

การจำลองกระบวนการออกแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็น



นาย ณัฐพล วัชรประไพพันธ์

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELLING BATCH ANNEALING PROCESS IN  
COLD ROLLED STEEL SHEET INDUSTRY

Mr. Nattapon Watcharaprapaipun



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองกระบวนการอบอุ่นแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็ก  
แผ่นรีดเย็น

โดย

นายณัฐพล วัชรประไพพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

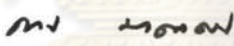
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรธร มงคลศรี)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. กษิติศ นนุทอง)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

ณัฐพล วัชรประไพพันธ์: การจำลองกระบวนการอบอ่อนแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็น. (MODELLING BATCH ANNEALING PROCESS IN COLD ROLLED STEEL SHEET INDUSTRY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, 231 หน้า.

กระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการผลิตเหล็กแผ่นม้วนกลมซึ่งเป็นกระบวนการที่ช่วยลดความเค้นตกค้างภายในและช่วยปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเหล็ก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อนในเตาอบอ่อนแบบกะ เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแผ่นเหล็กม้วนกลมแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบอ่อนแบบกะได้ดีและเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ปรากฏว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายพฤติกรรมของอุณหภูมิได้ดีกว่าแบบจำลองจากงานวิจัยก่อนหน้า โดยมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง จากนั้นได้ศึกษาจำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ เมื่อจำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมภายในเตาอบอ่อนแบบกะมีจำนวนลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ทำนายได้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิมมากขึ้น นอกจากนี้ได้ออกแบบการปรับอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่เตาเผา เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ เมื่อเวลาที่แช่แช่ (soaking time) มีค่าสูงขึ้น จะสามารถลดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็นได้ และยังสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อน ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณการใช้ของก๊าซไฮโดรเจน และการใช้พลังงานมีค่าลดลง

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ณัฐพล วัชรประไพพันธ์.....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....สุรเทพ.....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....กอบบุญ หล่อทองคำ.....



## 5170563021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : COLD-ROLLED STEEL COIL/ ANNEALING PROCESS/ BATCH ANNEALING FURNACE/ HEAT TRANSFER/ TEMPERATURE DISTRIBUTION/ FINITE ELEMENT METHOD

NATTAPON WATCHARAPRAPAI PUN: MODELLING BATCH ANNEALING PROCESS IN COLD ROLLED STEEL SHEET INDUSTRY. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.Ing., 231 pp.

The annealing process is the most important step in the cold rolled steel sheet production. It removes the internal stress and at the same time improves the mechanical properties of the rolled steel sheet. In this work, new mathematical model is proposed and validated with the real industrial operating data. The predicted value is compared with the value from the existing model. The results show that the predicted value from the developed model exhibits more consistent than the value predicted from the existing model. The number of cold rolled steel sheet effect on temperature distribution. It was found that the lower number of cold rolled steel sheet lead to larger temperature deviation. The simulation is performed using commercial software to study and analyze the temperature distribution during the annealing process. Results obtained show that the increasing of soaking time decreases the temperature difference between hot and cold point. Finally, the heating schedule is designed in order to improve the performances of the annealing process. The heating schedule designed by the developed model results in more uniform temperature distribution than the heating schedule designed by the existing model. Moreover, it can reduce the temperature required for annealing process resulting in reduction of energy consumption.

Department : .....	Chemical Engineering .....	Student's Signature	<i>Nattapon Watcharaprapai pun</i>
Field of Study : .....	Chemical Engineering .....	Advisor's Signature	<i>Soorathep Khawhom</i>
Academic Year : .....	2009 .....	Co-Advisor's Signature	<i>Govon Lothongkum</i>

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการอบรมสั่งสอนการปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทางในพัฒนางานวิจัยและความช่วยเหลือในอีกหลาย ๆ ด้านมาตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม, รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช มงคลศรี ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.กษิติศ หนูทองและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาฯ 72 พรรษา จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด คุณศราวดี ทองเสม ผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ และคุณบันเทิง ร่อนแก้ว หัวหน้างานส่วนประกันคุณภาพ สำหรับคำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานภายในบริษัทเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่และน้อง ๆ สำหรับความช่วยเหลือหลาย ๆ ด้านและให้กำลังใจในการทำวิจัยด้วยดี

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ผ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 เทคโนโลยีการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า.....	8
3.2 เหล็กกล้า.....	14
3.3 คุณสมบัติของธาตุต่างๆ.....	20
3.4 Heat treatment of steel.....	23
3.5 Heat Transfer.....	28
3.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม.....	33
4. กระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	38
4.1 ส่วนประกอบหลักของเตาอบอ่อนแบบกะ.....	38
4.2 หลักการทำงานของเตาอบอ่อนแบบกะ.....	40
5. กระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	46
5.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	46
6. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	50

บทที่	52
6.1 ผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม.....	52
6.2 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม.....	72
6.3 จำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก.....	92
6.4 ออกแบบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	94
7. สรุปผลการวิจัย.....	111
7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัต.....	111
7.2 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม.....	111
7.3 จำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก.....	111
7.4 ออกแบบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	112
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	122
ภาคผนวก ค.....	132
ภาคผนวก ง.....	226
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	231



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมและอุณหภูมิโดยทั่วไปของน้ำเหล็กที่เติมเข้าไปและน้ำเหล็กกล้าที่เทออกมา.....	9
6.1	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A.....	50
6.2	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B.....	51
6.3	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C.....	51
6.4	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D.....	51
6.5	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A โดยที่จำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมในระบบต่างกัน.....	92
6.6	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B โดยที่จำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมในระบบต่างกัน.....	93
6.7	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลอง [6].....	102
6.8	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	108
6.9	สรุปความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลอง[6],แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและอุณหภูมิที่ได้ตรวจวัดจริง.....	109
ก-1	ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A.....	116
ก-2	ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B.....	117
ก-3	ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C.....	118
ก-4	ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D.....	119
ก-5	ค่าความจุความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A, B, C และ D.....	120
ก-6	ค่าคุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน.....	121
ก-7	ค่าคงที่ต่างๆ.....	121
ข-1	อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A.....	122
ข-2	อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B.....	124
ข-3	อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C.....	127













	แผ่นม้วนกลม code D ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	209
ค-76	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code D ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	210
ค-77	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6].....	211
ค-78	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6] .....	212
ค-79	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6] .....	213
ค-80	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6] .....	214
ค-81	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6] .....	216
ค-82	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6] .....	218
ค-83	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6] .....	220
ค-84	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6] .....	221
ค-85	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6] .....	222
ค-86	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6] .....	223
ค-87	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6] .....	224
ค-88	รูปแบบการขอรับของอุดหนุนของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็ก แผ่นม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6] .....	225
ง-1	ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน.....	227
ง-2	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า.....	230

## สารบัญรูปภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	แสดงผลกระทบที่เกิดกับโครงสร้างและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของ cold - worked metals [14] .....	28
3.2	การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากแผ่นเรียบ [12].....	31
3.3	การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [13].....	34
3.4	แผ่นโลหะที่ต้องการหาการกระจายของอุณหภูมิ [13].....	35
3.5	การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งแผ่นโลหะออกเป็นเอลิเมนต์ลักษณะต่างๆ [13].....	35
3.6	การวางตำแหน่งเอลิเมนต์ของเหล็กแผ่นม้วนกลม.....	37
4.1	ลักษณะทางกายภาพของเตาอบอ่อนแบบกะ.....	38
4.2	ลักษณะของ inner-cover.....	39
4.3	ลักษณะของ พัดลม.....	39
4.4	ลักษณะของ convector.....	40
4.5	การถ่ายเทความร้อนภายใน เตาอบอ่อนแบบกะ [5].....	41
4.6	ตำแหน่งจุดเย็นที่ และจุดร้อนที่ ภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม.....	42
4.7	การเปรียบเทียบ Thermal Conductivity ของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจน [16].....	45
5.1	เหล็กแผ่นม้วนกลม (สองมิติสมมาตรตามแนวแกน r และ z).....	46
5.2	ทิศทางการไหลของก๊าซไฮโดรเจนภายในเตาอบอ่อนแบบกะ.....	47
6.1	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง.....	52
6.2	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง.....	52
6.3	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14	

	ชั่วโมง.....	53
6.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง.....	53
6.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง.....	54
6.6	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง.....	54
6.7	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง.....	55
6.8	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง.	55
6.9	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 14.5 ชั่วโมง (all position).....	56
6.10	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง.....	57
6.11	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง.....	57
6.12	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง.....	58
6.13	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลมในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง.....	58
6.14	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง.....	59

6.15	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง.....	59
6.16	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง.....	60
6.17	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง.....	60
6.18	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 28.5 ชั่วโมง (all position).....	61
6.19	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง.....	62
6.20	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง.....	62
6.21	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง.....	63
6.22	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง.....	63
6.23	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง.....	64
6.24	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง.....	64
6.25	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการ	



	ให้ความร้อน (top), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง..	65
6.26	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง.....	65
6.27	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 32.5 ชั่วโมง (all position).....	66
6.28	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง.....	67
6.29	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง.....	67
6.30	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง.....	68
6.31	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง.....	68
6.32	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง.....	69
6.33	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง.....	69
6.34	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง.....	70
6.35	การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง.....	70







	พัฒนาขึ้น และคุณหมุมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 (code D).....	90
6.67	เปรียบเทียบคุณหมุมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง คุณหมุมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และคุณหมุมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 (code D).....	90
6.68	เปรียบเทียบคุณหมุมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง คุณหมุมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และคุณหมุมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 (code D).....	91
6.69	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแตกต่างของคุณหมุมิกับจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ที่อบในกระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	93
6.70	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแตกต่างของคุณหมุมิกับจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ที่อบในกระบวนการอบอ่อนแบบกะ.....	94
6.71	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6] .....	97
6.72	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code B) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6] .....	98
6.73	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code C) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6] .....	100
6.74	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6] .....	101
6.75	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	103
6.76	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code B) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	105
6.77	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code C) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	106
6.78	รูปแบบการอบอ่อนของคุณหมุมิของก๊าซไฮโดรเจน (code D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	108



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## NOMENCLATURE

$C_p$	ค่าความจุความร้อน (J/kg·K)
$k$	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)
$P$	ความดัน (KPa)
$q$	พลังงานความร้อน
$R$	รัศมี
$T$	อุณหภูมิ (K)
$t$	ความหนา (mm)
$V$	ความเร็ว (m/s)

## Greek Symbols

$\varepsilon$	ค่าการแผ่รังสีความร้อน
$\rho$	ความหนาแน่นของ (kg/m <sup>3</sup> )
$\theta$	แนวแกน $\theta$

## Subscript

c	เหล็กหล่อ
cnd	การนำความร้อน
cnv	การพาความร้อน
h	ก๊าซไฮโดรเจน
i	พื้นที่ผิวเหล็กแผ่นมวลกลมภายใน
o	พื้นที่ผิวเหล็กแผ่นมวลกลมภายนอก
s	เหล็กแผ่นมวลกลม
r	แนวแกนรัศมี
rad	การแผ่รังสีความร้อน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานซึ่งเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อาหารกระป๋อง เครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น โดยในการผลิตเหล็กแผ่นม้วนกลมนั้น กระบวนการอบอ่อนมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อลดความเค้นในเนื้อเหล็ก โดยในการอบอ่อนจะใช้กระบวนการทางความร้อนมาช่วยทำให้เหล็กนั้นเปลี่ยนสมบัติและอ่อนลง ทำให้สามารถขึ้นรูปต่อไปได้ ซึ่งกลไกการอบอ่อนนั้นประกอบด้วยกระบวนการการจืดเรียงตัวใหม่ การเกิดผลึกใหม่ และการโตขึ้นของขนาดเกรนในเนื้อเหล็ก ในขั้นตอนการอบอ่อนนี้จะดำเนินการโดยใช้เตาอบอ่อน ซึ่งมีทั้งที่ดำเนินการแบบกะและดำเนินการแบบต่อเนื่อง แต่ในงานวิจัยนี้จะสนใจเตาอบอ่อนแบบกะ

ปัญหาที่พบในกระบวนการอบอ่อนกะนั้นคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแผ่นเหล็กม้วนกลม และปัญหาทางด้านมลพิษที่ปล่อยออกมาจากเตา แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบอ่อนคือ การสร้างแบบจำลองกระบวนการเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม การกระจายตัวของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบอ่อนแบบกะ และหาสภาวะที่ดีที่สุดในการทำงาน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ
- 2) เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเหล็กม้วนกลมโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองจากงานวิจัยก่อนหน้า และข้อมูลที่ได้จากการวัด
- 3) เพื่อศึกษาจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมในเตาอบอ่อนแบบกะที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ
- 4) เพื่อออกแบบค่าอุณหภูมิในการดำเนินการของเตาอบอ่อนแบบกะในช่วงการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของเตาอบอ่อนแบบกะ
- 2) เหล็กที่ใช้ศึกษาคือ แผ่นเหล็กม้วนกลม
- 3) ภายในเตาอบอ่อนแบบกะจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวพาความร้อนไปยังเหล็กแผ่นม้วนกลม
- 4) เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนแก่เตาอบอ่อนคือ LPG
- 5) โปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองคือโปรแกรม Comsol Multiphysics

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมการอบอ่อนได้อย่างแม่นยำ
- 2) สภาวะที่ดีที่สุดในการดำเนินการกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

### 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการผลิตของโรงงาน
- 2) เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากโรงงานเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง
- 3) สร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิจัย โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.4
- 4) ประเมินและปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น
- 5) หาสภาวะในการดำเนินงานที่ดีที่สุดและพัฒนาปรับปรุงกระบวนการในการอบอ่อนให้ดีขึ้น
- 6) หาแนวทางในการนำกระบวนการที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน
- 7) เขียนรายงานผลการวิเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ที่เป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญ สำหรับการศึกษาดุษฎีและแนวทางในการวิจัย โดยงานวิจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้คือ

ในปี 2002 Sahay และ Kumar [1] ได้ทำการศึกษากการกระจายตัวของอุณหภูมิ, การจัดเรียงตัวของผลึก (Microstructure) และคุณสมบัติทางกลของเหล็กระหว่างกระบวนการอบอ่อนแบบกะโดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้คือ

$$\rho_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T_m}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_m}{\partial z})$$

โดยที่  $\rho_m$  คือ ความหนาแน่น,  $T_m$  คือ อุณหภูมิ,  $C_m$  คือ ค่าความจุความร้อน,  $K_z$  และ  $K_r$  คือ ค่าการนำความร้อนในแนวแกน Z และค่าการนำความร้อนในแนวรัศมีของเหล็กโดยมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

สำหรับ;  $t = 0$

$$T_s(r,z) = T_{amb}$$

สำหรับ;  $t > 0$

$$k_r \frac{\partial T_m}{\partial r} = h_o(T_m - T_{go}) + \varepsilon_m F \sigma(T_m^4 - T_c^4) \quad \text{at } r = D_o/2$$

$$-k_r \frac{\partial T_m}{\partial r} = h_i(T_m - T_{go}) \quad \text{at } r = D_i/2$$

$$k_z \frac{\partial T_m}{\partial z} = h_{t/b}(T_m - T_{t/b}) \quad \text{at } z = z_{max}, z = z_0$$

โดยที่  $\varepsilon$  และ  $\sigma$  คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อน และการดูดกลืน,  $F$  คือ ปัจจัยด้านรูปร่าง (shape factor),  $T_{go}$ ,  $T_{gi}$ ,  $T_{tb}$  และ  $T_c$  คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งผิวด้านนอก ผิวด้านใน ผิวด้านบนและด้านล่าง และอุณหภูมิของ cover ตามลำดับ และ  $h_o$ ,  $h_i$  และ  $h_{t/b}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในตำแหน่งผิวด้านนอก ผิวด้านใน ผิวด้านบนและด้านล่างตามลำดับ

โดยได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากโรงงาน พบว่าในกระบวนการให้ความร้อน (heating) อุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริงจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการทำนาย และบริเวณจุดร้อน (hot point) ของเหล็กแผ่นม้วนกลมจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณจุดเย็น (cold point) ซึ่งเมื่อระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อนดำเนินไป อุณหภูมิที่จุดร้อนและจุดเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ควบคุมและในกระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะลดต่ำลง โดยพื้นผิวภายนอกจะมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่า เมื่อระยะเวลาดำเนินไป ความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อน

และจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลมก็จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นพบว่าเวลาในการแช่ (soaking time) จะมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กคือ เมื่อเวลาแช่นานขึ้นก็จะมีผลต่อการเกิดผลึก แต่จุดคราก (yield strength) และความต้านทานแรงดึงวิกฤติ (ultimate tensile strength) จะลดลง

ในปี 2003 Zhang และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง ค่าความเค้นอัด (compressive stress) ค่าความต้านทานของอุณหภูมิ ( $R_{CT}$ ,  $R_S$ ,  $R_R$ ,  $R_C$  และ  $R_G$ ) และอุณหภูมิ, และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของแผ่นเหล็กม้วนกลมในแนวแกนรัศมี นอกจากนั้นยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบริเวณขอบผิวและแกนกลางของเหล็กแผ่นม้วนกลมและเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

โดยในแนวแกนรัศมีจะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ 4 แบบคือ 1. การนำความร้อนของเหล็ก 2. การนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน 3. การนำความร้อนบริเวณผิวสัมผัส และ 4. การแผ่รังสีความร้อน เมื่อค่าความเค้นอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานบริเวณขอบ ( $R_{CT}$ ) จะมีค่าลดลง โดยที่ค่าความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นเหล็ก ( $R_S$ ) จะมีค่าคงที่และ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่า  $R_S$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า  $R_{CT}$  จะมีค่าลดลง, ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณขอบจะขึ้นกับค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนโดยค่ายังผลการนำความร้อนในแนวรัศมี (radial effective thermal conduction) จะเพิ่มขึ้นตามค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน, ค่ายังผลการนำความร้อนในแนวรัศมีของก๊าซไฮโดรเจนจะสูงกว่าก๊าซไนโตรเจน และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและ ในช่วงของการให้ความร้อน อุณหภูมิบริเวณขอบผิวจะมีค่าสูงกว่าบริเวณแกนกลาง ในส่วนของการให้ความเย็นพื้นที่บริเวณแกนกลางจะมีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าบริเวณขอบผิว

ในปี 2007 Chen และ Gu [3] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นในเหล็กแผ่นม้วนกลม และศึกษาอิทธิพลที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนเช่น ค่าการนำความร้อนในแนวแกนรัศมี เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และความกว้างของเหล็กแผ่นม้วนกลม ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z})$$



โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่น,  $T$  คือ อุณหภูมิ,  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อน,  $K_z$  และ  $K_r$  คือ ค่าการนำความร้อนในแนวแกน  $Z$  และค่าการนำความร้อนในแนวรัศมีของเหล็ก โดยมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$\text{สำหรับ; } t = 0 \quad T_s(r, z) = T_0 \quad R_i \leq r \leq R_o$$

$$\text{สำหรับ; } R = R_o, \quad -k_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_{RO}(T - T_g)$$

$$R = R_i, \quad -k_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_{RI}(T - T_g)$$

$$Z = 0, \quad -k_z \frac{\partial T}{\partial Z} = h_{zo}(T - T_g)$$

$$Z = Z_c, \quad -k_z \frac{\partial T}{\partial Z} = h_{zh}(T - T_g)$$

โดยที่  $T$  และ  $T_g$  คืออุณหภูมิของแผ่นเหล็กและอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนตามลำดับ และ  $h_{RO}$ ,  $h_{RI}$ ,  $h_{zh}$  และ  $h_{zo}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในตำแหน่งผิวด้านนอก ผิวด้านใน ผิวด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ

โดยในกระบวนการให้ความร้อนอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดเย็นจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดร้อน แต่ในกระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิในตำแหน่งจุดเย็นจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าในตำแหน่งจุดร้อน ค่าการนำความร้อนในแกนรัศมีมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อนคือ เมื่อค่าการนำความร้อนในแกนรัศมีเพิ่มขึ้นจะใช้ระยะเวลาในการอบอ่อนน้อยลง และค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกกับความกว้างของเหล็กแผ่นม้วนกลม จะแปรผันตรงกับระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อนคือ เมื่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและความกว้างของเหล็กแผ่นม้วนกลมเพิ่มขึ้นจะใช้ระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อนเพิ่มขึ้นและในปีเดียวกัน Kim [4] ได้เสนอแบบจำลองของเตาอบแบบวอล์กิงบีม (walking beam type reheating furnace) ซึ่งจะแบ่งโซนต่างๆ ในการให้ความร้อน เป็น 5 โซน ได้แก่ non-firing, charging, preheating, heating, soaking zone ซึ่งในแต่ละโซนเตาเผาจะให้พลังงานความร้อนแก่แผ่นเหล็กที่ต่างกัน ทำให้มีผลต่อปัจจัยต่างๆ และได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแผ่นเหล็ก การกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อนในแนวรัศมี (radiative heat flux) และการกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นเหล็ก ภายในเตาอบแบบวอล์กิงบีม ปรากฏว่าในช่วงบริเวณโซนการให้ความร้อนอุณหภูมิภายในแผ่นเหล็ก การกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อนในแนวรัศมี และการกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นเหล็กจะมีค่าสูงกว่าบริเวณโซนอื่น

ต่อมาในปี 2008 Saboonchi และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบอ่อน ลดระยะเวลาในการให้ความร้อน ลดปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ ลด

ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน และลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยได้หารูปแบบในการให้ความร้อนแบบต่างๆ เพื่อที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการอบอ่อน ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

โดยที่มีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$\text{สำหรับ; } r = R_0, \quad k_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_{cnv}(V_{gas}, T_{gas}, T_{surf}) + q_{rad}(T_{surf}, T_{wall})$$

$$R = R_i, \quad k_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_{cnv}(V_{gas}, T_{gas}, T_{surf})$$

$$Z = 0, L \quad k_z \frac{\partial T}{\partial z} = q_{cnv}(V_{gas}, T_{gas}, T_{surf}) + q_{rad}(T_{convector}, T_{surf}) + q_{cnd}(T_{convector}, T_{surf})$$

โดยที่  $q_{cnv}$ ,  $q_{rad}$  และ  $q_{cnd}$  คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อน จากผลการทดลองมีผลทำให้ลดพลังงานที่ใช้ ลดเวลาในการให้ความร้อน ลดค่าใช้จ่ายทางด้านค่าเชื้อเพลิง (natural gas) และก๊าซไฮโดรเจน และ ลดการใช้พลังงานทางไฟฟ้า ซึ่งในปีเดียวกัน Saboonchi และ Hassanpour [6] ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิ ตำแหน่งต่างๆ และการกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กม้วนกลมในกระบวนการอบอ่อน และ ศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กม้วนกลม ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

โดยที่มีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$\text{สำหรับ; } r = R_0, \quad k_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_{Ro,cnv}(T_{gas} - T_{surf}) + h_{Ro,rad}(T_{wall} - T_{surf})$$

$$R = R_i, \quad k_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_{Ri,cnv}(T_{gas} - T_{surf})$$

$$Z = 0, L \quad k_z \frac{\partial T}{\partial z} = C[h_{0,L,cnv}(T_{gas} - T_{surf}) + h_{0,L,rad}(T_{convector} - T_{surf})]$$

โดยที่  $h_{Ro,cnv}$  และ  $h_{Ro,rad}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ในตำแหน่งรัศมีด้านนอกสุดของเหล็กแผ่นม้วนกลม,  $h_{Ri,cnv}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน ในตำแหน่งรัศมีด้านในสุดของเหล็กแผ่นม้วนกลม,  $h_{0,L,cnv}$  และ  $h_{0,L,rad}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของเหล็กแผ่นม้วนกลม

ซึ่งตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับผิวด้านนอกของเหล็กม้วนกลมจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า ตำแหน่งกึ่งกลางของเหล็กม้วนกลมเมื่อเทียบเวลาในการอบอ่อนที่เวลาเดียวกัน ตำแหน่งและจำนวนของเหล็กม้วนกลมที่อยู่ในเตาอบอ่อนแบบกะก็มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งต่างๆ ด้วย และเมื่อลดความหนาของเหล็กม้วนกลมลง จะทำให้การให้อัตราการให้ความร้อนช้าลง และมีผลทำให้ต้องยืดเวลาในกระบวนการอบอ่อนยาวนานขึ้น ซึ่ง Saboonchi และ Hassanpour [7] ได้ทำการศึกษาเวลาในการให้ความเย็น (cooling) โดยใช้วิธีการลดอุณหภูมิแบบต่างๆ ดังนี้คือการลดอุณหภูมิโดยใช้อากาศ การลดอุณหภูมิโดยจุ่มน้ำทั้งหมด การลดอุณหภูมิโดยจุ่มน้ำบางครั้ง และการลดอุณหภูมิโดยการพ่นน้ำ โดยในการลดอุณหภูมิโดยจุ่มน้ำทั้งหมดจะใช้เวลาในการให้ความเย็นน้อยกว่าการลดอุณหภูมิโดยใช้อากาศ ซึ่งปัจจัยรูปร่างสูงๆ จะช่วยลดระยะเวลาในการให้ความเย็นได้ วิธีการลดอุณหภูมิโดยจุ่มน้ำบางครั้งจะใช้เวลาในการจุ่มน้ำก่อน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิโดยใช้อากาศ โดยการจุ่มน้ำจะมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการให้ลดอุณหภูมิมากกว่า ส่วนการลดอุณหภูมิโดยการพ่นน้ำนั้นบริเวณตำแหน่งพื้นที่ภายนอกจะใช้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมินานกว่าที่ตำแหน่งด้านข้างด้านบนและภายในตามลำดับ และในปีเดียวกัน Saboonchi และ Hassanpour [8] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงของการให้ความร้อน และการให้ความเย็นของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเวียนและปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน ที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนและให้ความเย็น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเวียนและปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน จะช่วยลดเวลาในการให้ความร้อนและให้ความเย็นของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ และผลต่างของอุณหภูมิบริเวณ จุดร้อน และ จุดเย็น จะมีค่าลดลง

ซึ่งในงานวิจัยที่ได้ศึกษาเหล่านี้ จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการอบอ่อนแบบกะ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองการนำความร้อน ซึ่งจะมีขอบเขตเงื่อนไขแตกต่างกันไป โดยงานวิจัยเหล่านี้ ได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อนเช่น ความกว้าง ความหนา และค่าการนำความร้อนในแนวรัศมี และศึกษาวิธีการที่ช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการอบอ่อน ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดปริมาณแก๊สแอลพีจี ก๊าซไฮโดรเจนและ พลังงานการใช้ไฟฟ้าอีกด้วย

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 เทคโนโลยีการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

การผลิตเหล็กและเหล็กกล้านั้นมีความเกี่ยวข้องกับขั้นตอนหลายขั้นตอนตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบต่างๆ จนถึงขั้นได้มาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้า ซึ่งมีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้คือ

- (1) การถลุงหรือการผลิตเหล็ก (Iron making)
- (2) การผลิตเหล็กกล้า (Steel making)
- (3) การหล่อผลิตภัณฑ์ที่กึ่งสำเร็จรูป (Casting)
- (4) กระบวนการรีดร้อน (Hot Rolling)
- (5) กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยกรดและกระบวนการรีดเย็น (Couple Pickling and Cold mill)
- (6) กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic Cleaning)
- (7) กระบวนการอบอ่อน (Annealing)
- (8) กระบวนการรีดซ้ำ (Temper Rolling)
- (9) กระบวนการปรับแต่งตามข้อกำหนดของลูกค้ (Recoiling)
- (10) การทดสอบและการตรวจสอบคุณภาพ (Tests and Inspections)

##### 3.1.1 การถลุงหรือการผลิตเหล็ก (Iron making)

แร่เหล็ก, ถ่านโค้ก และปูนขาวเป็นวัตถุดิบที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาถลุงแบบพ่นลม (Blast Furnace) เพื่อผลิตน้ำเหล็กหลอมเหลว (Hot metal หรือ Liquid pig iron) เหล็กที่ผลิตได้จากเตาถลุงพ่นลมประกอบไปด้วยคาร์บอน (~4.5%) และสารมลทินต่างๆ ซึ่งทำให้โลหะมีความเปราะมากเกินไปที่จะนำมาใช้ในงานต่างๆทางด้านวิศวกรรม

##### 3.1.2 การผลิตเหล็กกล้า (Steel making)

การผลิตเหล็กกล้า (Steelmaking) จะแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- (1) ขั้นปฐมภูมิ (Primary) หรือขั้นการหลอม

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาออกซิเจน (basic oxygen furnace) เป็นการนำน้ำโลหะที่ได้จากเตาถลุงมาผสมกับเศษเหล็กกล้าและลดปริมาณคาร์บอนให้เหลือ 0-1.5% โดยการเป่าออกซิเจนผ่านโลหะในเตาคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้กลายเป็นน้ำเหล็กกล้า

จุดประสงค์ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาออกซิเจน (basic oxygen furnace) คือการปรับสภาพน้ำเหล็ก (Liquid pig iron หรือ Hot metal) ที่ผลิตจากเตาถลุงพ่นลม (Blast furnace) ให้กลายเป็นน้ำเหล็กกล้าดิบ (Raw liquid steel) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนที่สองคือการปรุ้งน้ำเหล็ก หน้าที่หลักของเตาออกซิเจน (basic oxygen furnace) คือ การกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสจากน้ำเหล็ก และรักษาอุณหภูมิของเหล็กกล้าไม่ให้สูงหรือต่ำเกินไป เพื่อที่จะให้การปรุ้งน้ำเหล็กในขั้นถัดไปไม่ต้องเพิ่มความร้อนมากเกินไปหรือรอให้เย็นนานเกินไป ปฏิกิริยาคายความร้อนออกซิเดชันซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอน basic oxygen furnace ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนปริมาณมากและมากกว่าที่จำเป็นต้องใช้ในการหลอมเหล็ก ความร้อนที่เกินมานี้จะถูกใช้เพื่อหลอมเศษเหล็กและแร่เหล็กที่เติมเข้ามา ส่วนผสมและอุณหภูมิโดยทั่วไปของน้ำเหล็กที่เติมเข้าไปและน้ำเหล็กกล้าที่เทออกมาแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอุณหภูมิโดยทั่วไปของน้ำเหล็กที่เติมเข้าไปและน้ำเหล็กกล้าที่เทออกมา

	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% O	อุณหภูมิ (°C)
น้ำเหล็ก (เข้า)	4.7	0.2-0.3	0.2-1.5	0.06-0.12	0.02	0.0	1,350-1,400
น้ำเหล็กกล้า (ออก)	0.05	0.1	0.0	0.01-0.02	0.01-0.02	0.06	1,620-1,720

ขั้นตอนการทำงานของเตาออกซิเจน ได้แก่

- (1) เติมเศษเหล็ก 30 - 35 % (อาจใส่เศษเหล็กหล่อประมาณ 10%) ใช้เวลาเติม 2-3 นาที
- (2) เทน้ำเหล็ก 65-90 % เข้าหลังจากที่ได้กวาดตะกรันจากการหลอมครั้งก่อนออก เพราะมีซิลิเฟอรัตกค้างอยู่
- (3) เป่าออกซิเจน, ใส่ CaO และ CaF<sub>2</sub>
- (4) หยุดออกซิเดชันหรือหยุดเป่า แล้วนำตัวอย่างน้ำเหล็กไปวิเคราะห์อุณหภูมิและปริมาณคาร์บอน
- (5) เทน้ำเหล็กกล้าออก



## (2) ขั้นทุติยภูมิ (Secondary) หรือขั้นการป้อนน้ำเหล็กกล้า

การผลิตเหล็กกล้าในขั้นทุติยภูมิคือการป้อนน้ำเหล็กน้ำเหล็กด้วยเทคนิคทางโลหวิทยา เป็นขั้นตอนสำคัญที่อยู่ระหว่างขั้นตอนที่หนึ่ง (basic oxygen furnace /Electric arc furnace) กับขั้นตอนการหล่อ (Casting) โดยนับเวลาตั้งแต่เริ่มเท (Tapping) น้ำเหล็กกล้าจนถึงเริ่มต้นการหล่อ ธาตุบางชนิดจะถูกเติมลงไปและธาตุบางชนิดจะถูกกำจัดออกมาในขั้นการป้อนน้ำเหล็กนี้เพื่อเป็นการปรับส่วนผสมของเหล็กกล้าให้ตรงกับสเปคและความต้องการของลูกค้า ในสมัยก่อนขั้นตอนนี้ เป็นกระบวนการที่ลดเพียง C, H และ S เท่านั้น แต่สมัยใหม่ครอบคลุมถึงธาตุตัวอื่นๆด้วย เช่น P, Si, N, Al ฯลฯ ซึ่งขึ้นอยู่กับเกรดเหล็กที่จะผลิตกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ Ladle metallurgy ได้แก่

(1) การปรับส่วนผสมของน้ำเหล็ก โดยเติมธาตุที่ต้องการและกำจัดธาตุที่ไม่ต้องการ

(2) การกำจัดออกซิเจนในน้ำเหล็ก (Deoxidation)

(3) การกำจัดก๊าซ (Degassing) เช่น ก๊าซไฮโดรเจน

(4) การกำจัดซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสในน้ำเหล็ก

(5) การทำความสะอาดระดับจุลภาค (Microcleanliness) โดยการกำจัดธาตุโลหะ (nonmetallic) ที่ไม่ต้องการ

(6) การควบคุมรูปร่างสิ่งเจือปน (Inclusion) โดยการเปลี่ยนส่วนผสมของสารมลทินที่ตกค้างเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า

(7) การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า เช่น เพิ่มความแกร่ง (Toughness), ความเหนียว (Ductility), และคุณสมบัติในแนวตามขวาง (Transverse)

(8) การกวนน้ำเหล็กกล้าหลอมเหลวในเตา

(9) การเพิ่มอุณหภูมิด้วยวิธีต่างๆ เช่น อาร์คด้วยไฟฟ้าและใช้ปฏิกิริยาทางเคมี

สิ่งที่ต้องควบคุมอย่างระมัดระวังในขั้นตอนนี้การป้อนน้ำเหล็กได้แก่ อุณหภูมิ, คุณภาพภายใน และปริมาณของสิ่งเจือปน (Inclusion) ที่อยู่ในเหล็กกล้า เตาหลายประเภทและอุปกรณ์ต่างๆได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์เหล่านี้ สิ่งเหล่านี้ก็จะมีบทบาทพิเศษต่างๆที่จะต้องทำขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของเหล็กกล้าแต่ละชนิดที่จะผลิตขึ้น หลังจากขั้นตอนการป้อนน้ำเหล็กเสร็จสิ้นแล้ว น้ำเหล็กกล้าที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติต่างๆคือ ส่วนผสม, คุณภาพ, ความสะอาด, เวลา, อุณหภูมิ ตามที่ต้องการและการใช้ต้นทุนให้น้อยที่สุดก่อนที่จะส่งไปยังกระบวนการหล่อ

ในกระบวนการป้อนน้ำเหล็ก อุปกรณ์ต่างๆที่ถูกลำเอียงนำมาใช้มีหน้าที่หลายอย่างได้แก่ การนำน้ำเหล็กกล้าผ่านระบบสุญญากาศ, การพ่นก๊าซอาร์กอน, การเติมโลหะหรือวัสดุอื่นๆ สำหรับกำจัดสารมลทิน, การให้ความร้อนหรือควบคุมอุณหภูมิ กระบวนการป้อนน้ำเหล็กมีความ

เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หรือเทคนิคต่างๆที่จะเสนอต่อไปนี้ ซึ่งการเลือกใช้เทคนิคต่างๆในโรงผลิตเหล็กกล้าแต่ละแห่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของเหล็กกล้าที่ผลิตและเนื้อที่ที่มีอยู่ในโรงงาน

### 3.1.3 การหล่อผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Casting)

หลังจากผ่านขั้นตอนการป้อนน้ำเหล็กมาแล้ว น้ำเหล็กกล้าก็มักจะถูกนำมาสู่ขั้นตอนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting) ผ่านทางบ่อพัก (Tundish) และผ่านต่อไปในแบบหล่อ (Mold) ทองแดงที่หล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อทำให้เกิดการเริ่มแข็งตัวเป็นเปลือกบางๆ แถง strand ของเหล็กกล้าที่หล่อออกมาจะถูกดึงผ่านชุดลูกรีดและถูกลดความร้อนด้วยการพ่นสเปร์ยน้ำ เปลือกชั้นนอกที่เริ่มแข็งตัวจะเพิ่มความหนาขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง strand แข็งตัวทั้งหมด ชั้นสุดท้าย strand จะถูกตัดเป็นท่อนๆตามความยาวที่ต้องการและจะถูกนำไปเก็บหรือส่งต่อไปยังโรงรีด strand ที่หล่อออกมาจะมีรูปทรงต่างๆกันไปขึ้นอยู่กับการใช้งานในขั้นตอนสุดท้าย โดยจะถูกหล่อออกมาเป็นเหล็กแท่งแบน (Slabs) สำหรับการนำไปรีดเป็นเหล็กแผ่น (Plate) หรือเหล็กแผ่นบาง (Strip), เหล็กแท่งใหญ่ (Blooms) สำหรับนำไปผลิตเป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (Section), เหล็กแท่งเล็ก (Billets) สำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์ทรงยาวเช่นเหล็กหลอด

การหล่อแบบต่อเนื่องช่วยลดขั้นตอนที่ใช้ในการผลิตสมัยก่อนออกไป เช่น การหล่อให้เป็นเหล็กแท่งจำนวนมาก และแกะแม่พิมพ์เพื่อเอาเหล็กแท่งออก การให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งอีกครั้ง และการทำการรีดร้อนขึ้นต้นเพื่อเปลี่ยนรูปทรงให้อยู่ในสภาพกึ่งสำเร็จรูป กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องนี้จะให้ค่า yields, คุณภาพ, และศักยภาพในการผลิต (Productivity) ที่สูงกว่าการหล่อแบบแท่ง และนอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพทางพลังงานที่สูงกว่าด้วย

ในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง เหล็กกล้าหลอมเหลวจะถูกส่งมาจาก Ladle และเทลงในบ่อพักหรือ Tundish ซึ่งจะปล่อยน้ำเหล็กต่อไปสู่แบบหล่ออันเดียวในกรณีใช้เครื่องหล่อแบบ single-strand หรืออาจจะส่งไปยังหลายๆแบบหล่อในกรณีใช้เครื่องหล่อแบบ multi-strand เหล็กกล้าหลอมจะเย็นตัวเมื่อผ่านแบบหล่อและเกิดเปลือกของแข็งที่ชั้นนอก (Outer shell) หรือผิวนอก (Skin) ในขณะที่เหล็กกล้าเคลื่อนที่ผ่านไปยัง Runout table บริเวณแกนกลางของแท่งเหล็กกล้าก็เกิดการแข็งตัวด้วย ทำให้เกิดเป็นรูปทรงกึ่งสำเร็จรูปตามความกว้างและความหนาที่ต้องการ

### 3.1.4 กระบวนการรีดร้อน (Hot Rolling)

การรีดร้อนเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปขั้นปฐมภูมิ (Primary forming) หน้าที่หลักของการรีดร้อน คือ การกำจัด defect ในเนื้อแท่งหล่ออินกอท, การลดขนาดรูปทรง และการปรับคุณภาพผิวให้ได้ตามที่ต้องการ ค่าตัวแปรหลักที่ใช้วัดความสามารถของกระบวนการรีดในการกำจัด defect ในเนื้องานหล่อเรียกว่า rolling ratio ซึ่งถูก

คำนวณโดยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดก่อนการรีดต่อหลังการรีด ค่า rolling ratio ที่ถือว่าเป็นเหล็กที่มีคุณภาพดีขึ้นกับประเภทของเหล็กกล้า เช่น เหล็กก่อสร้างมีค่าประมาณ 2 แต่เหล็กกล้าเครื่องมือมีค่ามากถึง 12

ขั้นตอนแรกสุดของกระบวนการรีดร้อนทุกประเภท ได้แก่ การให้ความร้อนแก่แท่งเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงเหมาะแก่การขึ้นรูป ในระหว่างการให้ความร้อนและการขึ้นรูปร้อนนั้น สะเก็ดของชั้นผิวเหล็กออกไซด์ (Scale) จะก่อตัวขึ้นบนผิวของแท่งเหล็ก และจะต้องกำจัดออกอย่างมีระบบ การกำจัดสเกล (Descaling) สามารถทำได้ด้วย วิธีการทางกล (โดยบดละเอียดระหว่างการขึ้นรูปร้อน) หรือโดยการพ่นสเปรย์น้ำแรงดันสูง

ในระหว่างการรีด การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะเกิดขึ้นระหว่างแม่พิมพ์ (die) ที่อยู่ในสภาพลวกหรือมีแรงดันไปข้างหน้า กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อยู่กับที่ หมายความว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปทรงจะไม่มี การเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อเวลาผ่านไป แรงที่มีการส่งผ่านในระหว่างการรีดคือแรงเสียดทานระหว่างลูกรีดและวัสดุที่ถูกรีด

กระบวนการรีดร้อนมีหลายประเภท การคัดเลือกเทคนิคการรีดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์

สำหรับการควบคุมลักษณะต่างๆ (เช่น รูปทรง, ขนาด, และคุณภาพผิว) ให้ได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องอาศัยการทำ finishing และการทำกรรมวิธีทางความร้อน การทำ finishing ทั่วไปได้แก่ การทำให้เย็น (cooling), การทำให้ตรง (strengthening), การปรับขนาด (sizing), และการทำความสะอาดผิว ขั้นตอนต่อไปของกระบวนการได้แก่ การควบคุมคุณภาพ (ซึ่งสามารถทำได้ในระหว่างการขึ้นรูปร้อน), การ marking, การจัดเก็บเป็นกอง, และการจัดเตรียมสำหรับเก็บและขนส่ง บางครั้งเหล็กที่รีดร้อนจะถูกเคลือบผิวเพื่อเป็นการป้องกัน และเพื่อให้ดูสวยงาม

การรีดร้อนประกอบด้วยเทคโนโลยีการผลิตสำหรับทั้งผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปผลิตภัณฑ์เหล็กที่รีดร้อนก็สำเร็จรูปเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อนในขั้นต่อไป โดยสามารถจัดเป็นกลุ่มหลักๆ ได้แก่

- ผลิตภัณฑ์ทรงแบน
- ผลิตภัณฑ์ทรงยาว
- ท่อไร้ตะเข็บ
- ผลิตภัณฑ์พิเศษต่างๆ เช่น วงแหวน, เหล็กเส้นที่มีรูปทรงต่างๆ ฯลฯ

### 3.1.5 กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยกรดและกระบวนการรีดเย็น (Couple Pickling and Cold mill)

การรีดเย็นจะลดความหนาของเหล็กแผ่นบางรีดร้อนให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-2.2 มม. โรงรีดเย็นทั่วไปจะประกอบด้วยหลายส่วนได้แก่ กระบวนการกัดผิวแบบต่อเนื่อง (continuous pickling line), กระบวนการรีดเย็น, เตาอบอ่อน, กระบวนการอบ temper, การตรวจสอบคุณภาพ และกระบวนการปรับสภาพขั้นสุดท้าย

กระบวนการกัดผิว (pickling) มีหน้าที่กำจัดสะเก็ดเหล็กออกไซด์หรือ scale ที่เกิดจากกระบวนการรีดร้อนซึ่งเป็นตัวทำให้เกิด defect ที่ผิวงานรีดของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย กระบวนการกัดผิวจะทำเป็น line ต่อเนื่อง และประกอบไปด้วยการลำเลียงแผ่นเหล็กผ่าน เครื่องกำจัด scale และผ่านต่อไปยังถังบรรจุกรดซัลฟูริก, ไฮโดรคลอริก, หรือไนตริกผสมไฮโดรฟลูออริก หลังจากนั้นแผ่นเหล็กจะถูกส่งต่อไปล้างทำความสะอาด (rinse), ทำให้แห้ง, ปรับสภาพให้เรียบ (trimmed) และส่งผ่านกระบวนการเคลือบน้ำมันด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatically oiled) เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานที่เหมาะสมในระหว่างการรีด

การรีดเย็นจะใช้เครื่องรีดที่มีแท่นรีด 4 หรือ 5 แท่นเรียงติดกัน หรือใช้เครื่องรีดแท่นเดี่ยวแบบ multi-roll (เช่น แบบ six-high, twelve-high, หรือ twenty-high) แผ่นเหล็กรีดเย็นที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากการขึ้นรูปจะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการอบอ่อน

### 3.1.6 กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic Cleaning)

โดยเหล็กที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น จะเข้ามายังกระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยจุดประสงค์ก็คือ กำจัดน้ำมันที่เคลือบไว้ออกไปก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน

### 3.1.7 กระบวนการอบอ่อน (Annealing)

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) ช่วงของการให้ความร้อน (Heating) คือหลังจากที่ครอบ heating cover ลงไปแล้วมีการจุดไฟเพื่อให้ความร้อนแล้วทำให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ดังนั้นในการจัดการวางแผนในการใช้งาน heating cover และ inner-cover ขณะที่อุณหภูมิไม่ลดต่ำลงมามากจะเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากในช่วงจะเกิดการคืนตัวและการตกผลึกใหม่ขึ้นมา



(2) ช่วงของการปล่อยให้อุณหภูมิในเตากระจายให้ทั่ว (Soaking) ช่วงนี้หลังจากอุณหภูมิของเตาได้ตามต้องการแล้วจะมีการปล่อยให้ความร้อนกระจายทั่วเตา โดยการพาความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง ตอนนี้เป็นช่วงของการเจริญเติบโตของเกรนได้ดี ดังนั้นช่วงนี้จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิรวมทั้งพบว่าการก่อตัวจะดีถ้าหากอุณหภูมิสูงหรือระยะเวลาของการ soaking ยาวขึ้น

(3) ช่วงของการทำให้เย็นตัวลง (Cooling) หลังจากปล่อยให้ความร้อนกระจายทั่วแล้วจะมีการปล่อยให้เย็นลงโดยการเอา heating cover ออกรวมทั้งอาจใช้ลมหรือพ่นน้ำลงไปบน inner-cover อีกที เพื่อทำให้อุณหภูมิลด ช่วงนี้อุณหภูมิที่ลดจะไม่มีผลต่อโครงสร้างของเกรนโลหะโดยมากจะใช้เวลาประมาณ 35 ชั่วโมง

### 3.1.8 กระบวนการรีดซ้ำ (Temper Rolling)

เหล็กแผ่นบางที่ผ่านการอบอ่อนนี้จะค่อยๆถูก temper ในเครื่องรีดปรับผิว (skin pass) แบบ four-high ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การรีด temper จะช่วยเพิ่มความเรียบให้แก่แผ่นเหล็ก และช่วยป้องกัน yield-point elongation

### 3.1.9 กระบวนการปรับแต่งตามข้อกำหนดของลูกค้า (Recoiling)

จะเป็นกระบวนการที่ปรับแต่งสเปคต่างๆ ตามที่ลูกค้าต้องการ

### 3.1.10 การทดสอบและการตรวจสอบคุณภาพ (Tests and Inspections)

หลังผ่านการรีดปรับผิวเหล็กแผ่นบางรีดเย็นนี้จะถูกเขียนรหัสและนำไปตรวจสอบคุณภาพ โดยจะมีการป้องกันการเกิดสนิมด้วยการเคลือบน้ำมัน เหล็กแผ่นรีดเย็นอาจจะจัดส่งตามความต้องการของลูกค้าในรูปแบบต่างๆ เช่น ส่งเป็นม้วน, ตัดเป็นหน้าแคบ หรือตัดเป็นแผ่นๆตามความยาวที่กำหนด ต่อจากนั้นเหล็กแผ่นรีดเย็นนี้ สามารถนำไปเคลือบผิวเพื่อความทนทานหรือเพื่อความสวยงามได้

## 3.2 เหล็กกล้า

เหล็กกล้าได้มีการคิดค้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในหลายรูปแบบ ดังนั้นจึงมีการผลิตเหล็กกล้าออกมาหลายประเภทตามลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน อัตราส่วนผสม และปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนัก ถ้าพิจารณาจาก Iron-carbon Equilibrium Diagram แล้วจะเห็นว่าเหล็กกล้ามีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.008% - 2% โดยน้ำหนักแต่ในทางปฏิบัติแล้วเหล็กกล้าจะมีได้ไม่เกิน 1.7% ถ้ามีมากกว่านั้นจะขาดคุณสมบัติความแข็งแรงและความเหนียวไป หากยึดหลักตามอัตราส่วนผสมคาร์บอนและการใช้งานแล้วจะสามารถแบ่งประเภทเหล็กกล้าออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้



### (1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักโดยจะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 1.7% จะมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วยเช่น ซิลิคอน , ฟอสฟอรัส , กำมะถัน และ แมงกานีสซึ่งธาตุเหล่านี้มีปริมาณน้อยมาก จะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เริ่มการผลิตเหล็กจากสินแร่โดยกรรมวิธีการผลิตของเหล็กกล้าคาร์บอนได้แก่ กรรมวิธี LD , กรรมวิธีโม่ส , กรรมวิธีเตากระเพาะ และ กรรมวิธีเบสเซเมอร์ เหล็กชนิดนี้เป็นวัสดุช่างชนิดเดียวที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานบางครั้งก็เรียกว่า "Mild Steel"

นอกจากนี้ยังแยกออกตามปริมาณคาร์บอนที่อยู่ได้ 3 ชนิดคือ

#### (1) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติเหนียว แต่ไม่แข็งแรงนักสามารถนำไปกลึง กัด ไส เจาะได้ง่าย นอกจากนี้ยังเป็นเหล็กที่อ่อน สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่ายเหล็กชนิดนี้เหมาะกันงานที่ไม่ต้องการความเค้นแรงดึงสูงนัก นอกจากนี้เหล็กชนิดนี้ไม่สามารถนำมาชุบแข็งหรือชุบผิวแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อนเพราะมีคาร์บอนน้อย

- เปอร์เซนต์คาร์บอน ไม่เกิน 0.2%

- กรรมวิธีการผลิต กรรมวิธีเบสเซเมอร์

การใช้งาน เหล็กแผ่นหม้อน้ำ ท่อน้ำประปา , เหล็กเส้นในงานก่อสร้าง, เหล็กเคลือบดีบุกเช่นกระป๋องบรรจุอาหาร, เหล็กอบสังกะสี เช่น แผ่นสังกะสีมุงหลังคา, ทำตัว, ถังรถยนต์ ถังน้ำมัน, งานย้ำหมุด, ทำสกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนเครื่องจักร ไซ้, บานพับประตู

#### (2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าชนิดนี้มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่าและยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการความเค้นดึงปานกลาง ต้องการป้องกันการสึกหรอที่ผิวหน้า และต้องการความแข็งแรง แต่มีความแข็งบ้างพอสมควร

- เปอร์เซนต์คาร์บอน 0.2-0.5%

- กรรมวิธีการผลิต เบสเซเมอร์, โม่ส, เตากระเพาะ, LD

การใช้งาน ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล , ทำรางรถไฟ เพลาเครื่องกล เพื่องหัวค้อน ก้านสูบ สปริง, ชิ้นส่วนรถไถนา ไขควง ท่อเหล็ก, นอต สกรูที่ต้องแข็งแรง

### (3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูงเป็นเหล็กกล้าชนิดนี้เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง ความแข็งและความเค้นแรงดึงสูงเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.5–1.5% สามารถทำการชุบแข็งให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ แต่เมื่อชุบแข็งให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ แต่เมื่อชุบแข็งแล้ว จะเปราะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหล่อ

การใช้งาน ทำเครื่องมือต่าง ๆ เช่น ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดคิ่งใบ เลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียว (tap) ไขมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กกัด สปริงแหนบ ลูกบอล ในเบร้งลูกปืน

### (2) เหล็กกล้าประสม (Alloy Steel)

เหล็กกล้าประสมเป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ไม่เกิน 1.7% และยังมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กด้วยเช่น แมงกานีส, นิกเกิล, โครเมียม, วาเนเดียม, โมลิบดีนัม, โคบอลต์, ทังสเตน ฯลฯ การที่ผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กนั้นก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่เหล็กคาร์บอนให้คุณสมบัติเหล่านั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำไม่สามารถใช้งานได้ดี กรรมวิธีการผลิตเหล็กกล้าประสมสามารถผลิตได้จาก เตากระทะ, เตาไฟฟ้า และ เตาอินดักชั่น

จุดมุ่งหมายของการผสมธาตุอื่นๆ ลงไปนั้น คือ

- เพิ่มคุณสมบัติด้านชุบแข็ง
- ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรออันเนื่องมาจากการเสียดสีขณะใช้งาน
- เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน
- ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

เหล็กกล้าผสมอยู่สามารถแบ่งตามปริมาณของวัสดุที่ผสมได้ 2 ประเภทคือ

#### (1) เหล็กกล้าประสมสูง (High Alloy Steel)

เหล็กกล้าประสมสูงเป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่รวมแล้วมากกว่า 10% เหล็กกล้าในกลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กเครื่องมือประสม (Alloy Tool Steel) ด้วย ซึ่งเหล็กกล้าชนิดนี้จะมีคุณสมบัติในด้านทนต่อการกัดกร่อนทนต่อการสึกหรอได้ดีจึงถูกใช้งานในการทำเหล็กเครื่องมือต่าง ๆ (เหล็กเครื่องมือประสม (Alloy Tool Steel) หมายถึงเหล็กที่ใช้ทำอุปกรณ์การตัด โลหะหรือการขึ้นรูปโลหะและอื่น ๆ)

## (2) เหล็กกล้าประสมต่ำ (Low Alloy Steel)

เหล็กกล้าประสมต่ำเป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมรวมอยู่แล้วไม่เกิน 10% เหล็กชนิดนี้จะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเหล็กคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steel) และมีคุณสมบัติอื่นเหมือนเหล็กกล้าประสมสูง

## (3) เหล็กกล้าประสมพิเศษ (Special Alloy Steel)

เหล็กกล้าประสมพิเศษเป็นเหล็กกล้าประสมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่จะใช้เฉพาะอย่างหลากหลายประเภทเช่น

### (1) เหล็กกล้าประสมทนแรงดึงสูง (High tensile strength alloy Steels)

เหล็กกล้าประสมทนแรงดึงสูงเป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเหล็กกล้าประสมทั่ว ๆ ไปไปคือเป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงมาก และมีความเหนียวสูง นอกจากนี้วิธีการชุบแข็งยังแตกต่างไปจากเหล็กกล้าประสมทั่วไป มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ประมาณ 0.2% โดยส่วนใหญ่ใช้กับงาน เพลาส่งกำลัง หรือ เฟืองเป็นต้น

### (2) เหล็กกล้าทนการเสียดสีและรับแรงกระแทก (Wear Resistant Steel)

เหล็กกล้าทนการเสียดสีและรับแรงกระแทกลักษณะ เหล็กที่มีคุณสมบัติทนการเสียดสีสูง และรับแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี ที่นำมาใช้งานมาก คือ เหล็กกล้าประสมแมงกานีส หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เหล็กกล้าฮาร์ดฟิลล์” โดยจะมีธาตุที่ผสมอยู่ ซิลิคอน 0.4-1%, แมงกานีส 11-14% แต่เหล็กที่ผ่านการผลิตออกมาในตอนแรกนั้นยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมีความเปราะมาก ต้องนำไปชุบที่อุณหภูมิ 1000-1100 °C และจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว จะทำให้เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติเหนียว เหล็กชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับงานที่มีเฉพาะงานเสียดสีแต่เพียงอย่างเดียวเพราะจะไม่คุ้มทุนการผลิตจะต้องได้รับแรงกระแทกพร้อมกันไปด้วย นอกจากนี้ไม่สามารถตัดเจาะหรือกลึงได้ง่ายต้องใช้มีดกลึงที่มีความแข็งสูง และใช้ความเร็วในการตัดต่ำมาก การใช้งานส่วนใหญ่ใช้ทำ ตะแคงเหล็ก , อุปกรณ์ชุดแร่, รางรถไฟ, ฯลฯ

### (3) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High – Speed Steel) (HSS) หรือ เหล็กกล้ารอบสูง

เหล็กกล้าความเร็วสูงเป็นเหล็กกล้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อความมุ่งหมายสำหรับงานเครื่องมือตัดกลึง กัด เจาะ ไส (Maching) ซึ่งเดิมนั้นใช้เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เหล็กกล้าชนิดนี้มีธาตุหลักประสมในเหล็กกล้า คือ ทังสแตน เมื่อขึ้นรูปแล้วก่อนนำไปใช้งานจะต้องชุบแข็งก่อน ที่อุณหภูมิประมาณ 950 – 1300 C แล้วแต่ส่วนผสม

คุณสมบัติทั่วไป

- มีความแข็ง (หลังจากชุบแข็งแล้วจะเปราะ)

- รักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
  - ชุบแข็งได้ดีทนต่อการสึกหรอได้ดี
  - เพอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.6 – 0.8%
  - ธาตุที่ผสมอยู่ ทั้งสแตน 6%, โมลิบดีนัม 6%, โครเมียม 4%, วาเนเดียม 1%
- การใช้งาน ดอกสว่าน ดอกทำเกลียว มีด กลึง มีดไส แม่พิมพ์, เครื่องมือวัดต่าง ๆ ฯลฯ

#### (4) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีธาตุที่ผสมอยู่เพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติต้านทานการเป็นสนิม คือ โครเมียม และจะต้องผสมโครเมียมให้สูงพอสมควร ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ก็คือเหล็กประสมสูงชนิดหนึ่ง

##### คุณสมบัติทั่วไป

- ป้องกันการเกิดสนิม
- ป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีประเภทกรด
- ทนความร้อน (ขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมต่อสูง ๆ )
- เพอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 0.4%
- ธาตุที่ผสมอยู่ โครเมียม 15 –18%, นิกเกิล, แมงกานีส, อะลูมิเนียม, ฯลฯ

การใช้งาน ที่ยึดส่วนต่าง ๆ เช่น ที่ยึดเตาท่อ, ทำของใช้ เช่น มีดซ่อนซ่อน หรืออุปกรณ์ในงานเคมี หรืออ่างล้างในครัว (Sink)

#### (4) เหล็กกล้าหล่อ (Cast Steel)

เหล็กกล้าหล่อ คือ เหล็กกล้าที่นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ ตามงานที่ต้องการ ซึ่งมีลักษณะรูปร่างซับซ้อนเกินกว่าที่จะทำการตีขึ้นรูป การอัด หรือ การรีด ซึ่งวิธีการหล่อนี้จะได้งานที่ขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการ เหล็กกล้าหล่อนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการตี หรือการวัด จะมีส่วนที่แตกต่างกันคือ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผ่านการหล่อจะปรากฏมีรูพรุนเล็ก ๆ ว่างเกรน เหล็กกล้าหล่อแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ๆ คือ

##### (1) เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ (Carbon Steel Castings)

เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นหลักเพียงอย่างเดียวโดยมีเพอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 0.6% ธาตุอื่นที่ผสมอยู่เช่น แมงกานีส 0.5 –1%, ซิลิคอน 0.2 – 0.75 %, กำมะถัน <0.5%, ฟอสฟอรัส < 0.5% ซึ่งจะเป็นธาตุที่ติดมาในรูปของสารมลทิน

ยกเว้นเฉพาะแมงกานีส ซิลิคอน อะลูมิเนียม เพราะมีหน้าที่เป็นตัวกำจัดแก๊ส (Deoxidizer) ส่วนใหญ่การใช้งานจะใช้ทำ กังหันเทอร์ไบต์

เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามปริมาณคาร์บอน คือ

- เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนต่ำ มีคาร์บอนไม่เกิน 0.2%
- เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนปานกลาง มีคาร์บอน 0.2 – 0.5%
- เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนสูง มีคาร์บอน 0.5 - 0.6%

#### (2) เหล็กกล้าประสมหล่อ (Alloy Steel Castings)

เหล็กกล้าประสมหล่อ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 1.7% และธาตุอื่นผสมอยู่ด้วยเช่นแมงกานีส, ซิลิคอน, โครเมียม, นิกเกิล, วาเนเดียม, โมลิบดีนัม, ทังสแตน, ทองแดง หรือโคบอลต์ การที่มีธาตุต่าง ๆ ประสมลงในเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่าง เช่นคุณสมบัติ ชุบแข็ง คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและสูง คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้า และคุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก กรรมวิธีการผลิตจะผลิตใน เตากระทะ, เตาไฟฟ้า และ เตาอินดักชั่น ส่วนใหญ่จะนำไปใช้งาน ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรมเคมี

เหล็กกล้าประสมหล่อ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

- เหล็กกล้าหล่อประสมต่ำ มีธาตุผสมที่สำคัญ เช่น แมงกานีส โครเมียม นิกเกิล ทังสแตน ไม่เกิน 10%

- เหล็กกล้าหล่อประสมสูง มีธาตุผสมที่สำคัญเกินกว่า 10%

#### (5) เหล็กอ่อน (Wrought Iron)

เหล็กอ่อนนี้เป็นเหล็กที่ผลิตจากเตาพุตติ้ง (Pudding Process) มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่เกิน 0.1% นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่เช่น ซิลิคอน, กำมะถัน, ฟอสฟอรัส, แมงกานีส ฯลฯ ผลผลิตจากเตาพุตติ้งจะได้เหล็กที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กอ่อนนี้จะไม่หลอมละลาย แต่จะอ่อนเปื่อยกตีขึ้นรูปได้ง่ายมาก นอกจากนี้ยังสามารถตีขึ้นเหล็กให้ประสานกันได้อีกด้วยส่วนมากการใช้งาน ท่อ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องพบกับการเสื่อมสภาพโดยสนิม ข้อต่อรถไฟ โซ่ ขอบเกี่ยว หรืออุปกรณ์ที่มากขึ้นรูปอย่างง่าย



### 3.3 คุณสมบัติของธาตุต่างๆ

คุณสมบัติของธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในเหล็ก ได้แก่

#### (1) คาร์บอน (Carbon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C

เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องมีส่วนผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

#### (2) อลูมิเนียม (Aluminium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al

เป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นตัวไล่แก๊สออกซิเจน และไนโตรเจน (Deoxidizer และ Denitrizer) มากที่สุด ซึ่งผสมอยู่เล็กน้อยในเหล็ก จะมีผลทำให้เนื้อละเอียดขึ้น เมื่อใช้ผสมลงในเหล็กที่จะนำไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง โดยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับไนโตรเจน เป็นสารที่แข็งมาก ใช้ผสมลงในเหล็กทนความร้อนบางชนิด เพื่อให้ต้านทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ได้ดีขึ้น

#### (3) โบรอน (Boron) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ B

ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งแก่เหล็ก ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป จึงทำให้ใจกลางของงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งสูงขึ้น โบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ใช้ทำจากกันอุปรกรณ์นิวเคลียร์

#### (4) แคลเซียม (Calcium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ca

แคลเซียมจะใช้ในลักษณะแคลเซียมซิลิไซด์ (CaSi) เพื่อลดออกซิเดชัน (Deoxidation) นอกจากนั้น แคลเซียม ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดสะเก็ดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำความร้อน

#### (5) ซีเรียม (Cerium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ce

เป็นตัวลดออกซิเจนและกำมะถันได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Hot Working ของเหล็กกล้า และปรับปรุงความต้านทานการเกิดสะเก็ดของเหล็กทนความร้อน

#### (6) โคบอลต์ (Cobalt) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Co

ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ แต่สามารถป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนื้อหยาบที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงช่วยปรับปรุงให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้ จึงใช้ผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อน และเหล็กไฮสปีด ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็น โคบอลต์

60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้น จึงไม่ควรเติมโคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

**(7) โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr**

ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

**(8) ทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu**

เพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กแม้เพียงเล็กน้อย เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมของเหล็กแต่อย่างใด

**(9) แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn**

ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนี้ แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

**(10) โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo**

ปกติจะใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

**(11) ไนโตรเจน (Nitrogen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ N**

ขณะทำไนไตรดิง (Nitriding) ไนโตรเจนจะรวมตัวกับธาตุบางชนิดในเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ ซึ่งทำให้ผิวงานมีความแข็งสูงมาก ด้านทานการสึกหรอได้ดีเยี่ยม

**(12) นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni**

เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

**(13) ออกซิเจน (Oxygen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ O**

ออกซิเจนเป็นอันตรายต่อเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ส่วนผสม รูปร่าง และการกระจายตัวของสารประกอบที่เกิดจากออกซิเจนนั้น ออกซิเจนทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานแรงกระแทกลดลง (ตามแนวขวาง) และเปราะยิ่งขึ้น

**(14) ตะกั่ว (Lead) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb**

เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free-Machining Steel) มีตะกั่วผสมอยู่ประมาณ 0.20 - 0.50 % โดยตะกั่วจะเป็นอนุภาคละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก เมื่อนำไปกลึง หรือตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลทำให้ขี้ก้างขาดง่าย จึงทำให้ตัดแต่งได้ง่าย ตะกั่วไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก

**(15) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulphur) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ P และ S ตามลำดับ**

เป็นตัวทำลายคุณสมบัติของเหล็ก แต่มีผสมอยู่ในเนื้อเหล็กโดยไม่ได้ตั้งใจ ต้องพยายามให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ มักจะเรียกสารเหล่านี้ว่า สารมลทิน (Impurities) เหล็กเกรดสูงจะต้องมีฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.03 - 0.05 % ส่วนกำมะถันจะทำให้เหล็กเกิด Red Shortness จึงแตกเปราะง่าย โดยทั่วไปจึงจำกัดปริมาณกำมะถันในเหล็กไม่เกิน 0.025 หรือ 0.03 % ยกเว้นเหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free Machining) ที่เติมกำมะถันถึง 0.30 % เพื่อให้เกิดซัลไฟด์ขนาดเล็กกระจายทั่วเนื้อเหล็ก ทำให้ขี้ก้างขาดง่าย จึงตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย

**(16) ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si**

ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

### (17) ไทเทเนียม (Titanium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่แข็งแรงมาก ทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ดี เป็นธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กสแตนเลส เพื่อป้องกันการผุกร่อนตามขอบเกรน นอกจากนี้ ไทเทเนียมยังช่วยทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด

### (18) วาเนเดียม (Vanadium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V

ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการเชื่อม และการดัดเสียไป ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด รวมตัวกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด

### (19) ทังสเตน (Tungsten) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ W

สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็น คาร์ไบด์ ที่แข็งแรงมาก จึงทำให้เหล็กที่ผสมทังสเตนมีความแข็งแรงมาก หลังจากผ่านการอบชุบ จึงใช้ทำพวกเครื่องมือคม (Cutting Tools) ต่าง ๆ ทำให้เหล็กเหนียวขึ้น และป้องกันไม่ให้เกิดเนื้อหยาบ เนื่องจากการที่เกรนขยายตัว เพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีของเหล็ก ดังนั้น จึงนิยมเติมทังสเตนในเหล็กไฮสปีด (Hi-Speed) และเหล็กที่ต้องอบชุบแข็งโดยทั่วไป

## 3.4 Heat treatment of steel

Heat treatment คือกระบวนการที่ให้ความร้อน (Heating) และให้เย็น (Cooling) โดยอาศัยเวลา เข้ามาช่วยควบคุม โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้โลหะ (หรือโลหะผสม) มีคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการ โดยที่โลหะนั้นยังอยู่ในสภาพของแข็ง

หลักพื้นฐานทั่วไปของ Heat-treating process ของเหล็กคือ การให้ความร้อนแก่เหล็กให้อยู่ในช่วง Austenite โดยให้อุณหภูมิสูงกว่าช่วง Critical range (ที่อยู่ในสภาพ Austenite) แล้วปล่อยให้เย็นลง เพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลตามต้องการ [11]

การทำ heat treatment นี้มีหลายวิธี ได้แก่

- (1) Annealing
- (2) Normalizing
- (3) Hardening
- (4) Tempering

โดยในที่นี้จะกล่าวถึง heat treatment แบบ Annealing เท่านั้นซึ่งโลหะที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มา จะทำให้ขนาดของ Grain มีความละเอียดมากขึ้น มีการเพิ่มจำนวนของ Dislocation ส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของ Dislocation เป็นไปอย่างยากลำบาก



มากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ Dislocation เคลื่อนที่ เป็นผลให้โลหะมีความแข็งแรงสูงขึ้น (Tensile strength และ Yield strength เพิ่มขึ้น) และมี Elongation ลดลง แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปเย็นต่อเนื่องโดยไม่มีกระบวนการทางความร้อนใดๆ มาช่วยให้โลหะมีความอ่อนลงเลยจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเปราะและแตกหักในที่สุด เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปเย็นหลายๆ ครั้ง ต้องมีกระบวนการทางความร้อนมาช่วยทำให้โลหะนั้นอ่อนลงและสามารถขึ้นรูปต่อไปได้ โดยเรียกกระบวนการที่ทำให้โลหะมีความอ่อนลงว่า Annealing (การอบอ่อน) ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการเกิด Recovery, Recrystallization และ Grain growth [15]

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) ของโลหะที่มีหลายผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะชนิดนั้นจะทำให้โครงสร้างและสมบัติของโลหะนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Grain การเกิด Strain Hardening และจำนวน Dislocation มีความหนาแน่นมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้โลหะมีความเครียด (Strain) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อแรงดึง แรงอัด แรงเฉือน บริเวณโดยรอบของ Dislocation ที่เกิดขึ้นมาใหม่นอกจากนี้ คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า, ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน ก็จะเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นรูปเย็น คุณสมบัติต่างๆ และโครงสร้างที่เปลี่ยนไปภายหลังการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) สามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการขึ้นรูปเย็น (Precold work states) ได้ โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่เรียกว่า Annealing ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติและโครงสร้างของโลหะ กลับคืนสู่สภาพเดิมโดยการให้ความร้อน (อบ) ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม อะตอมในโลหะจะเกิดการเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ซึ่งจะส่งผลให้ความเครียด (Strain) ในโลหะลดลง รวมถึงทำให้ Tensile strength และ Hardness ลดลงอีกด้วย โดยการทำให้ Annealing จะถูกใช้ในกรณีที่ต้องการให้โลหะมีความอ่อนลง และมีความเหนียว หรือต้องการที่จะนำไปขึ้นรูปเย็นต่อไป [9]

กระบวนการคืนสภาพ (Annealing Process) มีด้วยกัน 3 ขั้นตอนคือ [9]

(1) การจัดเรียงตัวใหม่ หรือ Recovery

เมื่อโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาจะมีพลังงานภายในเพิ่มขึ้น (ซึ่งอาจได้รับมาจากพลังงานความร้อน หรือพลังงานกลอื่นก็ได้) เมื่อพลังงานภายในเพิ่มจนถึงจุดสูงสุด โลหะจะเกิดการคืนตัวก่อน ซึ่งเป็นขั้นแรกของการคืนสภาพ การคืนตัวจะเกิดขึ้นช่วงไม่นานนัก หลักการของการคืนตัวคือ เมื่อเราให้พลังงานหรือความร้อนโลหะจะเกิดคลายความเครียดภายในแลททิซออกมา โดยที่ยังไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ผลที่ตามมาของ การคืนตัวจะมีผลให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งได้แก่

- พลังงานภายในเริ่มถูกปล่อยออก เมื่อเราเพิ่มอัตราการคืนตัว
- ความเค้นตกค้างภายในแลททิซ (Residual Stress) ที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น



จะถูกปล่อยหรือคลายออก

- ความเครียดภายในแลททิซเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการคืนตัวและความเครียดจะหมดไปเมื่อเวลานานมากยิ่งขึ้น

- ปริมาณของการลดความเค้นตกค้างภายใน (Residual Stress) จะเร็วหรือช้าขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้การคืนตัว กล่าวคือ ยิ่งใช้อุณหภูมิสูงมากขึ้น การลดความเค้นตกค้างจะใช้เวลาน้อยลง หรือปริมาณความเค้นตกค้างลดลงในปริมาณที่มากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ

- การให้ความร้อนที่ไม่สูงนั้นเพื่อให้เกิดการคืนตัวนั้น สามารถนำมาใช้ในการลดความเค้นตกค้างของโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วก็ได้ เราจะเรียกกระบวนการนี้โดยทั่วไปว่าการอบคลายความเค้นตกค้าง (Residual Stress Relief Annealing) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดการแตกหักหรือการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นตกค้าง (Stress Corrosion)

- สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งในผลึกโลหะเริ่มรวมตัวกัน

- คุณสมบัติทางกลที่สำคัญของโลหะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของการคืนตัว

## (2) การเกิดผลึกใหม่ หรือ Recrystallization

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงการคืนตัวให้เพิ่มสูงขึ้น จะเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้น ผลึกใหม่นี้จะมีส่วนผสม โครงสร้างผลึกและแลททิซเหมือนกันผลึกเดิมก่อนการขึ้นรูปเย็น (การเปลี่ยนรูป) ผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่เกรนถูกการเปลี่ยนรูปกระทำอย่างรุนแรงสุด หรืออีกนัยหนึ่งจะเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดหรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนและตรงระนาบเลื่อน (Slip Plane) การเกิดผลึกใหม่จำเป็นต้องใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมถึงจะเกิดผลึกใหม่ อุณหภูมินี้ เรียกว่า อุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ซึ่งมีความหมายว่า เป็นอุณหภูมิที่โลหะเกิดผลึกใหม่ หมดภายในเวลา หนึ่งชั่วโมง ดังนั้นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ในโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นกับขนาดและโครงสร้างผลึกธาตุที่ผสม รวมทั้งอุณหภูมิของการหลอมละลายธาตุ

การเกิดผลึกใหม่ของธาตุหรือโลหะบริสุทธิ์ จะใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่าโลหะผสมมาก เช่น ในเหล็กบริสุทธิ์มีอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่เท่ากับ  $365^{\circ}\text{C}$  แต่พอผสมคาร์บอนลงในเหล็กเพียงเล็กน้อยกลายเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะเพิ่มขึ้นเป็น  $525^{\circ}\text{C}$

ข้อสังเกต ในกรณีของโลหะที่มีจุดหลอมละลายต่ำ เช่น ตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี จะมีอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นั่นหมายความว่า โลหะทั้งสามชนิดจะไม่เกิด

งานเย็นขึ้นเลย ณ อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเมื่อเราทำการเปลี่ยนรูปมันที่อุณหภูมิห้องมันจะเกิดการคืนตัวทันที

การเกิดผลึกใหม่ของโลหะนั้น มักจะขึ้นกับเวลาในการคืนสภาพและอุณหภูมิที่ทำการคืนสภาพ กล่าวคือถ้าเพิ่มเวลาในการคืนสภาพ เราจะสามารถใช้อุณหภูมิต่ำลงได้หรือถ้าเพิ่มอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ให้สูงขึ้น เราจะใช้เวลาน้อยลงแต่อัตราการเพิ่มและเวลาที่ลดลงไม่ได้เป็นส่วนโดยตรง

ดังนั้นจะเห็นว่า การเกิดผลึกใหม่จะเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นกับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าการเปลี่ยนแปลงเวลา (ที่อุณหภูมิต่ำ) ดังนั้น เรามักจะใช้การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเป็นตัวแปรในการคืนสภาพ

การเกิดผลึกใหม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติทางกลเริ่มเปลี่ยนแปลง คือ ความแข็งและความแข็งแรงเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ความเหนียวเริ่มเพิ่ม
- เริ่มเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น ผลึกเริ่มมีแรงขับหรือ Driving Force ซึ่งเกิดจากพลังงานที่สะสมอยู่ในโลหะเมื่อผ่านการขึ้นรูปเย็นแรงขับในผลึกจะทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งเกิดการเคลื่อนเข้ามารวมกัน
- การเปลี่ยนตำแหน่ง (Dislocation) ในผลึกโลหะเริ่มมีความหนาแน่นลดลง และเคลื่อนเข้ามารวมกัน ในช่วงต้นของการเกิดผลึกใหม่ และการเกิดการจัดเรียงตัวของการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ เป็นรูปหลายเหลี่ยมหรือ ที่เรียกว่า Polygonization ขึ้น ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ทำให้เกิดเกรนย่อย Sub grain
- คุณสมบัติทางกายภาพ เริ่มเปลี่ยนแปลงโดย เฉพาะเกรนของโลหะจะเริ่มเกิด Sub Grain ขึ้นบริเวณที่เกิดความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งมาก เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรง หรือบริเวณที่มีความเครียดมาก ซึ่งมักเป็นบริเวณขอบเกรน โดยเฉพาะ ขอบเกรนที่เกรน สาม-สี่ เกรนมาบรรจบกัน
- เกรนที่เกิดใหม่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยไปแทนที่เกรนเดิมที่มีมีความเครียดอยู่ที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาเกรนที่เกิดใหม่จะมีลักษณะค่อยข้างสมมาตรกัน (หรือเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่ค่อยข้างกลมคือไม่แบนหรือรีบยาว) และเป็นเกรนที่ไม่มีความเครียดตกค้างอยู่เลย
- การเกิดผลึกใหม่จะสิ้นสุดเมื่อ เมื่อโลหะเกิดเกรนใหม่สมบูรณ์แล้ว

(3) การโตขึ้นของผลึก หรือ Grain Growth

เมื่อเกรนใหม่เกิดขึ้นทั่วทั้งโลหะแล้ว ถ้าเราให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นอีกเกรนที่เกิดใหม่ก็จะเริ่มโตขึ้นเรื่อยๆ การโตของเกรนในการคืนสภาพนี้ไม่เหมือนการโตของเกรนเนื่องจากการ

แข็งตัวจากโลหะเหลว (การโตของเกรนในการแข็งตัวของโลหะ หรือ Solidification นั้นเกรนจะโตในลักษณะกิ่งไม้ หรือ dendrite) กล่าวคือ การโตของเกรนในการคืนสภาพจะเหมือนการที่เกรนเล็กๆ ที่เกิดใหม่มารวมตัวกัน เนื่องจากขอบของแต่ละเกรนเล็กๆ มารวมกันเป็นขอบเกรนใหม่ (ขอบเกรนเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างหนึ่ง ที่สามารถเคลื่อนตัวไปรวมกันได้) หรือบางครั้งขอบเกรนเล็กๆ นั้นหายไประวมกัน นั่นคือเกรนที่ติดกันเกิดการรวมตัวกัน

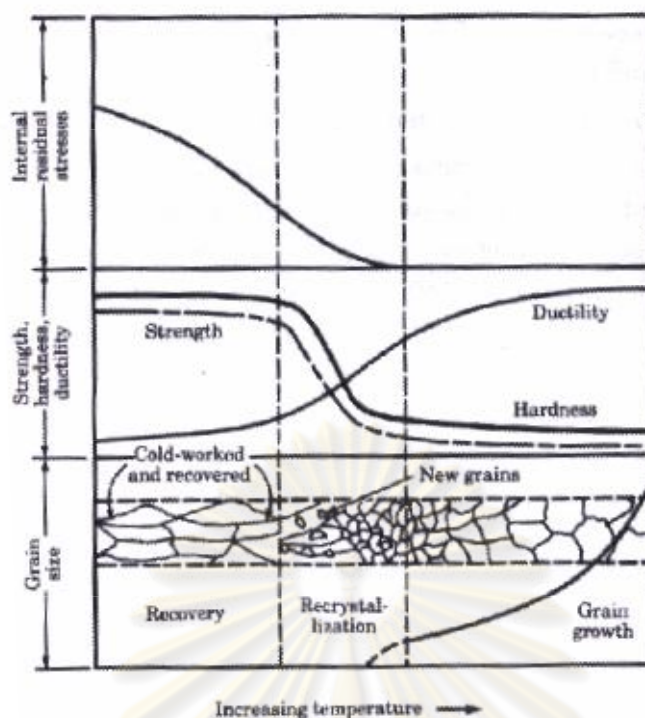
เนื่องจากในเกรนใหญ่จะมีพลังงานอิสระน้อยกว่าเกรนเล็กทำให้พลังงานอิสระดังกล่าวทำให้เกิดแรงขับ ผลักดันให้ขอบเกรนลดจำนวนลง แรงขับจะมีตรงข้ามกับความแข็งหรือคงรูปของแลตทิซ (Rigidity of the Lattice) ดังนั้นการให้พลังงานความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นแก่โลหะในช่วงนี้ ความแข็งหรือคงรูปของแลตทิซในเกรนเล็กจะลดลงในขณะที่อัตราการโตของเกรนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกรนที่ได้มีขนาดโตขึ้น เกรนจะโตไปเรื่อยเมื่อเรายังให้ความร้อนไปเรื่อยๆ จนเกรนอาจจะใหญ่กว่าเกรนเดิมก่อนเกิดงานเย็น

ดังนั้นในเรื่องการโตของเกรน เราอาจสรุปผลบางประการได้ดังนี้

- เกรนมีขนาดใหญ่มากน้อยจะขึ้นอุณหภูมิที่ให้ในขณะที่ทำการคืนสภาพ คือ การเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น มีผลให้มีเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามมา
- เกรนจะโตขึ้นมากน้อยขึ้นกับการที่โลหะมีการต่อต้านการเคลื่อนของขอบเกรน (หรือการเปลี่ยนตำแหน่ง) เช่นมีธาตุผสมแทรกตัวในแลตทิซ หรือเกิด Second Phase Particles
- ถ้าต้องการให้เกรนมีขนาดที่พอเหมาะจะต้องให้อุณหภูมิไม่สูงเกินกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่มากและต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนแซ่ไว้พอเหมาะเพื่อไม่ให้เกรนโตเกินไป
- เกรนที่โตขึ้นจะไม่มี ความเครียด และคุณสมบัติทางกลของโลหะเช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งจะเหมือนเดิมก่อนที่โลหะนั้นจะเกิดงานเย็น

สรุปขนาดเกรน (Grain Size) มีผลขึ้นกับ

- ปริมาณการเปลี่ยนรูป (Degree of Deformation)
- เวลาที่ใช้ในการคืนสภาพ ณ อุณหภูมิหนึ่ง (เวลาที่แซ่ไว้ในขณะเกิดการโตของเกรน) (Time at Annealing Temperature)
- อุณหภูมิของการคืนสภาพ (Temperature of Annealing)
- ปริมาณธาตุผสมที่ไม่ละลายในโลหะ (Insoluble Impurity)



รูปที่ 3.1 แสดงผลกระทบที่เกิดกับโครงสร้างและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของ cold-worked metals [14]

### 3.5 Heat Transfer

ความร้อนหรือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนย้ายถ่ายเทได้ 3 วิธีด้วยกัน [10] คือ 1. โดยการนำ (Conduction) 2. โดยการแผ่กระจาย (Radiation) 3. โดยการพา (Convection) แม้จะมีการแบ่งแยกวิธีการเคลื่อนย้ายถ่ายเทความร้อนและการวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 วิธีดังกล่าว แต่การถ่ายเทความร้อนส่วนมากในสภาพทั่วไป ความร้อนจะไม่เคลื่อนย้ายถ่ายเทโดยวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว แต่จะถ่ายเทโดยหลายวิธีที่กล่าวมาพร้อมกัน ในการศึกษาและแก้ปัญหาวิศวกรรมศาสตร์จะพิจารณาถึงวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนย้ายถ่ายเทไปมากที่สุด เป็นวิธีที่ความร้อนใช้ในการถ่ายเทความร้อนโดยไม่คำนึงถึงวิธีการอื่น ๆ ที่ความร้อนใช้ในการถ่ายเทแต่มีปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยวิธีนั้น ๆ น้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหานั้น

(1) Conduction (การนำความร้อน): เป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลาง (ของแข็ง, ของเหลวหรือแก๊ส) หรือวัตถุเดียวกัน หรือระหว่างตัวกลางที่ต่างกันแต่อยู่สัมผัสหรือติดต่อกันโดยตรง การเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำพลังงานภายในวัตถุจะถ่ายเทหรือเคลื่อนย้ายโดยการติดต่อโดยตรงของโมเลกุลและปราศจากการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของวัตถุนั้น ๆ วัตถุแข็งที่บดแสงจะมีการเคลื่อนย้ายของ



ความร้อนโดยวิธีการนำเพียงอย่างเดียว การเคลื่อนย้ายของความร้อนในตัวกลางหรือวัตถุที่ไม่เป็นของแข็ง ส่วนมากจะเป็นไปแบบผสม กล่าวคือ ความร้อนจะเคลื่อนที่หรือถ่ายเทไปด้วยวิธีการนำและการพาไปทั้งสองวิธีและบางลักษณะจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแผ่ด้วย

(2) Convection (การพาความร้อน): เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของวัตถุแข็งกับของเหลวหรือแก๊ส กระบวนการถ่ายเทความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุเพียงอย่างเดียว แต่มีองค์ประกอบอื่นๆ อีกที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพานี้ เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือแก๊ส เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้ก็ให้ผลเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีอื่น ๆ คือมีการเคลื่อนย้ายพลังงานเกิดขึ้น และเคลื่อนย้ายไปตามอุณหภูมิที่ลดต่ำลง การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพานี้เป็นกระบวนการที่สำคัญมาก เพราะ ความร้อนจะถูกนำพาไปด้วยพลังงานจะถูกสะสมและเคลื่อนย้ายด้วยวิธีต่าง ๆ ปะปนกันไป การพาความร้อนจึงอาจแบ่งเป็นประเภทย่อย ตามลักษณะต่างๆ ดังนี้ได้คือ

- การพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural or Free Convection) หรือการพาความร้อนด้วยบังคับ (Forced Convection)
- การพาความร้อนด้วยการเคลื่อนที่แบบราบเรียบ (Laminar flow Convection) หรือการพาความร้อนด้วยการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulent flow Convection)
- การพาความร้อนแบบสม่ำเสมอ (Steady Convection) หรือการพาความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Convection)
- การพาความร้อนตามลักษณะสัณฐานภายนอก (Configuration)
- การพาความร้อนตามจำนวนมิติที่เกิดการถ่ายเทความร้อน (Dimensions)

(3) Radiation (การแผ่ความร้อน): เป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนจากวัตถุที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุนั้นอยู่ห่างจากกัน และแม้ว่าระยะห่างนั้นจะเป็นบริเวณสุญญากาศก็ตาม การแผ่ความร้อนโดยทั่วไป หมายถึง กระบวนการถ่ายเทหรือส่งพลังงานออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการกระจายของคลื่นแม่เหล็กที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิและทำให้พลังงานเคลื่อนย้ายเรียกว่า การแผ่ความร้อน (Thermal radiation) ซึ่งต่างกับการแผ่กระจายของแสง ที่ช่วงความยาวคลื่นต่างกัน [10]

### 3.5.1 การแบ่งประเภทของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว แต่ละวิธีของกระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจจะแบ่งแยกออกเป็นประเภทได้ตามสภาวะ การถ่ายเทสัณฐานภายนอกของวัตถุและจำนวนมิติที่เกิดการถ่ายเท



### (1) การถ่ายเทความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady State)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในระบบ หรือในกระบวนการไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่เปลี่ยนไป เช่นเมื่อเวลาคงที่หรือเมื่อพิจารณาหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง อุณหภูมิที่จุดต่างๆ จะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงไป

### (2) การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady or Transient State)

การถ่ายเทความร้อนในสภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่จุดต่างๆ ในระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปแสดงให้เห็นถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในระบบ

### (3) การถ่ายเทความร้อนตามลักษณะสัณฐานภายนอก (Configuration)

การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้ เป็นไปตามรูปลักษณะทรงเรขาคณิตศาสตร์ เช่น การถ่ายเทความร้อนของวัตถุรูปผนังแผ่นเรียบ รูปทรงกระบอก รูปท้อ และรูปแผ่นขนาน

หรือเป็นไปตามลักษณะการวางของวัตถุ เช่น การถ่ายเทความร้อนในแนวตั้งหรือแนวตั้ง ในแนวราบหรือแนวนอน และในแนวเอียงลาด เป็นต้น

หรือเป็นไปตามลักษณะการไหลของของเหลวหรือแก๊สผ่านไปตามวัตถุแข็ง เช่น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะการไหลผ่านภายในและการไหลผ่านภายนอก เป็นต้น

### (4) การถ่ายเทความร้อนตามจำนวนมิติการถ่ายเท (Number of Dimension)

การถ่ายเทความร้อนอาจมีทิศทางไปทางเดียวเรียกว่า การถ่ายเทความร้อนหนึ่งมิติ เช่น การนำความร้อนผ่านผนังเป็นต้น หรือมีทิศทางไปสองทาง เป็นการถ่ายเทความร้อนสองมิติ เช่น การถ่ายเทความร้อนของท่อที่ฝังอยู่ใต้พื้นดิน หรือมีทิศทางไปสามทางเป็นการถ่ายเทความร้อนสามมิติ เช่น การถ่ายเทความร้อนจากท่อที่ยื่นออกมาจากตึก เป็นต้น [10]

## 3.5.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (Conduction Heat Transfer)

เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามีการถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เรากล่าวได้ว่าพลังงานถ่ายเทด้วยวิธีการนำ นั้นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิ

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

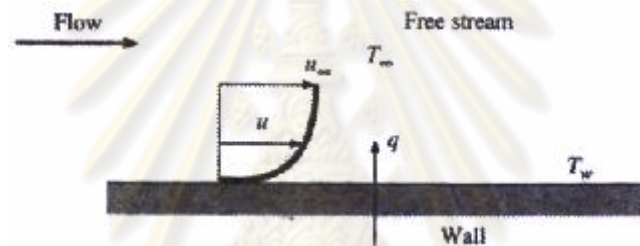
เมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่จะได้สมการดังนี้

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $q$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อน,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  คือค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล ค่าคงที่  $k$  มีค่าเป็นบวก เรียกว่า สภาพการนำความร้อนของวัสดุ และถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นไปตามหลักของกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวอย่างเช่น ความร้อนที่ไหลจะมีค่าลดต่ำลงตามสเกลอุณหภูมิที่แสดงด้วยระบบโคออร์ดิเนต จากสมการ (3.2) เป็นสมการของสภาพการนำความร้อน และค่า  $k$  มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันค่าของความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ [12]

### 3.5.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)

มักทราบกันดีแล้วว่า แผ่นโลหะร้อนจะเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อนำไปวางให้พัดลมเป่ามากกว่าการนำไปวางไว้ในอากาศนิ่งๆ วิธีการนี้เรียกว่า การพา หรือเรียกว่า กระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา



รูปที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากแผ่นเรียบ [12]

พิจารณารายการให้ความร้อนแผ่นเรียบ ดังรูปที่ 3.2 อุณหภูมิของแผ่นเรียบคือ  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลคือ  $T_\infty$  ความเร็วของของไหลดังแสดงในรูป และความเร็วนี้ลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวแผ่นเรียบ เพราะเกิดจากการกระทำของค่าความหนืด เมื่อความเร็วของชั้นของของไหลที่ผนังเป็นศูนย์ ความร้อนต้องถ่ายเทด้วยการนำความร้อนที่จุดๆ นั้น ดังนั้น เราต้องคำนวณการถ่ายเทความร้อน โดยใช้สมการ (3.2) ด้วยค่าสมการนำความร้อนของของไหลและอุณหภูมิของของไหลที่ผนัง อาจมีคำถามว่าทำไม ถ้าการไหลของความร้อนเกิดขึ้นลักษณะที่เป็น การนำความร้อนในชั้นนี้ หรือเมื่อเราพูดถึงการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแล้วต้องพิจารณาค่าความเร็วของของไหลด้วยหรือ คำตอบก็คือ ค่าอุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับอัตราของของไหลที่นำความร้อนออกไป หากมีความเร็วสูงก็จะทำให้มีค่าการพาความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงด้วย ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่บริเวณผนังนั้นจะขึ้นอยู่กับสนามการไหล และต้องนำเอาความสัมพันธ์มาวิเคราะห์ร่วมกันในภายหลังปริมาณทั้งสองดังกล่าว แม้ว่าเราต้องจำกัดไกลเชิงกายภาพของการถ่ายเทความร้อนในผนังว่าเป็นกระบวนการนำความร้อน การแสดงผลกระทบรวมของการพาความร้อน เราใช้กฎของนิวตันว่าด้วยการระบายความร้อน จะได้

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (3.3)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมด ระหว่างผนังกับของไหลและพื้นที่ผิว A ปริมาณของ h เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา [12]

### 3.5.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer)

การเปรียบเทียบถึงกลไกของการนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ ตัวกลางการแผ่รังสีความร้อนนี้อาจจะถ่ายเทผ่านขอบเขตที่ต้องการ และสามารถผ่านสภาวะที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์กลไกในกรณีนี้เป็นการแผ่รังสีในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เราต้องจำกัดการพิจารณาด้วยว่าเป็นการแผ่รังสีคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องออกมาในรูปของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์จะพิจารณาว่า ตัวแผ่ความร้อนที่เป็นไอเดิล หรือวัตถุดำ (Black body) ซึ่งพลังงานถูกปล่อยออกของวัตถุเป็นสัดส่วนของอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว ดังนั้น

$$q_{emitted} = \sigma AT^4 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ และเรียกว่าค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzman Constant) มีค่าเท่ากับ  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  สมการ (3.4) เรียกว่า กฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ของการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น ส่วนอื่นเป็นประเภทของการแผ่รังสีคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอาจไม่กำหนดให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ ได้

สมการ (3.4) เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีที่ปล่อยออกไปจากผิววัตถุดำเท่านั้น การแผ่รังสีสุทธิที่เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างผิว 2 ผิว จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์แตกต่างยกกำลังสี่ เช่น

$$\frac{q_{net\_exchange}}{A} = \alpha\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.5)$$

วัตถุดำเป็นวัตถุซึ่งให้พลังงานที่แผ่รังสีออกมาเป็นไปตามกฎ  $T^4$  เราเรียกวัดุดำเพราะว่ามีผิวดำ ซึ่งชั้นบางๆ ของโลหะที่เคลือบผิวเรียกว่า ถ่านสีดำ (Carbon black) จุดนี้เป็นการประมาณพฤติกรรมเท่านั้น สำหรับผิวประเภทอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นผิวที่ทาสีหรือเรียกโลหะขัดเงาจะให้ผลด้านการแผ่รังสีพลังงานไม่มากเท่ากับวัตถุดำ อย่างไรก็ตาม การแผ่รังสีที่ปล่อยออกทั้งหมดจากวัตถุเหล่านี้ยังคงอยู่ในรูปของสัดส่วนของ  $T_1^4$  การนำไปคิดหาการแผ่รังสีออกจากผิวที่เป็นสีเท่านั้น แนะนำให้นำเอาแฟกเตอร์มาคูณกับสมการ (3.4) ที่เรียกว่าความสามารถในการปล่อย (Emissivity,  $\epsilon$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของผิวสีเท่ากับผิวดำที่เป็นไอเดิล อันที่จริงแล้วเราต้อง

คิดถึงหลักความจริงว่าการแผ่รังสีที่ออกจากผิวๆหนึ่ง ทั้งหมดนั้นคงเป็นไปไม่ได้ แต่จะเป็นจริงที่ผิวอื่นๆ เมื่อเกิดการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเคลื่อนที่ในทิศทางที่เป็นเส้นตรง และบางส่วนเกิดจากการสูญเสียไปสู่สภาวะแวดล้อม ดังนั้น เราจึงขอแนะนำแพคเกจเครื่องมืออีก 2 ตัวในสมการ (3.4) ที่นำไปคิดทั้ง 2 สภาวะ ดังนี้

$$q = F_e F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $F_e$  คือฟังก์ชันของการปล่อยรังสีออก และ  $F_G$  คือฟังก์ชันของรูปร่าง “แพคเกจของภาพ”

การแผ่รังสีในสภาวะปกคลุม (ปิด): ปัญหาการแผ่รังสีมักเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ  $T_1$  การปกคลุมด้วยพื้นที่มีขนาดใหญ่อย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ  $T_2$  ต้องคิดปริมาณการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีสุทธิที่เกิดขึ้น การคำนวณจะใช้สมการดังนี้ [12]

$$q = \varepsilon_1 \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

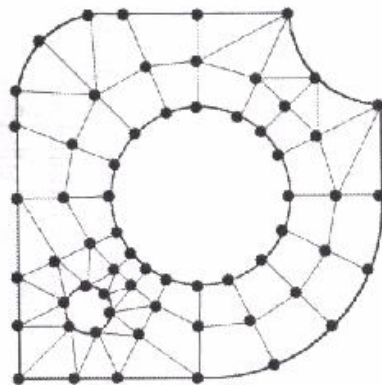
### 3.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในงานวิศวกรรม มีหลายโปรแกรม อาทิเช่น CFD-ACE+, STAR-CD, ABAQUS student, Fluent add-on Fuel Cell, ANSYS Multi-physics และ Comsol เป็นต้น

Comsol เป็นโปรแกรมที่พัฒนาจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประยุกต์ใช้ในการคำนวณทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง กลศาสตร์ของไหล การถ่ายเทความร้อน ไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้า และปฏิกิริยาเคมี

#### 3.6.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแน่นอนตรง ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยก็คือ ค่าผลเฉลยแน่นอนตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแน่นอนตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ดังเช่น แสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [13]

วิธีการดังกล่าวซึ่งป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

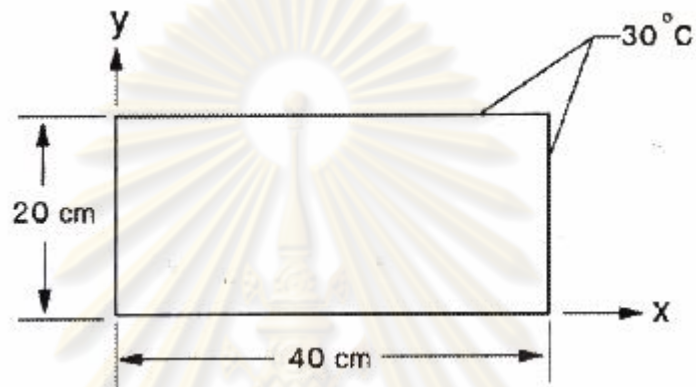
จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นนอกจากนั้น ขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณค่าภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง เป็นต้น ส่วนขนาดของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ ของเอลิเมนต์ เช่น หากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้ว อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น



สรุปคือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ ซึ่งจะประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

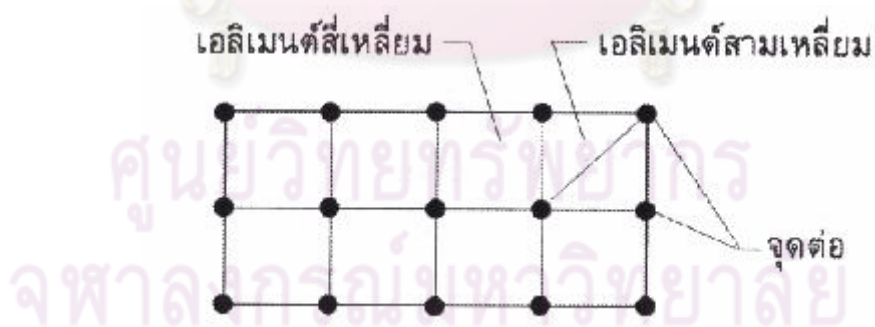
1. การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งเชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าตัวแปรตามที่ต้องการ

หากเราจะใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ กับตัวอย่างในการหาการกระจายของอุณหภูมิในแผ่นโลหะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นโลหะที่ต้องการหาการกระจายของอุณหภูมิ [13]

สิ่งแรกที่เราจำเป็นต้องดำเนินการคือ การแบ่งแผ่นโลหะนี้ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ดังเช่นรูป 3.5 โดยชิ้นส่วนย่อยๆ อาจเป็นเอลิเมนต์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมก็ได้ เป็นต้น



รูปที่ 3.5 การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งแผ่นโลหะออกเป็นเอลิเมนต์ลักษณะต่างๆ [13]

2. การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยๆ ที่แบ่งบนแผ่นเหล็กนั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ตัวไม่รู้ค่า (unknowns) จะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ (node) การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวไม่รู้ค่าที่สมมุติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่น หากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะ

การกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมุติให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นเรียบ (flat plane) เป็นต้น

3. การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่สนใจอยู่นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจากเอลิเมนต์มีขนาดไม่เท่ากัน

4. การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่ ประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกัน จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ชุดนั้นเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนค่าอุณหภูมิหากวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อน

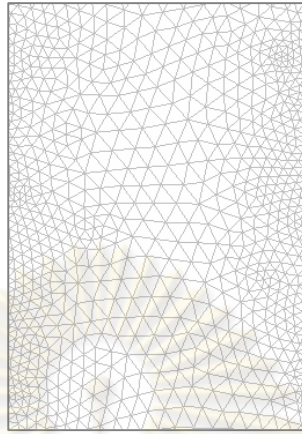
5. การคำนวณหาค่าอื่นๆ ที่เหลือ จากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการ เช่น เมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

### 3.6.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาความร้อน

การแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนมีจุดเด่นหลายประการที่มีความน่าสนใจในตัวเองเมื่อเปรียบเทียบกับปัญหาทางด้านอื่นๆ เช่น ทางด้านของแข็งหรือการไหล จุดเด่นประการแรกก็คือ การแก้ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อนนั้นค่อนข้างที่จะจำเพาะเจาะจงกล่าวคือ ตัวไม่รู้ค่าที่ต้องการคำนวณหานั้นคือ อุณหภูมิแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้ จุดเด่นประการต่อมาก็คือ การกระจายของอุณหภูมิที่ต้องการนั้นสามารถหาได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบง่ายๆ เพียงสมการเดียว และจุดเด่นประการสุดท้ายที่สำคัญก็คือ ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมินั้นสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย รวมทั้งผลลัพธ์ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่ได้นั้นสามารถตรวจสอบความถูกต้องหรือความเป็นไปได้โดยผู้ที่มีประสบการณ์ทางด้านนี้โดยไม่ยากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาทางด้านอื่นๆ เหตุผลต่างๆ เหล่านี้เองมีส่วนเป็นอย่างมากที่ทำให้การพัฒนาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นไปได้อย่างรวดเร็วถึงแม้ว่าจะเริ่มขึ้นหลังจากการพัฒนาทางด้านของแข็งก็ตาม

ประโยชน์ของการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อนนั้นมีมากมาย ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้สามารถทำการคำนวณและวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนรูปร่างที่มีลักษณะซับซ้อนได้ ผลของอุณหภูมิที่ได้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณทางด้านอื่นต่อเนื่องกันไปได้อีก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การนำการกระจายของอุณหภูมิที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณการขยายตัวและความเค้นในของแข็ง เป็นต้น [13]

ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้แต่ละเอลิเมนต์ใช้ฟังก์ชันการประมาณกำลังสอง (Lagrange-Quadratic) ในการคำนวณ และมีการวางตำแหน่งของเอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.6



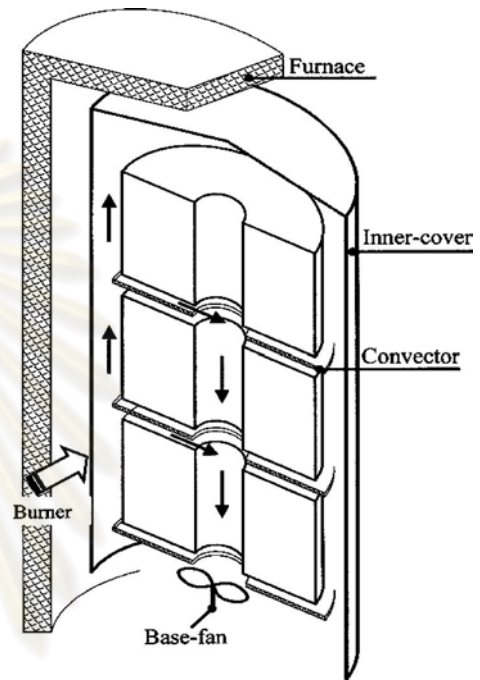
รูปที่ 3.6 การวางตำแหน่งเอลิเมนต์ของเหล็กแผ่นม้วนกลม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### กระบวนการอบอ่อนแบบกะ

#### 4.1 ส่วนประกอบหลักของเตาอบอ่อนแบบกะ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเตาอบอ่อนแบบกะ

ก) ลักษณะภายนอกของเตาอบอ่อนแบบกะ

ข) ลักษณะภายในของเตาอบอ่อนแบบกะ [5]

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะภายนอกและภายในของเตาอบอ่อนแบบกะซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้คือ

#### 1. inner-cover

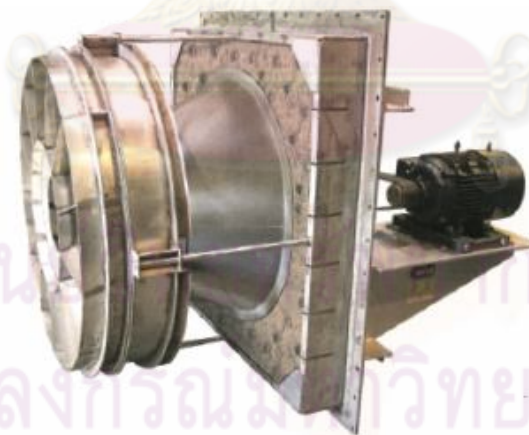
ทำหน้าที่บรรจุเหล็กแผ่นม้วนกลมและ ป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้ามาแทนที่ก๊าซไฮโดรเจน) (ก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆในเนื้อเหล็กเช่น ไม่ทำให้เหล็กเกิดออกไซด์ของโลหะ) ภายใน cover ได้



รูปที่ 4.2 ลักษณะของ inner-cover

## 2. power-fan

บริเวณฐานของเตาอบอ่อนแบบกะ จะติดตั้งพัดลม (power-fan) เพื่อทำหน้าที่ช่วยให้ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยเกิดการหมุนเวียนกระจายตัวภายใน cover ได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.3 ลักษณะของพัดลม



### 3. convectors หรือ grooved plates [6]

Convector จะทำหน้าที่ วางชั้นระหว่างเหล็กแผ่นม้วนกลมที่อยู่ติดกันดังรูปที่ 4.1 ซึ่ง convector จะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ thicker rib, flat circular plate และ concentric hole ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะของ convector

### 4. furnace (outer-cover)

เตาเผาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ ซึ่งภายในเตาเผา จะเกิดการเผาไหม้ระหว่าง ก๊าซแอลพีจี กับ อากาศ เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดความร้อน ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทเข้ามา ภายใน inner-cover

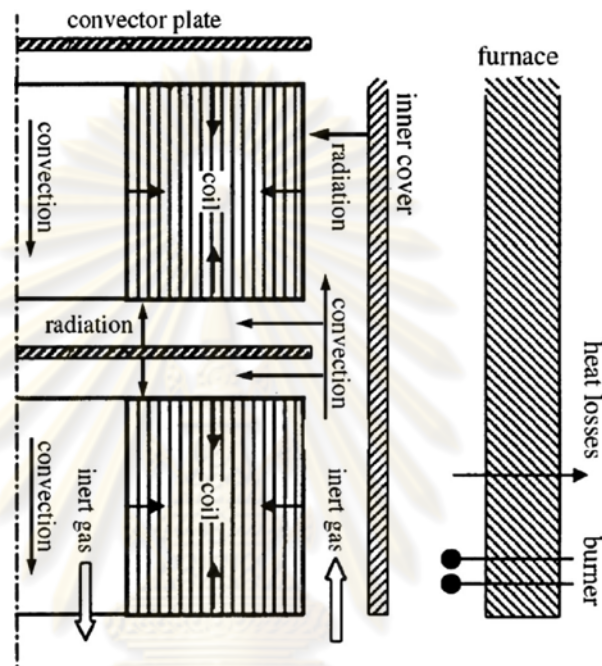
#### 4.2 หลักการทำงานของเตาอบอ่อนแบบกะ

ในกระบวนการอบอ่อน ฐานของเตาอยู่กับที่แล้วยกเหล็กแผ่นม้วนกลมประมาณ 3-4 ม้วน มาวางลงบนฐานของเตาโดยวางซ้อนกัน คั่นด้วย convector plate วางคั่นเหล็กแผ่นม้วนกลมที่อยู่ติดกัน เพื่อการพาความร้อนจะได้ดีขึ้น หลังจากนั้นครอบด้วย inner-cover ป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้ามาแทนที่ ก๊าซเฉื่อย (ก๊าซไฮโดรเจน) แล้วครอบด้วย heating cover ไล่อากาศที่อยู่ภายใน inner cover โดยการใส่ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวไล่อากาศออก และเริ่มจุดไฟ ซึ่งจะให้ความร้อนบริเวณผนังด้านนอกของ inner-cover ซึ่งจะใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยภายใน inner-cover จะมีพัดลมซึ่งจะช่วยให้ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็น ก๊าซเฉื่อยเกิดการหมุนเวียนกระจายตัวภายใน cover ได้ดี [16]

เมื่อเกิดการเผาไหม้บริเวณเตาเผาขึ้นอุณหภูมิของ inner-cover จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ และ inner-cover จะส่งผ่านความร้อนมายังเหล็กได้ 2 ทาง คือ การแผ่รังสีความร้อน และ การพา

ความร้อน โดยการเคลื่อนที่ของก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจะถูกทำให้ร้อนอย่างรวดเร็ว โดยผนังของ inner-cover จะส่งผ่านความร้อนมาทั่วทุกพื้นที่ผิวของเหล็ก

convector จะร้อนเร็วกว่า เหล็กแผ่นม้วนกลมก็เพราะว่า convector มีมวลน้อยกว่าเหล็ก ดังนั้นบริเวณ convector จะส่งผ่านความร้อนโดย การแผ่รังสีความร้อน และ rib ส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อน [6] แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

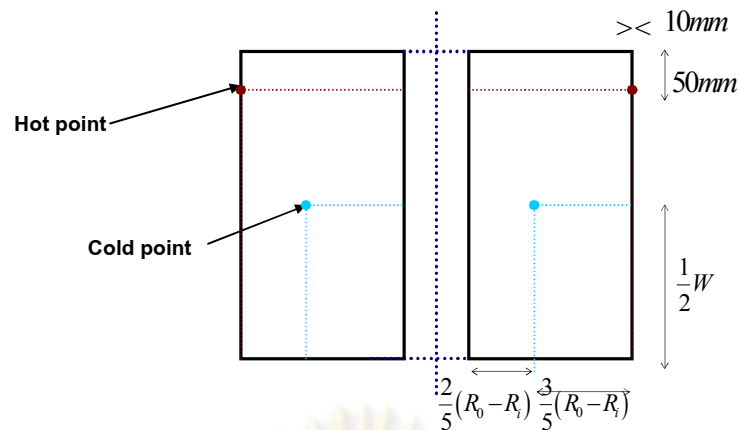


รูปที่ 4.5 การถ่ายเทความร้อนภายใน เตาอบอ่อนแบบกะ [5]

ซึ่งบริเวณระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่นที่อยู่ติดกันจะมีช่องว่างแล้วภายในจะมีส่วนของเหล็กที่สัมผัสกันและ ส่วนที่เป็นอากาศดังรูปที่ 4.5

โดยที่ก๊าซไฮโดรเจนจะเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทาง คือในแนวแกน  $z$  และแกน  $r$  ซึ่งความเร็วในทิศทางในแนวแกน  $r$  จะมีความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วในแนวแกน  $z$  มาก ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเร็วในแนวแกน  $z$  มีค่าคงที่ โดยภายในจะเกิดการถ่ายเทความร้อน ได้ 3 แบบคือการนำความร้อน ในตำแหน่งที่เหล็กอยู่ติดกัน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ของก๊าซที่อยู่บริเวณช่องว่าง

ในระหว่างกระบวนการอบอ่อนดำเนินไปจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 จุดคือตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับผิวด้านนอก (จุดร้อน) ของ เหล็กแผ่นม้วนกลมจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าตำแหน่งกึ่งกลาง (จุดเย็น) ของ เหล็กแผ่นม้วนกลมเมื่อเทียบเวลาในการอบอ่อนที่เวลาเดียวกัน [6] ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม

เมื่อได้อุณหภูมิและเวลาตามความต้องการแล้ว จะต้องดับไฟด้วยยกเอา heating cover ออก แล้วเป่าให้เย็นหรือใช้น้ำทำให้เย็นลง คือจะยกส่วนของ cooling cover ไปครอบทำการเป่าลมหรือพ่นน้ำเพื่อให้เย็นเร็วขึ้น เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วจึงยก cooling cover และ inner-cover ออกเพื่อจะยก เหล็กแผ่นม้วนกลมส่งให้กระบวนการถัดไป

ผิวด้านข้าง inner-cover จะมี 2 แบบ คือ แบบเรียบ เรียกว่า flat type และแบบผิวเป็นลอน ความยาวหรือตามขวาง เรียกว่า corrugate type ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงของโรงงานจะใช้ inner-cover แบบ ผิวที่เป็นลอนตามแนวขวาง

#### 4.2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing Cycle)

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ช่วงของการให้ความร้อน (Heating) คือหลังจากที่ครอบ heating cover ลงไปแล้วมีการจุดไฟเพื่อให้ความร้อนแล้วทำให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ดังนั้นในการจัดการวางแผนในการใช้งาน heating cover และ inner-cover ขณะที่อุณหภูมิไม่ลดต่ำลงมากจะเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากในช่วงจะเกิดการคืนตัวและการตกผลึกใหม่ขึ้นมา

2. ช่วงของการปล่อยให้อุณหภูมิในเตากระจายให้ทั่ว (ช่วงของการแช่) ช่วงนี้หลังจากอุณหภูมิของเตาได้ตามต้องการแล้วจะมีการปล่อยให้ความร้อนกระจายทั่วเตา โดยการพาความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง ตอนนี้จะเป็ช่วงของการเจริญเติบโตของเกรนได้ดี ดังนั้นช่วงนี้จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิรวมทั้งพบว่าการก่อตัวจะดีถ้าหากอุณหภูมิสูงหรือระยะเวลาในการแช่ยาวขึ้น

3. ช่วงของการทำให้เย็นตัวลง (Cooling) หลังจากทีปล่อยให้ความร้อนกระจายทั่วแล้วจะมีการปล่อยให้เย็นลงโดยการเอา heating cover ออกรวมทั้งอาจใช้ลมหรือพ่นน้ำลงไป

บน inner-cover อีกที เพื่อให้อุณหภูมิลด ช่วงนี้อุณหภูมิที่ลดจะไม่มีผลต่อโครงสร้างของเกรน โลหะโดยมากจะใช้เวลาประมาณ 35 ชั่วโมง

#### การควบคุมอุณหภูมิ

ในการควบคุมอุณหภูมิของการอบอ่อน ถ้าทำการวัดในส่วนที่ใกล้ ๆ กับตัวฐาน เรียกว่า อุณหภูมิในตำแหน่งฐาน (Base Temperature) ถ้าวัดส่วนของ Heating Cover ด้านใกล้ กับเหล็กแผ่นม้วนกลมบนสุดเรียกว่า Heating Cover Temperature แต่ในการควบคุมอุณหภูมิ ของการอบอ่อนนั้นมักจะมีเงื่อนไขอย่างอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น คุณภาพของเหล็ก ขนาดของ แผ่นเหล็ก น้ำหนักของแผ่นเหล็ก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้รูปแบบกระบวนการอบอ่อน อาจแตกต่างกันออกไปทั้งนี้เพื่อที่จะพยายามรักษาคุณภาพของเหล็กไว้ให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี

#### เงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิของการอบอ่อน

ดังที่ได้กล่าวแล้วอุณหภูมิของการอบอ่อนจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างและ คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ ดังนั้นในการทำงานจริงพบว่า อุณหภูมิของเตาภายในจะไม่สม่ำเสมอ เท่ากันทุกจุด เพื่อต้องการที่จะรักษาคุณสมบัติเชิงกลของโลหะให้ดีจึงต้องพยายามควบคุม อุณหภูมิในแต่ละจุดที่แตกต่างกันให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นส่วนของจุด Heating Cover Temperature หรือจุดอุณหภูมิในตำแหน่งฐาน [16]

#### 4.2.2 ขั้นตอนปฏิบัติของการอบอ่อน

ม้วนของเหล็กจะถูกยกโดยเครนยกแบบแม่เหล็ก จากนั้นนำมาวางบนตัวฐาน ซึ่งมี Convecter Plate ตัวด้านล่างสุด ซึ่งมีฐานรองรับคือตัวกระจายความร้อน (Diffuser) อยู่กึ่งกลาง หลังจากนั้นวางม้วนเหล็กแล้วทับม้วนเหล็กด้วย Convecter Plate ตัวกลางเพื่อให้มีการกระจาย ความร้อนเป็นไปด้วยดี หลังจากนั้นวางม้วนเหล็กลงไปอีกทำอย่างนี้จนซ้อนม้วนเหล็กได้ 4-5 ม้วน จึงวาง Convecter Plate ตัวด้านบนสุด ทับข้างบนอีกครั้ง บางแบบ Convecter Plate ตัวด้านบนสุด ติดด้วยชุดของ Heating Cover อีกครั้งหนึ่ง ต่อไปจะเป็นขั้นตอนการให้ความร้อน

เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเหล็กและอากาศจึงต้องทำการ ไล่อากาศ (Purge) ด้วยก๊าซไนโตรเจนก่อน หลังจากนั้นจึงปล่อยก๊าซเข้าไปใน inner-cover เพื่อให้ เป็นตัวพาความร้อนโดยมากนิยมก๊าซไนโตรเจน 94 % ผสมกับไฮโดรเจน 6% เป็นตัวพาความร้อน ใน inner-cover แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษาที่จะใช้ก๊าซไฮโดรเจน 100% เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป หลังจากบรรจุก๊าซใน inner-cover แล้วจึงทำการจุดไฟ เพื่อให้ความร้อนกับ inner-cover ในกรณีของก๊าซไฮโดรเจนนั้นจะติดไฟง่าย เพื่อป้องกันอันตรายจึงต้องมีการตรวจการ รั่วไหลของก๊าซไฮโดรเจนอย่างละเอียดก่อนที่จะจุดไฟ จากชุด Heating Cover จะทำให้เกิดการแผ่ ความร้อนจากตัวของ inner-cover ไปสู่ตัวม้วนเหล็กซึ่งจะทำให้ม้วนเหล็กมีอุณหภูมิประมาณ 650-750 °C แล้วเกิดกระบวนการอบอ่อนขึ้นมาได้



หลังจากอบได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วจะทำการดับไฟลง ชุด Heating Cover จึงถูกยกออกแล้วจะสวมชุดของ Cooling Cover เข้าไปแทน รวมทั้งจะทำการพ่นน้ำหรือเป่าลม เพื่อให้เกิดการเย็นตัวจนอุณหภูมิของ inner-cover จะประมาณ  $120^{\circ}\text{C}$  จึงหยุดการพ่นน้ำ

ขบวนการสุดท้ายคือ การยก inner-cover ออกจะยกออกเมื่ออุณหภูมิของม้วนเหล็กตกประมาณ  $70^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า พร้อมกับยกม้วนเหล็กไปเก็บในส่วนของลานเก็บเหล็กแผ่นม้วนกลม (Coil Cooling Yard) [16]

#### 4.2.3 ข้อจำกัดในการนำม้วนเหล็กเข้ากระบวนการผลิต

การนำม้วนเหล็กเข้าเตาอบนั้น จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและช่วงเวลาการอบเหมือนกันภายใน 1 เตา ดังนั้น การนำม้วนเหล็กเข้าอบจึงควรคำนึงถึงเงื่อนไข เช่น ความหนา น้ำหนัก ควรจะใกล้เคียงกัน ข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ห้ามนำม้วนเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกต่างกันเกิน 400 ม.ม. เข้าตู้เดียวกันรวมทั้งการวางม้วนเหล็กควรวางม้วนที่เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกมากไว้ล่างสุด เพื่อให้การทรงตัวของม้วนเหล็กอยู่ในสภาพดี

ในกรณีที่ต้องเอาม้วนเหล็กที่อุณหภูมิและช่วงเวลาในการอบต่างกันเข้าตู้เดียวกัน จำเป็นจะต้องพิจารณาใช้อุณหภูมิที่สูงสุดและช่วงเวลาในการให้ความร้อนกระจาย (เวลาในการแช่) เป็นตัวกำหนดทั้งนี้เพื่อให้คุณสมบัติเชิงกลออกมาดี

ข้อได้เปรียบของกระบวนการอบอ่อนโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน 100 % เป็นตัวพาความร้อน ได้แก่

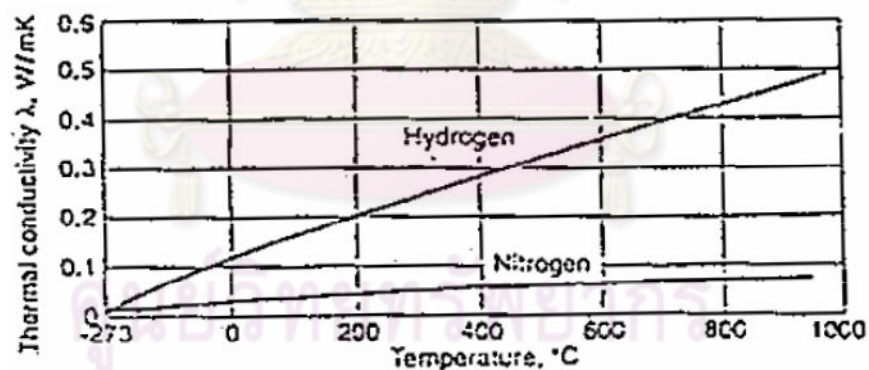
1. 100% hydrogen atmosphere: จะมีค่าการพาความร้อนสูงกว่าของก๊าซไฮโดรเจนที่มีก๊าซไนโตรเจนปะปนอยู่
2. High conversion: จะช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนและความเย็นของกระบวนการอบอ่อนมีผลทำให้ ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน
3. Vacuum exhaust system: เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาความร้อนที่ดี ทำให้ ระบบขับไอเสียในเตาเผาทำงานได้สะดวกขึ้น
4. High heat conductivity: ค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน 100 % มีค่าสูง
5. Low oxygen: ภายใน inner-cover มีก๊าซออกซิเจนต่ำมากหรือแทบไม่มีเลย ซึ่งก๊าซออกซิเจนจะเป็นก๊าซที่ทำให้เหล็กเกิดสนิม
6. Low dew point: จุด dew point ต่ำ
7. Atmosphere not including nitrogen: ภายในระบบปราศจากองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน
8. Quick removal of oil



9. Improved productivity: ทำให้ผลผลิตมีค่าสูงขึ้น
10. Uniform heating
11. Energy saving: ประหยัดพลังงาน
12. Improved surface quality: ปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวเหล็กให้ดีขึ้น
13. Prevention of decarbonization: ป้องกันการเกิดปฏิกิริยา decarbonization
14. Prevention of nitriding: ป้องกันการเกิด nitriding

ตามที่กล่าวมาแล้วในปัจจุบันนี้ ภายใต้ Inner-cover นิยมใช้ก๊าซไนโตรเจน 94% ผสมกับไฮโดรเจน 6% เป็นตัวพาความร้อนไปกระจายในแต่ละชั้นม้วนเหล็ก ต่อมาพบว่าไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ จึงได้ทำการศึกษาโดยการใส่ไฮโดรเจนเป็นตัวพาความร้อนแทน ซึ่งวิธีการนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับ TCRSS (บริษัทเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด (มหาชน))

จากการทดลองพบว่า การพาความร้อนของไฮโดรเจนก๊าซนั้นมีความสามารถสูงกว่าการพาความร้อนของก๊าซไนโตรเจนประมาณ 6.5 เท่า รวมทั้งพบว่าถ้าหากใช้ก๊าซไฮโดรเจน 100% เป็นตัวพาความร้อนแล้วจะทำให้ลดเวลาของช่วงการให้ความร้อนลง 5% และลดเวลาในการเย็นตัวลง 10% ดังนั้น จึงเป็นการประหยัดพลังงานได้มาก ดังนั้นต่อมาจึงมีการพัฒนาและนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้มากขึ้น แต่ในแง่ที่การพิจารณา คือ การควบคุมการใช้ ถ้าหากประมาณหรือรู้เท่าไม่ถึงการณ์อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย [16]



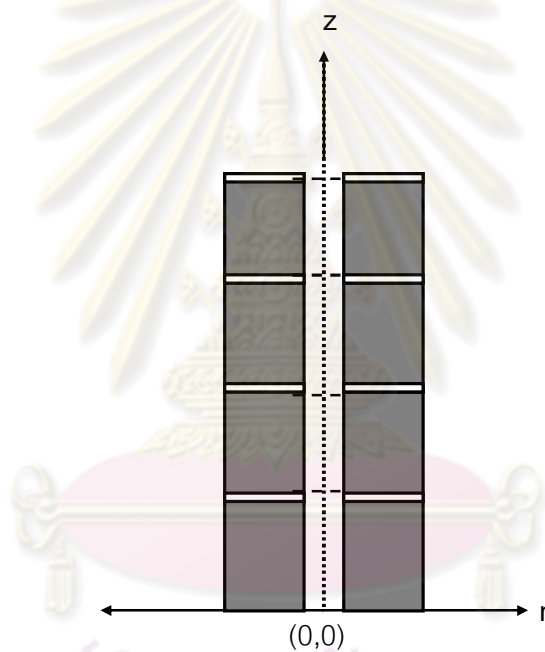
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจน [16]

## บทที่ 5

### แบบจำลองคณิตศาสตร์

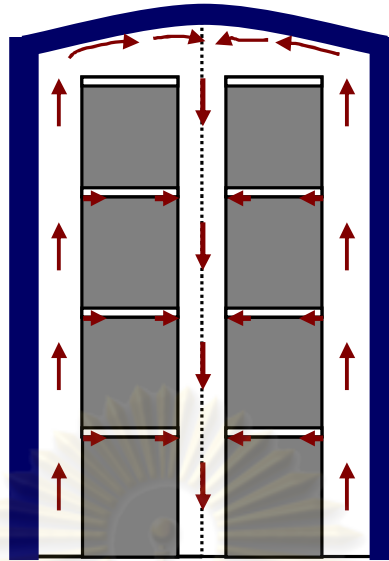
#### 5.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ภายในเตาอบอ่อนแบบกะ มีกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนจาก inner cover สู่อากาศไฮโดรเจนและถ่ายเทความร้อนต่อไปยังเหล็กแผ่นม้วนกลม ซึ่งกระบวนการการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการเชิงพลวัต โดยกำหนดให้การกระจายตัวของอุณหภูมิ เป็นไปในรูปแบบ สองมิติสมมาตรตามแนวแกน  $r$  และ  $z$  ดังรูปที่ 5.1 โดยที่เหล็กแต่ละม้วนจะถูกคั่นด้วย convector plate ซึ่งแกน  $r$  จะเป็นความกว้าง และ แกน  $z$  จะเป็นความสูง



รูปที่ 5.1 เหล็กแผ่นม้วนกลม (สองมิติสมมาตรตามแนวแกน  $r$  และ  $z$ )

ภายในเหล็กไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน ซึ่งภายในกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาการถ่ายเทพลังงานทั้งหมด 3 แบบ คือ 1. การนำความร้อน (Conduction) 2. การพาความร้อน (Convection) และ 3. การแผ่รังสีความร้อน (radiation) และมีทิศทางการไหลของก๊าซไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ทิศทางการไหลของก๊าซไฮโดรเจนภายในเตาอบอ่อนแบบกะ

จากรูปที่ 5.2 ก๊าซไฮโดรเจนจะเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทาง คือในแนวแกน z และแกน r ซึ่งความเร็วในทิศทางในแนวแกน r จะมีความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วในแนวแกน z มาก ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเร็วในแนวแกน z มีค่าคงที่ ซึ่งความเร็วของก๊าซไฮโดรเจนไม่เปลี่ยนแปลง โดยที่ภายในกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง คือ

### 1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเหล็กแผ่นม้วนกลม

จากสมการสมดุลพลังงาน ในแนวพิกัดทรงกระบอก

$$\rho_s C_{p,s} \left( \frac{\partial T_s}{\partial t} + V_r \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T_s}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (k_\theta \frac{\partial T_s}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_s}{\partial z}) \right] - \left[ \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right]_p \frac{Dp}{Dt} - (\tau : \nabla v) \quad (5.1)$$

สมมติฐาน

1.  $\rho_s$  = ความหนาแน่นของเหล็กแผ่นม้วนกลมมีค่าคงที่
2.  $V_r, V_\theta, V_z = 0$ ; เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของเหล็กแผ่นม้วนกลม
3.  $\frac{\partial T_{\theta,s}}{\partial \theta} = 0$ ; ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเหล็กแผ่นม้วนกลมในแนวแกน  $\theta$
4.  $\left[ \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right]_p \frac{Dp}{Dt} = 0$ ; เนื่องจากเหล็กมีสถานะเป็นของแข็ง (stationary solid)
5.  $\tau : \nabla v = 0$ ; เนื่องจากเหล็กไม่มีการเคลื่อนที่ ( $v = 0$ )

จากสมมติฐานข้างต้นจะได้สมการ

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_s}{\partial z}) \quad (5.2)$$

โดยที่  $T_s$  คือ อุณหภูมิของแผ่นเหล็กมวลกลม (K),  $\rho_s$  คือค่าความหนาแน่นของเหล็กแผ่นมวลกลม ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_{p,s}$  คือค่าความจุความร้อนของเหล็กแผ่นมวลกลม ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ),  $k_r$  และ  $k_z$  คือค่าการนำความร้อนในแนวแกนรัศมีและในแนวแกน  $z$  ของเหล็กแผ่นมวลกลม ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) เนื่องจากเหล็กแผ่นมวลกลมประกอบด้วยชั้นของแผ่นเหล็กจำนวนมาก เรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ดังนั้นในการคำนวณ ค่าสมบัติต่างๆ จะต้องใช้วิธี statistical analysis regression ของ Chen และ Gu [3] ซึ่งค่าการนำความร้อนในแนวแกน  $z$  ( $k_z$ ) จะเป็นไปตามสมการที่ 5.3

$$k_z = 59.66 - 0.037T_s \quad (5.3)$$

ค่าการนำความร้อนในแนวรัศมี ( $k_r$ ) จะเป็นไปตามสมการที่ 5.4 [3]

$$k_r = k_z (0.0833 \times (t_s - 0.5) + 0.25) \quad (5.4)$$

ค่าความจุความร้อนของเหล็กแผ่นมวลกลม ( $C_{p,s}$ ) จะมีค่าไปตามสมการที่ 5.5 [3]

$$C_{p,s} = (0.448 + 4.492 \times 10^{-4} T_s) \times 10^{-3} \quad (5.5)$$

โดยที่ค่า  $T_s$  คือ อุณหภูมิของแผ่นเหล็กมวลกลม (K),  $t_s$  คือ ความหนาของแผ่นเหล็กแผ่นมวลกลม (mm)

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของก๊าซไฮโดรเจน

จากสมการ (5.1) จากสมการสมดุลพลังงาน ในแนวพิกัดทรงกระบอก

$$\rho_h C_{p,h} \left( \frac{\partial T_h}{\partial t} + V_r \frac{\partial T_h}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T_h}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T_h}{\partial z} \right) = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rh} r \frac{\partial T_h}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (k_{\theta h} \frac{\partial T_h}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zh} \frac{\partial T_h}{\partial z}) \right] - \left[ \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right]_p \left( \frac{Dp}{Dt} \right) - (\tau : \nabla v)$$

สมมุติฐาน

1.  $V_\theta = 0$ ; ไม่มีการเคลื่อนไหวยาวของก๊าซไฮโดรเจนในแนวแกน  $\theta$
2.  $\frac{\partial T_h}{\partial \theta} = 0$ ; ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในแนวแกน  $\theta$
3.  $\frac{Dp}{Dt} = 0$ ; ความดันในระบบมีค่าคงที่
4.  $\tau : \nabla v = 0$ ; ความเร็วของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าคงที่ตามแนวแกน

จากสมมุติฐานข้างต้นจะได้สมการ

$$\rho_h C_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + \rho_h C_{p,h} \left[ V_r \frac{\partial T_h}{\partial r} + V_z \frac{\partial T_h}{\partial z} \right] = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rh} r \frac{\partial T_h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zh} \frac{\partial T_h}{\partial z}) \right] \quad (5.6)$$

$$\rho_h C_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rh} r \frac{\partial T_h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zh} \frac{\partial T_h}{\partial z}) \right] - \rho_h C_{p,h} u_h \nabla T_h \quad (5.7)$$

โดยที่ค่า  $\rho_h$  คือความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_{p,h}$  คือค่าความจุความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ),  $T_h$  คือ อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (K),  $u_h$  คือ ความเร็วของก๊าซไฮโดรเจนในแนวแกน r ( $V_r$ ) และในแนวแกน z ( $V_z$ ) (m/s) และค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่าเท่ากันในแนวแกน r และในแนวแกน z ( $k_{rh} = k_{zh} = k_h$ )

โดยค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ของ Chen และ Gu [3] จะมีค่าเท่ากับ

$$k_h = 0.171 + 5.245 \times 10^{-4} T_h \quad (5.8)$$

ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบอ่อนแบบกะจะใช้สมการ 5.2 -5.8 และจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยเงื่อนไขขอบเขตที่พิจารณาคือ

#### เงื่อนไขขอบเขต

1. ตำแหน่ง  $R = R_0$ ;  $k_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_{cnv}(V_h, T_h, T_{surf}) + q_{rad}(T_{surf}, T_{wall})$
2. ตำแหน่ง  $R = R_i$ ;  $k_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_{cnv}(V_h, T_h, T_{surf})$
3. ตำแหน่ง  $Z = 0, h$ ;  $k_z \frac{\partial T}{\partial Z} = q_{cnv}(V_h, T_h, T_{surf}) + q_{rad}(T_{convector}, T_{surf}) + q_{cnd}(T_{convector}, T_{surf})$

โดยที่  $q_{cnd}$ ,  $q_{cnv}$  และ  $q_{rad}$  คือพลังงานความร้อนของค่าการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน จากเงื่อนไขขอบเขตในตำแหน่ง  $R = R_0$  (ผิวด้านนอกของเหล็กแผ่นม้วนกลม) จะมีการถ่ายเทพลังงาน 2 แบบ คือ การพาความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน และการแผ่รังสีความร้อนของผนัง inner cover ในตำแหน่ง  $R = R_i$  (ผิวด้านในของเหล็กแผ่นม้วนกลม) มีการถ่ายเทความร้อนแบบ การพาความร้อน ส่วนในตำแหน่งขอบด้านบนและขอบด้านล่างจะมีการถ่ายเทพลังงาน 3 แบบ คือ การนำความร้อนระหว่าง convector plate กับ ผิวของเหล็กแผ่นม้วนกลม การพาความร้อนจากการเคลื่อนที่ของก๊าซไฮโดรเจน และการแผ่รังสีความร้อนระหว่าง convector plate กับ ผิวของเหล็กแผ่นม้วนกลม



## บทที่ 6

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในบทที่ 6 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยจะกล่าวถึงหัวข้อหลักๆ ดังนี้คือ

- ผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม
- เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้จริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น และ อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6]
- ศึกษาจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก
- ออกแบบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อน

งานวิจัยนี้จะศึกษาเหล็กแผ่นม้วนกลมที่อบในเตาอบอ่อนแบบกะ จะประกอบไปด้วย เหล็กแผ่นม้วนกลมจำนวน 4 ชนิดได้แก่ code A, code B, code C, code D โดยมีลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามตารางที่ 6.1, 6.2, 6.3 และ 6.4 ดังนี้ คือ

ตาราง 6.1 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

ตำแหน่ง	น้ำหนัก (ตัน)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)
1. bottom	20.54	2.07	1224	1758
2. middle 1	20.37	2.07	1224	1752
3. middle 2	19.40	0.93	1224	1715
4. top	19.16	0.93	1224	1706

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 6.2 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

ตำแหน่ง	น้ำหนัก (ตัน)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)
1. bottom	20.73	0.722	1225	1765
2. middle 1	20.61	0.722	1225	1760
3. middle 2	19.84	0.722	1225	1731
4. top	19.31	0.722	1225	1711

ตาราง 6.3 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

ตำแหน่ง	น้ำหนัก (ตัน)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)
1. bottom	21.06	1.10	1223	1779
2. middle 1	21.88	1.10	1223	1809
3. middle 2	20.66	1.15	1223	1764
4. top	20.82	1.15	1223	1770

ตาราง 6.4 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

ตำแหน่ง	น้ำหนัก (ตัน)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)
1. bottom	24.26	1.00	1223	1894
2. middle 1	24.08	1.00	1223	1888
3. middle 2	23.57	1.10	1223	1870
4. top	23.63	1.10	1223	1872

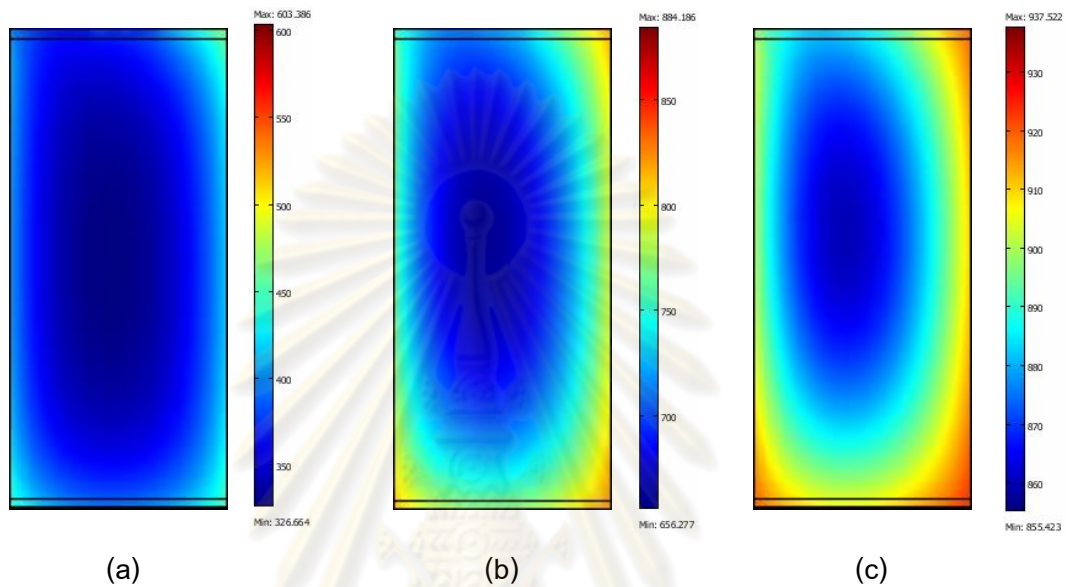
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.1 ผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม

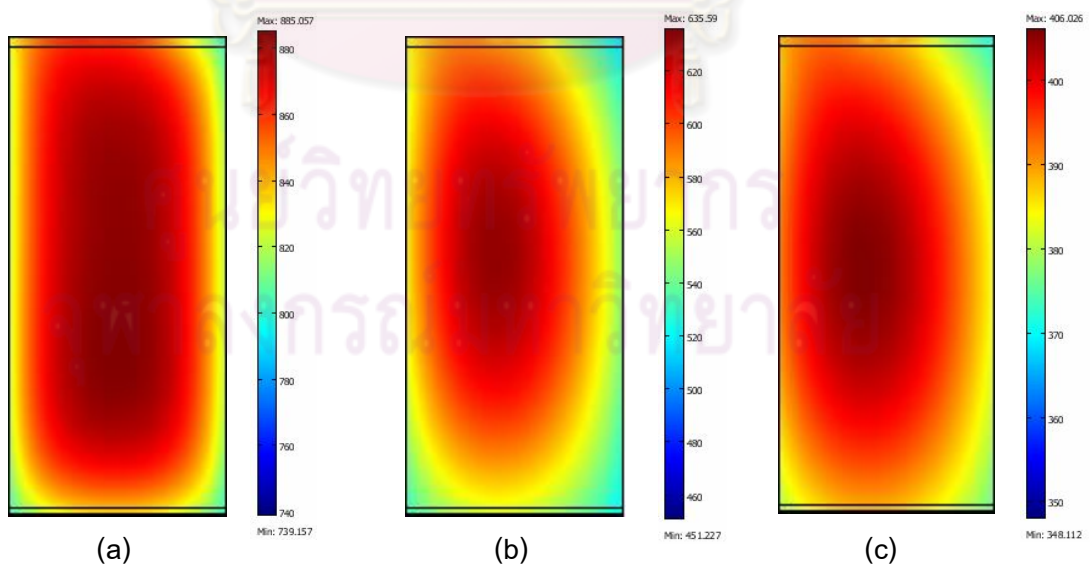
ในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลมจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่สี่ต่างๆ บ่งบอกถึงอุณหภูมิ (K) ของแผ่นเหล็ก แกน X คือ ผลต่างของรัศมีภายนอกและภายใน ( $R_o-R_i$ ) และ Y คือ ความสูงของแผ่นเหล็ก ซึ่งมีผลการทำนาย ณ เวลาต่างๆ ดังนี้คือ

### 6.1.1 ผลการทำนายอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

- ตำแหน่ง bottom

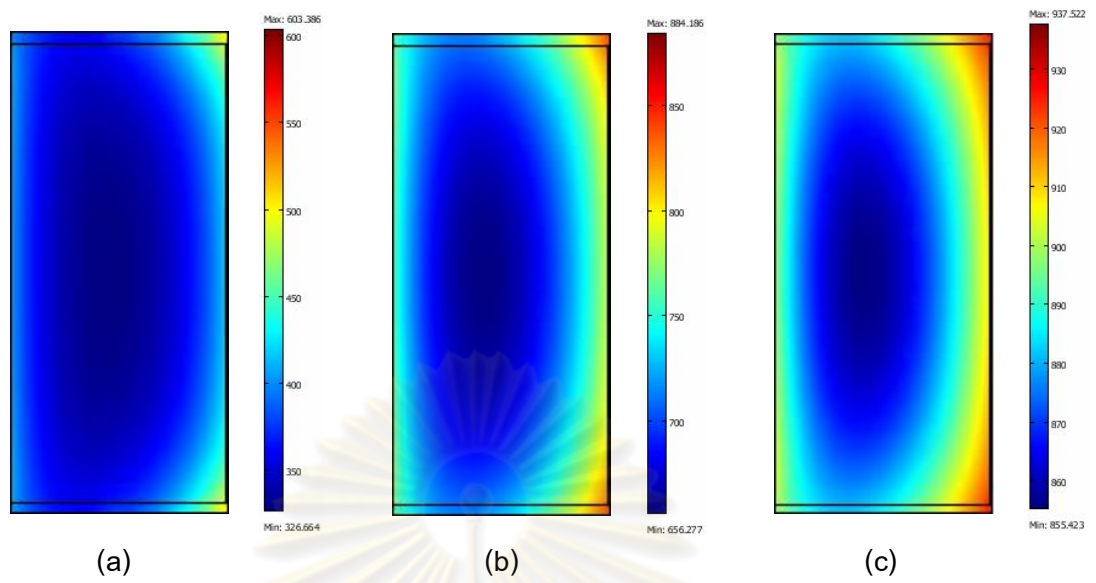


รูปที่ 6.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง

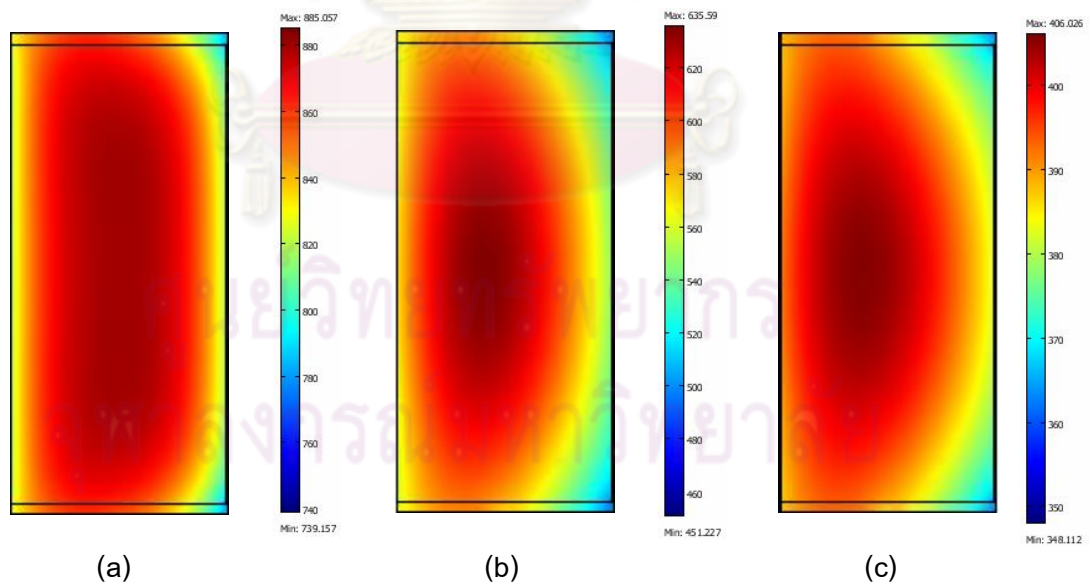


รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง

- ตำแหน่ง middle 1

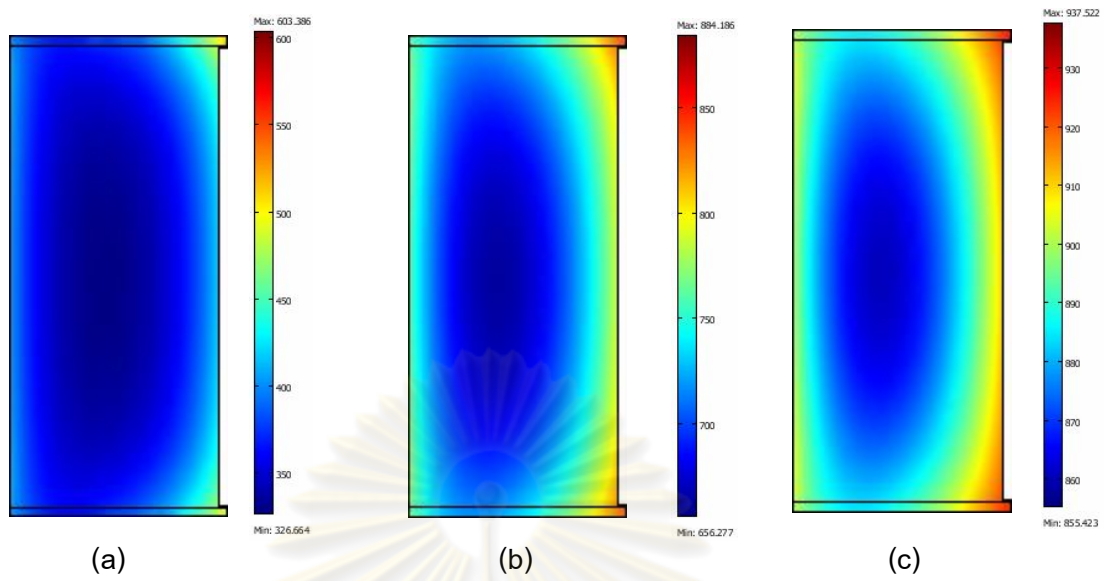


รูปที่ 6.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง

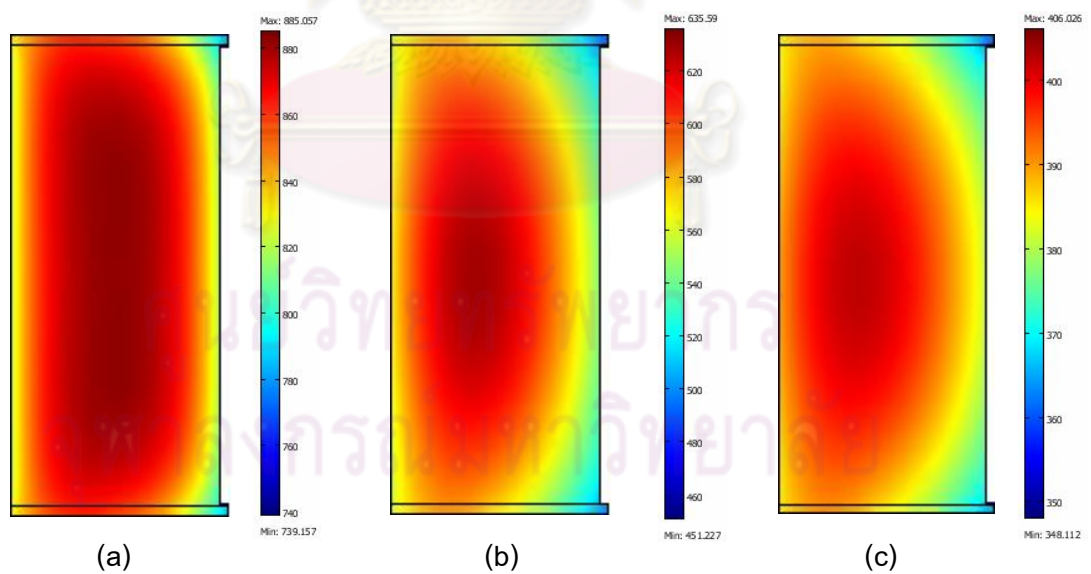


รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 2

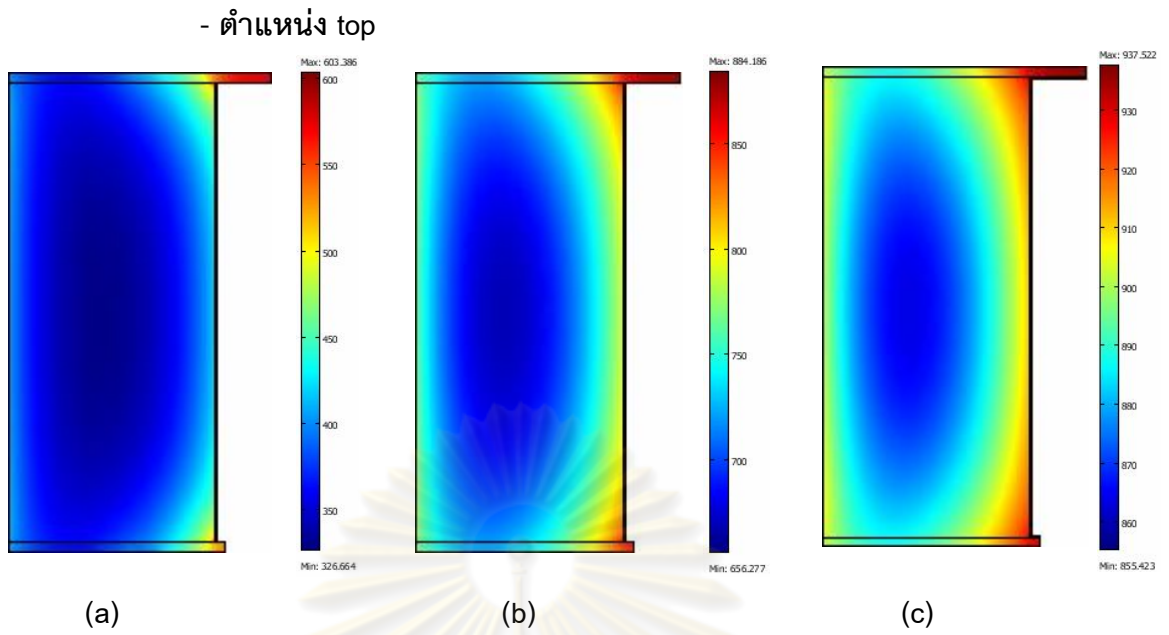


รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง

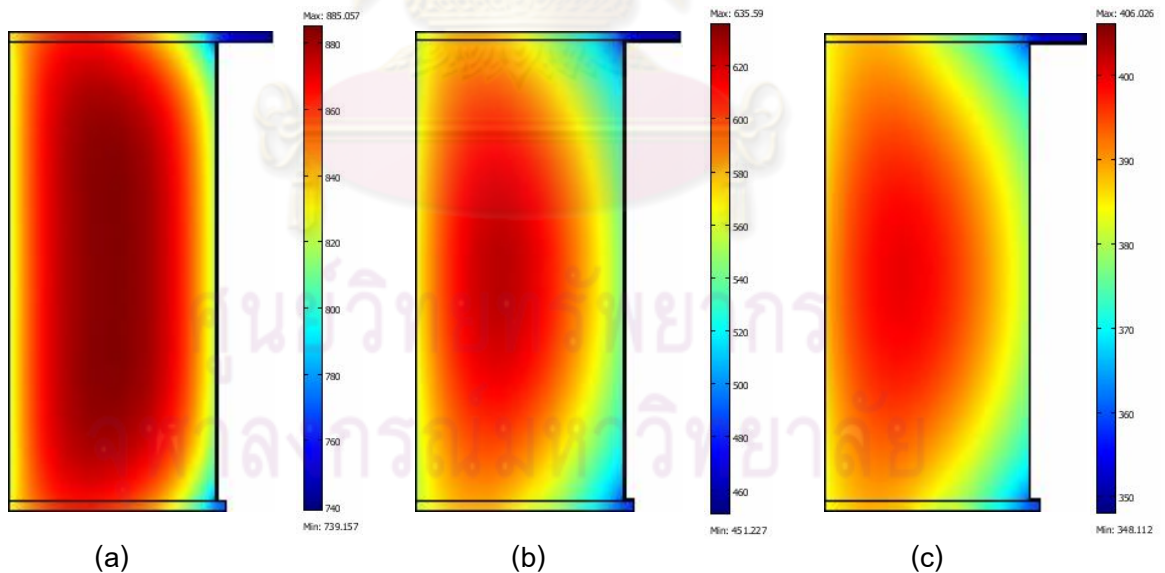


รูปที่ 6.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง

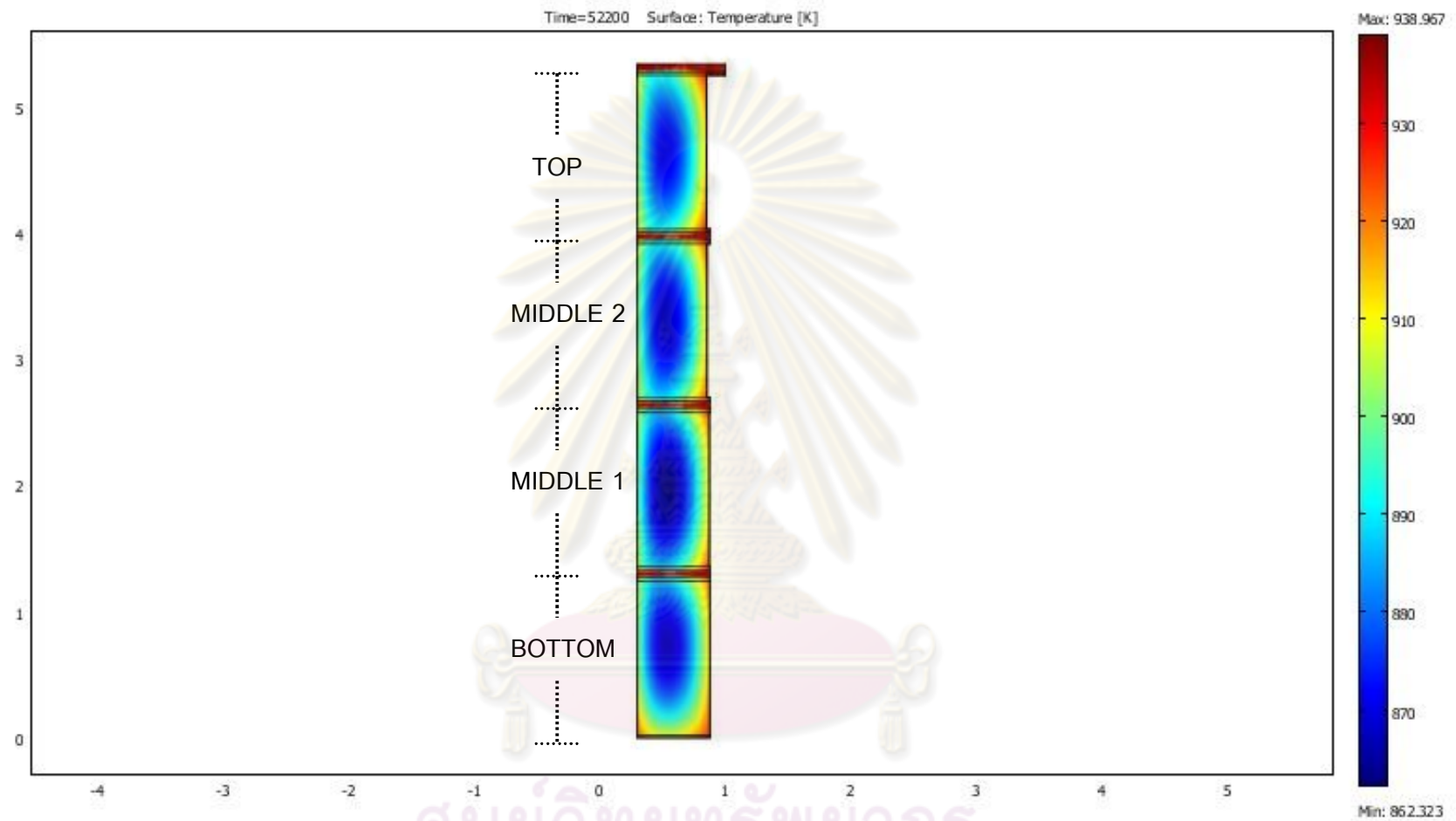




รูปที่ 6.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 7 ชั่วโมง, c) เวลา 14 ชั่วโมง



รูปที่ 6.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 17 ชั่วโมง, b) เวลา 25 ชั่วโมง, c) เวลา 35 ชั่วโมง

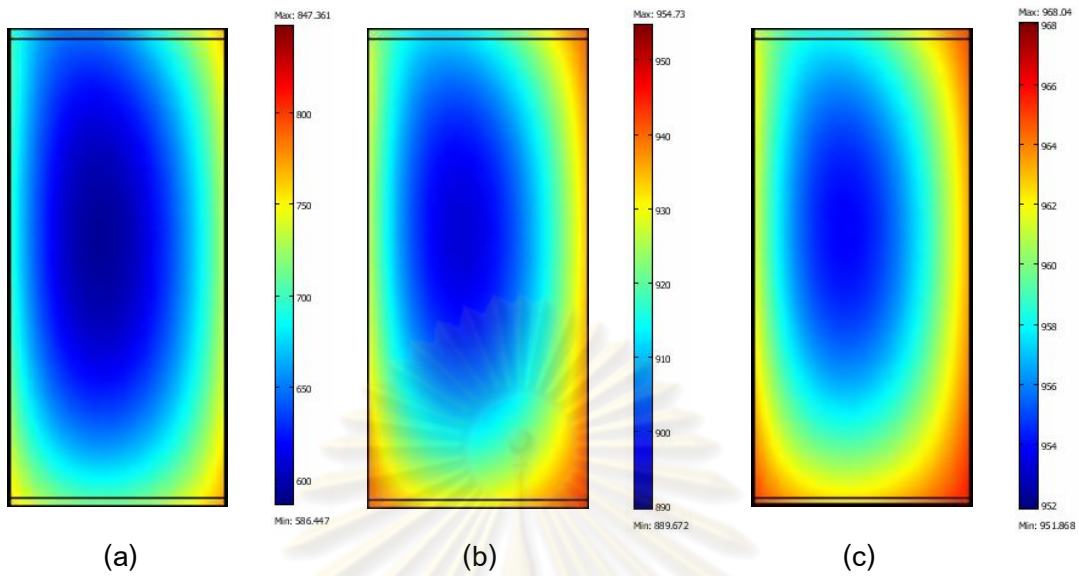


รูปที่ 6.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 14.5 ชั่วโมง (all position)

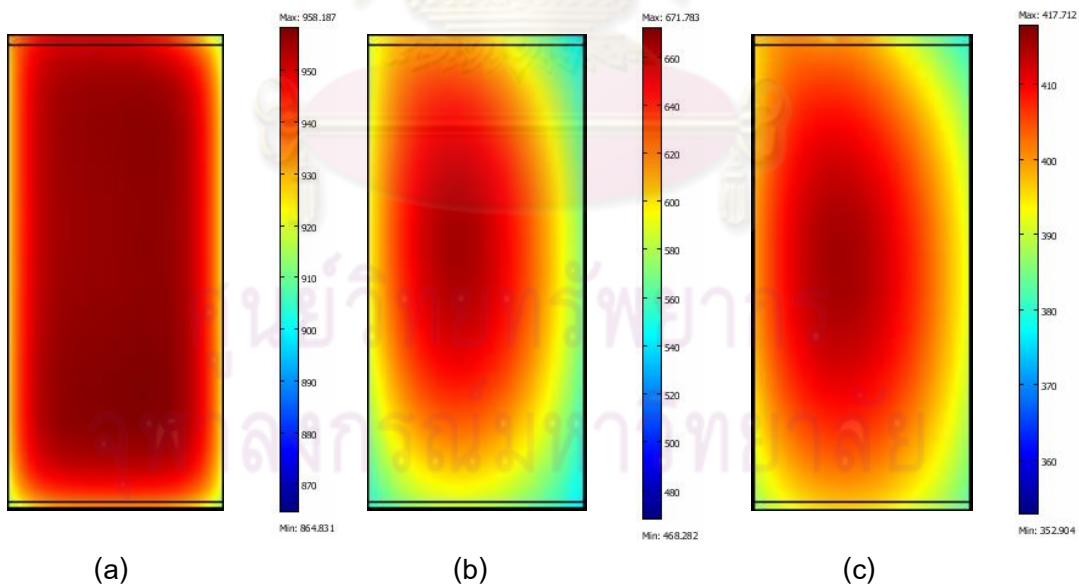
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.1.2 ผลการทำนายอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

- ตำแหน่ง bottom

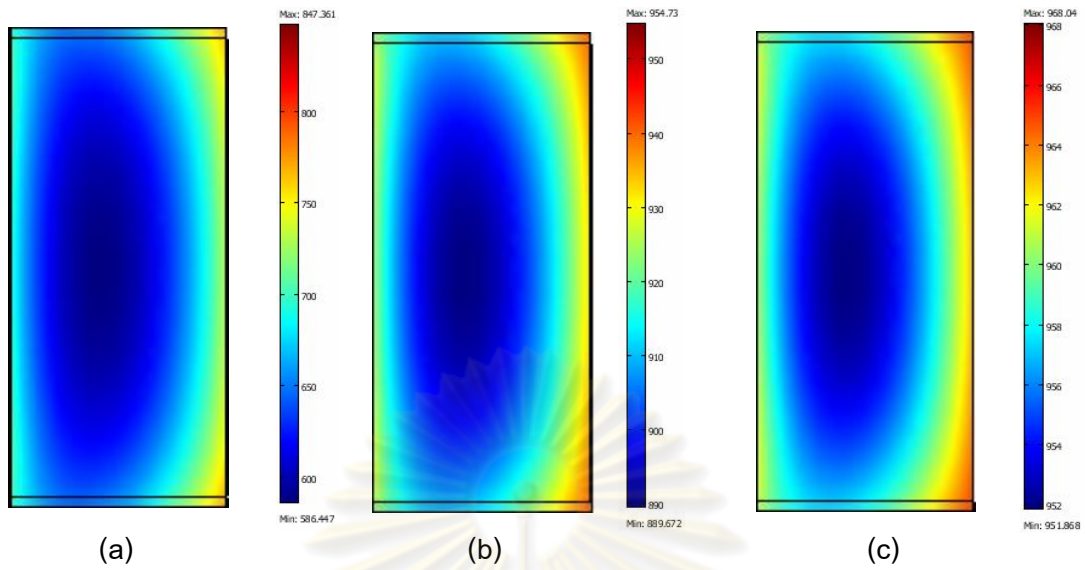


รูปที่ 6.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง

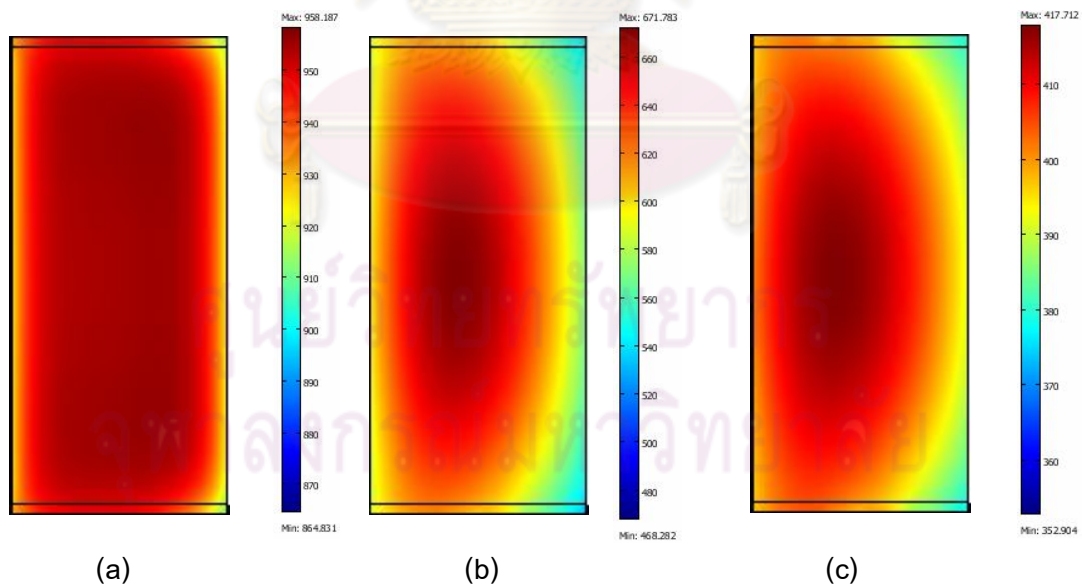


รูปที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 1

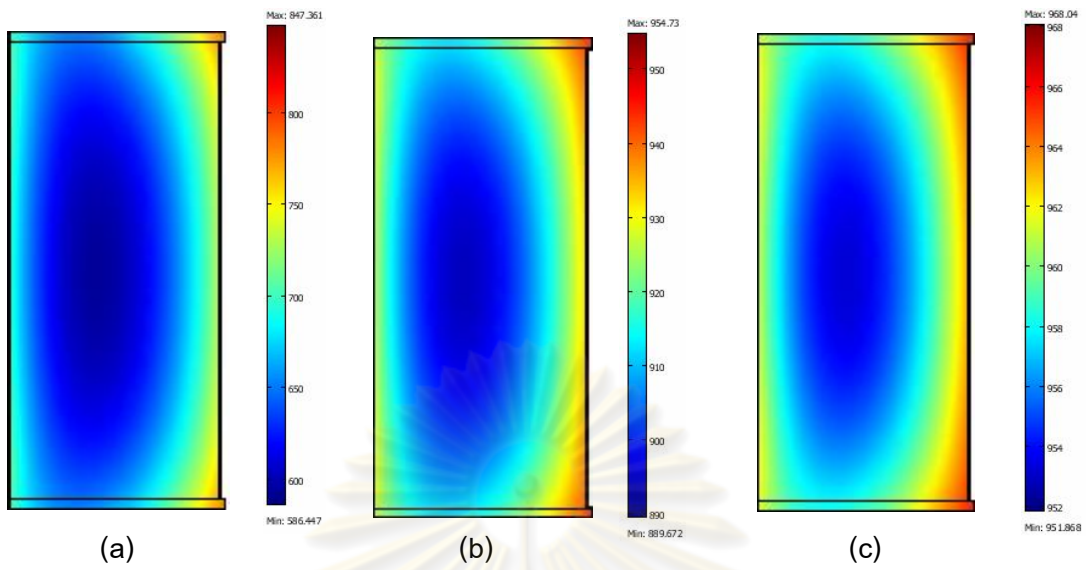


รูปที่ 6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง

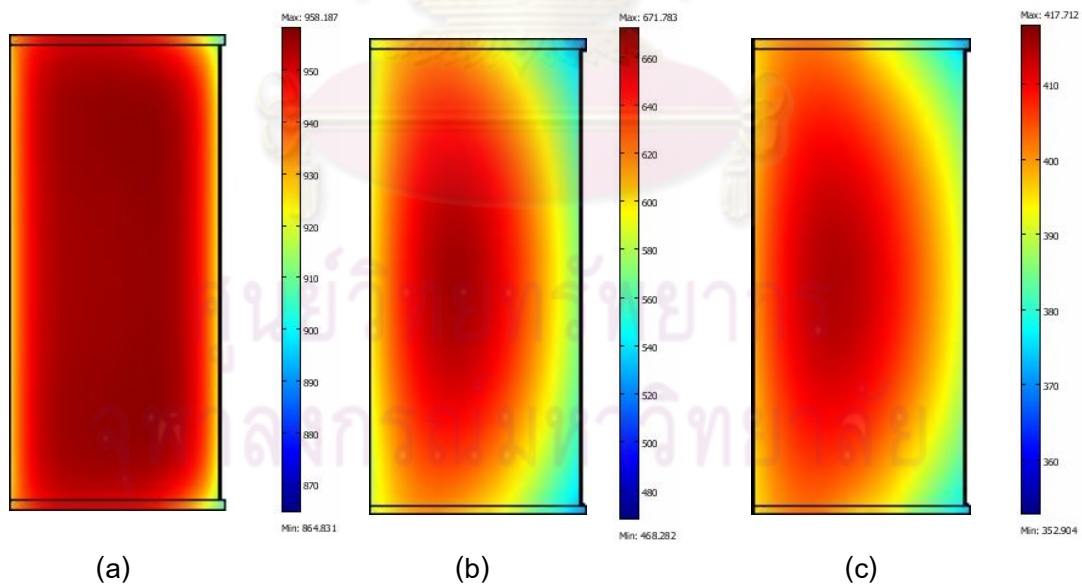


รูปที่ 6.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลมในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 2



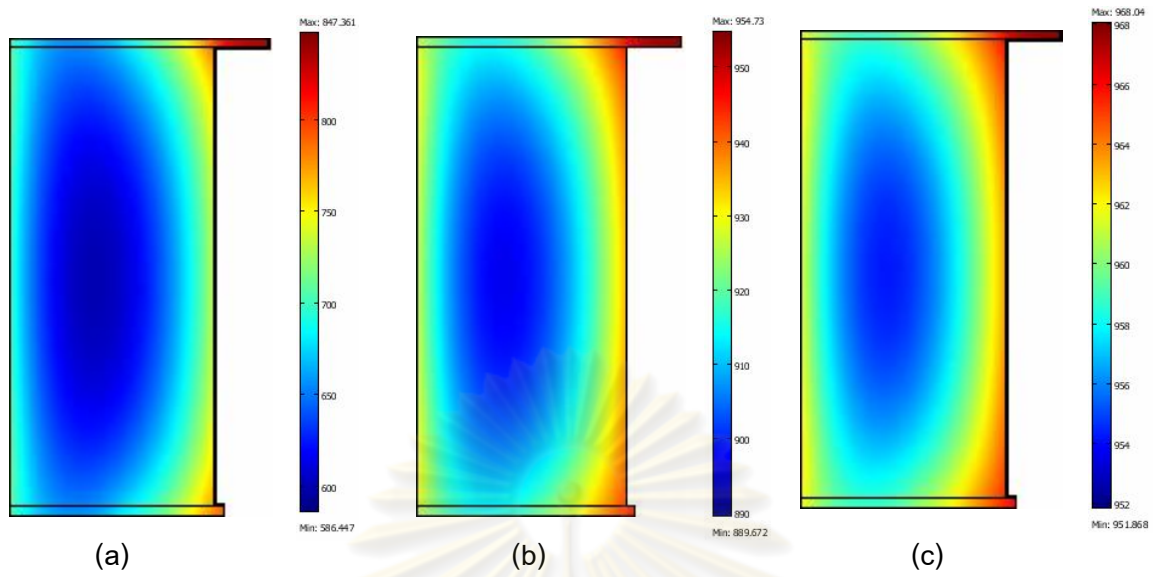
รูปที่ 6.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง



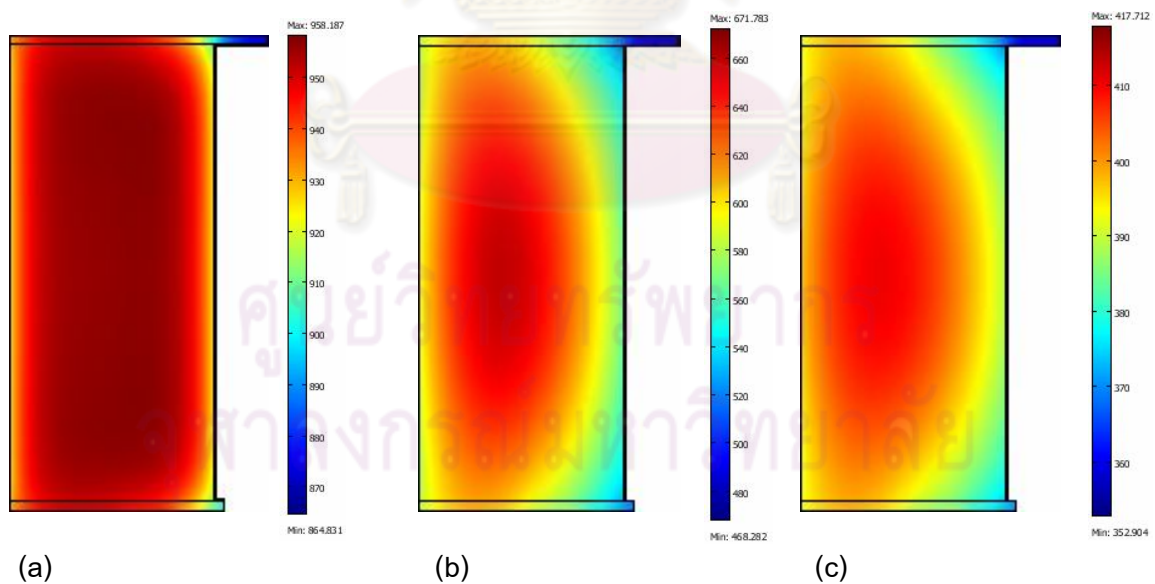
รูปที่ 6.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง



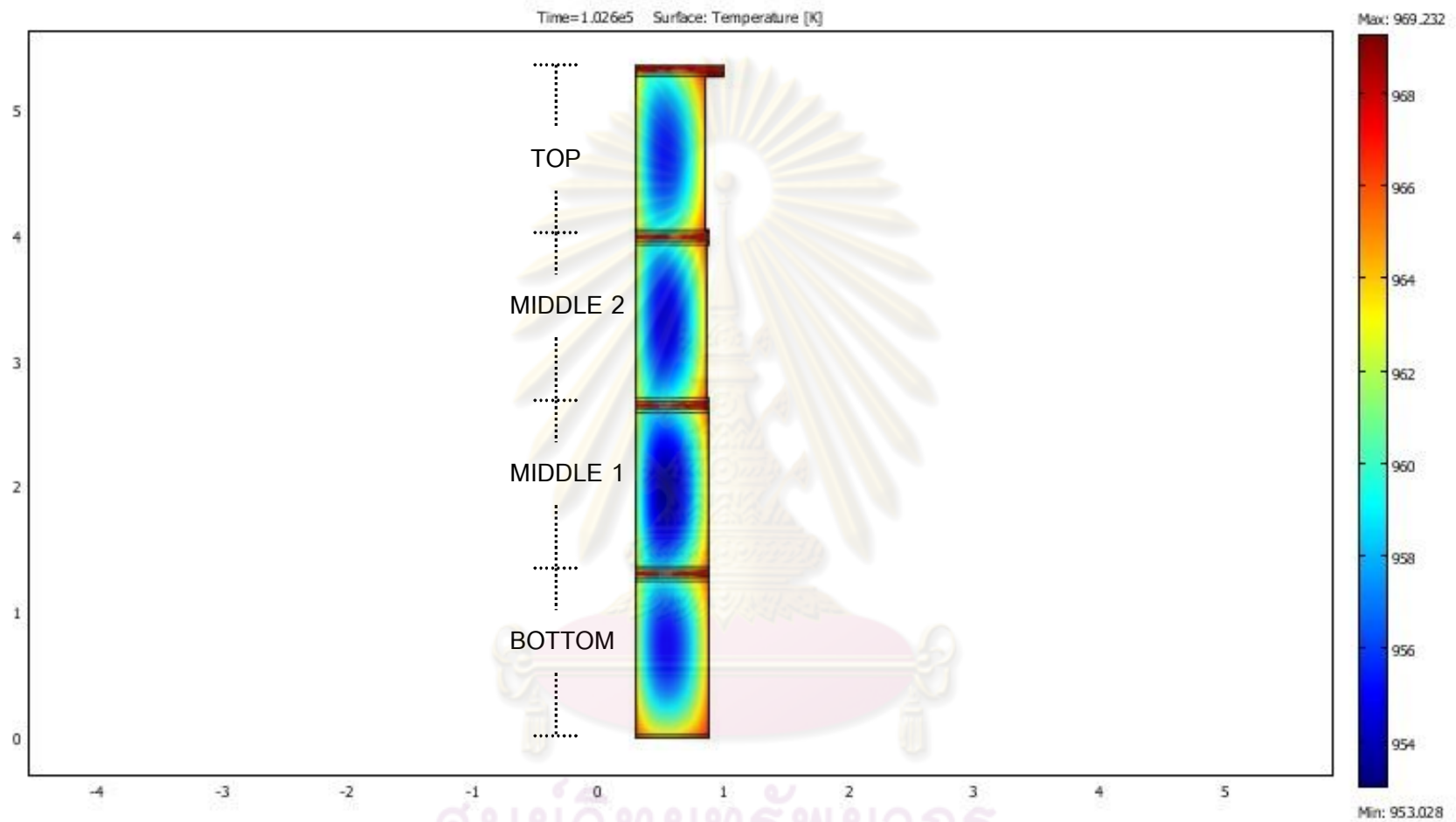
- ตำแหน่ง top



รูปที่ 6.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 5.5 ชั่วโมง, b) เวลา 16.5 ชั่วโมง, c) เวลา 28 ชั่วโมง



รูปที่ 6.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 29.5 ชั่วโมง, b) เวลา 39.5 ชั่วโมง, c) เวลา 50 ชั่วโมง

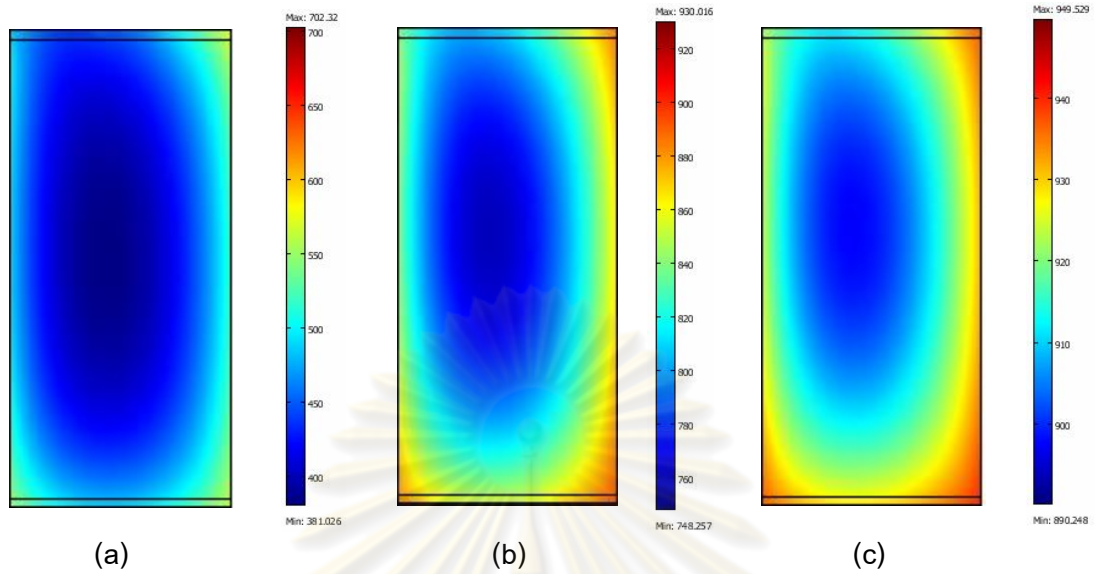


รูปที่ 6.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 28.5 ชั่วโมง (all position)

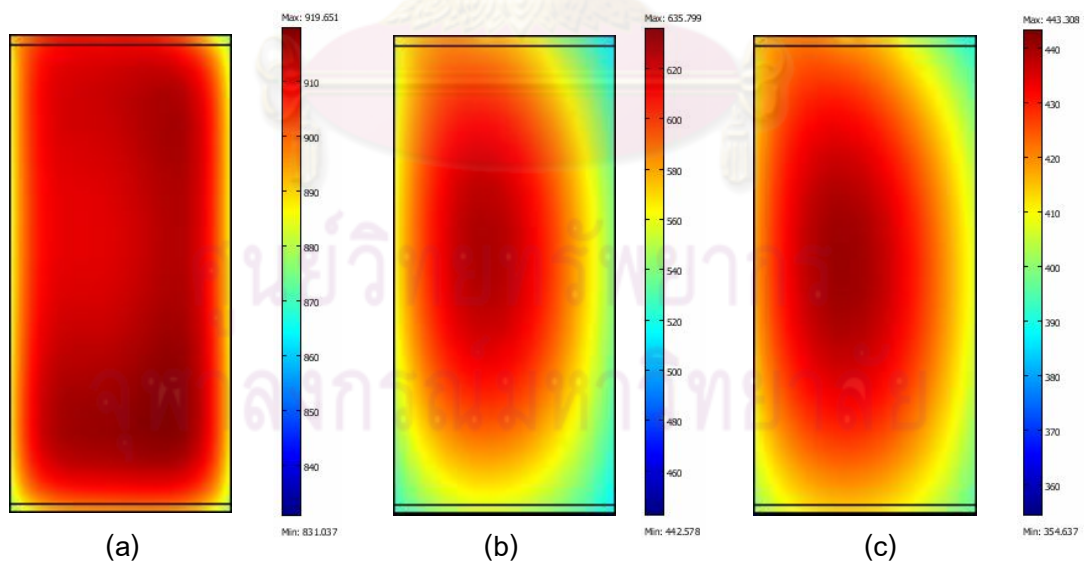
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.1.3 ผลการทำนายอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

- ตำแหน่ง bottom

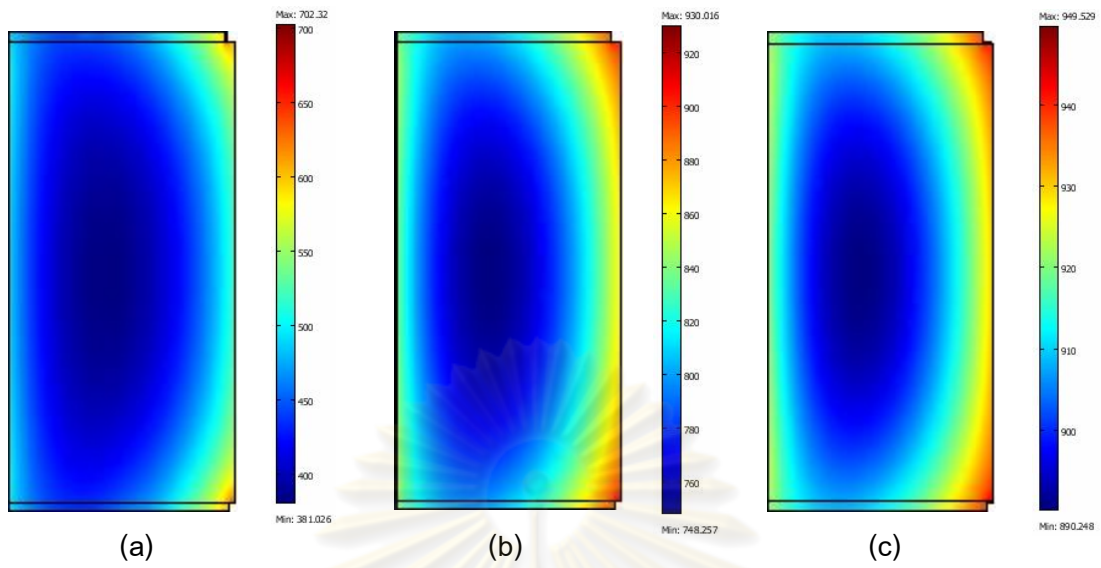


รูปที่ 6.19 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง

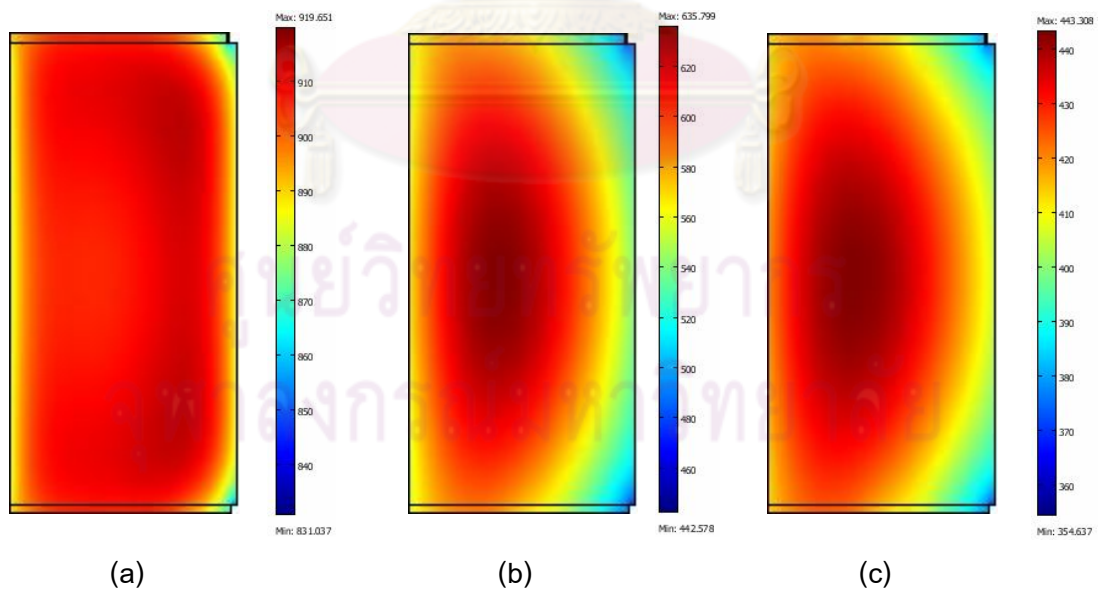


รูปที่ 6.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (bottom), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 1

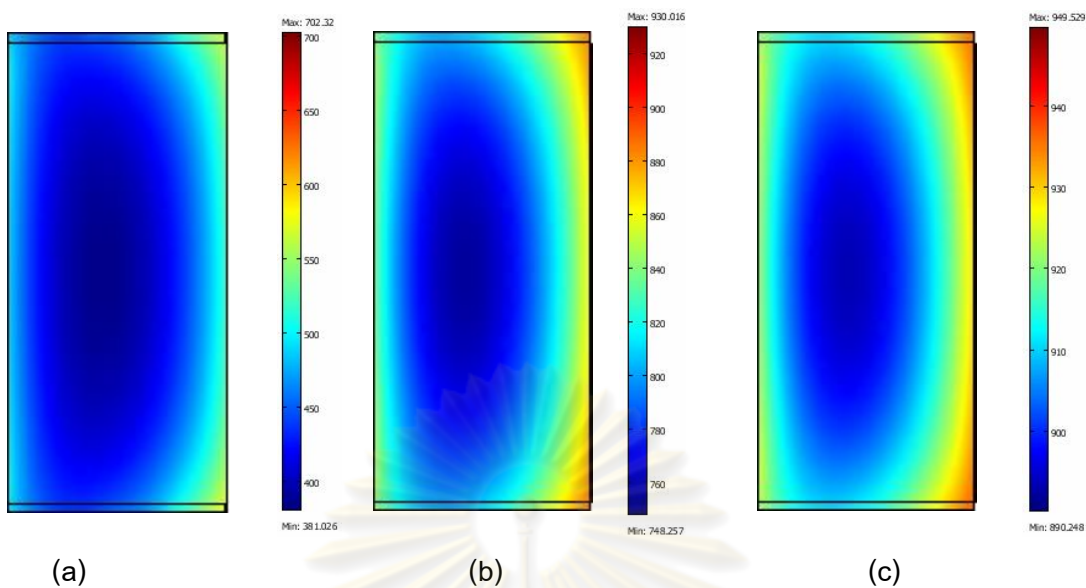


รูปที่ 6.21 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง

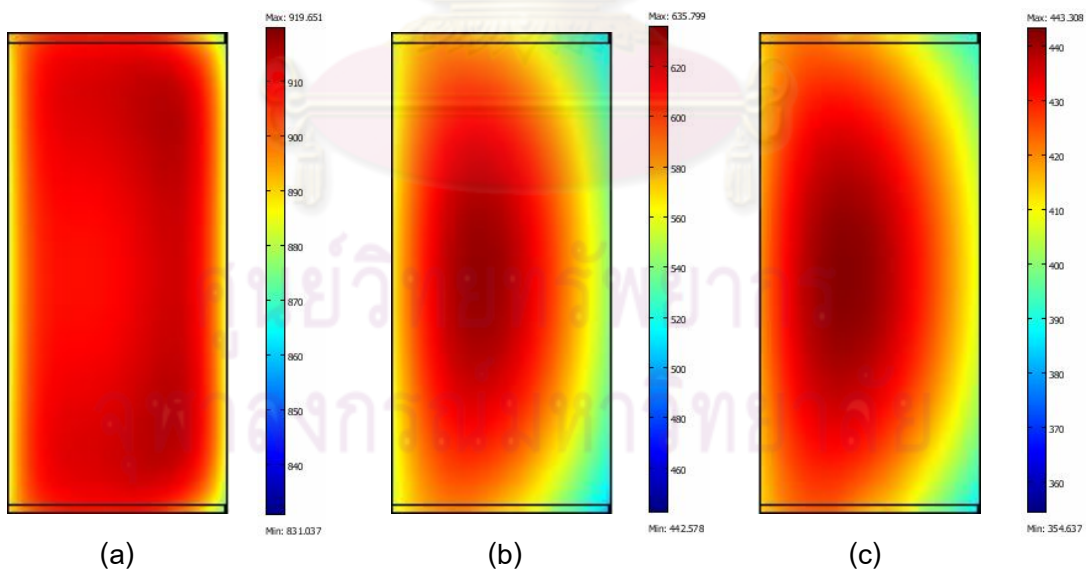


รูปที่ 6.22 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 2



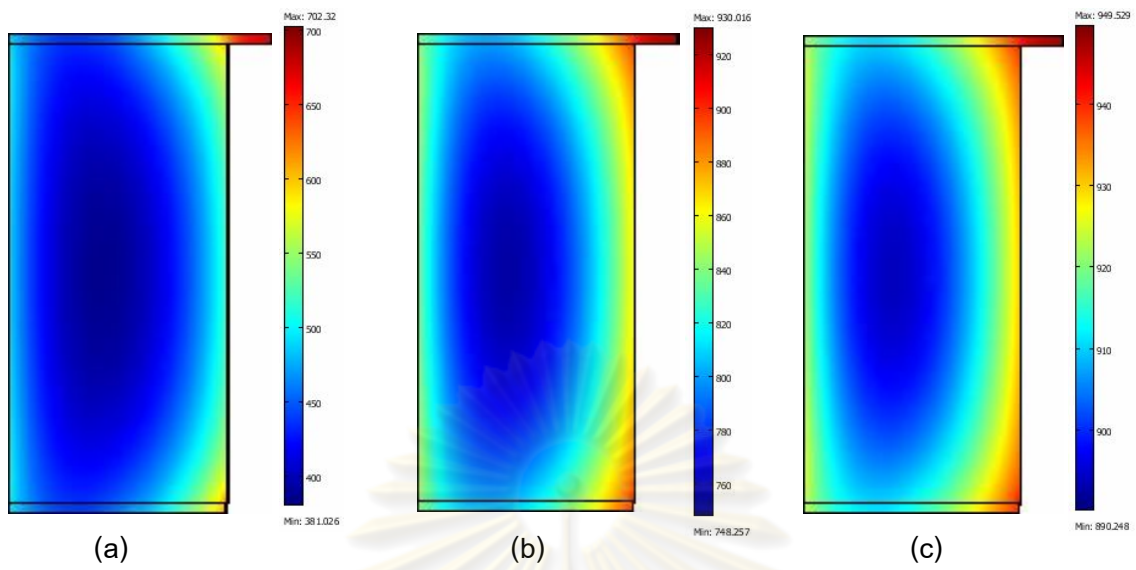
รูปที่ 6.23 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง



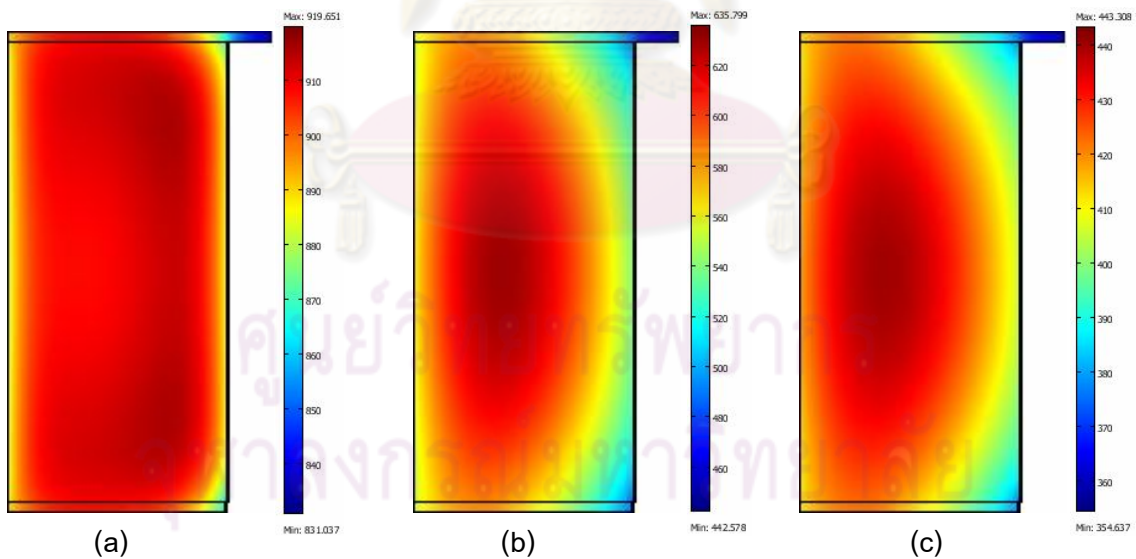
รูปที่ 6.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง



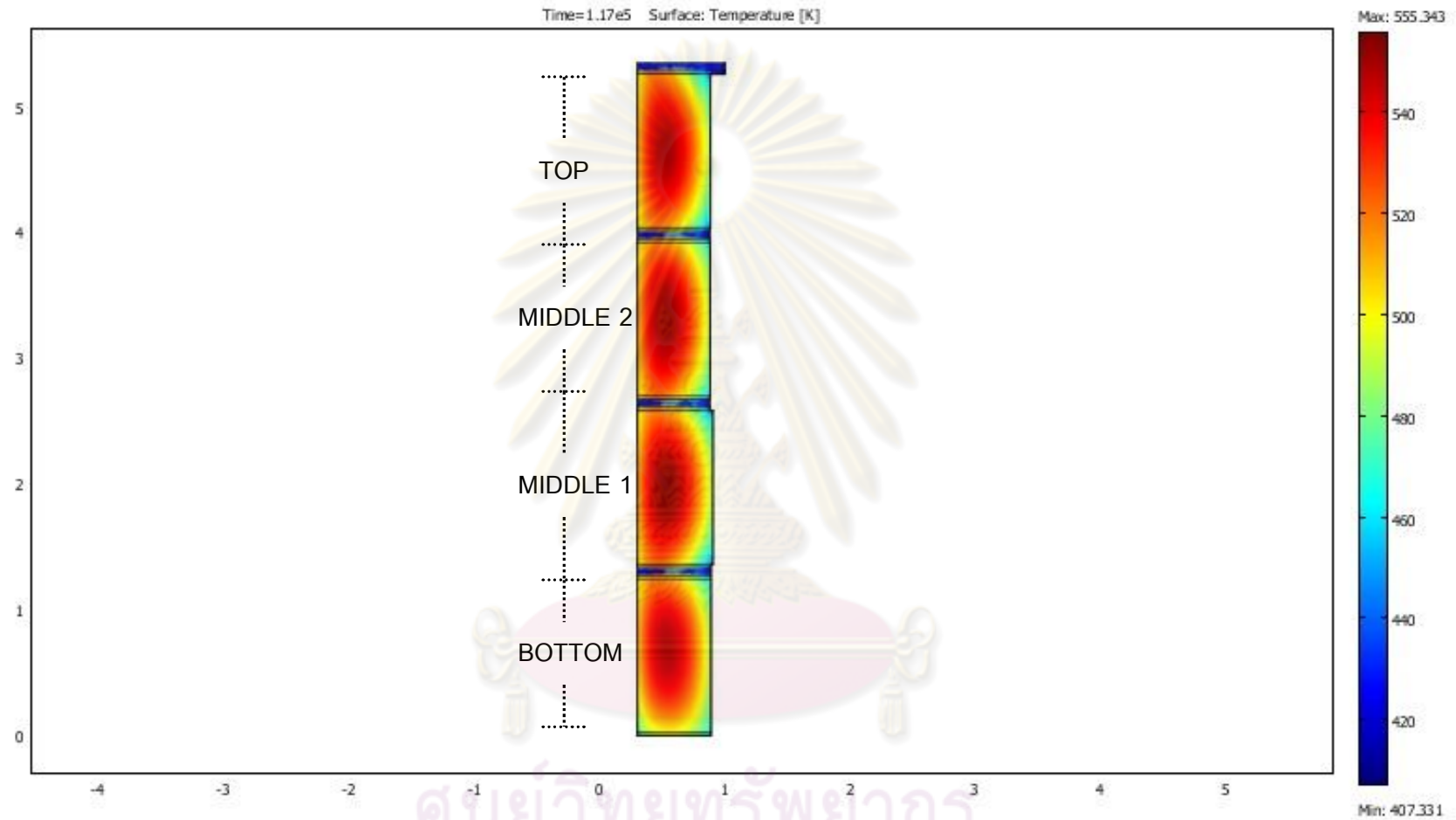
- ตำแหน่ง top



รูปที่ 6.25 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 2 ชั่วโมง, b) เวลา 9.5 ชั่วโมง, c) เวลา 17 ชั่วโมง



รูปที่ 6.26 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 20 ชั่วโมง, b) เวลา 30 ชั่วโมง, c) เวลา 37.5 ชั่วโมง

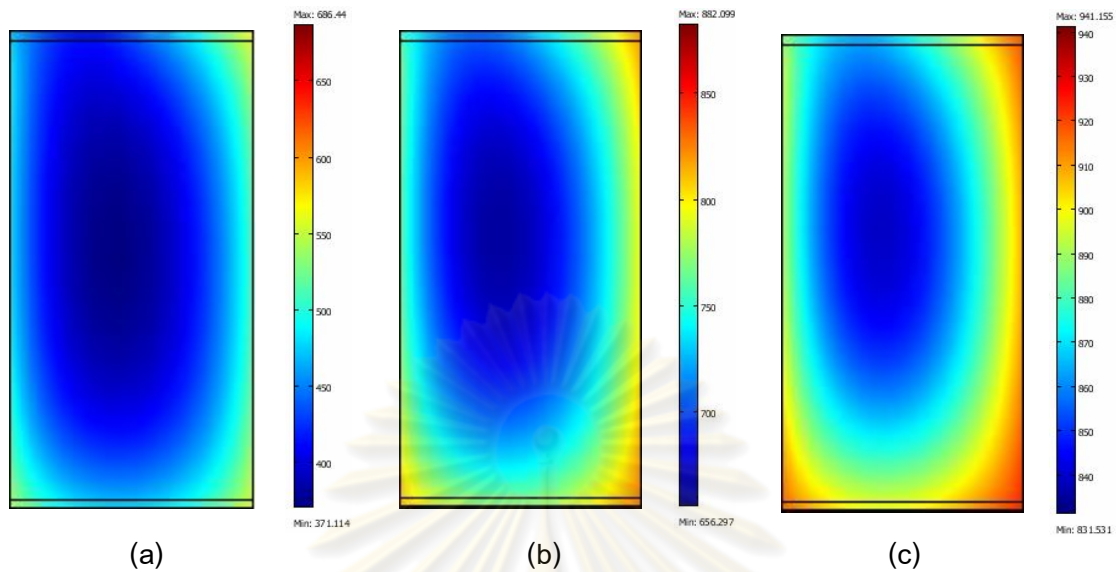


รูปที่ 6.27 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 32.5 ชั่วโมง (all position)

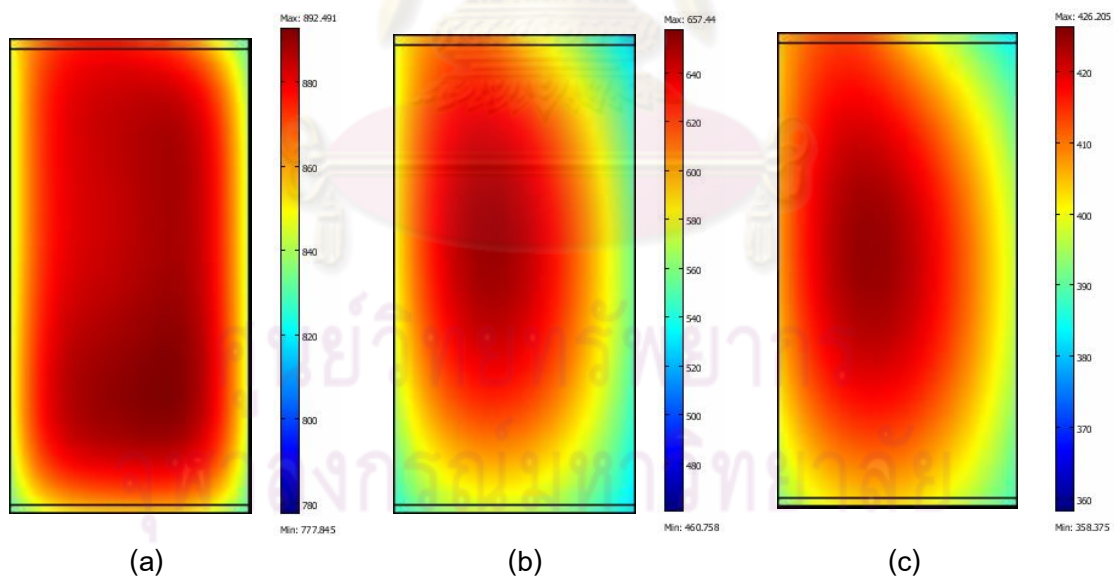
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.1.4 ผลการทำนายอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

- ตำแหน่ง bottom

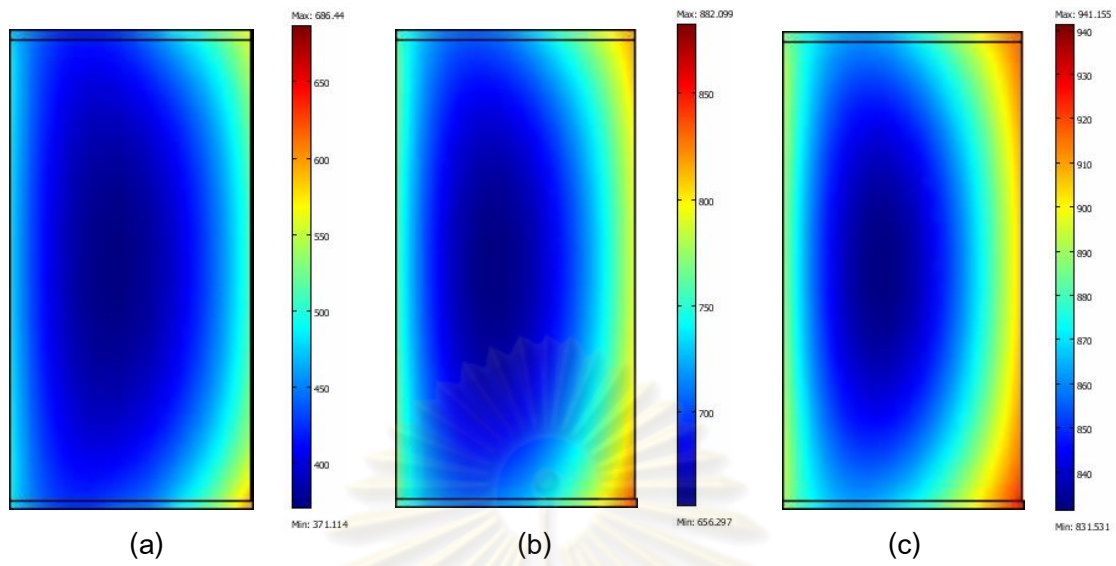


รูปที่ 6.28 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง

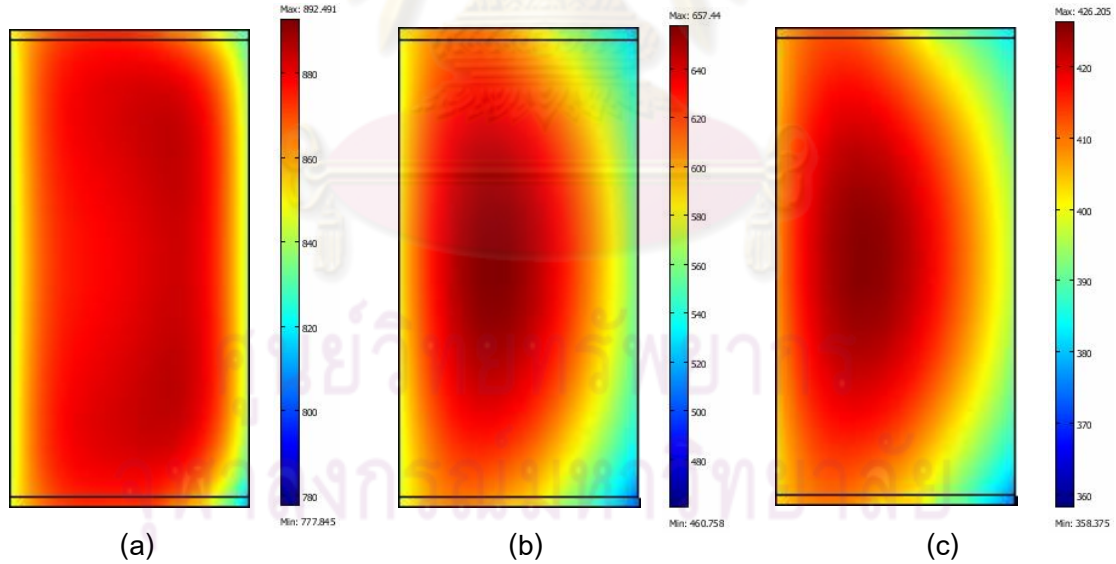


รูปที่ 6.29 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (bottom), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 1

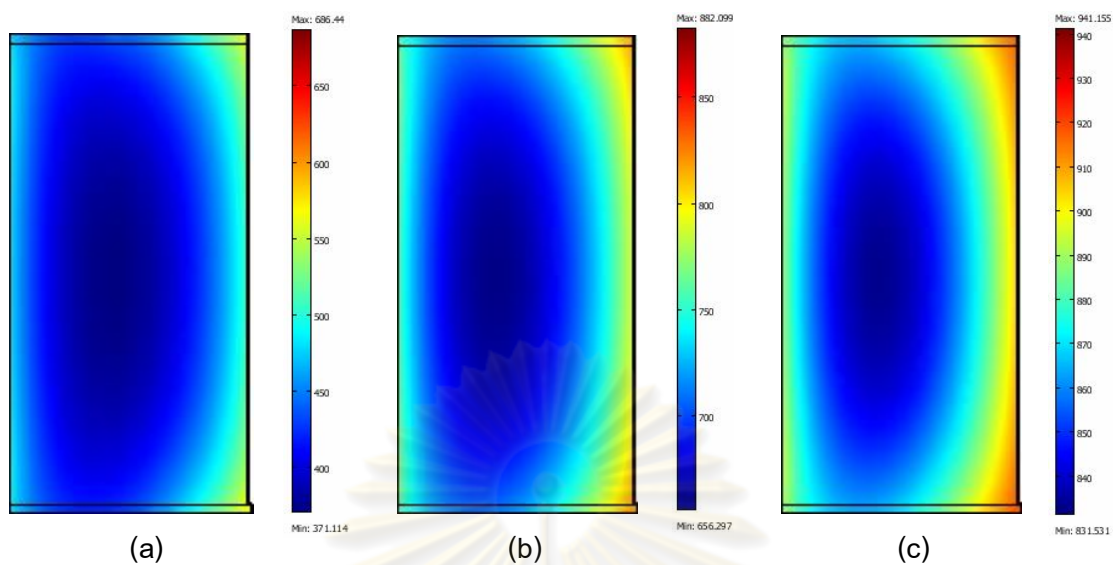


รูปที่ 6.30 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 1), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง

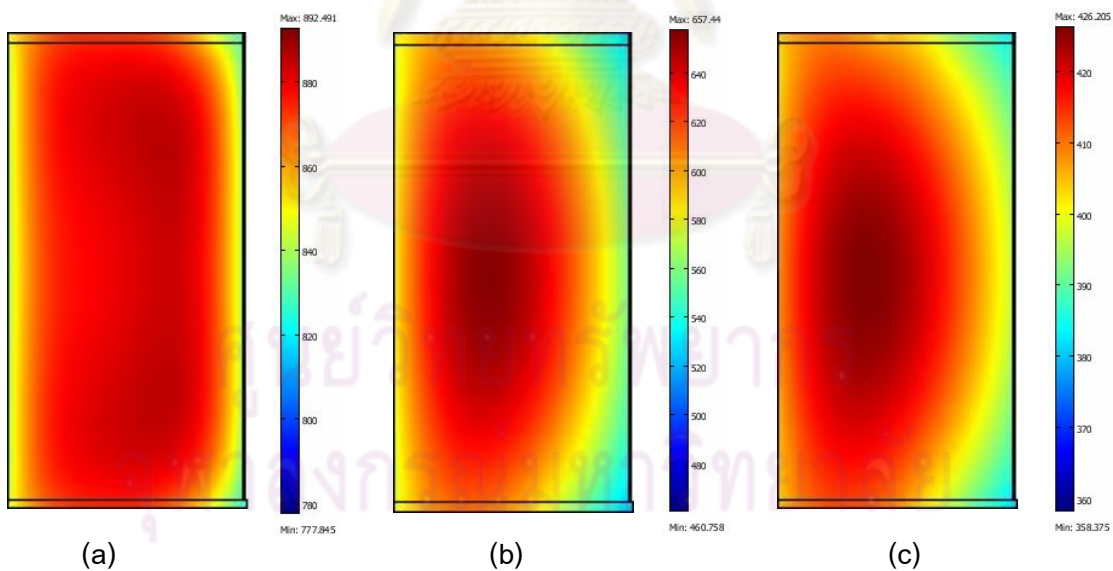


รูปที่ 6.31 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 1), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง

## - ตำแหน่ง middle 2

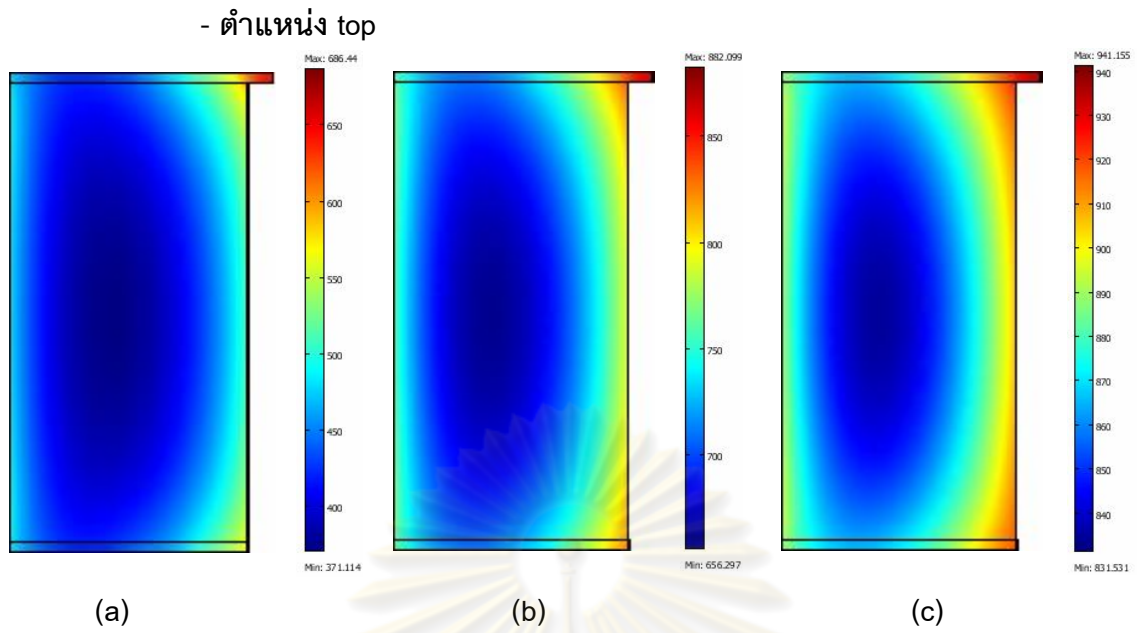


รูปที่ 6.32 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (middle 2), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง

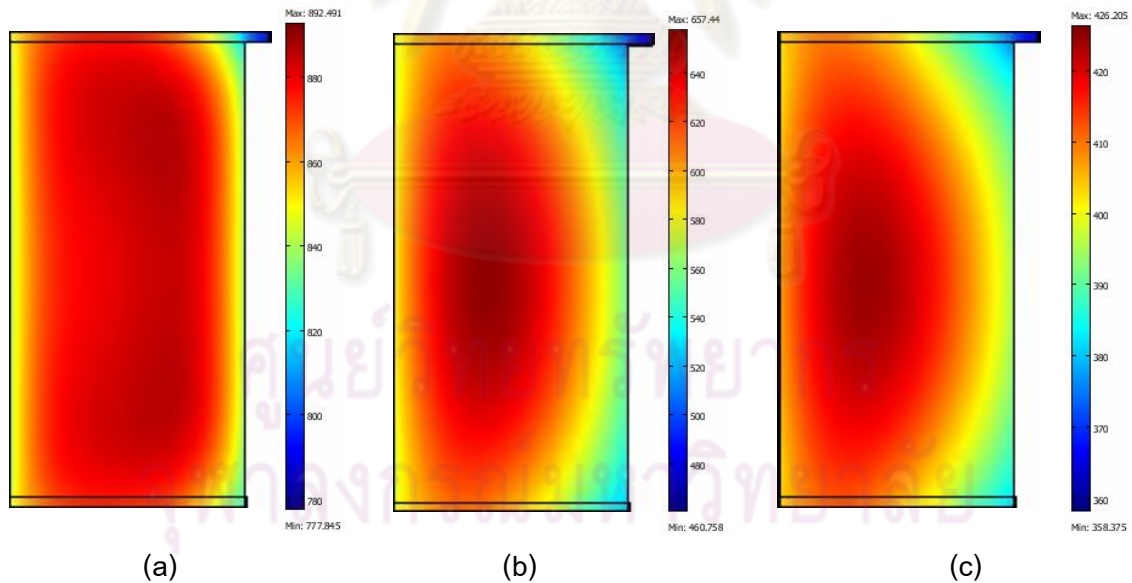


รูปที่ 6.33 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (middle 2), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง

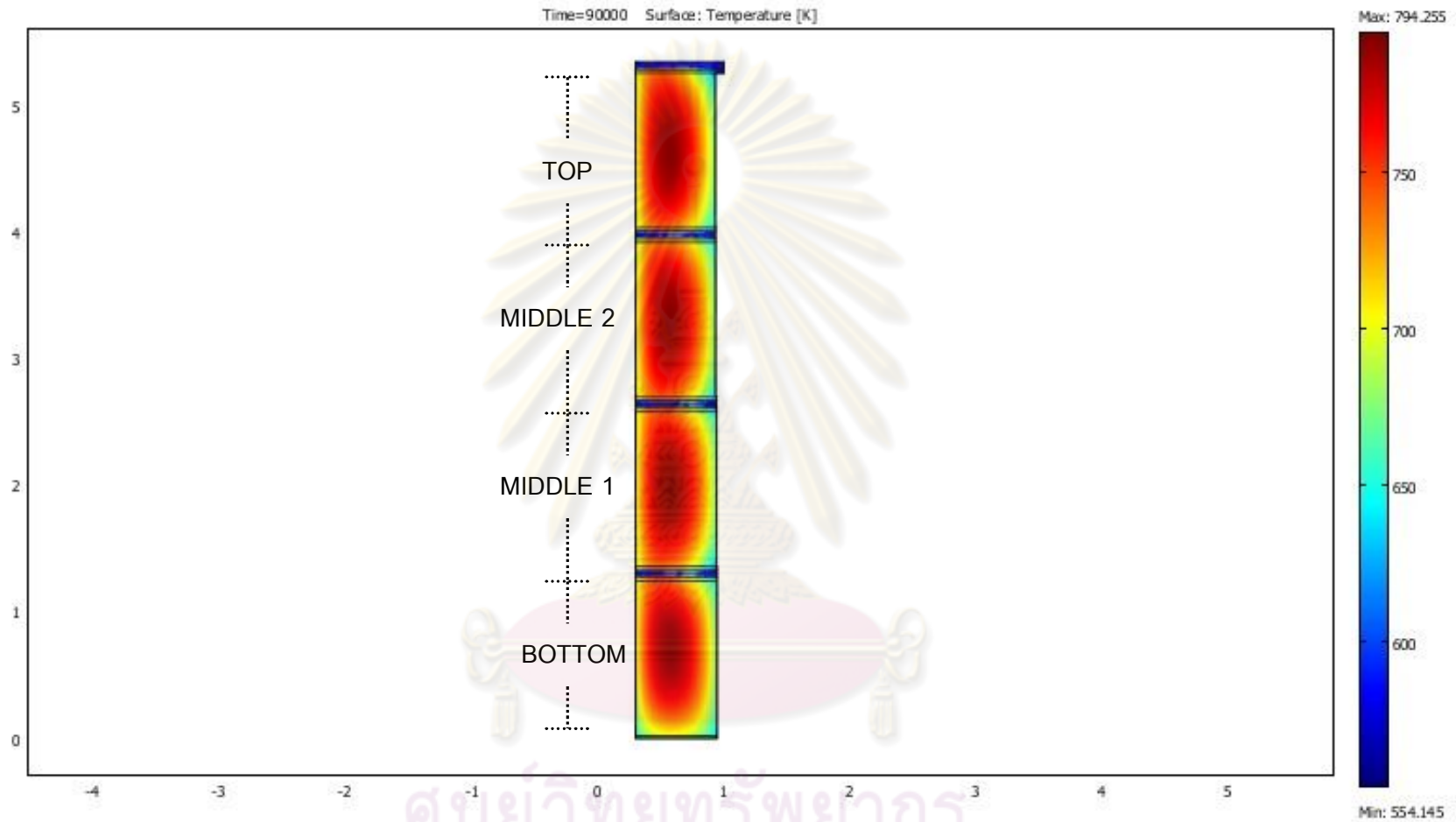




รูปที่ 6.34 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความร้อน (top), a) เวลา 2.5 ชั่วโมง, b) เวลา 8.5 ชั่วโมง, c) เวลา 15 ชั่วโมง



รูปที่ 6.35 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการให้ความเย็น (top), a) เวลา 19.5 ชั่วโมง, b) เวลา 29 ชั่วโมง, c) เวลา 39 ชั่วโมง



รูปที่ 6.36 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในกระบวนการอบอ่อนที่เวลา 25 ชั่วโมง (all position)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลมเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิได้แก่

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น จากสมการที่ 5.2 และ 5.7 ได้แก่

- แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเหล็กแผ่นม้วนกลม

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_s}{\partial z})$$

- แบบจำลองคณิตศาสตร์ของก๊าซไฮโดรเจน

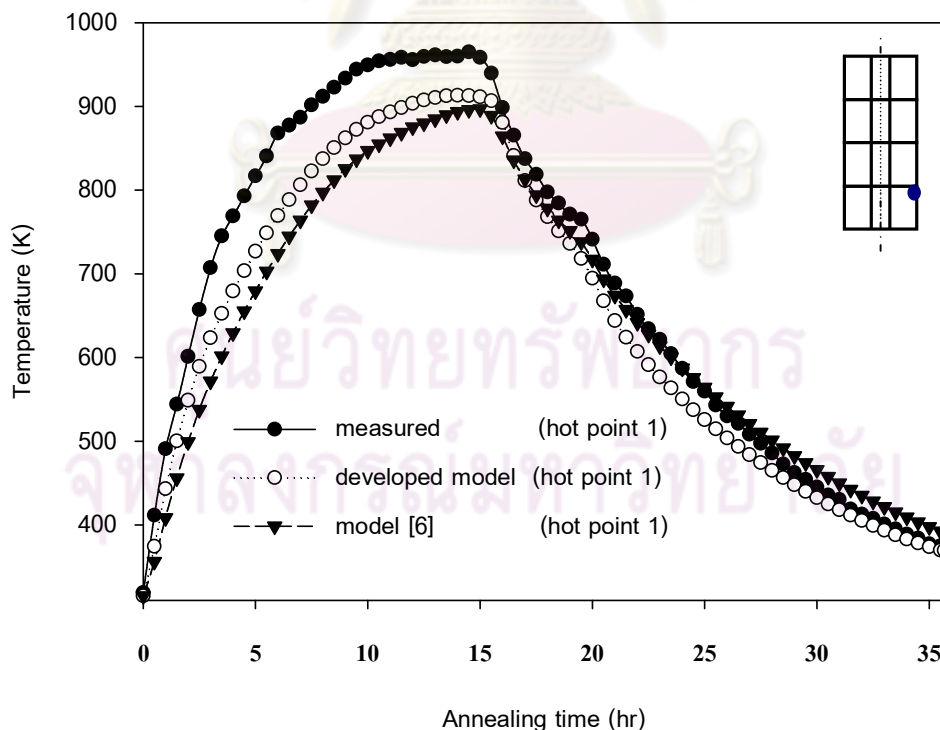
$$\rho_h C_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rh} r \frac{\partial T_h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zh} \frac{\partial T_h}{\partial z}) \right] - \rho_h C_{p,h} u_h \nabla T_h$$

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์ [6]

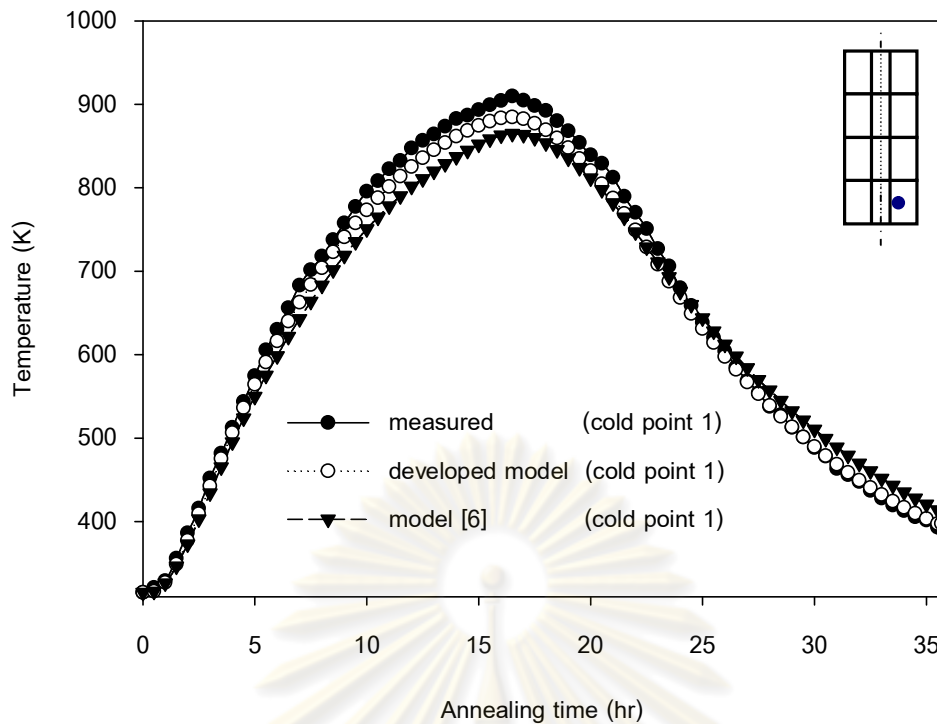
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

โดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS ทำนายค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น โดยเมื่อนำมาเขียนกราฟ จะได้ผลดังนี้คือ

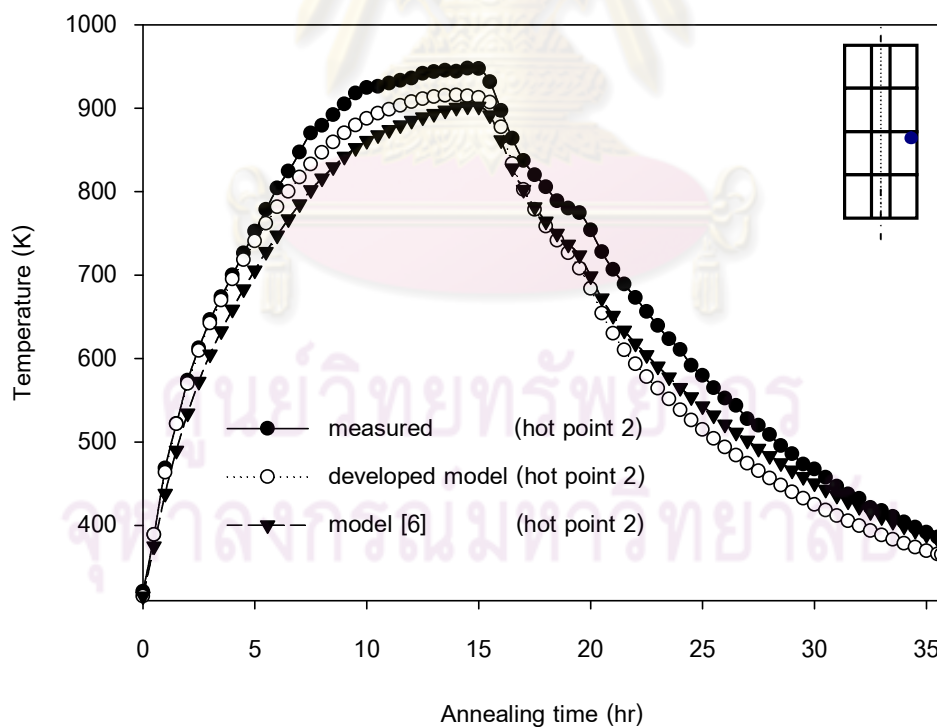
### 6.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A



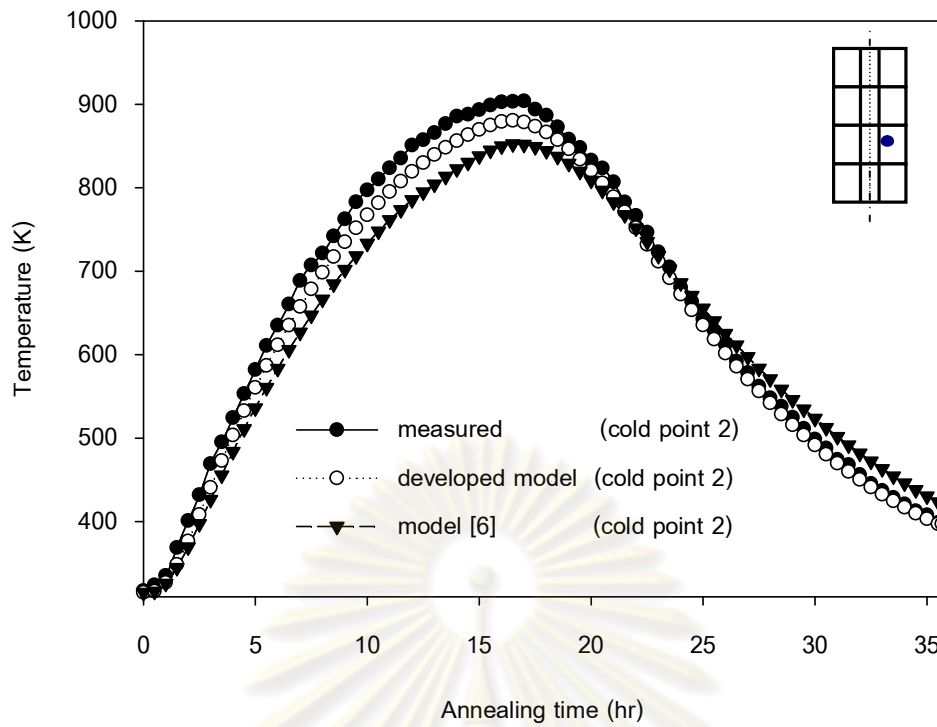
รูปที่ 6.37 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 (code A)



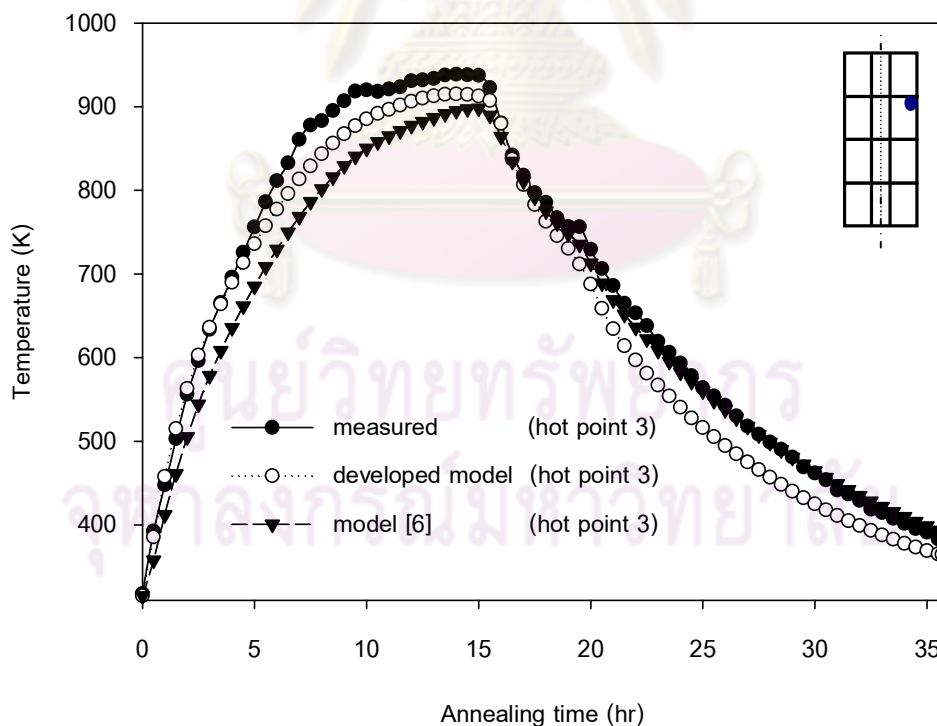
รูปที่ 6.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 (code A)



รูปที่ 6.39 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 (code A)

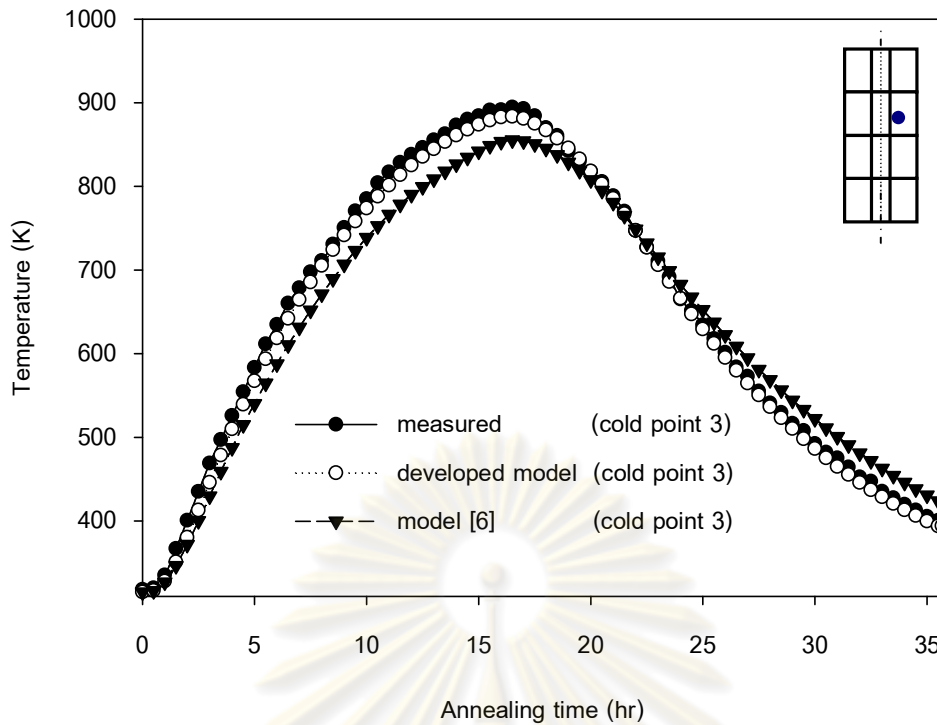


รูปที่ 6.40 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 (code A)

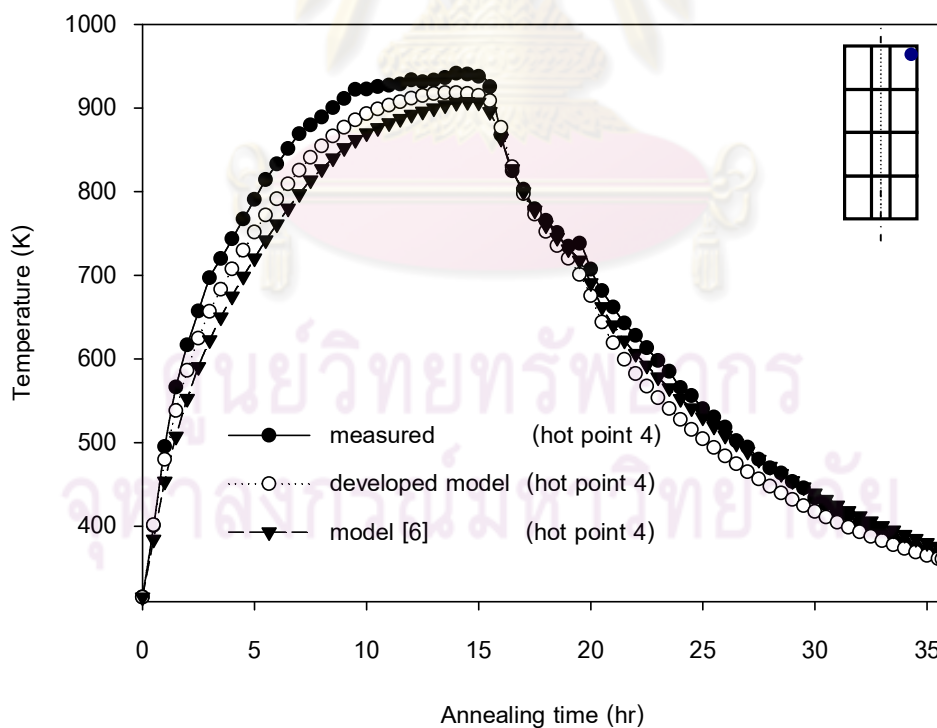


รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 (code A)

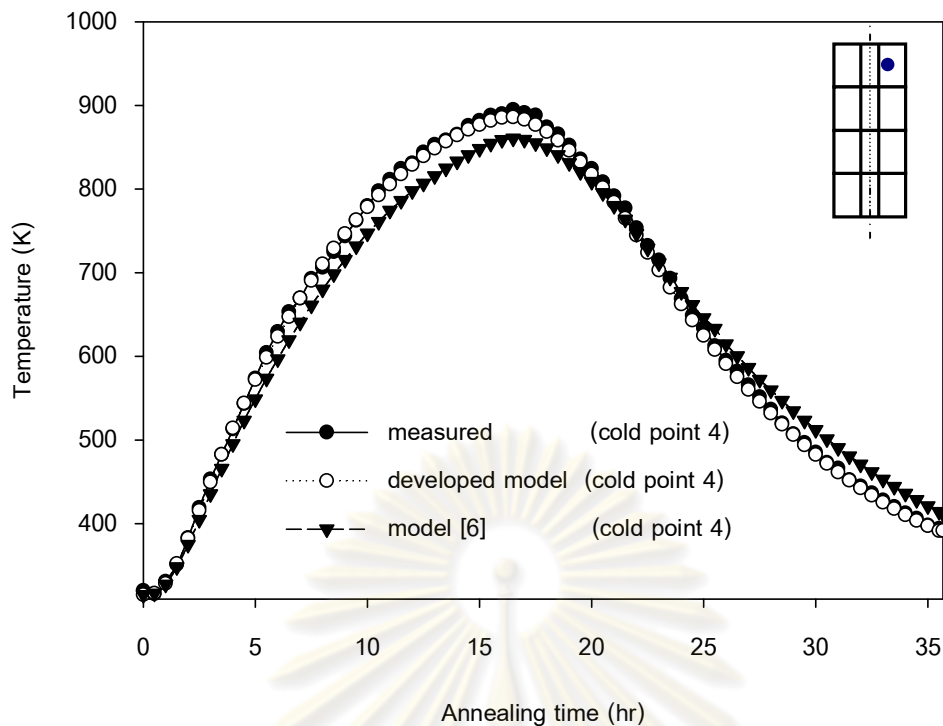




รูปที่ 6.42 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 (code A)



รูปที่ 6.43 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 (code A)



**รูปที่ 6.44** เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 (code A)

จากรูปที่ 6.37 - 6.44 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลมในตำแหน่ง bottom, middle 1, middle 2 และ top ตามลำดับ

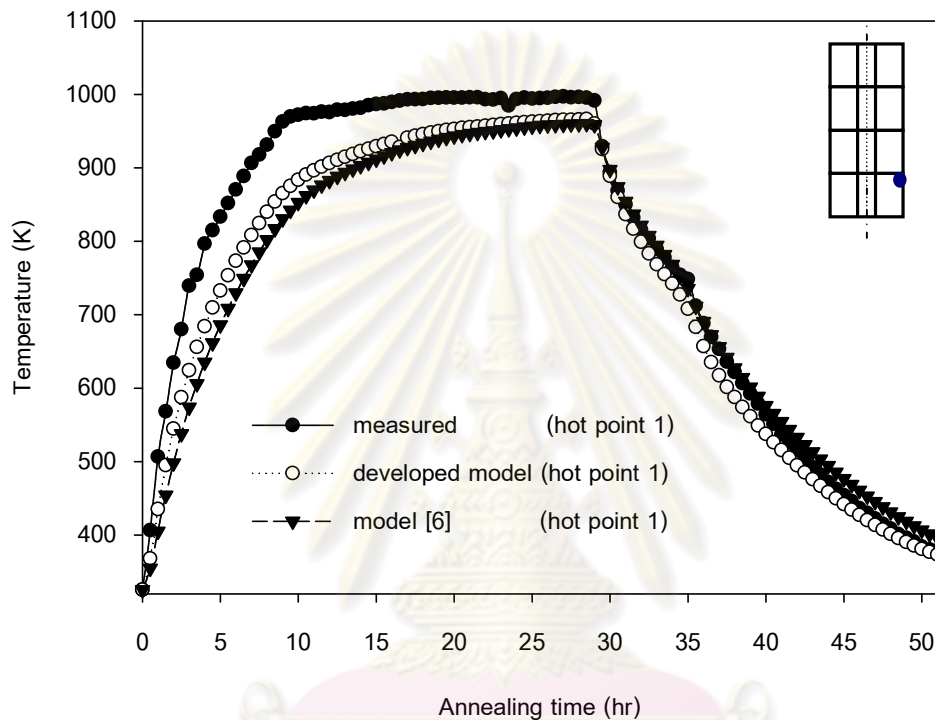
โดยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง มากกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] (ซึ่งค่าของค่าความคาดเคลื่อนจะคิดในหน่วย K)

โดยค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 5.73 %, 5.80%, 4.82% และ 3.83% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 5.05% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 1.71%, 2.45%, 1.53% และ 0.66 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 1.59%

ค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 7.23 %, 5.15%, 4.06% และ 3.84% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 5.07% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 3.98%, 5.35%, 4.74% และ

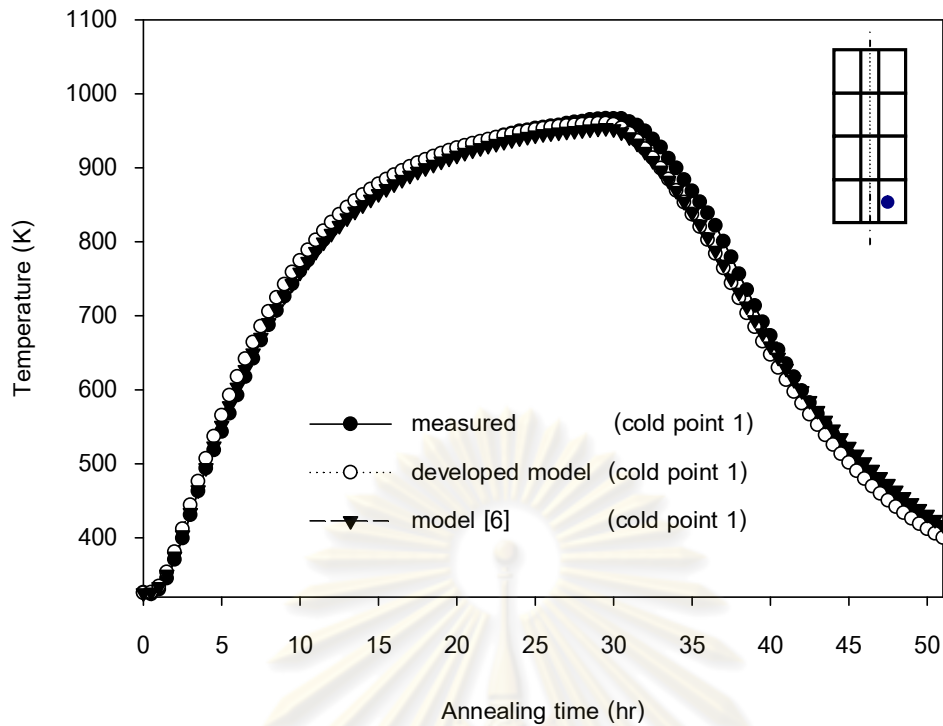
3.65 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 4.43% เพราะฉะนั้น อุณหภูมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น กับ แบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อน ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.02 % และ ในตำแหน่งจุดเย็น ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2.84 %

### 6.2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

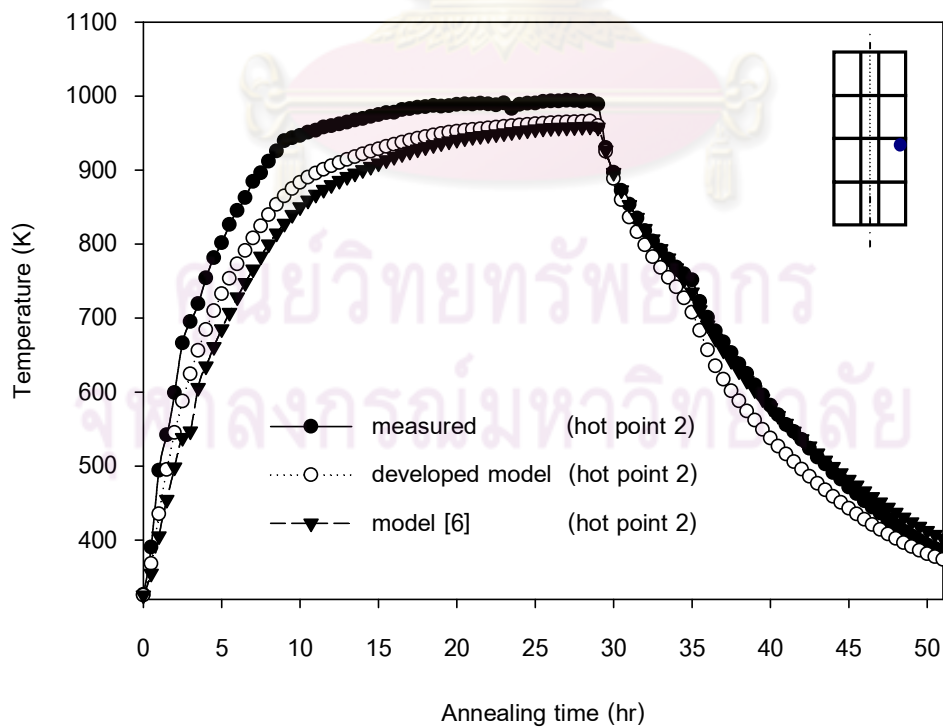


รูปที่ 6.45 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 (code B)

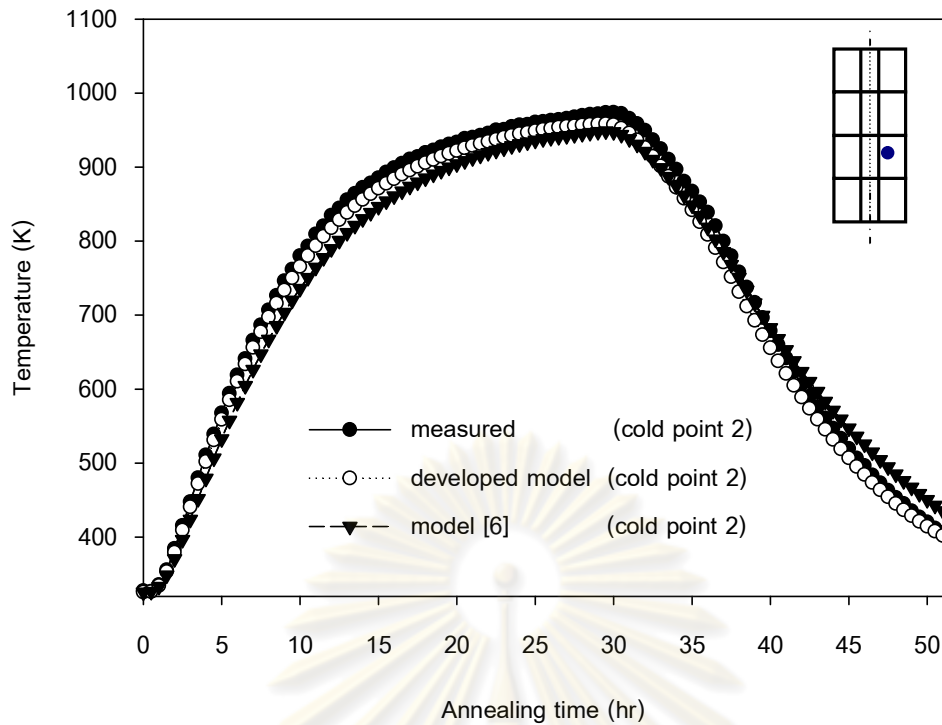
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



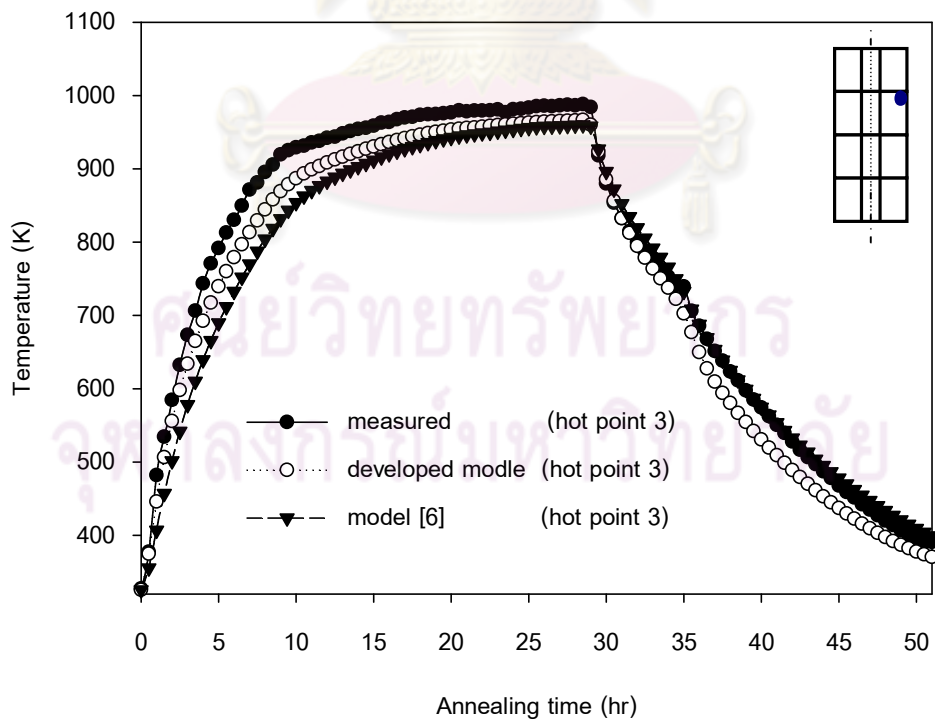
รูปที่ 6.46 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 (code B)



รูปที่ 6.47 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 (code B)

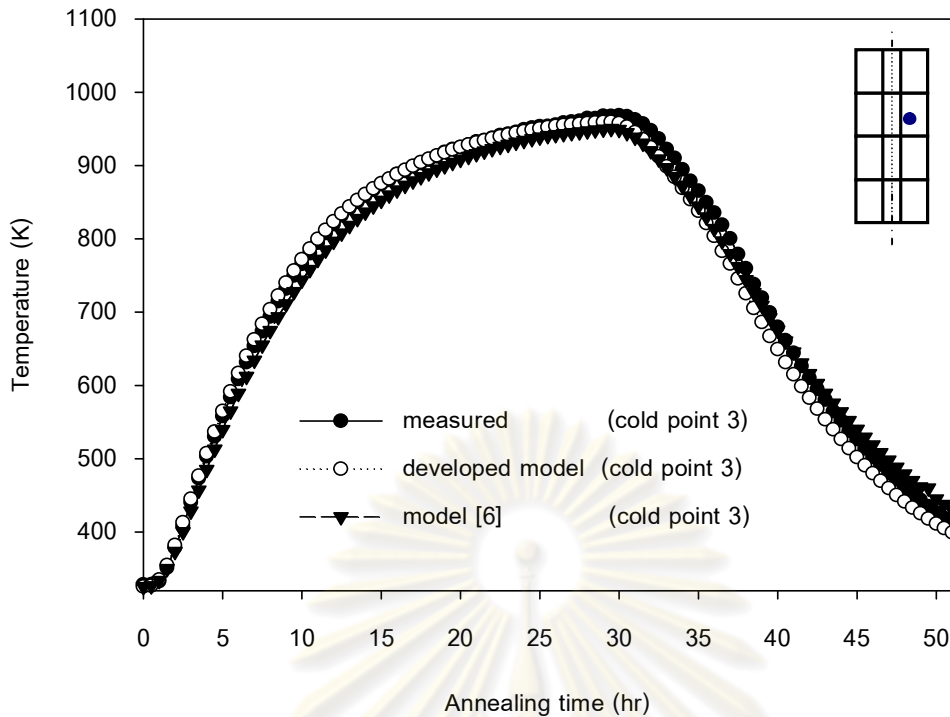


รูปที่ 6.48 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 (code B)

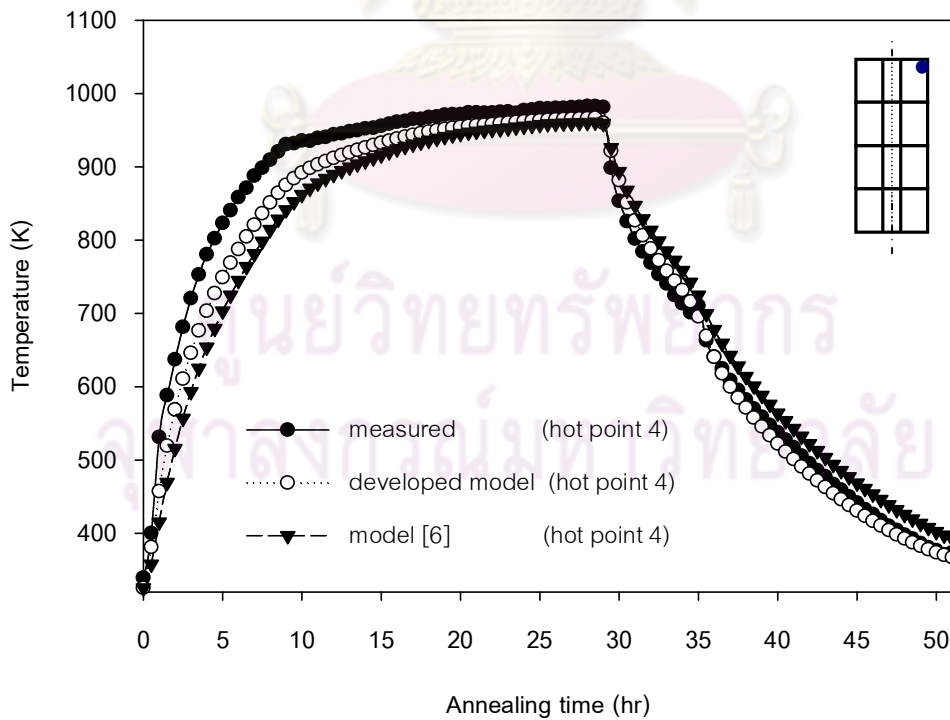


รูปที่ 6.49 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 (code B)

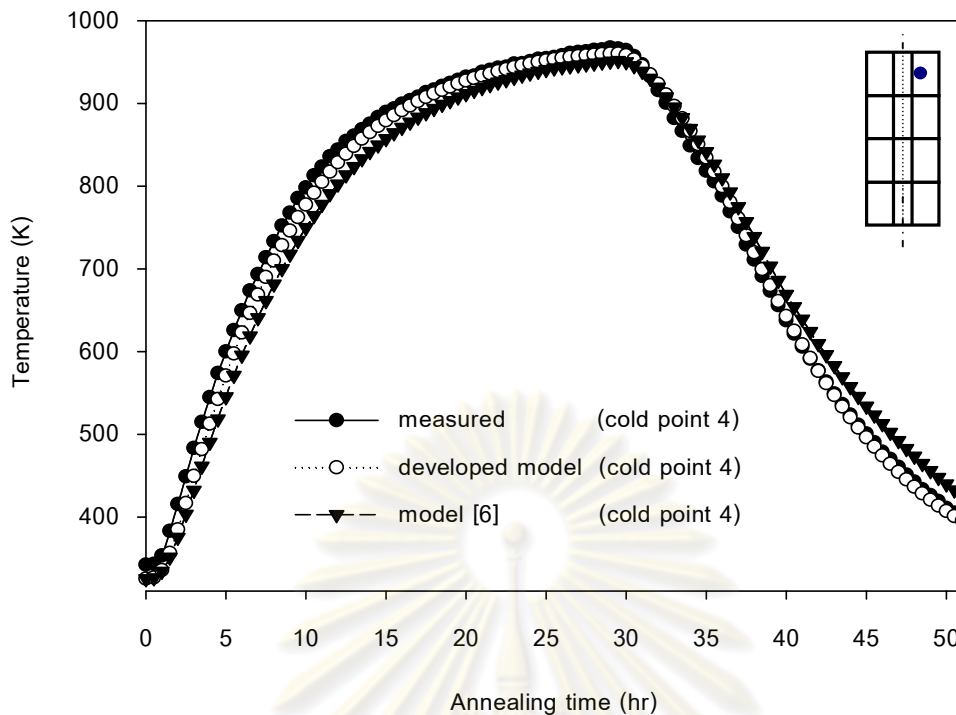




รูปที่ 6.50 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 (code B)



รูปที่ 6.51 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 (code B)



รูปที่ 6.52 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 (code B)

จากรูปที่ 6.45 - 6.52 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ในตำแหน่ง bottom, middle 1, middle 2 และ top ตามลำดับ

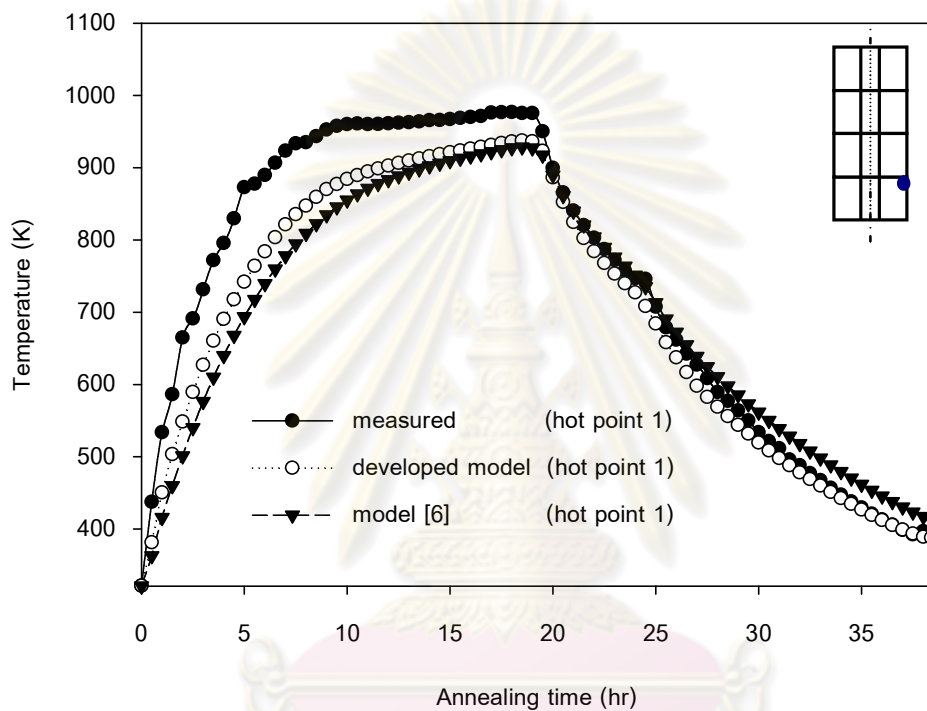
โดยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง มากกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] (ซึ่งค่าของค่าความคาดเคลื่อนจะคิดในหน่วย K)

โดยค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 5.33 %, 5.33%, 4.20% และ 3.36% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 4.55% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 1.88%, 1.88%, 1.90% และ 1.70 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 1.84%

ค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 6.68 %, 5.49%, 4.50% และ 6.45% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 5.78% และใน

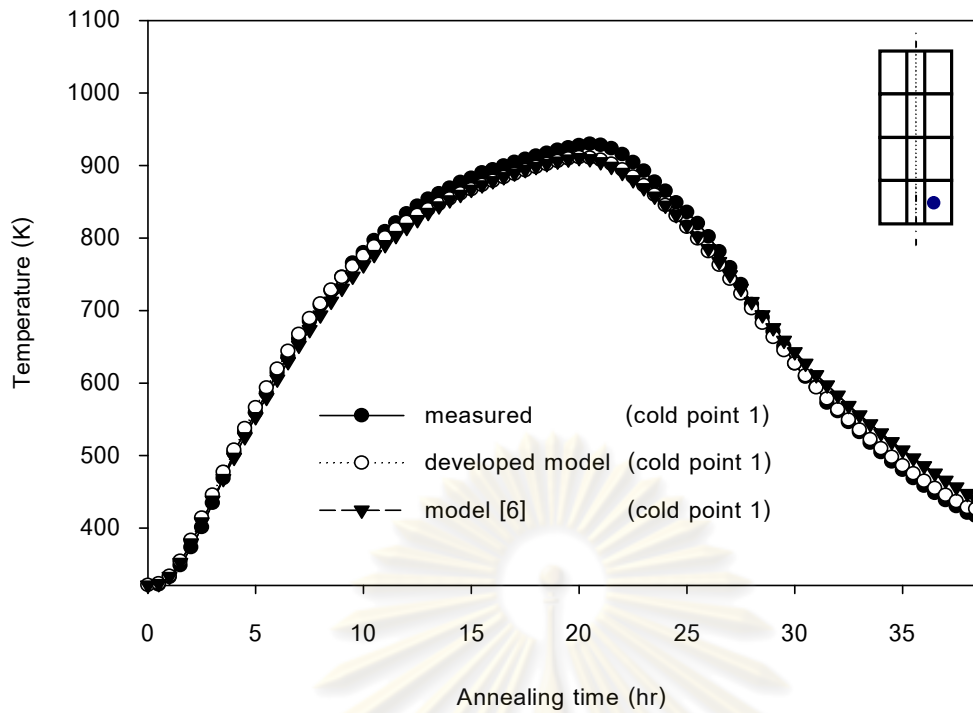
ตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.59%, 3.84%, 2.32% และ 4.53 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 3.07% เพราะฉะนั้น คุณหมุมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น กับ แบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.23 % และ ในตำแหน่งจุดเย็น ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.23 %

### 6.2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

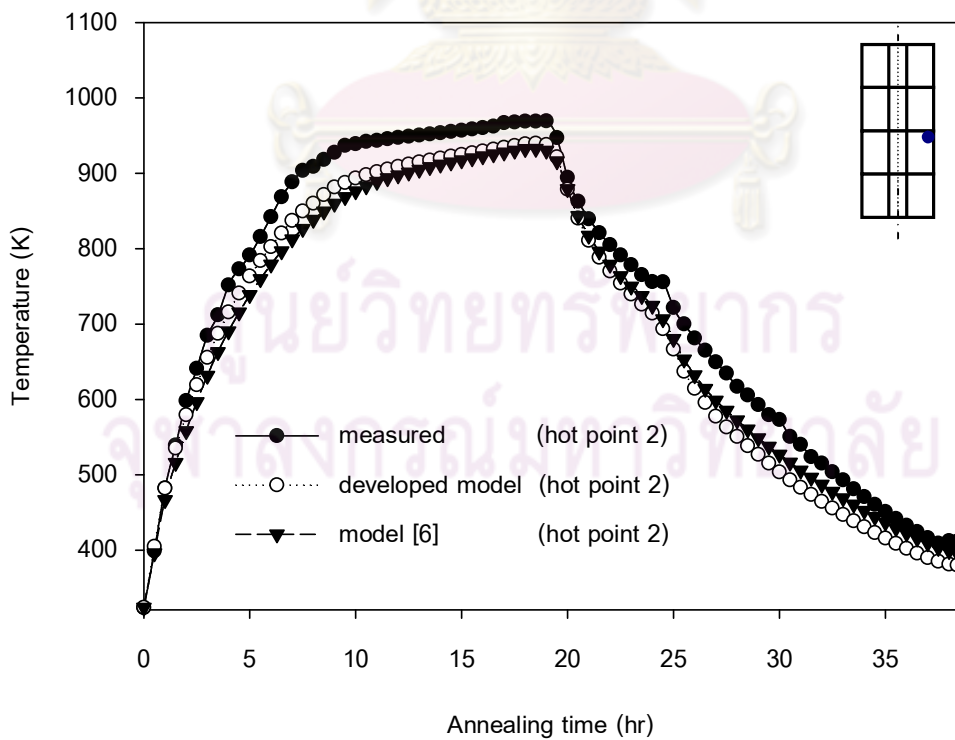


รูปที่ 6.53 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 (code C)

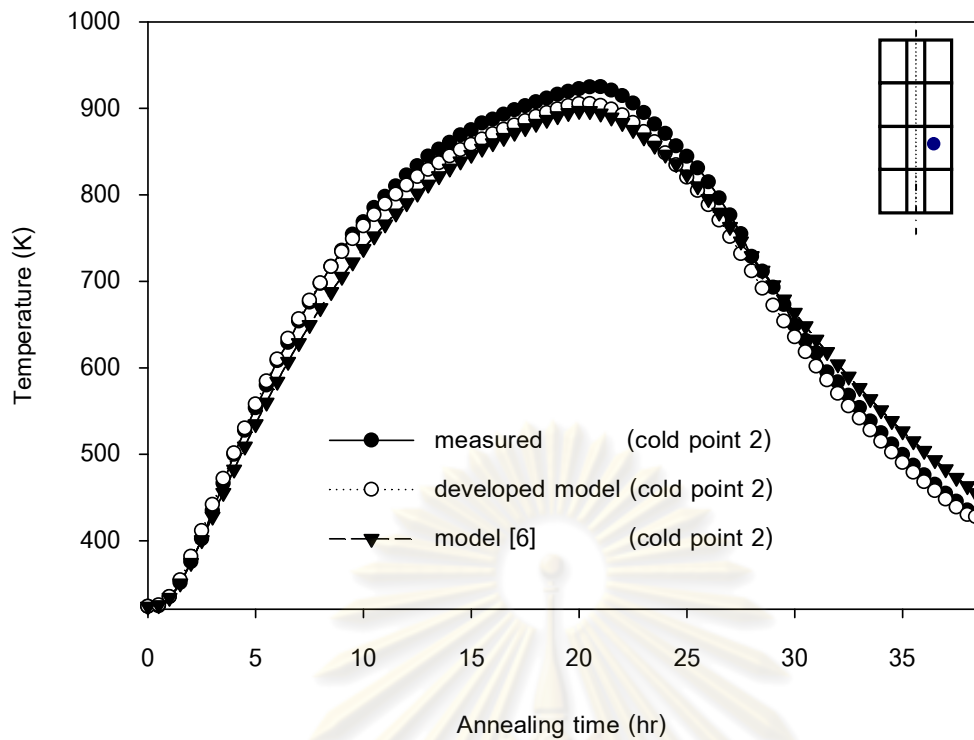
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



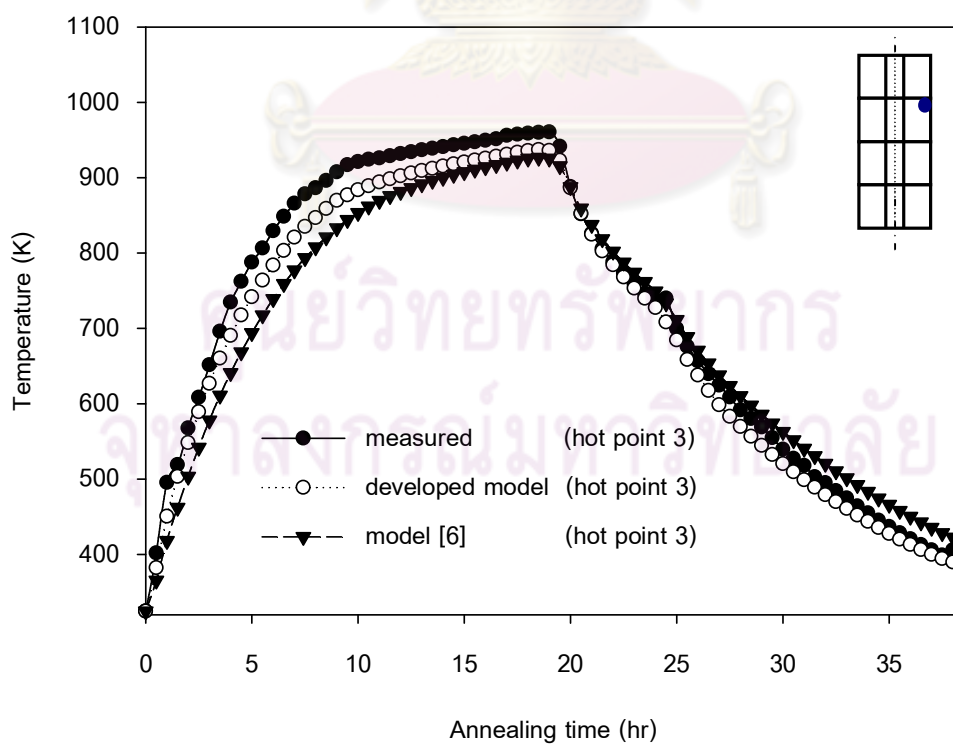
รูปที่ 6.54 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 (code C)



รูปที่ 6.55 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 (code C)

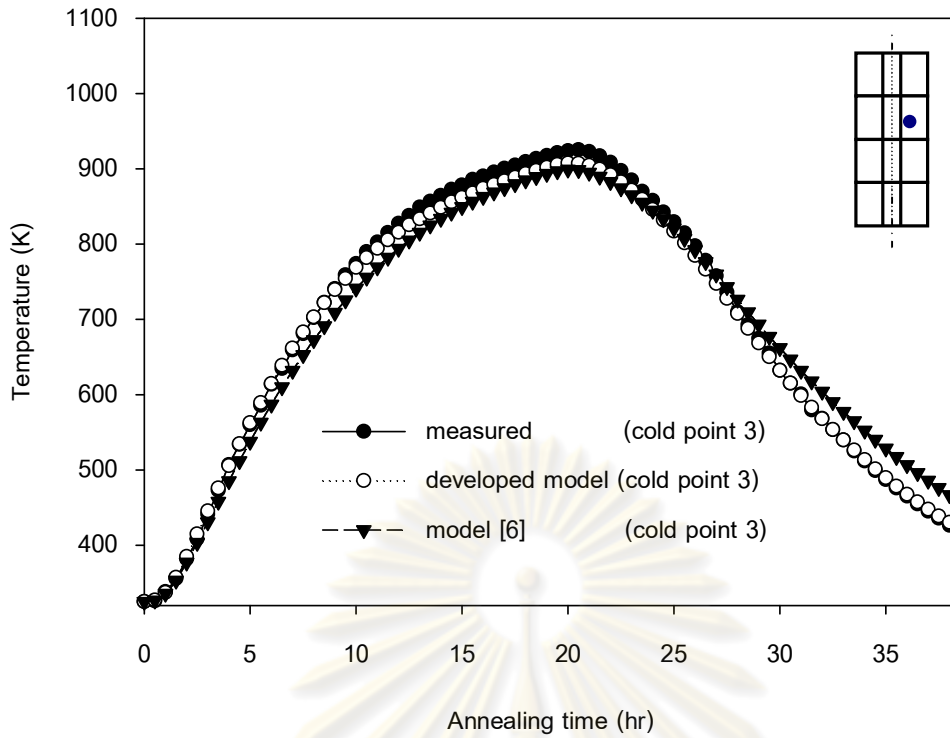


รูปที่ 6.56 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 (code C)

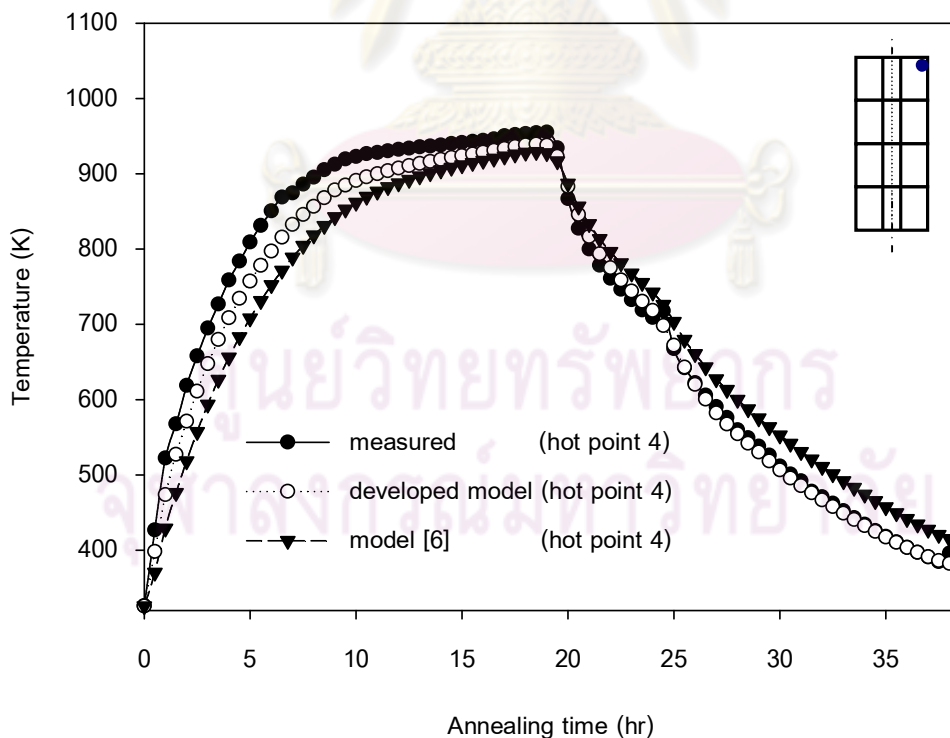


รูปที่ 6.57 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 (code C)

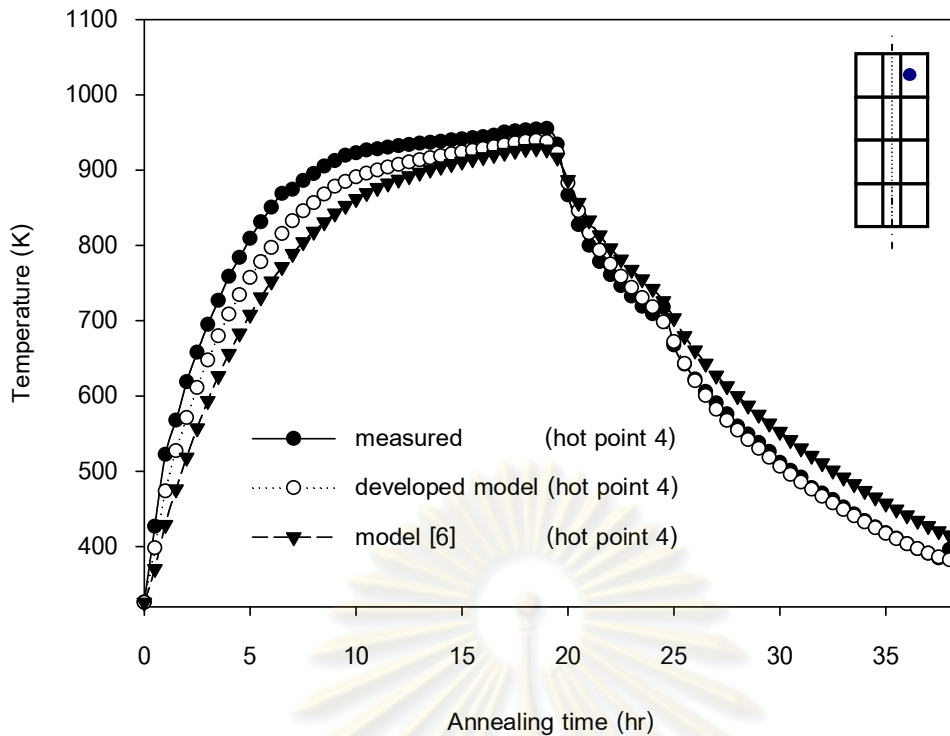




รูปที่ 6.58 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 (code C)



รูปที่ 6.59 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 (code C)



รูปที่ 6.60 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 (code C)

จากรูปที่ 6.53 - 6.60 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code C) ในตำแหน่ง bottom, middle 1, middle 2 และ top ตามลำดับ

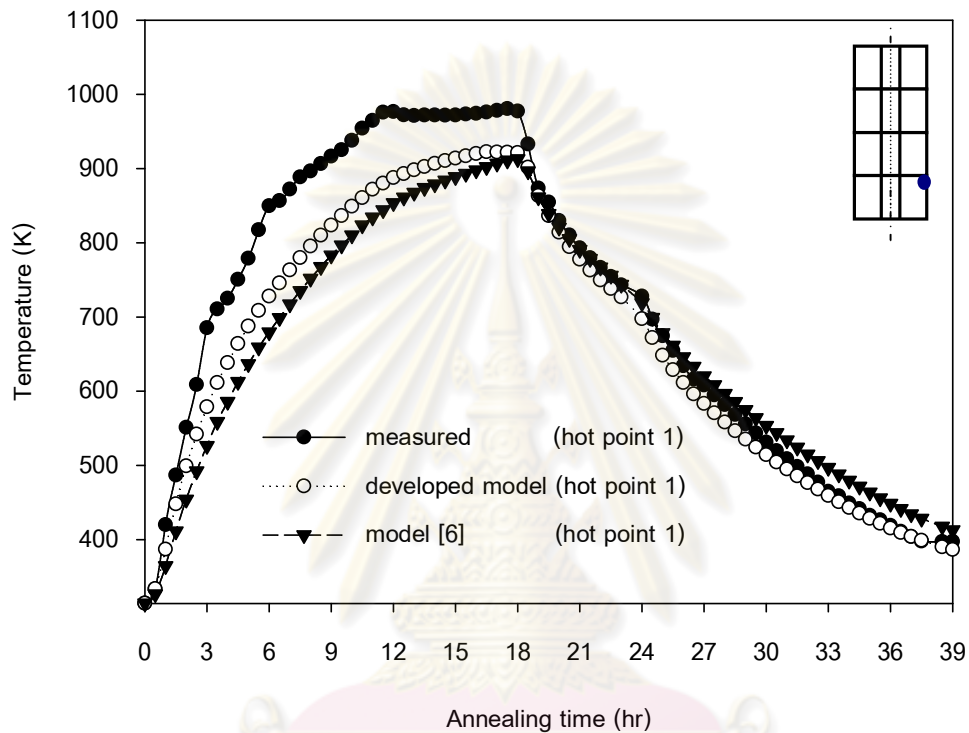
โดยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง มากกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] (ซึ่งค่าของค่าความคาดเคลื่อนจะคิดในหน่วย K)

โดยค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 5.47%, 5.76%, 3.11% และ 2.60% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 4.23% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 1.43%, 1.69%, 0.99% และ 0.91% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 1.26%

ค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 8.11%, 5.37%, 5.60% และ 7.19% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 6.55% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 2.19%, 2.98%, 3.53% และ

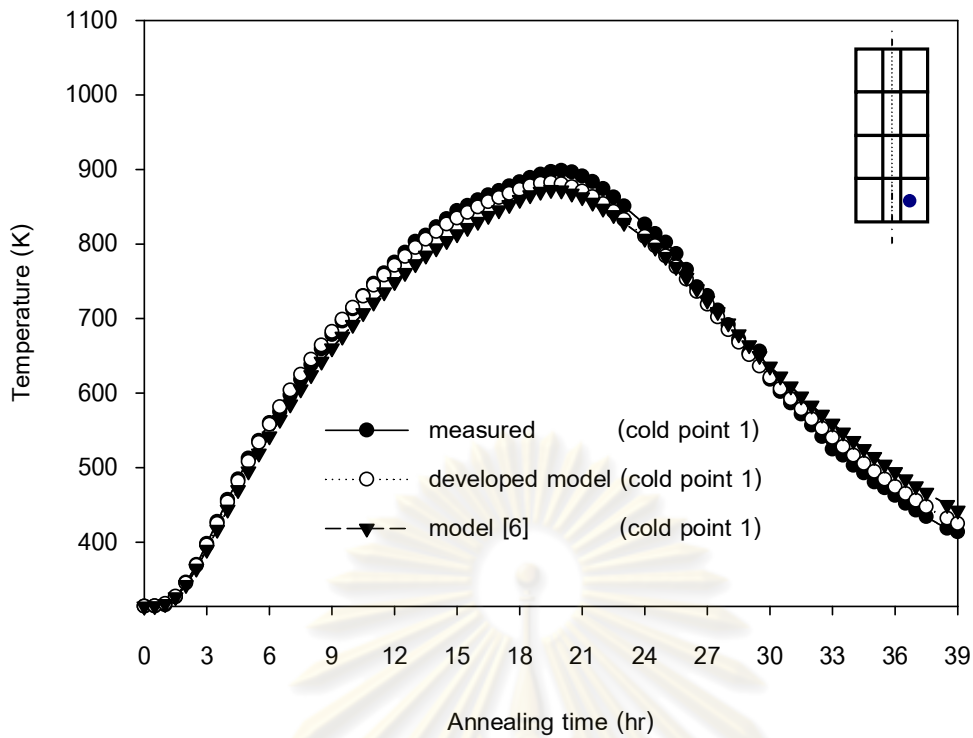
3.29 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 3.00% เพราะฉะนั้น คุณหมุมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น กับ แบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อน ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2.32 % และ ในตำแหน่งจุดเย็น ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.74 %

#### 6.2.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

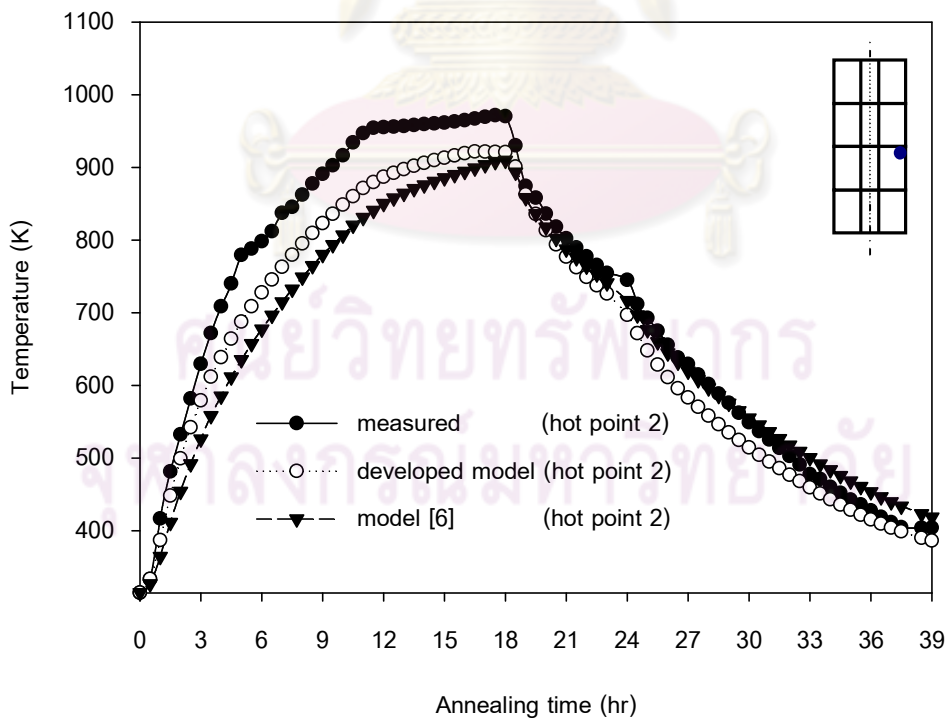


รูปที่ 6.61 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 (code D)

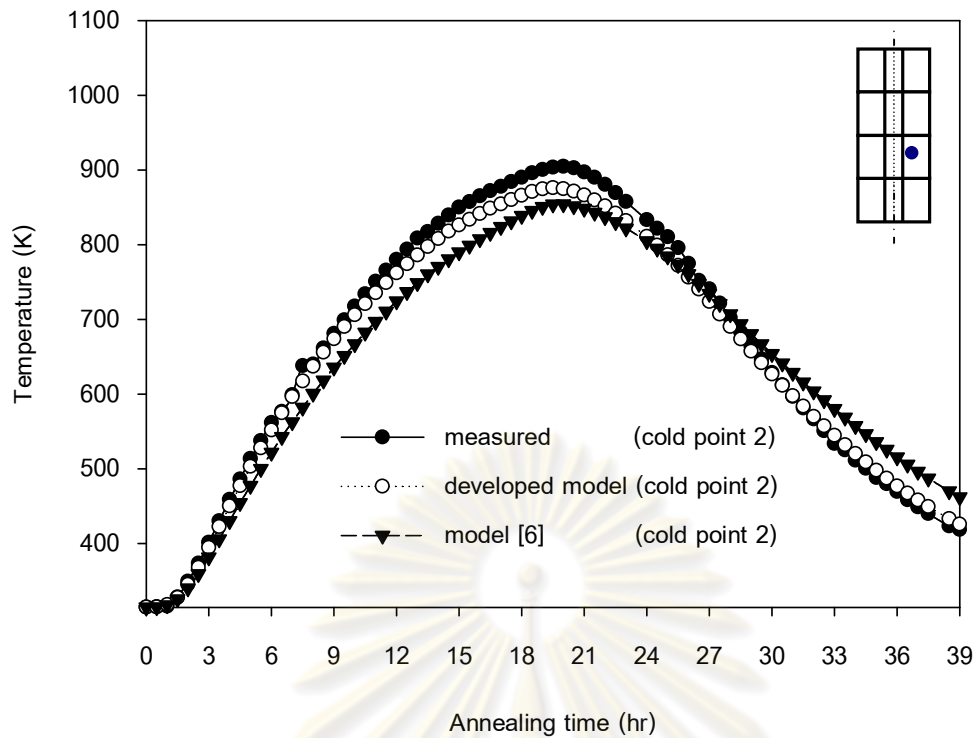
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



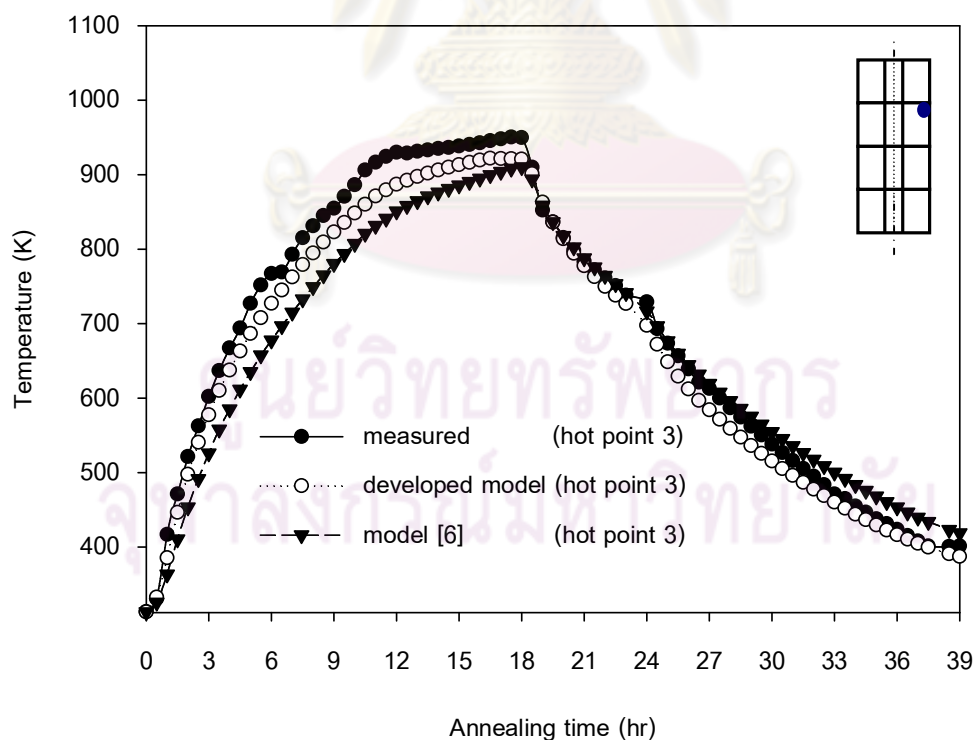
รูปที่ 6.62 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 (code D)



รูปที่ 6.63 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 (code D)

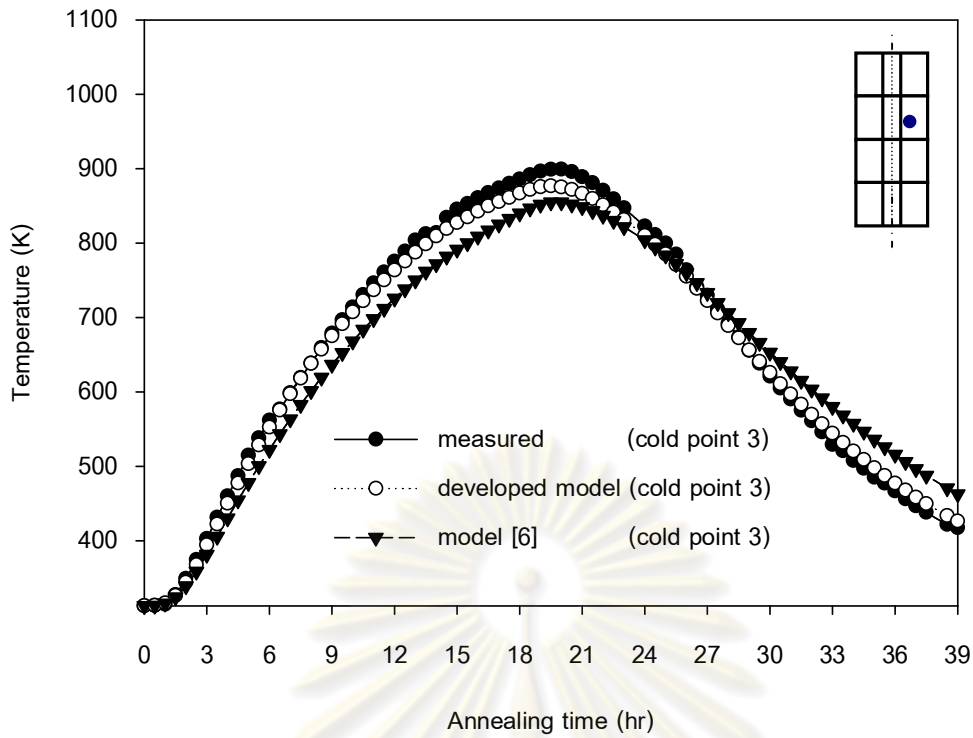


รูปที่ 6.64 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 (code D)

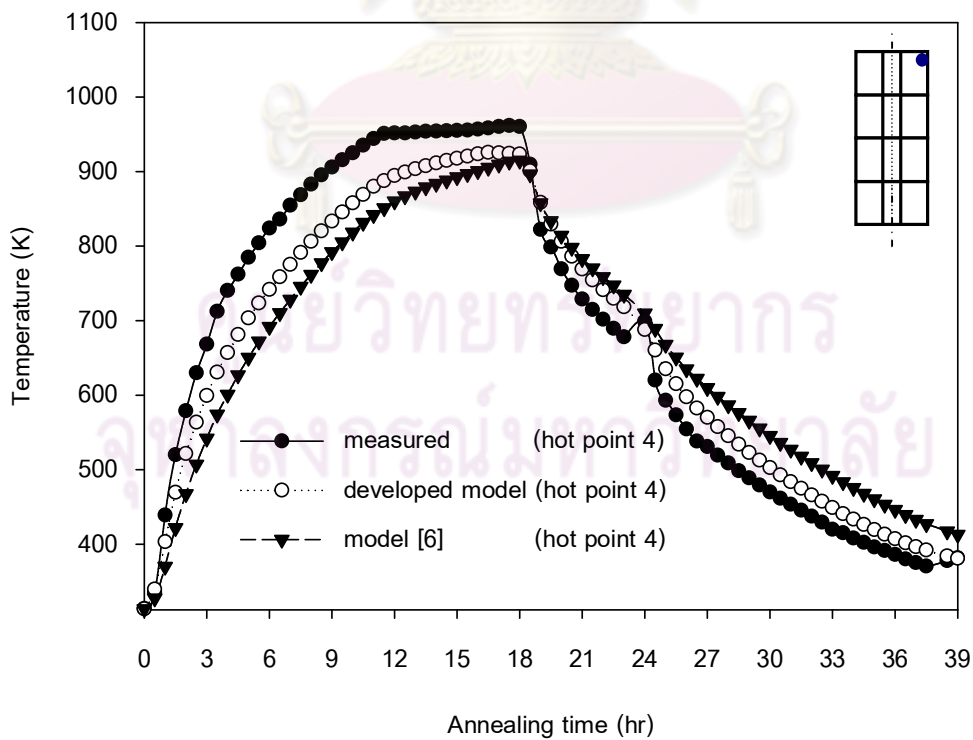


รูปที่ 6.65 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 (code D)

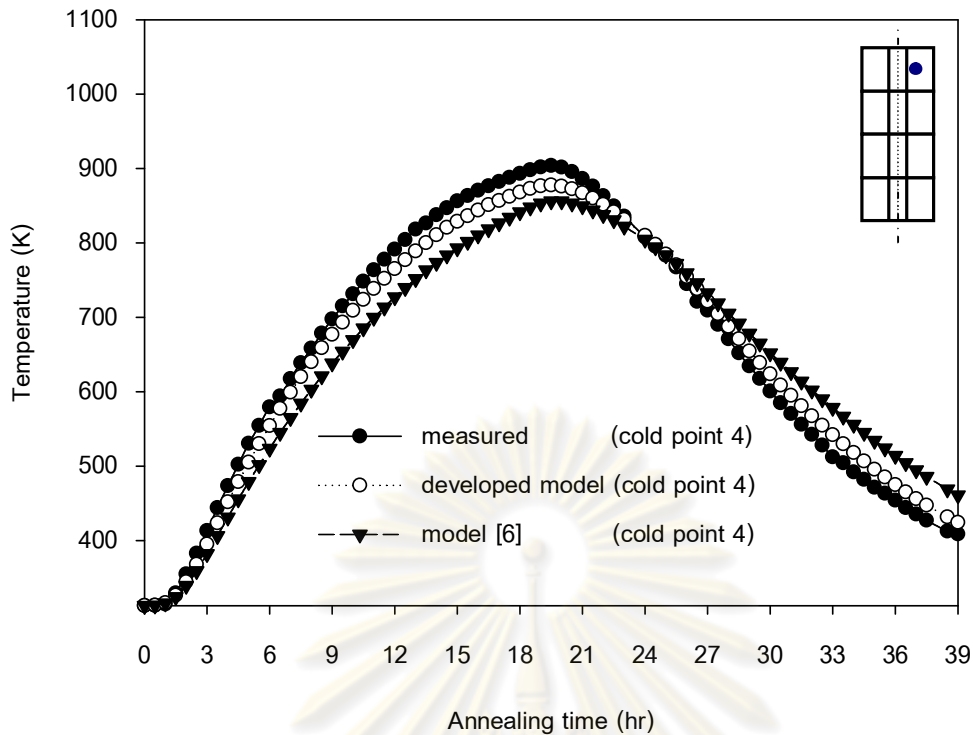




รูปที่ 6.66 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 (code D)



รูปที่ 6.67 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 (code D)



รูปที่ 6.68 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 (code D)

จากรูปที่ 6.61 - 6.68 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code D) ในตำแหน่ง bottom, middle 1, middle 2 และ top ตามลำดับ

โดยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง มากกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] (ซึ่งค่าของค่าความคาดเคลื่อนจะคิดในหน่วย K)

โดยค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 5.56 %, 5.66%, 3.25% และ 6.34% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 5.20% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 1.35%, 1.90%, 1.57% และ 3.12 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 1.99% และ ค่าความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงในตำแหน่งจุดร้อนที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 8.26 %, 7.06%, 5.76% และ 12.07% โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 8.29% และในตำแหน่งจุดเย็นที่ 1, 2, 3 และ 4

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.21%, 5.75%, 5.62% และ 7.29 % โดยจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับ 5.47% เพราะฉะนั้น อุณหภูมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น กับ แบบจำลอง [6] ในตำแหน่งจุดร้อน ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3.06 % และ ในตำแหน่งจุดเย็น ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3.48 %

### 6.3 จำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก

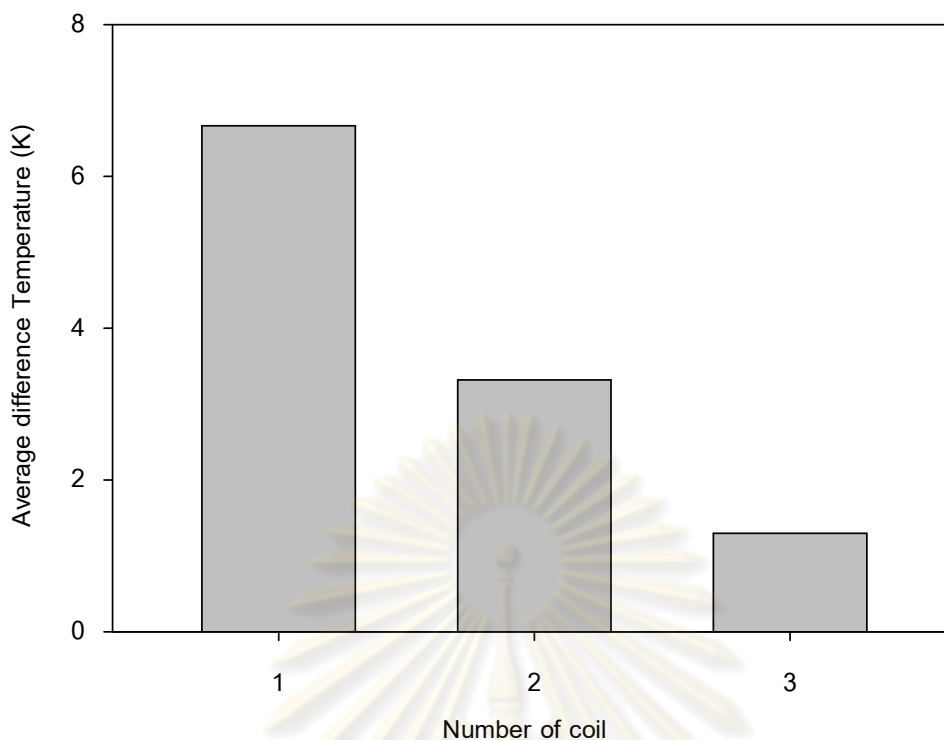
ในการศึกษาจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในเนื้อเหล็ก โดยจะเปรียบเทียบกับความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นซึ่ง จะได้ผลดังตารางที่ 6.5 และ 6.6 ดังนี้

**ตารางที่ 6.5** ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A โดยที่จำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมในระบบต่างกัน

Number of coil	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย (K)			
	Bottom	Middle 1	Middle 2	Top
3	0.88	0.75	2.27	-
2	3.34	3.29	-	-
1	6.67	-	-	-

จากตารางที่ 6.5 เมื่อในระบบมีจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม 3, 2 และ 1 ลูก ตามลำดับ จะมีค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของอุณหภูมิจะเท่ากับ 1.3, 3.32 และ 6.67 K ตามลำดับ และเมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.69

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

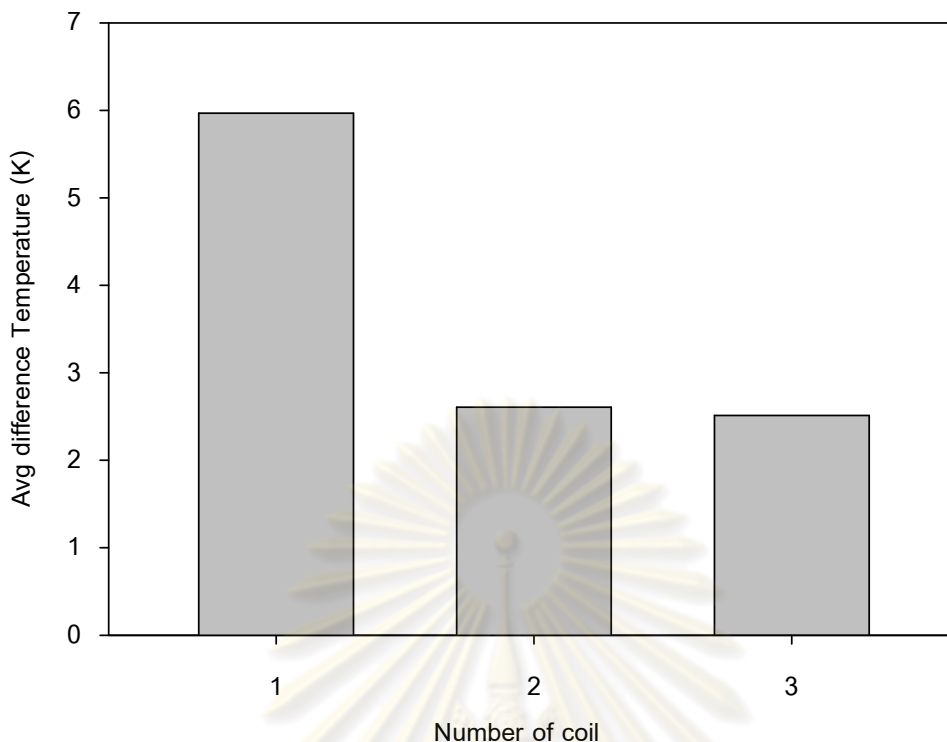


**รูปที่ 6.69** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิกับจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code A) ที่อบในกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

**ตารางที่ 6.6** ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B โดยที่จำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมในระบบต่างกัน

Number of coil	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย (K)			
	Bottom	Middle 1	Middle 2	Top
3	1.87	1.88	3.78	-
2	0.65	4.56	-	-
1	5.97	-	-	-

จากตารางที่ 6.5 เมื่อในระบบมีจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม 3, 2 และ 1 ลูกตามลำดับ จะมีค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของอุณหภูมิจะเท่ากับ 2.51, 2.61 และ 5.97 K ตามลำดับ และเมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.70



รูปที่ 6.70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิกับจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลม (code B) ที่อบในกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

#### 6.4 ออกแบบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

ในการออกแบบตารางการให้ความร้อน (Heating schedule) จะใช้วิธี random search โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนระหว่างแบบจำลองเชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น กับแบบจำลอง [6] ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อน ซึ่งมีผลทำให้

- การใช้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีค่าลดลง

- ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลง

โดยมีเงื่อนไขดังนี้คือ

1. ความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นจะต้องมีค่าใกล้เคียง

หรือน้อยกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของตารางการอบอ่อนที่โรงงานใช้อยู่



2. เมื่อเริ่มอบอ่อน ค่าอัตราการให้ความร้อน (heating rate) จะมีค่าสูงสุดโดยที่  
อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $500^{\circ}\text{C}$

code A :  $345^{\circ}\text{C/hr} \leq \text{heating rate} \leq 420^{\circ}\text{C/hr}$

code B :  $275^{\circ}\text{C/hr} \leq \text{heating rate} \leq 360^{\circ}\text{C/hr}$

code C :  $325^{\circ}\text{C/hr} \leq \text{heating rate} \leq 370^{\circ}\text{C/hr}$

code D :  $120^{\circ}\text{C/hr} \leq \text{heating rate} \leq 215^{\circ}\text{C/hr}$

3. ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นที่เป็นไปได้  
ตลอดระยะเวลาในการอบ

code A : ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น  $\leq 265^{\circ}\text{C}$

code B : ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น  $\leq 310^{\circ}\text{C}$

code C : ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น  $\leq 315^{\circ}\text{C}$

code D : ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น  $\leq 270^{\circ}\text{C}$

4. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการให้ความร้อน

code A : อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อน  $\leq 715^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในตำแหน่งจุดเย็น  $\geq 610^{\circ}\text{C}$  ,

$318\text{ K} \leq \text{อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน} \leq 950\text{ K}$

code B : อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อน  $\leq 725^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในตำแหน่งจุดเย็น  $\geq 685^{\circ}\text{C}$  ,

$320\text{ K} \leq \text{อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน} \leq 970\text{ K}$

code C : อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อน  $\leq 710^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในตำแหน่งจุดเย็น  $\geq 640^{\circ}\text{C}$  ,

$325\text{ K} \leq \text{อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน} \leq 950\text{ K}$

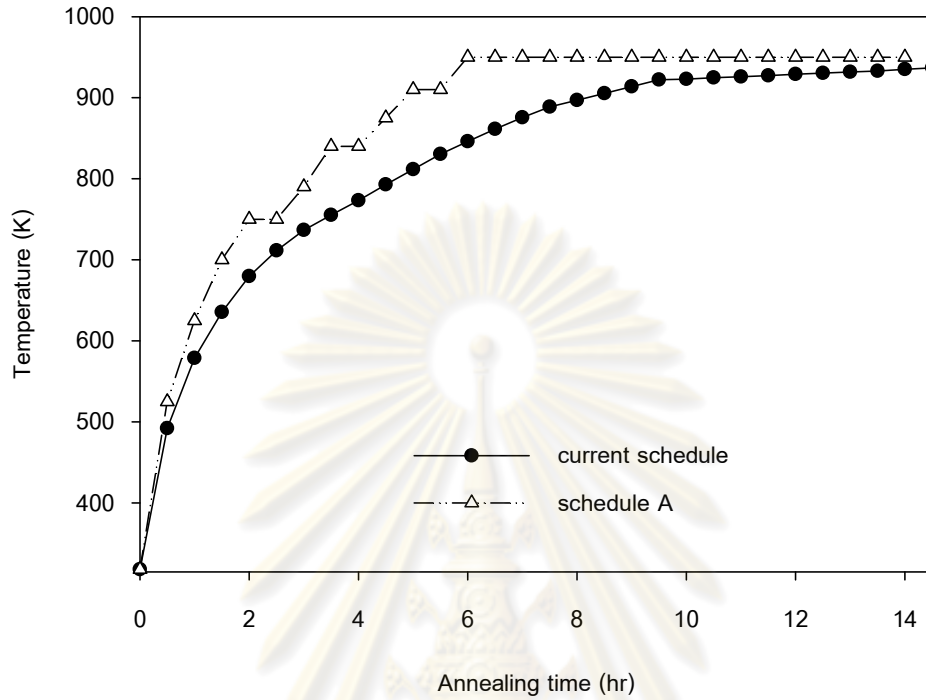
code D : อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อน  $\leq 715^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในตำแหน่งจุดเย็น  $\geq 600^{\circ}\text{C}$  ,

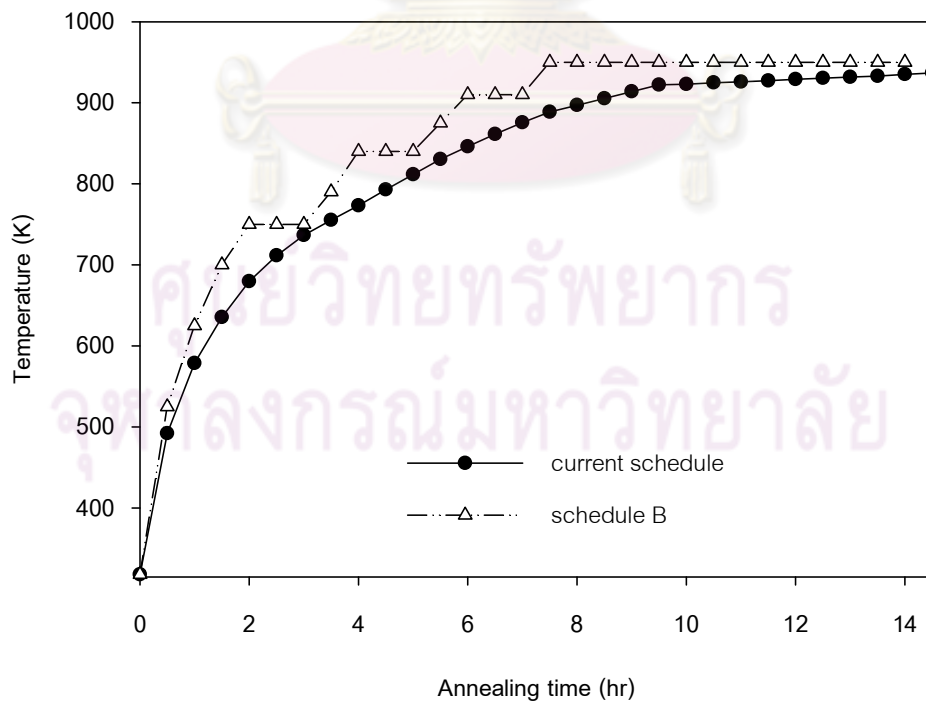
$315\text{ K} \leq \text{อุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน} \leq 950\text{ K}$

6.4.1 รูปแบบตารางการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6]

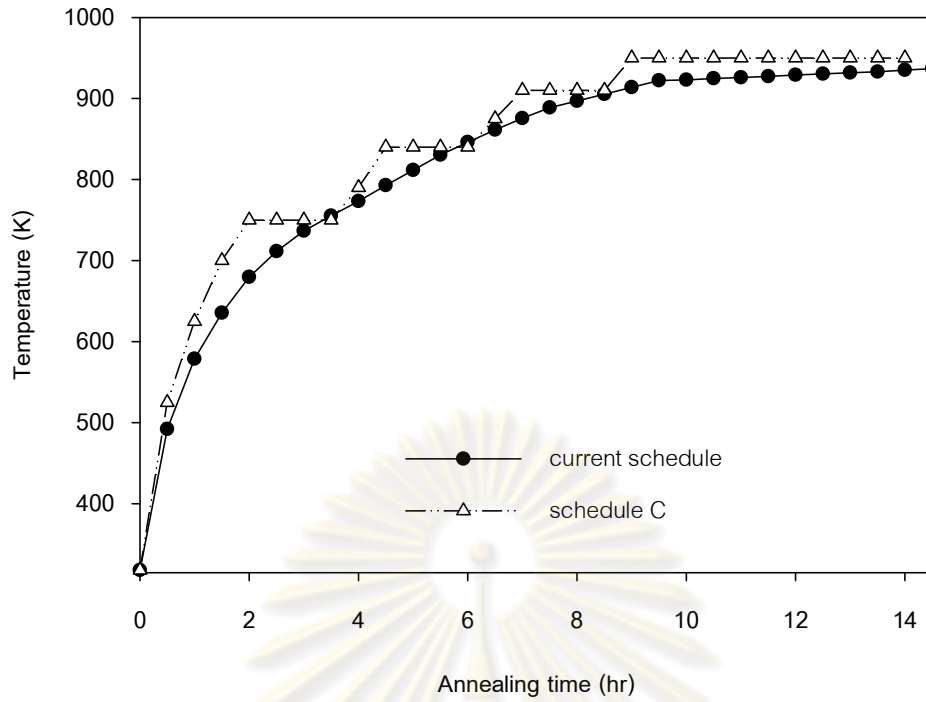
- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code A)



(a)



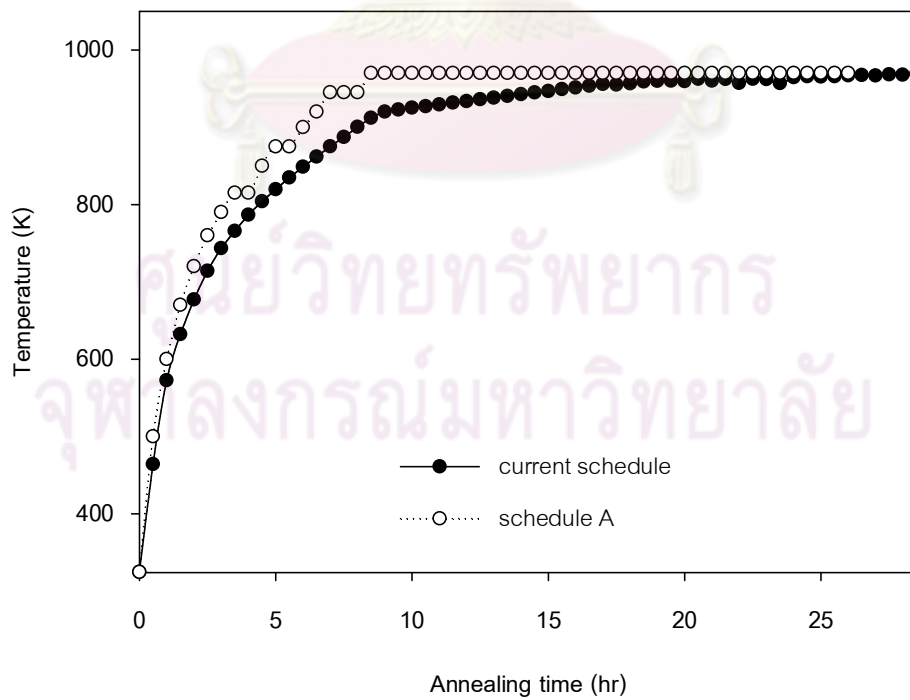
(b)



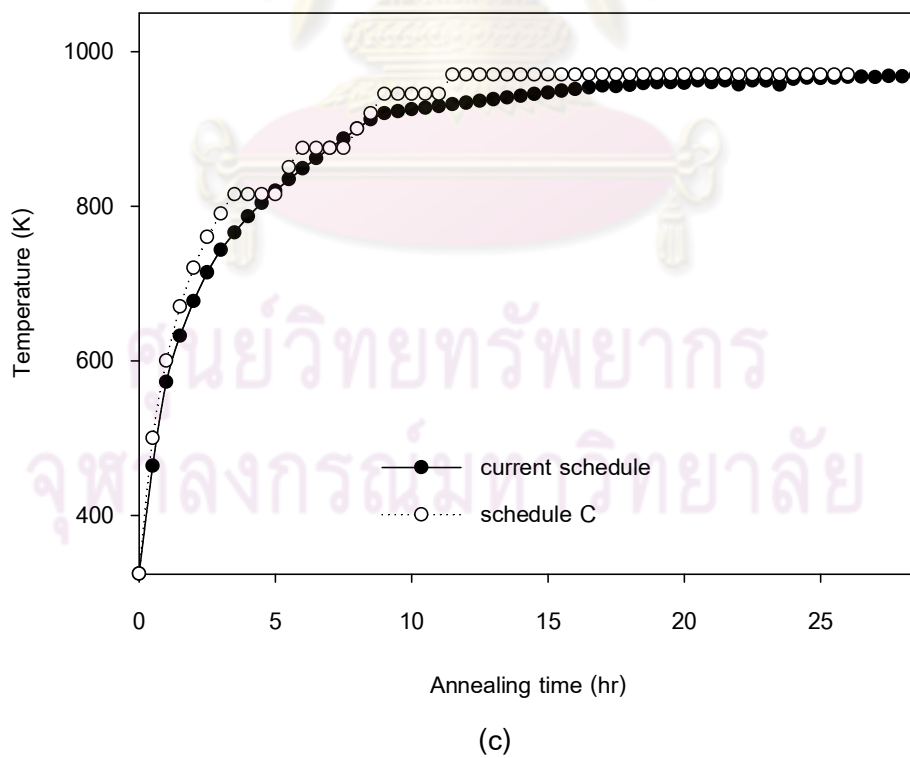
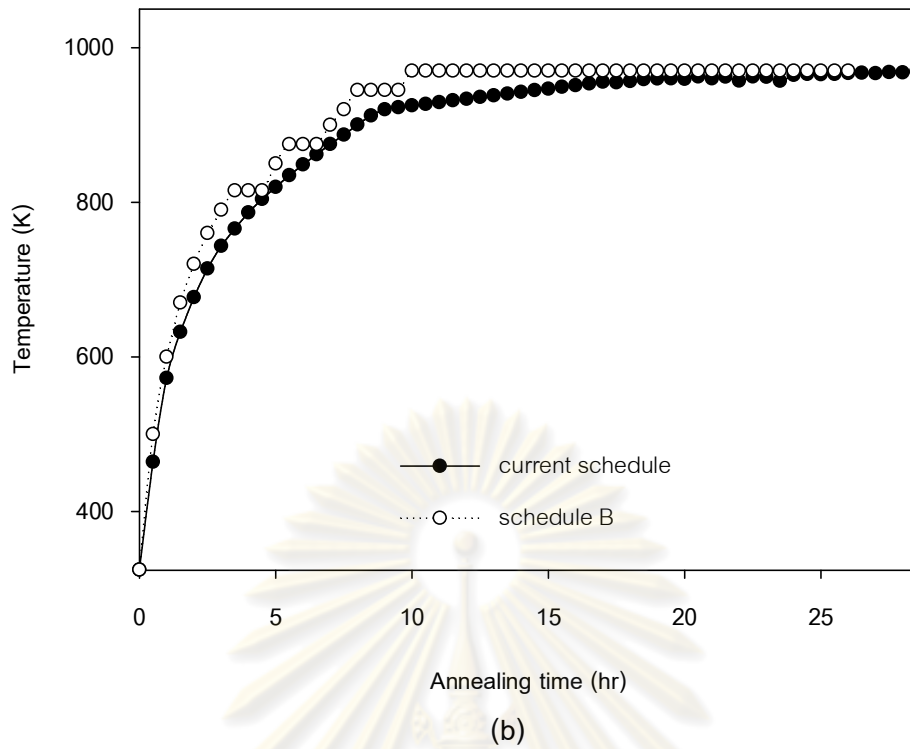
(c)

รูปที่ 6.71 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6], (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code B)

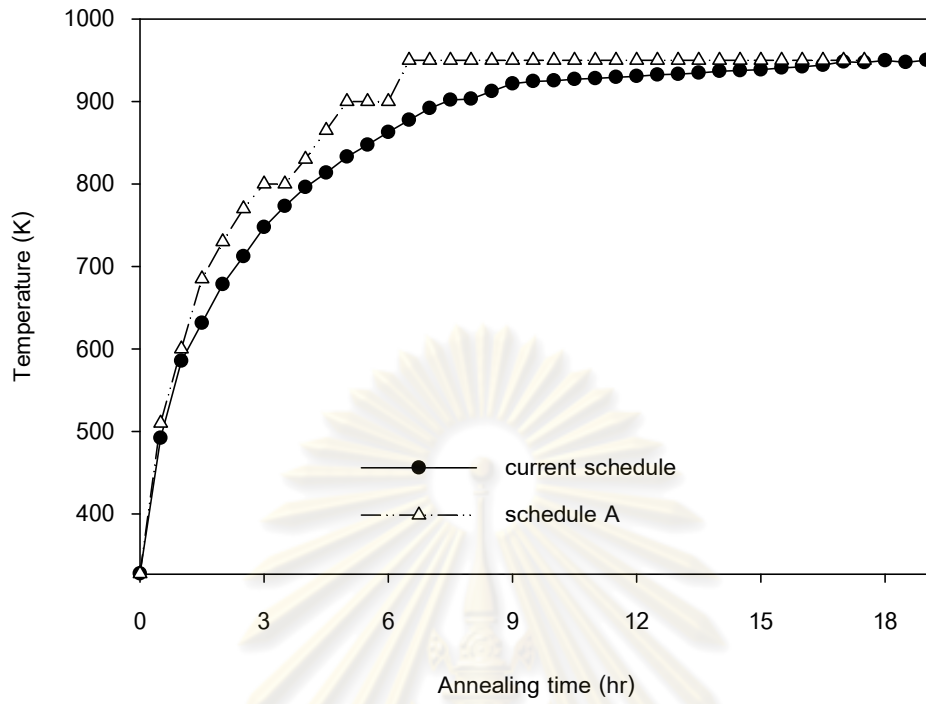


(a)

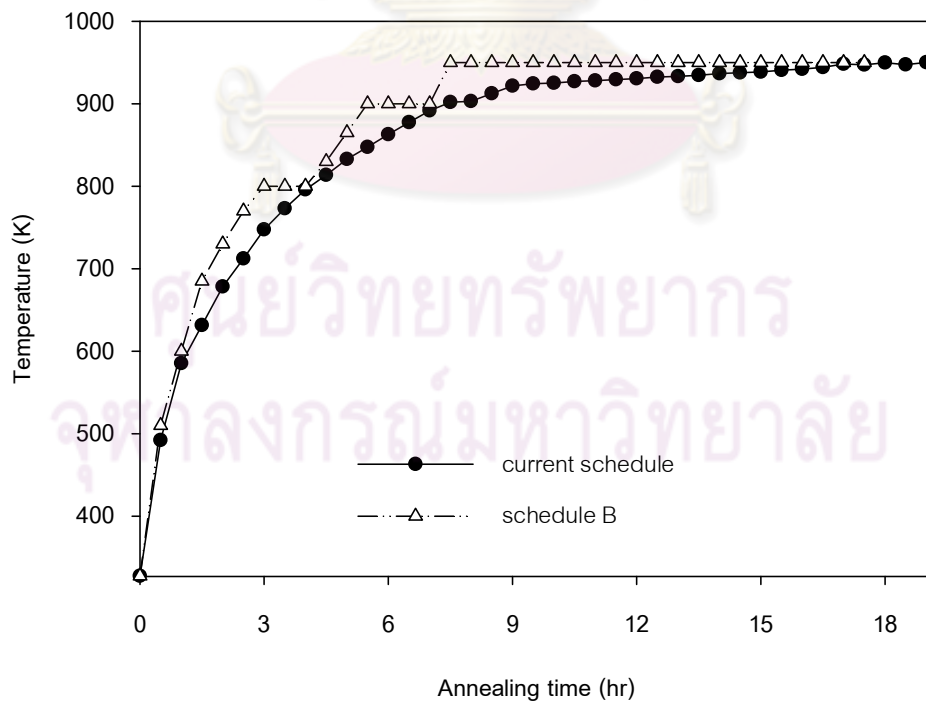


รูปที่ 6.72 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code B) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6], (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code C)

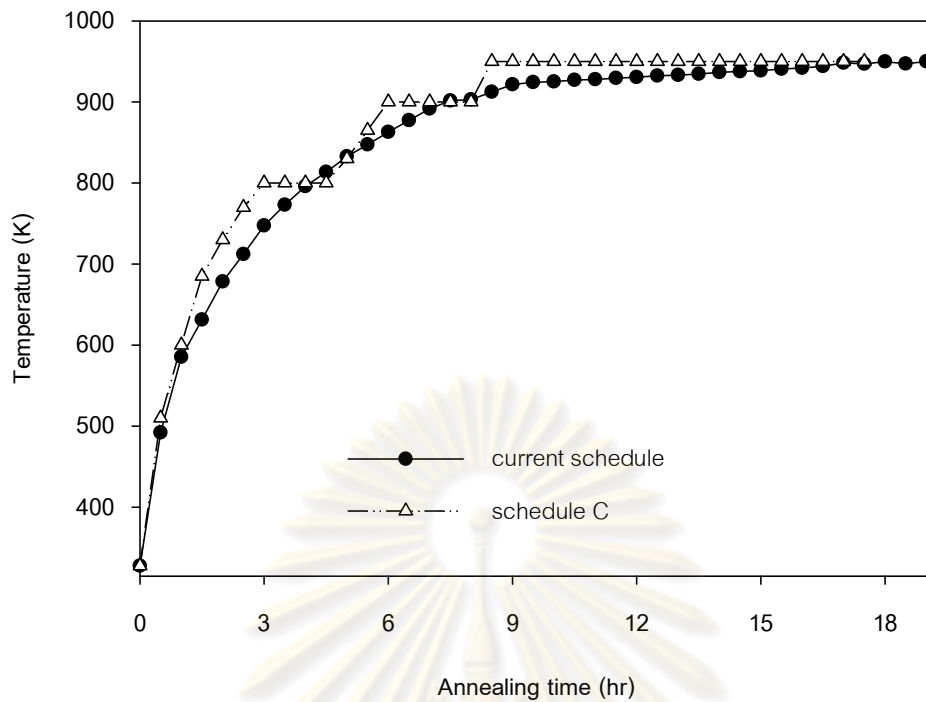


(a)



(b)

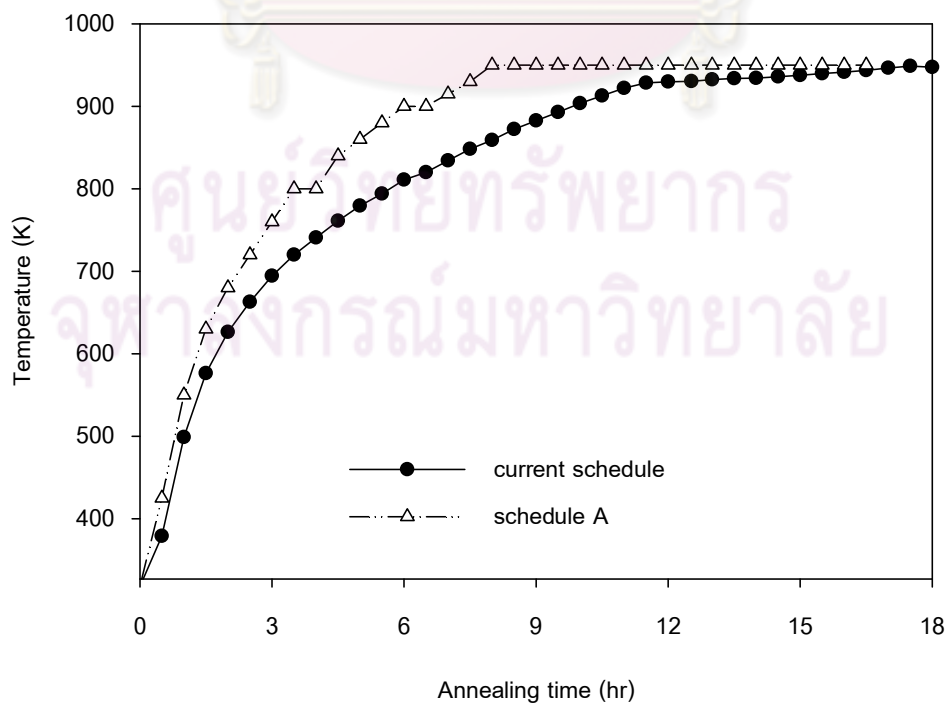




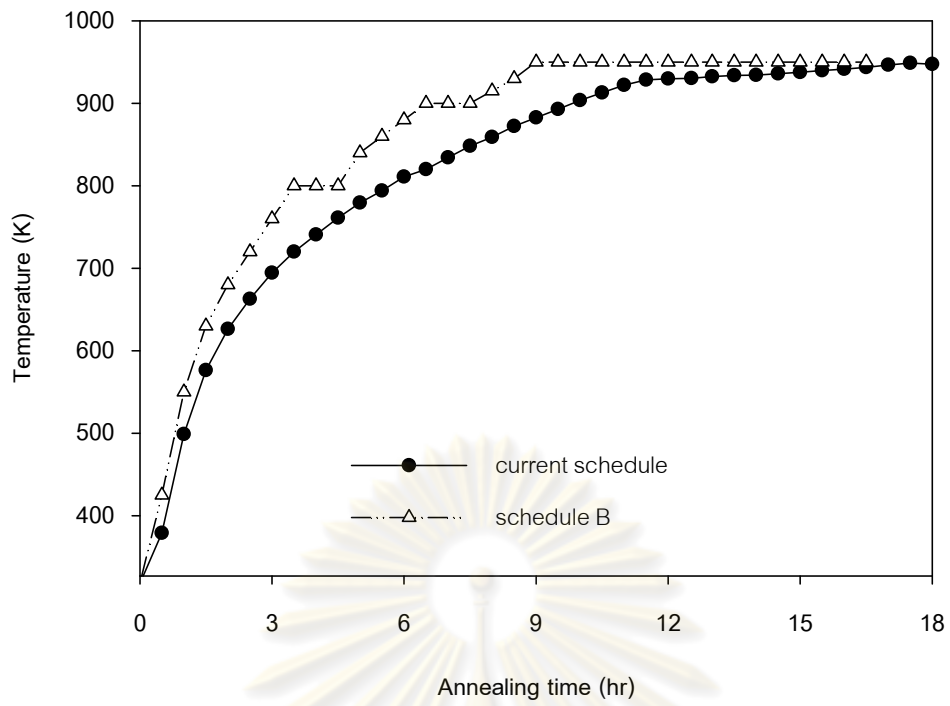
(c)

รูปที่ 6.73 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code C) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6], (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

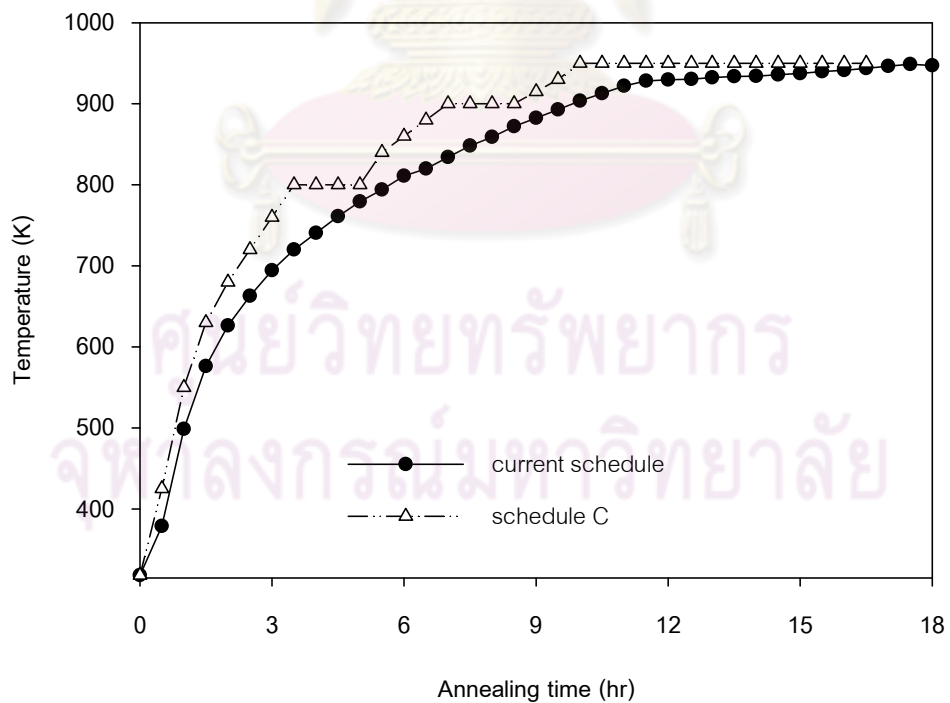
- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code D)



(a)



(b)



(c)

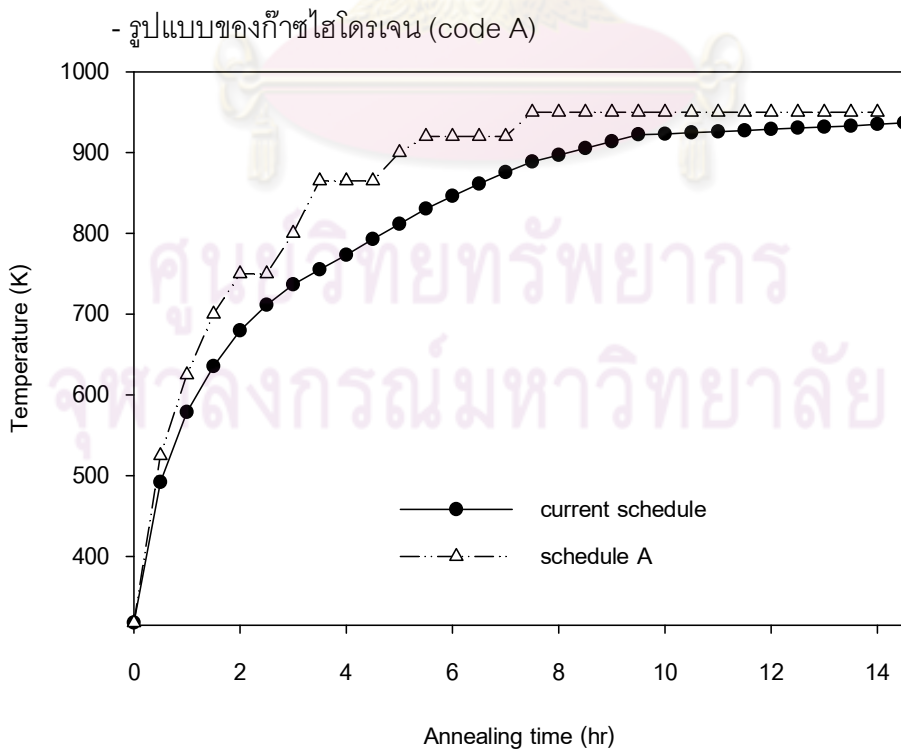
รูปที่ 6.74 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าสไฮโดรเจน (code D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6], (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

จากรูปที่ 6.71-6.74 แสดงรูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A, B, C และ D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลอง [6] ผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น จะได้ผลการทำนาย คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่วัดจริงจากโรงงานจะมีค่าดังนี้คือ schedule A จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุด โดยมีค่าน้อยกว่า schedule B และ C ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของผลการทำนายแสดงในตารางที่ 6.7

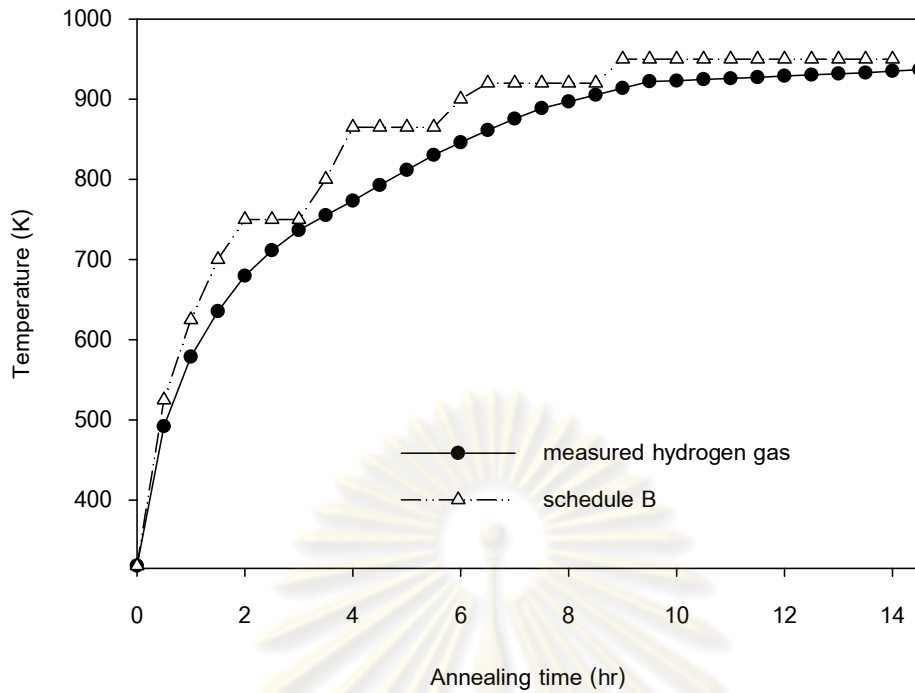
ตารางที่ 6.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลอง [6]

schedule	แบบจำลอง [6]		
	A	B	C
code A	52.18	58.46	67.89
code B	7.77	10.01	11.32
code C	33.84	39.83	43.14
code D	61.01	62.64	66.44

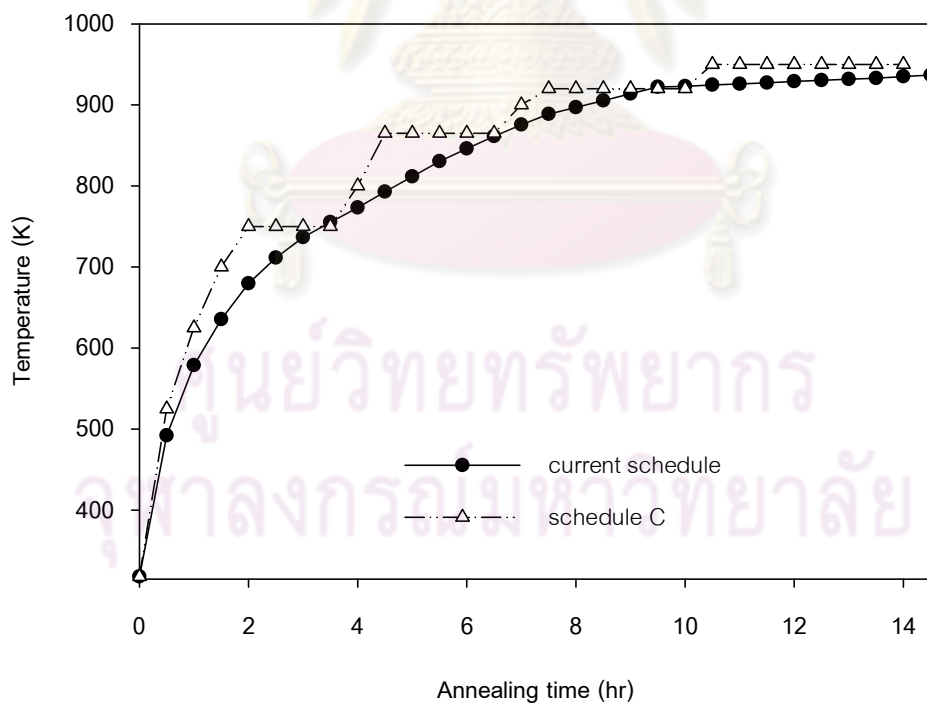
#### 6.4.2 รูปแบบตารางการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



(a)



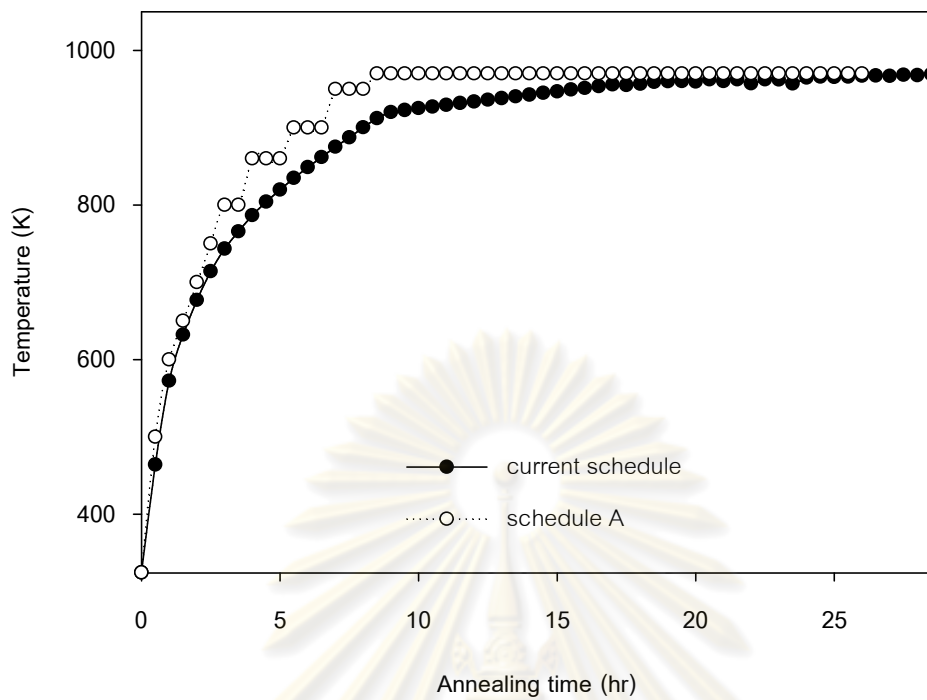
(b)



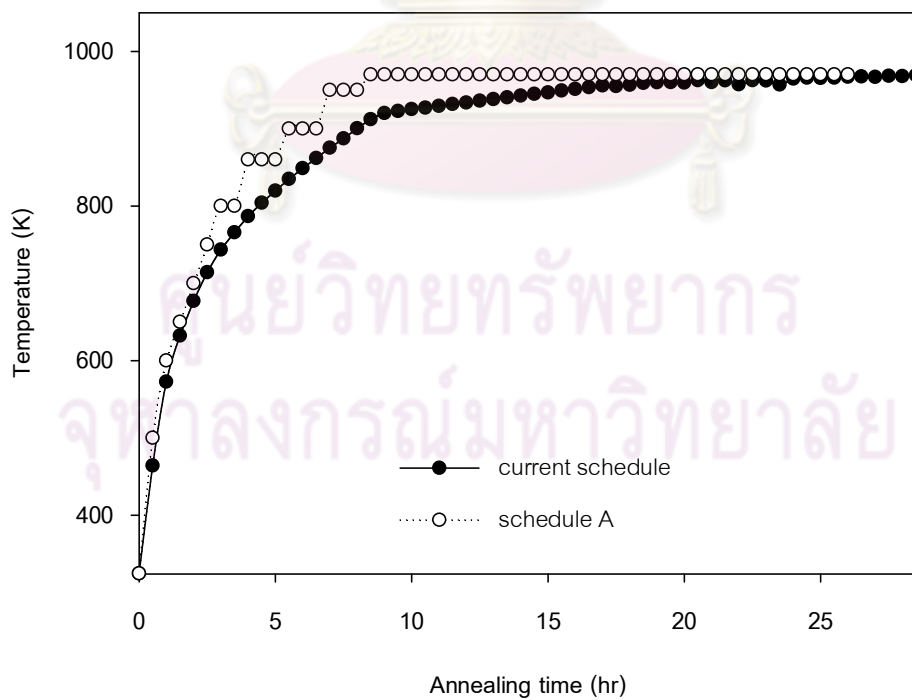
(c)

รูปที่ 6.75 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น, (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code B)

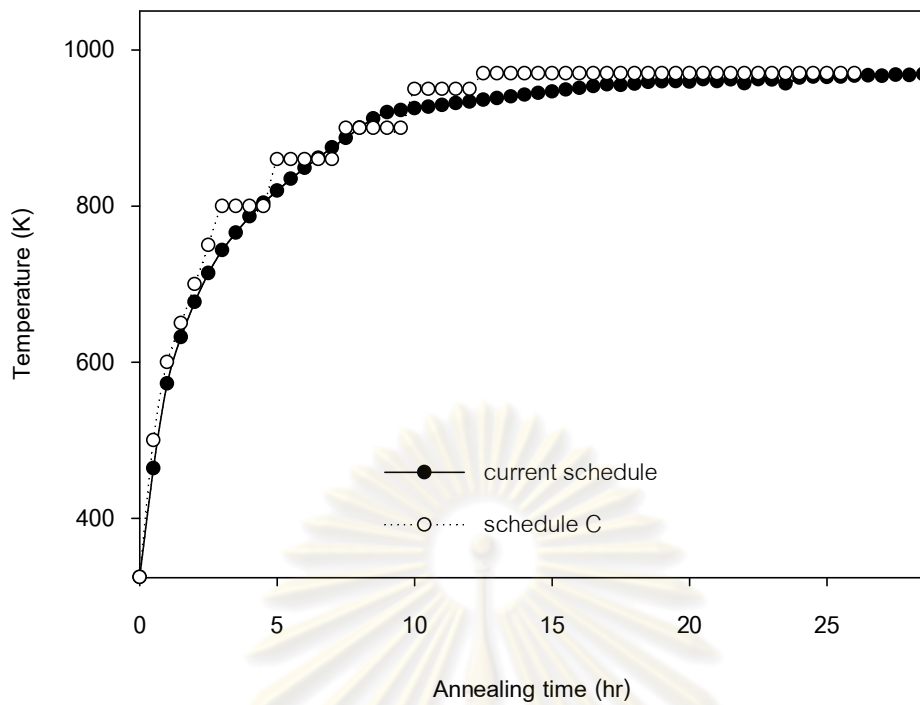


(a)



(b)

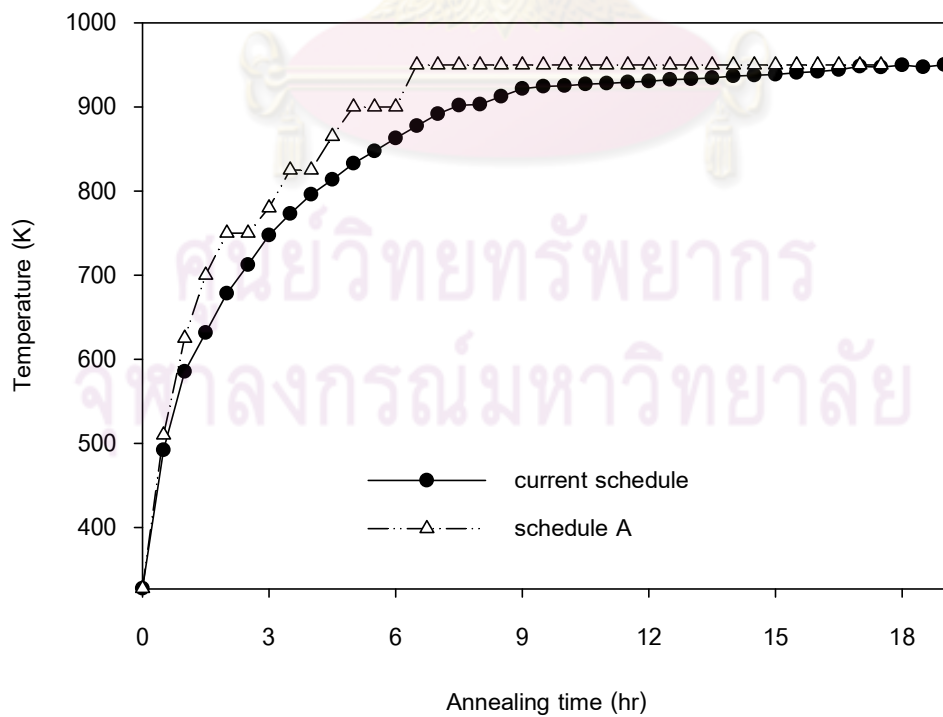




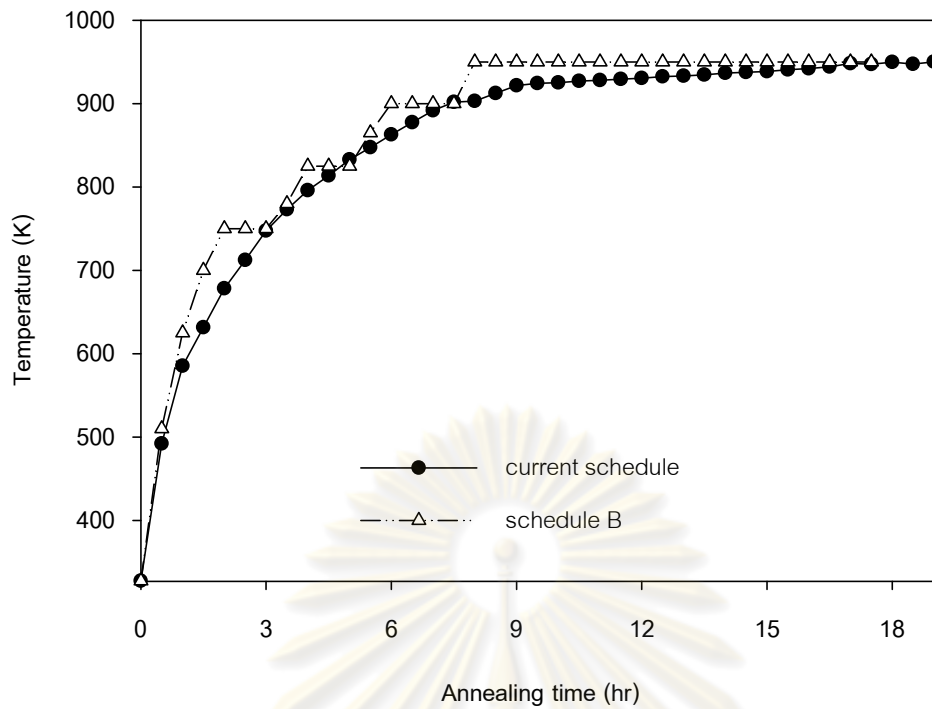
(c)

รูปที่ 6.76 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code B) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น, (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

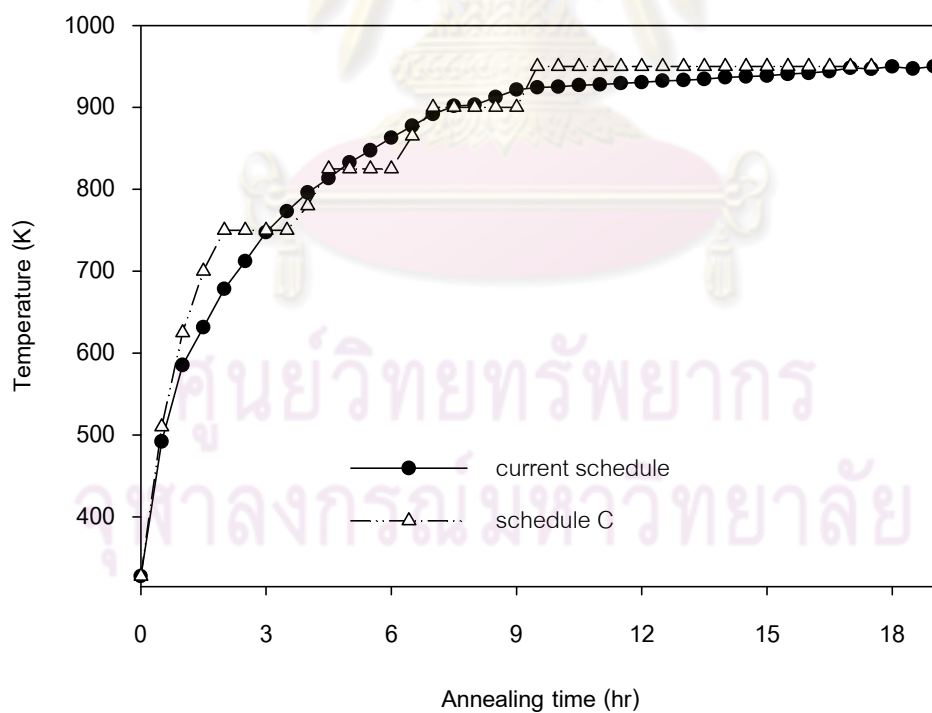
- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code C)



(a)



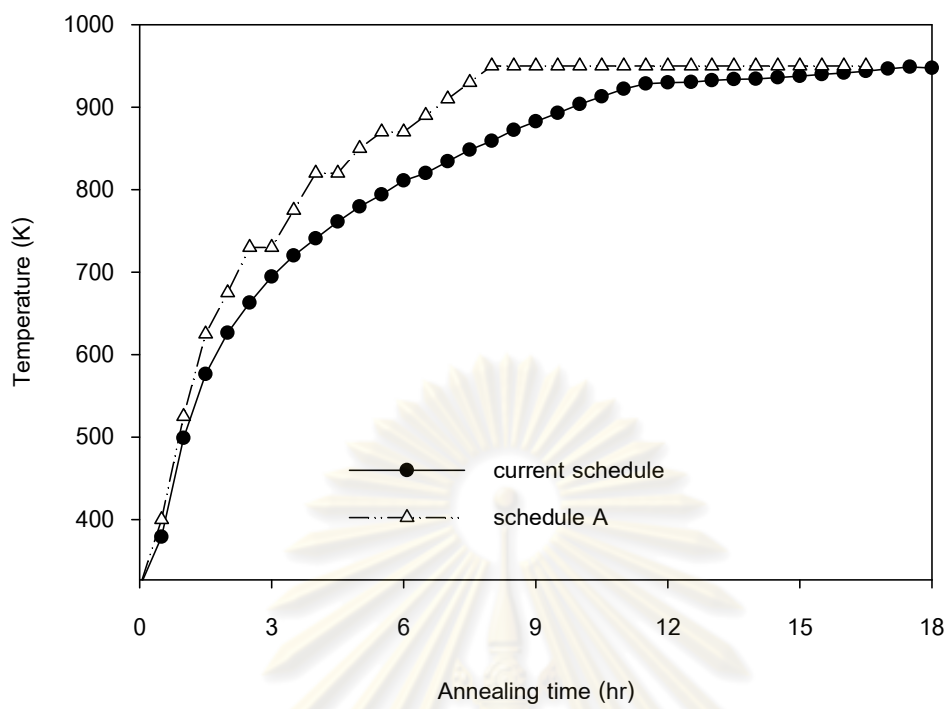
(b)



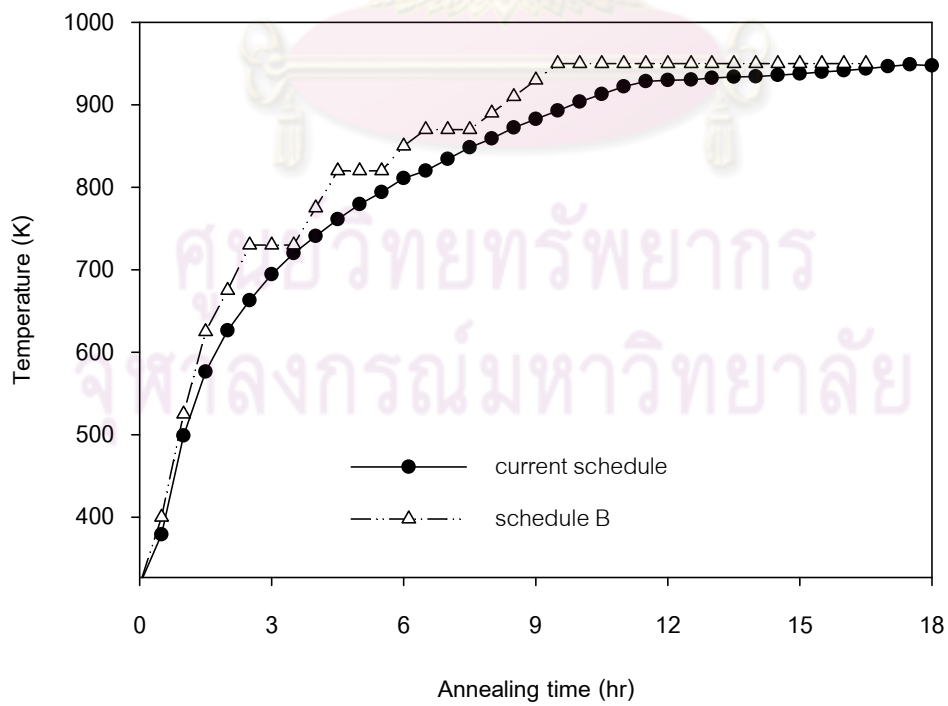
(c)

รูปที่ 6.77 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code C) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น, (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

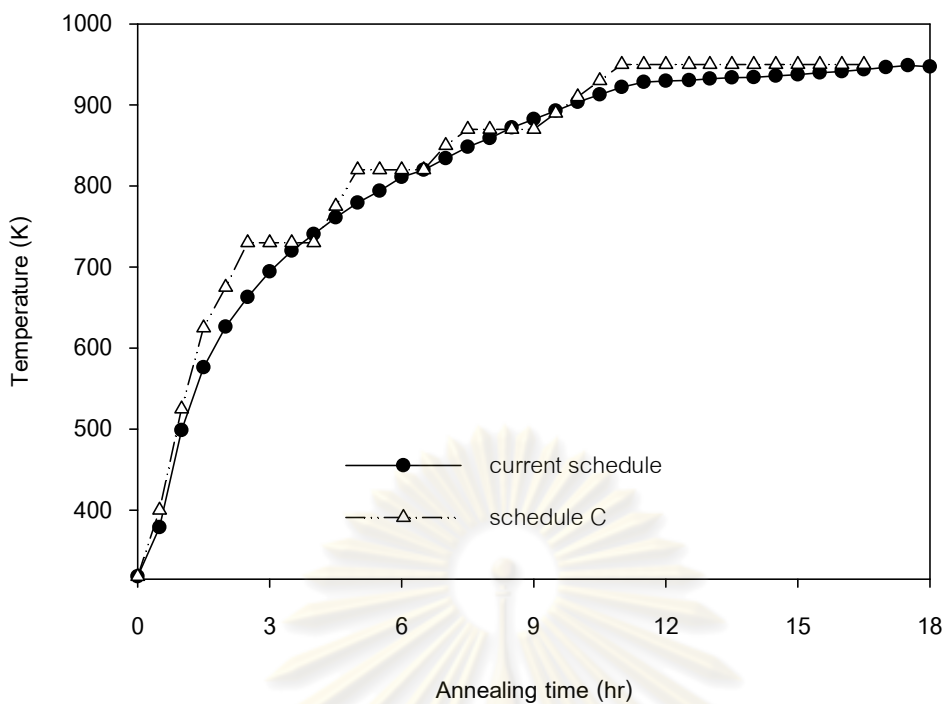
- รูปแบบของก๊าซไฮโดรเจน (code D)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6.78 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น, (a) schedule A, (b) schedule B, (c) schedule C

จากรูปที่ 6.75-6.78 แสดงรูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (code A, B, C และ D) ที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น จะได้ผลการทำนาย คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่วัดจริงจากโรงงานจะมีค่าดังนี้คือ schedule A จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยกว่า schedule B และ C ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของผลการทำนายแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

schedule	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น		
	A	B	C
code A	49.42	57.66	63.93
code B	6.17	6.85	10.84
code C	26.81	29.43	39.5
code D	57.51	61.46	63.09

ตารางที่ 6.9 สรุปความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) ในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการให้ความร้อนของแบบจำลอง [6], แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และอุณหภูมิที่ได้ตรวจวัดจริง

schedule	แบบจำลอง [6]			แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น			อุณหภูมิที่ได้ตรวจวัดจริง
	A	B	C	A	B	C	
code A	52.18	58.46	67.89	49.42	57.66	63.93	65.15
code B	7.77	10.01	11.32	6.17	6.85	10.84	23.53
code C	33.84	39.83	43.14	26.81	29.43	39.5	48.05
code D	61.01	62.64	66.44	57.51	61.46	63.09	76.30

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทำนายอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น ระหว่างแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น แบบจำลอง [6] และอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง ปรากฏว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายอุณหภูมิได้ โดยที่จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็น น้อยกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] และอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง

จากรูป 6.75 แสดงรูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน จาก schedule A ถึง C ของเหล็กม้วนกลม code A ซึ่ง Schedule A, B และ C จะมีรูปแบบการอบอุ่นใกล้เคียงกัน ต่างกันที่ในแต่ละรูปแบบการอบอุ่น จะมีเวลาในการแช่ที่ต่างๆ กัน ซึ่ง Schedule A จะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ บริเวณจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงซึ่งสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนได้ 0.5 ชั่วโมง จากการที่ลดระยะเวลาในการอบอุ่นเหล็กแผ่นม้วนกลมได้จะมีผลทำให้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนได้ 48.79 บาท/1 เตาอบอุ่นแบบกะ และสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 720.85 หน่วย/1 เตาอบอุ่นแบบกะ (รายละเอียดผลการคำนวณ แสดงที่ภาคผนวก ง)

จากรูป 6.76 แสดงรูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน จาก schedule A ถึง C ของเหล็กม้วนกลม code B ซึ่ง Schedule A จะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ บริเวณจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง ซึ่งสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนได้ 2.5 ชั่วโมง จากการที่ลดระยะเวลาในการอบอุ่นเหล็กแผ่นม้วนกลมได้จะมีผลทำให้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนได้ 243.94 บาท/1 เตาอบอุ่นแบบกะ และสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 3604.25 หน่วย/1 เตาอบอุ่นแบบกะ (รายละเอียดผลการคำนวณ แสดงที่ภาคผนวก ง)

จากรูป 6.77 แสดงรูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน จาก schedule A ถึง C ของเหล็กม้วนกลม code C ซึ่ง Schedule A จะมีค่าความแตกต่างของ



อุณหภูมิ บริเวณจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงซึ่งสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนได้ 1.73 ชั่วโมง จากการที่ลดระยะเวลาในการอบเหล็กแผ่นม้วนกลมได้จะมีผลทำให้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของ ก๊าซไฮโดรเจนได้ 174.47 บาท/1 เตอบอ่อนแบบบะ และสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 2494.14 หน่วย/1 เตอบอ่อนแบบบะ (รายละเอียดผลการคำนวณ แสดงที่ภาคผนวก ง)

จากรูป 6.78 แสดงรูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน จาก schedule A ถึง C ของเหล็กม้วนกลม code D ซึ่ง Schedule A จะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ บริเวณจุดร้อนและจุดเย็นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงซึ่งสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนได้ 1.5 ชั่วโมง จากการที่ลดระยะเวลาในการอบเหล็กแผ่นม้วนกลมได้จะมีผลทำให้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนได้ 146.37 บาท/1 เตอบอ่อนแบบบะ และสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 2162.55 หน่วย/1 เตอบอ่อนแบบบะ(รายละเอียดผลการคำนวณ แสดงที่ภาคผนวก ง)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

#### 7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัต

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัต และทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นเหล็กม้วนกลมโดยใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง พบว่ามีค่าสอดคล้องกัน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้ จะมีรูปแบบดังนี้คือ

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเหล็กแผ่นม้วนกลม

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_s}{\partial z})$$

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของก๊าซไฮโดรเจน

$$\rho_h C_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rh} r \frac{\partial T_h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zh} \frac{\partial T_h}{\partial z}) \right] - \rho_h C_{p,h} u_h \nabla T_h$$

#### 7.2 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิภายในเหล็กแผ่นม้วนกลม

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้กับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง [6] ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาได้จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถใช้ในการทำนายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบอ่อนแบบกะได้ดี

#### 7.3 จำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก

จำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็น ซึ่งเมื่อจำนวนของเหล็กแผ่นม้วนกลมในกระบวนการอบอ่อนลดลง จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้นและ เมื่อลดจำนวนเหล็กแผ่นม้วนกลมจาก 4 ม้วน ลงเหลือ 3 ม้วน ค่าความคลาดเคลื่อนจากมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

#### 7.4 ออกแบบอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

เวลาที่ใช้แช่ (soaking time) มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็กซึ่งเวลาที่ใช้แช่มีค่ามากจะส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมิบริเวณจุดร้อนและจุดเย็นมีค่าน้อยลง และยังส่งผลให้ลดการใช้ก๊าซไฮโดรเจน และ ลดพลังงานการไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบจำลอง[6]



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Satyam S. Sahay and Arun M. Kumar. Applications of Integrated Batch Annealing Furnace Simulator. Materials and Manufacturing process 17, 4(2002): 439 -453.
- [2] X. Zhang, F. Yu, W. Wu and Y. Zuo. Application of Radial Effective Thermal Conductivity for Heat Transfer Model of Steel Coils in HPH Furnace. International Journal of Thermophysics 24, (2003): 1395 – 1405.
- [3] Guang Chen and Mingyan Gu. Simulation of steel coil heat transfer in a high performance hydrogen furnace. Heat Transfer Engineering Journal 28, (2007): 25-35.
- [4] Man Yong Kim. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace. Heat and Mass Transfer Journal 50, (2007): 3740-3748.
- [5] Ahmad Saboonchi, Saeid Hassanpour and Shahram Abbasi. New heating schedule in hydrogen annealing furnace based on process simulation for less energy consumption. Energy Conversion and Management Journal 49, (2008): 3211-3216.
- [6] Ahmad Saboonchi and Saeid Hassanpour. Simulation of Cold Rolled Steel Coil Heating during Batch Annealing Process. Heat Transfer Engineering Journal 29, (2008): 893-901.
- [7] Ahmad Saboonchi and Saeid Hassanpour. Simulation-based prediction of hot-rolled coil forced cooling. Applied Thermal Engineering Journal 28, (2008): 1630 -1637
- [8] Ahmad Saboonchi and Saeid Hassanpour. Prediction of H<sub>2</sub> Content and Inert Gas Circulation Rate Effects on Batch Annealing Process. Material and Manufacturing Processes Journal 23, (2008): 277-283.
- [9] คมสัน จิระภัทรศิลป์. (2545). Engineering Metallurgy (โลหะวิทยาวิศวกรรม). พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ภาควิชาการพิมพ์มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] สมชาย ปกรโณดม. (2522). การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์รุ่งเกียรติ.
- [11] ประกอบ บุญยงค์. (2538). Engineering Physical Metallurgy. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มงคลการพิมพ์.

- [12] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง. (2547). การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์ เซนเตอร์.
- [13] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2537). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. (2546). วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซนเตอร์.
- [15] William F. Smith. 1996. Principle of Material Science and Engineering, 3 rd.ed., NewYork: McGraw-Hill.
- [16] นายอิสระ สถาพร และ นายสมเกียรติ ขำเทศ. เอกสารกระบวนการอบอ่อนของเหล็กรีดเย็น (Batch Annealing Furnace, BAF). บริษัท เหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด (มหาชน)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ตารางที่ ก-1 ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Temperature (K)	$K_s$ (W/m·K)	$K_r$ (W/m·K)
273.15	59.66	22.72
315.05	58.11	22.13
319.15	57.96	22.07
411.35	54.55	20.77
490.75	51.61	19.65
544.05	49.64	18.90
601.15	47.52	18.10
657.15	45.45	17.31
707.25	43.60	16.60
745.05	42.20	16.07
768.95	41.32	15.73
792.85	40.43	15.40
816.75	39.55	15.06
840.65	38.66	14.72
867.95	37.65	14.34
877.25	37.31	14.21
886.85	36.95	14.07
901.55	36.41	13.86
911.75	36.03	13.72
922.55	35.63	13.57
933.45	35.23	13.41
944.25	34.83	13.26
949.35	34.64	13.19
954.15	34.46	13.12
955.65	34.41	13.10
958.15	34.32	13.07
964.85	34.07	12.97

ตารางที่ ก-2 ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Temperature (K)	$K_s$ (W/m·K)	$K_r$ (W/m·K)
273.15	59.66	16.02
315.05	58.11	15.60
319.15	57.96	15.56
411.35	54.55	14.65
490.75	51.61	13.86
544.05	49.64	13.33
601.15	47.52	12.76
657.15	45.45	12.20
707.25	43.60	11.71
745.05	42.20	11.33
768.95	41.32	11.09
792.85	40.43	10.86
816.75	39.55	10.62
840.65	38.66	10.38
867.95	37.65	10.11
877.25	37.31	10.02
886.85	36.95	9.92
901.55	36.41	9.78
911.75	36.03	9.67
922.55	35.63	9.57
933.45	35.23	9.46
944.25	34.83	9.35
949.35	34.64	9.30
954.15	34.46	9.25
955.65	34.41	9.24
958.15	34.32	9.21
964.85	34.07	9.15

ตารางที่ ก-3 ค่าการนำความร้อนของเหล็กของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Temperature (K)	$K_s$ (W/m·K)	$K_r$ (W/m·K)
273.15	59.66	17.90
315.05	58.11	17.43
319.15	57.96	17.39
411.35	54.55	16.36
490.75	51.61	15.48
544.05	49.64	14.89
601.15	47.52	14.26
657.15	45.45	13.63
707.25	43.60	13.08
745.05	42.20	12.66
768.95	41.32	12.39
792.85	40.43	12.13
816.75	39.55	11.86
840.65	38.66	11.60
867.95	37.65	11.29
877.25	37.31	11.19
886.85	36.95	11.09
901.55	36.41	10.92
911.75	36.03	10.81
922.55	35.63	10.69
933.45	35.23	10.57
944.25	34.83	10.45
949.35	34.64	10.39
954.15	34.46	10.34
955.65	34.41	10.32
958.15	34.32	10.29
964.85	34.07	10.22

ตารางที่ ก-4 ค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Temperature (K)	$K_s$ (W/m·K)	$K_r$ (W/m·K)
273.15	59.66	17.40
315.05	58.11	16.95
319.15	57.96	16.90
411.35	54.55	15.91
490.75	51.61	15.05
544.05	49.64	14.48
601.15	47.52	13.86
657.15	45.45	13.26
707.25	43.60	12.72
745.05	42.20	12.31
768.95	41.32	12.05
792.85	40.43	11.79
816.75	39.55	11.53
840.65	38.66	11.28
867.95	37.65	10.98
877.25	37.31	10.88
886.85	36.95	10.78
901.55	36.41	10.62
911.75	36.03	10.51
922.55	35.63	10.39
933.45	35.23	10.27
944.25	34.83	10.16
949.35	34.64	10.10
954.15	34.46	10.05
955.65	34.41	10.03
958.15	34.32	10.01
964.85	34.07	9.94



ตารางที่ ก-5 ค่าความจุความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A, B, C และ D

Temperature (K)	$C_p$ (J/kg · K)
273.15	448.00
315.05	466.82
319.15	468.66
411.35	510.08
490.75	545.75
544.05	569.69
601.15	595.34
657.15	620.49
707.25	643.00
745.05	659.98
768.95	670.71
792.85	681.45
816.75	692.19
840.65	702.92
867.95	715.18
877.25	719.36
886.85	723.67
901.55	730.28
911.75	734.86
922.55	739.71
933.45	744.61
944.25	749.46
949.35	751.75
954.15	753.91
955.65	754.58
958.15	755.70
964.85	758.71

ตารางที่ ก-6 ค่าคุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน

Temperature (K)	$K_h$ (W/m · K)	$C_p$ (KJ/kg · K)
300	0.182	14.31
400	0.228	14.48
500	0.272	14.51
600	0.315	14.55
700	0.351	14.60
800	0.384	14.71
900	0.412	14.83
1000	0.440	14.98

ตารางที่ ก-7 ค่าคงที่ต่างๆ

สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย	คำอธิบาย
$\rho_s$	7872	kg/m <sup>3</sup>	ความหนาแน่นของ cold rolled steel
$\rho_c$	7150	kg/m <sup>3</sup>	ความหนาแน่นของเหล็กหล่อ
$\rho_h$	0.0899	kg/m <sup>3</sup>	ความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจน
$P_h$	43500	Pa	ค่าเฉลี่ยของความดันภายในเตาอบอ่อนแบบกะ
$\varepsilon$	0.85	-	ค่าการแผ่รังสีความร้อน
$C_{p,c}$	385	J/kg · K	ค่าความจุความร้อนของเหล็กหล่อ

ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

1. ราคาค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย (TOU) = 2.6136 บาท/หน่วย (Peak)
2. ราคาของก๊าซไฮโดรเจน = 18.5 บาท/sm<sup>3</sup>

ค่าพลังงานไฟฟ้า

1. Combustion air motor = 180 kw
2. Exhaust air motor = 165 kw
3. RC fan motor = 1056 kw
4. Basement fan = 25.9 kw
5. Dilution fan = 144.17 kw

ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

1. อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน = 20 Nm<sup>3</sup>/hr, 5 Nm<sup>3</sup>/hr (1.5 hr เริ่มต้น, หลัง 1.5 hr ตามลำดับ)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลตรวจวัดจากโรงงาน

ตารางที่ ข-1 คุณภาพมีในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
0.00	319.15	315.05	320.75	317.05	317.75	318.25	315.55	320.05	318.05
0.50	411.35	320.75	388.95	323.85	392.45	319.75	400.75	315.85	491.95
1.00	490.75	328.95	468.55	335.15	447.75	335.15	495.25	330.95	578.75
1.50	544.05	355.85	522.05	368.75	503.05	367.15	566.25	350.95	635.55
2.00	601.15	386.15	573.75	400.95	556.05	400.75	616.85	383.05	679.65
2.50	657.15	415.85	612.45	431.95	596.25	435.25	657.35	419.25	711.45
3.00	707.25	451.95	646.35	469.15	633.85	469.05	696.85	453.15	736.65
3.50	745.05	481.65	673.85	495.35	665.75	497.25	719.95	482.65	755.25
4.00	768.95	512.65	700.05	524.25	695.85	525.95	743.55	513.05	773.25
4.50	792.85	543.55	726.25	553.15	725.95	554.55	767.15	543.45	792.85
5.00	816.75	574.55	752.35	581.95	756.05	583.25	790.65	573.85	811.55
5.50	840.65	605.45	778.55	610.85	786.15	611.85	814.25	604.25	830.35
6.00	867.95	630.05	804.25	635.15	811.35	634.75	833.05	629.55	846.05
6.50	877.25	655.95	824.45	660.45	832.65	660.25	851.35	653.25	861.25
7.00	886.85	682.95	847.25	688.75	860.65	678.65	869.25	669.45	875.55
7.50	901.55	701.55	870.05	707.25	877.95	697.65	879.75	692.95	888.65
8.00	911.75	717.85	879.15	721.65	883.25	711.15	889.15	706.15	897.05
8.50	922.55	737.65	892.05	742.05	895.05	730.95	900.15	724.85	905.45
9.00	933.45	757.55	904.95	762.55	906.75	750.65	911.05	743.65	913.75
9.50	944.25	777.35	917.85	782.95	918.55	770.45	922.05	762.35	922.15
10.00	949.35	795.55	924.45	797.15	919.85	785.35	922.35	779.95	923.05
10.50	954.15	808.25	925.95	810.25	918.15	804.25	925.45	797.75	924.75
11.00	955.65	822.55	929.75	823.65	920.95	817.05	927.15	811.45	925.85
11.50	958.15	832.45	933.15	835.25	923.65	828.75	928.65	824.15	927.35
12.00	955.45	847.45	935.85	850.95	930.75	838.15	933.55	831.05	929.05
12.50	959.35	856.65	941.45	857.35	931.85	846.15	931.35	844.05	930.35
13.00	961.05	864.15	943.65	865.85	933.45	855.45	933.05	853.35	931.75
13.50	959.25	873.45	945.25	876.65	937.75	862.65	936.25	858.55	933.05
14.00	959.85	882.65	944.05	885.65	938.65	873.15	941.25	865.35	935.15
14.50	964.85	886.85	947.75	887.85	938.05	880.15	940.55	875.75	936.95
15.00	958.25	893.45	947.25	893.45	937.35	884.15	937.85	881.85	925.05
15.50	939.45	899.25	931.45	898.75	922.65	891.25	925.25	888.05	907.75
16.00	898.25	904.35	897.15	902.75	880.55	891.65	867.95	889.85	828.35

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
16.50	865.35	909.75	863.75	903.35	841.95	894.55	824.55	894.85	776.95
17.00	837.25	904.75	837.15	903.85	817.85	892.75	802.65	891.15	746.35
17.50	818.65	898.15	819.95	893.95	796.95	884.25	779.35	888.35	724.45
18.00	797.65	892.45	805.45	886.85	785.55	869.95	765.55	874.05	707.15
18.50	784.25	880.15	788.75	872.75	767.05	860.65	750.85	865.75	692.55
19.00	770.95	868.05	780.05	857.95	756.45	842.65	734.55	852.25	679.05
19.50	765.05	854.05	774.65	847.95	756.35	829.85	738.15	835.75	668.85
20.00	741.15	839.25	753.85	832.85	729.35	817.55	707.25	824.25	614.35
20.50	711.15	829.05	727.85	823.55	706.15	805.45	681.75	808.45	580.45
21.00	688.75	812.45	706.55	806.85	685.95	788.55	661.85	791.75	559.55
21.50	673.35	789.65	689.15	782.85	664.75	770.15	642.65	777.35	543.75
22.00	651.25	770.35	672.85	766.65	653.15	747.35	628.05	753.35	530.05
22.50	634.15	750.85	656.25	746.55	638.15	727.25	613.35	732.25	518.05
23.00	621.45	726.95	639.45	723.05	619.45	710.65	598.05	715.05	506.65
23.50	604.45	705.95	623.45	704.95	606.35	691.75	585.15	693.25	496.05
24.00	586.85	679.85	610.55	680.55	593.25	665.25	565.75	668.95	484.05
24.50	571.05	658.65	591.75	663.85	578.25	651.45	556.05	648.95	474.45
25.00	559.55	638.45	579.65	642.55	563.85	634.25	540.55	633.45	465.55
25.50	542.95	620.25	564.85	628.95	553.85	617.75	530.55	612.55	456.85
26.00	530.05	604.25	552.45	612.25	542.75	601.45	518.25	595.25	448.65
26.50	521.05	584.85	543.65	592.05	530.45	583.95	502.15	582.15	440.65
27.00	508.25	568.45	527.65	578.35	517.85	572.75	494.45	565.75	433.25
27.50	497.25	554.15	519.75	561.85	508.35	555.05	479.95	551.55	426.05
28.00	485.75	537.75	508.65	548.15	498.75	541.15	469.85	536.55	419.15
28.50	472.55	527.75	495.45	538.05	490.25	529.65	463.45	520.25	412.75
29.00	462.35	512.55	485.75	524.65	480.85	516.65	453.45	507.45	406.45
29.50	454.15	501.05	473.25	511.55	469.05	508.05	445.85	496.95	400.45
30.00	444.95	488.45	467.45	498.55	461.95	492.65	433.75	485.35	394.75
30.50	435.45	478.25	457.45	487.85	453.85	482.05	426.85	473.15	389.65
31.00	430.25	463.45	446.75	474.35	441.55	475.15	419.05	466.25	384.65
31.50	418.65	456.05	437.45	468.05	436.65	464.25	413.95	452.45	379.75
32.00	412.75	447.85	432.25	456.15	429.15	452.45	403.45	444.85	375.65
32.50	407.65	437.15	421.25	445.45	418.75	447.45	399.45	436.75	371.45
33.00	400.65	427.85	417.55	437.15	414.45	435.45	390.95	428.15	367.55
33.50	394.75	419.55	410.65	428.65	407.85	427.45	385.15	420.25	363.75
34.00	388.85	412.95	404.05	420.85	401.65	419.75	379.75	412.65	360.15
34.50	384.15	405.45	397.75	412.75	395.35	412.85	374.65	406.15	356.75
35.00	377.15	401.55	391.65	407.85	391.15	405.55	370.95	397.85	353.45

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
35.50	374.85	393.05	385.95	398.65	383.35	400.45	365.85	394.15	350.35
35.67	373.25	391.15	381.75	396.85	380.55	400.45	366.15	391.75	349.35

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
0.00	325.35	325.95	326.25	327.45	327.25	328.35	339.25	342.15	324.45
0.50	406.45	323.85	390.35	326.65	377.45	328.45	400.15	343.15	464.05
1.00	506.55	330.15	494.05	335.75	481.85	332.75	531.25	353.25	572.55
1.50	568.25	345.15	541.95	355.65	534.35	351.15	588.35	383.05	632.15
2.00	634.45	370.45	599.15	384.55	584.45	378.65	637.15	415.55	677.05
2.50	680.15	399.35	666.15	415.55	632.25	407.65	681.45	448.95	714.05
3.00	739.35	430.85	694.95	447.55	673.25	440.35	720.55	483.15	743.35
3.50	753.95	463.05	719.35	480.15	706.15	473.15	752.95	514.75	765.75
4.00	796.45	493.75	753.95	510.95	743.55	503.15	780.55	544.65	786.65
4.50	814.85	518.45	781.35	538.95	770.75	530.15	802.25	573.75	803.95
5.00	833.35	543.25	801.55	567.65	791.75	557.85	823.05	599.85	819.65
5.50	851.75	567.95	826.15	593.95	812.85	583.95	840.65	625.55	834.65
6.00	870.25	592.75	845.25	618.75	830.25	608.55	858.35	649.65	848.65
6.50	888.65	617.45	862.55	640.95	849.65	631.35	871.15	673.55	861.75
7.00	906.45	642.25	884.35	665.75	871.45	653.65	887.65	693.35	875.15
7.50	917.85	666.95	895.95	686.45	881.15	673.75	898.55	713.65	887.25
8.00	931.25	687.65	911.75	706.85	895.35	693.75	909.55	733.05	900.35
8.50	949.55	706.85	925.45	726.25	905.45	714.65	920.65	752.05	912.05
9.00	962.75	726.15	939.35	746.15	919.45	731.85	930.65	767.65	919.95
9.50	969.55	743.05	943.35	761.75	925.05	749.55	931.85	785.35	922.65
10.00	972.05	760.45	946.55	780.05	929.05	765.45	935.55	798.15	925.05
10.50	974.15	774.85	950.85	793.15	931.15	779.95	935.15	812.75	926.85
11.00	973.95	790.35	953.55	809.25	935.65	794.25	939.15	823.25	929.15
11.50	976.25	802.45	957.85	820.45	937.75	807.55	940.45	835.85	931.75
12.00	975.55	815.55	959.55	834.65	942.05	819.55	944.05	843.85	933.55
12.50	978.85	826.85	962.15	844.35	943.55	831.65	945.35	854.25	935.95
13.00	978.65	838.25	964.55	855.55	948.05	841.65	948.25	860.85	937.95
13.50	980.45	847.45	967.45	864.15	951.25	850.25	949.75	868.45	940.35
14.00	981.55	855.55	969.35	872.35	954.15	858.65	952.15	875.15	942.55
14.50	984.95	863.25	972.25	878.25	955.75	866.65	953.15	883.15	944.85
15.00	986.55	870.85	974.65	885.55	958.45	874.45	955.75	889.35	946.55
15.50	987.45	878.55	977.35	892.85	962.75	880.05	958.45	893.55	949.05



Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
16.00	989.35	884.25	977.75	898.95	963.65	888.15	961.15	899.25	951.15
16.50	991.15	890.05	981.55	904.75	967.45	892.35	962.35	903.55	953.35
17.00	992.85	895.85	982.75	910.55	969.85	898.45	965.15	907.75	955.55
17.50	993.15	900.95	984.55	913.85	970.75	903.15	965.25	913.25	954.85
18.00	993.35	906.65	985.35	919.35	973.35	907.75	967.48	916.35	956.45
18.50	994.85	910.35	986.95	922.65	974.15	912.35	968.35	920.75	958.95
19.00	995.05	915.35	986.15	927.15	974.35	918.35	970.85	924.55	959.75
19.50	995.55	919.05	986.75	930.85	975.45	922.25	971.65	928.15	959.95
20.00	995.35	923.25	988.55	933.35	976.55	924.75	971.65	931.95	959.35
20.50	995.25	928.05	989.25	938.55	979.45	928.15	973.95	933.25	962.35
21.00	995.85	929.85	988.95	940.15	978.05	932.65	973.95	937.85	959.95
21.50	995.65	933.45	990.05	942.75	979.35	934.25	973.55	940.15	962.15
22.00	993.15	936.95	989.15	945.65	979.15	937.35	973.85	942.95	957.05
22.50	992.65	940.65	987.75	950.05	979.45	941.25	974.95	944.05	962.45
23.00	994.75	943.95	990.55	950.65	980.75	943.25	975.25	947.85	962.05
23.50	984.45	946.35	983.05	954.65	976.85	945.65	973.35	948.25	956.95
24.00	993.35	949.55	988.45	956.75	980.95	949.15	977.15	950.85	964.45
24.50	995.25	950.85	990.05	957.55	981.75	951.55	977.95	953.65	965.75
25.00	993.95	953.25	990.15	960.45	983.15	953.35	979.75	954.35	965.35
25.50	994.55	954.55	992.35	961.65	985.25	953.65	979.55	955.85	965.65
26.00	995.05	956.35	993.05	962.95	985.85	955.45	980.05	957.85	966.85
26.50	996.35	957.35	993.05	964.05	985.15	958.25	980.05	960.75	967.35
27.00	996.75	959.95	993.95	965.55	986.25	959.55	980.95	961.95	966.65
27.50	995.75	961.65	993.85	967.75	987.15	960.75	981.35	962.65	968.05
28.00	996.25	962.45	992.45	969.55	986.25	964.45	982.85	964.45	967.75
28.50	995.25	964.95	993.85	971.35	987.95	964.35	982.65	964.95	968.95
29.00	991.25	965.85	988.95	971.85	984.15	967.55	981.45	967.25	961.85
29.50	929.15	966.55	930.05	973.55	918.15	967.35	898.35	966.15	866.55
30.00	893.75	966.25	896.75	974.05	879.75	968.15	853.25	964.15	820.45
30.50	868.45	966.25	872.25	972.25	853.45	966.85	825.65	956.85	790.85
31.00	850.05	962.15	853.45	965.55	832.45	962.45	801.85	946.95	768.65
31.50	831.95	957.25	834.75	958.75	814.65	957.05	784.25	932.65	750.75
32.00	815.75	949.55	817.85	949.65	799.85	947.75	769.05	915.75	735.25
32.50	803.85	938.45	803.85	936.75	786.05	936.45	753.45	900.55	721.55
33.00	789.15	927.65	791.15	924.95	775.85	922.15	740.55	882.05	708.75
33.50	777.55	912.65	779.25	910.25	762.55	910.05	724.85	866.45	697.05
34.00	764.45	899.55	768.55	896.85	752.75	894.45	713.55	848.85	685.55
34.50	754.05	883.75	759.55	880.55	741.15	878.95	701.15	833.65	674.75

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
35.00	748.25	868.55	751.35	867.15	739.25	865.45	710.35	818.35	640.15
35.50	712.05	853.85	722.15	852.75	706.05	849.55	663.15	805.55	592.75
36.00	688.25	838.75	700.75	838.85	685.65	835.55	640.95	788.25	568.45
36.50	669.45	821.75	682.55	820.65	667.65	819.05	624.75	769.15	551.55
37.00	653.25	800.45	667.45	799.65	651.15	800.35	608.75	750.35	537.85
37.50	635.85	779.25	653.05	780.05	637.95	778.85	595.35	729.15	525.55
38.00	621.75	756.45	637.85	758.05	623.25	759.45	582.25	710.95	514.35
38.50	606.45	734.95	624.85	737.45	611.25	738.05	569.95	691.15	504.05
39.00	592.35	713.55	609.45	716.85	597.45	719.45	558.85	673.25	494.15
39.50	578.75	691.55	595.65	696.35	584.95	699.15	547.55	655.75	484.75
40.00	564.15	672.95	581.85	678.45	574.15	679.55	537.65	637.45	475.85
40.50	551.25	653.85	569.15	659.85	562.25	661.25	527.55	621.35	467.15
41.00	536.85	634.95	555.85	641.65	550.45	644.15	517.15	605.65	458.85
41.50	525.65	617.35	546.45	623.45	539.35	626.15	505.75	591.05	450.95
42.00	515.45	598.65	535.65	606.05	527.65	610.15	495.45	577.15	443.25
42.50	504.65	582.35	523.85	589.95	516.55	594.95	485.85	563.45	436.05
43.00	492.25	567.35	511.95	575.75	506.45	580.35	477.55	549.05	428.95
43.50	482.15	553.05	502.65	560.45	496.95	564.55	466.95	536.25	422.15
44.00	471.95	538.95	491.05	546.95	487.05	551.95	459.35	523.55	415.65
44.50	462.65	524.95	482.05	533.25	478.05	537.75	449.95	511.35	409.45
45.00	454.05	511.95	471.25	519.75	467.65	526.45	441.55	500.75	403.45
45.50	445.85	499.75	462.45	506.55	458.75	513.65	432.55	490.15	397.75
46.00	436.25	489.25	452.85	496.45	451.25	502.05	426.05	478.55	392.35
46.50	429.75	477.35	444.25	483.65	442.15	491.55	417.65	469.95	387.45
47.00	422.25	467.85	436.45	473.05	434.85	480.25	409.85	460.35	382.55
47.50	414.95	457.65	427.15	463.05	427.05	471.25	404.15	451.05	378.15
48.00	408.45	447.85	419.55	453.25	419.85	461.55	397.75	442.55	373.85
48.50	401.15	440.35	411.95	445.05	413.75	452.25	392.55	433.25	370.05
49.00	396.15	431.15	405.45	435.25	406.65	443.65	386.35	426.25	366.25
49.50	390.95	423.05	399.45	426.85	400.75	434.85	380.55	419.05	362.65
50.00	384.15	416.55	393.15	420.35	395.85	426.45	376.58	410.65	359.25
50.50	380.15	409.45	388.25	411.95	389.85	418.85	370.95	404.85	356.15
51.00	378.85	402.65	386.85	405.95	390.85	411.75	373.55	397.95	355.05

ตารางที่ ข-3 อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
0.00	321.35	320.75	323.55	323.95	324.65	324.85	325.95	326.05	327.55
0.50	437.45	321.95	399.05	324.55	401.85	325.75	426.75	326.95	492.05
1.00	533.65	332.35	482.25	335.15	495.25	338.25	522.15	338.85	585.35
1.50	586.25	348.55	539.25	351.55	518.95	355.55	567.65	355.45	631.45
2.00	664.85	373.45	598.05	375.65	567.65	381.45	618.65	380.95	678.25
2.50	691.25	401.05	641.05	402.25	608.25	408.25	657.85	407.75	712.25
3.00	731.45	434.65	684.85	434.65	651.45	440.95	694.75	439.75	747.35
3.50	771.75	468.65	712.05	466.45	695.85	472.65	726.75	470.85	773.05
4.00	795.55	503.85	751.65	499.75	734.55	506.75	758.65	503.65	795.95
4.50	829.65	532.55	773.05	527.45	762.15	533.75	783.65	531.25	813.65
5.00	872.75	559.45	791.45	553.55	787.75	559.75	809.15	556.65	832.75
5.50	877.65	585.95	815.75	579.75	806.35	585.65	831.15	582.55	847.35
6.00	889.65	614.35	842.15	608.05	829.35	613.65	850.35	610.55	862.85
6.50	906.65	636.15	868.65	629.15	848.55	634.55	868.75	631.55	877.45
7.00	923.25	660.75	888.45	653.75	865.85	659.25	874.15	655.65	891.65
7.50	933.45	685.05	903.65	675.65	878.25	680.65	885.95	677.15	901.75
8.00	935.05	706.95	908.85	697.25	886.35	702.15	895.05	698.15	903.05
8.50	943.35	727.15	918.15	717.05	896.05	722.25	904.95	718.95	912.45
9.00	952.55	746.25	927.45	735.55	907.55	740.65	912.25	736.85	921.65
9.50	957.55	765.65	936.75	754.15	916.95	758.85	919.35	754.35	924.35
10.00	959.95	780.05	939.05	768.55	921.15	773.75	922.75	769.75	925.15
10.50	960.85	796.65	942.05	785.05	924.25	789.65	926.35	785.55	927.05
11.00	960.05	808.95	943.45	797.85	926.05	802.55	928.05	798.55	927.95
11.50	960.35	821.15	945.55	809.95	928.85	814.95	930.15	811.05	929.35
12.00	961.15	833.65	947.35	822.55	931.75	827.35	932.15	823.55	930.55
12.50	961.95	844.15	948.75	833.35	934.15	837.65	933.65	834.05	932.35
13.00	962.75	853.85	950.45	844.55	936.75	848.85	935.35	845.25	933.25
13.50	963.75	861.25	951.85	852.45	938.75	856.65	936.55	852.95	934.45
14.00	965.45	868.95	953.55	860.45	940.95	864.35	937.95	860.85	936.65
14.50	965.85	876.95	955.25	869.05	943.35	872.55	939.75	868.95	937.65
15.00	967.05	882.65	956.85	874.95	945.35	878.15	941.05	874.75	938.65
15.50	968.65	890.15	958.55	882.75	947.35	885.65	942.65	881.95	940.75
16.00	970.05	894.25	960.35	887.15	949.35	890.05	944.05	886.15	941.95
16.50	971.25	899.65	962.15	892.95	951.35	895.45	946.05	891.75	944.15
17.00	976.05	904.55	966.95	898.15	955.95	900.35	950.15	896.45	948.15
17.50	976.45	908.75	967.85	902.65	957.45	904.55	951.65	900.65	947.15
18.00	976.75	913.15	968.75	907.35	958.75	909.15	953.15	905.15	949.75

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
18.50	975.55	917.25	968.95	911.55	959.85	913.35	954.05	909.15	947.35
19.00	975.55	921.45	969.25	916.05	960.55	917.45	954.95	913.15	950.05
19.50	950.15	924.75	947.15	919.45	941.45	921.05	934.15	916.55	906.65
20.00	899.55	927.75	894.35	922.55	887.95	923.85	866.75	919.55	833.35
20.50	865.55	929.75	862.65	924.65	851.85	925.05	827.35	920.65	790.45
21.00	840.35	928.25	839.45	924.75	825.85	922.65	799.75	917.65	761.65
21.50	820.25	923.45	820.95	920.75	805.45	916.95	778.15	910.85	740.85
22.00	802.85	915.45	805.05	914.35	788.15	908.25	760.85	901.05	723.95
22.50	786.95	904.45	791.35	905.75	773.25	897.45	746.35	889.05	709.95
23.00	771.85	892.45	778.35	894.85	759.15	884.75	732.35	875.05	696.45
23.50	757.25	877.35	765.35	881.75	745.95	869.85	718.75	859.05	683.55
24.00	746.75	864.95	755.95	870.75	735.85	857.75	708.95	846.45	674.25
24.50	745.95	848.75	755.75	856.35	739.85	842.25	717.65	830.65	647.15
25.00	707.45	835.65	721.75	844.25	699.55	829.35	667.45	817.35	596.85
25.50	678.85	820.25	699.95	830.95	675.85	814.55	641.95	801.95	569.35
26.00	661.65	801.95	681.35	814.85	656.65	797.35	622.25	784.25	551.25
26.50	642.45	781.25	665.05	796.25	639.65	777.95	605.55	764.55	536.95
27.00	627.25	759.25	649.55	776.35	624.35	757.45	590.45	744.55	516.15
27.50	608.55	736.05	634.55	754.75	608.65	735.65	575.95	722.35	511.85
28.00	589.35	708.45	616.95	728.45	591.45	709.75	559.55	696.65	498.05
28.50	576.95	690.25	605.55	711.55	580.15	692.65	549.15	680.35	489.35
29.00	563.85	670.85	592.85	692.85	568.95	674.55	537.75	662.65	480.25
29.50	549.95	650.55	579.45	673.05	554.75	654.95	525.95	644.05	470.45
30.00	533.65	626.65	573.05	649.15	539.35	632.05	511.45	621.85	458.85
30.50	521.35	608.45	550.55	631.45	527.25	614.85	500.75	605.05	450.65
31.00	511.45	594.55	540.15	617.15	517.75	600.65	491.75	591.65	443.75
31.50	495.95	572.55	523.85	595.05	502.85	579.45	477.95	571.15	433.45
32.00	487.95	560.95	515.25	583.45	494.95	568.25	470.65	560.35	427.95
32.50	477.05	545.95	503.75	567.95	484.45	553.15	462.05	546.15	420.65
33.00	467.25	532.15	492.95	553.75	474.55	539.65	452.25	532.85	413.95
33.50	456.75	517.45	481.15	538.25	464.15	524.75	442.85	518.65	406.85
34.00	447.35	504.55	470.75	524.65	454.75	511.65	434.15	506.25	400.45
34.50	437.95	491.55	460.55	511.55	445.25	498.85	425.75	493.65	394.45
35.00	429.45	480.15	450.95	499.45	436.75	487.05	418.05	482.45	388.75
35.50	420.85	468.65	441.75	487.15	428.45	475.75	410.75	471.45	383.45
36.00	413.05	458.15	432.85	475.95	420.45	464.95	403.65	461.05	378.35
36.50	405.75	448.15	424.45	464.95	412.85	454.55	397.05	452.05	373.35
37.00	398.55	438.35	416.35	454.75	405.65	444.85	390.75	441.55	368.75

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
37.50	392.35	429.95	409.05	445.45	398.95	435.65	384.65	432.65	363.65
38.00	396.75	420.95	412.45	435.35	405.65	426.25	395.95	423.35	364.35
38.39	396.25	416.85	411.75	430.95	405.75	422.25	396.95	419.55	363.15

ตารางที่ ข-4 อุณหภูมิในตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
0.00	314.15	313.95	314.65	314.55	313.15	312.45	313.55	312.65	318.15
0.50	333.15	314.15	333.15	314.95	330.55	312.85	335.05	312.85	378.95
1.00	419.85	315.55	416.75	316.05	416.75	314.25	438.95	314.45	498.75
1.50	486.65	326.25	481.55	328.05	470.95	326.95	519.95	329.35	576.25
2.00	551.05	346.05	532.45	349.25	521.25	348.95	578.85	354.95	626.25
2.50	608.65	369.65	581.95	373.35	562.35	374.25	629.75	382.85	662.85
3.00	685.25	397.95	629.45	401.35	601.95	402.45	668.15	413.15	694.45
3.50	710.45	427.45	671.85	430.05	636.65	431.35	712.25	444.05	719.95
4.00	725.05	456.85	708.65	458.65	667.05	459.85	740.15	473.75	740.65
4.50	750.55	484.55	740.05	486.05	693.75	487.05	761.95	502.35	761.05
5.00	778.95	512.45	779.35	513.45	727.05	514.65	784.65	530.55	779.35
5.50	817.25	536.25	787.95	537.35	751.55	537.75	804.15	554.65	794.05
6.00	849.65	560.05	798.25	561.65	766.95	561.75	823.95	579.35	810.95
6.50	856.55	574.75	812.05	576.35	768.95	576.65	835.95	594.15	819.85
7.00	871.95	597.25	837.15	598.85	792.85	598.75	854.55	617.45	834.15
7.50	888.55	617.95	845.45	637.95	815.05	619.15	868.65	638.75	848.25
8.00	896.45	637.95	862.25	639.85	831.05	638.35	882.75	658.25	858.95
8.50	906.55	659.05	877.55	661.35	844.75	659.35	895.35	678.65	872.15
9.00	916.45	678.35	890.85	680.95	854.55	678.75	905.65	697.75	882.55
9.50	925.15	696.25	902.55	699.15	870.55	696.45	915.45	715.25	892.75
10.00	937.75	712.75	916.35	717.55	886.25	713.75	924.75	731.35	903.55
10.50	954.05	730.45	934.15	733.95	905.95	730.35	935.15	748.35	912.85
11.00	964.55	746.95	946.95	750.65	916.45	746.15	944.05	763.65	922.05
11.50	975.65	760.85	954.35	765.55	924.25	760.95	950.95	777.85	928.35
12.00	976.65	775.35	955.25	780.05	929.75	775.45	951.55	791.35	929.65
12.50	972.15	788.65	955.75	793.65	928.75	788.85	951.45	804.35	930.35
13.00	971.25	803.25	956.75	808.55	931.05	803.75	952.65	818.35	932.35
13.50	971.95	811.55	958.05	817.15	932.95	812.25	953.85	826.65	933.75
14.00	971.85	822.85	959.25	828.35	934.85	813.85	954.05	837.65	934.15
14.50	971.75	833.65	960.15	839.45	936.25	834.35	954.45	846.95	935.95
15.00	971.85	844.45	961.35	850.05	938.25	845.45	954.95	856.35	937.55



Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
15.50	973.15	851.45	962.95	857.35	940.25	852.95	955.35	863.45	939.75
16.00	974.15	858.85	964.75	865.05	942.45	860.65	956.65	870.55	941.45
16.50	975.85	865.55	966.95	871.95	945.25	867.55	958.25	876.65	943.65
17.00	978.05	871.45	969.25	877.85	947.85	873.75	960.15	882.25	946.45
17.50	980.45	877.55	971.65	884.25	950.15	880.05	961.45	887.85	948.85
18.00	977.25	883.15	970.15	889.95	949.65	885.75	960.15	893.15	947.35
18.50	932.85	888.85	930.15	895.95	909.85	891.65	909.55	898.15	888.55
19.00	873.35	893.25	874.15	900.45	852.25	896.55	822.15	901.85	805.15
19.50	854.55	896.95	858.15	903.45	836.45	899.05	798.45	903.85	784.35
20.00	829.75	898.35	836.15	904.65	815.25	899.25	769.15	901.75	758.45
20.50	810.15	896.35	818.05	902.55	798.15	895.85	747.05	895.75	739.15
21.00	792.75	890.95	802.25	897.05	783.55	889.05	728.75	886.25	723.25
21.50	779.55	883.65	789.65	889.85	771.95	880.95	714.65	876.05	710.95
22.00	766.35	873.95	777.35	880.45	761.05	870.75	701.45	863.25	698.85
22.50	754.25	862.65	765.45	869.35	750.75	859.25	689.25	849.55	687.75
23.00	742.95	850.75	754.55	857.55	737.85	847.15	677.95	835.65	677.55
24.00	727.95	826.35	744.95	833.15	729.05	822.65	698.85	807.95	646.75
24.50	696.85	813.65	711.85	821.55	692.95	811.15	619.85	795.45	594.05
25.00	674.35	802.05	692.75	810.25	673.45	799.75	592.85	783.25	571.15
25.50	654.65	786.95	675.05	795.75	656.55	784.85	573.25	767.35	554.05
26.00	634.05	765.45	655.75	774.75	638.95	763.75	554.35	744.95	537.25
26.50	615.95	742.15	638.15	751.85	621.15	741.05	538.15	721.25	522.75
27.00	608.05	730.55	629.35	740.55	612.75	729.55	530.65	709.35	515.95
27.50	594.85	710.95	614.65	721.45	599.75	710.95	519.25	690.35	505.85
28.00	581.65	691.35	601.65	701.85	586.75	692.05	508.75	670.95	495.85
28.50	568.35	672.25	588.55	682.65	574.15	673.45	498.35	652.05	486.25
29.00	555.65	653.65	575.85	664.35	561.95	655.45	488.75	634.45	476.75
29.50	543.55	655.85	562.05	646.65	550.25	638.25	479.25	617.75	468.15
30.00	531.15	618.15	549.05	628.65	537.95	620.85	469.85	600.85	459.35
30.50	519.65	601.85	536.85	612.05	526.55	604.95	461.45	585.05	451.45
31.00	508.75	586.55	525.35	596.55	515.85	590.15	453.25	570.55	443.65
31.50	498.15	571.65	513.75	581.15	505.35	575.15	445.25	556.15	436.25
32.00	488.25	556.85	502.75	566.45	494.85	560.75	437.25	542.45	428.95
32.50	477.25	541.55	490.95	550.75	483.45	545.85	429.25	528.15	421.45
33.00	464.85	524.65	477.65	533.65	470.95	529.05	419.75	512.35	412.95
33.50	458.75	516.35	470.95	525.05	464.75	520.65	415.15	504.35	408.65
34.00	449.05	502.95	460.25	511.25	454.75	507.45	408.05	492.05	401.95
34.50	441.55	492.75	451.95	500.45	446.65	497.05	402.15	482.05	396.75

Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)	Temp H <sub>2</sub> (K)
35.00	432.45	480.55	442.55	488.05	437.75	485.15	395.95	471.45	391.05
35.50	426.35	472.75	435.95	479.85	431.25	476.95	391.35	463.45	273.15
36.00	418.85	462.45	427.85	469.35	423.45	466.55	385.95	454.05	381.85
36.50	410.85	451.85	419.05	458.25	415.15	455.95	379.95	444.05	376.25
37.00	403.95	442.65	411.55	448.65	407.95	446.55	374.95	435.35	371.55
37.50	397.85	434.05	404.65	439.85	401.25	437.95	370.45	427.25	367.45
38.50	397.05	418.25	403.95	423.35	400.45	421.75	377.75	412.65	364.65
39.0	397.25	413.75	404.15	418.55	401.25	417.35	381.45	408.75	365.55



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลการวิจัย

ตารางที่ ค-1 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.14	4.01	1.26	15.50	906.49	32.96	3.51	31.00	417.96	12.29	2.86
0.50	374.20	37.15	9.03	16.00	880.48	17.77	1.98	31.50	411.43	7.22	1.72
1.00	443.03	47.72	9.72	16.50	840.45	24.90	2.88	32.00	405.22	7.53	1.82
1.50	500.10	43.95	8.08	17.00	811.15	26.10	3.12	32.50	399.23	8.42	2.07
2.00	548.58	52.57	8.74	17.50	787.79	30.86	3.77	33.00	393.54	7.11	1.77
2.50	589.13	68.02	10.35	18.00	767.91	29.74	3.73	33.50	388.16	6.59	1.67
3.00	623.46	83.79	11.85	18.50	750.93	33.32	4.25	34.00	383.08	5.77	1.48
3.50	652.42	92.63	12.43	19.00	735.85	35.10	4.55	34.50	378.30	5.85	1.52
4.00	679.10	89.85	11.68	19.50	717.88	47.17	6.17	35.00	373.82	3.33	0.88
4.50	703.40	89.45	11.28	20.00	695.24	45.91	6.19	35.50	369.68	5.17	1.38
5.00	726.74	90.01	11.02	20.50	667.50	43.65	6.14	35.67	369.22	4.03	1.08
5.50	748.65	92.00	10.94	21.00	644.06	44.69	6.49				
6.00	769.24	98.71	11.37	21.50	624.09	49.26	7.32				
6.50	788.42	88.83	10.13	22.00	606.91	44.34	6.81				
7.00	806.16	80.69	9.10	22.50	591.13	43.02	6.78				
7.50	822.48	79.07	8.77	23.00	576.79	44.66	7.19				
8.00	837.30	74.45	8.17	23.50	563.63	40.82	6.75				
8.50	850.46	72.09	7.81	24.00	550.15	36.70	6.25				
9.00	862.06	71.39	7.65	24.50	537.48	33.57	5.88				
9.50	872.12	72.13	7.64	25.00	525.68	33.87	6.05				
10.00	880.63	68.72	7.24	25.50	514.67	28.28	5.21				
10.50	887.59	66.56	6.98	26.00	503.82	26.23	4.95				
11.00	893.01	62.64	6.55	26.50	493.67	27.38	5.25				
11.50	898.27	59.88	6.25	27.00	483.70	24.55	4.83				
12.00	903.25	52.20	5.46	27.50	474.36	22.89	4.60				
12.50	907.28	52.07	5.43	28.00	465.10	20.65	4.25				
13.00	910.35	50.70	5.28	28.50	456.35	16.20	3.43				
13.50	912.33	46.92	4.89	29.00	447.94	14.41	3.12				
14.00	913.07	46.78	4.87	29.50	439.87	14.28	3.14				
14.50	912.70	52.15	5.40	30.00	432.17	12.78	2.87				
15.00	911.25	47.00	4.90	30.50	424.87	10.58	2.43				

ตารางที่ ค-2 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	0.00	0.00	18.00	869.27	23.18	2.60	35.67	397.55	6.40	1.64
0.50	316.42	4.33	1.35	18.50	859.47	20.68	2.35				
1.00	326.88	2.07	0.63	19.00	847.82	20.23	2.33				
1.50	348.78	7.07	1.99	19.50	834.75	19.30	2.26				
2.00	377.25	8.90	2.30	20.00	820.4	18.85	2.25				
2.50	409.32	6.53	1.57	20.50	804.71	24.34	2.94				
3.00	442.45	9.50	2.10	21.00	787.55	24.90	3.06				
3.50	475.15	6.50	1.35	21.50	769.02	20.63	2.61				
4.00	506.36	6.29	1.23	22.00	749.35	21.00	2.73				
4.50	536.12	7.43	1.37	22.50	728.94	21.91	2.92				
5.00	564.3	10.25	1.78	23.00	708.31	18.64	2.56				
5.50	590.96	14.49	2.39	23.50	688.03	17.92	2.54				
6.00	616.16	13.89	2.20	24.00	668.45	11.40	1.68				
6.50	640	15.95	2.43	24.50	649.53	9.12	1.38				
7.00	662.57	20.38	2.98	25.00	631.47	6.98	1.09				
7.50	683.83	17.72	2.53	25.50	614.57	5.68	0.92				
8.00	703.89	13.96	1.94	26.00	597.96	6.29	1.04				
8.50	722.95	14.70	1.99	26.50	582.5	2.35	0.40				
9.00	740.88	16.67	2.20	27.00	567.32	1.13	0.20				
9.50	757.66	19.69	2.53	27.50	553.24	0.91	0.16				
10.00	773.3	22.25	2.80	28.00	539.29	1.54	0.29				
10.50	787.8	20.45	2.53	28.50	526.12	1.63	0.31				
11.00	801.16	21.39	2.60	29.00	513.48	0.93	0.18				
11.50	813.63	18.82	2.26	29.50	501.38	0.33	0.07				
12.00	825.18	22.27	2.63	30.00	489.84	1.39	0.28				
12.50	835.7	20.95	2.45	30.50	478.91	0.66	0.14				
13.00	845.18	18.97	2.20	31.00	468.56	5.11	1.10				
13.50	853.77	19.68	2.25	31.50	458.78	2.73	0.60				
14.00	861.6	21.05	2.38	32.00	449.51	1.66	0.37				
14.50	868.54	18.31	2.06	32.50	440.63	3.48	0.80				
15.00	874.58	18.87	2.11	33.00	432.21	4.36	1.02				
15.50	879.72	19.53	2.17	33.50	424.3	4.75	1.13				
16.00	883.6	20.75	2.29	34.00	416.86	3.91	0.95				
16.50	884.79	24.96	2.74	34.50	409.9	4.45	1.10				
17.00	882.48	22.27	2.46	35.00	403.43	1.88	0.47				
17.50	877	21.15	2.35	35.50	397.44	4.39	1.12				

ตารางที่ ค-3 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.16	5.59	1.74	18.00	758.45	47	5.84	35.67	365.1	16.65	4.36
0.50	389.02	0.07	0.02	18.50	741.51	47.24	5.99				
1.00	463.57	4.98	1.06	19.00	726.54	53.51	6.86				
1.50	521.65	0.4	0.08	19.50	707.99	66.66	8.61				
2.00	569.91	3.84	0.67	20.00	683.89	69.96	9.28				
2.50	609.37	3.08	0.50	20.50	654.23	73.62	10.11				
3.00	642.34	4.01	0.62	21.00	630.12	76.43	10.82				
3.50	669.75	4.1	0.61	21.50	610.21	78.94	11.45				
4.00	695.11	4.94	0.71	22.00	593.42	79.43	11.81				
4.50	718.3	7.95	1.09	22.50	578.12	78.13	11.91				
5.00	740.72	11.63	1.55	23.00	564.24	75.21	11.76				
5.50	761.86	16.69	2.14	23.50	551.44	72.01	11.55				
6.00	781.67	22.58	2.81	24.00	538.27	72.28	11.84				
6.50	800.11	24.34	2.95	24.50	526.03	65.72	11.11				
7.00	817.13	30.12	3.56	25.00	514.7	64.95	11.21				
7.50	832.76	37.29	4.29	25.50	504.11	60.74	10.75				
8.00	846.9	32.25	3.67	26.00	493.69	58.76	10.64				
8.50	859.35	32.7	3.67	26.50	483.94	59.71	10.98				
9.00	870.26	34.69	3.83	27.00	474.36	53.29	10.10				
9.50	879.63	38.22	4.16	27.50	465.4	54.35	10.46				
10.00	887.44	37.01	4.00	28.00	456.52	52.13	10.25				
10.50	893.7	32.25	3.48	28.50	448.14	47.31	9.55				
11.00	898.42	31.33	3.37	29.00	440.09	45.66	9.40				
11.50	903.08	30.07	3.22	29.50	432.39	40.86	8.63				
12.00	907.55	28.3	3.02	30.00	425.03	42.42	9.07				
12.50	911.09	30.36	3.22	30.50	418.09	39.36	8.60				
13.00	913.72	29.93	3.17	31.00	411.51	35.24	7.89				
13.50	915.26	29.99	3.17	31.50	405.3	32.15	7.35				
14.00	915.5	28.55	3.02	32.00	399.41	32.84	7.60				
14.50	914.65	33.1	3.49	32.50	393.72	27.53	6.54				
15.00	912.7	34.55	3.65	33.00	388.31	29.24	7.00				
15.50	907.08	24.37	2.62	33.50	383.2	27.45	6.68				
16.00	877.39	19.76	2.20	34.00	378.37	25.68	6.36				
16.50	833.3	30.45	3.53	34.50	373.83	23.92	6.01				
17.00	802.48	34.67	4.14	35.00	369.58	22.07	5.64				
17.50	778.55	41.4	5.05	35.50	365.66	20.29	5.26				



ตารางที่ ค-4 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	2.00	0.63	18.00	866.42	20.43	2.30	35.67	397.19	0.34	0.09
0.50	316.44	7.41	2.29	18.50	857.29	15.46	1.77				
1.00	326.84	8.31	2.48	19.00	846.38	11.57	1.35				
1.50	348.52	20.23	5.49	19.50	834.06	13.89	1.64				
2.00	376.60	24.35	6.07	20.00	820.44	12.41	1.49				
2.50	408.17	23.78	5.51	20.50	805.45	18.10	2.20				
3.00	440.74	28.41	6.06	21.00	788.94	17.91	2.22				
3.50	472.87	22.48	4.54	21.50	771.02	11.83	1.51				
4.00	503.53	20.72	3.95	22.00	751.91	14.74	1.92				
4.50	532.78	20.37	3.68	22.50	731.99	14.56	1.95				
5.00	560.51	21.44	3.68	23.00	711.76	11.29	1.56				
5.50	586.77	24.08	3.94	23.50	691.76	13.19	1.87				
6.00	611.61	23.54	3.71	24.00	672.32	8.23	1.21				
6.50	635.14	25.31	3.83	24.50	653.44	10.41	1.57				
7.00	657.45	31.30	4.54	25.00	635.34	7.21	1.12				
7.50	678.49	28.76	4.07	25.50	618.32	10.63	1.69				
8.00	698.36	23.29	3.23	26.00	601.57	10.68	1.74				
8.50	717.27	24.78	3.34	26.50	585.91	6.14	1.04				
9.00	735.07	27.48	3.60	27.00	570.54	7.81	1.35				
9.50	751.77	31.18	3.98	27.50	556.22	5.63	1.00				
10.00	767.35	29.80	3.74	28.00	542.04	6.11	1.11				
10.50	781.83	28.42	3.51	28.50	528.63	9.42	1.75				
11.00	795.21	28.44	3.45	29.00	515.76	8.89	1.69				
11.50	807.71	27.54	3.30	29.50	503.40	8.15	1.59				
12.00	819.33	31.62	3.72	30.00	491.61	6.94	1.39				
12.50	829.94	27.41	3.20	30.50	480.44	7.41	1.52				
13.00	839.54	26.31	3.04	31.00	469.85	4.50	0.95				
13.50	848.27	28.38	3.24	31.50	459.83	8.22	1.76				
14.00	856.25	29.40	3.32	32.00	450.33	5.82	1.28				
14.50	863.36	24.49	2.76	32.50	441.24	4.21	0.95				
15.00	869.60	23.85	2.67	33.00	432.65	4.50	1.03				
15.50	874.95	23.80	2.65	33.50	424.55	4.10	0.96				
16.00	879.07	23.68	2.62	34.00	416.95	3.90	0.93				
16.50	880.52	22.83	2.53	34.50	409.85	2.90	0.70				
17.00	878.57	25.28	2.80	35.00	403.23	4.62	1.13				
17.50	873.57	20.38	2.28	35.50	397.12	1.53	0.38				

ตารางที่ ค-5 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.15	2.6	0.82	18.00	762.64	22.91	2.92	35.67	364.61	15.94	4.19
0.50	385.5	6.95	1.77	18.50	745.47	21.58	2.81				
1.00	457.75	10	2.23	19.00	730.28	26.17	3.46				
1.50	515	11.95	2.38	19.50	711.76	44.59	5.90				
2.00	563.06	7.01	1.26	20.00	688	41.35	5.67				
2.50	602.75	6.5	1.09	20.50	658.73	47.42	6.72				
3.00	636.11	2.26	0.36	21.00	634.43	51.52	7.51				
3.50	664.03	1.72	0.26	21.50	614.15	50.6	7.61				
4.00	689.82	6.03	0.87	22.00	596.99	56.16	8.60				
4.50	713.36	12.59	1.73	22.50	581.26	56.89	8.91				
5.00	736.04	20.01	2.65	23.00	567.01	52.44	8.47				
5.50	757.39	28.76	3.66	23.50	553.91	52.44	8.65				
6.00	777.43	33.92	4.18	24.00	540.43	52.82	8.90				
6.50	796.09	36.56	4.39	24.50	527.88	50.37	8.71				
7.00	813.34	47.31	5.50	25.00	516.26	47.59	8.44				
7.50	829.2	48.75	5.55	25.50	505.43	48.42	8.74				
8.00	843.58	39.67	4.49	26.00	494.78	47.97	8.84				
8.50	856.29	38.76	4.33	26.50	484.83	45.62	8.60				
9.00	867.46	39.29	4.33	27.00	475.06	42.79	8.26				
9.50	877.09	41.46	4.51	27.50	465.93	42.42	8.34				
10.00	885.18	34.67	3.77	28.00	456.9	41.85	8.39				
10.50	891.74	26.41	2.88	28.50	448.38	41.87	8.54				
11.00	896.75	24.2	2.63	29.00	440.2	40.65	8.45				
11.50	901.66	21.99	2.38	29.50	432.38	36.67	7.82				
12.00	906.32	24.43	2.62	30.00	424.92	37.03	8.02				
12.50	910.06	21.79	2.34	30.50	417.89	35.96	7.92				
13.00	912.85	20.6	2.21	31.00	411.24	30.31	6.86				
13.50	914.56	23.19	2.47	31.50	404.97	31.68	7.26				
14.00	915	23.65	2.52	32.00	399.03	30.12	7.02				
14.50	914.35	23.7	2.53	32.50	393.29	25.46	6.08				
15.00	912.61	24.74	2.64	33.00	387.85	26.6	6.42				
15.50	907.42	15.23	1.65	33.50	382.7	25.15	6.17				
16.00	879.66	0.89	0.10	34.00	377.86	23.79	5.92				
16.50	837.29	4.66	0.55	34.50	373.31	22.04	5.57				
17.00	806.82	11.03	1.35	35.00	369.05	22.1	5.65				
17.50	782.88	14.07	1.77	35.50	365.14	18.21	4.75				

ตารางที่ ค-6 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	3.2	1.01	18.00	867.27	2.68	0.31	35.67	394.14	6.31	1.58
0.50	316.65	3.1	0.97	18.50	857.34	3.31	0.38				
1.00	328.09	7.06	2.11	19.00	845.69	3.04	0.36				
1.50	351.1	16.05	4.37	19.50	832.69	2.84	0.34				
2.00	380.34	20.41	5.09	20.00	818.42	0.87	0.11				
2.50	412.85	22.4	5.15	20.50	802.79	2.66	0.33				
3.00	446.15	22.9	4.88	21.00	785.63	2.92	0.37				
3.50	478.8	18.45	3.71	21.50	767.08	3.07	0.40				
4.00	509.87	16.08	3.06	22.00	747.37	0.02	0.00				
4.50	539.39	15.16	2.73	22.50	726.93	0.32	0.04				
5.00	567.31	15.94	2.73	23.00	706.29	4.36	0.61				
5.50	593.68	18.17	2.97	23.50	686	5.75	0.83				
6.00	618.59	16.16	2.55	24.00	666.37	1.12	0.17				
6.50	642.16	18.09	2.74	24.50	647.37	4.08	0.63				
7.00	664.48	14.17	2.09	25.00	629.2	5.05	0.80				
7.50	685.5	12.15	1.74	25.50	612.19	5.56	0.90				
8.00	705.33	5.82	0.82	26.00	595.47	5.98	0.99				
8.50	724.17	6.78	0.93	26.50	579.88	4.07	0.70				
9.00	741.89	8.76	1.17	27.00	564.6	8.15	1.42				
9.50	758.47	11.98	1.55	27.50	550.39	4.66	0.84				
10.00	773.92	11.43	1.46	28.00	536.33	4.82	0.89				
10.50	788.24	16.01	1.99	28.50	523.06	6.59	1.24				
11.00	801.44	15.61	1.91	29.00	510.33	6.32	1.22				
11.50	813.76	14.99	1.81	29.50	498.14	9.91	1.95				
12.00	825.17	12.98	1.55	30.00	486.52	6.13	1.24				
12.50	835.57	10.58	1.25	30.50	475.53	6.52	1.35				
13.00	844.95	10.5	1.23	31.00	465.12	10.03	2.11				
13.50	853.43	9.22	1.07	31.50	455.3	8.95	1.93				
14.00	861.17	11.98	1.37	32.00	446	6.45	1.43				
14.50	868.02	12.13	1.38	32.50	437.09	10.36	2.32				
15.00	873.98	10.17	1.15	33.00	428.68	6.77	1.55				
15.50	879.04	12.21	1.37	33.50	420.76	6.69	1.57				
16.00	882.81	8.84	0.99	34.00	413.33	6.42	1.53				
16.50	883.72	10.83	1.21	34.50	406.4	6.45	1.56				
17.00	881.04	11.71	1.31	35.00	399.97	5.58	1.38				
17.50	875.23	9.02	1.02	35.50	394.03	6.42	1.60				

ตารางที่ ค-7 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.18	0.37	0.12	18.00	752.44	13.11	1.71	35.67	360.79	5.36	1.46
0.50	401.64	0.89	0.22	18.50	735.34	15.51	2.07				
1.00	479.82	15.43	3.12	19.00	720.29	14.26	1.94				
1.50	538.34	27.91	4.93	19.50	701.05	37.1	5.03				
2.00	586.29	30.56	4.95	20.00	675.53	31.72	4.48				
2.50	624.88	32.47	4.94	20.50	644.11	37.64	5.52				
3.00	656.83	40.02	5.74	21.00	619.29	42.56	6.43				
3.50	683.09	36.86	5.12	21.50	599.22	43.43	6.76				
4.00	707.47	36.08	4.85	22.00	582.45	45.6	7.26				
4.50	729.84	37.31	4.86	22.50	567.28	46.07	7.51				
5.00	751.56	39.09	4.94	23.00	553.56	44.49	7.44				
5.50	772.1	42.15	5.18	23.50	540.76	44.39	7.59				
6.00	791.32	41.73	5.01	24.00	527.7	38.05	6.73				
6.50	809.19	42.16	4.95	24.50	515.65	40.4	7.27				
7.00	825.68	43.57	5.01	25.00	504.54	36.01	6.66				
7.50	840.81	38.94	4.43	25.50	494.18	36.37	6.86				
8.00	854.47	34.68	3.90	26.00	483.99	34.26	6.61				
8.50	866.43	33.72	3.75	26.50	474.5	27.65	5.51				
9.00	876.86	34.19	3.75	27.00	465.17	29.28	5.92				
9.50	885.75	36.3	3.94	27.50	456.48	23.47	4.89				
10.00	893.1	29.25	3.17	28.00	447.87	21.98	4.68				
10.50	898.91	26.54	2.87	28.50	439.77	23.68	5.11				
11.00	903.18	23.97	2.59	29.00	432.02	21.43	4.73				
11.50	907.44	21.21	2.28	29.50	424.61	21.24	4.76				
12.00	911.55	22	2.36	30.00	417.56	16.19	3.73				
12.50	914.76	16.59	1.78	30.50	410.93	15.92	3.73				
13.00	917.08	15.97	1.71	31.00	404.67	14.38	3.43				
13.50	918.31	17.94	1.92	31.50	398.78	15.17	3.66				
14.00	918.22	23.03	2.45	32.00	393.21	10.24	2.54				
14.50	917.04	23.51	2.50	32.50	387.82	11.63	2.91				
15.00	914.76	23.09	2.46	33.00	382.7	8.25	2.11				
15.50	908.61	16.64	1.80	33.50	377.86	7.29	1.89				
16.00	876.62	8.67	1.00	34.00	373.31	6.44	1.70				
16.50	829.56	5.01	0.61	34.50	369.03	5.62	1.50				
17.00	797.43	5.22	0.65	35.00	365.04	5.91	1.59				
17.50	772.89	6.46	0.83	35.50	361.38	4.47	1.22				

ตารางที่ ค-8 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	5	1.56	18.00	868.45	5.6	0.64	35.67	391.69	0.06	0.02
0.50	316.71	0.86	0.27	18.50	858.08	7.67	0.89				
1.00	328.5	2.45	0.74	19.00	845.97	6.28	0.74				
1.50	352.22	1.27	0.36	19.50	832.49	3.26	0.39				
2.00	382.28	0.77	0.20	20.00	817.77	6.48	0.79				
2.50	415.58	3.67	0.88	20.50	801.67	6.78	0.84				
3.00	449.55	3.6	0.79	21.00	784.04	7.71	0.97				
3.50	482.74	0.09	0.02	21.50	765.01	12.34	1.59				
4.00	514.21	1.16	0.23	22.00	744.84	8.51	1.13				
4.50	544.02	0.57	0.10	22.50	723.95	8.3	1.13				
5.00	572.13	1.72	0.30	23.00	702.9	12.15	1.70				
5.50	598.6	5.65	0.94	23.50	682.27	10.98	1.58				
6.00	623.57	5.98	0.95	24.00	662.38	6.57	0.98				
6.50	647.16	6.09	0.93	24.50	643.18	5.77	0.89				
7.00	669.47	0.02	0.00	25.00	624.87	8.58	1.35				
7.50	690.44	2.51	0.36	25.50	607.79	4.76	0.78				
8.00	710.2	4.05	0.57	26.00	591	4.25	0.71				
8.50	728.97	4.12	0.57	26.50	575.42	6.73	1.16				
9.00	746.6	2.95	0.40	27.00	560.14	5.61	0.99				
9.50	763.09	0.74	0.10	27.50	545.98	5.57	1.01				
10.00	778.43	1.52	0.19	28.00	531.97	4.58	0.85				
10.50	792.62	5.13	0.64	28.50	518.77	1.48	0.28				
11.00	805.67	5.78	0.71	29.00	506.12	1.33	0.26				
11.50	817.84	6.31	0.77	29.50	494.03	2.92	0.59				
12.00	829.11	1.94	0.23	30.00	482.52	2.83	0.58				
12.50	839.35	4.7	0.56	30.50	471.65	1.5	0.32				
13.00	848.56	4.79	0.56	31.00	461.37	4.88	1.05				
13.50	856.87	1.68	0.20	31.50	451.68	0.77	0.17				
14.00	864.44	0.91	0.11	32.00	442.53	2.32	0.52				
14.50	871.11	4.64	0.53	32.50	433.76	2.99	0.68				
15.00	876.89	4.96	0.56	33.00	425.48	2.67	0.62				
15.50	881.77	6.28	0.71	33.50	417.7	2.55	0.61				
16.00	885.35	4.5	0.51	34.00	410.42	2.23	0.54				
16.50	886.01	8.84	0.99	34.50	403.63	2.52	0.62				
17.00	883.01	8.14	0.91	35.00	397.33	0.52	0.13				
17.50	876.82	11.53	1.30	35.50	391.54	2.61	0.66				



ตารางที่ ค-9 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	0.03	0.01	18.00	945.51	47.84	4.82	36.00	656.88	31.37	4.56
0.50	367.99	38.46	9.46	18.50	947.66	47.19	4.74	36.50	635.22	34.23	5.11
1.00	435.09	71.46	14.11	19.00	949.55	45.50	4.57	37.00	617.02	36.23	5.55
1.50	494.94	73.31	12.90	19.50	951.22	44.33	4.45	37.50	601.33	34.52	5.43
2.00	544.73	89.72	14.14	20.00	952.68	42.67	4.29	38.00	587.53	34.22	5.50
2.50	587.38	92.77	13.64	20.50	953.94	41.31	4.15	38.50	573.87	32.58	5.37
3.00	624.05	115.30	15.59	21.00	955.00	40.85	4.10	39.00	561.39	30.96	5.23
3.50	655.95	98.00	13.00	21.50	955.85	39.80	4.00	39.50	548.90	29.85	5.16
4.00	684.13	112.32	14.10	22.00	956.99	36.16	3.64	40.00	537.45	26.70	4.73
4.50	709.58	105.27	12.92	22.50	958.07	34.58	3.48	40.50	526.02	25.23	4.58
5.00	732.59	100.76	12.09	23.00	959.09	35.66	3.58	41.00	515.39	21.46	4.00
5.50	753.47	98.28	11.54	23.50	960.04	24.41	2.48	41.50	504.91	20.74	3.95
6.00	773.09	97.16	11.16	24.00	960.93	32.42	3.26	42.00	494.78	20.67	4.01
6.50	791.22	97.43	10.96	24.50	961.77	33.48	3.36	42.50	485.09	19.56	3.88
7.00	808.16	98.29	10.84	25.00	962.54	31.41	3.16	43.00	475.74	16.51	3.35
7.50	824.50	93.35	10.17	25.50	963.25	31.30	3.15	43.50	466.75	15.40	3.19
8.00	839.86	91.39	9.81	26.00	963.90	31.15	3.13	44.00	458.11	13.84	2.93
8.50	853.69	95.86	10.10	26.50	964.48	31.87	3.20	44.50	449.81	12.84	2.78
9.00	865.29	97.46	10.12	27.00	964.89	31.86	3.20	45.00	441.87	12.18	2.68
9.50	875.16	94.39	9.74	27.50	965.26	30.49	3.06	45.50	434.27	11.58	2.60
10.00	883.52	88.53	9.11	28.00	965.68	30.57	3.07	46.00	427.02	9.23	2.12
10.50	890.59	83.56	8.58	28.50	966.27	28.98	2.91	46.50	420.09	9.66	2.25
11.00	896.20	77.75	7.98	29.00	966.01	31.24	3.15	47.00	413.49	8.76	2.07
11.50	901.23	75.02	7.68	29.50	925.37	3.78	0.41	47.50	407.22	7.73	1.86
12.00	906.20	69.35	7.11	30.00	888.71	5.04	0.56	48.00	401.29	7.16	1.75
12.50	910.60	68.25	6.97	30.50	860.02	8.43	0.97	48.50	395.69	5.46	1.36
13.00	914.65	64.00	6.54	31.00	836.53	13.52	1.59	49.00	390.43	5.72	1.44
13.50	918.50	61.95	6.32	31.50	816.74	15.21	1.83	49.50	385.51	5.44	1.39
14.00	922.17	59.38	6.05	32.00	798.96	16.79	2.06	50.00	380.92	3.23	0.84
14.50	925.69	59.26	6.02	32.50	783.02	20.83	2.59	50.50	376.84	3.31	0.87
15.00	929.03	57.52	5.83	33.00	768.34	20.81	2.64	51.00	373.25	5.60	1.48
15.50	932.19	55.26	5.60	33.50	754.87	22.68	2.92				
16.00	935.19	54.16	5.47	34.00	742.15	22.30	2.92				
16.50	928.02	63.13	6.37	34.50	727.24	26.81	3.56				
17.00	940.69	52.16	5.25	35.00	707.81	40.44	5.40				
17.50	943.18	49.97	5.03	35.50	683.21	28.84	4.05				

ตารางที่ ค-10 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	0.60	0.18	18.00	911.10	4.45	0.49	36.00	802.68	36.07	4.30
0.50	326.34	2.49	0.77	18.50	915.34	4.99	0.55	36.50	784.04	37.71	4.59
1.00	334.37	4.22	1.28	19.00	919.43	4.08	0.45	37.00	764.45	36.00	4.50
1.50	353.68	8.53	2.47	19.50	923.24	4.19	0.46	37.50	744.13	35.12	4.51
2.00	380.81	10.36	2.80	20.00	926.76	3.51	0.38	38.00	723.82	32.63	4.31
2.50	411.89	12.54	3.14	20.50	929.97	1.92	0.21	38.50	703.64	31.31	4.26
3.00	444.22	13.37	3.10	21.00	932.88	3.03	0.33	39.00	684.86	28.69	4.02
3.50	476.22	13.17	2.84	21.50	935.49	2.04	0.22	39.50	665.28	26.27	3.80
4.00	507.11	13.36	2.71	22.00	938.26	1.31	0.14	40.00	647.53	25.42	3.78
4.50	536.94	18.49	3.57	22.50	940.88	0.23	0.02	40.50	629.81	24.04	3.68
5.00	565.39	22.14	4.08	23.00	943.32	0.63	0.07	41.00	613.38	21.57	3.40
5.50	592.35	24.40	4.30	23.50	945.60	0.75	0.08	41.50	597.20	20.15	3.26
6.00	617.77	25.02	4.22	24.00	947.72	1.83	0.19	42.00	581.60	17.05	2.85
6.50	641.69	24.24	3.93	24.50	949.67	1.18	0.12	42.50	566.75	15.60	2.68
7.00	664.22	21.97	3.42	25.00	951.46	1.79	0.19	43.00	552.49	14.86	2.62
7.50	685.61	18.66	2.80	25.50	953.08	1.47	0.15	43.50	538.81	14.24	2.57
8.00	705.69	18.04	2.62	26.00	954.54	1.81	0.19	44.00	525.75	13.20	2.45
8.50	724.56	17.71	2.51	26.50	955.83	1.52	0.16	44.50	513.33	11.62	2.21
9.00	742.33	16.18	2.23	27.00	956.76	3.19	0.33	45.00	501.54	10.41	2.03
9.50	758.92	15.87	2.14	27.50	957.62	4.03	0.42	45.50	490.37	9.38	1.88
10.00	774.41	13.96	1.84	28.00	958.46	3.99	0.41	46.00	479.77	9.48	1.94
10.50	788.87	14.02	1.81	28.50	959.26	5.69	0.59	46.50	469.52	7.83	1.64
11.00	802.24	11.89	1.50	29.00	959.96	5.89	0.61	47.00	459.78	8.07	1.72
11.50	814.65	12.20	1.52	29.50	960.08	6.47	0.67	47.50	450.55	7.10	1.55
12.00	826.19	10.64	1.30	30.00	958.46	7.79	0.81	48.00	441.82	6.03	1.35
12.50	836.77	9.92	1.20	30.50	953.76	12.49	1.29	48.50	433.61	6.74	1.53
13.00	846.47	8.22	0.98	31.00	946.41	15.74	1.64	49.00	425.90	5.25	1.22
13.50	855.38	7.93	0.94	31.50	936.74	20.51	2.14	49.50	418.70	4.35	1.03
14.00	863.48	7.93	0.93	32.00	925.63	23.92	2.52	50.00	412.01	4.54	1.09
14.50	871.01	7.76	0.90	32.50	913.11	25.34	2.70	50.50	405.79	3.66	0.89
15.00	877.97	7.12	0.82	33.00	899.34	28.31	3.05	51.00	400.04	2.61	0.65
15.50	884.31	5.76	0.66	33.50	884.52	28.13	3.08				
16.00	890.36	6.11	0.69	34.00	869.11	30.44	3.38				
16.50	896.12	6.07	0.68	34.50	853.22	30.53	3.45				
17.00	901.49	5.64	0.63	35.00	837.09	31.46	3.62				
17.50	906.49	5.54	0.61	35.50	820.28	33.57	3.93				

ตารางที่ ค-11 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	0.93	0.29	18.00	944.99	40.36	4.10	36.00	656.79	43.96	6.27
0.50	368.09	22.26	5.70	18.50	947.16	39.79	4.03	36.50	635.19	47.36	6.94
1.00	435.29	58.76	11.89	19.00	949.06	37.09	3.76	37.00	617.07	50.38	7.55
1.50	495.21	46.74	8.62	19.50	950.74	36.01	3.65	37.50	601.46	51.59	7.90
2.00	545.06	54.09	9.03	20.00	952.22	36.33	3.68	38.00	587.75	50.10	7.85
2.50	587.63	78.52	11.79	20.50	953.50	35.75	3.61	38.50	574.17	50.68	8.11
3.00	624.31	70.64	10.16	21.00	954.57	34.38	3.48	39.00	561.76	47.69	7.83
3.50	656.17	63.18	8.78	21.50	955.44	34.61	3.50	39.50	549.35	46.30	7.77
4.00	684.29	69.66	9.24	22.00	956.59	32.56	3.29	40.00	537.57	44.28	7.61
4.50	709.67	71.68	9.17	22.50	957.69	30.06	3.04	40.50	526.61	42.54	7.47
5.00	732.60	68.95	8.60	23.00	958.72	31.83	3.21	41.00	516.03	39.82	7.16
5.50	753.41	72.74	8.80	23.50	959.69	23.36	2.38	41.50	505.60	40.85	7.48
6.00	772.96	72.29	8.55	24.00	960.60	27.85	2.82	42.00	495.51	40.14	7.49
6.50	791.02	71.53	8.29	24.50	961.44	28.61	2.89	42.50	485.84	38.01	7.26
7.00	807.90	76.45	8.64	25.00	962.23	27.92	2.82	43.00	476.52	35.43	6.92
7.50	824.19	71.76	8.01	25.50	962.95	29.40	2.96	43.50	467.54	35.11	6.98
8.00	839.50	72.25	7.92	26.00	963.62	29.43	2.96	44.00	458.91	32.14	6.55
8.50	853.28	72.17	7.80	26.50	964.22	28.83	2.90	44.50	450.61	31.44	6.52
9.00	864.84	74.51	7.93	27.00	964.64	29.31	2.95	45.00	442.66	28.59	6.07
9.50	874.68	68.67	7.28	27.50	965.02	28.83	2.90	45.50	435.04	27.41	5.93
10.00	883.01	63.54	6.71	28.00	965.45	27.00	2.72	46.00	427.77	25.08	5.54
10.50	890.05	60.80	6.39	28.50	966.06	27.79	2.80	46.50	420.81	23.44	5.28
11.00	895.64	57.91	6.07	29.00	959.79	29.16	2.95	47.00	414.19	22.26	5.10
11.50	900.65	57.20	5.97	29.50	925.09	4.96	0.53	47.50	407.90	19.25	4.51
12.00	905.60	53.95	5.62	30.00	888.39	8.36	0.93	48.00	401.94	17.61	4.20
12.50	910.00	52.15	5.42	30.50	859.69	12.56	1.44	48.50	396.31	15.64	3.80
13.00	914.04	50.51	5.24	31.00	836.20	17.25	2.02	49.00	391.01	14.44	3.56
13.50	917.89	49.56	5.12	31.50	816.41	18.34	2.20	49.50	386.04	13.41	3.36
14.00	921.56	47.79	4.93	32.00	798.63	19.22	2.35	50.00	381.41	11.74	2.99
14.50	925.09	47.16	4.85	32.50	782.71	21.14	2.63	50.50	377.29	10.96	2.82
15.00	928.44	46.21	4.74	33.00	768.05	23.10	2.92	51.00	373.65	13.20	3.41
15.50	931.61	45.74	4.68	33.50	754.60	24.65	3.16				
16.00	934.62	43.13	4.41	34.00	741.91	26.64	3.47				
16.50	937.46	44.09	4.49	34.50	727.04	32.51	4.28				
17.00	940.14	42.61	4.34	35.00	707.64	43.71	5.82				
17.50	942.65	41.90	4.26	35.50	683.08	39.07	5.41				

ตารางที่ ค-12 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.31	2.14	0.65	18.00	905.73	13.62	1.48	36.00	808.84	30.01	3.58
0.50	326.34	0.31	0.09	18.50	910.21	12.44	1.35	36.50	790.70	29.95	3.65
1.00	334.27	1.48	0.44	19.00	914.53	12.62	1.36	37.00	771.59	28.06	3.51
1.50	353.10	2.55	0.72	19.50	918.57	12.28	1.32	37.50	751.69	28.36	3.64
2.00	379.40	5.15	1.34	20.00	922.31	11.04	1.18	38.00	731.64	26.41	3.48
2.50	409.50	6.05	1.46	20.50	925.73	12.82	1.37	38.50	711.70	25.75	3.49
3.00	440.84	6.71	1.50	21.00	928.85	11.3	1.20	39.00	692.59	24.26	3.38
3.50	471.91	8.24	1.72	21.50	931.67	11.08	1.18	39.50	673.47	22.88	3.29
4.00	501.99	8.96	1.75	22.00	934.64	11.01	1.16	40.00	655.62	22.83	3.37
4.50	531.07	7.88	1.46	22.50	937.44	12.61	1.33	40.50	637.79	22.06	3.34
5.00	558.87	8.78	1.55	23.00	940.07	10.58	1.11	41.00	621.16	20.49	3.19
5.50	585.28	8.67	1.46	23.50	942.52	12.13	1.27	41.50	604.76	18.69	3.00
6.00	610.25	8.5	1.37	24.00	944.81	11.94	1.25	42.00	588.92	17.13	2.83
6.50	633.80	7.15	1.12	24.50	946.92	10.63	1.11	42.50	573.79	16.16	2.74
7.00	656.05	9.7	1.46	25.00	948.86	11.59	1.21	43.00	559.22	16.53	2.87
7.50	677.21	9.24	1.35	25.50	950.63	11.02	1.15	43.50	545.22	15.23	2.72
8.00	697.13	9.72	1.38	26.00	952.23	10.72	1.11	44.00	531.82	15.13	2.77
8.50	715.90	10.35	1.43	26.50	953.66	10.39	1.08	44.50	519.06	14.19	2.66
9.00	733.61	12.54	1.68	27.00	954.70	10.85	1.12	45.00	506.91	12.84	2.47
9.50	750.18	11.57	1.52	27.50	955.68	12.07	1.25	45.50	495.37	11.18	2.21
10.00	765.70	14.35	1.84	28.00	956.64	12.91	1.33	46.00	484.39	12.06	2.43
10.50	780.22	12.93	1.63	28.50	957.54	13.81	1.42	46.50	473.81	9.84	2.03
11.00	793.69	15.56	1.92	29.00	958.34	13.51	1.39	47.00	463.75	9.3	1.97
11.50	806.23	14.22	1.73	29.50	958.56	14.99	1.54	47.50	454.21	8.84	1.91
12.00	817.92	16.73	2.00	30.00	957.07	16.98	1.74	48.00	445.19	8.06	1.78
12.50	828.68	15.67	1.86	30.50	952.62	19.63	2.02	48.50	436.69	8.36	1.88
13.00	838.59	16.96	1.98	31.00	945.70	19.85	2.06	49.00	428.70	6.55	1.50
13.50	847.72	16.43	1.90	31.50	936.60	22.15	2.31	49.50	421.24	5.61	1.31
14.00	856.06	16.29	1.87	32.00	926.15	23.5	2.47	50.00	414.29	6.06	1.44
14.50	863.84	14.41	1.64	32.50	914.38	22.37	2.39	50.50	407.82	4.13	1.00
15.00	871.07	14.48	1.64	33.00	901.40	23.55	2.55	51.00	401.84	4.11	1.01
15.50	877.67	15.18	1.70	33.50	887.40	22.85	2.51				
16.00	883.99	14.96	1.66	34.00	872.78	24.07	2.68				
16.50	890.00	14.75	1.63	34.50	857.63	22.92	2.60				
17.00	895.62	14.93	1.64	35.00	842.14	25.01	2.88				
17.50	900.87	12.98	1.42	35.50	825.91	26.84	3.15				

ตารางที่ ค-13 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.31	1.94	0.59	18.00	946.27	27.08	2.78	36.00	649.59	36.06	5.26
0.50	374.69	2.76	0.73	18.50	948.37	25.78	2.65	36.50	627.50	40.15	6.01
1.00	445.87	35.98	7.47	19.00	950.19	24.16	2.48	37.00	609.43	41.72	6.41
1.50	506.38	27.97	5.23	19.50	951.80	23.65	2.42	37.50	594.01	43.94	6.89
2.00	555.66	28.79	4.93	20.00	953.21	23.34	2.39	38.00	580.25	43.00	6.90
2.50	597.88	34.37	5.44	20.50	954.42	25.03	2.56	38.50	566.66	44.59	7.29
3.00	633.79	39.46	5.86	21.00	955.43	22.62	2.31	39.00	554.30	43.15	7.22
3.50	664.96	41.19	5.83	21.50	956.23	23.12	2.36	39.50	541.95	43.00	7.35
4.00	692.43	51.12	6.88	22.00	957.33	21.82	2.23	40.00	530.68	43.47	7.57
4.50	717.21	53.54	6.95	22.50	958.37	21.08	2.15	40.50	519.44	42.81	7.61
5.00	739.60	52.15	6.59	23.00	959.35	21.40	2.18	41.00	508.98	41.47	7.53
5.50	759.93	52.92	6.51	23.50	960.27	16.58	1.70	41.50	498.68	40.67	7.54
6.00	779.06	51.19	6.17	24.00	961.14	19.81	2.02	42.00	488.73	38.92	7.38
6.50	796.73	52.92	6.23	24.50	961.95	19.80	2.02	42.50	479.22	37.33	7.23
7.00	813.28	58.17	6.68	25.00	962.70	20.45	2.08	43.00	470.07	36.38	7.18
7.50	829.27	51.88	5.89	25.50	963.39	21.86	2.22	43.50	461.26	35.69	7.18
8.00	844.33	51.02	5.70	26.00	964.03	21.82	2.21	44.00	452.80	34.25	7.03
8.50	857.86	47.59	5.26	26.50	964.60	20.55	2.09	44.50	444.68	33.37	6.98
9.00	869.13	50.32	5.47	27.00	965.00	21.25	2.15	45.00	436.92	30.73	6.57
9.50	878.65	46.40	5.02	27.50	965.37	21.78	2.21	45.50	429.50	29.25	6.38
10.00	886.70	42.35	4.56	28.00	965.78	20.47	2.08	46.00	422.43	28.82	6.39
10.50	893.47	37.68	4.05	28.50	966.38	21.57	2.18	46.50	415.67	26.48	5.99
11.00	898.80	36.85	3.94	29.00	959.81	24.34	2.47	47.00	409.24	25.61	5.89
11.50	903.57	34.18	3.64	29.50	923.61	5.46	0.59	47.50	403.14	23.91	5.60
12.00	908.31	33.74	3.58	30.00	885.53	5.78	0.66	48.00	397.38	22.47	5.35
12.50	912.50	31.05	3.29	30.50	856.20	2.75	0.32	48.50	391.95	21.80	5.27
13.00	916.36	31.69	3.34	31.00	832.35	0.10	0.01	49.00	386.85	19.80	4.87
13.50	920.06	31.19	3.28	31.50	812.36	2.29	0.28	49.50	382.09	18.66	4.66
14.00	923.61	30.54	3.20	32.00	794.45	5.40	0.68	50.00	377.65	18.20	4.60
14.50	927.02	28.73	3.01	32.50	778.45	7.60	0.97	50.50	373.76	16.09	4.13
15.00	930.26	28.19	2.94	33.00	763.74	12.11	1.56	51.00	370.38	20.47	5.24
15.50	933.34	29.41	3.05	33.50	750.25	12.30	1.61				
16.00	936.25	27.40	2.84	34.00	737.51	15.24	2.02				
16.50	939.00	28.45	2.94	34.50	722.40	18.75	2.53				
17.00	941.59	28.26	2.91	35.00	702.43	36.82	4.98				
17.50	944.01	26.74	2.75	35.50	676.91	29.14	4.13				



ตารางที่ ค-14 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	3.00	0.91	18.00	909.10	1.35	0.15	36.00	803.82	31.73	3.80
0.50	326.45	2.00	0.61	18.50	913.42	1.07	0.12	36.50	783.31	35.74	4.36
1.00	334.93	2.18	0.66	19.00	917.59	0.76	0.08	37.00	765.85	34.50	4.31
1.50	354.71	3.56	1.01	19.50	921.48	0.77	0.08	37.50	745.66	33.19	4.26
2.00	382.01	3.36	0.89	20.00	925.08	0.33	0.04	38.00	725.44	34.01	4.48
2.50	412.99	5.34	1.31	20.50	928.36	0.21	0.02	38.50	705.35	32.70	4.43
3.00	445.06	4.71	1.07	21.00	931.35	1.30	0.14	39.00	686.19	33.26	4.62
3.50	476.73	3.58	0.76	21.50	934.04	0.21	0.02	39.50	667.04	32.11	4.59
4.00	507.27	4.12	0.82	22.00	936.88	0.47	0.05	40.00	649.23	30.32	4.46
4.50	536.73	6.58	1.24	22.50	939.56	1.69	0.18	40.50	631.46	29.79	4.51
5.00	564.83	6.98	1.25	23.00	942.08	1.17	0.12	41.00	614.94	29.21	4.53
5.50	591.46	7.51	1.29	23.50	944.42	1.23	0.13	41.50	598.65	27.50	4.39
6.00	616.59	8.04	1.32	24.00	946.60	2.55	0.27	42.00	582.94	27.21	4.46
6.50	640.25	8.90	1.41	24.50	948.61	2.94	0.31	42.50	567.97	26.98	4.53
7.00	662.55	8.90	1.36	25.00	950.45	2.90	0.30	43.00	553.56	26.79	4.62
7.50	683.74	9.99	1.48	25.50	952.13	1.52	0.16	43.50	539.74	24.81	4.39
8.00	703.65	9.90	1.43	26.00	953.64	1.81	0.19	44.00	526.52	25.43	4.61
8.50	722.38	7.73	1.08	26.50	954.98	3.27	0.34	44.50	513.96	23.79	4.42
9.00	740.03	8.18	1.12	27.00	955.96	3.59	0.37	45.00	502.01	24.44	4.64
9.50	756.52	6.97	0.93	27.50	956.86	3.89	0.40	45.50	490.68	22.97	4.47
10.00	771.92	6.47	0.85	28.00	957.75	6.70	0.69	46.00	479.91	22.14	4.41
10.50	786.31	6.36	0.82	28.50	958.59	5.76	0.60	46.50	469.53	22.02	4.48
11.00	799.63	5.38	0.68	29.00	959.32	8.23	0.85	47.00	459.66	20.59	4.29
11.50	812.01	4.46	0.55	29.50	959.41	7.94	0.82	47.50	450.31	20.94	4.44
12.00	823.52	3.97	0.48	30.00	957.64	10.51	1.09	48.00	441.47	20.08	4.35
12.50	834.10	2.45	0.29	30.50	952.74	14.11	1.46	48.50	433.15	19.10	4.22
13.00	843.82	2.17	0.26	31.00	945.27	17.18	1.79	49.00	425.35	18.30	4.12
13.50	852.75	2.50	0.29	31.50	935.59	21.46	2.24	49.50	418.06	16.79	3.86
14.00	860.89	2.24	0.26	32.00	924.57	23.18	2.45	50.00	411.29	15.16	3.55
14.50	868.47	1.82	0.21	32.50	912.24	24.21	2.59	50.50	404.99	13.86	3.31
15.00	875.50	1.05	0.12	33.00	898.73	23.42	2.54	51.00	399.18	12.57	3.05
15.50	881.91	1.86	0.21	33.50	884.24	25.81	2.84				
16.00	888.04	0.11	0.01	34.00	869.19	25.26	2.82				
16.50	893.87	1.52	0.17	34.50	853.66	25.29	2.88				
17.00	899.32	0.87	0.10	35.00	837.83	27.62	3.19				
17.50	904.40	1.25	0.14	35.50	821.24	28.31	3.33				

ตารางที่ ค-15 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.31	13.94	4.11	18.00	947.85	19.63	2.03	36.00	640.54	0.41	0.06
0.50	381.13	19.02	4.75	18.50	949.85	18.50	1.91	36.50	617.93	6.82	1.09
1.00	457.18	74.07	13.94	19.00	951.57	19.28	1.99	37.00	599.99	8.76	1.44
1.50	519.33	69.02	11.73	19.50	953.08	18.57	1.91	37.50	584.90	10.45	1.76
2.00	568.69	68.46	10.74	20.00	954.39	17.26	1.78	38.00	571.23	11.02	1.89
2.50	610.61	70.84	10.40	20.50	955.51	18.44	1.89	38.50	557.73	12.22	2.14
3.00	646.00	74.55	10.35	21.00	956.43	17.52	1.80	39.00	545.54	13.31	2.38
3.50	676.54	76.41	10.15	21.50	957.16	16.39	1.68	39.50	533.35	14.20	2.59
4.00	703.36	77.19	9.89	22.00	958.18	15.67	1.61	40.00	522.29	15.36	2.86
4.50	727.47	74.78	9.32	22.50	959.15	15.80	1.62	40.50	511.26	16.29	3.09
5.00	749.21	73.84	8.97	23.00	960.07	15.18	1.56	41.00	501.03	16.12	3.12
5.50	768.93	71.72	8.53	23.50	960.94	12.41	1.27	41.50	490.95	14.80	2.93
6.00	787.50	70.85	8.25	24.00	961.75	15.40	1.58	42.00	481.22	14.23	2.87
6.50	804.68	66.47	7.63	24.50	962.51	15.44	1.58	42.50	471.94	13.91	2.86
7.00	820.77	66.88	7.53	25.00	963.22	16.53	1.69	43.00	463.02	14.53	3.04
7.50	836.35	62.20	6.92	25.50	963.87	15.68	1.60	43.50	454.45	12.50	2.68
8.00	851.04	58.51	6.43	26.00	964.47	15.58	1.59	44.00	446.23	13.12	2.86
8.50	864.22	56.43	6.13	26.50	965.02	15.03	1.53	44.50	438.35	11.60	2.58
9.00	875.07	55.58	5.97	27.00	965.40	15.55	1.59	45.00	430.83	10.72	2.43
9.50	884.17	47.68	5.12	27.50	965.74	15.61	1.59	45.50	423.66	8.89	2.06
10.00	891.79	43.76	4.68	28.00	966.14	16.71	1.70	46.00	416.82	9.23	2.17
10.50	898.16	36.99	3.96	28.50	966.72	15.93	1.62	46.50	410.30	7.35	1.76
11.00	903.09	36.06	3.84	29.00	959.81	21.64	2.20	47.00	404.10	5.75	1.40
11.50	907.50	32.95	3.50	29.50	921.61	23.26	2.59	47.50	398.23	5.92	1.46
12.00	911.91	32.14	3.40	30.00	881.40	28.15	3.30	48.00	392.70	5.05	1.27
12.50	915.81	29.54	3.12	30.50	851.08	25.43	3.08	48.50	387.49	5.06	1.29
13.00	919.40	28.85	3.04	31.00	826.72	24.87	3.10	49.00	382.61	3.74	0.97
13.50	922.88	26.87	2.83	31.50	806.49	22.24	2.84	49.50	378.07	2.48	0.65
14.00	926.24	25.91	2.72	32.00	788.44	19.39	2.52	50.00	373.86	2.72	0.72
14.50	929.48	23.67	2.48	32.50	772.40	18.95	2.52	50.50	370.20	0.75	0.20
15.00	932.57	23.18	2.43	33.00	757.69	17.14	2.31	51.00	367.08	6.47	1.73
15.50	935.52	22.93	2.39	33.50	744.24	19.39	2.68				
16.00	938.30	22.85	2.38	34.00	731.51	17.96	2.52				
16.50	940.92	21.43	2.23	34.50	716.20	15.05	2.15				
17.00	943.39	21.76	2.25	35.00	695.65	14.70	2.07				
17.50	945.69	19.56	2.03	35.50	669.05	5.90	0.89				

ตารางที่ ค-16 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	16.80	4.91	18.00	911.87	4.48	0.49	36.00	799.50	11.25	1.43
0.50	326.54	16.61	4.84	18.50	916.05	4.70	0.51	36.50	780.61	11.46	1.49
1.00	335.57	17.68	5.00	19.00	920.08	4.47	0.48	37.00	760.76	10.41	1.39
1.50	356.34	26.71	6.97	19.50	923.84	4.31	0.46	37.50	740.21	11.06	1.52
2.00	384.70	30.85	7.42	20.00	927.31	4.64	0.50	38.00	719.72	8.77	1.23
2.50	416.61	32.34	7.20	20.50	930.47	2.78	0.30	38.50	699.35	8.20	1.19
3.00	449.41	33.74	6.98	21.00	933.35	4.50	0.48	39.00	680.02	6.77	1.01
3.50	481.64	33.11	6.43	21.50	935.92	4.23	0.45	39.50	660.69	4.94	0.75
4.00	512.60	32.05	5.88	22.00	938.66	4.29	0.45	40.00	642.80	5.35	0.84
4.50	542.40	31.35	5.46	22.50	941.24	2.81	0.30	40.50	624.94	3.59	0.58
5.00	570.73	29.12	4.85	23.00	943.65	4.20	0.44	41.00	608.40	2.75	0.45
5.50	597.51	28.04	4.48	23.50	945.90	2.35	0.25	41.50	592.11	1.06	0.18
6.00	622.74	26.91	4.14	24.00	947.99	2.86	0.30	42.00	576.41	0.74	0.13
6.50	646.44	27.11	4.02	24.50	949.91	3.74	0.39	42.50	561.48	1.97	0.35
7.00	668.73	24.62	3.55	25.00	951.67	2.68	0.28	43.00	547.14	1.91	0.35
7.50	689.89	23.76	3.33	25.50	953.27	2.58	0.27	43.50	533.40	2.85	0.53
8.00	709.73	23.32	3.18	26.00	954.71	3.14	0.33	44.00	520.29	3.26	0.62
8.50	728.37	23.68	3.15	26.50	955.98	4.77	0.50	44.50	507.85	3.50	0.68
9.00	745.90	21.75	2.83	27.00	956.90	5.05	0.52	45.00	496.04	4.71	0.94
9.50	762.26	23.09	2.94	27.50	957.75	4.90	0.51	45.50	484.86	5.29	1.08
10.00	777.52	20.63	2.58	28.00	958.59	5.86	0.61	46.00	474.27	4.28	0.89
10.50	791.75	21.00	2.58	28.50	959.38	5.57	0.58	46.50	464.04	5.91	1.26
11.00	804.90	18.35	2.23	29.00	960.06	7.19	0.74	47.00	454.33	6.02	1.31
11.50	817.10	18.75	2.24	29.50	960.05	6.10	0.63	47.50	445.15	5.90	1.31
12.00	828.43	15.42	1.83	30.00	958.06	6.09	0.63	48.00	436.48	6.07	1.37
12.50	838.81	15.44	1.81	30.50	952.81	4.04	0.42	48.50	428.34	4.91	1.13
13.00	848.33	12.52	1.45	31.00	944.93	2.02	0.21	49.00	420.71	5.54	1.30
13.50	857.06	11.39	1.31	31.50	934.81	2.16	0.23	49.50	413.61	5.44	1.30
14.00	865.01	10.14	1.16	32.00	923.33	7.58	0.83	50.00	407.03	3.62	0.88
14.50	872.39	10.76	1.22	32.50	910.54	9.99	1.11	50.50	400.93	3.92	0.97
15.00	879.24	10.11	1.14	33.00	896.60	14.55	1.65	51.00	395.32	2.63	0.66
15.50	885.47	8.08	0.90	33.50	881.69	15.24	1.76				
16.00	891.43	7.82	0.87	34.00	866.26	17.41	2.05				
16.50	897.09	6.46	0.71	34.50	850.37	16.72	2.01				
17.00	902.39	5.36	0.59	35.00	834.20	15.85	1.94				
17.50	907.31	5.94	0.65	35.50	817.28	11.73	1.46				

ตารางที่ ค-17 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	321.23	0.12	0.04	13.00	909.64	53.11	5.52	26.00	637.18	24.47	3.70
0.50	381.40	56.05	12.81	13.50	912.64	51.11	5.30	26.50	616.87	25.58	3.98
1.00	450.41	83.24	15.60	14.00	915.65	49.80	5.16	27.00	597.82	29.43	4.69
1.50	503.31	82.94	14.15	14.50	918.51	47.34	4.90	27.50	582.43	26.12	4.29
2.00	548.41	116.44	17.51	15.00	921.04	46.01	4.76	28.00	568.92	20.43	3.47
2.50	589.32	101.93	14.75	15.50	923.57	45.08	4.65	28.50	555.98	20.97	3.63
3.00	626.97	104.48	14.28	16.00	926.10	43.95	4.53	29.00	543.79	20.06	3.56
3.50	660.44	111.31	14.42	16.50	928.67	42.58	4.38	29.50	531.65	18.30	3.33
4.00	690.58	104.97	13.19	17.00	931.25	44.80	4.59	30.00	519.50	14.15	2.65
4.50	717.60	112.05	13.51	17.50	933.84	42.61	4.36	30.50	508.48	12.87	2.47
5.00	741.92	130.83	14.99	18.00	936.17	40.58	4.15	31.00	497.95	13.50	2.64
5.50	764.00	113.65	12.95	18.50	937.48	38.07	3.90	31.50	487.95	8.00	1.61
6.00	784.01	105.64	11.87	19.00	936.33	39.22	4.02	32.00	478.17	9.78	2.00
6.50	803.40	103.25	11.39	19.50	923.13	27.02	2.84	32.50	468.88	8.17	1.71
7.00	821.21	102.04	11.05	20.00	886.46	13.09	1.46	33.00	459.78	7.47	1.60
7.50	835.38	98.07	10.51	20.50	852.29	13.26	1.53	33.50	450.98	5.77	1.26
8.00	847.17	87.88	9.40	21.00	824.67	15.68	1.87	34.00	442.57	4.78	1.07
8.50	859.32	84.03	8.91	21.50	802.43	17.82	2.17	34.50	434.47	3.48	0.80
9.00	870.08	82.47	8.66	22.00	784.11	18.74	2.33	35.00	426.68	2.77	0.65
9.50	877.27	80.28	8.38	22.50	767.88	19.07	2.42	35.50	419.24	1.61	0.38
10.00	884.19	75.76	7.89	23.00	753.19	18.66	2.42	36.00	412.15	0.90	0.22
10.50	889.54	71.31	7.42	23.50	739.65	17.60	2.32	36.50	405.39	0.36	0.09
11.00	894.49	65.56	6.83	24.00	727.29	19.46	2.61	37.00	398.97	0.42	0.10
11.50	898.77	61.58	6.41	24.50	708.23	37.72	5.06	37.50	393.52	1.17	0.30
12.00	902.74	58.41	6.08	25.00	684.21	23.24	3.29	38.00	389.01	7.74	1.95
12.50	906.51	55.44	5.76	25.50	658.10	20.75	3.06	38.39	387.72	8.53	2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-18 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	321.35	0.60	0.19	13.00	839.44	14.41	1.69	26.00	781.54	20.41	2.54
0.50	323.45	1.50	0.47	13.50	846.89	14.36	1.67	26.50	762.94	18.31	2.34
1.00	333.96	1.61	0.48	14.00	854.34	14.61	1.68	27.00	743.39	15.86	2.09
1.50	354.62	6.07	1.74	14.50	861.33	15.62	1.78	27.50	723.22	12.83	1.74
2.00	383.27	9.82	2.63	15.00	867.14	15.51	1.76	28.00	702.80	5.65	0.80
2.50	414.21	13.16	3.28	15.50	872.95	17.20	1.93	28.50	682.72	7.53	1.09
3.00	445.79	11.14	2.56	16.00	878.77	15.48	1.73	29.00	663.20	7.65	1.14
3.50	477.11	8.46	1.81	16.50	883.75	15.90	1.77	29.50	644.90	5.65	0.87
4.00	507.77	3.92	0.78	17.00	888.44	16.11	1.78	30.00	627.05	0.40	0.06
4.50	537.48	4.93	0.93	17.50	893.14	15.61	1.72	30.50	610.19	1.74	0.29
5.00	566.22	6.77	1.21	18.00	897.72	15.43	1.69	31.00	593.76	0.79	0.13
5.50	593.51	7.56	1.29	18.50	901.87	15.38	1.68	31.50	578.33	5.78	1.01
6.00	619.51	5.16	0.84	19.00	905.86	15.59	1.69	32.00	563.32	2.37	0.42
6.50	644.10	7.95	1.25	19.50	909.47	15.28	1.65	32.50	549.25	3.30	0.60
7.00	667.32	6.57	0.99	20.00	911.20	16.55	1.78	33.00	535.58	3.43	0.64
7.50	689.07	4.02	0.59	20.50	910.55	19.20	2.06	33.50	522.40	4.95	0.96
8.00	709.42	2.47	0.35	21.00	907.68	20.57	2.22	34.00	509.85	5.30	1.05
8.50	728.53	1.38	0.19	21.50	902.30	21.15	2.29	34.50	497.81	6.26	1.27
9.00	745.95	0.30	0.04	22.00	894.32	21.13	2.31	35.00	486.28	6.13	1.28
9.50	760.84	4.81	0.63	22.50	884.32	20.13	2.23	35.50	475.30	6.65	1.42
10.00	775.45	4.60	0.59	23.00	872.53	19.92	2.23	36.00	464.87	6.72	1.47
10.50	788.41	8.24	1.03	23.50	859.56	17.79	2.03	36.50	454.97	6.82	1.52
11.00	800.67	8.28	1.02	24.00	845.38	19.57	2.26	37.00	445.61	7.26	1.66
11.50	811.78	9.37	1.14	24.50	830.67	18.08	2.13	37.50	436.82	6.87	1.60
12.00	821.99	11.66	1.40	25.00	815.27	20.38	2.44	38.00	428.61	7.66	1.82
12.50	831.62	12.53	1.48	25.50	799.00	21.25	2.59	38.39	426.27	9.42	2.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-19 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	323.94	0.39	0.12	13.00	914.65	35.80	3.77	26.00	614.52	66.83	9.81
0.50	404.90	5.85	1.47	13.50	917.27	34.58	3.63	26.50	595.69	69.36	10.43
1.00	482.11	0.14	0.03	14.00	919.88	33.67	3.53	27.00	577.54	72.01	11.09
1.50	535.36	3.89	0.72	14.50	922.39	32.86	3.44	27.50	563.22	71.33	11.24
2.00	579.53	18.52	3.10	15.00	924.66	32.19	3.36	28.00	550.68	66.27	10.74
2.50	619.25	21.80	3.40	15.50	926.92	31.63	3.30	28.50	538.38	67.17	11.09
3.00	655.55	29.30	4.28	16.00	929.19	31.16	3.24	29.00	526.92	65.93	11.12
3.50	687.36	24.69	3.47	16.50	931.59	30.56	3.18	29.50	515.27	64.18	11.08
4.00	715.74	35.91	4.78	17.00	934.03	32.92	3.40	30.00	503.49	69.56	12.14
4.50	740.92	32.13	4.16	17.50	936.47	31.38	3.24	30.50	493.02	57.53	10.45
5.00	763.40	28.05	3.54	18.00	938.63	30.12	3.11	31.00	483.11	57.04	10.56
5.50	783.91	31.84	3.90	18.50	939.66	29.29	3.02	31.50	473.69	50.16	9.57
6.00	802.46	39.69	4.71	19.00	937.81	31.44	3.24	32.00	464.48	50.77	9.85
6.50	820.52	48.13	5.54	19.50	921.63	25.52	2.69	32.50	455.69	48.06	9.54
7.00	837.05	51.40	5.79	20.00	878.71	15.64	1.75	33.00	447.09	45.86	9.30
7.50	849.75	53.90	5.96	20.50	840.14	22.51	2.61	33.50	438.77	42.38	8.81
8.00	860.09	48.76	5.37	21.00	810.85	28.60	3.41	34.00	430.83	39.92	8.48
8.50	871.40	46.75	5.09	21.50	788.38	32.57	3.97	34.50	423.19	37.36	8.11
9.00	881.57	45.88	4.95	22.00	770.10	34.95	4.34	35.00	415.85	35.10	7.78
9.50	887.57	49.18	5.25	22.50	753.95	37.40	4.73	35.50	408.85	32.90	7.45
10.00	893.33	45.72	4.87	23.00	739.44	38.91	5.00	36.00	402.20	30.65	7.08
10.50	897.76	44.29	4.70	23.50	726.17	39.18	5.12	36.50	395.87	28.58	6.73
11.00	901.85	41.60	4.41	24.00	714.18	41.77	5.53	37.00	389.87	26.48	6.36
11.50	905.40	40.15	4.25	24.50	693.57	62.18	8.23	37.50	385.03	24.02	5.87
12.00	908.74	38.61	4.08	25.00	666.58	55.17	7.64	38.00	381.32	31.13	7.55
12.50	911.94	36.81	3.88	25.50	637.05	62.90	8.99	38.39	380.14	31.61	7.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-20 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	323.95	0.00	0.00	13.00	829.08	15.47	1.83	26.00	788.27	26.58	3.26
0.50	325.76	1.21	0.37	13.50	836.84	15.61	1.83	26.50	770.45	25.80	3.24
1.00	335.31	0.16	0.05	14.00	844.60	15.85	1.84	27.00	751.56	24.79	3.19
1.50	354.66	3.11	0.88	14.50	851.89	17.16	1.97	27.50	731.87	22.88	3.03
2.00	381.94	6.29	1.67	15.00	858.02	16.93	1.94	28.00	711.77	16.68	2.29
2.50	411.55	9.30	2.31	15.50	864.14	18.61	2.11	28.50	691.77	19.78	2.78
3.00	441.85	7.20	1.66	16.00	870.27	16.88	1.90	29.00	672.21	20.64	2.98
3.50	471.98	5.53	1.19	16.50	875.54	17.41	1.95	29.50	653.71	19.34	2.87
4.00	501.53	1.78	0.36	17.00	880.53	17.62	1.96	30.00	635.60	13.55	2.09
4.50	530.22	2.77	0.53	17.50	885.51	17.14	1.90	30.50	618.41	13.04	2.07
5.00	558.04	4.49	0.81	18.00	890.39	16.96	1.87	31.00	601.60	15.55	2.52
5.50	584.52	4.77	0.82	18.50	894.82	16.73	1.84	31.50	585.74	9.31	1.56
6.00	609.83	1.78	0.29	19.00	899.09	16.96	1.85	32.00	570.28	13.17	2.26
6.50	633.83	4.68	0.74	19.50	903.01	16.44	1.79	32.50	555.74	12.21	2.15
7.00	656.56	2.81	0.43	20.00	905.21	17.34	1.88	33.00	541.59	12.16	2.20
7.50	677.92	2.27	0.34	20.50	905.23	19.42	2.10	33.50	527.92	10.33	1.92
8.00	697.98	0.73	0.10	21.00	903.21	21.54	2.33	34.00	514.90	9.75	1.86
8.50	716.88	0.17	0.02	21.50	898.88	21.87	2.37	34.50	502.38	9.17	1.79
9.00	734.18	1.37	0.19	22.00	892.12	22.23	2.43	35.00	490.38	9.07	1.82
9.50	749.12	5.03	0.67	22.50	883.39	22.36	2.47	35.50	478.94	8.21	1.69
10.00	763.78	4.77	0.62	23.00	872.91	21.94	2.45	36.00	468.06	7.89	1.66
10.50	776.87	8.18	1.04	23.50	861.20	20.55	2.33	36.50	457.73	7.22	1.55
11.00	789.30	8.55	1.07	24.00	848.22	22.53	2.59	37.00	447.95	6.80	1.50
11.50	800.62	9.33	1.15	24.50	834.59	21.76	2.54	37.50	438.76	6.69	1.50
12.00	811.07	11.48	1.40	25.00	820.18	24.07	2.85	38.00	430.17	5.18	1.19
12.50	820.96	12.39	1.49	25.50	804.84	26.11	3.14	38.39	427.72	3.23	0.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-21 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	324.52	0.13	0.04	13.00	909.14	27.61	2.95	26.00	637.76	18.89	2.88
0.50	382.09	19.76	4.92	13.50	912.15	26.60	2.83	26.50	617.40	22.25	3.48
1.00	450.39	44.86	9.06	14.00	915.16	25.79	2.74	27.00	598.35	26.00	4.17
1.50	503.17	15.78	3.04	14.50	918.03	25.32	2.68	27.50	582.98	25.67	4.22
2.00	548.27	19.38	3.41	15.00	920.56	24.79	2.62	28.00	569.52	21.93	3.71
2.50	589.17	19.08	3.14	15.50	923.10	24.25	2.56	28.50	556.64	23.51	4.05
3.00	626.81	24.64	3.78	16.00	925.64	23.71	2.50	29.00	544.49	24.46	4.30
3.50	660.26	35.59	5.11	16.50	928.21	23.14	2.43	29.50	532.42	22.33	4.03
4.00	690.39	44.16	6.01	17.00	930.81	25.14	2.63	30.00	520.32	19.03	3.53
4.50	717.39	44.76	5.87	17.50	933.40	24.05	2.51	30.50	509.34	17.91	3.40
5.00	741.68	46.07	5.85	18.00	935.74	23.01	2.40	31.00	498.84	18.91	3.65
5.50	763.74	42.61	5.28	18.50	937.07	22.78	2.37	31.50	488.86	13.99	2.78
6.00	783.70	45.65	5.50	19.00	935.94	24.61	2.56	32.00	479.11	15.84	3.20
6.50	803.07	45.48	5.36	19.50	922.82	18.63	1.98	32.50	469.82	14.63	3.02
7.00	820.84	45.01	5.20	20.00	886.31	1.64	0.18	33.00	460.73	13.82	2.91
7.50	835.00	43.25	4.93	20.50	852.29	0.44	0.05	33.50	451.93	12.22	2.63
8.00	846.77	39.58	4.47	21.00	824.71	1.14	0.14	34.00	443.51	11.24	2.47
8.50	858.87	37.18	4.15	21.50	802.47	2.98	0.37	34.50	435.39	9.86	2.21
9.00	869.57	37.98	4.18	22.00	784.14	4.01	0.51	35.00	427.58	9.17	2.10
9.50	876.77	40.18	4.38	22.50	767.89	5.36	0.69	35.50	420.11	8.34	1.95
10.00	883.70	37.45	4.07	23.00	753.20	5.95	0.78	36.00	412.99	7.46	1.77
10.50	889.05	35.20	3.81	23.50	739.66	6.29	0.84	36.50	406.20	6.65	1.61
11.00	894.00	32.05	3.46	24.00	727.29	8.56	1.16	37.00	399.74	5.91	1.46
11.50	898.27	30.58	3.29	24.50	708.31	31.54	4.26	37.50	394.23	4.72	1.18
12.00	902.24	29.51	3.17	25.00	684.45	15.10	2.16	38.00	389.65	16.00	3.94
12.50	906.01	28.14	3.01	25.50	658.56	17.29	2.56	38.39	388.34	17.41	4.29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-22 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	324.85	0.00	0.00	13.00	833.29	15.56	1.83	26.00	784.53	12.82	1.61
0.50	326.88	1.13	0.35	13.50	840.92	15.73	1.84	26.50	766.44	11.51	1.48
1.00	337.09	1.16	0.34	14.00	848.54	15.81	1.83	27.00	747.36	10.09	1.33
1.50	357.12	1.57	0.44	14.50	855.70	16.85	1.93	27.50	727.59	8.06	1.10
2.00	384.81	3.36	0.88	15.00	861.69	16.46	1.87	28.00	707.51	2.24	0.32
2.50	414.75	6.50	1.59	15.50	867.69	17.96	2.03	28.50	687.66	4.99	0.72
3.00	445.34	4.39	0.99	16.00	873.69	16.36	1.84	29.00	668.29	6.26	0.93
3.50	475.73	3.08	0.65	16.50	878.85	16.60	1.85	29.50	650.02	4.93	0.75
4.00	505.53	1.22	0.24	17.00	883.72	16.63	1.85	30.00	632.15	0.10	0.02
4.50	534.45	0.70	0.13	17.50	888.59	15.96	1.76	30.50	615.20	0.35	0.06
5.00	562.46	2.71	0.48	18.00	893.35	15.80	1.74	31.00	598.65	2.00	0.33
5.50	589.11	3.46	0.59	18.50	897.67	15.68	1.72	31.50	583.05	3.60	0.62
6.00	614.55	0.90	0.15	19.00	901.82	15.63	1.70	32.00	567.85	0.40	0.07
6.50	638.67	4.12	0.65	19.50	905.59	15.46	1.68	32.50	553.56	0.41	0.07
7.00	661.49	2.24	0.34	20.00	907.46	16.39	1.77	33.00	539.65	0.00	0.00
7.50	682.92	2.27	0.33	20.50	906.98	18.07	1.95	33.50	526.23	1.48	0.28
8.00	703.02	0.87	0.12	21.00	904.34	18.31	1.98	34.00	513.43	1.78	0.35
8.50	721.94	0.31	0.04	21.50	899.30	17.65	1.92	34.50	501.13	2.28	0.46
9.00	739.23	1.42	0.19	22.00	891.81	16.44	1.81	35.00	489.34	2.29	0.47
9.50	754.10	4.75	0.63	22.50	882.42	15.03	1.67	35.50	478.10	2.35	0.49
10.00	768.70	5.05	0.65	23.00	871.36	13.39	1.51	36.00	467.41	2.46	0.53
10.50	781.70	7.95	1.01	23.50	859.16	10.69	1.23	36.50	457.26	2.71	0.60
11.00	794.03	8.52	1.06	24.00	845.78	11.97	1.39	37.00	447.64	2.79	0.63
11.50	805.22	9.73	1.19	24.50	831.82	10.43	1.24	37.50	438.60	2.95	0.68
12.00	815.55	11.80	1.43	25.00	817.10	12.25	1.48	38.00	430.15	3.90	0.91
12.50	825.31	12.34	1.47	25.50	801.43	13.12	1.61	38.39	427.72	5.47	1.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-23 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.59	0.36	0.11	13.00	913.35	22.00	2.35	26.00	619.90	2.35	0.38
0.50	398.05	28.70	6.72	13.50	916.07	20.48	2.19	26.50	600.45	5.10	0.84
1.00	473.52	48.63	9.31	14.00	918.79	19.16	2.04	27.00	582.01	8.44	1.43
1.50	527.10	40.55	7.14	14.50	921.39	18.36	1.95	27.50	567.25	8.70	1.51
2.00	571.18	47.47	7.67	15.00	923.73	17.32	1.84	28.00	554.33	5.22	0.93
2.50	610.95	46.90	7.13	15.50	926.06	16.59	1.76	28.50	541.80	7.35	1.34
3.00	647.44	47.31	6.81	16.00	928.40	15.65	1.66	29.00	530.06	7.69	1.43
3.50	679.63	47.12	6.48	16.50	930.83	15.22	1.61	29.50	518.22	7.73	1.47
4.00	708.47	50.18	6.61	17.00	933.30	16.85	1.77	30.00	506.29	5.16	1.01
4.50	734.16	49.49	6.31	17.50	935.77	15.88	1.67	30.50	495.62	5.13	1.02
5.00	757.17	51.98	6.42	18.00	937.98	15.17	1.59	31.00	485.50	6.25	1.27
5.50	778.11	53.04	6.38	18.50	939.11	14.94	1.57	31.50	475.90	2.05	0.43
6.00	797.05	53.30	6.27	19.00	937.58	17.37	1.82	32.00	466.54	4.11	0.87
6.50	815.45	53.30	6.14	19.50	922.98	11.17	1.20	32.50	457.61	4.44	0.96
7.00	832.32	41.83	4.79	20.00	882.88	16.13	1.86	33.00	448.88	3.37	0.75
7.50	845.53	40.42	4.56	20.50	845.60	18.25	2.21	33.50	440.44	2.41	0.54
8.00	856.41	38.64	4.32	21.00	816.32	16.57	2.07	34.00	432.39	1.76	0.41
8.50	867.93	37.02	4.09	21.50	793.50	15.35	1.97	34.50	424.65	1.10	0.26
9.00	878.19	34.06	3.73	22.00	774.94	14.09	1.85	35.00	417.21	0.84	0.20
9.50	884.62	34.73	3.78	22.50	758.55	12.20	1.63	35.50	410.13	0.62	0.15
10.00	890.79	31.96	3.46	23.00	743.81	11.46	1.56	36.00	403.39	0.26	0.06
10.50	895.51	30.84	3.33	23.50	730.33	11.58	1.61	36.50	396.99	0.06	0.01
11.00	899.87	28.18	3.04	24.00	718.14	9.19	1.30	37.00	390.92	0.17	0.04
11.50	903.63	26.52	2.85	24.50	698.12	19.53	2.72	37.50	385.97	1.32	0.34
12.00	907.16	24.99	2.68	25.00	672.00	4.55	0.68	38.00	382.10	13.85	3.50
12.50	910.52	23.13	2.48	25.50	642.94	0.99	0.15	38.39	380.94	16.01	4.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-24 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	326.05	0.00	0.00	13.00	834.27	10.98	1.30	26.00	784.36	0.11	0.01
0.50	328.01	1.06	0.32	13.50	841.85	11.10	1.30	26.50	766.13	1.58	0.21
1.00	338.08	0.77	0.23	14.00	849.42	11.43	1.33	27.00	746.86	2.31	0.31
1.50	358.08	2.63	0.74	14.50	856.54	12.41	1.43	27.50	726.89	4.54	0.63
2.00	385.93	4.98	1.31	15.00	862.49	12.26	1.40	28.00	706.57	9.92	1.42
2.50	416.04	8.29	2.03	15.50	868.45	13.50	1.53	28.50	686.47	6.12	0.90
3.00	446.78	7.03	1.60	16.00	874.40	11.75	1.33	29.00	666.88	4.23	0.64
3.50	477.28	6.43	1.37	16.50	879.52	12.23	1.37	29.50	648.42	4.37	0.68
4.00	507.16	3.51	0.70	17.00	884.36	12.09	1.35	30.00	630.37	8.52	1.37
4.50	536.13	4.88	0.92	17.50	889.19	11.46	1.27	30.50	613.28	8.23	1.36
5.00	564.17	7.52	1.35	18.00	893.92	11.23	1.24	31.00	596.60	4.95	0.84
5.50	590.83	8.28	1.42	18.50	898.21	10.94	1.20	31.50	580.88	9.73	1.70
6.00	616.26	5.71	0.94	19.00	902.33	10.82	1.18	32.00	565.58	5.23	0.93
6.50	640.35	8.80	1.39	19.50	906.08	10.47	1.14	32.50	551.22	5.07	0.93
7.00	663.13	7.48	1.14	20.00	907.95	11.60	1.26	33.00	537.25	4.40	0.82
7.50	684.51	7.36	1.09	20.50	907.50	13.15	1.43	33.50	523.76	5.11	0.99
8.00	704.56	6.41	0.92	21.00	904.89	12.76	1.39	34.00	510.92	4.67	0.92
8.50	723.42	4.47	0.62	21.50	899.88	10.97	1.20	34.50	498.60	4.95	1.00
9.00	740.64	3.79	0.51	22.00	892.40	8.65	0.96	35.00	486.78	4.33	0.90
9.50	755.46	1.11	0.15	22.50	882.99	6.06	0.68	35.50	475.53	4.08	0.87
10.00	769.99	0.24	0.03	23.00	871.87	3.18	0.36	36.00	464.85	3.80	0.82
10.50	782.94	2.61	0.33	23.50	859.59	0.54	0.06	36.50	454.71	2.66	0.59
11.00	795.20	3.35	0.42	24.00	846.10	0.35	0.04	37.00	445.11	3.56	0.81
11.50	806.35	4.70	0.58	24.50	832.02	1.37	0.16	37.50	436.11	3.46	0.80
12.00	816.62	6.93	0.84	25.00	817.17	0.18	0.02	38.00	427.70	4.35	1.03
12.50	826.33	7.72	0.93	25.50	801.39	0.56	0.07	38.39	425.34	5.79	1.38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-25 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.12	0.03	0.01	13.00	897.92	73.33	7.55	26.50	596.14	19.81	3.22
0.50	333.53	0.38	0.11	13.50	902.48	69.47	7.15	27.00	583.29	24.76	4.07
1.00	386.96	32.89	7.83	14.00	906.65	65.20	6.71	27.50	570.51	24.34	4.09
1.50	447.97	38.68	7.95	14.50	910.44	61.31	6.31	28.00	558.22	23.43	4.03
2.00	499.21	51.84	9.41	15.00	913.66	58.19	5.99	28.50	546.43	21.92	3.86
2.50	541.87	66.78	10.97	15.50	916.81	56.34	5.79	29.00	534.99	20.66	3.72
3.00	578.67	106.58	15.55	16.00	919.96	54.19	5.56	29.50	524.49	19.06	3.51
3.50	611.33	99.12	13.95	16.50	922.40	53.45	5.48	30.00	514.32	16.83	3.17
4.00	638.20	86.85	11.98	17.00	922.05	56.00	5.73	30.50	504.14	15.51	2.98
4.50	663.88	86.67	11.55	17.50	921.70	58.75	5.99	31.00	494.85	13.90	2.73
5.00	687.38	91.57	11.76	18.00	921.35	55.90	5.72	31.50	485.59	12.56	2.52
5.50	708.45	108.80	13.31	18.50	901.54	31.31	3.36	32.00	476.45	11.80	2.42
6.00	727.79	121.86	14.34	19.00	863.38	9.97	1.14	32.50	467.80	9.45	1.98
6.50	745.58	110.97	12.96	19.50	836.27	18.28	2.14	33.00	459.15	5.70	1.23
7.00	763.09	108.86	12.48	20.00	813.95	15.80	1.90	33.50	450.74	8.01	1.75
7.50	779.83	108.72	12.24	20.50	794.32	15.83	1.95	34.00	442.92	6.13	1.37
8.00	795.36	101.09	11.28	21.00	777.54	15.21	1.92	34.50	435.46	6.09	1.38
8.50	809.91	96.64	10.66	21.50	762.94	16.61	2.13	35.00	428.37	4.08	0.94
9.00	823.56	92.89	10.14	22.00	749.68	16.67	2.17	35.50	421.64	4.71	1.11
9.50	836.34	88.81	9.60	22.50	738.09	16.16	2.14	36.00	415.26	3.59	0.86
10.00	849.00	88.75	9.46	23.00	726.84	16.11	2.17	36.50	409.39	1.46	0.36
10.50	860.60	93.45	9.79	24.00	697.48	30.47	4.19	37.00	403.94	0.01	0.00
11.00	871.86	92.69	9.61	24.50	671.95	24.90	3.57	37.50	398.90	1.05	0.26
11.50	880.06	95.59	9.80	25.00	648.25	26.10	3.87	38.50	390.05	7.00	1.76
12.00	887.55	89.10	9.12	25.50	628.74	25.91	3.96	39.00	386.42	10.83	2.73
12.50	892.83	79.32	8.16	26.00	611.43	22.62	3.57				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-26 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	313.95	0.00	0.00	13.00	795.01	8.24	1.03	26.50	735.99	6.16	0.83
0.50	314.21	0.06	0.02	13.50	806.10	5.45	0.67	27.00	718.93	11.62	1.59
1.00	317.39	1.84	0.58	14.00	816.65	6.20	0.75	27.50	701.77	9.18	1.29
1.50	327.17	0.92	0.28	14.50	826.65	7.00	0.84	28.00	684.72	6.63	0.96
2.00	344.97	1.08	0.31	15.00	834.52	9.93	1.18	28.50	667.84	4.41	0.66
2.50	368.66	0.99	0.27	15.50	842.00	9.45	1.11	29.00	651.34	2.31	0.35
3.00	395.99	1.96	0.49	16.00	849.48	9.37	1.09	29.50	635.94	19.91	3.04
3.50	424.82	2.63	0.62	16.50	856.55	9.00	1.04	30.00	620.92	2.77	0.45
4.00	453.54	3.31	0.72	17.00	862.02	9.43	1.08	30.50	605.89	4.04	0.67
4.50	481.31	3.24	0.67	17.50	867.50	10.05	1.15	31.00	592.15	5.60	0.95
5.00	507.97	4.48	0.87	18.00	872.98	10.17	1.15	31.50	578.45	6.80	1.19
5.50	533.43	2.82	0.53	18.50	877.80	11.05	1.24	32.00	565.00	8.15	1.46
6.00	557.91	2.14	0.38	19.00	881.20	12.05	1.35	32.50	552.57	11.02	2.03
6.50	581.41	6.66	1.16	19.50	882.22	14.73	1.64	33.00	540.14	15.49	2.95
7.00	603.73	6.48	1.08	20.00	880.42	17.93	2.00	33.50	527.97	11.62	2.25
7.50	624.93	6.98	1.13	20.50	876.44	19.91	2.22	34.00	516.44	13.49	2.68
8.00	645.07	7.12	1.12	21.00	870.61	20.34	2.28	34.50	505.30	12.55	2.55
8.50	664.19	5.14	0.78	21.50	863.06	20.59	2.33	35.00	494.55	14.00	2.91
9.00	682.35	4.00	0.59	22.00	853.95	20.00	2.29	35.50	484.20	11.45	2.42
9.50	698.84	2.59	0.37	22.50	843.43	19.22	2.23	36.00	474.23	11.78	2.55
10.00	714.81	2.06	0.29	23.00	832.62	18.13	2.13	36.50	464.82	12.97	2.87
10.50	729.74	0.71	0.10	24.00	809.88	16.47	1.99	37.00	455.89	13.24	2.99
11.00	744.43	2.52	0.34	24.50	797.43	16.22	1.99	37.50	447.41	13.36	3.08
11.50	757.92	2.93	0.39	25.00	783.79	18.26	2.28	38.50	431.81	13.56	3.24
12.00	771.07	4.28	0.55	25.50	769.01	17.94	2.28	39.00	424.72	10.97	2.65
12.50	783.17	5.48	0.69	26.00	752.66	12.79	1.67				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-27 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.68	0.03	0.01	13.00	897.29	59.46	6.21	26.50	595.92	42.23	6.62
0.50	333.67	0.52	0.15	13.50	901.84	56.21	5.87	27.00	583.11	46.24	7.35
1.00	386.96	29.79	7.15	14.00	906.01	53.24	5.55	27.50	570.39	44.26	7.20
1.50	448.10	33.45	6.95	14.50	909.78	50.37	5.25	28.00	558.16	43.49	7.23
2.00	499.50	32.95	6.19	15.00	913.01	48.34	5.03	28.50	546.43	42.12	7.16
2.50	542.28	39.67	6.82	15.50	916.16	46.79	4.86	29.00	535.05	40.80	7.08
3.00	579.10	50.35	8.00	16.00	919.31	45.44	4.71	29.50	524.60	37.45	6.66
3.50	611.72	60.13	8.95	16.50	921.75	45.20	4.67	30.00	514.47	34.58	6.30
4.00	638.55	70.10	9.89	17.00	921.41	47.84	4.94	30.50	504.34	32.51	6.06
4.50	664.15	75.90	10.26	17.50	921.06	50.59	5.21	31.00	495.07	30.28	5.76
5.00	687.57	91.78	11.78	18.00	920.72	49.43	5.10	31.50	485.84	27.91	5.43
5.50	708.55	79.40	10.08	18.50	900.92	29.23	3.14	32.00	476.71	26.04	5.18
6.00	727.81	70.44	8.82	19.00	862.79	11.36	1.30	32.50	468.07	22.88	4.66
6.50	745.51	66.54	8.19	19.50	835.68	22.47	2.62	33.00	459.43	18.22	3.82
7.00	762.93	74.22	8.87	20.00	813.34	22.81	2.73	33.50	451.02	19.93	4.23
7.50	779.60	65.85	7.79	20.50	793.70	24.35	2.98	34.00	443.19	17.06	3.71
8.00	795.07	67.18	7.79	21.00	776.92	25.33	3.16	34.50	435.73	16.22	3.59
8.50	809.55	68.00	7.75	21.50	762.31	27.34	3.46	35.00	428.62	13.93	3.15
9.00	823.14	67.71	7.60	22.00	749.06	28.29	3.64	35.50	421.87	14.08	3.23
9.50	835.88	66.67	7.39	22.50	737.50	27.95	3.65	36.00	415.47	12.38	2.89
10.00	848.50	67.85	7.40	23.00	726.27	28.28	3.75	36.50	409.57	9.48	2.26
10.50	860.07	74.08	7.93	24.00	697.01	47.94	6.44	37.00	404.09	7.46	1.81
11.00	871.31	75.64	7.99	24.50	671.54	40.31	5.66	37.50	399.02	5.63	1.39
11.50	879.48	74.87	7.84	25.00	647.90	44.85	6.47	38.50	390.11	13.84	3.43
12.00	886.95	68.30	7.15	25.50	628.43	46.62	6.91	39.00	386.44	17.71	4.38
12.50	892.21	63.54	6.65	26.00	611.16	44.59	6.80				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-28 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.55	0.00	0.00	13.00	786.02	22.53	2.79	26.50	740.21	11.64	1.55
0.50	314.80	0.15	0.05	13.50	797.18	19.97	2.44	27.00	723.70	16.85	2.28
1.00	317.93	1.88	0.60	14.00	807.82	20.53	2.48	27.50	706.91	14.54	2.02
1.50	327.52	0.53	0.16	14.50	817.93	21.52	2.56	28.00	690.16	11.69	1.67
2.00	344.88	4.37	1.25	15.00	825.98	24.07	2.83	28.50	673.49	9.16	1.34
2.50	367.88	5.47	1.46	15.50	833.64	23.71	2.77	29.00	657.11	7.24	1.09
3.00	394.36	6.99	1.74	16.00	841.31	23.74	2.74	29.50	641.66	4.99	0.77
3.50	422.27	7.78	1.81	16.50	848.57	23.38	2.68	30.00	626.52	2.13	0.34
4.00	450.10	8.55	1.86	17.00	854.28	23.57	2.68	30.50	611.39	0.66	0.11
4.50	477.04	9.01	1.85	17.50	859.99	24.26	2.74	31.00	597.44	0.89	0.15
5.00	502.95	10.50	2.04	18.00	865.71	24.24	2.72	31.50	583.53	2.38	0.41
5.50	527.74	9.61	1.79	18.50	870.77	25.18	2.81	32.00	569.84	3.39	0.60
6.00	551.62	10.03	1.79	19.00	874.47	25.98	2.89	32.50	557.13	6.38	1.16
6.50	574.57	1.78	0.31	19.50	875.88	27.57	3.05	33.00	544.43	10.78	2.02
7.00	596.41	2.44	0.41	20.00	874.64	30.01	3.32	33.50	531.97	6.92	1.32
7.50	617.20	20.75	3.25	20.50	871.35	31.20	3.46	34.00	520.15	8.90	1.74
8.00	637.00	2.85	0.45	21.00	866.32	30.73	3.43	34.50	508.72	8.27	1.65
8.50	655.83	5.52	0.83	21.50	859.66	30.19	3.39	35.00	497.67	9.62	1.97
9.00	673.76	7.19	1.06	22.00	851.48	28.97	3.29	35.50	487.01	7.16	1.49
9.50	690.10	9.05	1.29	22.50	841.83	27.52	3.17	36.00	476.74	7.39	1.57
10.00	705.95	11.60	1.62	23.00	831.87	25.68	2.99	36.50	467.04	8.79	1.92
10.50	720.80	13.15	1.79	24.00	810.73	22.42	2.69	37.00	457.83	9.18	2.05
11.00	735.42	15.23	2.03	24.50	799.01	22.54	2.74	37.50	449.08	9.23	2.10
11.50	748.88	16.67	2.18	25.00	786.09	24.16	2.98	38.50	432.93	9.58	2.26
12.00	762.02	18.03	2.31	25.50	772.01	23.74	2.98	39.00	425.59	7.04	1.68
12.50	774.15	19.50	2.46	26.00	756.29	18.46	2.38				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-29 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.73	0.42	0.14	13.00	897.20	33.85	3.64	26.50	596.75	24.40	3.93
0.50	332.44	1.89	0.57	13.50	901.78	31.17	3.34	27.00	583.97	28.78	4.70
1.00	385.52	31.23	7.49	14.00	905.96	28.89	3.09	27.50	571.24	28.51	4.75
1.50	446.28	24.67	5.24	14.50	909.76	26.49	2.83	28.00	559.00	27.75	4.73
2.00	497.52	23.73	4.55	15.00	913.00	25.25	2.69	28.50	547.27	26.88	4.68
2.50	540.33	22.02	3.92	15.50	916.16	24.09	2.56	29.00	535.88	26.07	4.64
3.00	577.34	24.61	4.09	16.00	919.32	23.13	2.45	29.50	525.43	24.82	4.51
3.50	610.08	26.57	4.17	16.50	921.77	23.48	2.48	30.00	515.29	22.66	4.21
4.00	637.30	29.75	4.46	17.00	921.44	26.41	2.79	30.50	505.16	21.39	4.06
4.50	663.01	30.74	4.43	17.50	921.10	29.05	3.06	31.00	495.89	19.96	3.87
5.00	686.54	40.51	5.57	18.00	920.77	28.88	3.04	31.50	486.65	18.70	3.70
5.50	707.64	43.91	5.84	18.50	901.00	8.85	0.97	32.00	477.53	17.32	3.50
6.00	727.01	39.94	5.21	19.00	862.94	10.69	1.25	32.50	468.88	14.57	3.01
6.50	744.82	24.13	3.14	19.50	835.94	0.51	0.06	33.00	460.24	10.71	2.27
7.00	762.33	30.52	3.85	20.00	813.68	1.57	0.19	33.50	451.83	12.92	2.78
7.50	779.07	35.98	4.41	20.50	794.10	4.05	0.51	34.00	444.01	10.74	2.36
8.00	794.61	36.44	4.38	21.00	777.36	6.19	0.79	34.50	436.54	10.11	2.26
8.50	809.16	35.59	4.21	21.50	762.79	9.16	1.19	35.00	429.42	8.33	1.90
9.00	822.81	31.74	3.71	22.00	749.55	11.50	1.51	35.50	422.66	8.59	1.99
9.50	835.58	34.97	4.02	22.50	737.98	12.77	1.70	36.00	416.25	7.20	1.70
10.00	848.24	38.01	4.29	23.00	726.76	11.09	1.50	36.50	410.34	4.81	1.16
10.50	859.84	46.11	5.09	24.00	697.51	31.54	4.33	37.00	404.84	3.11	0.76
11.00	871.11	45.34	4.95	24.50	672.10	20.85	3.01	37.50	399.75	1.50	0.37
11.50	879.32	44.93	4.86	25.00	648.55	24.90	3.70	38.50	390.79	9.66	2.41
12.00	886.81	42.94	4.62	25.50	629.16	27.39	4.17	39.00	387.09	14.16	3.53
12.50	892.10	36.65	3.95	26.00	611.94	27.01	4.23				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-30 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.45	0.00	0.00	13.00	787.49	16.26	2.02	26.50	739.01	2.04	0.28
0.50	312.75	0.10	0.03	13.50	798.64	13.61	1.68	27.00	722.46	7.09	0.97
1.00	316.15	1.90	0.60	14.00	809.27	4.58	0.56	27.50	705.70	5.25	0.74
1.50	326.16	0.79	0.24	14.50	819.36	14.99	1.80	28.00	688.99	3.06	0.44
2.00	343.95	5.00	1.43	15.00	827.38	18.07	2.14	28.50	672.39	1.06	0.16
2.50	367.32	6.93	1.85	15.50	835.01	17.94	2.10	29.00	656.08	0.63	0.10
3.00	394.08	8.37	2.08	16.00	842.65	18.00	2.09	29.50	640.72	2.47	0.39
3.50	422.21	9.14	2.12	16.50	849.88	17.67	2.04	30.00	625.69	4.84	0.78
4.00	450.23	9.62	2.09	17.00	855.55	18.20	2.08	30.50	610.66	5.71	0.94
4.50	477.33	9.72	2.00	17.50	861.21	18.84	2.14	31.00	596.81	6.66	1.13
5.00	503.39	11.26	2.19	18.00	866.88	18.87	2.13	31.50	583.00	7.85	1.36
5.50	528.31	9.44	1.76	18.50	871.88	19.77	2.22	32.00	569.42	8.67	1.55
6.00	552.31	9.44	1.68	19.00	875.46	21.09	2.35	32.50	556.81	10.96	2.01
6.50	575.38	1.27	0.22	19.50	876.70	22.35	2.49	33.00	544.20	15.15	2.86
7.00	597.32	1.43	0.24	20.00	875.24	24.01	2.67	33.50	531.84	11.19	2.15
7.50	618.21	0.94	0.15	20.50	871.72	24.13	2.69	34.00	520.11	12.66	2.49
8.00	638.09	0.26	0.04	21.00	866.46	22.59	2.54	34.50	508.76	11.71	2.36
8.50	656.99	2.36	0.36	21.50	859.59	21.36	2.42	35.00	497.80	12.65	2.61
9.00	674.99	3.76	0.55	22.00	851.22	19.53	2.24	35.50	487.22	10.27	2.15
9.50	691.39	5.06	0.73	22.50	841.43	17.82	2.07	36.00	477.02	10.47	2.24
10.00	707.28	6.47	0.91	23.00	831.35	15.80	1.86	36.50	467.39	11.44	2.51
10.50	722.17	8.18	1.12	24.00	809.99	12.66	1.54	37.00	458.24	11.69	2.62
11.00	736.83	9.32	1.25	24.50	798.16	12.99	1.60	37.50	449.54	11.59	2.65
11.50	750.32	10.63	1.40	25.00	785.12	14.63	1.83	38.50	433.49	11.74	2.78
12.00	763.48	11.97	1.54	25.50	770.93	13.92	1.77	39.00	426.19	8.84	2.12
12.50	775.61	13.24	1.68	26.00	755.14	8.61	1.13				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-31 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.97	0.58	0.19	13.00	903.57	49.08	5.15	26.50	582.25	44.10	8.19
0.50	339.50	4.45	1.33	13.50	907.61	46.24	4.85	27.00	569.80	39.15	7.38
1.00	403.07	35.88	8.17	14.00	911.30	42.75	4.48	27.50	557.32	38.07	7.33
1.50	469.45	50.50	9.71	14.50	914.64	39.81	4.17	28.00	545.30	36.55	7.19
2.00	521.35	57.50	9.93	15.00	917.59	37.36	3.91	28.50	533.77	35.42	7.11
2.50	563.38	66.37	10.54	15.50	920.50	34.85	3.65	29.00	522.67	33.92	6.94
3.00	599.26	68.89	10.31	16.00	923.41	33.24	3.47	29.50	512.45	33.20	6.93
3.50	630.54	81.71	11.47	16.50	925.57	32.68	3.41	30.00	502.54	32.69	6.96
4.00	656.79	83.36	11.26	17.00	924.84	35.31	3.68	30.50	492.62	31.17	6.76
4.50	681.00	80.95	10.62	17.50	924.11	37.34	3.88	31.00	483.61	30.36	6.70
5.00	703.36	81.29	10.36	18.00	923.37	36.78	3.83	31.50	474.62	29.37	6.60
5.50	723.36	80.79	10.05	18.50	900.90	8.65	0.95	32.00	465.75	28.50	6.52
6.00	741.66	82.29	9.99	19.00	858.42	36.27	4.41	32.50	457.34	28.09	6.54
6.50	758.45	77.50	9.27	19.50	829.13	30.68	3.84	33.00	448.93	29.18	6.95
7.00	775.19	79.36	9.29	20.00	806.17	37.02	4.81	33.50	440.77	25.62	6.17
7.50	791.29	77.36	8.91	20.50	786.04	38.99	5.22	34.00	433.25	25.20	6.17
8.00	806.10	76.65	8.68	21.00	768.97	40.22	5.52	34.50	426.11	23.96	5.96
8.50	820.01	75.34	8.42	21.50	754.31	39.66	5.55	35.00	419.35	23.40	5.91
9.00	833.20	72.45	8.00	22.00	741.08	39.63	5.65	35.50	412.98	21.63	5.53
9.50	845.56	69.89	7.63	22.50	729.53	40.28	5.84	36.00	406.99	21.04	5.45
10.00	857.77	66.98	7.24	23.00	718.33	40.38	5.96	36.50	401.50	21.55	5.67
10.50	868.97	66.18	7.08	24.00	687.87	10.98	1.57	37.00	396.46	21.51	5.74
11.00	879.83	64.22	6.80	24.50	660.07	40.22	6.49	37.50	391.85	21.40	5.78
11.50	887.47	63.48	6.67	25.00	634.94	42.09	7.10	38.50	383.89	6.14	1.63
12.00	894.40	57.15	6.01	25.50	614.99	41.74	7.28	39.00	380.77	0.68	0.18
12.50	899.07	52.38	5.51	26.00	597.46	43.11	7.78				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-32 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.65	0.00	0.00	13.00	789.07	29.28	3.58	26.50	738.20	16.95	2.35
0.50	312.95	0.10	0.03	13.50	800.18	26.47	3.20	27.00	721.50	12.15	1.71
1.00	316.35	1.90	0.61	14.00	810.76	26.89	3.21	27.50	704.58	14.23	2.06
1.50	326.46	2.89	0.88	14.50	820.81	26.14	3.09	28.00	687.72	16.77	2.50
2.00	344.47	10.48	2.95	15.00	828.78	27.57	3.22	28.50	670.98	18.93	2.90
2.50	368.13	14.72	3.85	15.50	836.36	27.09	3.14	29.00	654.55	20.10	3.17
3.00	395.18	17.97	4.35	16.00	843.95	26.60	3.06	29.50	639.10	21.35	3.46
3.50	423.58	20.47	4.61	16.50	851.14	25.51	2.91	30.00	623.98	23.13	3.85
4.00	451.80	21.95	4.63	17.00	856.76	25.49	2.89	30.50	608.86	23.81	4.07
4.50	479.05	23.30	4.64	17.50	862.38	25.47	2.87	31.00	594.95	24.40	4.28
5.00	505.21	25.34	4.78	18.00	868.00	25.15	2.82	31.50	581.08	24.93	4.48
5.50	530.21	24.44	4.41	18.50	872.95	25.20	2.81	32.00	567.45	25.00	4.61
6.00	554.26	25.09	4.33	19.00	876.48	25.37	2.81	32.50	554.81	26.66	5.05
6.50	577.37	16.78	2.82	19.50	877.66	26.19	2.90	33.00	542.16	29.81	5.82
7.00	599.32	18.13	2.94	20.00	876.13	25.62	2.84	33.50	529.78	25.43	5.04
7.50	620.21	18.54	2.90	20.50	872.52	23.23	2.59	34.00	518.03	25.98	5.28
8.00	640.07	18.18	2.76	21.00	867.15	19.10	2.16	34.50	506.67	24.62	5.11
8.50	658.95	19.70	2.90	21.50	860.15	15.90	1.82	35.00	495.70	24.25	5.14
9.00	676.92	20.83	2.98	22.00	851.65	11.60	1.34	35.50	485.12	21.67	4.68
9.50	693.27	21.98	3.07	22.50	841.72	7.83	0.92	36.00	474.93	20.88	4.60
10.00	709.13	22.22	3.04	23.00	831.51	4.14	0.50	36.50	465.32	21.27	4.79
10.50	723.98	24.37	3.26	24.00	809.89	1.94	0.24	37.00	456.19	20.84	4.79
11.00	738.59	25.06	3.28	24.50	797.94	2.49	0.31	37.50	447.52	20.27	4.74
11.50	752.04	25.81	3.32	25.00	784.76	1.51	0.19	38.50	431.55	18.90	4.58
12.00	765.15	26.20	3.31	25.50	770.44	3.09	0.40	39.00	424.29	15.54	3.80
12.50	777.24	27.11	3.37	26.00	754.49	9.54	1.28				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-33 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.14	4.01	1.26	15.50	888.8	50.65	5.39	31.00	449.85	19.60	4.56
0.50	356.16	55.19	13.42	16.00	864.29	33.96	3.78	31.50	442.39	23.74	5.67
1.00	408.51	82.24	16.76	16.50	835.8	29.55	3.41	32.00	435.2	22.45	5.44
1.50	455.96	88.09	16.19	17.00	813.02	24.23	2.89	32.50	428.3	20.65	5.07
2.00	499.19	101.96	16.96	17.50	794.13	24.52	3.00	33.00	421.67	21.02	5.25
2.50	537.67	119.48	18.18	18.00	778.01	19.64	2.46	33.50	415.31	20.56	5.21
3.00	571.64	135.61	19.17	18.50	763.95	20.30	2.59	34.00	409.22	20.37	5.24
3.50	601.58	143.47	19.26	19.00	751.31	19.64	2.55	34.50	403.38	19.23	5.01
4.00	629.27	139.68	18.17	19.50	738	27.05	3.54	35.00	397.82	20.67	5.48
4.50	655.41	137.44	17.33	20.00	717.13	24.02	3.24	35.50	392.52	17.67	4.71
5.00	679.31	137.44	16.83	20.50	693.64	17.51	2.46	35.67	390.57	17.32	4.64
5.50	702.86	137.79	16.39	21.00	674.13	14.62	2.12				
6.00	724.01	143.94	16.58	21.50	657.09	16.26	2.41				
6.50	744.81	132.44	15.10	22.00	641.55	9.70	1.49				
7.00	763.8	123.05	13.87	22.50	627.57	6.58	1.04				
7.50	781.89	119.66	13.27	23.00	613.64	7.81	1.26				
8.00	797.25	114.50	12.56	23.50	600.43	4.02	0.67				
8.50	811.88	110.67	12.00	24.00	587.32	0.47	0.08				
9.00	825.44	108.01	11.57	24.50	575.83	4.78	0.84				
9.50	836.96	107.29	11.36	25.00	564.34	4.79	0.86				
10.00	846.94	102.41	10.79	25.50	552.85	9.90	1.82				
10.50	854.9	99.25	10.40	26.00	541.44	11.39	2.15				
11.00	862.11	93.54	9.79	26.50	531.09	10.04	1.93				
11.50	868.73	89.42	9.33	27.00	520.75	12.50	2.46				
12.00	875.19	80.26	8.40	27.50	510.41	13.16	2.65				
12.50	880.02	79.33	8.27	28.00	501.1	15.35	3.16				
13.00	884.86	76.19	7.93	28.50	491.8	19.25	4.07				
13.50	889.69	69.56	7.25	29.00	482.5	20.15	4.36				
14.00	893.62	66.23	6.90	29.50	474.17	20.02	4.41				
14.50	895.97	68.88	7.14	30.00	465.9	20.95	4.71				
15.00	896.88	61.37	6.40	30.50	457.63	22.18	5.09				



ตารางที่ ค-34 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	0.00	0.00	15.50	858.29	40.96	4.55	31.00	489.13	25.68	5.54
0.50	316.39	4.36	1.36	16.00	862.95	41.40	4.58	31.50	479.24	23.19	5.08
1.00	326.28	2.67	0.81	16.50	864.94	44.81	4.93	32.00	469.71	21.86	4.88
1.50	346.49	9.36	2.63	17.00	863.57	41.18	4.55	32.50	460.55	23.40	5.35
2.00	373.02	13.13	3.40	17.50	859.82	38.33	4.27	33.00	451.76	23.91	5.59
2.50	402.96	12.89	3.10	18.00	853.73	38.72	4.34	33.50	443.34	23.79	5.67
3.00	434.21	17.74	3.93	18.50	845.4	34.75	3.95	34.00	435.38	22.43	5.43
3.50	465.29	16.36	3.40	19.00	835.32	32.73	3.77	34.50	427.83	22.38	5.52
4.00	495.24	17.41	3.40	19.50	824.08	29.97	3.51	35.00	420.69	19.14	4.77
4.50	523.87	19.68	3.62	20.00	811.54	27.71	3.30	35.50	413.95	20.90	5.32
5.00	549.81	24.74	4.31	20.50	797.57	31.48	3.80	35.67	411.38	20.23	5.17
5.50	575.16	30.29	5.00	21.00	781.7	30.75	3.78				
6.00	598.6	31.45	4.99	21.50	764.67	24.98	3.16				
6.50	621.71	34.24	5.22	22.00	746.89	23.46	3.05				
7.00	642.98	39.97	5.85	22.50	728.85	22.00	2.93				
7.50	663.75	37.80	5.39	23.00	710.83	16.12	2.22				
8.00	683.03	34.82	4.85	23.50	693.18	12.77	1.81				
8.50	701.53	36.12	4.90	24.00	675.63	4.22	0.62				
9.00	718.91	38.64	5.10	24.50	659.79	1.14	0.17				
9.50	735.19	42.16	5.42	25.00	643.96	5.51	0.86				
10.00	750.64	44.91	5.65	25.50	628.13	7.88	1.27				
10.50	764.65	43.60	5.39	26.00	612.4	8.15	1.35				
11.00	778.13	44.42	5.40	26.50	598.21	13.36	2.28				
11.50	790.06	42.39	5.09	27.00	584.02	15.57	2.74				
12.00	801.66	45.79	5.40	27.50	569.84	15.69	2.83				
12.50	810.68	45.97	5.37	28.00	557.38	19.63	3.65				
13.00	819.69	44.46	5.14	28.50	544.91	17.16	3.25				
13.50	828.7	44.75	5.12	29.00	532.44	19.89	3.88				
14.00	837.17	45.48	5.15	29.50	521.39	20.34	4.06				
14.50	844.7	42.15	4.75	30.00	510.42	21.97	4.50				
15.00	852.01	41.44	4.64	30.50	499.46	21.21	4.43				

ตารางที่ ค-35 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.15	5.6	1.75	15.50	891.63	39.82	4.28	31.00	435.95	10.8	2.42
0.50	375.08	13.87	3.57	16.00	861.88	35.27	3.93	31.50	429.11	8.34	1.91
1.00	438.3	30.25	6.46	16.50	828.23	35.52	4.11	32.00	422.56	9.69	2.24
1.50	489.83	32.22	6.17	17.00	802.34	34.81	4.16	32.50	416.29	4.96	1.18
2.00	534.37	39.38	6.86	17.50	781.65	38.3	4.67	33.00	410.29	7.26	1.74
2.50	572.45	40	6.53	18.00	764.53	40.92	5.08	33.50	404.58	6.07	1.48
3.00	605.05	41.3	6.39	18.50	749.89	38.86	4.93	34.00	399.07	4.98	1.23
3.50	633.08	40.77	6.05	19.00	736.75	43.3	5.55	34.50	393.78	3.97	1.00
4.00	658.87	41.18	5.88	19.50	723.94	50.71	6.55	35.00	388.75	2.9	0.74
4.50	683.3	42.95	5.91	20.00	698.74	55.11	7.31	35.50	383.97	1.98	0.51
5.00	705.78	46.57	6.19	20.50	672.25	55.6	7.64	35.67	382.24	0.49	0.13
5.50	727.96	50.59	6.50	21.00	651.44	55.11	7.80				
6.00	747.77	56.48	7.02	21.50	633.86	55.29	8.02				
6.50	767.24	57.21	6.94	22.00	618.18	54.67	8.13				
7.00	785.12	62.13	7.33	22.50	604.4	51.85	7.90				
7.50	802.04	68.01	7.82	23.00	590.67	48.78	7.63				
8.00	816.06	63.09	7.18	23.50	577.76	45.69	7.33				
8.50	829.51	62.54	7.01	24.00	564.96	45.59	7.47				
9.00	842.12	62.83	6.94	24.50	554.02	37.73	6.38				
9.50	852.45	65.4	7.13	25.00	543.07	36.58	6.31				
10.00	861.05	63.4	6.86	25.50	532.12	32.73	5.79				
10.50	867.89	58.06	6.27	26.00	521.26	31.19	5.65				
11.00	874.07	55.68	5.99	26.50	511.54	32.11	5.91				
11.50	879.68	53.47	5.73	27.00	501.83	25.82	4.89				
12.00	885.15	50.7	5.42	27.50	492.12	27.63	5.32				
12.50	889.29	52.16	5.54	28.00	483.45	25.2	4.95				
13.00	893.43	50.22	5.32	28.50	474.77	20.68	4.17				
13.50	897.56	47.69	5.05	29.00	466.1	19.65	4.05				
14.00	900.75	43.3	4.59	29.50	458.39	14.86	3.14				
14.50	902.28	45.47	4.80	30.00	450.75	16.7	3.57				
15.00	902.15	45.1	4.76	30.50	443.1	14.35	3.14				

ตารางที่ ค-36 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	2	0.63	15.50	844.79	53.96	6.00	31.00	501.79	27.44	5.78
0.50	316.38	7.47	2.31	16.00	849.93	52.82	5.85	31.50	491.61	23.56	5.03
1.00	325.83	9.32	2.78	16.50	852.48	50.87	5.63	32.00	481.78	25.63	5.62
1.50	344.73	24.02	6.51	17.00	851.89	51.96	5.75	32.50	472.3	26.85	6.03
2.00	369.42	31.53	7.86	17.50	849.12	44.83	5.01	33.00	463.16	26.01	5.95
2.50	397.28	34.67	8.03	18.00	844.27	42.58	4.80	33.50	454.37	25.72	6.00
3.00	426.46	42.69	9.10	18.50	837.43	35.32	4.05	34.00	446.02	25.17	5.98
3.50	455.62	39.73	8.02	19.00	829.05	28.9	3.37	34.50	438.08	25.33	6.14
4.00	483.91	40.34	7.69	19.50	819.61	28.34	3.34	35.00	430.53	22.68	5.56
4.50	511.11	42.04	7.60	20.00	808.93	23.92	2.87	35.50	423.36	24.71	6.20
5.00	536.08	45.87	7.88	20.50	796.78	26.77	3.25	35.67	420.66	23.81	6.00
5.50	560.58	50.27	8.23	21.00	782.86	23.99	2.97				
6.00	583.4	51.75	8.15	21.50	767.58	15.27	1.95				
6.50	605.94	54.51	8.25	22.00	751.62	15.03	1.96				
7.00	626.83	61.92	8.99	22.50	735.16	11.39	1.53				
7.50	647.27	59.98	8.48	23.00	718.7	4.35	0.60				
8.00	666.33	55.32	7.67	23.50	702.3	2.65	0.38				
8.50	684.68	57.37	7.73	24.00	685.97	5.42	0.80				
9.00	701.98	60.57	7.94	24.50	670.77	6.92	1.04				
9.50	718.25	64.7	8.26	25.00	655.57	13.02	2.03				
10.00	733.33	63.82	8.01	25.50	640.38	11.43	1.82				
10.50	747.86	62.39	7.70	26.00	625.26	13.01	2.12				
11.00	761.48	62.17	7.55	26.50	611.32	19.27	3.25				
11.50	773.63	61.62	7.38	27.00	597.38	19.03	3.29				
12.00	785.48	65.47	7.69	27.50	583.44	21.59	3.84				
12.50	794.85	62.5	7.29	28.00	570.94	22.79	4.16				
13.00	804.22	61.63	7.12	28.50	558.44	20.39	3.79				
13.50	813.59	63.06	7.19	29.00	545.94	21.29	4.06				
14.00	822.43	63.22	7.14	29.50	534.7	23.15	4.53				
14.50	830.36	57.49	6.48	30.00	523.52	24.97	5.01				
15.00	838.08	55.37	6.20	30.50	512.35	24.5	5.02				

ตารางที่ ค-37 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.14	2.61	0.82	15.50	889.49	33.16	3.59	31.00	449.08	7.53	1.71
0.50	357.81	34.64	8.83	16.00	864.1	16.45	1.87	31.50	441.87	5.22	1.20
1.00	412.24	35.51	7.93	16.50	834.61	7.34	0.87	32.00	434.91	5.76	1.34
1.50	461.06	41.99	8.35	17.00	811.07	6.78	0.83	32.50	428.23	9.48	2.26
2.00	505.2	50.85	9.14	17.50	791.62	5.33	0.67	33.00	421.81	7.36	1.78
2.50	544.21	52.04	8.73	18.00	775.07	10.48	1.33	33.50	415.66	7.81	1.91
3.00	578.37	55.48	8.75	18.50	760.69	6.36	0.83	34.00	409.74	8.09	2.01
3.50	608.27	57.48	8.63	19.00	747.78	8.67	1.15	34.50	404.06	8.71	2.20
4.00	635.78	60.07	8.63	19.50	735.22	21.13	2.79	35.00	398.64	7.49	1.91
4.50	661.68	64.27	8.85	20.00	712.85	16.5	2.26	35.50	393.47	10.12	2.64
5.00	685.28	70.77	9.36	20.50	688.8	17.35	2.46	35.67	391.58	11.03	2.90
5.50	708.53	77.62	9.87	21.00	668.98	16.97	2.47				
6.00	729.39	81.96	10.10	21.50	651.77	12.98	1.95				
6.50	749.89	82.76	9.94	22.00	636.18	16.97	2.60				
7.00	768.63	92.02	10.69	22.50	622.28	15.87	2.49				
7.50	786.46	91.49	10.42	23.00	608.44	11.01	1.78				
8.00	801.55	81.7	9.25	23.50	595.4	10.95	1.81				
8.50	815.91	79.14	8.84	24.00	582.46	10.79	1.82				
9.00	829.24	77.51	8.55	24.50	571.26	6.99	1.21				
9.50	840.51	78.04	8.50	25.00	560.05	3.8	0.67				
10.00	850.21	69.64	7.57	25.50	548.45	5.4	0.97				
10.50	857.91	60.24	6.56	26.00	537.72	5.03	0.93				
11.00	864.86	56.09	6.09	26.50	527.69	2.76	0.52				
11.50	871.24	52.41	5.67	27.00	517.66	0.19	0.04				
12.00	877.47	53.28	5.72	27.50	507.63	0.72	0.14				
12.50	882.12	49.73	5.34	28.00	498.64	0.11	0.02				
13.00	886.78	46.67	5.00	28.50	489.64	0.61	0.12				
13.50	891.43	46.32	4.94	29.00	480.64	0.21	0.04				
14.00	895.17	43.48	4.63	29.50	472.6	3.55	0.76				
14.50	897.33	40.72	4.34	30.00	464.6	2.65	0.57				
15.00	898.01	39.34	4.20	30.50	456.61	2.76	0.61				

ตารางที่ ค-38 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	3.2	1.01	15.50	848.57	42.68	4.79	31.00	500.78	25.63	5.39
0.50	316.58	3.17	0.99	16.00	853.39	38.26	4.29	31.50	490.8	26.55	5.72
1.00	326.85	8.3	2.48	16.50	855.44	39.11	4.37	32.00	481.15	28.7	6.34
1.50	346.61	20.54	5.59	17.00	854.2	38.55	4.32	32.50	471.84	24.39	5.45
2.00	371.91	28.84	7.20	17.50	850.74	33.51	3.79	33.00	462.87	27.42	6.30
2.50	400.2	35.05	8.05	18.00	845.19	24.76	2.85	33.50	454.24	26.79	6.27
3.00	429.69	39.36	8.39	18.50	837.68	22.97	2.67	34.00	446.04	26.29	6.26
3.50	459.09	38.16	7.67	19.00	828.71	13.94	1.65	34.50	438.25	25.4	6.15
4.00	487.56	38.39	7.30	19.50	818.76	11.09	1.34	35.00	430.83	25.28	6.23
4.50	514.94	39.61	7.14	20.00	807.65	9.9	1.21	35.50	423.78	23.33	5.83
5.00	540.08	43.17	7.40	20.50	795.03	10.42	1.29	35.67	421.12	20.67	5.16
5.50	564.73	47.12	7.70	21.00	780.53	8.02	1.02				
6.00	587.71	47.04	7.41	21.50	764.94	5.21	0.68				
6.50	610.39	49.86	7.55	22.00	748.65	1.3	0.17				
7.00	631.42	47.23	6.96	22.50	732.03	4.78	0.66				
7.50	651.98	45.67	6.55	23.00	715.42	4.77	0.67				
8.00	671.12	40.03	5.63	23.50	698.99	7.24	1.05				
8.50	689.54	41.41	5.67	24.00	682.64	17.39	2.61				
9.00	706.89	43.76	5.83	24.50	667.55	16.1	2.47				
9.50	723.18	47.27	6.14	25.00	652.47	18.22	2.87				
10.00	738.66	46.69	5.95	25.50	637.38	19.63	3.18				
10.50	752.75	51.5	6.40	26.00	622.38	20.93	3.48				
11.00	766.32	50.73	6.21	26.50	608.61	24.66	4.22				
11.50	778.4	50.35	6.08	27.00	594.85	22.1	3.86				
12.00	790.16	47.99	5.73	27.50	581.09	26.04	4.69				
12.50	799.43	46.72	5.52	28.00	568.78	27.63	5.11				
13.00	808.69	46.76	5.47	28.50	556.48	26.83	5.07				
13.50	817.95	44.7	5.18	29.00	544.17	27.52	5.33				
14.00	826.67	46.48	5.32	29.50	533.12	25.07	4.93				
14.50	834.47	45.68	5.19	30.00	522.15	29.5	5.99				
15.00	842.05	42.1	4.76	30.50	511.17	29.12	6.04				



ตารางที่ ค-39 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.17	0.38	0.12	15.50	895.43	29.82	3.22	31.00	425	5.95	1.42
0.50	384.31	16.44	4.10	16.00	863.49	4.46	0.51	31.50	418.44	4.49	1.08
1.00	453.63	41.62	8.40	16.50	827.19	2.64	0.32	32.00	412.18	8.73	2.16
1.50	507.35	58.9	10.40	17.00	799.46	3.19	0.40	32.50	406.2	6.75	1.69
2.00	552.63	64.22	10.41	17.50	777.69	1.66	0.21	33.00	400.53	9.58	2.45
2.50	590.62	66.73	10.15	18.00	759.95	5.6	0.73	33.50	395.14	9.99	2.59
3.00	622.68	74.17	10.64	18.50	744.89	5.96	0.79	34.00	389.95	10.2	2.69
3.50	649.93	70.02	9.73	19.00	731.26	3.29	0.45	34.50	384.98	10.33	2.76
4.00	674.9	68.65	9.23	19.50	717.94	20.21	2.74	35.00	380.27	9.32	2.51
4.50	698.6	68.55	8.94	20.00	690.79	16.46	2.33	35.50	375.82	9.97	2.73
5.00	720.44	70.21	8.88	20.50	662.3	19.45	2.85	35.67	374.2	8.05	2.20
5.50	742	72.25	8.87	21.00	640.47	21.38	3.23				
6.00	761.2	71.85	8.62	21.50	622.28	20.37	3.17				
6.50	780.06	71.29	8.37	22.00	606.22	21.83	3.48				
7.00	797.42	71.83	8.26	22.50	592.23	21.12	3.44				
7.50	813.79	65.96	7.50	23.00	578.29	19.76	3.30				
8.00	827.18	61.97	6.97	23.50	565.21	19.94	3.41				
8.50	840.08	60.07	6.67	24.00	552.27	13.48	2.38				
9.00	852.26	58.79	6.45	24.50	541.33	14.72	2.65				
9.50	862.04	60.01	6.51	25.00	530.39	10.16	1.88				
10.00	869.97	52.38	5.68	25.50	519.45	11.1	2.09				
10.50	876.33	49.12	5.31	26.00	508.59	9.66	1.86				
11.00	882.1	45.05	4.86	26.50	498.98	3.17	0.63				
11.50	887.21	41.44	4.46	27.00	489.38	5.07	1.03				
12.00	892.17	41.38	4.43	27.50	479.77	0.18	0.04				
12.50	895.96	35.39	3.80	28.00	471.26	1.41	0.30				
13.00	899.74	33.31	3.57	28.50	462.75	0.7	0.15				
13.50	903.53	32.72	3.49	29.00	454.23	0.78	0.17				
14.00	906.35	34.9	3.71	29.50	446.75	0.9	0.20				
14.50	907.49	33.06	3.51	30.00	439.33	5.58	1.29				
15.00	906.89	30.96	3.30	30.50	431.91	5.06	1.19				

ตารางที่ ค-40 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code A

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	315.05	5	1.56	15.50	854.41	33.64	3.79	31.00	490.72	24.47	5.25
0.50	316.65	0.8	0.25	16.00	858.95	30.9	3.47	31.50	480.69	28.24	6.24
1.00	327.41	3.54	1.07	16.50	860.66	34.19	3.82	32.00	471.03	26.18	5.89
1.50	348.27	2.68	0.76	17.00	859.02	32.13	3.61	32.50	461.72	24.97	5.72
2.00	374.97	8.08	2.11	17.50	855.08	33.27	3.75	33.00	452.79	24.64	5.75
2.50	404.7	14.55	3.47	18.00	849	25.05	2.87	33.50	444.22	23.97	5.70
3.00	435.49	17.66	3.90	18.50	840.88	24.87	2.87	34.00	436.11	23.46	5.69
3.50	465.98	16.67	3.45	19.00	831.25	21	2.46	34.50	428.43	22.28	5.49
4.00	495.33	17.72	3.45	19.50	820.62	15.13	1.81	35.00	421.15	23.3	5.86
4.50	523.36	20.09	3.70	20.00	808.78	15.47	1.88	35.50	414.28	20.13	5.11
5.00	548.8	25.05	4.37	20.50	795.41	13.04	1.61	35.67	411.67	19.92	5.08
5.50	573.69	30.56	5.06	21.00	780.1	11.65	1.47				
6.00	596.76	32.79	5.21	21.50	763.66	13.69	1.76				
6.50	619.52	33.73	5.16	22.00	746.49	6.86	0.91				
7.00	640.52	28.93	4.32	22.50	729.02	3.23	0.44				
7.50	661.03	31.92	4.61	23.00	711.57	3.48	0.49				
8.00	680.09	26.06	3.69	23.50	694.35	1.1	0.16				
8.50	698.38	26.47	3.65	24.00	677.23	8.28	1.24				
9.00	715.6	28.05	3.77	24.50	661.58	12.63	1.95				
9.50	731.72	30.63	4.02	25.00	645.92	12.47	1.97				
10.00	747.03	32.92	4.22	25.50	633.27	20.72	3.38				
10.50	760.93	36.82	4.62	26.00	614.71	19.46	3.27				
11.00	774.29	37.16	4.58	26.50	600.54	18.39	3.16				
11.50	786.15	38	4.61	27.00	586.37	20.62	3.64				
12.00	797.69	33.36	4.01	27.50	572.21	20.66	3.75				
12.50	806.72	37.33	4.42	28.00	559.66	23.11	4.31				
13.00	815.74	37.61	4.41	28.50	547.11	26.86	5.16				
13.50	824.76	33.79	3.94	29.00	534.56	27.11	5.34				
14.00	833.25	32.1	3.71	29.50	523.38	26.43	5.32				
14.50	840.81	34.94	3.99	30.00	512.28	26.93	5.55				
15.00	848.15	33.7	3.82	30.50	501.18	28.03	5.92				

ตารางที่ ค-41 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นมวลกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	0.03	0.01	18.00	933.29	60.06	6.05	36.00	690.72	2.47	0.36
0.50	354.67	51.78	12.74	18.50	936.07	58.78	5.91	36.50	672.59	3.14	0.47
1.00	405.02	101.53	20.04	19.00	938.68	56.37	5.67	37.00	656.34	3.09	0.47
1.50	454.28	113.97	20.06	19.50	941.06	54.49	5.47	37.50	641.80	5.95	0.94
2.00	497.97	136.48	21.51	20.00	943.16	52.19	5.24	38.00	627.38	5.63	0.91
2.50	537.94	142.21	20.91	20.50	945.03	50.22	5.05	38.50	614.24	7.79	1.28
3.00	573.98	165.37	22.37	21.00	946.66	49.19	4.94	39.00	601.15	8.80	1.49
3.50	605.95	148.00	19.63	21.50	948.06	47.59	4.78	39.50	588.63	9.88	1.71
4.00	635.24	161.21	20.24	22.00	949.22	43.93	4.42	40.00	576.24	12.09	2.14
4.50	661.66	153.19	18.80	22.50	950.26	42.39	4.27	40.50	565.33	14.08	2.55
5.00	686.08	147.27	17.67	23.00	951.64	43.11	4.33	41.00	554.43	17.58	3.27
5.50	708.55	143.20	16.81	23.50	952.96	31.49	3.20	41.50	543.52	17.87	3.40
6.00	729.59	140.66	16.16	24.00	954.23	39.12	3.94	42.00	532.82	17.37	3.37
6.50	749.24	139.41	15.69	24.50	955.44	39.81	4.00	42.50	522.96	18.31	3.63
7.00	767.78	138.67	15.30	25.00	956.59	37.36	3.76	43.00	513.10	20.85	4.24
7.50	785.39	132.46	14.43	25.50	957.68	36.87	3.71	43.50	503.25	21.10	4.38
8.00	802.09	129.16	13.87	26.00	958.19	36.86	3.70	44.00	494.38	22.43	4.75
8.50	816.94	132.61	13.97	26.50	958.58	37.77	3.79	44.50	485.51	22.86	4.94
9.00	830.32	132.43	13.76	27.00	958.96	37.79	3.79	45.00	476.64	22.59	4.98
9.50	842.17	127.38	13.14	27.50	959.35	36.40	3.66	45.50	468.61	22.76	5.10
10.00	852.65	119.40	12.28	28.00	959.73	36.52	3.67	46.00	460.76	24.51	5.62
10.50	861.82	112.33	11.53	28.50	960.12	35.13	3.53	46.50	452.92	23.17	5.39
11.00	869.59	104.36	10.72	29.00	958.58	32.67	3.30	47.00	445.38	23.13	5.48
11.50	876.33	99.92	10.24	29.50	927.65	1.50	0.16	47.50	438.26	23.31	5.62
12.00	882.59	92.96	9.53	30.00	897.67	3.92	0.44	48.00	431.39	22.94	5.62
12.50	888.28	90.57	9.25	30.50	873.94	5.49	0.63	48.50	424.79	23.64	5.89
13.00	893.54	85.11	8.70	31.00	854.27	4.22	0.50	49.00	418.46	22.31	5.63
13.50	898.33	82.12	8.38	31.50	836.87	4.92	0.59	49.50	412.39	21.44	5.48
14.00	902.87	78.68	8.02	32.00	821.72	5.97	0.73	50.00	406.63	22.48	5.85
14.50	907.28	77.67	7.89	32.50	807.68	3.83	0.48	50.50	401.33	21.18	5.57
15.00	911.73	74.82	7.58	33.00	794.32	5.17	0.66	51.00	396.35	17.50	4.62
15.50	916.11	71.34	7.22	33.50	781.78	4.23	0.54				
16.00	920.42	68.93	6.97	34.00	768.26	3.81	0.50				
16.50	924.12	67.03	6.76	34.50	752.57	1.48	0.20				
17.00	927.44	65.41	6.59	35.00	735.49	12.76	1.71				
17.50	930.41	62.74	6.32	35.50	711.32	0.73	0.10				

ตารางที่ ค-42 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	0.60	0.18	18.00	899.77	6.88	0.76	36.00	806.19	32.56	3.88
0.50	326.34	2.49	0.77	18.50	904.42	5.93	0.65	36.50	788.19	33.56	4.08
1.00	333.67	3.52	1.07	19.00	908.75	6.60	0.72	37.00	769.52	30.93	3.86
1.50	350.47	5.32	1.54	19.50	912.84	6.21	0.68	37.50	750.58	28.67	3.68
2.00	375.02	4.57	1.23	20.00	916.73	6.52	0.71	38.00	731.63	24.82	3.28
2.50	403.80	4.45	1.11	20.50	920.38	7.67	0.83	38.50	712.97	21.98	2.99
3.00	433.98	3.13	0.73	21.00	923.79	6.06	0.65	39.00	694.36	19.19	2.69
3.50	464.58	1.53	0.33	21.50	926.95	6.50	0.70	39.50	676.56	14.99	2.17
4.00	494.48	0.73	0.15	22.00	929.86	7.09	0.76	40.00	659.00	13.95	2.07
4.50	523.81	5.36	1.03	22.50	932.57	8.08	0.86	40.50	643.83	10.02	1.53
5.00	551.66	8.41	1.55	23.00	935.23	8.72	0.92	41.00	628.66	6.29	0.99
5.50	578.20	10.25	1.80	23.50	937.69	8.66	0.92	41.50	613.49	3.86	0.63
6.00	603.26	10.51	1.77	24.00	939.98	9.57	1.01	42.00	598.67	0.02	0.00
6.50	626.97	9.52	1.54	24.50	942.08	8.77	0.92	42.50	585.26	2.91	0.50
7.00	649.38	7.13	1.11	25.00	943.99	9.26	0.97	43.00	571.85	4.50	0.79
7.50	670.53	3.58	0.54	25.50	945.71	8.84	0.93	43.50	558.45	5.40	0.98
8.00	690.46	2.81	0.41	26.00	946.88	9.47	0.99	44.00	546.72	7.77	1.44
8.50	709.19	2.34	0.33	26.50	947.94	9.41	0.98	44.50	534.99	10.04	1.91
9.00	726.79	0.64	0.09	27.00	949.00	10.95	1.14	45.00	523.26	11.31	2.21
9.50	743.27	0.22	0.03	27.50	950.06	11.59	1.21	45.50	512.73	12.98	2.60
10.00	758.72	1.73	0.23	28.00	951.13	11.32	1.18	46.00	502.47	13.22	2.70
10.50	773.19	1.66	0.21	28.50	952.19	12.76	1.32	46.50	492.20	14.85	3.11
11.00	786.71	3.64	0.46	29.00	953.22	12.63	1.31	47.00	482.35	14.50	3.10
11.50	799.31	3.14	0.39	29.50	953.85	12.70	1.31	47.50	473.01	15.36	3.36
12.00	811.01	4.54	0.56	30.00	952.49	13.76	1.42	48.00	464.02	16.17	3.61
12.50	821.85	5.00	0.60	30.50	948.10	18.15	1.88	48.50	455.38	15.03	3.41
13.00	831.86	6.39	0.76	31.00	941.59	20.56	2.14	49.00	447.07	15.92	3.69
13.50	841.09	6.36	0.75	31.50	933.00	24.25	2.53	49.50	439.11	16.06	3.80
14.00	849.57	5.98	0.70	32.00	921.83	27.72	2.92	50.00	431.53	14.98	3.60
14.50	857.36	5.89	0.68	32.50	909.43	29.02	3.09	50.50	424.42	14.97	3.66
15.00	864.78	6.07	0.70	33.00	896.46	31.19	3.36	51.00	417.70	15.05	3.74
15.50	871.65	6.90	0.79	33.50	882.81	29.84	3.27				
16.00	877.97	6.28	0.71	34.00	868.84	30.71	3.41				
16.50	884.00	6.05	0.68	34.50	854.16	29.59	3.35				
17.00	889.62	6.23	0.70	35.00	839.27	29.28	3.37				
17.50	894.84	6.11	0.68	35.50	823.32	30.53	3.58				

ตารางที่ ค-43 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	0.93	0.29	18.00	931.08	54.27	5.51	36.00	690.51	10.24	1.46
0.50	354.79	35.56	9.11	18.50	933.92	53.03	5.37	36.50	672.60	9.95	1.46
1.00	405.29	88.76	17.97	19.00	936.60	49.55	5.02	37.00	656.61	10.84	1.62
1.50	454.62	87.33	16.11	19.50	939.04	47.71	4.84	37.50	642.37	10.68	1.64
2.00	498.33	100.82	16.83	20.00	941.20	47.35	4.79	38.00	628.26	9.59	1.50
2.50	538.24	127.91	19.20	20.50	943.13	46.12	4.66	38.50	615.46	9.39	1.50
3.00	547.14	147.81	21.27	21.00	944.82	44.13	4.46	39.00	602.72	6.73	1.10
3.50	605.90	113.45	15.77	21.50	946.28	43.77	4.42	39.50	590.58	5.07	0.85
4.00	634.94	119.01	15.78	22.00	947.50	41.65	4.21	40.00	578.57	3.28	0.56
4.50	661.08	120.27	15.39	22.50	948.59	39.16	3.96	40.50	568.00	1.15	0.20
5.00	685.21	116.34	14.51	23.00	950.03	40.52	4.09	41.00	557.43	1.58	0.28
5.50	707.40	118.75	14.37	23.50	951.41	31.64	3.22	41.50	546.86	0.41	0.08
6.00	728.17	117.08	13.85	24.00	952.74	35.71	3.61	42.00	536.49	0.84	0.16
6.50	747.57	114.98	13.33	24.50	954.00	36.05	3.64	42.50	526.91	3.06	0.58
7.00	765.89	118.46	13.40	25.00	955.21	34.94	3.53	43.00	517.33	5.38	1.05
7.50	783.30	112.65	12.57	25.50	956.36	35.99	3.63	43.50	507.76	5.11	1.02
8.00	799.83	111.92	12.28	26.00	956.92	36.13	3.64	44.00	499.10	8.05	1.64
8.50	814.54	110.91	11.98	26.50	957.35	35.7	3.59	44.50	490.44	8.39	1.74
9.00	827.81	111.54	11.87	27.00	957.78	36.17	3.64	45.00	481.78	10.53	2.23
9.50	839.58	103.77	11.00	27.50	958.21	35.64	3.59	45.50	473.89	11.44	2.47
10.00	850.00	96.55	10.20	28.00	958.64	33.81	3.41	46.00	466.18	13.33	2.94
10.50	859.13	91.72	9.65	28.50	959.07	34.78	3.50	46.50	458.47	14.22	3.20
11.00	866.88	86.67	9.09	29.00	957.57	31.38	3.17	47.00	451.05	14.6	3.35
11.50	873.61	84.24	8.79	29.50	926.57	3.48	0.37	47.50	444.00	16.85	3.94
12.00	879.87	79.68	8.30	30.00	896.56	0.19	0.02	48.00	437.20	17.65	4.21
12.50	885.58	76.57	7.96	30.50	872.82	0.57	0.07	48.50	430.65	18.7	4.54
13.00	890.86	73.69	7.64	31.00	853.15	0.3	0.04	49.00	424.35	18.9	4.66
13.50	895.68	71.77	7.42	31.50	835.75	1	0.12	49.50	418.29	18.84	4.72
14.00	900.25	69.1	7.13	32.00	820.63	2.78	0.34	50.00	412.52	19.37	4.93
14.50	904.71	67.54	6.95	32.50	806.64	2.79	0.35	50.50	407.19	18.94	4.88
15.00	909.21	65.44	6.71	33.00	793.34	2.19	0.28	51.00	402.16	15.31	3.96
15.50	913.63	63.72	6.52	33.50	780.89	1.64	0.21				
16.00	917.99	59.76	6.11	34.00	767.47	1.08	0.14				
16.50	921.75	59.8	6.09	34.50	751.91	7.64	1.01				
17.00	925.12	57.63	5.86	35.00	734.95	16.4	2.18				
17.50	928.14	56.41	5.73	35.50	710.93	11.22	1.55				



ตารางที่ ค-44 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	2.1	0.64	18.00	885.05	34.3	3.73	36.00	818.64	20.21	2.41
0.50	326.31	0.34	0.10	18.50	890.27	32.38	3.51	36.50	802.37	18.28	2.23
1.00	333.16	2.59	0.77	19.00	895.16	31.99	3.45	37.00	785.42	14.23	1.78
1.50	348.49	7.16	2.01	19.50	899.80	31.05	3.34	37.50	768.08	11.97	1.53
2.00	370.59	13.96	3.63	20.00	904.22	29.13	3.12	38.00	750.71	7.34	0.97
2.50	396.48	19.07	4.59	20.50	908.38	30.17	3.21	38.50	733.42	4.03	0.55
3.00	423.78	23.77	5.31	21.00	912.29	27.86	2.96	39.00	716.15	0.7	0.10
3.50	451.71	28.44	5.92	21.50	915.94	26.81	2.84	39.50	699.38	3.03	0.44
4.00	479.23	31.72	6.21	22.00	919.33	26.32	2.78	40.00	682.77	4.32	0.64
4.50	506.49	32.46	6.02	22.50	922.50	27.55	2.90	40.50	667.89	8.04	1.22
5.00	532.61	35.04	6.17	23.00	925.60	25.05	2.64	41.00	653.01	11.36	1.77
5.50	557.76	36.19	6.09	23.50	928.51	26.14	2.74	41.50	638.12	14.67	2.35
6.00	581.72	37.03	5.98	24.00	931.21	25.54	2.67	42.00	623.52	17.47	2.88
6.50	604.61	36.34	5.67	24.50	933.72	23.83	2.49	42.50	610.05	20.1	3.41
7.00	626.44	39.31	5.90	25.00	936.03	24.42	2.54	43.00	596.59	20.84	3.62
7.50	647.22	39.23	5.71	25.50	938.14	23.51	2.44	43.50	583.13	22.68	4.05
8.00	666.97	39.88	5.64	26.00	939.61	23.34	2.42	44.00	571.11	24.16	4.42
8.50	685.67	40.58	5.59	26.50	940.97	23.08	2.39	44.50	559.09	25.84	4.85
9.00	703.34	42.81	5.74	27.00	942.33	23.22	2.40	45.00	547.07	27.32	5.26
9.50	720.00	41.75	5.48	27.50	943.69	24.06	2.49	45.50	536.12	29.57	5.84
10.00	735.70	44.35	5.69	28.00	945.05	24.5	2.53	46.00	525.42	28.97	5.84
10.50	750.48	42.67	5.38	28.50	946.40	24.95	2.57	46.50	514.73	31.08	6.43
11.00	764.35	44.9	5.55	29.00	947.73	24.12	2.48	47.00	504.41	31.36	6.63
11.50	777.34	43.11	5.25	29.50	948.64	24.91	2.56	47.50	494.59	31.54	6.81
12.00	789.47	45.18	5.41	30.00	947.60	26.45	2.72	48.00	485.10	31.85	7.03
12.50	800.77	43.58	5.16	30.50	943.77	28.48	2.93	48.50	475.92	30.87	6.94
13.00	811.28	44.27	5.17	31.00	938.07	27.48	2.85	49.00	467.07	31.82	7.31
13.50	821.03	43.12	4.99	31.50	930.58	28.17	2.94	49.50	458.55	31.7	7.43
14.00	830.07	42.28	4.85	32.00	920.89	28.76	3.03	50.00	450.38	30.03	7.14
14.50	838.44	39.81	4.53	32.50	910.14	26.61	2.84	50.50	442.66	30.71	7.45
15.00	846.45	39.1	4.42	33.00	898.86	26.09	2.82	51.00	435.31	29.36	7.23
15.50	853.92	38.93	4.36	33.50	886.92	23.33	2.56				
16.00	860.86	38.09	4.24	34.00	874.64	22.21	2.48				
16.50	867.49	37.26	4.12	34.50	861.61	18.94	2.15				
17.00	873.72	36.83	4.04	35.00	848.37	18.78	2.17				
17.50	879.53	34.32	3.76	35.50	834.07	18.68	2.19				

ตารางที่ ค-45 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	1.93	0.59	18.00	932.99	40.36	4.15	36.00	687.67	2.02	0.29
0.50	355.37	22.08	5.85	18.50	935.75	38.4	3.94	36.50	669.54	1.89	0.28
1.00	406.93	74.92	15.55	19.00	938.35	36	3.69	37.00	653.38	2.23	0.34
1.50	457.15	77.2	14.45	19.50	940.71	34.74	3.56	37.50	639.00	1.05	0.16
2.00	501.48	82.97	14.20	20.00	942.80	33.75	3.46	38.00	624.76	1.51	0.24
2.50	541.84	90.41	14.30	20.50	944.65	34.8	3.55	38.50	611.85	0.6	0.10
3.00	578.08	95.17	14.14	21.00	946.27	31.78	3.25	39.00	598.99	1.54	0.26
3.50	610.06	96.09	13.61	21.50	947.65	31.7	3.24	39.50	586.76	1.81	0.31
4.00	639.25	104.3	14.03	22.00	948.81	30.34	3.10	40.00	574.68	0.53	0.09
4.50	665.47	105.28	13.66	22.50	949.84	29.61	3.02	40.50	564.08	1.83	0.33
5.00	689.64	102.11	12.90	23.00	951.21	29.54	3.01	41.00	553.47	3.02	0.55
5.50	711.84	101.01	12.43	23.50	952.54	24.31	2.49	41.50	542.87	3.52	0.65
6.00	732.59	97.66	11.76	24.00	953.81	27.14	2.77	42.00	532.48	4.83	0.92
6.50	751.94	97.71	11.50	24.50	955.02	26.73	2.72	42.50	522.90	6.35	1.23
7.00	770.21	101.24	11.62	25.00	956.18	26.97	2.74	43.00	513.32	6.87	1.36
7.50	787.56	93.59	10.62	25.50	957.29	27.96	2.84	43.50	503.75	6.8	1.37
8.00	804.01	91.34	10.20	26.00	957.80	28.05	2.85	44.00	495.12	8.07	1.66
8.50	818.62	86.83	9.59	26.50	958.20	26.95	2.74	44.50	486.49	8.44	1.77
9.00	831.79	87.66	9.53	27.00	958.59	27.66	2.80	45.00	477.86	10.21	2.18
9.50	843.45	81.6	8.82	27.50	958.98	28.17	2.85	45.50	470.02	11.27	2.46
10.00	853.75	75.3	8.11	28.00	959.38	26.87	2.72	46.00	462.36	11.11	2.46
10.50	862.74	68.41	7.35	28.50	959.77	28.18	2.85	46.50	454.70	12.55	2.84
11.00	870.35	65.3	6.98	29.00	958.21	25.94	2.64	47.00	447.33	12.48	2.87
11.50	876.93	60.82	6.49	29.50	926.76	8.61	0.94	47.50	440.35	13.3	3.11
12.00	883.06	58.99	6.26	30.00	896.26	16.51	1.88	48.00	433.63	13.78	3.28
12.50	888.64	54.91	5.82	30.50	872.19	18.74	2.20	48.50	427.15	13.4	3.24
13.00	893.80	54.25	5.72	31.00	852.26	19.81	2.38	49.00	420.92	14.27	3.51
13.50	898.50	52.75	5.55	31.50	834.67	20.02	2.46	49.50	414.94	14.19	3.54
14.00	902.95	51.2	5.37	32.00	819.38	19.53	2.44	50.00	409.27	13.42	3.39
14.50	907.29	48.46	5.07	32.50	805.22	19.17	2.44	50.50	404.03	14.18	3.64
15.00	911.68	46.77	4.88	33.00	791.78	15.93	2.05	51.00	399.10	8.25	2.11
15.50	916.01	46.74	4.85	33.50	779.19	16.64	2.18				
16.00	920.27	43.38	4.50	34.00	765.62	12.87	1.71				
16.50	923.93	43.52	4.50	34.50	749.88	8.73	1.18				
17.00	927.21	42.64	4.40	35.00	732.71	6.54	0.88				
17.50	930.14	40.61	4.18	35.50	708.36	2.31	0.33				

ตารางที่ ค-46 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	3	0.91	18.00	889.90	17.85	1.97	36.00	813.83	21.72	2.60
0.50	326.42	2.03	0.62	18.50	894.94	17.41	1.91	36.50	797.05	22	2.69
1.00	333.83	1.08	0.32	19.00	899.66	18.69	2.04	37.00	779.63	20.72	2.59
1.50	350.13	1.02	0.29	19.50	904.13	18.12	1.96	37.50	761.91	16.94	2.18
2.00	373.31	5.34	1.41	20.00	908.38	16.37	1.77	38.00	744.16	15.29	2.01
2.50	400.18	7.47	1.83	20.50	912.38	15.77	1.70	38.50	726.58	11.47	1.55
3.00	428.37	11.98	2.72	21.00	916.13	16.52	1.77	39.00	709.03	10.42	1.45
3.50	457.04	16.11	3.40	21.50	919.62	14.63	1.57	39.50	692.07	7.08	1.01
4.00	485.19	17.96	3.57	22.00	922.85	14.5	1.55	40.00	675.30	4.25	0.63
4.50	512.96	17.19	3.24	22.50	925.87	15.38	1.63	40.50	660.40	0.85	0.13
5.00	539.50	18.35	3.29	23.00	928.83	14.42	1.53	41.00	645.50	1.35	0.21
5.50	564.97	18.98	3.25	23.50	931.59	14.06	1.49	41.50	630.60	4.45	0.71
6.00	589.18	19.37	3.18	24.00	934.16	14.99	1.58	42.00	616.00	5.85	0.96
6.50	612.24	19.11	3.03	24.50	936.53	15.02	1.58	42.50	602.60	7.65	1.29
7.00	634.19	19.46	2.98	25.00	938.71	14.64	1.54	43.00	589.19	8.84	1.52
7.50	655.05	18.7	2.78	25.50	940.70	12.95	1.36	43.50	575.80	11.25	1.99
8.00	674.82	18.93	2.73	26.00	942.07	13.38	1.40	44.00	563.89	11.94	2.16
8.50	693.52	21.13	2.96	26.50	943.33	14.92	1.56	44.50	551.99	14.24	2.65
9.00	711.16	20.69	2.83	27.00	944.59	14.96	1.56	45.00	540.08	13.63	2.59
9.50	727.76	21.79	2.91	27.50	945.85	14.9	1.55	45.50	529.28	15.63	3.04
10.00	743.38	22.07	2.88	28.00	947.11	17.34	1.80	46.00	518.73	16.68	3.32
10.50	758.06	21.89	2.81	28.50	948.37	15.98	1.66	46.50	508.18	16.63	3.38
11.00	771.80	22.45	2.83	29.00	949.60	17.95	1.86	47.00	498.02	17.77	3.70
11.50	784.65	22.9	2.84	29.50	950.37	16.98	1.76	47.50	488.36	17.11	3.63
12.00	796.62	22.93	2.80	30.00	949.01	19.14	1.98	48.00	479.03	17.48	3.79
12.50	807.75	23.9	2.87	30.50	944.70	22.15	2.29	48.50	470.02	17.77	3.93
13.00	818.07	23.58	2.80	31.00	938.44	24.01	2.49	49.00	461.34	17.69	3.99
13.50	827.63	22.62	2.66	31.50	930.35	26.7	2.79	49.50	459.99	25.14	5.78
14.00	836.47	22.18	2.58	32.00	920.07	27.68	2.92	50.00	445.00	18.55	4.35
14.50	844.63	22.02	2.54	32.50	908.75	27.7	2.96	50.50	437.47	18.62	4.45
15.00	852.44	22.01	2.52	33.00	896.93	25.22	2.73	51.00	430.31	18.56	4.51
15.50	859.72	20.33	2.31	33.50	884.50	25.55	2.81				
16.00	866.46	21.69	2.44	34.00	871.74	22.71	2.54				
16.50	872.90	19.45	2.18	34.50	858.26	20.69	2.35				
17.00	878.94	19.51	2.17	35.00	844.56	20.89	2.41				
17.50	884.56	18.59	2.06	35.50	829.77	19.78	2.33				

ตารางที่ ค-47 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.32	13.93	4.11	18.00	936.20	31.28	3.23	36.00	677.84	36.89	5.76
0.50	357.80	42.35	10.58	18.50	938.78	29.57	3.05	36.50	659.14	34.39	5.50
1.00	415.11	116.14	21.86	19.00	941.22	29.63	3.05	37.00	642.64	33.89	5.57
1.50	469.41	118.94	20.22	19.50	943.42	28.23	2.91	37.50	628.15	32.8	5.51
2.00	515.64	121.51	19.07	20.00	945.35	26.3	2.71	38.00	613.82	31.57	5.42
2.50	556.75	124.7	18.30	20.50	947.05	26.9	2.76	38.50	600.91	30.96	5.43
3.00	593.18	127.37	17.68	21.00	948.52	25.43	2.61	39.00	588.05	29.2	5.23
3.50	624.95	128	17.00	21.50	949.76	23.79	2.44	39.50	575.89	28.34	5.18
4.00	653.79	126.76	16.24	22.00	950.77	23.08	2.37	40.00	563.89	26.24	4.88
4.50	679.46	122.79	15.31	22.50	951.67	23.28	2.39	40.50	553.40	25.85	4.90
5.00	703.07	119.98	14.58	23.00	952.93	22.32	2.29	41.00	542.91	25.76	4.98
5.50	724.68	115.97	13.80	23.50	954.15	19.2	1.97	41.50	532.43	26.68	5.28
6.00	744.86	113.49	13.22	24.00	955.33	21.82	2.23	42.00	522.15	26.7	5.39
6.50	763.65	107.5	12.34	24.50	956.45	21.5	2.20	42.50	512.74	26.89	5.53
7.00	781.39	106.26	11.97	25.00	957.54	22.21	2.27	43.00	503.32	25.77	5.40
7.50	798.25	100.3	11.16	25.50	958.57	20.98	2.14	43.50	493.91	26.96	5.77
8.00	814.26	95.29	10.48	26.00	959.03	21.02	2.14	44.00	485.46	26.11	5.68
8.50	828.41	92.24	10.02	26.50	959.36	20.69	2.11	44.50	477.01	27.06	6.01
9.00	841.13	89.52	9.62	27.00	959.69	21.26	2.17	45.00	468.56	27.01	6.12
9.50	852.32	79.53	8.53	27.50	960.03	21.32	2.17	45.50	460.92	28.37	6.56
10.00	862.15	73.4	7.85	28.00	960.36	22.49	2.29	46.00	453.46	27.41	6.43
10.50	870.66	64.49	6.90	28.50	960.69	21.96	2.23	46.50	446.01	28.36	6.79
11.00	877.75	61.4	6.54	29.00	959.02	22.43	2.29	47.00	438.86	29.01	7.08
11.50	883.83	56.62	6.02	29.50	926.06	27.71	3.08	47.50	432.10	27.95	6.92
12.00	889.51	54.54	5.78	30.00	893.37	40.12	4.70	48.00	425.61	27.86	7.00
12.50	894.68	50.67	5.36	30.50	867.94	42.29	5.12	48.50	419.37	26.82	6.83
13.00	899.47	48.78	5.14	31.00	847.06	45.21	5.64	49.00	413.38	27.03	7.00
13.50	903.83	45.92	4.83	31.50	828.85	44.6	5.69	49.50	407.66	27.11	7.12
14.00	907.98	44.17	4.64	32.00	813.19	44.14	5.74	50.00	402.24	25.66	6.81
14.50	912.05	41.1	4.31	32.50	798.74	45.29	6.01	50.50	397.28	26.33	7.10
15.00	916.17	39.58	4.14	33.00	785.06	44.51	6.01	51.00	392.64	19.09	5.11
15.50	920.26	38.19	3.98	33.50	772.30	47.45	6.55				
16.00	924.29	36.86	3.83	34.00	758.51	44.96	6.30				
16.50	927.73	34.62	3.60	34.50	742.41	41.26	5.88				
17.00	930.80	34.35	3.56	35.00	724.78	14.43	2.03				
17.50	933.53	31.72	3.29	35.50	699.39	36.24	5.46				

ตารางที่ ค-48 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code B

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.35	16.8	4.91	18.00	893.79	22.56	2.46	36.00	809.99	21.74	2.76
0.50	326.51	16.64	4.85	18.50	898.69	22.06	2.40	36.50	792.79	23.64	3.07
1.00	334.35	18.9	5.35	19.00	903.26	21.29	2.30	37.00	774.97	24.62	3.28
1.50	351.39	31.66	8.27	19.50	907.58	20.57	2.22	37.50	756.90	27.75	3.81
2.00	375.43	40.12	9.65	20.00	911.70	20.25	2.17	38.00	738.82	27.87	3.92
2.50	403.16	45.79	10.20	20.50	915.56	17.69	1.90	38.50	720.97	29.82	4.31
3.00	432.11	51.04	10.56	21.00	919.17	18.68	1.99	39.00	703.15	29.9	4.44
3.50	461.44	53.31	10.36	21.50	922.53	17.62	1.87	39.50	685.99	30.24	4.61
4.00	490.16	54.49	10.00	22.00	925.64	17.31	1.84	40.00	669.03	31.58	4.95
4.50	518.39	55.36	9.65	22.50	928.54	15.51	1.64	40.50	654.08	32.73	5.27
5.00	545.31	54.54	9.09	23.00	931.38	16.47	1.74	41.00	639.12	33.47	5.53
5.50	571.06	54.49	8.71	23.50	934.02	14.23	1.50	41.50	624.17	33.12	5.60
6.00	595.48	54.17	8.34	24.00	936.48	14.37	1.51	42.00	609.53	32.38	5.61
6.50	618.69	54.86	8.14	24.50	938.75	14.9	1.56	42.50	596.14	32.69	5.80
7.00	640.74	52.61	7.59	25.00	940.82	13.53	1.42	43.00	582.75	33.7	6.14
7.50	661.63	52.02	7.29	25.50	942.71	13.14	1.37	43.50	569.38	33.13	6.18
8.00	681.42	51.63	7.04	26.00	944.00	13.85	1.45	44.00	557.54	33.99	6.49
8.50	700.08	51.97	6.91	26.50	945.18	15.57	1.62	44.50	545.70	34.35	6.72
9.00	717.67	49.98	6.51	27.00	946.36	15.59	1.62	45.00	533.86	33.11	6.61
9.50	734.20	51.15	6.51	27.50	947.54	15.11	1.57	45.50	523.16	33.01	6.73
10.00	749.74	48.41	6.07	28.00	948.72	15.73	1.63	46.00	512.71	34.16	7.14
10.50	764.30	48.45	5.96	28.50	949.90	15.05	1.56	46.50	502.26	32.31	6.88
11.00	777.93	45.32	5.51	29.00	951.05	16.2	1.67	47.00	492.20	31.85	6.92
11.50	790.64	45.21	5.41	29.50	951.71	14.44	1.49	47.50	482.65	31.6	7.01
12.00	802.47	41.38	4.90	30.00	950.11	14.04	1.46	48.00	473.44	30.89	6.98
12.50	813.45	40.8	4.78	30.50	945.44	11.41	1.19	48.50	464.56	31.31	7.23
13.00	823.61	37.24	4.33	31.00	938.76	8.19	0.86	49.00	456.01	29.76	6.98
13.50	833.00	35.45	4.08	31.50	930.21	2.44	0.26	49.50	447.79	28.74	6.86
14.00	841.66	33.49	3.83	32.00	919.47	3.72	0.41	50.00	439.94	29.29	7.13
14.50	849.65	33.5	3.79	32.50	907.71	7.16	0.80	50.50	432.56	27.71	6.84
15.00	857.29	32.06	3.60	33.00	895.47	13.42	1.52	51.00	425.56	27.61	6.94
15.50	864.40	29.15	3.26	33.50	882.64	16.19	1.87				
16.00	870.98	28.27	3.14	34.00	869.49	20.64	2.43				
16.50	877.26	26.29	2.91	34.50	855.63	21.98	2.64				
17.00	883.14	24.61	2.71	35.00	841.55	23.2	2.83				
17.50	888.61	24.64	2.70	35.50	826.36	20.81	2.58				



ตารางที่ ค-49 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	321.21	0.14	0.04	13.00	893.61	69.14	7.18	26.00	672.18	10.53	1.59
0.50	362.98	74.47	17.02	13.50	898.22	65.53	6.80	26.50	654.87	12.42	1.93
1.00	415.77	117.88	22.09	14.00	902.34	63.11	6.54	27.00	638.84	11.59	1.85
1.50	459.95	126.30	21.54	14.50	906.13	59.72	6.18	27.50	624.46	15.91	2.61
2.00	501.21	163.64	24.61	15.00	909.71	57.34	5.93	28.00	610.78	21.43	3.64
2.50	540.03	151.22	21.88	15.50	913.03	55.62	5.74	28.50	597.87	20.92	3.63
3.00	576.47	154.98	21.19	16.00	916.15	53.90	5.56	29.00	585.39	21.54	3.82
3.50	609.94	161.81	20.97	16.50	919.17	52.08	5.36	29.50	573.19	23.24	4.23
4.00	640.02	155.53	19.55	17.00	922.10	53.95	5.53	30.00	561.72	28.07	5.26
4.50	667.93	161.72	19.49	17.50	924.88	51.57	5.28	30.50	550.26	28.91	5.54
5.00	693.74	179.01	20.51	18.00	927.52	49.23	5.04	31.00	538.79	27.34	5.35
5.50	717.64	160.01	18.23	18.50	928.55	47.00	4.82	31.50	528.38	32.43	6.54
6.00	739.60	150.05	16.87	19.00	927.35	48.20	4.94	32.00	518.05	30.10	6.17
6.50	759.70	146.95	16.21	19.50	917.35	32.80	3.45	32.50	507.72	30.67	6.43
7.00	777.99	145.26	15.73	20.00	889.59	9.96	1.11	33.00	498.06	30.81	6.59
7.50	794.45	139.00	14.89	20.50	861.38	4.17	0.48	33.50	488.75	32.00	7.01
8.00	809.07	125.98	13.47	21.00	839.70	0.65	0.08	34.00	479.45	32.10	7.18
8.50	822.46	120.89	12.81	21.50	820.68	0.43	0.05	34.50	470.35	32.40	7.40
9.00	834.79	117.76	12.36	22.00	804.18	1.33	0.17	35.00	461.78	32.33	7.53
9.50	845.72	111.83	11.68	22.50	789.64	2.69	0.34	35.50	453.50	32.65	7.76
10.00	855.26	104.69	10.91	23.00	776.22	4.37	0.57	36.00	445.52	32.47	7.86
10.50	863.79	97.06	10.10	23.50	763.75	6.50	0.86	36.50	437.82	32.07	7.90
11.00	871.43	88.62	9.23	24.00	751.18	4.43	0.59	37.00	430.42	31.87	8.00
11.50	877.96	82.39	8.58	24.50	735.14	10.81	1.45	37.50	423.32	30.97	7.89
12.00	883.38	77.77	8.09	25.00	713.21	5.76	0.81	38.00	417.28	20.53	5.17
12.50	888.50	73.45	7.64	25.50	690.45	11.60	1.71	38.39	412.70	16.45	4.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-50 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	321.35	0.60	0.19	13.00	835.12	18.73	2.19	26.00	785.31	16.64	2.07
0.50	323.36	1.41	0.44	13.50	844.21	17.04	1.98	26.50	767.54	13.71	1.75
1.00	333.30	0.95	0.29	14.00	852.45	16.50	1.90	27.00	749.18	10.07	1.33
1.50	352.66	4.11	1.18	14.50	859.99	16.96	1.93	27.50	730.60	5.45	0.74
2.00	379.39	5.94	1.59	15.00	866.94	15.71	1.78	28.00	712.19	3.74	0.53
2.50	408.47	7.42	1.85	15.50	873.27	16.88	1.90	28.50	693.99	3.74	0.54
3.00	438.35	3.70	0.85	16.00	879.01	15.24	1.70	29.00	676.18	5.33	0.80
3.50	468.19	0.46	0.10	16.50	884.41	15.24	1.69	29.50	658.85	8.30	1.28
4.00	497.40	6.45	1.28	17.00	889.52	15.03	1.66	30.00	643.04	16.39	2.61
4.50	525.90	6.65	1.25	17.50	894.22	14.53	1.60	30.50	627.22	18.77	3.09
5.00	553.52	5.93	1.06	18.00	898.51	14.64	1.60	31.00	611.41	16.86	2.84
5.50	580.07	5.88	1.00	18.50	902.41	14.84	1.62	31.50	597.19	24.64	4.30
6.00	605.36	8.99	1.46	19.00	905.95	15.50	1.68	32.00	583.10	22.15	3.95
6.50	629.39	6.76	1.06	19.50	908.92	15.83	1.71	32.50	569.00	23.05	4.22
7.00	652.11	8.64	1.31	20.00	910.69	17.06	1.84	33.00	555.99	23.84	4.48
7.50	673.54	11.51	1.68	20.50	909.35	20.40	2.19	33.50	543.56	26.11	5.05
8.00	693.69	13.26	1.88	21.00	904.98	23.27	2.51	34.00	531.12	26.57	5.27
8.50	712.69	14.46	1.99	21.50	898.65	24.80	2.69	34.50	518.96	27.41	5.58
9.00	730.56	15.69	2.10	22.00	890.27	25.18	2.75	35.00	507.54	27.39	5.70
9.50	747.24	18.41	2.40	22.50	880.27	24.18	2.67	35.50	496.51	27.86	5.95
10.00	762.73	17.32	2.22	23.00	869.33	23.12	2.59	36.00	485.89	27.74	6.06
10.50	777.21	19.44	2.44	23.50	857.60	19.75	2.25	36.50	475.68	27.53	6.14
11.00	790.72	18.23	2.25	24.00	845.16	19.79	2.29	37.00	465.86	27.51	6.28
11.50	803.18	17.97	2.19	24.50	831.99	16.76	1.97	37.50	456.45	26.50	6.16
12.00	814.57	19.08	2.29	25.00	817.82	17.83	2.13	38.00	447.54	26.59	6.32
12.50	825.19	18.96	2.25	25.50	802.16	18.09	2.21	38.39	440.18	23.33	5.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-51 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นมวลกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	323.92	0.37	0.12	13.00	904.94	45.51	4.79	26.00	632.30	49.05	7.20
0.50	396.12	2.93	0.73	13.50	908.45	43.40	4.56	26.50	614.14	50.91	7.65
1.00	466.75	15.50	3.21	14.00	911.61	41.94	4.40	27.00	598.48	51.07	7.86
1.50	515.81	23.44	4.35	14.50	914.55	40.70	4.26	27.50	585.12	49.43	7.79
2.00	558.15	39.90	6.67	15.00	917.39	39.46	4.12	28.00	572.36	44.59	7.23
2.50	596.51	44.54	6.95	15.50	920.09	38.46	4.01	28.50	560.25	45.30	7.48
3.00	631.66	53.19	7.77	16.00	922.68	37.67	3.92	29.00	548.70	44.15	7.45
3.50	663.04	49.01	6.88	16.50	925.21	36.94	3.84	29.50	537.44	42.01	7.25
4.00	690.49	61.16	8.14	17.00	927.68	39.27	4.06	30.00	526.89	46.16	8.06
4.50	715.62	57.43	7.43	17.50	930.06	37.79	3.90	30.50	516.34	34.21	6.21
5.00	738.55	52.90	6.68	18.00	932.36	36.39	3.76	31.00	505.80	34.35	6.36
5.50	759.67	56.08	6.87	18.50	932.67	36.28	3.74	31.50	496.38	27.47	5.24
6.00	779.07	63.08	7.49	19.00	930.17	39.08	4.03	32.00	487.04	28.21	5.48
6.50	796.65	72.00	8.29	19.50	916.16	30.99	3.27	32.50	477.70	26.05	5.17
7.00	812.41	76.04	8.56	20.00	879.11	15.24	1.70	33.00	469.03	23.92	4.85
7.50	826.36	77.29	8.55	20.50	843.54	19.11	2.21	33.50	460.70	20.45	4.25
8.00	838.49	70.36	7.74	21.00	817.46	21.99	2.62	34.00	452.37	18.38	3.90
8.50	849.53	68.62	7.47	21.50	796.30	24.65	3.00	34.50	444.25	16.30	3.54
9.00	859.70	67.75	7.31	22.00	778.80	26.25	3.26	35.00	436.67	14.28	3.17
9.50	868.59	68.16	7.28	22.50	763.62	27.73	3.50	35.50	429.38	12.37	2.80
10.00	876.20	62.85	6.69	23.00	749.81	28.54	3.67	36.00	422.39	10.46	2.42
10.50	882.89	59.16	6.28	23.50	737.24	28.11	3.67	36.50	415.70	8.75	2.06
11.00	888.74	54.71	5.80	24.00	724.43	31.52	4.17	37.00	409.30	7.05	1.69
11.50	893.58	51.97	5.50	24.50	706.53	49.22	6.51	37.50	403.19	5.86	1.43
12.00	897.40	49.95	5.27	25.00	680.40	41.35	5.73	38.00	398.85	13.60	3.30
12.50	901.09	47.66	5.02	25.50	653.01	46.94	6.71	38.39	395.73	16.02	3.89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-52 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นมวลกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	323.95	0.00	0.00	13.00	811.98	32.57	3.86	26.00	795.23	19.62	2.41
0.50	325.60	1.05	0.32	13.50	821.64	30.81	3.61	26.50	779.51	16.74	2.10
1.00	334.06	1.09	0.32	14.00	830.51	29.94	3.48	27.00	763.01	13.34	1.72
1.50	350.89	0.66	0.19	14.50	838.72	30.33	3.49	27.50	746.14	8.61	1.14
2.00	374.66	0.99	0.26	15.00	846.37	28.58	3.27	28.00	729.26	0.81	0.11
2.50	400.84	1.41	0.35	15.50	853.41	29.34	3.32	28.50	712.37	0.82	0.12
3.00	428.02	6.63	1.52	16.00	859.89	27.26	3.07	29.00	695.64	2.79	0.40
3.50	455.42	11.03	2.36	16.50	866.01	26.94	3.02	29.50	679.18	6.13	0.91
4.00	482.47	17.28	3.46	17.00	871.83	26.32	2.93	30.00	663.69	14.54	2.24
4.50	509.02	18.43	3.49	17.50	877.23	25.42	2.82	30.50	648.20	16.75	2.65
5.00	534.90	18.65	3.37	18.00	882.21	25.14	2.77	31.00	632.71	15.56	2.52
5.50	559.93	19.82	3.42	18.50	886.80	24.75	2.71	31.50	618.43	23.38	3.93
6.00	583.96	24.09	3.96	19.00	891.02	25.03	2.73	32.00	604.23	20.78	3.56
6.50	606.94	22.21	3.53	19.50	894.70	24.75	2.69	32.50	590.04	22.09	3.89
7.00	628.77	24.98	3.82	20.00	897.26	25.29	2.74	33.00	576.76	23.01	4.16
7.50	649.50	26.15	3.87	20.50	897.05	27.60	2.99	33.50	563.96	25.71	4.78
8.00	669.15	28.10	4.03	21.00	894.15	30.60	3.31	34.00	551.15	26.50	5.05
8.50	687.77	29.28	4.08	21.50	889.54	31.21	3.39	34.50	538.61	27.06	5.29
9.00	705.39	30.16	4.10	22.00	883.11	31.24	3.42	35.00	526.73	27.28	5.46
9.50	721.98	32.17	4.27	22.50	875.20	30.55	3.37	35.50	515.23	28.08	5.76
10.00	737.52	31.03	4.04	23.00	866.42	28.43	3.18	36.00	504.09	28.14	5.91
10.50	752.13	32.92	4.19	23.50	856.86	24.89	2.82	36.50	493.33	28.38	6.10
11.00	765.86	31.99	4.01	24.00	846.60	24.15	2.77	37.00	482.93	28.18	6.20
11.50	778.63	31.32	3.87	24.50	835.57	20.78	2.43	37.50	472.90	27.45	6.16
12.00	790.45	32.10	3.90	25.00	823.52	20.73	2.46	38.00	463.33	27.98	6.43
12.50	801.54	31.81	3.82	25.50	809.97	20.98	2.52	38.39	455.23	24.28	5.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-53 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	324.51	0.14	0.04	13.00	891.39	45.36	4.84	26.00	670.64	13.99	2.13
0.50	365.52	36.33	9.04	13.50	895.98	42.77	4.56	26.50	653.54	13.89	2.17
1.00	418.12	77.13	15.57	14.00	900.10	40.85	4.34	27.00	637.77	13.42	2.15
1.50	462.11	56.84	10.95	14.50	903.89	39.46	4.18	27.50	623.69	15.04	2.47
2.00	503.18	64.47	11.36	15.00	907.49	37.86	4.01	28.00	610.34	18.89	3.19
2.50	541.73	66.52	10.94	15.50	910.83	36.52	3.85	28.50	597.77	17.62	3.04
3.00	577.88	73.57	11.29	16.00	913.98	35.37	3.73	29.00	585.67	16.72	2.94
3.50	611.03	84.82	12.19	16.50	917.04	34.31	3.61	29.50	573.84	19.09	3.44
4.00	640.78	93.77	12.77	17.00	920.00	35.95	3.76	30.00	562.76	23.41	4.34
4.50	668.37	93.78	12.31	17.50	922.83	34.62	3.62	30.50	551.67	24.42	4.63
5.00	693.87	93.88	11.92	18.00	925.52	33.23	3.47	31.00	540.59	22.84	4.41
5.50	717.48	88.87	11.02	18.50	926.60	33.25	3.46	31.50	530.53	27.68	5.50
6.00	739.16	90.19	10.87	19.00	925.43	35.12	3.66	32.00	520.54	25.59	5.17
6.50	759.02	89.53	10.55	19.50	915.42	26.03	2.76	32.50	510.56	26.11	5.39
7.00	777.08	88.77	10.25	20.00	887.56	0.39	0.04	33.00	501.21	26.66	5.62
7.50	793.33	84.92	9.67	20.50	859.28	7.43	0.87	33.50	492.19	28.04	6.04
8.00	807.77	78.58	8.87	21.00	837.57	11.72	1.42	34.00	483.17	28.42	6.25
8.50	820.99	75.06	8.38	21.50	818.54	13.09	1.63	34.50	474.34	29.09	6.53
9.00	833.17	74.38	8.20	22.00	802.04	13.89	1.76	35.00	466.01	29.26	6.70
9.50	843.97	72.98	7.96	22.50	787.52	14.27	1.85	35.50	457.95	29.50	6.88
10.00	853.41	67.74	7.35	23.00	774.13	14.98	1.97	36.00	450.15	29.70	7.06
10.50	861.85	62.40	6.75	23.50	761.71	15.76	2.11	36.50	442.64	29.79	7.21
11.00	869.40	56.65	6.12	24.00	749.21	13.36	1.82	37.00	435.39	29.74	7.33
11.50	875.86	52.99	5.70	24.50	733.24	6.61	0.89	37.50	428.41	29.46	7.38
12.00	881.23	50.52	5.42	25.00	711.37	11.82	1.69	38.00	422.49	16.84	4.15
12.50	886.32	47.83	5.12	25.50	688.73	12.88	1.91	38.39	417.96	12.21	3.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-54 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	324.85	0.00	0.00	13.00	815.26	33.59	3.96	26.00	792.11	5.24	0.66
0.50	326.72	0.97	0.30	13.50	824.86	31.79	3.71	26.50	776.26	1.69	0.22
1.00	335.82	2.43	0.72	14.00	833.66	30.69	3.55	27.00	759.77	2.32	0.31
1.50	353.23	2.32	0.65	14.50	841.79	30.76	3.52	27.50	743.01	7.36	1.00
2.00	377.15	4.30	1.13	15.00	849.36	28.79	3.28	28.00	726.30	16.55	2.33
2.50	403.38	4.87	1.19	15.50	856.32	29.33	3.31	28.50	709.65	17.00	2.45
3.00	430.58	10.37	2.35	16.00	862.71	27.34	3.07	29.00	693.21	18.66	2.77
3.50	458.03	14.62	3.09	16.50	868.75	26.70	2.98	29.50	677.08	22.13	3.38
4.00	485.15	21.60	4.26	17.00	874.49	25.86	2.87	30.00	661.97	29.92	4.73
4.50	511.77	21.98	4.12	17.50	879.81	24.74	2.74	30.50	646.86	32.01	5.21
5.00	537.73	22.02	3.93	18.00	884.71	24.44	2.69	31.00	631.74	31.09	5.18
5.50	562.85	22.80	3.89	18.50	889.22	24.13	2.64	31.50	617.84	38.39	6.62
6.00	586.97	26.68	4.35	19.00	893.34	24.11	2.63	32.00	604.02	35.77	6.30
6.50	610.04	24.51	3.86	19.50	896.87	24.18	2.62	32.50	590.21	37.06	6.70
7.00	631.95	27.30	4.14	20.00	899.18	24.67	2.67	33.00	577.29	37.64	6.97
7.50	652.76	27.89	4.10	20.50	898.46	26.59	2.87	33.50	564.83	40.08	7.64
8.00	672.47	29.68	4.23	21.00	894.96	27.69	3.00	34.00	552.37	40.72	7.96
8.50	691.15	31.10	4.31	21.50	889.72	27.23	2.97	34.50	540.17	41.32	8.28
9.00	708.81	31.84	4.30	22.00	882.69	25.56	2.81	35.00	528.60	41.55	8.53
9.50	725.42	33.43	4.40	22.50	874.25	23.20	2.58	35.50	517.39	41.64	8.75
10.00	740.98	32.77	4.23	23.00	865.00	19.75	2.23	36.00	506.54	41.59	8.95
10.50	755.60	34.05	4.31	23.50	855.05	14.80	1.70	36.50	496.04	41.49	9.13
11.00	769.32	33.23	4.14	24.00	844.46	13.29	1.55	37.00	485.90	41.05	9.23
11.50	782.06	32.89	4.04	24.50	833.18	9.07	1.08	37.50	476.11	40.46	9.29
12.00	793.84	33.51	4.05	25.00	820.87	8.48	1.02	38.00	466.76	40.51	9.50
12.50	804.88	32.77	3.91	25.50	807.07	7.48	0.92	38.39	458.8	36.55	8.66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-55 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	325.55	0.40	0.12	13.00	896.61	38.74	4.14	26.00	660.74	38.49	6.18
0.50	370.33	56.42	13.22	13.50	900.83	35.72	3.81	26.50	643.17	37.62	6.21
1.00	428.97	93.18	17.85	14.00	904.59	33.36	3.56	27.00	627.26	36.81	6.23
1.50	476.11	91.54	16.13	14.50	908.07	31.68	3.37	27.50	613.19	37.24	6.47
2.00	518.25	100.40	16.23	15.00	911.38	29.67	3.15	28.00	599.85	40.30	7.20
2.50	557.29	100.56	15.29	15.50	914.47	28.18	2.99	28.50	587.30	38.15	6.95
3.00	593.57	101.18	14.56	16.00	917.40	26.65	2.82	29.00	575.28	37.53	6.98
3.50	626.56	100.19	13.79	16.50	920.25	25.80	2.73	29.50	563.55	37.60	7.15
4.00	655.96	102.69	13.54	17.00	923.02	27.13	2.85	30.00	552.57	41.12	8.04
4.50	683.09	100.56	12.83	17.50	925.68	25.97	2.73	30.50	541.59	40.84	8.16
5.00	708.05	101.10	12.49	18.00	928.22	24.93	2.62	31.00	530.62	38.87	7.90
5.50	731.08	100.07	12.04	18.50	929.08	24.97	2.62	31.50	520.69	42.74	8.94
6.00	752.19	98.16	11.54	19.00	927.58	27.37	2.87	32.00	510.84	40.19	8.54
6.50	771.44	97.31	11.20	19.50	916.75	17.40	1.86	32.50	500.99	38.94	8.43
7.00	788.90	85.25	9.75	20.00	887.02	20.27	2.34	33.00	491.79	39.54	8.74
7.50	804.53	81.42	9.19	20.50	856.60	29.25	3.54	33.50	482.92	40.07	9.05
8.00	818.32	76.73	8.57	21.00	833.39	33.64	4.21	34.00	474.06	39.91	9.19
8.50	830.93	74.02	8.18	21.50	813.38	35.23	4.53	34.50	465.38	39.63	9.31
9.00	842.52	69.73	7.64	22.00	796.26	35.41	4.65	35.00	457.22	39.17	9.37
9.50	852.75	66.60	7.24	22.50	781.32	34.97	4.69	35.50	449.33	38.58	9.39
10.00	861.62	61.13	6.62	23.00	767.65	35.30	4.82	36.00	441.73	38.08	9.43
10.50	869.51	56.84	6.14	23.50	755.06	36.31	5.05	36.50	434.40	37.35	9.41
11.00	876.53	51.52	5.55	24.00	742.41	33.46	4.72	37.00	427.35	36.60	9.37
11.50	882.47	47.68	5.13	24.50	726.07	8.42	1.17	37.50	420.58	35.93	9.34
12.00	887.34	44.81	4.81	25.00	703.38	35.93	5.38	38.00	414.94	18.99	4.80
12.50	891.96	41.69	4.47	25.50	679.64	37.69	5.87	38.39	410.8	13.85	3.49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-56 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code C

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	326.05	0.00	0.00	13.00	817.46	27.79	3.29	26.00	792.04	7.79	0.99
0.50	327.86	0.91	0.28	13.50	826.97	25.98	3.05	26.50	775.95	11.40	1.49
1.00	336.85	2.00	0.59	14.00	835.68	25.17	2.92	27.00	759.18	14.63	1.96
1.50	354.30	1.15	0.32	14.50	843.74	25.21	2.90	27.50	742.12	19.77	2.74
2.00	378.49	2.46	0.64	15.00	851.22	23.53	2.69	28.00	725.10	28.45	4.08
2.50	405.03	2.72	0.67	15.50	858.10	23.85	2.70	28.50	708.13	27.78	4.08
3.00	432.53	7.22	1.64	16.00	864.41	21.74	2.45	29.00	691.38	28.73	4.34
3.50	460.22	10.63	2.26	16.50	870.37	21.38	2.40	29.50	674.94	30.89	4.80
4.00	487.54	16.11	3.20	17.00	876.04	20.41	2.28	30.00	659.56	37.71	6.06
4.50	514.32	16.93	3.19	17.50	881.28	19.37	2.15	30.50	644.19	39.14	6.47
5.00	540.41	16.24	2.92	18.00	886.12	19.03	2.10	31.00	628.81	37.16	6.28
5.50	565.62	16.93	2.91	18.50	890.55	18.60	2.05	31.50	614.69	43.54	7.62
6.00	589.80	20.75	3.40	19.00	894.61	18.54	2.03	32.00	600.67	40.32	7.20
6.50	612.90	18.65	2.95	19.50	898.09	18.46	2.01	32.50	586.65	40.50	7.42
7.00	634.83	20.82	3.18	20.00	900.37	19.18	2.09	33.00	573.55	40.70	7.64
7.50	655.63	21.52	3.18	20.50	899.65	21.00	2.28	33.50	560.94	42.29	8.15
8.00	675.32	22.83	3.27	21.00	896.15	21.50	2.34	34.00	548.33	42.08	8.31
8.50	693.96	24.99	3.48	21.50	890.89	19.96	2.19	34.50	535.98	42.33	8.57
9.00	711.58	25.27	3.43	22.00	883.81	17.24	1.91	35.00	524.29	41.84	8.67
9.50	728.14	26.21	3.47	22.50	875.30	13.75	1.55	35.50	512.98	41.53	8.81
10.00	743.63	26.12	3.39	23.00	865.95	9.10	1.04	36.00	502.03	40.98	8.89
10.50	758.18	27.37	3.48	23.50	855.87	3.18	0.37	36.50	491.46	39.41	8.72
11.00	771.83	26.72	3.35	24.00	845.13	1.32	0.16	37.00	481.25	39.70	8.99
11.50	784.49	26.56	3.27	24.50	833.68	3.03	0.36	37.50	471.41	38.76	8.96
12.00	796.19	27.36	3.32	25.00	821.20	3.85	0.47	38.00	462.02	38.67	9.13
12.50	807.15	26.90	3.23	25.50	807.21	5.26	0.66	38.39	454.09	34.54	8.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-57 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.12	0.03	0.01	13.00	867.66	103.59	10.67	26.50	633.02	17.07	2.77
0.50	326.61	6.54	1.96	13.50	874.07	97.88	10.07	27.00	620.23	12.18	2.00
1.00	364.38	55.47	13.21	14.00	879.04	92.81	9.55	27.50	608.26	13.41	2.26
1.50	411.22	75.43	15.50	14.50	884.01	87.74	9.03	28.00	596.48	14.83	2.55
2.00	454.04	97.01	17.60	15.00	888.76	83.09	8.55	28.50	585.64	17.29	3.04
2.50	492.17	116.48	19.14	15.50	893.24	79.91	8.21	29.00	574.80	19.15	3.45
3.00	526.53	158.72	23.16	16.00	897.72	76.43	7.85	29.50	563.97	20.42	3.76
3.50	558.76	151.69	21.35	16.50	902.28	73.57	7.54	30.00	553.53	22.38	4.21
4.00	585.96	139.09	19.18	17.00	906.78	71.27	7.29	30.50	543.72	24.07	4.63
4.50	612.62	137.93	18.38	17.50	911.01	69.44	7.08	31.00	533.91	25.16	4.95
5.00	636.61	142.34	18.27	18.00	912.85	64.40	6.59	31.50	524.11	25.96	5.21
5.50	659.16	158.09	19.34	18.50	896.48	36.37	3.90	32.00	514.92	26.67	5.46
6.00	679.44	170.21	20.03	19.00	861.43	11.92	1.37	32.50	505.95	28.70	6.01
6.50	698.72	157.83	18.43	19.50	839.10	15.45	1.81	33.00	496.97	32.12	6.91
7.00	717.25	154.70	17.74	20.00	820.65	9.10	1.10	33.50	488.05	29.30	6.39
7.50	735.08	153.47	17.27	20.50	805.21	4.94	0.61	34.00	479.66	30.61	6.82
8.00	751.74	144.71	16.14	21.00	790.59	2.16	0.27	34.50	471.52	29.97	6.79
8.50	767.60	138.95	15.33	21.50	778.44	1.11	0.14	35.00	463.62	31.17	7.21
9.00	783.03	133.42	14.56	22.00	766.88	0.53	0.07	35.50	455.96	29.61	6.94
9.50	796.57	128.58	13.90	22.50	755.87	1.62	0.21	36.00	448.54	29.69	7.09
10.00	810.12	127.63	13.61	23.00	743.58	0.63	0.08	36.50	441.37	30.52	7.43
10.50	823.66	130.39	13.67	24.00	718.85	9.10	1.25	37.00	434.44	30.49	7.55
11.00	834.38	130.17	13.50	24.50	698.92	2.07	0.30	37.50	428.35	30.50	7.67
11.50	844.06	131.59	13.49	25.00	678.37	4.02	0.60	38.50	417.61	20.56	5.18
12.00	853.74	122.91	12.58	25.50	661.60	6.95	1.06	39.00	412.86	15.61	3.93
12.50	861.11	111.04	11.42	26.00	645.94	11.89	1.88				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-58 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 1 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	313.95	0.00	0.00	13.00	773.12	30.13	3.75	26.50	739.63	2.52	0.34
0.50	314.20	0.05	0.02	13.50	784.71	26.84	3.31	27.00	724.33	6.22	0.85
1.00	317.19	1.64	0.52	14.00	794.44	28.41	3.45	27.50	708.97	1.98	0.28
1.50	326.26	0.01	0.00	14.50	804.18	29.47	3.54	28.00	693.60	2.25	0.33
2.00	342.68	3.37	0.97	15.00	813.30	31.15	3.69	28.50	679.03	6.78	1.01
2.50	364.55	5.10	1.38	15.50	821.64	29.81	3.50	29.00	664.46	10.81	1.65
3.00	389.85	8.10	2.03	16.00	829.99	28.86	3.36	29.50	649.88	5.97	0.91
3.50	416.72	10.73	2.51	16.50	837.85	27.70	3.20	30.00	635.78	17.63	2.85
4.00	443.74	13.11	2.87	17.00	845.41	26.04	2.99	30.50	622.41	20.56	3.42
4.50	470.06	14.49	2.99	17.50	852.53	25.02	2.85	31.00	609.05	22.50	3.84
5.00	494.99	17.46	3.41	18.00	859.33	23.82	2.70	31.50	595.69	24.04	4.21
5.50	519.12	17.13	3.19	18.50	865.55	23.30	2.62	32.00	583.32	26.47	4.75
6.00	542.03	18.02	3.22	19.00	870.33	22.92	2.57	32.50	571.28	29.73	5.49
6.50	564.35	10.40	1.81	19.50	872.78	24.17	2.69	33.00	559.24	34.59	6.59
7.00	584.99	12.26	2.05	20.00	872.11	26.24	2.92	33.50	547.27	30.92	5.99
7.50	605.07	12.88	2.08	20.50	867.88	28.47	3.18	34.00	536.01	33.06	6.57
8.00	624.22	13.73	2.15	21.00	862.83	28.12	3.16	34.50	525.07	32.32	6.56
8.50	642.44	16.61	2.52	21.50	855.68	27.97	3.17	35.00	514.44	33.89	7.05
9.00	660.17	18.18	2.68	22.00	847.72	26.23	3.00	35.50	504.14	31.39	6.64
9.50	675.93	20.32	2.92	22.50	839.01	23.64	2.74	36.00	494.15	31.70	6.85
10.00	691.68	21.07	2.96	23.00	828.49	22.26	2.62	36.50	484.48	32.63	7.22
10.50	707.44	23.01	3.15	24.00	807.25	19.10	2.31	37.00	475.13	32.48	7.34
11.00	721.69	25.26	3.38	24.50	795.35	18.30	2.25	37.50	466.37	32.32	7.45
11.50	735.38	25.47	3.35	25.00	782.83	19.22	2.40	38.50	450.12	31.87	7.62
12.00	749.07	26.28	3.39	25.50	769.32	17.63	2.24	39.00	442.60	28.85	6.97
12.50	761.35	27.30	3.46	26.00	754.88	10.57	1.38				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-59 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.68	0.03	0.01	13.00	864.29	92.46	9.66	26.50	631.97	6.18	0.97
0.50	326.99	6.16	1.85	13.50	870.70	87.35	9.12	27.00	619.50	9.85	1.57
1.00	364.67	52.08	12.50	14.00	875.68	83.57	8.71	27.50	607.88	6.77	1.10
1.50	411.42	70.13	14.56	14.50	880.66	79.49	8.28	28.00	596.46	5.19	0.86
2.00	454.13	78.32	14.71	15.00	885.43	75.92	7.90	28.50	586.00	2.55	0.43
2.50	492.13	89.82	15.43	15.50	889.94	73.01	7.58	29.00	575.54	0.31	0.05
3.00	526.32	103.13	16.38	16.00	894.45	70.30	7.29	29.50	565.09	3.04	0.54
3.50	558.32	113.53	16.90	16.50	899.05	67.90	7.02	30.00	555.02	5.97	1.09
4.00	585.22	123.43	17.42	17.00	903.57	65.68	6.78	30.50	545.58	8.73	1.63
4.50	611.56	128.49	17.36	17.50	907.85	63.80	6.57	31.00	536.14	10.79	2.05
5.00	635.23	144.12	18.49	18.00	909.73	60.42	6.23	31.50	526.70	12.95	2.52
5.50	657.48	130.47	16.56	18.50	893.39	36.76	3.95	32.00	517.85	15.10	3.00
6.00	677.48	120.77	15.13	19.00	858.36	15.79	1.81	32.50	509.20	18.25	3.72
6.50	696.50	115.55	14.23	19.50	836.05	22.10	2.57	33.00	500.54	22.89	4.79
7.00	714.82	122.33	14.61	20.00	817.62	18.53	2.22	33.50	491.94	20.99	4.46
7.50	732.46	112.99	13.36	20.50	802.21	15.84	1.94	34.00	483.82	23.57	5.12
8.00	748.96	113.29	13.14	21.00	787.62	14.63	1.82	34.50	475.94	23.99	5.31
8.50	764.68	112.87	12.86	21.50	775.53	14.12	1.79	35.00	468.27	25.72	5.81
9.00	779.99	110.86	12.44	22.00	764.04	13.31	1.71	35.50	460.83	24.88	5.71
9.50	793.47	109.08	12.09	22.50	753.12	12.33	1.61	36.00	453.62	25.77	6.02
10.00	806.94	109.41	11.94	23.00	740.99	13.56	1.80	36.50	446.62	27.57	6.58
10.50	820.41	113.74	12.18	24.00	716.58	28.37	3.81	37.00	439.86	28.31	6.88
11.00	831.09	115.86	12.23	24.50	696.84	15.01	2.11	37.50	433.90	29.25	7.23
11.50	840.74	113.61	11.90	25.00	676.50	16.25	2.35	38.50	423.36	19.41	4.80
12.00	850.39	104.86	10.98	25.50	659.96	15.09	2.24	39.00	418.68	14.53	3.59
12.50	857.75	98.00	10.25	26.00	644.58	11.17	1.70				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-60 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 2 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	314.55	0.00	0.00	13.00	748.62	59.93	7.41	26.50	747.54	4.31	0.57
0.50	314.78	0.17	0.05	13.50	760.42	56.73	6.94	27.00	734.26	6.29	0.85
1.00	317.48	1.43	0.45	14.00	770.47	57.88	6.99	27.50	720.69	0.76	0.10
1.50	325.54	2.51	0.76	14.50	780.53	58.92	7.02	28.00	707.08	5.23	0.75
2.00	340.02	9.23	2.64	15.00	790.01	60.04	7.06	28.50	693.70	11.05	1.62
2.50	359.28	14.07	3.77	15.50	798.76	58.59	6.83	29.00	680.32	15.97	2.40
3.00	381.68	19.67	4.90	16.00	807.52	57.53	6.65	29.50	666.94	20.29	3.14
3.50	405.66	24.39	5.67	16.50	815.82	56.13	6.44	30.00	653.83	25.18	4.00
4.00	430.11	28.54	6.22	17.00	823.85	54.00	6.15	30.50	641.15	29.10	4.75
4.50	454.21	31.84	6.55	17.50	831.46	52.79	5.97	31.00	628.47	31.92	5.35
5.00	477.37	36.08	7.03	18.00	838.75	51.20	5.75	31.50	615.79	34.64	5.96
5.50	499.95	37.40	6.96	18.50	845.48	50.47	5.63	32.00	603.81	37.36	6.59
6.00	521.59	40.06	7.13	19.00	850.79	49.66	5.51	32.50	592.05	41.30	7.50
6.50	542.76	33.59	5.83	19.50	853.92	49.53	5.48	33.00	580.30	46.65	8.74
7.00	562.58	36.27	6.06	20.00	854.29	50.36	5.57	33.50	568.60	43.55	8.29
7.50	581.94	56.01	8.78	20.50	851.59	50.96	5.65	34.00	557.47	46.22	9.04
8.00	600.51	39.34	6.15	21.00	848.20	48.85	5.45	34.50	546.60	46.15	9.22
8.50	618.29	43.06	6.51	21.50	842.99	46.86	5.27	35.00	535.98	47.93	9.82
9.00	635.65	45.30	6.65	22.00	837.04	43.41	4.93	35.50	525.62	45.77	9.54
9.50	651.27	47.88	6.85	22.50	830.40	38.95	4.48	36.00	515.52	46.17	9.84
10.00	666.89	50.66	7.06	23.00	821.93	35.62	4.15	36.50	505.67	47.42	10.35
10.50	682.51	51.44	7.01	24.00	804.77	28.38	3.41	37.00	496.08	47.43	10.57
11.00	696.75	53.90	7.18	24.50	794.93	26.62	3.24	37.50	487.02	47.17	10.72
11.50	710.48	55.07	7.19	25.00	784.49	25.76	3.18	38.50	469.97	46.62	11.01
12.00	724.22	55.83	7.16	25.50	773.09	22.66	2.85	39.00	461.95	43.40	10.37
12.50	736.65	57.00	7.18	26.00	760.78	13.97	1.80				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-61 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.72	0.43	0.14	13.00	864.70	66.35	7.13	26.50	631.79	10.64	1.71
0.50	325.60	4.95	1.50	13.50	871.11	61.84	6.63	27.00	619.28	6.53	1.07
1.00	363.50	53.25	12.78	14.00	876.09	58.76	6.29	27.50	607.63	7.88	1.31
1.50	410.45	60.50	12.85	14.50	881.07	55.18	5.89	28.00	596.17	9.42	1.61
2.00	453.35	67.90	13.03	15.00	885.84	52.41	5.59	28.50	585.70	11.55	2.01
2.50	491.53	70.82	12.59	15.50	890.35	49.90	5.31	29.00	575.23	13.28	2.36
3.00	525.88	76.07	12.64	16.00	894.85	47.60	5.05	29.50	564.75	14.50	2.64
3.50	558.02	78.63	12.35	16.50	899.44	45.81	4.85	30.00	554.68	16.73	3.11
4.00	585.03	82.02	12.30	17.00	903.97	43.88	4.63	30.50	545.24	18.69	3.55
4.50	611.46	82.29	11.86	17.50	908.24	41.91	4.41	31.00	535.80	19.95	3.87
5.00	635.20	91.85	12.63	18.00	910.11	39.54	4.16	31.50	526.36	21.01	4.16
5.50	657.52	94.03	12.51	18.50	893.76	16.09	1.77	32.00	517.52	22.67	4.58
6.00	677.58	89.37	11.65	19.00	858.73	6.48	0.76	32.50	508.88	25.43	5.26
6.50	696.65	72.30	9.40	19.50	836.42	0.03	0.00	33.00	500.23	29.28	6.22
7.00	715.01	77.84	9.82	20.00	817.96	2.71	0.33	33.50	491.64	26.89	5.79
7.50	732.68	82.37	10.11	20.50	802.52	4.37	0.55	34.00	483.55	28.80	6.33
8.00	749.21	81.84	9.85	21.00	787.90	4.35	0.55	34.50	475.68	29.03	6.50
8.50	764.96	79.79	9.44	21.50	775.77	3.82	0.49	35.00	468.04	30.29	6.92
9.00	780.30	74.25	8.69	22.00	764.24	3.19	0.42	35.50	460.62	29.37	6.81
9.50	793.79	76.76	8.82	22.50	753.28	2.53	0.34	36.00	453.43	29.98	7.08
10.00	807.28	78.97	8.91	23.00	741.10	3.25	0.44	36.50	446.47	31.32	7.54
10.50	820.77	85.18	9.40	24.00	716.61	12.44	1.71	37.00	439.73	31.78	7.79
11.00	831.47	84.98	9.27	24.50	696.83	3.88	0.56	37.50	433.81	32.56	8.12
11.50	841.12	83.13	8.99	25.00	676.45	3.00	0.45	38.50	423.33	22.88	5.71
12.00	850.78	78.97	8.49	25.50	659.86	3.31	0.50	39.00	418.69	17.44	4.35
12.50	858.14	70.61	7.60	26.00	644.43	5.48	0.86				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-62 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.45	0.00	0.00	13.00	750.01	53.74	6.69	26.50	746.42	5.37	0.72
0.50	312.73	0.12	0.04	13.50	761.81	50.44	6.21	27.00	733.09	3.54	0.49
1.00	315.68	1.43	0.45	14.00	771.86	41.99	5.16	27.50	719.52	8.57	1.21
1.50	324.15	2.80	0.86	14.50	781.92	52.43	6.28	28.00	705.91	13.86	2.00
2.00	339.05	9.90	2.84	15.00	791.38	54.07	6.40	28.50	692.59	19.14	2.84
2.50	358.65	15.60	4.17	15.50	800.12	52.83	6.19	29.00	679.27	23.82	3.63
3.00	381.30	21.15	5.26	16.00	808.86	51.79	6.02	29.50	665.95	27.70	4.34
3.50	405.48	25.87	6.00	16.50	817.15	50.40	5.81	30.00	652.91	32.06	5.16
4.00	430.09	29.76	6.47	17.00	825.16	48.59	5.56	30.50	640.31	35.36	5.85
4.50	454.33	32.72	6.72	17.50	832.75	47.30	5.38	31.00	627.72	37.57	6.37
5.00	477.62	37.03	7.20	18.00	840.02	45.73	5.16	31.50	615.13	39.98	6.95
5.50	500.33	37.42	6.96	18.50	846.71	44.94	5.04	32.00	603.25	42.50	7.58
6.00	522.08	39.67	7.06	19.00	851.92	44.63	4.98	32.50	591.59	45.74	8.38
6.50	543.37	33.28	5.77	19.50	854.87	44.18	4.91	33.00	579.93	50.88	9.62
7.00	563.29	35.46	5.92	20.00	855.00	44.25	4.92	33.50	568.34	47.69	9.16
7.50	582.74	36.41	5.88	20.50	852.07	43.78	4.89	34.00	557.30	49.85	9.82
8.00	601.40	36.95	5.79	21.00	848.46	40.59	4.57	34.50	546.53	49.48	9.95
8.50	619.26	40.09	6.08	21.50	843.04	37.91	4.30	35.00	536.01	50.86	10.48
9.00	636.70	42.05	6.20	22.00	836.91	33.84	3.89	35.50	525.74	48.79	10.23
9.50	652.38	44.07	6.33	22.50	830.11	29.14	3.39	36.00	515.73	49.18	10.54
10.00	668.06	45.69	6.40	23.00	821.52	25.63	3.02	36.50	505.98	50.03	10.97
10.50	683.74	46.61	6.38	24.00	804.14	18.51	2.25	37.00	496.49	49.94	11.18
11.00	698.03	48.12	6.45	24.50	794.18	16.97	2.09	37.50	487.51	49.56	11.32
11.50	711.80	49.15	6.46	25.00	783.62	16.13	2.02	38.50	470.63	48.88	11.59
12.00	725.58	49.87	6.43	25.50	772.11	12.74	1.62	39.00	462.69	45.34	10.86
12.50	738.02	50.83	6.44	26.00	759.70	4.05	0.53				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-63 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดร้อนที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.96	0.59	0.19	13.00	873.15	79.50	8.34	26.50	622.12	83.97	15.60
0.50	327.44	7.61	2.27	13.50	879.06	74.79	7.84	27.00	609.61	78.96	14.88
1.00	369.98	68.97	15.71	14.00	883.62	70.43	7.38	27.50	598.00	78.75	15.17
1.50	421.66	98.29	18.90	14.50	888.17	66.28	6.94	28.00	586.59	77.84	15.30
2.00	467.33	111.52	19.27	15.00	892.55	62.40	6.53	28.50	576.21	77.86	15.62
2.50	506.88	122.87	19.51	15.50	896.72	58.63	6.14	29.00	565.83	77.08	15.77
3.00	541.82	126.33	18.91	16.00	900.89	55.76	5.83	29.50	555.45	76.20	15.90
3.50	574.14	138.11	19.39	16.50	905.20	53.05	5.54	30.00	545.48	75.63	16.10
4.00	600.75	139.40	18.83	17.00	909.45	50.70	5.28	30.50	536.17	74.72	16.19
4.50	626.91	135.04	17.72	17.50	913.47	47.98	4.99	31.00	526.87	73.62	16.24
5.00	650.29	134.36	17.12	18.00	914.88	45.27	4.72	31.50	517.56	72.31	16.24
5.50	672.19	131.96	16.41	18.50	896.31	13.24	1.46	32.00	508.87	71.62	16.38
6.00	691.76	132.19	16.04	19.00	857.62	35.47	4.31	32.50	500.38	71.13	16.57
6.50	710.31	125.64	15.03	19.50	833.59	35.14	4.40	33.00	491.88	72.13	17.19
7.00	728.29	126.26	14.78	20.00	814.08	44.93	5.84	33.50	483.44	68.29	16.45
7.50	745.57	123.08	14.17	20.50	797.96	50.91	6.82	34.00	475.52	67.47	16.53
8.00	761.69	121.06	13.71	21.00	782.77	54.02	7.41	34.50	467.82	65.67	16.33
8.50	777.07	118.28	13.21	21.50	770.33	55.68	7.79	35.00	460.36	64.41	16.27
9.00	792.05	113.60	12.54	22.00	758.54	57.09	8.14	35.50	453.13	61.78	15.79
9.50	805.21	110.24	12.04	22.50	747.38	58.13	8.43	36.00	446.14	60.19	15.59
10.00	818.38	106.37	11.50	23.00	734.91	56.96	8.40	36.50	439.37	59.42	15.64
10.50	831.54	103.61	11.08	24.00	709.83	10.98	1.57	37.00	432.84	57.89	15.44
11.00	841.82	102.23	10.83	24.50	689.04	69.19	11.16	37.50	427.17	56.72	15.31
11.50	851.03	99.92	10.51	25.00	667.65	74.80	12.62	38.50	417.28	39.53	10.46
12.00	860.24	91.31	9.60	25.50	650.56	77.31	13.49	39.00	412.96	31.51	8.26
12.50	867.11	84.34	8.86	26.00	634.80	80.45	14.51				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-64 การกระจายตัวของอุณหภูมิตำแหน่งจุดเย็นที่ 4 ที่ได้จากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ [6] ของเหล็กแผ่นม้วนกลม code D

Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error	Time (hr)	Temp (K)	$ \Delta $ (K)	% Error
0.00	312.65	0.00	0.00	13.00	751.61	66.74	8.16	26.50	746.10	24.85	3.45
0.50	312.93	0.08	0.02	13.50	763.39	63.26	7.65	27.00	732.65	23.30	3.28
1.00	315.88	1.43	0.45	14.00	773.42	64.23	7.67	27.50	718.96	28.61	4.14
1.50	324.40	4.95	1.50	14.50	783.44	63.51	7.50	28.00	705.23	34.28	5.11
2.00	339.41	15.54	4.38	15.00	792.89	63.46	7.41	28.50	691.81	39.76	6.10
2.50	359.18	23.67	6.18	15.50	801.60	61.85	7.16	29.00	678.39	43.94	6.93
3.00	382.02	31.13	7.53	16.00	810.31	60.24	6.92	29.50	664.97	47.22	7.64
3.50	406.39	37.66	8.48	16.50	818.56	58.09	6.63	30.00	651.84	50.99	8.49
4.00	431.16	42.59	8.99	17.00	826.54	55.71	6.31	30.50	639.18	54.13	9.25
4.50	455.55	46.80	9.32	17.50	834.09	53.76	6.05	31.00	626.51	55.96	9.81
5.00	478.95	51.60	9.73	18.00	841.33	51.82	5.80	31.50	613.85	57.70	10.37
5.50	501.75	52.90	9.54	18.50	847.99	50.16	5.59	32.00	601.91	59.46	10.96
6.00	523.58	55.77	9.63	19.00	853.17	48.68	5.40	32.50	590.20	62.05	11.75
6.50	544.92	49.23	8.29	19.50	856.08	47.77	5.29	33.00	578.50	66.15	12.91
7.00	564.89	52.56	8.51	20.00	856.15	45.60	5.06	33.50	566.85	62.50	12.39
7.50	584.37	54.38	8.51	20.50	853.13	42.62	4.76	34.00	555.78	63.73	12.95
8.00	603.06	55.19	8.38	21.00	849.43	36.82	4.16	34.50	544.97	62.92	13.05
8.50	620.93	57.72	8.50	21.50	843.91	32.14	3.67	35.00	534.42	62.97	13.36
9.00	638.38	59.37	8.51	22.00	837.67	25.58	2.96	35.50	524.13	60.68	13.09
9.50	654.06	61.19	8.55	22.50	830.76	18.79	2.21	36.00	514.10	60.05	13.23
10.00	669.74	61.61	8.42	23.00	822.05	13.60	1.63	36.50	504.34	60.29	13.58
10.50	685.42	62.93	8.41	24.00	804.44	3.51	0.43	37.00	494.83	59.48	13.66
11.00	699.69	63.96	8.37	24.50	794.36	1.09	0.14	37.50	485.85	58.60	13.72
11.50	713.45	64.40	8.28	25.00	783.69	0.44	0.06	38.50	468.98	56.33	13.65
12.00	727.21	64.14	8.10	25.50	772.05	4.70	0.61	39.00	461.05	52.30	12.80
12.50	739.65	64.70	8.04	26.00	759.51	14.56	1.96				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-65 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	381.72	316.44	398.52	316.46	394.08	316.68	412.59	316.74
1.0	625	463.62	328.55	487.03	328.49	479.77	329.88	505.30	330.35
1.5	700	534.06	356.35	558.77	355.88	550.37	358.79	577.50	360.10
2.0	750	591.34	391.13	615.31	390.02	606.83	394.25	633.19	396.46
2.5	750	630.01	428.27	651.17	426.42	643.82	431.71	667.08	434.74
3.0	800	670.84	465.31	691.34	462.71	683.89	468.72	706.45	472.40
3.5	865	719.35	501.79	740.17	498.48	732.19	505.10	755.08	509.27
4.0	865	751.35	537.70	770.12	533.71	763.07	540.85	783.69	545.42
4.5	865	773.41	571.30	790.03	566.69	783.91	574.15	802.18	578.98
5.0	900	798.95	602.66	814.59	597.51	808.75	605.17	825.97	610.17
5.5	920	823.35	632.03	838.08	626.43	832.53	634.24	848.75	639.34
6.0	920	840.07	659.34	853.27	653.37	848.41	661.24	862.99	666.39
6.5	920	852.04	685.11	863.53	678.81	859.47	686.69	872.25	691.85
7.0	920	861.44	708.27	871.56	701.74	868.09	709.53	879.43	714.64
7.5	950	879.52	729.57	889.63	722.88	885.99	730.58	897.37	735.62
8.0	950	892.00	749.42	901.30	742.63	898.00	750.20	908.49	755.14
8.5	950	900.02	767.69	908.27	760.84	905.44	768.27	914.82	773.10
9.0	950	905.71	783.85	913.03	777.00	910.61	784.24	919.01	788.93
9.5	950	910.81	799.15	917.27	792.34	915.21	799.37	922.71	803.92
10.0	950	915.02	813.05	920.77	806.30	919.00	813.11	925.75	817.51
10.5	950	918.71	825.61	923.83	818.96	922.31	825.52	928.39	829.77
11.0	950	922.14	837.49	926.66	830.95	925.38	837.27	930.83	841.35
11.5	950	925.17	848.26	929.16	841.87	928.08	847.93	932.97	851.85
12.0	950	927.88	858.19	931.40	851.96	930.49	857.76	934.88	861.50
12.5	950	930.28	867.27	933.38	861.22	932.63	866.76	936.57	870.33
13.0	950	932.42	875.50	935.15	869.65	934.53	874.93	938.07	878.33
13.5	950	934.28	882.89	936.68	877.26	936.16	882.27	939.35	885.49
14.0	950	935.87	889.46	937.99	884.06	937.56	888.80	940.45	891.86

ตารางที่ ค-66 รูปแบบการอบอ่อนของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.1	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	381.72	316.44	398.52	316.46	394.08	316.68	412.59	316.74
1.0	625	463.62	328.55	487.03	328.49	479.77	329.88	505.3	330.35
1.5	700	534.06	356.35	558.77	355.88	550.37	358.79	577.5	360.1
2.0	750	591.34	391.13	615.31	390.02	606.83	394.25	633.19	396.46
2.5	750	628.64	428.21	649.6	426.37	642.37	431.66	665.38	434.68
3.0	750	651.97	464.83	669.65	462.22	663.78	468.22	683.2	471.91
3.5	800	685.63	499.41	703.28	496.1	697.01	502.52	716.49	506.7
4.0	865	732.22	532.03	751.28	528.15	744	534.92	765.07	539.47
4.5	865	762.92	564.09	780.08	559.73	773.75	566.9	792.7	571.71
5.0	865	780.58	595.26	795.11	590.41	789.96	597.88	806.01	602.87
5.5	865	794.43	624.35	806.99	619.02	802.69	626.62	816.63	631.71
6.0	900	816.63	651.18	829.05	645.44	824.57	653.06	838.43	658.2
6.5	920	838.02	675.64	850.09	669.62	845.67	677.22	859.17	682.34
7.0	920	852.37	698.12	863.31	691.89	859.4	699.45	871.68	704.52
7.5	920	862.07	718.97	871.69	712.6	868.38	720.06	879.25	725.05
8.0	920	869.55	738.12	878	731.65	875.19	738.98	884.82	743.86
8.5	920	878.62	756.05	886.34	749.52	883.79	756.68	892.65	761.44
9.0	950	891.63	772.83	899.27	766.27	896.62	773.26	905.4	777.9
9.5	950	902.8	788.28	910.07	781.74	907.53	788.56	915.93	793.06
10.0	950	909.03	802.14	915.52	795.67	913.34	802.32	920.9	806.67
10.5	950	914.11	815.1	919.87	808.71	918.01	815.16	924.8	819.37
11.0	950	918.07	826.66	923.21	820.38	921.61	826.62	927.73	830.67
11.5	950	921.18	836.82	925.81	830.67	924.41	836.69	929.97	840.59
12.0	950	924.29	846.99	928.4	840.97	927.2	846.77	932.21	850.5
12.5	950	926.65	855.4	930.36	849.55	929.32	855.11	933.89	858.69
13.0	950	928.89	863.52	932.22	857.83	931.32	863.17	935.48	866.59
13.5	950	931.03	871.38	934	865.86	933.23	870.96	937	874.23
14.0	950	932.95	878.58	935.58	873.25	934.93	878.11	938.34	881.23

ตารางที่ ค-67 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	381.72	316.44	398.52	316.46	394.08	316.68	412.59	316.74
1.0	625	463.62	328.55	487.03	328.49	479.77	329.88	505.3	330.35
1.5	700	534.06	356.35	558.77	355.88	550.37	358.79	577.5	360.1
2.0	750	591.34	391.13	615.31	390.02	606.83	394.25	633.19	396.46
2.5	750	628.64	428.21	649.6	426.37	642.37	431.66	665.38	434.68
3.0	750	650.73	464.79	668.23	462.18	662.46	468.16	681.66	471.85
3.5	750	670.74	498.79	686.07	495.5	681.1	501.88	697.93	506.06
4.0	800	700.57	529.49	716.14	525.66	710.78	532.24	728.04	536.73
4.5	865	744.22	558.78	761.23	554.54	754.83	561.37	773.69	566.06
5.0	865	770.53	587.7	785.92	583.07	780.27	590.17	797.29	595.01
5.5	865	785.57	614.99	798.97	609.98	794.25	617.23	809.17	622.14
6.0	865	796.89	640.35	808.52	635	804.58	642.28	817.6	647.22
6.5	865	809.15	663.66	819.74	658.03	816.18	665.26	828.13	670.18
7.0	900	828.79	685.15	839.51	679.33	835.68	686.48	847.82	691.36
7.5	920	849.1	705.65	859.75	699.69	855.85	706.78	867.91	711.59
8.0	920	861.19	724.82	870.72	718.78	867.35	725.81	878.21	730.53
8.5	920	869.51	742.9	877.82	736.78	875	743.73	884.52	748.35
9.0	920	875.85	759.43	883.18	753.27	880.79	760.08	889.27	764.59
9.5	920	880.65	773.67	887.18	767.53	885.11	774.14	892.72	778.52
10.0	920	887.78	787.5	893.79	781.39	891.9	787.81	898.96	792.06
10.5	950	900.3	800.36	906.5	794.32	904.4	800.58	911.67	804.69
11.0	950	909.73	812.72	915.74	806.76	913.67	812.85	920.72	816.83
11.5	950	915.76	824.51	921.15	818.63	919.36	824.56	925.73	828.41
12.0	950	919.86	835.33	924.65	829.55	923.12	835.3	928.85	839.01
12.5	950	922.95	844.68	927.25	839.01	925.92	844.57	931.12	848.14
13.0	950	925.66	853.48	929.52	847.95	928.37	853.3	933.09	856.74
13.5	950	928.32	862.19	931.74	856.78	930.76	861.94	935.01	865.23
14.0	950	930.59	870.17	933.64	864.92	932.81	869.86	936.63	873.01

ตารางที่ ค-68 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	379.81	326.35	379.93	326.36	388.01	326.48	395.92	326.58
1.0	600	453.62	336.37	453.86	336.23	465.16	337.05	477.57	337.82
1.5	650	511.20	359.21	511.49	358.44	522.78	360.30	536.04	362.14
2.0	700	561.90	389.63	562.21	387.91	573.08	390.74	586.41	393.59
2.5	750	611.52	422.72	611.83	419.97	622.31	423.69	635.62	427.41
3.0	800	655.79	457.03	656.07	453.24	665.99	457.74	679.04	462.21
3.5	800	690.51	491.25	690.73	486.46	699.85	491.62	712.17	496.70
4.0	860	723.86	524.22	724.02	518.56	732.60	524.22	744.34	529.72
4.5	860	753.46	556.36	753.55	549.90	761.53	555.99	772.63	561.84
5.0	860	774.13	586.90	774.14	579.72	781.37	586.13	791.52	592.21
5.5	900	801.56	615.71	801.50	607.94	808.45	614.60	818.19	620.85
6.0	900	819.34	642.43	819.20	634.21	825.57	641.01	834.59	647.34
6.5	900	831.17	667.41	830.96	658.81	836.71	665.70	844.87	672.04
7.0	950	859.39	690.93	859.14	682.05	865.03	689.00	873.27	695.33
7.5	950	877.77	713.67	877.46	704.58	883.00	711.58	890.89	717.90
8.0	950	890.30	734.90	889.94	725.64	895.03	732.65	902.27	738.92
8.5	970	903.77	754.86	903.38	745.49	908.17	752.48	914.94	758.66
9.0	970	914.52	773.55	914.09	764.10	918.55	771.03	924.84	777.12
9.5	970	921.88	790.89	921.41	781.42	925.49	788.26	931.23	794.22
10.0	970	927.31	806.26	926.81	796.83	930.56	803.53	935.79	809.34
10.5	970	931.80	820.24	931.27	810.91	934.72	817.44	939.49	823.08
11.0	970	935.85	833.33	935.31	824.12	938.48	830.48	942.83	835.94
11.5	970	939.19	844.91	938.62	835.86	941.56	842.03	945.54	847.29
12.0	970	942.32	855.97	941.75	847.10	944.46	853.07	948.09	858.14
12.5	970	944.89	865.52	944.30	856.87	946.82	862.62	950.16	867.50
13.0	970	947.43	874.97	946.83	866.55	949.16	872.10	952.21	876.77
13.5	970	949.68	883.54	949.08	875.37	951.23	880.70	954.02	885.18
14.0	970	951.75	891.54	951.14	883.63	953.13	888.74	955.68	893.02
14.5	970	953.63	898.97	953.03	891.33	954.86	896.22	957.18	900.30
15.0	970	955.32	905.82	954.72	898.46	956.42	903.13	958.53	907.01
15.5	970	956.87	912.10	956.28	905.03	957.84	909.48	959.77	913.17
16.0	970	958.26	917.81	957.67	911.02	959.11	915.26	960.86	918.76
16.5	970	959.47	922.94	958.89	916.46	960.22	920.48	961.82	923.79
17.0	970	960.52	927.50	959.95	921.33	961.18	925.14	962.64	928.26
17.5	970	961.50	931.76	960.94	925.89	962.08	929.50	963.42	932.44



Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	962.42	935.72	961.87	930.14	962.93	933.55	964.14	936.33
18.5	970	963.23	939.28	962.70	933.99	963.67	937.21	964.78	939.82
19.0	970	963.94	942.44	963.42	937.42	964.32	940.46	965.33	942.92
19.5	970	964.54	945.18	964.04	940.46	964.88	943.32	965.80	945.61
20.0	970	965.10	947.68	964.61	943.23	965.38	945.91	966.23	948.07
20.5	970	965.63	950.03	965.16	945.84	965.87	948.36	966.64	950.37
21.0	970	966.10	952.09	965.65	948.15	966.31	950.52	967.01	952.40
21.5	970	966.50	953.86	966.07	950.17	966.68	952.38	967.32	954.14
22.0	970	966.84	955.34	966.43	951.89	966.99	953.96	967.57	955.60
22.5	970	967.13	956.63	966.74	953.40	967.25	955.33	967.79	956.86
23.0	970	967.42	957.95	967.05	954.93	967.53	956.74	968.02	958.16
23.5	970	967.67	959.10	967.32	956.29	967.76	957.98	968.21	959.30
24.0	970	967.89	960.10	967.55	957.48	967.96	959.05	968.38	960.27
24.5	970	968.06	960.92	967.75	958.48	968.13	959.95	968.51	961.09
25.0	970	968.20	961.60	967.90	959.33	968.26	960.70	968.61	961.75
25.5	970	968.35	962.35	968.07	960.23	968.40	961.51	968.73	962.49
26.0	970	968.49	963.01	968.22	961.04	968.53	962.22	968.84	963.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-69 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	379.81	326.35	379.93	326.36	388.01	326.48	395.92	326.58
1.0	600	453.62	336.37	453.86	336.23	465.16	337.05	477.57	337.82
1.5	650	511.20	359.21	511.49	358.44	522.78	360.30	536.04	362.14
2.0	700	561.90	389.63	562.21	387.91	573.08	390.74	586.41	393.59
2.5	750	611.52	422.72	611.83	419.97	622.31	423.69	635.62	427.41
3.0	800	657.94	457.17	658.23	453.37	668.21	457.89	681.36	462.39
3.5	800	688.17	491.58	688.38	486.76	697.33	491.95	709.48	497.06
4.0	800	707.39	524.28	707.53	518.54	715.35	524.20	726.10	529.73
4.5	860	745.66	555.24	745.74	548.73	753.64	554.76	764.41	560.60
5.0	860	768.42	584.96	768.42	577.81	775.64	584.15	785.77	590.22
5.5	860	782.55	612.58	782.46	604.89	788.89	611.42	797.93	617.61
6.0	860	793.51	638.00	793.33	629.87	799.07	636.49	807.11	642.71
6.5	900	816.74	661.75	816.51	653.30	822.26	659.96	830.15	666.17
7.0	900	832.92	683.90	832.62	675.23	838.02	681.91	845.56	688.08
7.5	900	842.67	704.30	842.31	695.50	847.20	702.15	854.04	708.25
8.0	900	851.79	723.18	851.38	714.29	855.86	720.87	862.09	726.86
8.5	950	875.30	741.07	874.88	732.16	879.62	738.67	886.10	744.54
9.0	950	892.07	758.38	891.62	749.49	896.20	755.95	902.65	761.73
9.5	950	901.12	775.00	900.63	766.13	904.79	772.54	910.66	778.22
10.0	950	909.16	790.61	908.65	781.78	912.48	788.11	917.83	793.66
10.5	970	919.72	805.32	919.19	796.55	922.87	802.77	927.96	808.20
11.0	970	927.59	818.72	927.06	810.03	930.53	816.14	935.32	821.42
11.5	970	933.02	831.39	932.48	822.81	935.69	828.78	940.10	833.92
12.0	970	937.36	843.11	936.80	834.65	939.76	840.47	943.80	845.45
12.5	970	940.99	854.01	940.43	845.69	943.15	851.35	946.84	856.17
13.0	970	943.54	862.89	942.98	854.77	945.52	860.25	948.93	864.89
13.5	970	946.09	871.77	945.53	863.86	947.88	869.15	951.01	873.61
14.0	970	948.57	880.47	948.00	872.76	950.17	877.86	953.03	882.15
14.5	970	950.41	887.63	949.84	880.15	951.87	885.06	954.51	889.17
15.0	970	952.25	894.78	951.68	887.53	953.57	892.25	956.00	896.18
15.5	970	954.07	901.85	953.50	894.84	955.24	899.36	957.46	903.12
16.0	970	955.42	907.32	954.87	900.57	956.49	904.90	958.54	908.49
16.5	970	956.77	912.80	956.23	906.30	957.74	910.44	959.62	913.85
17.0	970	958.13	918.27	957.59	912.03	958.98	915.97	960.70	919.22
17.5	970	959.29	923.04	958.76	917.07	960.06	920.82	961.63	923.90

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	960.36	927.46	959.84	921.74	961.04	925.32	962.48	928.23
18.5	970	961.34	931.53	960.83	926.07	961.94	929.46	963.26	932.23
19.0	970	962.21	935.25	961.72	930.05	962.74	933.26	963.95	935.88
19.5	970	963.00	938.62	962.52	933.68	963.47	936.72	964.57	939.18
20.0	970	963.74	941.78	963.26	937.08	964.14	939.96	965.15	942.28
20.5	970	964.40	944.67	963.95	940.22	964.76	942.93	965.67	945.11
21.0	970	965.00	947.26	964.56	943.05	965.31	945.61	966.14	947.66
21.5	970	965.52	949.57	965.09	945.59	965.78	948.00	966.54	949.92
22.0	970	965.96	951.58	965.55	947.83	966.19	950.10	966.89	951.90
22.5	970	966.38	953.46	965.98	949.94	966.57	952.06	967.21	953.75
23.0	970	966.77	955.24	966.39	951.93	966.94	953.93	967.52	955.50
23.5	970	967.13	956.83	966.76	953.73	967.27	955.59	967.80	957.06
24.0	970	967.43	958.23	967.09	955.31	967.55	957.06	968.04	958.43
24.5	970	967.70	959.42	967.36	956.70	967.80	958.33	968.24	959.60
25.0	970	967.92	960.47	967.61	957.93	968.01	959.45	968.41	960.63
25.5	970	968.13	961.43	967.83	959.06	968.20	960.48	968.57	961.58
26.0	970	968.30	962.23	968.02	960.02	968.36	961.35	968.70	962.37



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-70 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	379.81	326.35	379.93	326.36	388.01	326.48	395.92	326.58
1.0	600	453.62	336.37	453.86	336.23	465.16	337.05	477.57	337.82
1.5	650	511.2	359.21	511.49	358.44	522.78	360.3	536.04	362.14
2.0	700	561.9	389.63	562.21	387.91	573.08	390.74	586.41	393.59
2.5	750	611.52	422.72	611.83	419.97	622.31	423.69	635.62	427.41
3.0	800	657.94	457.17	658.23	453.37	668.21	457.89	681.36	462.39
3.5	800	688.17	491.58	688.38	486.76	697.33	491.95	709.48	497.06
4.0	800	707.07	524.27	707.2	518.53	715.01	524.19	725.74	529.72
4.5	800	723.44	554.33	723.49	547.82	730.47	553.78	740.05	559.57
5.0	860	754.51	582.7	754.49	575.57	761.51	581.76	771.01	587.73
5.5	860	776.7	609.01	776.61	601.41	783.22	607.77	792.37	613.85
6.0	860	789.66	633.78	789.47	625.83	795.38	632.3	803.66	638.44
6.5	860	798.99	655.97	798.74	647.76	804.05	654.25	811.47	660.34
7.0	860	811.84	676.58	811.53	668.2	816.52	674.65	823.42	680.67
7.5	900	829.13	695.96	828.77	687.48	833.68	693.89	840.42	699.82
8.0	900	842.71	714.18	842.31	705.64	846.96	712	853.39	717.83
8.5	900	851.17	731.1	850.72	722.55	854.98	728.82	860.88	734.53
9.0	900	857.31	746.76	856.83	738.23	860.71	744.39	866.05	749.96
9.5	900	867.16	761.38	866.66	752.92	870.38	758.95	875.43	764.37
10.0	950	886.28	775.48	885.78	767.12	889.7	773.04	895.01	778.32
10.5	950	900.84	789.26	900.33	781	904.14	786.84	909.38	792.01
11.0	950	908.3	802.62	907.77	794.96	911.28	800.22	916.15	805.28
11.5	950	913.51	815.05	912.97	806.99	916.19	812.64	920.62	817.56
12.0	950	918.07	826.93	917.52	818.97	920.46	824.5	924.48	829.28
12.5	970	928.73	838	928.19	830.16	931.19	835.57	935.21	840.21
13.0	970	936.09	848.59	935.56	840.88	938.44	846.16	942.32	850.67
13.5	970	940.59	858.62	940.05	851.05	942.71	856.21	946.29	860.58
14.0	970	944.13	867.99	943.59	860.58	946.01	865.59	949.27	869.83
14.5	970	946.58	875.95	946.04	868.72	948.28	873.58	951.28	877.66
15.0	970	949.03	883.91	948.49	876.86	950.56	881.56	953.3	885.49
15.5	970	951.01	890.89	950.48	884.03	952.4	888.57	954.92	892.35
16.0	970	952.81	897.47	952.28	890.81	954.06	895.18	956.38	898.81
16.5	970	954.37	903.33	953.85	896.88	955.51	901.08	957.64	904.56
17.0	970	955.5	907.87	954.99	901.64	956.55	905.68	958.55	909.01
17.5	970	956.63	912.4	956.13	906.4	957.59	910.28	959.46	913.47

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	957.76	916.94	957.27	911.16	958.64	914.87	960.36	917.92
18.5	970	958.89	921.48	958.41	915.92	959.68	919.47	961.27	922.37
19.0	970	959.77	925.12	959.3	919.78	960.5	923.17	961.97	925.94
19.5	970	960.51	928.25	960.05	923.12	961.18	926.36	962.56	929.01
20.0	970	961.25	931.37	960.8	926.46	961.86	929.56	963.14	932.08
20.5	970	961.98	934.5	961.55	929.79	962.54	932.75	963.73	935.14
21.0	970	962.72	937.62	962.29	933.13	963.22	935.94	964.31	938.21
21.5	970	963.23	939.85	962.82	935.55	963.69	938.23	964.71	940.39
22.0	970	963.72	941.99	963.32	937.89	964.14	940.44	965.1	942.49
22.5	970	964.21	944.13	963.82	940.22	964.59	942.65	965.49	944.6
23.0	970	964.7	946.27	964.33	942.55	965.04	944.86	965.87	946.7
23.5	970	965.16	948.27	964.79	944.74	965.47	946.92	966.23	948.66
24.0	970	965.48	949.69	965.13	946.31	965.76	948.39	966.48	950.05
24.5	970	965.8	951.11	965.46	947.89	966.06	949.87	966.74	951.44
25.0	970	966.12	952.52	965.8	949.47	966.36	951.35	966.99	952.84
25.5	970	966.44	953.94	966.13	951.04	966.65	952.82	967.24	954.23
26.0	970	966.76	955.36	966.46	952.62	966.95	954.3	967.49	955.62

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-71 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.31	321.35	323.91	323.95	324.71	324.85	325.86	326.05
0.5	510	386.39	323.00	412.46	325.35	386.92	326.46	404.58	327.59
1.0	625	466.96	333.99	502.90	335.29	466.75	337.16	492.50	338.12
1.5	700	538.17	357.21	576.16	356.92	537.83	359.70	565.12	360.60
2.0	750	594.79	390.18	631.20	388.08	594.50	391.58	620.58	392.60
2.5	750	628.29	426.78	659.47	422.95	628.15	426.90	650.97	428.11
3.0	780	660.77	462.49	689.48	457.18	660.65	461.37	681.29	462.78
3.5	825	700.93	496.94	729.46	490.33	700.75	494.76	720.79	496.31
4.0	825	725.16	529.98	750.19	522.21	725.00	526.86	743.01	528.49
4.5	865	756.74	561.36	780.98	552.57	756.52	557.42	773.52	559.10
5.0	900	789.14	591.30	812.72	581.61	788.86	586.70	805.31	588.37
5.5	900	810.17	620.01	831.18	609.50	809.87	614.82	824.88	616.46
6.0	900	826.50	646.99	845.08	635.80	826.20	641.27	839.65	642.89
6.5	950	854.39	672.63	873.19	660.84	854.01	666.48	867.21	668.04
7.0	950	873.55	697.25	890.82	684.93	873.15	690.72	885.50	692.22
7.5	950	884.37	719.89	899.44	707.19	883.97	713.06	895.02	714.50
8.0	950	892.80	740.82	905.94	727.86	892.39	733.75	902.22	735.14
8.5	950	899.64	760.11	911.15	746.99	899.22	752.85	907.98	754.19
9.0	950	905.28	777.37	915.42	764.23	904.84	770.00	912.68	771.29
9.5	950	910.45	793.68	919.33	780.58	910.00	786.25	916.99	787.49
10.0	950	914.99	808.71	922.75	795.72	914.53	801.26	920.75	802.45
10.5	950	918.97	822.53	925.75	809.72	918.50	815.11	924.05	816.25
11.0	950	922.45	835.06	928.37	822.49	921.97	827.71	926.92	828.81
11.5	950	925.39	846.34	930.58	834.08	924.90	839.11	929.34	840.16
12.0	950	928.11	856.73	932.63	844.80	927.60	849.65	931.57	850.65
12.5	950	930.51	866.13	934.44	854.56	930.00	859.23	933.55	860.18
13.0	950	932.58	874.51	936.01	863.35	932.06	867.82	935.25	868.73
13.5	950	934.40	882.07	937.39	871.34	933.88	875.61	936.76	876.47
14.0	950	936.09	889.04	938.68	878.73	935.58	882.81	938.15	883.63
14.5	950	937.56	895.23	939.81	885.36	937.05	889.25	939.36	890.02
15.0	950	938.81	900.63	940.77	891.23	938.30	894.92	940.39	895.65
15.5	950	939.99	905.70	941.68	896.75	939.49	900.25	941.37	900.94
16.0	950	941.05	910.24	942.50	901.74	940.55	905.06	942.25	905.70
16.5	950	941.96	914.22	943.21	906.17	941.47	909.31	943.01	909.91
17.0	950	942.75	917.72	943.83	910.10	942.28	913.07	943.67	913.64
17.5	950	943.44	920.81	944.38	913.63	942.98	916.43	944.25	916.96

ตารางที่ ค-72 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.31	321.35	323.91	323.95	324.71	324.85	325.86	326.05
0.5	510	386.39	323.00	412.46	325.35	386.92	326.46	404.58	327.59
1.0	625	466.96	333.99	502.90	335.29	466.75	337.16	492.50	338.12
1.5	700	538.17	357.21	576.16	356.92	537.83	359.70	565.12	360.60
2.0	750	594.79	390.18	631.20	388.08	594.50	391.58	620.58	392.60
2.5	750	628.11	426.78	659.24	422.94	627.98	426.89	650.77	428.11
3.0	750	650.26	461.62	676.89	456.40	650.21	460.53	669.89	461.94
3.5	780	678.23	494.16	703.38	487.81	678.13	492.04	696.35	493.60
4.0	825	714.00	525.38	739.28	518.00	713.81	522.38	731.63	524.04
4.5	825	734.94	554.95	757.06	546.68	734.76	551.23	750.74	552.93
5.0	825	749.80	582.50	769.10	573.49	749.60	578.14	763.83	579.86
5.5	865	774.93	608.56	794.27	598.90	774.63	603.66	788.44	605.38
6.0	900	806.98	633.51	826.92	623.27	806.62	628.19	820.45	629.86
6.5	900	825.09	657.52	842.80	646.76	824.72	651.84	837.45	653.46
7.0	900	836.39	680.82	851.45	669.58	836.01	674.80	847.24	676.35
7.5	900	848.99	702.76	862.63	691.12	848.59	696.42	858.73	697.92
8.0	950	868.55	723.28	882.53	711.34	868.10	716.68	878.09	718.12
8.5	950	887.66	742.63	901.52	730.47	887.17	735.86	897.02	737.23
9.0	950	898.03	760.99	910.01	748.67	897.54	754.09	906.48	755.39
9.5	950	904.61	778.32	914.81	765.88	904.13	771.33	912.03	772.56
10.0	950	910.29	794.50	919.12	782.03	909.81	787.45	916.75	788.62
10.5	950	915.15	809.41	922.83	796.97	914.66	802.32	920.80	803.44
11.0	950	919.16	823.04	925.90	810.71	918.67	815.95	924.16	817.02
11.5	950	922.59	835.41	928.49	823.28	922.10	828.37	927.01	829.39
12.0	950	925.55	846.67	930.71	834.78	925.05	839.71	929.44	840.69
12.5	950	928.26	857.01	932.76	845.40	927.76	850.16	931.69	851.09
13.0	950	930.63	866.33	934.56	855.05	930.13	859.64	933.65	860.53
13.5	950	932.67	874.66	936.10	863.75	932.17	868.15	935.33	869.00
14.0	950	934.57	882.39	937.55	871.86	934.07	876.07	936.91	876.88
14.5	950	936.23	889.29	938.82	879.17	935.73	883.19	938.28	883.96
15.0	950	937.65	895.37	939.90	885.68	937.15	889.52	939.44	890.24
15.5	950	938.91	900.88	940.87	891.63	938.42	895.27	940.49	895.96
16.0	950	940.09	905.95	941.78	897.13	939.61	900.59	941.47	901.24
16.5	950	941.12	910.42	942.57	902.04	940.64	905.32	942.32	905.93
17.0	950	941.99	914.30	943.25	906.37	941.52	909.47	943.05	910.04
17.5	950	942.75	917.74	943.85	910.24	942.30	913.17	943.68	913.71

ตารางที่ ค-73 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.31	321.35	323.91	323.95	324.71	324.85	325.86	326.05
0.5	510	386.39	323.00	412.46	325.35	386.92	326.46	404.58	327.59
1.0	625	466.96	333.99	502.90	335.29	466.75	337.16	492.50	338.12
1.5	700	538.17	357.21	576.16	356.92	537.83	359.70	565.12	360.60
2.0	750	594.79	390.18	631.20	388.08	594.50	391.58	620.58	392.60
2.5	750	628.11	426.78	659.24	422.94	627.98	426.89	650.77	428.11
3.0	750	648.52	461.52	674.80	456.31	648.48	460.43	667.99	461.84
3.5	750	665.05	493.22	687.74	486.95	665.03	491.09	681.95	492.67
4.0	780	689.61	522.42	711.53	515.31	689.51	519.47	705.45	521.16
4.5	825	723.09	550.27	745.71	542.39	722.88	546.65	738.82	548.39
5.0	825	742.99	577.04	762.96	568.44	742.76	572.85	757.27	574.60
5.5	825	754.77	601.43	772.07	592.29	754.52	596.77	767.41	598.50
6.0	825	768.18	624.21	783.95	614.64	767.89	619.15	779.62	620.86
6.5	865	790.99	645.75	807.52	635.82	790.60	640.37	802.41	642.05
7.0	900	817.38	666.63	834.12	656.35	816.95	661.02	828.75	662.63
7.5	900	833.39	687.04	848.42	676.42	832.95	681.21	843.86	682.75
8.0	900	843.08	706.20	856.28	695.31	842.63	700.18	852.51	701.65
8.5	900	850.00	723.52	861.59	712.49	849.55	717.36	858.37	718.77
9.0	900	858.77	740.26	869.33	729.12	858.31	733.97	866.35	735.32
9.5	950	881.33	756.18	893.67	744.97	880.80	749.83	889.49	751.12
10.0	950	896.04	771.72	907.62	760.44	895.51	765.34	903.95	766.56
10.5	950	903.90	786.52	914.06	775.19	903.38	780.12	911.02	781.26
11.0	950	909.88	800.58	918.75	789.24	909.37	794.16	916.21	795.24
11.5	950	914.46	813.30	922.29	802.03	913.96	806.90	920.11	807.93
12.0	950	918.03	824.54	925.02	813.41	917.54	818.18	923.12	819.17
12.5	950	921.54	835.63	927.70	824.66	921.05	829.32	926.06	830.27
13.0	950	924.15	844.87	929.69	834.13	923.67	838.66	928.24	839.56
13.5	950	926.76	854.10	931.68	843.60	926.29	848.00	930.42	848.86
14.0	950	928.89	862.04	933.30	851.82	928.42	856.07	932.20	856.89
14.5	950	930.88	869.57	934.81	859.65	930.41	863.75	933.85	864.54
15.0	950	932.78	876.83	936.26	867.22	932.32	871.16	935.42	871.91
15.5	950	934.47	883.43	937.56	874.15	934.02	877.94	936.83	878.65
16.0	950	936.02	889.60	938.74	880.65	935.58	884.28	938.12	884.96
16.5	950	937.44	895.33	939.83	886.72	937.00	890.20	939.30	890.85
17.0	950	938.70	900.52	940.80	892.27	938.26	895.58	940.35	896.20
17.5	950	939.81	905.22	941.65	897.33	939.39	900.49	941.27	901.07

ตารางที่ ค-74 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	400	342.27	314.61	342.39	315.20	341.06	313.19	350.15	313.38
1.0	525	401.53	318.98	401.54	319.51	399.98	317.78	419.58	317.99
1.5	625	474.22	330.96	474.37	331.24	472.57	329.96	498.15	330.30
2.0	675	531.76	352.23	532.22	351.91	530.74	351.13	556.92	351.72
2.5	730	585.83	381.49	586.28	380.16	584.60	379.79	609.98	380.69
3.0	730	616.04	413.19	616.46	410.72	614.86	410.67	637.09	411.87
3.5	775	651.80	444.91	652.15	441.32	650.72	441.51	672.04	442.96
4.0	820	694.03	476.48	694.30	471.84	693.03	472.28	714.23	473.91
4.5	820	718.76	507.40	718.96	501.78	717.84	502.43	736.89	504.20
5.0	850	745.78	536.97	745.88	530.47	744.91	531.31	762.89	533.18
5.5	870	771.80	565.49	771.80	558.19	770.96	559.20	788.01	561.15
6.0	870	787.96	592.29	787.88	584.30	787.15	585.45	802.48	587.44
6.5	890	807.21	617.13	807.04	608.60	806.41	609.86	820.89	611.87
7.0	910	828.30	641.08	828.04	632.06	827.51	633.43	841.48	635.45
7.5	930	848.18	663.61	847.86	654.19	847.40	655.66	860.87	657.67
8.0	950	865.06	684.70	864.68	674.96	864.28	676.51	877.10	678.50
8.5	950	880.17	705.31	879.72	695.29	879.38	696.92	891.45	698.89
9.0	950	888.92	724.27	888.43	714.04	888.15	715.72	899.08	717.66
9.5	950	896.47	742.33	895.93	731.93	895.70	733.65	905.56	735.56
10.0	950	902.68	759.40	902.11	748.87	901.93	750.62	910.77	752.49
10.5	950	907.37	774.50	906.76	763.94	906.62	765.69	914.66	767.52
11.0	950	911.62	788.69	910.99	778.16	910.88	779.89	918.18	781.69
11.5	950	915.44	801.96	914.77	791.48	914.70	793.20	921.32	794.94
12.0	950	918.23	812.52	917.55	802.21	917.50	803.89	923.61	805.59
12.5	950	921.01	823.08	920.32	812.95	920.29	814.59	925.89	816.23
13.0	950	923.75	833.48	923.04	823.53	923.04	825.14	928.14	826.73
13.5	950	925.78	841.78	925.07	832.06	925.08	833.63	929.81	835.16
14.0	950	927.82	850.07	927.10	840.60	927.13	842.12	931.47	843.60
14.5	950	929.80	858.18	929.08	848.95	929.12	850.43	933.10	851.85
15.0	950	931.33	864.70	930.61	855.75	930.65	857.18	934.35	858.55
15.5	950	932.86	871.22	932.14	862.54	932.19	863.93	935.60	865.25
16.0	950	934.37	877.68	933.65	869.28	933.72	870.62	936.84	871.88
16.5	950	935.74	883.58	935.03	875.47	935.10	876.76	937.96	877.97

ตารางที่ ค-75 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	400	342.27	314.61	342.39	315.20	341.06	313.19	350.15	313.38
1.0	525	401.53	318.98	401.54	319.51	399.98	317.78	419.58	318.00
1.5	625	474.22	330.96	474.37	331.24	472.57	329.96	498.15	330.31
2.0	675	531.76	352.23	532.22	351.91	530.74	351.13	556.92	351.73
2.5	730	585.83	381.49	586.28	380.16	584.60	379.79	609.98	380.71
3.0	730	615.50	413.18	615.93	410.71	614.33	410.66	636.48	411.87
3.5	730	636.48	444.20	636.85	440.65	635.42	440.81	654.87	442.26
4.0	775	667.24	473.85	667.52	469.35	666.27	469.68	685.25	471.31
4.5	820	705.30	502.83	705.49	497.48	704.38	498.00	723.56	499.76
5.0	820	727.37	531.26	727.47	525.10	726.50	525.81	743.71	527.67
5.5	820	741.07	557.96	741.08	551.09	740.24	551.94	755.37	553.87
6.0	850	764.31	583.08	764.23	575.60	763.50	576.58	778.33	578.54
6.5	870	786.01	606.98	785.84	599.00	785.21	600.09	799.48	602.07
7.0	870	799.63	629.60	799.38	621.18	798.84	622.36	811.77	624.36
7.5	870	809.24	650.74	808.93	641.96	808.47	643.22	820.01	645.21
8.0	890	825.22	670.54	824.84	661.49	824.44	662.81	835.69	664.77
8.5	910	843.56	689.35	843.12	680.08	842.77	681.46	853.97	683.40
9.0	930	863.73	707.26	863.25	697.83	862.94	699.28	874.18	701.19
9.5	950	880.43	724.74	879.90	715.16	879.64	716.68	890.59	718.55
10.0	950	890.96	741.44	890.40	731.72	890.17	733.30	900.25	735.13
10.5	950	899.11	757.49	898.52	747.67	898.33	749.29	907.50	751.09
11.0	950	905.25	772.60	904.64	762.71	904.49	764.36	912.77	766.12
11.5	950	910.18	786.60	909.55	776.68	909.43	778.34	916.92	780.06
12.0	950	914.21	799.53	913.57	789.64	913.48	791.29	920.27	792.96
12.5	950	917.38	810.71	916.71	800.92	916.65	802.55	922.88	804.18
13.0	950	920.36	821.53	919.69	811.86	919.65	813.46	925.34	815.05
13.5	950	923.13	831.83	922.45	822.29	922.43	823.86	927.62	825.40
14.0	950	925.38	840.85	924.69	831.49	924.70	833.03	929.47	834.51
14.5	950	927.64	849.87	926.94	840.69	926.96	842.20	931.32	843.63
15.0	950	929.52	857.59	928.82	848.64	928.85	850.10	932.86	851.49
15.5	950	931.28	864.90	930.59	856.19	930.63	857.61	934.32	858.94
16.0	950	933.02	872.09	932.32	863.62	932.37	864.99	935.74	866.27
16.5	950	934.57	878.57	933.87	870.36	933.93	871.69	937.01	872.92



ตารางที่ ค-76 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	400	342.27	314.61	342.39	315.20	341.06	313.19	350.15	313.38
1.0	525	401.53	318.98	401.54	319.51	399.98	317.78	419.58	318.00
1.5	625	474.22	330.96	474.37	331.24	472.57	329.96	498.15	330.31
2.0	675	531.76	352.23	532.22	351.91	530.74	351.13	556.92	351.73
2.5	730	585.83	381.49	586.28	380.16	584.60	379.79	609.98	380.71
3.0	730	615.50	413.18	615.93	410.71	614.33	410.66	636.48	411.87
3.5	730	634.05	444.11	634.42	440.56	633.00	440.72	652.14	442.17
4.0	730	649.09	472.90	649.38	468.44	648.15	468.73	664.95	470.36
4.5	775	676.80	499.96	676.99	494.72	675.93	495.14	692.76	496.90
5.0	820	714.11	526.07	714.19	520.18	713.25	520.74	730.91	522.59
5.5	820	735.60	551.83	735.59	545.33	734.74	546.05	750.77	547.96
6.0	820	747.76	576.38	747.68	569.30	746.94	570.17	760.90	572.12
6.5	820	758.34	599.02	758.18	591.46	757.55	592.42	770.03	594.38
7.0	850	778.13	620.28	777.89	612.33	777.34	613.37	789.80	615.33
7.5	870	797.75	640.54	797.44	632.28	796.96	633.40	809.22	635.35
8.0	870	809.30	659.87	808.93	651.34	808.51	652.53	819.66	654.46
8.5	870	817.37	677.94	816.95	669.20	816.59	670.45	826.57	672.36
9.0	870	827.28	694.38	826.82	685.51	826.51	686.79	835.86	688.67
9.5	890	838.95	710.29	838.44	701.32	838.18	702.64	847.18	704.47
10.0	910	855.28	725.36	854.74	716.33	854.51	717.69	863.68	719.48
10.5	930	873.28	740.18	872.71	731.11	872.51	732.51	881.93	734.26
11.0	950	890.06	754.76	889.46	745.64	889.28	747.09	898.73	748.80
11.5	950	899.16	768.92	898.55	759.75	898.40	761.25	906.84	762.92
12.0	950	906.16	782.60	905.54	773.38	905.42	774.92	913.13	776.55
12.5	950	911.45	795.49	910.82	786.25	910.72	787.81	917.75	789.40
13.0	950	915.40	807.13	914.76	797.92	914.68	799.48	921.11	801.03
13.5	950	918.73	818.03	918.08	808.88	918.03	810.43	923.91	811.94
14.0	950	921.79	828.37	921.13	819.30	921.10	820.83	926.46	822.30
14.5	950	924.28	837.57	923.62	828.63	923.61	830.14	928.53	831.56
15.0	950	926.71	846.60	926.05	837.81	926.05	839.28	930.54	840.66
15.5	950	928.65	854.31	927.98	845.70	928.00	847.14	932.14	848.47
16.0	950	930.58	862.02	929.92	853.60	929.95	855.00	933.74	856.29
16.5	950	932.36	869.27	931.70	861.06	931.74	862.42	935.21	863.66

ตารางที่ ค-77 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	364.99	316.55	387.18	316.54	366.98	316.78	397.92	316.85
1.0	625	428.01	328.43	461.99	327.89	432.44	329.12	479.37	329.77
1.5	700	488.03	352.67	526.74	350.58	494.12	352.88	546.48	354.78
2.0	750	541.25	384.61	581.13	380.29	548.42	383.43	601.39	386.88
2.5	750	575.85	420.25	612.40	413.43	583.25	417.13	631.36	422.13
3.0	790	611.49	456.06	646.23	446.82	618.89	450.86	664.20	457.19
3.5	840	655.53	490.87	690.59	479.49	663.12	483.81	708.26	491.22
4.0	840	682.83	524.19	714.85	511.11	690.16	515.73	731.56	523.86
4.5	875	715.07	555.86	745.81	541.35	722.14	546.24	761.80	554.89
5.0	910	749.84	586.35	779.92	570.68	756.80	575.87	795.44	584.88
5.5	910	772.78	615.65	800.19	598.99	779.34	604.46	814.74	613.71
6.0	950	802.85	643.48	829.62	626.02	809.20	631.73	843.59	641.11
6.5	950	823.37	669.96	848.01	651.83	829.36	657.76	861.18	667.20
7.0	950	838.26	694.82	860.37	676.15	843.76	682.22	872.58	691.66
7.5	950	849.64	716.83	869.54	697.82	854.67	703.93	880.87	713.27
8.0	950	859.63	737.13	877.52	717.90	864.19	723.99	888.05	733.21
8.5	950	868.44	755.78	884.51	736.44	872.56	742.48	894.30	751.55
9.0	950	876.18	772.75	890.63	753.43	879.90	759.37	899.75	768.25
9.5	950	883.27	788.53	896.22	769.32	886.60	775.15	904.71	783.82
10.0	950	889.71	803.16	901.30	784.14	892.68	789.84	909.19	798.29
10.5	950	895.54	816.65	905.87	797.89	898.17	803.45	913.23	811.66
11.0	950	900.76	828.91	909.97	810.48	903.08	815.89	916.83	823.84
11.5	950	905.38	839.97	913.59	821.96	907.41	827.20	919.98	834.88
12.0	950	909.56	850.07	916.86	832.52	911.32	837.59	922.83	844.99
12.5	950	913.34	859.26	919.82	842.21	914.86	847.10	925.40	854.22
13.0	950	916.66	867.45	922.43	850.97	917.97	855.68	927.64	862.50
13.5	950	919.69	874.92	924.81	859.02	920.80	863.54	929.68	870.07
14.0	950	922.38	881.58	926.93	866.29	923.31	870.63	931.48	876.87

ตารางที่ ค-78 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	364.99	316.55	387.18	316.54	366.98	316.78	397.92	316.85
1.0	625	428.01	328.43	461.99	327.89	432.44	329.12	479.37	329.77
1.5	700	488.03	352.67	526.74	350.58	494.12	352.88	546.48	354.78
2.0	750	541.25	384.61	581.13	380.29	548.42	383.43	601.39	386.88
2.5	750	575.54	420.25	612.02	413.42	582.92	417.12	630.95	422.12
3.0	750	599.97	455.54	632.31	446.30	607.07	450.28	649.48	456.61
3.5	790	630.52	488.75	661.47	477.41	637.43	481.53	677.84	488.90
4.0	840	671.32	520.12	703.22	507.08	678.36	511.35	719.75	519.51
4.5	840	697.75	550.41	726.98	536.03	704.53	540.56	742.71	549.26
5.0	840	716.56	579.19	742.38	563.71	722.74	568.47	756.76	577.53
5.5	875	741.72	606.29	766.55	589.90	747.52	594.83	780.29	604.12
6.0	910	773.40	632.08	798.47	614.95	779.14	620.05	812.05	629.47
6.5	910	792.96	656.47	816.15	638.81	798.42	644.09	829.27	653.55
7.0	910	810.40	679.11	831.77	661.10	815.46	666.53	844.03	675.93
7.5	950	830.09	700.63	850.47	682.37	834.89	687.92	862.11	697.23
8.0	950	847.30	721.00	866.52	702.56	851.84	708.21	877.56	717.39
8.5	950	859.23	740.20	876.67	721.66	863.42	727.36	886.98	736.39
9.0	950	868.51	758.04	884.23	739.47	872.33	745.17	893.87	754.03
9.5	950	876.14	773.89	890.36	755.39	879.62	761.04	899.36	769.70
10.0	950	882.94	788.58	895.78	770.22	886.09	775.79	904.18	784.23
10.5	950	889.00	802.12	900.60	783.97	891.84	789.43	908.45	797.65
11.0	950	894.52	814.83	904.97	796.93	897.06	802.27	912.31	810.25
11.5	950	899.40	826.20	908.83	808.63	901.68	813.84	915.70	821.57
12.0	950	903.95	836.89	912.43	819.68	905.97	824.74	918.85	832.22
12.5	950	908.17	846.85	915.76	830.05	909.95	834.96	921.76	842.18
13.0	950	911.98	855.93	918.76	839.57	913.54	844.32	924.37	851.27
13.5	950	915.45	864.27	921.50	848.39	916.80	852.97	926.73	859.66
14.0	950	918.55	871.84	923.95	856.49	919.72	860.90	928.84	867.32

ตารางที่ ค-79 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code A ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05	315.11	315.05
0.5	525	364.99	316.55	387.18	316.54	366.98	316.78	397.92	316.85
1.0	625	428.01	328.43	461.99	327.89	432.44	329.12	479.37	329.77
1.5	700	488.03	352.67	526.74	350.58	494.12	352.88	546.48	354.78
2.0	750	541.25	384.61	581.13	380.29	548.42	383.43	601.39	386.88
2.5	750	575.54	420.25	612.02	413.42	582.92	417.12	630.95	422.12
3.0	750	599.35	455.51	631.56	446.28	606.43	450.25	648.69	456.58
3.5	750	618.93	488.20	647.49	476.86	625.52	480.91	663.06	488.27
4.0	790	646.24	517.73	674.06	504.74	652.55	508.78	689.17	516.90
4.5	840	683.38	545.26	712.23	531.06	689.76	535.20	727.58	543.82
5.0	840	708.09	571.85	734.93	556.76	714.23	561.10	749.75	570.06
5.5	840	724.26	597.31	747.97	581.51	729.82	586.06	761.56	595.19
6.0	840	738.68	620.59	760.02	604.23	743.70	608.88	772.57	618.07
6.5	875	761.08	642.42	782.15	625.65	765.86	630.38	794.40	639.56
7.0	910	788.78	663.58	810.33	646.53	793.55	651.39	822.55	660.53
7.5	910	806.00	684.26	825.87	667.01	810.52	672.03	837.48	681.10
8.0	910	817.78	703.64	835.67	686.22	821.91	691.34	846.45	700.29
8.5	910	830.80	721.89	847.41	704.38	834.64	709.56	857.57	718.36
9.0	950	852.10	739.47	869.13	721.93	855.90	727.17	879.21	735.82
9.5	950	864.94	756.32	880.73	738.80	868.54	744.10	890.28	752.58
10.0	950	874.23	772.14	888.57	754.67	877.56	759.99	897.53	768.29
10.5	950	881.46	786.53	894.44	769.18	884.50	774.47	902.80	782.57
11.0	950	888.05	800.31	899.74	783.09	890.80	788.33	907.52	796.22
11.5	950	893.52	812.57	904.11	795.57	896.02	800.71	911.40	808.39
12.0	950	898.53	823.93	908.10	807.19	900.78	812.23	914.92	819.68
12.5	950	902.57	833.39	911.31	817.01	904.61	821.91	917.73	829.12
13.0	950	906.62	842.84	914.52	826.82	908.45	831.59	920.54	838.56
13.5	950	910.36	851.70	917.50	836.07	911.99	840.69	923.13	847.42
14.0	950	913.81	853.50	920.23	844.76	915.25	849.24	925.51	855.73

ตารางที่ ค-80 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	362.76	326.52	362.91	326.49	363.64	326.62	366.65	326.72
1.0	600	418.97	336.05	419.27	335.38	421.19	336.23	430.65	336.88
1.5	670	474.09	358.70	474.46	355.93	477.26	357.91	490.20	359.44
2.0	720	524.25	387.47	524.60	381.92	528.07	385.03	542.84	387.50
2.5	760	568.88	419.33	569.12	410.81	573.07	414.97	588.66	418.31
3.0	790	608.74	452.29	608.82	440.85	613.11	445.95	628.95	450.09
3.5	815	643.81	485.57	643.68	471.41	648.19	477.31	663.82	482.14
4.0	815	671.34	517.78	670.94	501.22	675.52	507.75	690.55	513.14
4.5	850	698.09	548.79	697.42	530.16	702.07	537.21	716.45	543.06
5.0	875	724.62	577.68	723.67	557.46	728.36	564.89	742.20	571.05
5.5	875	747.85	604.71	746.63	583.29	751.29	590.99	764.53	597.39
6.0	900	771.14	629.84	769.71	607.57	774.35	615.48	787.10	622.05
6.5	920	795.23	653.86	793.62	630.97	798.25	639.05	810.66	645.75
7.0	945	815.50	676.70	813.73	653.33	818.31	661.54	830.28	668.33
7.5	945	833.12	698.72	831.20	674.97	835.70	683.28	847.16	690.13
8.0	945	849.34	719.23	847.31	695.26	851.71	703.62	862.66	710.50
8.5	970	864.31	738.74	862.18	714.63	866.48	723.01	876.93	729.89
9.0	970	877.68	757.03	875.47	732.88	879.66	741.25	889.61	748.10
9.5	970	887.11	773.62	884.82	749.55	888.87	757.85	898.23	764.63
10.0	970	895.70	789.79	893.35	765.82	897.25	774.04	906.00	780.75
10.5	970	902.86	805.15	900.44	781.35	904.18	789.47	912.31	796.08
11.0	970	909.27	819.43	906.81	795.86	910.39	803.85	917.92	810.34
11.5	970	915.00	832.65	912.50	809.38	915.92	817.22	922.89	823.58
12.0	970	920.20	844.81	917.67	821.91	920.94	829.57	927.39	835.78
12.5	970	924.81	855.90	922.26	833.45	925.38	840.91	931.36	846.95
13.0	970	928.95	866.06	926.39	844.10	929.38	851.36	934.92	857.22
13.5	970	932.73	875.39	930.17	853.98	933.01	861.02	938.15	866.70
14.0	970	936.05	883.80	933.50	863.00	936.21	869.81	940.98	875.30
14.5	970	939.10	891.56	936.56	871.39	939.14	877.96	943.57	883.26
15.0	970	941.99	898.84	939.46	879.31	941.92	885.65	946.03	890.75
15.5	970	944.60	905.48	942.11	886.61	944.45	892.72	948.25	897.63
16.0	970	946.96	911.48	944.49	893.30	946.72	899.17	950.25	903.89
16.5	970	949.04	916.85	946.61	899.37	948.73	905.01	952.01	909.53
17.0	970	950.93	921.74	948.54	904.97	950.56	910.37	953.60	914.70
17.5	970	952.76	926.41	950.42	910.33	952.33	915.51	955.15	919.64



Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	954.40	930.62	952.11	915.23	953.92	920.18	956.53	924.13
18.5	970	955.86	934.35	953.62	919.66	955.33	924.39	957.76	928.16
19.0	970	957.13	937.62	954.95	923.64	956.57	928.14	958.83	931.73
19.5	970	958.24	940.49	956.12	927.20	957.66	931.49	959.76	934.90
20.0	970	959.37	943.38	957.31	930.75	958.77	934.83	960.72	938.07
20.5	970	960.39	945.98	958.39	933.99	959.77	937.87	961.58	940.95
21.0	970	961.30	948.28	959.36	936.92	960.67	940.61	962.34	943.52
21.5	970	962.09	950.29	960.23	939.54	961.46	943.04	963.01	945.80
22.0	970	962.78	952.01	960.98	941.86	962.14	945.17	963.59	947.78
22.5	970	963.47	953.76	961.74	944.18	962.83	947.31	964.18	949.78
23.0	970	964.10	955.35	962.43	946.31	963.47	949.28	964.71	951.61
23.5	970	964.66	956.76	963.06	948.24	964.04	951.05	965.19	953.25
24.0	970	965.15	957.99	963.62	949.98	964.54	952.62	965.61	954.70
24.5	970	965.58	959.04	964.11	951.51	964.98	954.01	965.98	955.97
25.0	970	965.96	960.01	964.57	952.93	965.38	955.29	966.31	957.14
25.5	970	966.32	960.91	964.98	954.25	965.75	956.48	966.62	958.22
26.0	970	966.63	961.70	965.36	955.45	966.08	957.55	966.89	959.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-81 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	362.76	326.52	362.91	326.49	363.64	326.62	366.65	326.72
1.0	600	418.97	336.05	419.27	335.38	421.19	336.23	430.65	336.88
1.5	670	474.09	358.70	474.46	355.93	477.26	357.91	490.20	359.44
2.0	720	524.25	387.47	524.60	381.92	528.07	385.03	542.84	387.50
2.5	760	568.88	419.33	569.12	410.81	573.07	414.97	588.66	418.31
3.0	790	608.74	452.29	608.82	440.85	613.11	445.95	628.95	450.09
3.5	815	643.81	485.57	643.68	471.41	648.19	477.31	663.82	482.14
4.0	815	669.07	517.61	668.66	501.06	673.21	507.58	688.13	512.96
4.5	815	690.19	548.07	689.49	529.47	694.03	536.47	708.03	542.27
5.0	850	713.99	575.93	713.00	555.80	717.55	563.12	730.85	569.21
5.5	875	738.68	601.87	737.44	580.63	741.98	588.19	754.79	594.48
6.0	875	757.19	626.24	755.71	604.18	760.18	611.91	772.41	618.35
6.5	875	772.66	648.94	770.94	626.26	775.32	634.11	786.82	640.64
7.0	900	791.84	670.19	789.96	647.13	794.29	655.04	805.36	661.63
7.5	920	813.37	690.58	811.36	667.26	815.67	675.25	826.50	681.87
8.0	945	833.59	710.22	831.48	686.77	835.76	694.81	846.39	701.46
8.5	945	849.05	729.10	846.85	705.59	851.04	713.66	861.26	720.32
9.0	945	859.52	747.07	857.22	723.55	861.27	731.61	870.88	738.25
9.5	945	870.22	763.91	867.86	740.45	871.77	748.47	880.79	755.05
10.0	970	884.29	779.80	881.88	756.47	885.73	764.42	894.40	770.94
10.5	970	894.91	794.68	892.47	771.55	896.21	779.43	904.51	785.86
11.0	970	902.86	808.73	900.39	785.86	904.00	793.64	911.83	799.97
11.5	970	909.01	821.29	906.53	798.74	909.99	806.38	917.32	812.60
12.0	970	914.38	832.97	911.89	810.79	915.20	818.28	922.05	824.36
12.5	970	919.20	843.79	916.71	822.02	919.88	829.34	926.28	835.27
13.0	970	923.43	853.65	920.95	832.35	923.99	839.49	929.96	845.26
13.5	970	927.35	862.91	924.87	842.09	927.78	849.04	933.36	854.65
14.0	970	930.78	871.20	928.32	850.92	931.10	857.66	936.31	863.11
14.5	970	934.13	879.33	931.68	859.58	934.34	866.12	939.20	871.40
15.0	970	937.16	886.76	934.74	867.59	937.28	873.92	941.81	879.02
15.5	970	939.98	893.74	937.59	875.14	940.01	881.26	944.23	886.19
16.0	970	942.59	900.24	940.23	882.25	942.53	888.16	946.46	892.90
16.5	970	944.99	906.28	942.66	888.90	944.86	894.60	948.51	899.16
17.0	970	947.20	911.84	944.90	895.08	947.00	900.56	950.40	904.95
17.5	970	949.20	916.93	946.95	900.80	948.94	906.06	952.11	910.28

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	951.00	921.55	948.80	906.05	950.69	911.11	953.64	915.15
18.5	970	952.60	925.69	950.44	910.85	952.24	915.69	954.99	919.55
19.0	970	954.16	929.68	952.05	915.46	953.76	920.09	956.31	923.79
19.5	970	955.58	933.34	953.52	919.73	955.14	924.16	957.52	927.69
20.0	970	956.87	936.65	954.86	923.65	956.40	927.88	958.61	931.25
20.5	970	958.01	939.61	956.06	927.22	957.52	931.26	959.58	934.47
21.0	970	959.02	942.23	957.13	930.44	958.51	934.29	960.43	937.34
21.5	970	959.99	944.71	958.16	933.50	959.47	937.17	961.25	940.07
22.0	970	960.89	946.99	959.12	936.34	960.36	939.83	962.02	942.59
22.5	970	961.70	949.02	959.99	938.92	961.16	942.24	962.70	944.85
23.0	970	962.41	950.80	960.76	941.23	961.87	944.38	963.31	946.86
23.5	970	963.02	952.32	961.44	943.28	962.49	946.26	963.83	948.61
24.0	970	963.60	953.77	962.08	945.23	963.07	948.05	964.33	950.28
24.5	970	964.16	955.20	962.70	947.13	963.63	949.81	964.80	951.91
25.0	970	964.66	956.49	963.26	948.87	964.14	951.40	965.23	953.39
25.5	970	965.10	957.64	963.76	950.45	964.59	952.85	965.61	954.73
26.0	970	965.48	958.65	964.19	951.87	964.98	954.14	965.93	955.91



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-82 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code B ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	324.45	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35	325.33	325.35
0.5	500	362.76	326.52	362.91	326.49	363.64	326.62	366.65	326.72
1.0	600	418.97	336.05	419.27	335.38	421.19	336.23	430.65	336.88
1.5	670	474.09	358.70	474.46	355.93	477.26	357.91	490.20	359.44
2.0	720	524.25	387.47	524.60	381.92	528.07	385.03	542.84	387.50
2.5	760	568.88	419.33	569.12	410.81	573.07	414.97	588.66	418.31
3.0	790	608.74	452.29	608.82	440.85	613.11	445.95	628.95	450.09
3.5	815	643.81	485.57	643.68	471.41	648.19	477.31	663.82	482.14
4.0	815	669.07	517.61	668.66	501.06	673.21	507.58	688.13	512.96
4.5	815	687.25	547.85	686.54	529.26	691.03	536.25	704.89	542.04
5.0	815	704.59	574.92	703.57	554.82	707.99	562.08	720.82	568.12
5.5	850	726.94	599.77	725.65	578.60	730.05	586.04	742.29	592.25
6.0	875	750.10	623.20	748.59	601.27	753.00	608.87	764.95	615.21
6.5	875	767.81	645.37	766.09	622.92	770.40	630.63	781.79	637.06
7.0	875	779.93	666.10	778.00	643.27	782.20	651.03	792.85	657.51
7.5	875	791.53	685.00	789.43	662.00	793.50	669.76	803.48	676.22
8.0	900	808.01	702.93	805.80	679.86	809.81	687.61	819.43	694.05
8.5	920	827.29	720.17	825.00	697.13	828.99	704.87	838.48	711.28
9.0	945	843.34	736.52	841.00	713.61	844.94	721.33	854.23	727.72
9.5	945	857.95	752.59	855.55	729.83	859.43	737.53	868.47	743.88
10.0	945	867.45	767.59	865.01	745.02	868.76	752.66	877.33	758.94
10.5	945	875.66	781.80	873.19	759.46	876.80	767.02	884.87	773.22
11.0	945	882.80	795.12	880.31	773.04	883.78	780.50	891.34	786.60
11.5	970	895.11	807.81	892.63	786.04	896.04	793.40	903.38	799.41
12.0	970	905.25	819.91	902.78	798.47	906.11	805.73	913.19	811.63
12.5	970	912.66	831.39	910.19	810.29	913.41	817.43	920.16	823.23
13.0	970	917.78	841.87	915.33	821.16	918.42	828.16	924.77	833.83
13.5	970	922.40	851.80	919.96	831.50	922.93	838.35	928.88	843.89
14.0	970	926.53	861.17	924.11	841.29	926.95	847.98	932.52	853.38
14.5	970	929.72	868.79	927.33	849.41	930.05	855.91	935.29	861.16
15.0	970	932.92	876.41	930.55	857.53	933.16	863.85	938.06	868.93
15.5	970	936.06	883.94	933.73	865.55	936.22	871.68	940.78	876.62
16.0	970	938.49	889.97	936.19	872.13	938.58	878.07	942.87	882.84
16.5	970	940.92	896.01	938.65	878.70	940.94	884.45	944.96	889.06
17.0	970	943.29	901.92	941.07	885.15	943.24	890.70	947.01	895.16
17.5	970	945.17	906.68	942.99	890.48	945.07	895.84	948.62	900.13

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
18.0	970	947.05	911.45	944.91	895.80	946.90	900.97	950.23	905.11
18.5	970	948.91	916.16	946.82	901.08	948.71	906.05	951.82	910.03
19.0	970	950.59	920.41	948.53	905.88	950.34	910.67	953.25	914.49
19.5	970	952.16	924.42	950.15	910.44	951.87	915.04	954.60	918.71
20.0	970	953.63	928.18	951.67	914.76	953.31	919.17	955.85	922.68
20.5	970	955.00	931.69	953.09	918.82	954.65	923.05	957.02	926.42
21.0	970	956.27	934.96	954.41	922.65	955.90	926.69	958.11	929.91
21.5	970	957.46	938.00	955.64	926.21	957.05	930.08	959.12	933.16
22.0	970	958.54	940.79	956.78	929.53	958.12	933.23	960.04	936.16
22.5	970	959.53	943.34	957.82	932.60	959.09	936.13	960.88	938.92
23.0	970	960.42	945.65	958.77	935.41	959.97	938.78	961.64	941.44
23.5	970	961.22	947.71	959.62	937.98	960.76	941.19	962.32	943.72
24.0	970	961.98	949.67	960.43	940.43	961.51	943.48	962.97	945.89
24.5	970	962.69	951.50	961.19	942.72	962.22	945.62	963.57	947.91
25.0	970	963.32	953.15	961.89	944.82	962.86	947.58	964.11	949.74
25.5	970	963.89	954.61	962.51	946.73	963.43	949.34	964.60	951.40
26.0	970	964.39	955.90	963.06	948.44	963.93	950.92	965.03	952.87



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-83 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.30	321.35	323.90	323.95	324.71	324.85	325.85	326.05
0.5	510	367.20	323.03	404.11	325.32	369.75	326.43	374.99	327.57
1.0	600	422.02	333.32	475.89	334.07	424.39	335.90	435.97	336.91
1.5	685	480.36	355.60	542.76	353.49	482.60	355.99	497.75	357.06
2.0	730	530.69	385.46	594.09	379.92	532.75	382.84	549.63	384.14
2.5	770	575.32	418.90	637.67	409.97	577.13	413.11	594.47	414.71
3.0	800	614.59	453.06	674.14	440.95	616.10	444.24	633.37	446.14
3.5	800	641.99	485.80	696.13	471.01	643.13	474.36	659.60	476.50
4.0	830	671.23	517.24	722.25	500.12	672.02	503.49	687.72	505.86
4.5	865	705.02	547.46	754.94	528.36	705.51	531.81	720.90	534.33
5.0	900	738.86	576.77	787.65	555.97	739.07	559.62	754.31	562.21
5.5	900	760.54	604.71	804.88	582.47	760.43	586.29	774.95	588.93
6.0	900	778.12	631.35	817.84	607.87	777.72	611.82	791.25	614.50
6.5	950	808.92	656.80	848.89	632.29	808.35	636.43	821.68	639.10
7.0	950	829.56	681.27	866.84	655.88	828.78	660.20	841.64	662.85
7.5	950	842.94	703.84	876.42	677.80	841.96	682.26	853.92	684.86
8.0	950	854.05	724.80	884.06	698.31	852.88	702.83	863.91	705.40
8.5	950	863.54	744.09	890.47	717.33	862.21	721.87	872.35	724.40
9.0	950	871.72	761.63	895.95	734.79	870.26	739.31	879.57	741.79
9.5	950	879.24	778.08	900.96	751.27	877.64	755.75	886.19	758.18
10.0	950	886.03	793.37	905.47	766.70	884.31	771.12	892.15	773.50
10.5	950	892.14	807.44	909.52	781.04	890.32	785.37	897.51	787.70
11.0	950	897.57	820.24	913.11	794.22	895.67	798.46	902.27	800.73
11.5	950	902.39	831.86	916.29	806.34	900.41	810.46	906.47	812.67
12.0	950	906.86	842.63	919.26	817.65	904.82	821.65	910.38	823.80
12.5	950	910.86	852.38	921.91	828.02	908.78	831.90	913.88	833.98
13.0	950	914.39	861.14	924.26	837.47	912.27	841.22	916.97	843.23
13.5	950	917.65	869.21	926.43	846.26	915.50	849.88	919.82	851.82
14.0	950	920.62	876.59	928.42	854.39	918.46	857.89	922.43	859.76
14.5	950	923.26	883.19	930.19	861.79	921.09	865.15	924.75	866.95
15.0	950	925.59	889.08	931.77	868.51	923.44	871.74	926.82	873.46
15.5	950	927.82	894.64	933.27	874.87	925.67	877.97	928.78	879.63
16.0	950	929.80	899.63	934.63	880.67	927.68	883.65	930.55	885.23
16.5	950	931.56	904.04	935.84	885.92	929.46	888.77	932.12	890.28
17.0	950	933.14	908.03	936.93	890.73	931.08	893.45	933.54	894.90
17.5	950	934.55	911.59	937.92	895.10	932.53	897.70	934.81	899.08

ตารางที่ ค-84 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.30	321.35	323.90	323.95	324.70	324.85	325.85	326.05
0.5	510	367.20	323.03	404.11	325.32	369.75	326.43	374.99	327.57
1.0	600	422.02	333.32	475.89	334.07	424.38	335.90	435.97	336.91
1.5	685	480.36	355.60	542.76	353.49	482.58	355.99	497.75	357.06
2.0	730	530.69	385.46	594.09	379.92	532.73	382.84	549.63	384.14
2.5	770	575.32	418.90	637.67	409.97	577.11	413.11	594.47	414.71
3.0	800	614.59	453.06	674.14	440.95	616.08	444.24	633.37	446.14
3.5	800	641.15	485.73	695.03	470.94	642.26	474.28	658.71	476.43
4.0	800	660.67	516.35	708.34	499.34	661.39	502.63	676.57	505.01
4.5	830	686.74	545.11	732.03	526.27	687.12	529.54	701.51	532.09
5.0	865	718.39	572.65	763.57	552.26	718.49	555.59	732.63	558.24
5.5	900	748.14	599.03	792.31	577.38	747.98	580.87	762.02	583.56
6.0	900	770.96	624.97	811.78	602.14	770.51	605.79	784.07	608.51
6.5	900	785.81	648.65	822.57	624.97	785.11	628.73	797.79	631.44
7.0	900	800.78	671.03	834.45	646.65	799.85	650.48	811.66	653.19
7.5	950	825.61	692.72	859.71	667.75	824.55	671.72	836.14	674.39
8.0	950	844.76	712.90	876.90	687.53	843.57	691.62	854.84	694.23
8.5	950	856.07	732.32	885.07	706.63	854.72	710.83	865.36	713.39
9.0	950	865.25	749.98	891.39	724.15	863.77	728.40	873.62	730.90
9.5	950	873.39	766.53	896.92	740.67	871.80	744.93	880.89	747.37
10.0	950	880.31	781.79	901.59	756.02	878.63	760.26	887.03	762.65
10.5	950	886.49	795.48	905.74	769.94	884.73	774.13	892.48	776.46
11.0	950	891.68	807.29	909.20	782.14	889.86	786.24	897.05	788.51
11.5	950	896.44	818.28	912.38	793.57	894.57	797.59	901.24	799.79
12.0	950	901.20	829.27	915.55	805.01	899.28	808.93	905.43	811.08
12.5	950	904.85	838.05	917.99	814.37	902.90	818.19	908.64	820.27
13.0	950	908.48	846.78	920.41	823.69	906.51	827.40	911.83	829.41
13.5	950	911.90	855.05	922.70	832.56	909.90	836.16	914.84	838.11
14.0	950	914.73	862.00	924.60	840.18	912.73	843.67	917.34	845.55
14.5	950	917.56	868.95	926.51	847.79	915.56	851.17	919.84	852.99
15.0	950	920.26	875.57	928.32	855.08	918.25	858.35	922.22	860.10
15.5	950	922.71	881.63	929.98	861.83	920.71	864.98	924.39	866.67
16.0	950	925.00	887.32	931.53	868.21	923.02	871.25	926.42	872.87
16.5	950	927.14	892.63	932.98	874.23	925.17	877.16	928.32	878.71
17.0	950	929.08	897.48	934.31	879.80	927.14	882.61	930.05	884.10
17.5	950	930.85	905.93	935.52	884.96	928.93	887.66	931.63	889.09

ตารางที่ ค-85 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code C ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	327.55	321.30	321.35	323.90	323.95	324.71	324.85	325.85	326.05
0.5	510	367.20	323.03	404.11	325.32	369.75	326.43	374.99	327.57
1.0	600	422.02	333.32	475.89	334.07	424.39	335.90	435.97	336.91
1.5	685	480.36	355.60	542.76	353.49	482.60	355.99	497.75	357.06
2.0	730	530.69	385.46	594.09	379.92	532.75	382.84	549.63	384.14
2.5	770	575.32	418.90	637.67	409.97	577.13	413.11	594.47	414.71
3.0	800	614.59	453.06	674.14	440.95	616.10	444.24	633.37	446.14
3.5	800	641.15	485.73	695.03	470.94	642.29	474.28	658.71	476.43
4.0	800	660.59	516.35	708.23	499.33	661.33	502.62	676.48	505.00
4.5	800	677.52	544.47	719.99	525.68	677.87	528.86	691.72	531.43
5.0	830	699.98	571.03	740.45	550.75	700.00	553.82	712.97	556.54
5.5	865	729.63	595.99	770.72	574.52	729.37	577.57	742.25	580.38
6.0	900	760.03	620.06	801.11	597.62	759.52	600.78	772.61	603.62
6.5	900	781.86	643.66	819.73	620.38	781.08	623.76	794.00	626.58
7.0	900	795.79	666.63	829.19	642.60	794.76	646.20	806.79	648.97
7.5	900	807.98	688.38	837.51	663.72	806.73	667.46	817.58	670.19
8.0	900	820.04	708.50	847.04	683.39	818.62	687.18	828.59	689.87
8.5	950	839.92	727.14	867.76	701.77	838.42	705.58	848.13	708.23
9.0	950	859.34	744.67	886.16	719.17	857.76	723.03	867.48	725.62
9.5	950	868.99	761.04	893.30	735.55	867.30	739.50	876.56	742.01
10.0	950	876.96	776.22	898.95	750.83	875.19	754.83	883.77	757.26
10.5	950	883.81	790.31	903.68	765.11	881.97	769.12	889.90	771.48
11.0	950	889.70	803.10	907.68	778.19	887.80	782.17	895.13	784.46
11.5	950	894.95	814.86	911.24	790.31	893.01	794.24	899.80	796.46
12.0	950	899.10	824.57	914.03	800.51	897.13	804.37	903.46	806.52
12.5	950	903.24	834.27	916.82	810.72	901.25	814.50	907.13	816.58
13.0	950	907.21	843.60	919.49	820.58	905.20	824.27	910.64	826.28
13.5	950	910.32	851.16	921.59	828.75	908.30	832.33	913.39	834.28
14.0	950	913.43	858.71	923.69	836.91	911.41	840.39	916.14	842.27
14.5	950	916.47	866.10	925.74	844.92	914.45	848.31	918.83	850.12
15.0	950	918.84	871.98	927.35	851.46	916.84	854.74	920.94	856.49
15.5	950	921.21	877.86	928.96	858.00	919.23	861.17	923.05	862.86
16.0	950	923.58	883.73	930.57	864.54	921.61	867.60	925.16	869.22
16.5	950	925.70	888.98	932.02	870.47	923.75	873.42	927.05	874.98
17.0	950	927.69	893.94	933.38	876.09	925.76	878.94	928.82	880.44
17.5	950	929.55	898.58	934.65	881.43	927.65	884.16	930.49	885.60

ตารางที่ ค-86 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule A) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	425	338.76	314.78	339.14	315.31	337.76	313.31	341.18	313.50
1.0	550	387.59	320.02	387.85	320.02	386.71	318.33	395.78	318.55
1.5	630	441.97	333.73	442.13	332.17	441.21	330.95	454.97	331.25
2.0	680	489.45	356.15	489.48	351.92	488.77	351.14	504.80	351.61
2.5	720	532.16	382.82	532.01	375.52	531.49	375.10	548.69	375.76
3.0	760	573.86	412.08	573.48	401.70	573.12	401.58	591.05	402.43
3.5	800	613.10	442.57	612.44	429.22	612.22	429.37	630.49	430.41
4.0	800	640.29	472.88	639.33	456.82	639.23	457.19	656.69	458.39
4.5	840	672.25	502.29	670.97	483.84	670.97	484.40	688.31	485.75
5.0	860	702.31	530.94	700.73	510.42	700.82	511.16	717.94	512.63
5.5	880	728.89	558.42	727.01	536.18	727.17	537.09	743.86	538.65
6.0	900	753.95	584.67	751.81	561.00	752.04	562.07	768.30	563.71
6.5	900	771.19	609.33	768.80	584.51	769.08	585.70	784.37	587.39
7.0	915	790.07	632.89	787.47	607.09	787.79	608.40	802.44	610.14
7.5	930	810.15	655.21	807.37	628.65	807.73	630.05	822.01	631.83
8.0	950	828.07	676.33	825.13	649.19	825.52	650.69	839.34	652.49
8.5	950	842.86	696.31	839.78	668.73	840.20	670.30	853.39	672.11
9.0	950	854.10	714.90	850.91	687.03	851.35	688.65	863.74	690.47
9.5	950	862.57	732.14	859.28	704.10	859.74	705.77	871.25	707.58
10.0	950	869.90	748.15	866.52	720.07	866.99	721.76	877.67	723.57
10.5	950	876.20	762.59	872.77	734.62	873.25	736.31	883.19	738.10
11.0	950	881.77	775.72	878.30	747.97	878.78	749.66	888.06	751.43
11.5	950	887.34	788.85	883.82	761.33	884.31	763.00	892.93	764.75
12.0	950	891.86	799.93	888.32	772.80	888.81	774.45	896.88	776.17
12.5	950	896.25	810.78	892.70	784.05	893.18	785.68	900.72	787.37
13.0	950	900.37	821.01	896.81	794.73	897.29	796.33	904.33	797.99
13.5	950	903.89	829.86	900.34	804.12	900.82	805.69	907.42	807.31
14.0	950	907.41	838.71	903.88	813.50	904.34	815.04	910.50	816.63
14.5	950	910.70	847.01	907.18	822.38	907.65	823.88	913.39	825.43
15.0	950	913.74	854.69	910.24	830.67	910.70	832.13	916.05	833.65
15.5	950	916.58	861.92	913.11	838.54	913.56	839.96	918.55	841.43
16.0	950	919.20	868.65	915.78	845.93	916.21	847.31	920.87	848.74
16.5	950	921.59	874.84	918.21	852.82	918.63	854.16	922.98	855.55

ตารางที่ ค-87 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule B) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	425	338.76	314.78	339.14	315.31	337.76	313.31	341.18	313.50
1.0	550	387.59	320.02	387.85	320.02	386.71	318.33	395.78	318.55
1.5	630	441.97	333.73	442.13	332.17	441.21	330.95	454.97	331.25
2.0	680	489.45	356.15	489.48	351.92	488.77	351.14	504.80	351.61
2.5	720	532.16	382.82	532.01	375.52	531.49	375.10	548.69	375.76
3.0	760	573.86	412.08	573.48	401.70	573.12	401.58	591.05	402.43
3.5	800	613.10	442.57	612.44	429.22	612.22	429.37	630.49	430.41
4.0	800	639.30	472.86	638.34	456.79	638.24	457.16	655.61	458.37
4.5	800	658.50	501.75	657.22	483.32	657.22	483.85	673.27	485.20
5.0	840	687.31	529.02	685.71	508.61	685.79	509.28	701.80	510.74
5.5	860	714.32	554.90	712.43	532.94	712.58	533.75	728.44	535.30
6.0	880	739.72	579.96	737.55	556.68	737.76	557.63	753.38	559.25
6.5	900	762.02	603.98	759.62	579.62	759.88	580.70	775.05	582.37
7.0	900	778.72	626.83	776.10	601.57	776.40	602.77	790.75	604.48
7.5	900	792.70	648.37	789.89	622.38	790.23	623.67	803.68	625.42
8.0	915	807.89	668.67	804.92	642.12	805.29	643.49	818.15	645.26
8.5	930	825.76	687.95	822.65	661.00	823.05	662.44	835.68	664.22
9.0	950	843.42	706.39	840.21	679.16	840.62	680.67	853.07	682.46
9.5	950	855.64	723.93	852.33	696.52	852.76	698.08	864.57	699.87
10.0	950	864.75	740.49	861.37	712.99	861.81	714.60	872.82	716.38
10.5	950	872.43	755.99	868.99	728.49	869.45	730.13	879.68	731.90
11.0	950	878.46	769.39	874.98	742.06	875.45	743.71	885.02	745.46
11.5	950	884.45	782.72	880.93	755.58	881.40	757.23	890.31	758.96
12.0	950	889.47	794.47	885.94	767.64	886.41	769.28	894.73	770.99
12.5	950	894.20	805.74	890.66	779.27	891.13	780.88	898.89	782.57
13.0	950	898.43	816.02	894.88	789.96	895.36	791.55	902.61	793.20
13.5	950	902.27	825.52	898.74	799.94	899.20	801.51	905.99	803.13
14.0	950	906.01	834.80	902.49	809.71	902.95	811.25	909.27	812.83
14.5	950	909.42	843.36	905.91	818.81	906.37	820.31	912.27	821.86
15.0	950	912.61	851.43	909.12	827.45	909.57	828.92	915.07	830.43
15.5	950	915.57	859.02	912.12	835.63	912.56	837.06	917.68	838.54
16.0	950	918.27	865.99	914.85	843.24	915.29	844.63	920.06	846.07
16.5	950	920.73	872.43	917.36	850.34	917.78	851.69	922.23	853.08



ตารางที่ ค-88 รูปแบบการอบอุ่นของอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจน (schedule C) ของเหล็กแผ่น  
 ม้วนกลม code D ของแบบจำลอง [6]

Temp H <sub>2</sub>	Time (hr)	H 1 (K)	C 1 (K)	H 2 (K)	C 2 (K)	H 3 (K)	C 3 (K)	H 4 (K)	C 4 (K)
0.0	318.15	314.04	313.95	314.63	314.55	312.59	312.45	312.83	312.65
0.5	425	338.76	314.78	339.14	315.31	337.76	313.31	341.18	313.50
1.0	550	387.59	320.02	387.85	320.02	386.71	318.33	395.78	318.55
1.5	630	441.97	333.73	442.13	332.17	441.21	330.95	454.97	331.25
2.0	680	489.45	356.15	489.48	351.92	488.77	351.14	504.80	351.61
2.5	720	532.16	382.82	532.01	375.52	531.49	375.10	548.69	375.76
3.0	760	573.86	412.08	573.48	401.70	573.12	401.58	591.05	402.43
3.5	800	613.10	442.57	612.44	429.22	612.22	429.37	630.49	430.41
4.0	800	639.30	472.86	638.34	456.79	638.24	457.16	655.61	458.37
4.5	800	658.36	501.75	657.08	483.31	657.08	483.85	673.12	485.20
5.0	800	675.72	529.00	674.11	508.52	674.20	509.18	689.04	510.65
5.5	840	701.36	554.14	699.44	532.08	699.59	532.83	714.39	534.39
6.0	860	726.39	577.93	724.19	554.66	724.39	555.52	739.13	557.15
6.5	880	750.34	600.67	747.89	576.48	748.14	577.47	762.76	579.14
7.0	900	771.98	622.82	769.32	597.83	769.61	598.93	783.93	600.64
7.5	900	787.22	644.01	784.37	618.35	784.69	619.56	798.20	621.30
8.0	900	798.88	663.99	795.87	637.81	796.23	639.10	808.78	640.86
8.5	900	809.40	682.67	806.25	656.10	806.63	657.45	818.33	659.22
9.0	915	823.04	700.18	819.77	673.38	820.17	674.78	831.47	676.55
9.5	930	837.96	716.73	834.61	689.82	835.03	691.26	846.13	693.03
10.0	950	851.09	731.93	847.69	705.06	848.12	706.54	858.94	708.30
10.5	950	864.22	747.13	860.77	720.30	861.21	721.83	871.74	723.57
11.0	950	871.85	760.71	868.36	734.03	868.81	735.58	878.73	737.31
11.5	950	879.26	774.23	875.75	747.71	876.20	749.28	885.49	750.99
12.0	950	885.16	786.50	881.64	760.23	882.09	761.81	890.78	763.50
12.5	950	890.75	798.47	887.22	772.48	887.68	774.06	895.78	775.72
13.0	950	895.27	808.94	891.74	783.33	892.20	784.89	899.77	786.52
13.5	950	899.58	819.08	896.06	793.85	896.52	795.40	903.59	797.01
14.0	950	903.35	828.28	899.85	803.50	900.31	805.03	906.92	806.60
14.5	950	907.01	837.23	903.53	812.93	903.98	814.42	910.15	815.96
15.0	950	910.36	845.58	906.91	821.79	907.35	823.25	913.11	824.76
15.5	950	913.49	853.48	910.08	830.22	910.51	831.65	915.88	833.12
16.0	950	916.39	860.90	913.01	838.21	913.44	839.61	918.44	841.04
16.5	950	919.01	864.73	915.67	845.64	916.09	847.00	920.75	848.39

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากขั้นตอนของกระบวนการอบอุ่น เนื่องจากเหล็กแผ่นม้วนกลมประกอบด้วยชั้นของแผ่นเหล็กจำนวนมาก เรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ดังนั้นในการคำนวณ ค่าสมบัติต่างๆ จะใช้วิธี statistical analysis regression ซึ่งอ้างอิงจาก Chen และ Gu ซึ่งการคำนวณต่างๆ มีดังนี้

#### 1. การคำนวณค่าการนำความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม

เหล็กแผ่นม้วนกลม code A

ที่อุณหภูมิ  $T_s = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$k_s = 59.66 - 0.037T_s \quad (\text{ง-1})$$

$$k_s = 59.66 - 0.037(0) = 59.66 \quad \text{W/m}\cdot\text{K}$$

#### 2. การคำนวณค่าการนำความร้อนในแนวรัศมี

$t_s = 2.07 \text{ mm}$

$$k_r = k_z (0.0833 \times (t_s - 0.5) + 0.25) \quad (\text{ง-2})$$

$$k_r = 59.66 (0.0833 \times (2.07 - 0.5) + 0.25) = 22.72 \quad \text{W/m}\cdot\text{K}$$

#### 3. การคำนวณค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจน

ที่อุณหภูมิ  $T_h = 44.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$k_h = 0.171 + 5.245 \times 10^{-4} T_h \quad (\text{ง-3})$$

$$k_h = 0.171 + 5.245 \times 10^{-4} (44.9) = 0.1946 \quad \text{W/m}\cdot\text{K}$$

#### 4. การคำนวณค่าความจุความร้อนของเหล็กแผ่นม้วนกลม

ที่อุณหภูมิ  $T_s = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$C_{p,s} = (0.448 + 4.492 \times 10^{-4} T_s) \times 10^{-3} \quad (\text{ง-4})$$

$$C_{p,s} = (0.448 + 4.492 \times 10^{-4} (0)) \times 10^{-3} = 448 \quad \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

### 5. การคำนวณค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจน

- ราคาของก๊าซไฮโดรเจน = 18.5 บาท/sm<sup>3</sup>
- อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน = 21.098 sm<sup>3</sup>/hr (ในช่วง 1.5 hr แรก)
- อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน = 5.275 sm<sup>3</sup>/hr (หลังจาก 1.5 hr แรก)

#### ตารางที่ ง-1 ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน

ระยะเวลา (hr)	ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน (sm <sup>3</sup> )
0	-
0.5	10.55
1.0	21.10
1.5	31.65
2.0	34.28
2.5	36.92
3.0	39.56
3.5	42.20
4.0	44.83
4.5	47.47
5.0	50.11
5.5	52.75
6.0	55.38
6.5	58.02
7.0	60.66
7.5	63.29
8.0	65.93
8.5	68.57
9.0	71.21
9.5	73.84
10.0	76.48
10.5	79.12
11.0	81.75
11.5	84.39

ระยะเวลา (hr)	ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน (sm <sup>3</sup> )
12.0	87.03
12.5	89.67
13.0	92.30
13.5	94.94
14.0	97.58
14.5	100.22
15.0	102.85
15.5	105.49
16.0	108.13
16.5	110.76
17.0	113.40
17.5	116.04
18.0	118.68
18.5	121.31
19.0	123.95
19.5	126.59
20.0	129.23
20.5	131.86
21.0	134.50
21.5	137.14
22.0	139.77
22.5	142.41
23.0	145.05
23.5	147.69
24.0	150.32
24.5	152.96
25.0	155.60
25.5	158.24
26.0	160.87

ระยะเวลา (hr)	ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจน (sm <sup>3</sup> )
26.5	163.51
27.0	166.15
27.5	168.78
28.0	171.42
28.5	174.06

1. เหล็กแผ่นม้วนกลม code A

- ใช้ระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนทั้งหมด 14.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบอ่อน 0.5 ชั่วโมง ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนที่ประหยัดได้เท่ากับ

$$18.5 \frac{\text{bath}}{\text{sm}^3} \times (100.22 - 97.58) \text{sm}^3 = 48.79 \text{bath} / \text{batch annealing furnace}$$

2. เหล็กแผ่นม้วนกลม code B

- ใช้ระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนทั้งหมด 28.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบอ่อน 2.5 ชั่วโมง ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนที่ประหยัดได้เท่ากับ

$$18.5 \frac{\text{bath}}{\text{sm}^3} \times (174.06 - 160.87) \text{sm}^3 = 243.94 \text{bath} / \text{batch annealing furnace}$$

3. เหล็กแผ่นม้วนกลม code C

- ใช้ระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนทั้งหมด 19.23 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบอ่อน 1.73 ชั่วโมง ค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนที่ประหยัดได้เท่ากับ

$$18.5 \frac{\text{bath}}{\text{sm}^3} \times (125.47 - 116.04) \text{sm}^3 = 174.47 \text{bath} / \text{batch annealing furnace}$$

4. เหล็กแผ่นม้วนกลม code D

- ใช้ระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนทั้งหมด 18 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบอ่อน 1.5 ชั่วโมง ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของก๊าซไฮโดรเจนที่ประหยัดได้เท่ากับ

$$18.5 \frac{\text{bath}}{\text{sm}^3} \times (118.67 - 110.76) \text{sm}^3 = 146.37 \text{bath} / \text{batch annealing furnace}$$



## 6. การคำนวณค่าใช้จ่ายไฟฟ้า

1. Combustion air motor = 180 kw
2. Exhaust air motor = 165 kw
3. RC fan motor = 1056 kw
4. Basement fan = 25.9 kw
5. Dilution fan = 144.17 kw
6. ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย (TOU) = 2.6136 บาท/หน่วย (Peak)

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} = \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลา (ชั่วโมง)} \quad (\text{ง-5})$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า} = \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)} \times \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} \quad (\text{ง-6})$$

### ตารางที่ ง-2 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

CODE	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	เวลา (ชั่วโมง)	พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)	ค่าใช้จ่ายค่า ไฟฟ้า (บาท)
A	1441.7	0.5	720.85	1884.01
B	1441.7	2.5	3604.25	9420.07
C	1441.7	1.73	2494.14	6518.68
D	1441.7	1.5	2162.55	5652.04

## 7. การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ

$$\% \text{ ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงงาน} - \text{อุณหภูมิที่ทำนาย}|}{\text{อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงงาน}} \times 100$$

- ที่เวลา 2 hr

- อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงงาน = 898.25 K

- อุณหภูมิที่ทำนาย = 880.45 K

$$\% \text{ ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{|898.25 - 880.45|}{898.25} \times 100 = 1.98 \%$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล วัชรประไพพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกาญจนบุรี มีพี่น้องรวม 4 คน เป็นบุตรคนโตของครอบครัว ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยมหิดล และในปี พ.ศ. 2551 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย