

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตีกับเวลาภายใน โลหะทรงกลมตันซึ่งตกอย่างอิสระ
ภายใต้การเค็ดเป็นชั้นฟิล์ม



นายสมบุญ รัศมี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-5531-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE VARIATION WITH TIME IN A FREE FALLING SOLID METAL SPHERE
UNDER THE PROCESS OF FILM BOILING

Mr.Somboon Rassame

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Academic Year 2005

ISBN 974-17-5531-7

สมบูรณ์ รัศมี : การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกอย่างอิสระภายใต้การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม (TEMPERATURE VARIATION WITH TIME IN A FREE FALLING SOLID METAL SPHERE UNDER THE PROCESS OF FILM BOILING)

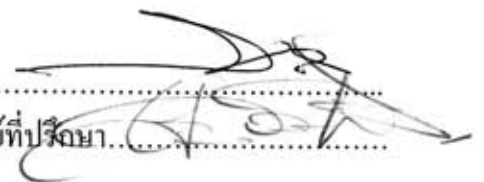
อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สัจชัย นิลสุวรรณ โฉมิต, 90 หน้า. ISBN 974-17-5531-7.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระภายใต้การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม โดยได้จัดทำระบบการทดลองเพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและที่ผิวของโลหะตันทรงกลมอุณหภูมิสูงซึ่งตกลงในของเหลวระบายความร้อน โดยโลหะตันทรงกลมที่นำมาใช้เป็น ทรงกลมเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดรัศมี 25.4 มิลลิเมตร ระดับอุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะทรงกลมตัน อยู่ระหว่าง 200-500 องศาเซลเซียส โดยได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้สองจุด จุดแรกที่ตำแหน่งภายในทรงกลมที่ครึ่งหนึ่งของรัศมีจากที่ผิวและจุดที่สองที่ผิวของทรงกลม และใช้น้ำเป็นของเหลวระบายความร้อน โดยมีระยะทางการตกประมาณ 2 เมตร

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมถูกนำไปใช้เป็นขอบเขตเริ่มต้นของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่อาศัยสมการการนำความร้อนของวัตถุทรงกลมเพื่อคำนวณอุณหภูมิภายใน โลหะทรงกลมที่ตำแหน่งต่างๆ ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมจากการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายอุณหภูมิภายใน โลหะทรงกลมของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณและจากผลการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างเป็นเหตุเป็นผล นอกจากนั้นผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่า ในช่วงเวลาที่สนใจ อุณหภูมิภายในโลหะตันทรงกลมมีการลดลงเฉพาะบริเวณใกล้ผิวโลหะตันทรงกลมเท่านั้น ที่ตำแหน่งบริเวณกลางทรงกลมค่าอุณหภูมิจะยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนจากภายในทรงกลมไม่ให้ถ่ายเทสู่ของเหลวระบายความร้อนได้โดยง่าย

ภาควิชา..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา..... 2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



4570578521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: FILM BOILING / FREE FALLING / METAL SPHERE / TEMPERATURE VARIATION

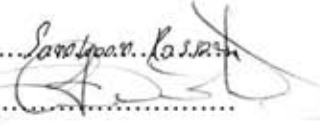

SOMBOON RASSAME: TEMPERATURE VARIATION WITH TIME IN A FREE FALLING SOLID METAL SPHERE UNDER THE PROCESS OF FILM BOILING.

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. SUNCHAI NILSUWANKOSIT, 90 pp. ISBN. 974-17-5531-7.

This thesis studied the variation of the internal temperature over time for the freely falling metal sphere that underwent the process of film boiling. The experimental rig was conducted to measure the temperature in and on the surface of high temperature metal sphere. The metal sphere was made of the stainless steel with the size of 25.4 mm in radius. The initial temperature of metal sphere was between 200-500 °C. The thermocouples were attached in the sphere at a point half the radius away from the surface and on the surface of metal sphere. The water was used as the coolant in the tank with the height of 2 m.

The experimental results for the surface temperature were applied as the boundary condition for a computer program which was based on the analytical model for the heat conduction equation in a sphere. This computer program was created to estimate the distribution of the temperature in a sphere with respect to time. The experimental results for the temperature in a sphere were compared with the calculated results from the computer program. The comparison indicated that the computer program could reasonably predict the temperature in a sphere for this experimental condition. The calculated results showed that, for the period of time that was of interest, the variation of the temperature occurred only near the surface of sphere. For the region around the center of the metal sphere, the temperature was not affect. This explained that the film boiling during the heat transfer process resisted the heat transfer process from the sphere to the coolant liquid.

Department..... Nuclear Technology.....
 Field of study..... Nuclear Technology.....
 Academic year..... 2005.....

Student's signature..... 
 Advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา นิลสุวรรณ โฆมิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ความเข้าใจและกำลังใจอย่างดียิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา และ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ แนะนำ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อุริช อัคร โฆมิต คุณบัญญัติ อุ่นพานิช สำหรับการให้คำปรึกษาและแนะนำ แก้ไข ปัญหา เกี่ยวกับระบบการทดลอง ของ งานวิจัยชิ้นนี้ทั้งหมด

เนื่องจากทุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิตส่วนหนึ่ง ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ รวมทั้งบุคลากรทุกคนในภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ พร้อมทั้งกำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจทำให้งานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วง ไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจาก งานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ เป็นผลมาจากความเมตตากรุณาของทุกท่านที่กล่าวไว้ข้างต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	5
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การถ่ายเทความร้อน.....	6
2.1.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ.....	6
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา.....	11
2.1.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี.....	12
2.2 การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม.....	13
2.2.1 การเดือดแบบแอ่ง.....	13
2.2.2 การเดือดแบบพาบังคับ.....	15
2.3 ข้อสมมติฐานสำหรับการคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายในวัตถุทรงกลม.... และความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น.....	16

บทที่	หน้า
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.2 รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง.....	23
3.21 เต้าเผา.....	23
3.22 โลหะทรงกลมตัน พร้อมหัววัดอุณหภูมิ.....	25
3.23 โครงสร้างหลัก.....	27
3.24 ถังน้ำ.....	28
3.25 ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรด.....	29
3.26 ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ.....	29
3.27 หน่วยรับข้อมูล.....	30
3.3 เงื่อนไขการทดลองและขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม.....	33
3.5 ขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของทรงกลม.....	37
3.5.1 ขอบเขตเวลาในการคำนวณ.....	37
3.5.2 ค่าคงที่ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ.....	38
3.5.3 การประเมินอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้เป็นขอบเขตเบื้องต้นในการคำนวณ.....	39
4. ผลการทดลอง.....	48
4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ.....	48
4.2 ผลการทดลอง.....	51
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันตามตำแหน่งมุม..... ต่างๆจาก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	56
5.2 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่ง ของรัศมีจากผิวที่คำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นและค่าที่ วัดได้จากการทดลอง.....	60
5.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน โลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนว มุมและรัศมีต่างๆซึ่งประเมินได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	68

บทที่	หน้า
6. บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 บทสรุปงานวิจัย.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณ.....	80
ภาคผนวก ข โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับติดต่อระหว่างระบบเก็บ.....	85
บันทึกข้อมูลและคอมพิวเตอร์.....	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการเปรียบเทียบระบบการทดลองเดิมและระบบการทดลองใหม่.....	22
3.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองตามตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ.....	32
4.1 แสดงสัญญาณดิจิทัลและค่าอุณหภูมิที่อ่านได้.....	49
4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจริงและอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ.....	50



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ปริมาตรอิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ.....	7
2.2 ปริมาตรอิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบ..... โคออร์ดิเนตรูปทรงเรขาคณิต.....	8
2.3 ปริมาตรอิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบ..... โคออร์ดิเนตรูปทรงกระบอก.....	9
2.4 ปริมาตรอิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบ..... โคออร์ดิเนตรูปทรงกลม.....	9
2.5 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา โดยที่ $T_s > T_o$	12
2.6 การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี.....	12
2.7 เส้นโค้งการเดือด (Boiling curve).....	14
2.8 ตำแหน่งอุณหภูมิในทรงกลมและชั้นฟิล์ม	17
3.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ทดลอง.....	21
3.2 โครงสร้าง ของเตาเผา.....	23
3.3 ฐานวางขวดวัดความร้อน.....	24
3.4 เตาเผา.....	24
3.5 แผนภาพแสดง การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลใน โลหะทรงกลมตัน.....	26
3.6 โลหะทรงกลมตัน.....	26
3.7 รูปแสดงระยะการจัดตำแหน่งของส่วนประกอบต่างๆของ โครงสร้างหลัก.....	27
3.8 ภาพถ่าย โครงสร้างหลัก.....	28
3.9 ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ.....	30
3.10 หน่วยรับข้อมูล.....	31
3.11 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในโลหะทรงกลม.....	32
3.12 การแบ่งองค์ประกอบภายในทรงกลมเพื่อทำการคำนวณ.....	34
3.13 การถอดอยแบบพหุนาม โดยพัฒนาฟังก์ชันพหุนามจากข้อมูลที่กำหนดมาให้.....	40
3.14 การพัฒนาฟังก์ชันเพื่อประเมินอุณหภูมิที่ผิว.....	42
3.15 การประมาณฟังก์ชันที่เวลา t ใดๆ.....	44
3.16 แผนผังขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา....	46

รูปที่	หน้า
3.17 แผนผังขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา.....	47
4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากหน่วยรับข้อมูลและ อุณหภูมิที่อ่านค่าได้...	49
4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 0°.....	51
4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 45°.....	52
4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 90°.....	52
4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 135°.....	53
4.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 0°.....	53
4.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 45°.....	54
4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 90°.....	54
4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่..... ตำแหน่ง 135°.....	55
5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะตันทรงกลมที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่..... เงื่อนไข อุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส	57
5.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะตันทรงกลมที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่..... เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส.....	57
5.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะตันทรงกลมที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่..... เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส.....	58
5.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะตันทรงกลมที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่..... เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส.....	58
5.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่..... เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส.....	61

รูปที่	หน้า
5.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส.....	62
5.7 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส.....	62
5.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่..... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส.....	63
5.9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรม ภายใน.... โลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่ เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส.....	63
5.10 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส.....	64
5.11 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส.....	64
5.12 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอนุกรมภายในโลหะ ทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่... เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส.....	65
5.13 การเปลี่ยนแปลงอนุกรมภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศาและ ตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 200 องศา..... เซลเซียส.....	69
5.14 การเปลี่ยนแปลงอนุกรมภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศา และ ตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอนุกรมเริ่มต้น 300 องศา..... เซลเซียส.....	70

รูปที่	หน้า
5.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศา และตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส.....	70
5.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศาและตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส.....	71
5.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมตามแนว รัศมี ($R = 0.01905 \text{ m}$.)และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส.....	72
5.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมตามแนวรัศมี ($R = 0.01905 \text{ m}$.)และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิ.....เริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส.....	72
5.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมตามแนว รัศมี ($R = 0.01905 \text{ m}$.)และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิ.....เริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส.....	73
5.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมตามแนวรัศมี ($R = 0.01905 \text{ m}$.)และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ประกอบกับการต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากราคาของเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่น ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้องพิจารณาถึงพลังงานทางเลือกที่สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าให้พลังงานไฟฟ้าที่มีปริมาณเพียงพอต่อการทิศทางการใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทยและมีต้นทุนการผลิตจากราคาเชื้อเพลิงที่ต่ำ และไม่ผันแปรมากจนเกินไปนักเมื่อเทียบกับ เชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์นั้นนับว่าสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวของประเทศไทยในภาวะปัจจุบันได้เป็นอย่างดีทั้งในเรื่องของการที่โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่มากไม่ต่างกับโรงไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานและเชื้อเพลิงอื่นๆ รวมถึงเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้น ยังมีราคาต่อหน่วยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่า และไม่แปรผันจนเกินไป เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆเช่น ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมัน นอกจากนี้แหล่งเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังมีอยู่อย่างเพียงพอในโลก ต่างจากกับก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมัน ซึ่งกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงนับว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่งสำหรับประเทศไทยในอนาคตอันใกล้

อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้นจะก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงทั้งจากตัวอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากแรงระเบิด หรือ การรั่วไหลของรังสี อันจะส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเป็นจำนวนมาก เหล่านี้เป็นเหตุให้เกิดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความปลอดภัยในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นจำนวนมากในต่างประเทศเพื่อจะได้นำผลการศึกษาวิจัยใช้ในการออกแบบ สร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ รวมถึงการสร้างระบบป้องกัน รักษาความปลอดภัยต่างๆให้มีความปลอดภัยสูงสุด

การเกิดระเบิดเป็นไออันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงหลอมเหลวและของเหลวระบายความร้อน นั้นเป็นถือว่าเป็นอุบัติเหตุร้ายแรงประเภทหนึ่งของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งสามารถที่จะสร้างความเสียหายให้แก่ตัวโรงไฟฟ้าและระบบอาคาร โครงสร้าง ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตของผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้า นอกจากนี้อาจจะทำให้เกิดการรั่วไหลของสารรังสีของ

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ อันก่อให้เกิดผลกระทบในทางกว้างต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า พลังงานนิวเคลียร์ได้

การระเบิดเป็นไออันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงหลอมเหลวและของเหลวระบายความร้อนนี้ เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูมีความร้อนสูงเกินขีดจำกัด แล้วเกิดหลอมเหลว ตกลงสู่ของเหลวระบายความร้อนซึ่งตกค้างอยู่ในระบบ เมื่อเชื้อเพลิงหลอมเหลวอุณหภูมิสูงสัมผัสผิวของเหลวระบายความร้อนโดยตรงจะเกิดการถ่ายเทพลังงานสู่ของเหลวระบายความร้อนที่อยู่ล้อมรอบอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเหลวระบายความร้อนเกิดการเดือดกลายเป็นไอที่มีความดันสูง กลไกการถ่ายเทความร้อนนี้ประกอบด้วย การเดือดเป็นชั้นฟิล์มและการแตกตัวของเชื้อเพลิงหลอมเหลว ไอความดันสูงนี้จะเคลื่อนที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นการระเบิดเป็นไอ ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบรวมถึง ผนังแกนปฏิกรณ์ปรมาณูและอุปกรณ์ใกล้เคียง

ดังนั้นการเข้าใจถึงกระบวนการการถ่ายเทความร้อนระหว่างเชื้อเพลิงหลอมเหลวอุณหภูมิสูงและของเหลวระบายความร้อนภายใต้การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม อาทิเช่น อัตราการระบายความร้อนระหว่างเชื้อเพลิงหลอมเหลว ปริมาณชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นและที่หลุดลอกไปจะเป็นกุญแจที่จะนำไปสู่ความเข้าใจถึงปรากฏการณ์การระเบิดเป็นไอ ซึ่งสามารถที่จะนำความรู้ดังกล่าวไปช่วยออกแบบระบบแกนปฏิกรณ์ให้มีความปลอดภัยและลดความเสี่ยงต่อการระเบิดเป็นไอมากยิ่งขึ้น

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในโลหะต้นทรงกลมความร้อนสูงซึ่งตกลงอย่างอิสระในน้ำ โดยโลหะทรงกลมเป็นตัวแทนของเชื้อเพลิงหลอมเหลวอุณหภูมิสูงและน้ำเป็นตัวแทนของของเหลวระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ปรมาณู ระบบการทดลองถูกกระทำขึ้นเพื่อทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิที่ผิวและที่ภายในโลหะทรงกลมต้นที่ถูกเผาให้ร้อนจนมีอุณหภูมิตั้งแต่ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส จากนั้นถูกปล่อยตกลงอย่างอิสระในถังบรรจุน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 45 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 2 เมตร ระบบวัดจะทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิที่ผิวทรงกลมและภายในทรงกลมที่ลดลงด้วยเทอร์โมคัปเปิล ขณะที่โลหะทรงกลมต้นเคลื่อนที่ผ่านน้ำจนกระทั่งตกลงสู่ด้านล่างของถังน้ำ ค่าอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากการทดลองนี้จะนำไปเป็นเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมต้นที่ตกลงอย่างอิสระในน้ำ ที่สร้างขึ้นเพื่อประเมินค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในทรงกลม และคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโลหะทรงกลมต้นและน้ำ รวมถึงทำนายความหนาของชั้นฟิล์ม อัตราการเกิดขึ้นและหลุดลอกของชั้นฟิล์ม เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและแม่นยำสำหรับใช้ประเมินอุณหภูมิภายในทรงกลมและอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมต้นที่วัดได้จากการทดลองนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของการออกแบบระบบการทดลองในปัจจุบัน ทำให้ระดับอุณหภูมิของโลหะทรงกลม ยังอยู่ในระดับที่ไม่สูงนักเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงหลอมเหลวจริง

นอกจากนี้ระยะการตกลงของโลหะทรงกลมตันในระบบการทดลองมีระยะที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับระยะความสูงในแกนปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามผลการศึกษารั้งนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญต่อไปสำหรับการศึกษา ที่สภาวะการทดลองใกล้เคียงกับเหตุการณ์การระเบิดเป็นไอจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระในของเหลวระบายความร้อนภายใต้ปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์มเทียบกับเวลา
2. เพื่อประเมินลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันโดยใช้แบบจำลองที่มีอยู่

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. อุณหภูมิสูงสุดของโลหะทรงกลมตันอยู่ที่ระดับ 600 องศาเซลเซียส
2. พัฒนาเทคนิคเพื่อใช้วัดอุณหภูมิโลหะทรงกลมตันอย่างน้อย 2 ตำแหน่งตามแนวรัศมี
3. ประเมินการกระจายอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันจากข้อมูลที่ได้โดยอาศัยแบบจำลองที่มีอยู่

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาระบบวัดอุณหภูมิสำหรับโลหะทรงกลมตัน
3. ติดตั้งและปรับปรุงระบบการทดลอง
4. ทำการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิและเก็บข้อมูล
5. ประเมินการกระจายอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตัน โดยใช้ข้อมูลที่วัดได้ และแบบจำลองที่มีอยู่
6. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี ค.ศ. 2000 ดร.สัจชัย นิลสุวรรณ โฆษิต ได้ทำการวิจัยเรื่อง A Numerical Model for Time Dependent Film Boiling on a Sphere [1] โดยได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณการกระจายของอุณหภูมิภายในทรงกลมร้อนภายใต้การไหลผ่านของของเหลวและการก่อรูปของชั้นไอของของเหลวบนผิวหน้าของทรงกลมนี้ สมมติการกระจายของอุณหภูมินั้นขึ้นกับตำแหน่งตามแนวรัศมี และกำหนดการไหลของแบบจำลองของเหลวระบายนวนเป็น Potential Flow การไหลแบบ Potential Flow อย่างแท้จริงทำให้เกิดการก่อรูปของชั้นไอ มีสมมาตรทั้งด้านหน้าและหลังของทรงกลม อย่างไรก็ตามทางปฏิบัติแล้วไม่มีของไหลใดที่มีลักษณะเป็นแบบ Potential Flow นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาการแยกออกของฟองไอของของเหลวจากชั้นไอรอบทรงกลมและการยุบตัวของชั้นไอรอบทรงกลมและการยุบตัวของชั้นไอหากการก่อรูปของชั้นไอใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น
2. ปี ค.ศ. 1994 K.H.BANG ได้ทำการวิจัยเรื่อง Numerical prediction of forced convection film boiling heat transfer from a sphere [2] โดยได้สร้างแบบจำลองสำหรับการเดือดแบบฟิล์มบนทรงกลม ภายใต้การไหลแบบการพาบังคับและใช้ laminar boundary layer ในการคำนวณลักษณะการไหลทั้งไอและของเหลวที่บริเวณเหนือผิวทรงกลมจากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึงความหนาของชั้นไอที่บางมากซึ่งมีขนาดระดับ 10 ไมครอน ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่จากการทดลองนี้ไม่ได้วิเคราะห์ถึงการแยกตัวของฟองอากาศออกจากไอ และการแยกตัวของชั้นไอออกจากพื้นผิวบางบริเวณของทรงกลม ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่อาจอธิบายได้โดย laminar boundary Layer
3. ปี ค.ศ.1968 L.C. WITT ได้ทำการวิจัยเรื่อง Film Boiling from a Sphere [3] โดยการวิเคราะห์การเดือดแบบฟิล์มจากทรงกลมสู่การไหลแบบการพาบังคับ กำหนดให้ชั้นไอบางมาก รอยต่อระหว่างของเหลวและชั้นไอราบเรียบ ข้อมูลความเร็วและอุณหภูมิในชั้นไอเป็นเส้นตรง ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากทรงกลมมีความคล้ายคลึงกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากท่อทรงกระบอก
4. ปี ค.ศ. 1965 Kiyoshi KOBAYASI ได้ทำการวิจัยเรื่อง Film Boiling Heat Transfer around a Sphere in Forced Convection [4] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนการ

เคื่อดแบบฟิล์มรอบๆ ทรงกลมที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านของเหลว โดยตั้งสมมติฐานสำหรับการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ในการแก้ไขปัญหาโดยเสนอทฤษฎีที่พัฒนาข้อสมมติฐานภายใต้หลักการที่แสดงให้เห็นว่าค่า Nusselt number (Nu) สำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเคื่อดขึ้นอยู่กับ Reynolds number (Re), Prandtl number (Pr) อัตราส่วนความหนืดของเหลวต่อไอขนาดทรงกลม และค่า dimensionless number อื่นๆผลที่ได้จากการแก้ปัญหาดังกล่าวถูกนำไปใช้กับตัวอย่างของการถ่ายเทความร้อนสำหรับน้ำและโซเดียมเหลว

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

เข้าใจถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาของโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระในของของเหลวระบายความร้อนภายใต้ปรากฏการณ์การเคื่อดเป็นชั้นฟิล์ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การเดือดเป็นชั้นฟิล์มบนวัตถุทรงกลม

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [5]

ในการถ่ายเทความร้อน ความร้อนสามารถถ่ายเทจากจุดๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ด้วยกัน 3 วิธีคือ

1. การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ

การที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนไปจากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่ง จะมีการถ่ายเทพลังงานจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นการถ่ายเทพลังงานด้วยวิธีการนำ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x}$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนคงที่ จะได้สมการดังนี้

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

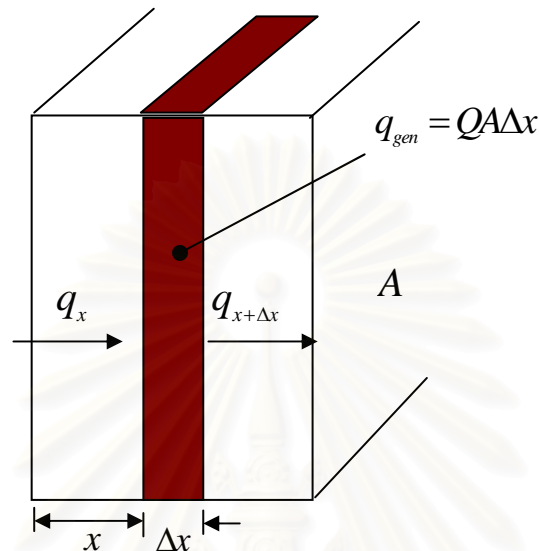
เมื่อ q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน, W

$\frac{\partial T}{\partial x}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหลต่อความยาว, $^{\circ}C / m$

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), $W / m^{\circ}C$

A คือ พื้นที่หน้าตัดซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน, m^2

เมื่อระบบที่พิจารณาเป็น หนึ่งมิติดังแสดงในรูป 2.1 ถ้าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว การหาปริมาณความร้อนกระทำได้โดยการอินทิเกรตและแทนค่า สมการที่ 2.1 ก็จะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.1 ปริมาตรอีลีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

อย่างไรก็ดี ถ้าระบบไม่อยู่ในสภาวะคงตัว อุณหภูมิของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กั เวลาหรือมีแหล่งกำเนิดความร้อน หรือตัวรับความร้อน อยู่ภายในของแข็ง ก็จะทำให้ปัญหานี้ยุ่งยากมากขึ้น ในกรณีหนึ่งมิติทั่วไปอาจจะพิจารณาได้ว่า

พลังงานที่ถูกนำมาจากผิวด้านซ้าย + พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นใน อีลีเมนต์ = พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ + พลังงานที่ถูกนำออกมาจากผิวด้านขวา

โดยปริมาณพลังงานดังกล่าว สามารถเขียนได้ในเทอมต่อไปนี้

$$\text{พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านซ้าย} = q_x = -kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x$$

$$\text{พลังงานที่ผลิตขึ้นใน อีลีเมนต์} = \dot{Q} A \Delta x$$

$$\text{พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial t} \Delta x$$

$$\text{พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านขวา} = q_{x+\Delta x} = -kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x}$$

- เมื่อ $Q =$ พลังงานที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, W/m^3
 $c =$ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ, $J/kg \cdot ^\circ C$
 $\rho =$ ความหนาแน่นของวัสดุ, kg/m^3

รวมความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังข้างบนนี้ลงในสมการสมดุลพลังงานจะได้

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + Q A \Delta x = \rho c A \frac{\partial T}{\partial t} \Delta x - A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}$$

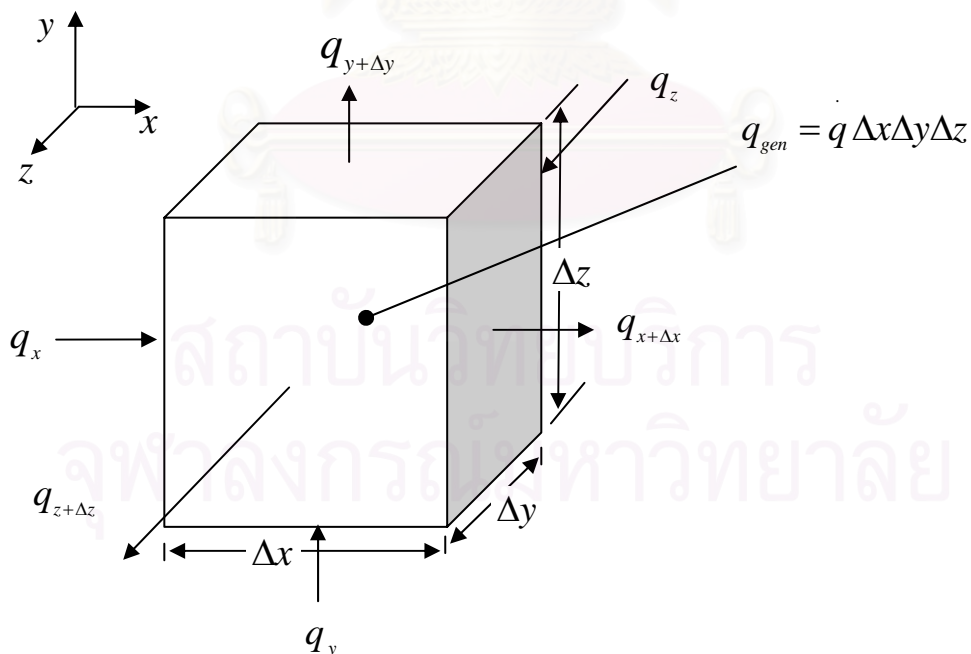
เมื่อประมาณว่า Δx มีขนาดเล็กมากจะสรุปได้ว่า

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x + kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

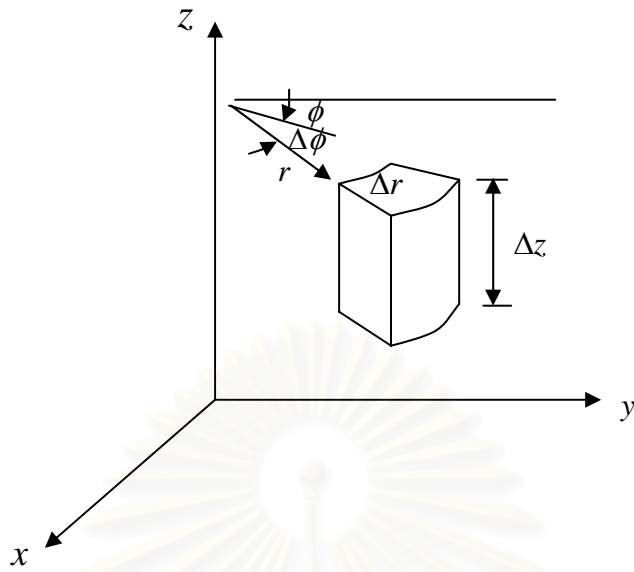
ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

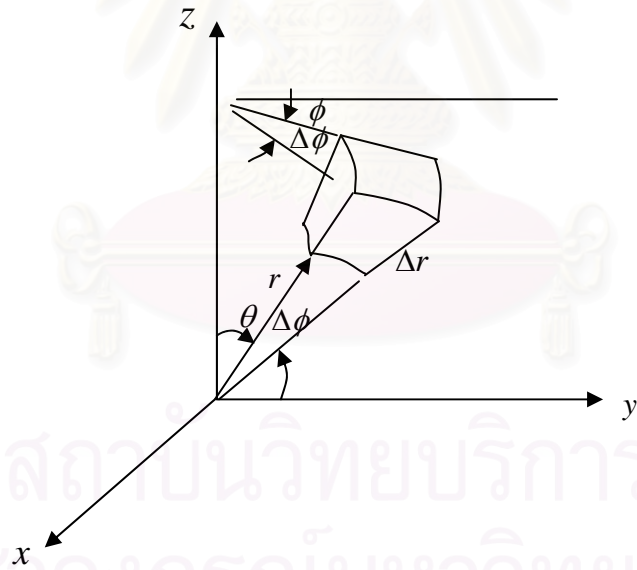
อย่างไรก็ตามสมการ 2.2 นี้เป็นการนำความร้อนในหนึ่งมิติ เท่านั้น ในกรณีระบบสามมิติในกรอบแกนอ้างอิงอื่น ๆ นั้นอาจจะพิจารณาปริมาตรที่ใช้วิเคราะห์ได้จากรูป 2.2, 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.2 ปริมาตรอีเลเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบโคออร์ดิเนต
 รูปทรงเรขาคณิต



รูปที่ 2.3 ปริมาตรอีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบ โคออร์ดิเนตรูปทรงกระบอก



รูปที่ 2.4 ปริมาตรอีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติแบบ โคออร์ดิเนตรูปทรงกลม

สำหรับสมการการนำความร้อนในระบบสามมิติที่แสดงด้วยระบบ โคออร์ดิเนตของรูปทรงเรขาคณิต ในรูปที่ 2.2 จะสามารถเขียนด้วยสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+\Delta x} + q_{y+\Delta y} + q_{z+\Delta z} + \frac{\partial E}{\partial t}$$

เมื่อ

$$q_x = -k\Delta y\Delta z \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+\Delta x} = -\left[k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right] \Delta y\Delta z$$

$$q_y = -k\Delta x\Delta z \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+\Delta y} = -\left[k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y+\Delta y} \right] \Delta x\Delta z$$

$$q_z = -k\Delta x\Delta y \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+\Delta z} = -\left[k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} \right] \Delta x\Delta y$$

$$q_{gen} = \dot{q} \Delta x\Delta y\Delta z$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \rho c \Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial T}{\partial t}$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของสมการการนำความร้อนสามมิติ จะแสดงได้ดังนี้

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อค่าสภาพการนำความร้อนมีค่าคงที่ สมการ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\alpha = k / \rho c$ เรียกว่า ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ (Thermal diffusivity) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

จากความสัมพันธ์ข้างบน แสดงอนุพันธ์ด้วยโคออร์ดิเนตพิกัดคาร์ทีเซียน นำมาเขียนในรูปอนุพันธ์เทเลอร์ด้วยทอมสองทอมแรก สมการ 2.3 สามารถนำมาปรับเปลี่ยนด้วยโคออร์ดิเนตพิกัดทรงกระบอกดังแสดงในรูป 2.3 หรือพิกัดทรงกลมดังแสดงในรูป 2.4 ด้วยเทคนิคการคำนวณจะได้ผลเฉลยดังนี้

สำหรับโคออร์ดิเนตพิกัดทรงกระบอก

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

สำหรับพิกัดโคออร์ดิเนตทรงกลม

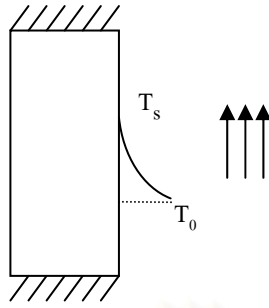
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

2. การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา

การถ่ายเทความร้อนที่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของตัวกลางซึ่งเป็นของไหล กล่าวคือโมเลกุลของของไหลซึ่งเคลื่อนที่และพาเอาพลังงานไปด้วย พลังงานดังกล่าวจึงเป็นผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหลดังแสดงในรูปที่ 2.5 อนึ่งปริมาณการถ่ายเทความร้อนข้ามผิวสัมผัสจากของแข็งสู่ของเหลวสามารถคำนวณได้จาก Newton's law of cooling ดังนี้

$$q = hA(T_s - T_o) \quad (2.6)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนข้ามผิวสัมผัส, $W / m^2 \cdot K$
 A คือ พื้นที่หน้าตัดผิวสัมผัส, m^2
 T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของของแข็ง, K
 T_o คือ อุณหภูมิต้นของของไหล, K

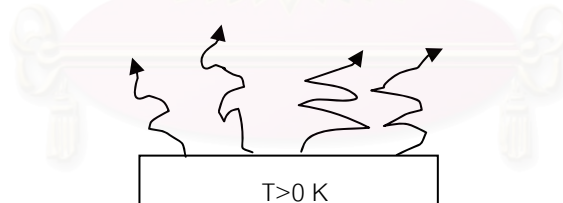


รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา โดยที่ $T_s > T_0$

โดยปริมาณถ่ายเทความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมด ระหว่างผนัง กับของไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาและขนาดพื้นที่ผิว A

3. การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี

ความร้อนถูกถ่ายเทได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำความร้อนและการพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนในวิธีนี้เป็นผลมาจากการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากวัตถุโดยการแผ่รังสีมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรง กับกำลังสี่ของค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ในขณะที่ค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนจะเป็น สัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยสามารถคำนวณ ได้จากกฎของ Stefan-Boltzmann ได้ดังนี้

$$q_{emitted} = \sigma AT^4 \quad (2.7)$$

โดยที่ T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน, K

σ คือค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์มาน (Stefan- Boltzman 's constant) เท่ากับ $5.6697e-8 W / m^2 \cdot K^4$ (โดยที่ไม่ขึ้นกับชนิดของผิว วัสดุ และอุณหภูมิ)

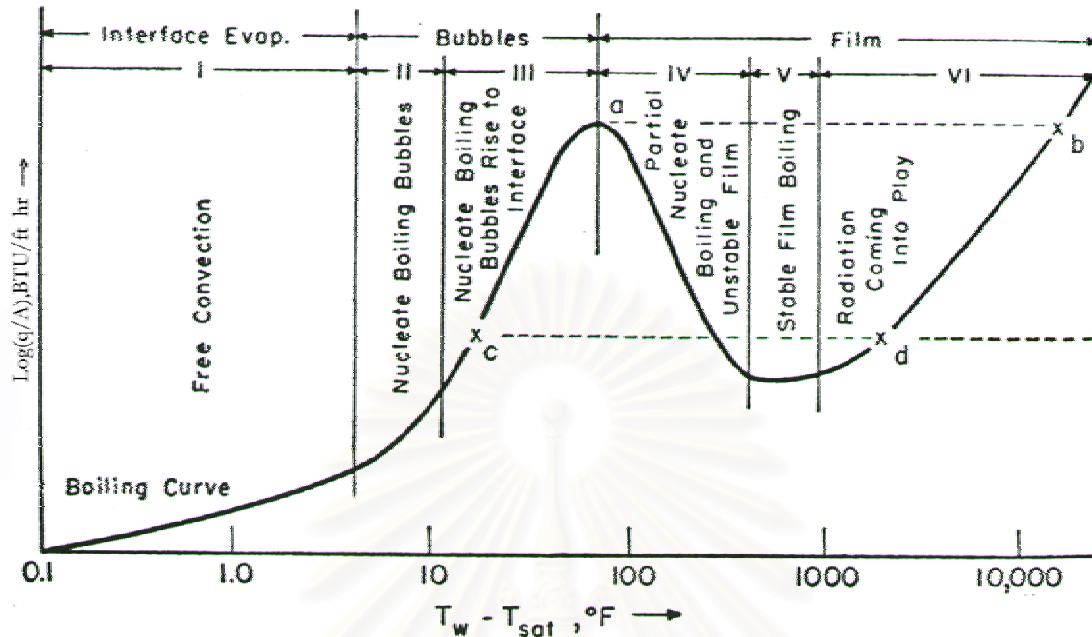
A เป็นพื้นที่ผิวของวัตถุ, m^2

2.2 การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม

การเดือดนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆกัน อย่างเช่น การพาความร้อนตามธรรมชาติเกิดเนื่องจากมีแอ่งของเหลวที่อยู่นิ่งและเกิดการเคลื่อนไหวบริเวณหน้าผิวสัมผัสกับแหล่งกำเนิดความร้อน รวมถึงการแยกตัวของฟองไอเพราะแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลวและไอ การเดือดลักษณะนี้เรียกว่า การเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling) การเดือดอีกลักษณะหนึ่งเกิดกับของเหลวซึ่งมีการเคลื่อนที่ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงประกอบด้วย การพาความร้อนโดยบังคับ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากกลไกภายนอก พร้อมกันนี้ยังได้รับอิทธิพลจากการพาความร้อนตามธรรมชาติและผลจากแรงลอยตัวอีกด้วย การเดือดลักษณะนี้เรียกว่า การเดือดแบบการพาบังคับ (Forced convection boiling)

2.2.1 การเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling)

เมื่อพิจารณาถึงน้ำที่ถูกต้มภายในกาต้มน้ำ จนกระทั่งเริ่มเดือด หรือตัวอย่างของการให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนที่แช่อยู่ในของเหลว เมื่อปริมาณความร้อนที่ให้กับระบบอยู่ในอัตราที่ต่ำ ไอของของเหลวจะเกิดขึ้นที่ผิวอิสระที่ด้านบนของของเหลว ขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (heat flux) เพิ่มมากขึ้น จะเริ่มเกิดฟองอากาศบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนซึ่งจะหลุดลอยสู่พื้นผิวด้านบนของของเหลวปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเดือด โดยที่ Nukiyama [6] เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาผลกระทบของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนและของเหลวระบายความร้อนต่อมา Farber และ Scorah [7] ได้ทำการทดลอง โดยนำลวดทองคำขาววางในแนวนอนแช่ลงในน้ำจากนั้นให้ความร้อนแก่ลวดทองคำขาวโดยผ่านกระแสไฟฟ้า เพื่อที่จะให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลวดและน้ำ จากผลการทดลองสามารถพิจารณาภาวะของการเดือดที่เกิดขึ้น ตามลักษณะเส้นโค้งการเดือด (boiling curve) เมื่อพิจารณา ($\Delta T = T_w - T_s$) ซึ่งแบ่งเป็น 6 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการเดือด (Boiling curve)

ช่วงที่ 1 : ΔT มีค่าน้อย การถ่ายเทความร้อนจากผิวลวดไปสู่ น้ำทำได้โดยวิธีการพาความร้อนตามธรรมชาติ การเดือดในช่วงนี้เรียกว่า Free convection

ช่วงที่ 2 : ΔT สูงขึ้น ทำให้เกิดฟองไอน้ำขึ้นบนผิวของเส้นลวด แต่ฟองเหล่านี้จะควบแน่นก่อนที่จะลอยขึ้นมาถึงผิวน้ำ

ช่วงที่ 3 : ΔT ที่มากขึ้นทำให้ฟองเกิดมากขึ้น ฟองเหล่านี้จะสามารถคงอยู่ได้นานจนสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยรอบ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวลวดจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วในช่วงที่ 2 และ 3 จะถูกเรียกรวมว่า Nucleate boiling จุดที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีค่ามากที่สุด (Critical Heat Flux, CHF) เป็นจุดสิ้นสุดของช่วงนี้

ช่วงที่ 4 : เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมาถึงจุดที่มีค่าสูงสุดแล้วยังเพิ่มค่า ΔT ต่อไปอีก ฟองที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากจนไม่สามารถจะเคลื่อนที่ออกจากผิวลวดได้ทันและทำตัวเป็นฉนวนกันไม่ให้ความร้อนสามารถถ่ายเทออกจากผิวลวด ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง

ช่วงที่ 5 : ในช่วงนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงมีค่าต่ำสุด การเดือดในช่วงนี้มีชื่อเรียกว่า Stable film boiling

ช่วงที่ 6 : ลักษณะพิเศษของการเดือดในช่วงนี้คือ ΔT มีค่าสูงมาก ในช่วงนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

2.2.2 การเดือดแบบพาบังคับ (Forced convection boiling)

การถ่ายเทความร้อนในกรณีการไหลแบบบังคับ มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของวัตถุและของไหล ซึ่งการไหลของของไหลนี้จะถูกบังคับจากภายนอกเช่น การใช้ Pump หรือพัดลม เป็นต้น โดยทั่วไปสิ่งสำคัญของปัญหาการพาความร้อนคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตและสภาวะของการไหลของไหล การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ 2 วิธี วิธีแรกนั้นคือวิธีวิเคราะห์ โดยตั้งสมการ ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่สนใจและดำเนินการแก้สมการที่ตั้งขึ้น วิธีแรกนี้มีข้อจำกัด มักนำมาใช้กับปัญหาที่ไม่ซับซ้อน สำหรับวิธีที่สองนั้นเป็นวิธีที่อาศัยผลจากการทดลอง โดยนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ในรูปของพารามิเตอร์ไร้มิติ พารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับการพาความร้อนโดยบังคับ มักจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$Nu = F(Re, Pr)$$

พารามิเตอร์ไร้มิตินี้มีความสำคัญต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยจะจำแนกดังนี้

นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่บอกถึงการถ่ายเทความร้อนข้ามรอยต่อของตัวกลาง โดยเป็นอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนต่อการนำความร้อนผ่านชั้นของไหลที่มีขนาดของระบบถ่ายเทความร้อนคือ L นั่นคือ

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

โดย L แทนขนาด (Characteristic length) ของระบบถ่ายเทความร้อน

k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

h แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่ระบุรูปแบบการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน โดยเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด หาได้จากสมการ

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu}$$

โดย ρ แทนความหนาแน่นของของไหล

v แทนความเร็วของของไหล

μ แทนความหนืดพลศาสตร์ของของไหล

พรีนดท์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number, Pr)

เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่เปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาบังคับกับการนำความร้อน สามารถเขียนได้คือ

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$$

โดย c_p แทนความร้อนจำเพาะของของไหลเมื่อความดันคงที่

ν แทนความหนืดจลน์ศาสตร์ของของไหล (μ / ρ)

α แทนการแพร่กระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ของของไหล ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าการนำความร้อนกับค่าความจุความร้อน ดังสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

2.3 ข้อสมมติฐานสำหรับการคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายในวัตถุทรงกลมและความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น

โดยสมการพลังงานความร้อนดังกล่าวข้างต้นจะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายในวัตถุทรงกลม ภายใต้สมมติฐานดังนี้

2.3.1 สำหรับวัตถุทรงกลม การพิจารณาถึงอุณหภูมิที่กระจายภายในทรงกลมเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาสามารถพิจารณาได้จากสมการการนำความร้อนในระบบพิกัดทรงกลมเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในทรงกลม และไม่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้ดังนี้

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

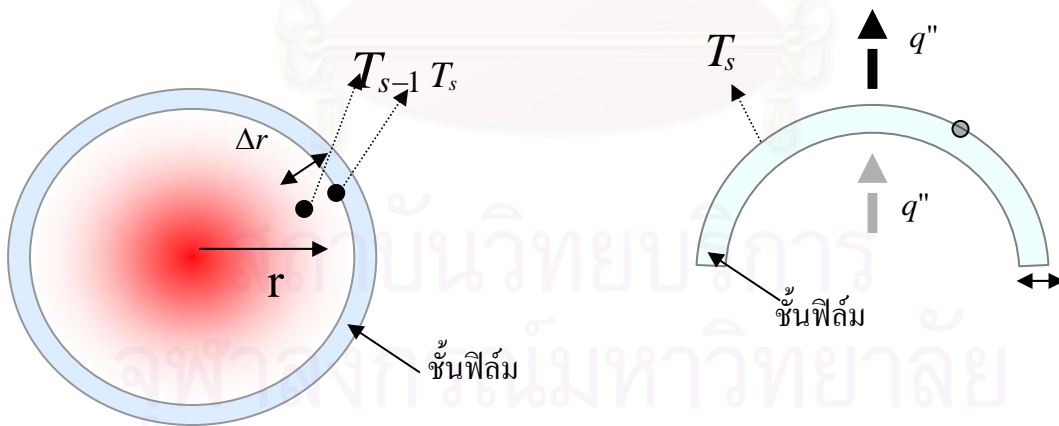
2.3.2 กำหนดให้ปัญหาที่พิจารณามีสมมาตรตามแนวแกนมุมกวาดรอบเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ) ดังนั้นจะพิจารณาระบบเป็นสองมิติ โดยจะคำนวณการกระจายอุณหภูมิในระบบสองมิติในแนวแกนรัศมี (r) และตามแนวมุมกระทำกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นสมการ ที่ 2.8 จะสามารถลดรูปเหลือ เป็น

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

2.3.3 กำหนดให้วัตถุทรงกลมมีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงสุดคือ T_{\max} เท่ากันตลอดทั้งทรงกลม โดยการถ่ายเทความร้อนเริ่มจากที่ผิว ในทิศทางตามแนวรัศมี โดยที่ตำแหน่ง รัศมี เท่ากับศูนย์จะพิจารณาว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับระยะตามแนวแกนรัศมีเป็นศูนย์

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

2.3.4 สำหรับอุณหภูมิที่ผิว ของทรงกลม (T_s) ตามแนวมุมต่างๆจะใช้ค่าที่ประเมินจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเป็นขอบเขตเบื้องต้นในการคำนวณ



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งอุณหภูมิในทรงกลมและชั้นฟิล์ม

2.3.5 ในส่วนของชั้นฟิล์ม จะพิจารณาถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มเทียบกับเวลา เนื่องจากสิ่งทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้นคือความร้อนที่ถูกถ่ายเทตามแนวรัศมีออกจากทรงกลมเข้าสู่ของเหลว ปัจจัยสำคัญซึ่งกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อน คืออุณหภูมิที่พื้นผิวของทรง

กลมซึ่งเปลี่ยนแปลงไปกับความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ชั้นฟิล์มมีขนาดคงที่จะสามารถคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มโดยประมาณได้โดยพิจารณาว่าการนำความร้อนของทรงกลมที่ผิวมีค่าเทียบได้กับการนำความร้อนข้ามชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น [9] นั่นคือ

$$-\frac{k(T_s - T_{s-1})}{\Delta r} \cong -\frac{k_g(T_{fg} - T_s)}{\delta} \quad (2.10)$$

$$\delta \cong \Delta r \frac{k_g(T_{fg} - T_s)}{k(T_s - T_{s-1})}$$

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ชั้นฟิล์มมีขนาดความหนาเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาจะต้องพิจารณาว่าความร้อนที่ถ่ายเทออกจากทรงกลมที่ผิว จะถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของเหลวและเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม โดยการเดือดของของเหลวและโดยเหตุที่ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยมาก ดังนั้นจะไม่คำนวณอุณหภูมิที่อยู่ในชั้นฟิล์มและการเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มโดยตรง แต่จะกำหนดให้อุณหภูมิของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่จุดเดือดคือ T_{fg} ดังนั้นการก่อรูปของชั้นไอบนผิวหน้าวัตถุทรงกลมสามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \rho_g h_{fg} \frac{\partial \delta}{\partial t} - \rho_f v_r C_p (T_{fg} - T_0) \Big|_{r=r_0+\delta} \quad (2.11)$$

สำหรับสมการที่ (2.10), (2.11) และ (2.12)

h_{fg} = ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ, (J/kg)

δ = ความหนาของชั้นไอ, (m)

T_0 = ค่าอุณหภูมิตั้งต้นของของเหลว, (K)

v_r = ความเร็วของของเหลวตามแนวรัศมี, (m/s)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ, ($kJ/kg \cdot K$)

t = เวลา, (sec)

ρ_f, ρ_s, ρ_g = ความหนาแน่นของของเหลว ของวัตถุทรงกลมและชั้นฟิล์ม ตามลำดับ, (kg/m^3)

k และ k_g = ค่าการนำความร้อนของวัตถุทรงกลมและของชั้นฟิล์มตามลำดับ, ($W/m \cdot K$)

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุทรงกลม, (K)

T_{s-1} = อุณหภูมิที่ตำแหน่งถัดจากผิวเข้าไป Δr ของวัตถุทรงกลม, (K)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระภายใต้ปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม เพื่อจำลองถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโลหะหลอมเหลวซึ่งแยกจากแท่งเชื้อเพลิงตกลงอย่างอิสระในของเหลวระบายความร้อนเนื่องจากเป็นเรื่องที่ยากทางการทดลองในการที่จะวัดอุณหภูมิในโลหะทรงกลมตันโดยตรงพร้อมกันหลายๆจุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระภายใต้ปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม

เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจำเป็นต้องใช้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน ณ ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกนมุมที่เปลี่ยนไปตามเวลา มาใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นในการคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่างๆในทรงกลม ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ติดตั้งระบบการทดลองเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน ณ ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกนมุมที่เปลี่ยนไปตามเวลา

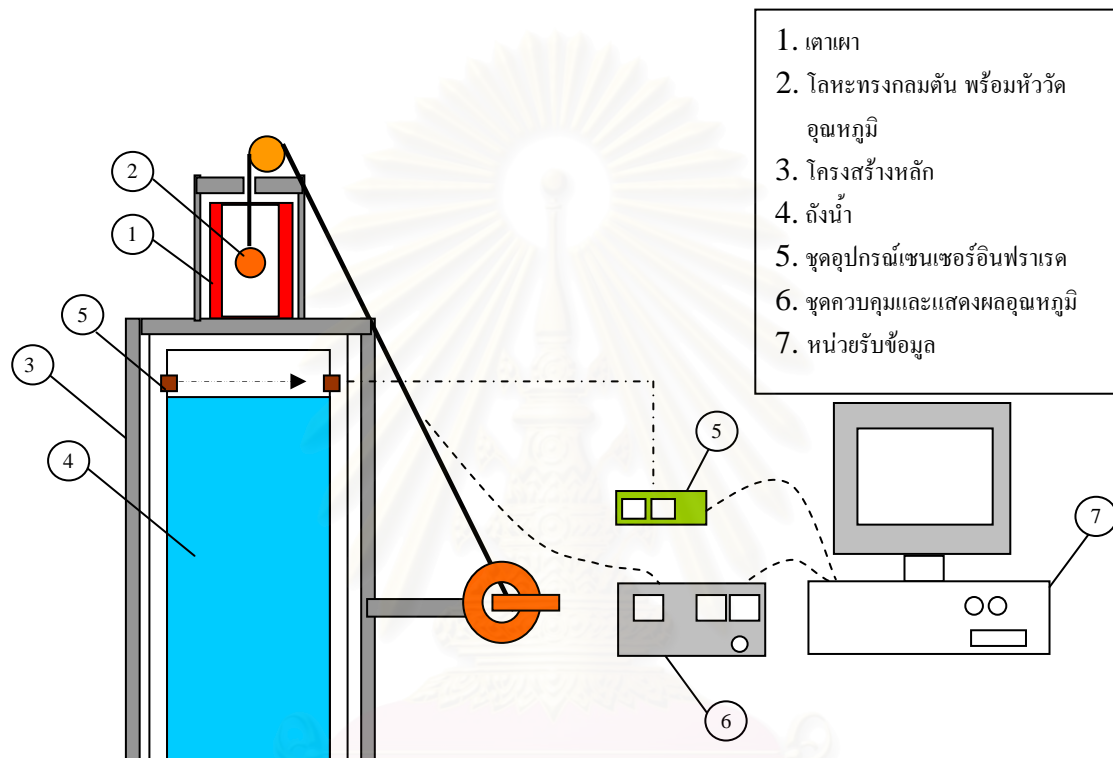
นอกจากนั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นว่ามีความถูกต้อง แม่นยำเพียงใด จึงมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ภายในทรงกลมเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ระบบการทดลองที่จัดทำขึ้นจึงควรจะต้องเป็นระบบที่สามารถวัดอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันควบคู่ไปพร้อมๆกัน

ในส่วนของวิธีการดำเนินการวิจัยถูกแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะเป็นส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการทดลอง เป็นกระบวนการซึ่งจะได้มาซึ่งค่าอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนไปตามเวลา ในส่วนที่สองจะเป็นส่วนของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ซึ่งเป็นขั้นตอนในการคำนวณหาอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ ตำแหน่งต่างๆที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยอาศัยการแปลงข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ผิวที่ได้รับจากผลการทดลอง มาเป็นขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

สำหรับระบบอุปกรณ์ทดลองสามารถพิจารณาแยกเป็น 7 ส่วน คือ (1) เตาเผา (2) โลหะทรงกลมตันพร้อมหัววัดอุณหภูมิ (3) โครงสร้างหลัก (4) ถังน้ำ และ (5) ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรด (6) ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ และ (7) หน่วยรับข้อมูล รูปที่ 3.1 คือแผนผังแสดงรายละเอียดอุปกรณ์



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ทดลอง

หลักการการทำงานของอุปกรณ์ทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ง่ายๆดังนี้

โลหะทรงกลมตันถูกนำไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการในเตาเผาด้วยอุปกรณ์รอกและสลิงอุณหภูมิภายในเตาสามารถปรับตั้งได้จากชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของโลหะทรงกลมตันอยู่ในช่วงที่ต้องการจะทำการปล่อยอุปกรณ์ลือค ทำให้โลหะทรงกลมตันที่ถูกเผาจนมีอุณหภูมิสูงถูกปล่อยตกลงมา ซึ่งก่อนที่โลหะทรงกลมตันจะเคลื่อนที่สัมผัสผิวน้ำในถังทรงกลมตันจะเคลื่อนที่ตัดลำแสงอินฟราเรด ทำให้ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรดส่งสัญญาณไฟฟ้าไปบอกยังหน่วยรับข้อมูลให้เริ่มเก็บบันทึกข้อมูลจากสัญญาณเทอร์โมคัพเปิลที่ติดตั้งในทรงกลมและที่ผิวของทรงกลม จากนั้นทรงกลมตันจึงเริ่มเคลื่อนตัวผ่านน้ำในถัง ในขณะที่หัววัดอุณหภูมิส่งค่าของอุณหภูมิภายในทรงกลมและที่ผิวของทรงกลม ไปบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์

จนกระทั่งทรงกลมตันเคลื่อนที่ตกลงถึงก้นถัง หลังจากนั้นสักรูระบบการบันทึกค่าอุณหภูมิจะหยุดการทำงาน

ระบบการทดลองนี้ก่อนทำการปรับปรุงได้ติดตั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาและปรับปรุง อุปกรณ์ทดลองเพื่อให้มีความสอดคล้องต่อเป้าหมายในการศึกษาค้างนี้ ซึ่งระบบการทดลองดั้งเดิมนั้น ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์ ในการเก็บบันทึกโพรไฟล์ของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตัน แต่เนื่องจาก การศึกษาในครั้งนี้ต้องการทราบอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นระบบอุปกรณ์ทดลองใหม่ที่ปรับปรุงขึ้นจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการเก็บบันทึกโพรไฟล์อุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมควบคู่ไปกับกับการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิภายในทรงกลมเดิม ซึ่งจะสามารถกระทำได้โดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มที่ผิวโลหะทรงกลมตัน และพัฒนาโปรแกรมการรับสัญญาณของคอมพิวเตอร์ที่หน่วยรับข้อมูล

นอกจากนั้นระบบการทดลองใหม่ยังได้พัฒนาความแม่นยำในการเริ่มเก็บข้อมูล ด้วยการนำระบบการตรวจจับวัตถุด้วยแสงอินฟราเรดเข้ามาใช้ จากเดิมที่ใช้ การกะประมาณการเริ่มต้นเก็บข้อมูลด้วยสายตา และกดแป้นคอมพิวเตอร์ ให้พร้อมกับจังหวะการเริ่มปล่อยโลหะทรงกลมตัน วิธีใหม่ได้ใช้เทคนิคการตรวจจับด้วยเซนเซอร์ลำแสงอินฟราเรด อุปกรณ์เซนเซอร์ตัวรับและตัวส่งจะถูกติดตั้งไว้ที่ถ้ำน้ำ ณ ตำแหน่งเหนือผิวน้ำเล็กน้อย ขณะที่โลหะทรงกลมตันวิ่งผ่านลำแสงอินฟราเรด ชุดควบคุมเซนเซอร์อินฟราเรดจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปทำการสั่งให้คอมพิวเตอร์เริ่มเก็บข้อมูล เทคนิคใหม่นี้จะช่วยเพิ่มความถูกต้องของตำแหน่งการเริ่มต้นเก็บข้อมูลที่ได้

สำหรับระยะทางการปล่อยตกของโลหะทรงกลมตันที่เคลื่อนที่ในของเหลวระบายความร้อนนั้นในระบบการทดลองเดิมมีความสูงประมาณ 60 เซนติเมตร ซึ่งอาจจะทำให้การสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอาจจะยังไม่ชัดเจนนัก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้เพิ่มระยะทางการปล่อยตกเพิ่มขึ้นอีก 3 เท่า เป็นประมาณ 180 เซนติเมตร เพื่อให้เห็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น รวมสรุปข้อแตกต่างระหว่างระบบการทดลองเก่าและใหม่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบระบบการทดลองเดิมและระบบการทดลองใหม่

	ระบบการทดลองเดิม	ระบบการทดลองใหม่
1.การวัดอุณหภูมิ	วัดเฉพาะอุณหภูมิภายในทรงกลม	วัดอุณหภูมิที่ผิวและภายในทรงกลม
2. ระบบการเริ่มต้นเก็บข้อมูล	ใช้วิธีกะประมาณ	ใช้ระบบเซนเซอร์ด้วยแสงอินฟราเรด
3.ระยะการปล่อยตก	60 เซนติเมตร	180 เซนติเมตร

ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดในการติดตั้งระบบการทดลองในการศึกษานี้แยกตามส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญดังนี้

3.2 รายละเอียดของอุปกรณ์การทดลอง

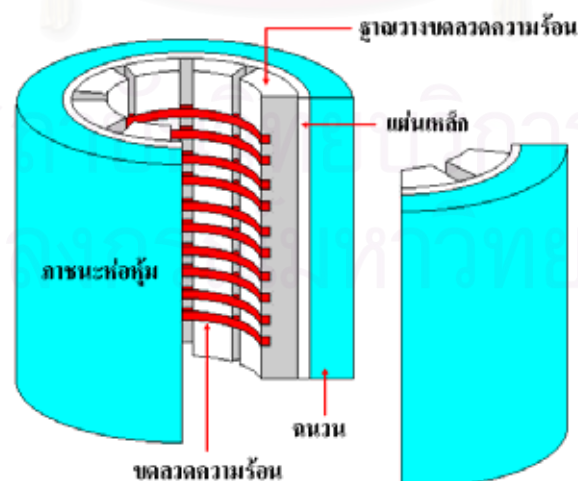
3.2.1 เตาเผา

เตาเผาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ให้ความร้อนกับโลหะทรงกลมตัน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของโลหะทรงกลมตันให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยคุณลักษณะของเตาเผา มี ดังนี้

1. เตาเผามีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาดประมาณ 9 ซม. ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้ได้กับทรงกลมโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 5 ซม. ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกันระหว่างทรงกลมโลหะและเตาเผาในระหว่างการดำเนินการทดลอง
2. เตาเผาจะมีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิของทรงกลมโลหะขึ้นไปไม่ต่ำกว่า 600 °C อุณหภูมิเหนือจุดเดือดของน้ำนี้เพื่อยืนยันว่ากระบวนการเดือดจะต้องเกิดขึ้นเมื่อทรงกลมโลหะถูกปล่อยลงมาสัมผัสกับน้ำระบายความร้อนในภาชนะด้านล่าง

ส่วนประกอบของเตาเผาสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.2

1. ขดลวดความร้อน (Heating Wire)
2. ฐานวางขดลวดความร้อน (Heating Wire Supporter)
3. ภาชนะห่อหุ้ม (Enclosure)



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเตาเผา

ขดลวดความร้อนที่ใช้มีขนาด 2 กิโลวัตต์ ขดเป็นเกลียววางตัวตามช่องว่างของ ฐานวางขดลวดความร้อน ขณะใช้งานกินกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมป์ สำหรับฐานวางขดลวดความร้อนทำจากแท่งคอนกรีตทนไฟแสดงในรูปที่ 3.3 โดยการนำฐานวางขดลวดความร้อนจำนวน 12 ชุดนำมาประกอบเป็นรูปทรงกระบอกและยึดติดกับท่อโลหะขนาด 16 เซนติเมตรก็จะได้เป็นโครงสร้างเตาเผา ดังแสดงใน รูป 3.4



รูปที่ 3.3 ฐานวางขดลวดความร้อน



รูปที่ 3.4 เตาเผา

3.22 โลหะทรงกลมตัน พร้อมหัววัดอุณหภูมิ

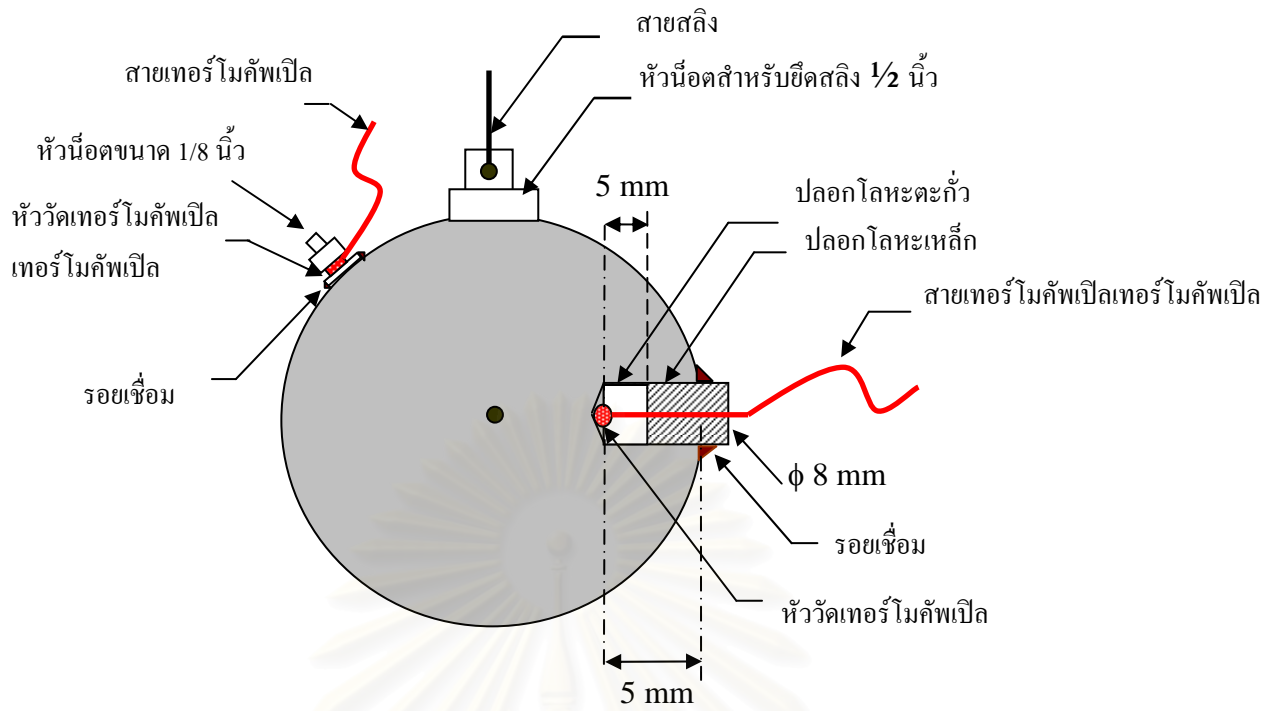
โลหะทรงกลมตันถูกใช้เพื่อจำลองถึงเชื้อเพลิงหลอมเหลวอุณหภูมิสูงที่ตกลงมาสัมผัสของเหลวระบายความร้อน ในการทดลองนี้ใช้โลหะทรงกลมตันที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นิ้ว

เพื่อที่จะได้โพรไฟล์ของอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในทรงกลม จึงได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิด Type K ซึ่งมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 850 องศาเซลเซียส เข้าไปในภายใน ที่ตำแหน่งประมาณ ครึ่งหนึ่งของรัศมี จากผิวโลหะทรงกลม และอีกจุดหนึ่งที่ตำแหน่งผิวของโลหะทรงกลม

สำหรับการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิดเข้าไปภายในทรงกลมตันนั้นกระทำโดย การเจาะรูทรงกลมตันขนาดประมาณ 8 มิลลิเมตรลงไปประมาณ 12.5 เซนติเมตรด้วยหัวเจาะชนิดพิเศษสำหรับเจาะเหล็กกล้าไร้สนิม หลังจากนั้นนำ ปลายเทอร์โมคัพเปิดที่หุ้มด้วยโลหะตะกั่วทรงกระบอกขนาดยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร จนมิดหัวเทอร์โมคัพเปิด การหุ้มด้วยโลหะตะกั่วที่ปลายเทอร์โมคัพเปิดนี้ จุดประสงค์ก็เพื่อให้ไม่ให้อากาศอยู่ภายในรูที่เจาะ หลังจากนั้นนำปลายเทอร์โมคัพเปิดที่หุ้มด้วยโลหะตะกั่วทรงกระบอกสวมลงไปในรู ให้ปลายหัววัดเทอร์โมคัพเปิดสัมผัสผิวด้านล่างของรูที่เจาะ จากนั้นนำปลอกโลหะเหล็กบุทรงกระบอกเจาะรูตรงกลางและบากด้านข้าง ร้อยด้วยสายเทอร์โมคัพเปิด สวมลงไปในรู แล้วทำการสวมอัดปลอกเหล็กให้กดทับปลอกโลหะตะกั่วลงไป ให้มั่นใจว่าปลายหัววัดเทอร์โมคัพเปิดสัมผัสผิวด้านล่างของรูที่เจาะและ มีความแน่นเพียงพอ จากนั้นทำการเชื่อมด้วยไฟฟ้า 2 จุด ที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างปลอกโลหะเหล็กและผิวทรงกลม เพื่อให้ปลอกเหล็กยึดติดกับโลหะทรงกลมตัน เพื่อมั่นใจว่าหัววัดเทอร์โมคัพเปิดที่ติดตั้งในทรงกลมตันจะไม่เคลื่อนที่ขณะทำการใช้งาน

สำหรับการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิดที่ผิวทรงกลมตันนั้น ในการศึกษารุ่นนี้ได้กระทำโดยการติดตั้งหัวสกรูขนาด 1/8 นิ้วลงไปผิวในตำแหน่งที่ต้องการก่อน จากนั้นนำเทอร์โมคัพเปิดซึ่งปลายสายเป็นแบบหางปลากลมไปสวมกับหัวสกรูแล้วล็อกให้แน่นด้วยน็อตอีกทีหนึ่ง

สำหรับอุปกรณ์ในการยึดกับสายสลิงนั้น ได้ทำการติดตั้งหัวน็อตขนาด 1/2 นิ้วที่ผิวของโลหะทรงกลม และทำการเจาะรูที่ปลายเกลียวเพื่อใช้สำหรับยึดติดกับสายสลิงที่ไว้ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงของทรงกลมแผนภาพแสดง การติดตั้งเทอร์โมคัพเปิดในโลหะทรงกลมตันและภาพถ่ายโลหะทรงกลมตันพร้อมหัววัดเทอร์โมคัพเปิดแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดง การติดตั้งเทอร์โมคัพเปิลในโลหะทรงกลมตัน

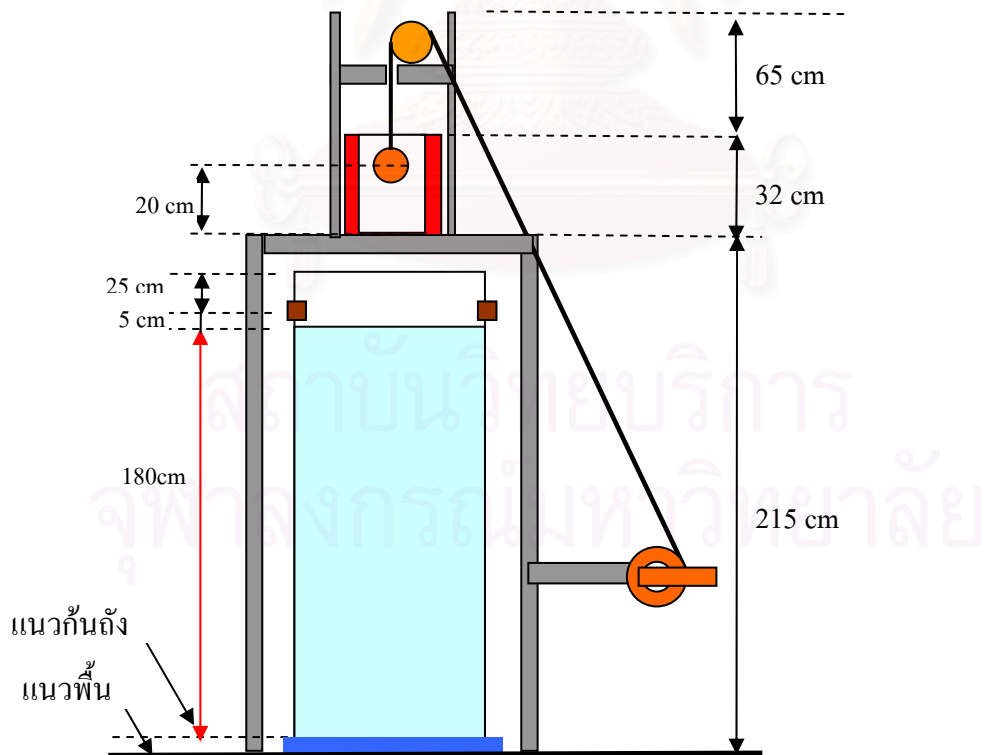


รูปที่ 3.6 โลหะทรงกลมตัน

3.23 โครงสร้างหลัก

โครงสร้างหลักสร้างจากโครงเหล็กฉาก เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบและการพับเก็บในกรณีเลิกใช้งาน ความสูงของโครงสร้างเหล็กทั้งหมดประมาณ 3.1 เมตร โดยโครงสร้างสนับสนุนนี้สามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ได้ 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่ใช้ในการติดตั้งของรอกด้านล่างพร้อมแขนจับที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยโลหะทรงกลมตัน ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ใช้รองรับ โคมรูปถ้วยที่ใช้ช่วยในการเคลื่อนที่ของลวดสลิงและสายเทอร์โมคัปเปิล ส่วนที่สามเป็นส่วนที่รองรับ เตาเผาและยึดเตาเผาให้อยู่ในสภาพที่มั่นคงและปลอดภัย ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนโครงเหล็กที่เว้นไว้สำหรับการติดตั้งถังน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งมีความสูงสุดไม่เกิน 2.10 เมตร

โดยทั่วไป ระบบรอกด้านล่างพร้อมแขนจับมีหน้าที่หลักในการปล่อยโลหะทรงกลมตัน โดยดึงคันสลักที่ล็อกไว้จากนั้น โลหะทรงกลมตันซึ่งมีน้ำหนักก็จะเคลื่อนตัวตกลงจากเตาเผาสู่น้ำด้านล่าง เมื่อโลหะทรงกลมตันอยู่ด้านล่างของถังหลังจากทดลองเสร็จในรอบหนึ่งๆ เมื่อต้องการทดลองในครั้งใหม่ก็ทำการหมุนแขนกลของรอกชุดล่างเพื่อทำการดึงโลหะทรงกลมตันจากพื้นด้านล่างของถังขึ้นสู่ตำแหน่งเดิมที่กลางเตาเผา ที่ตำแหน่งประมาณ 2.35 เมตรจากพื้นห้องซึ่งถูกควบคุมโดยจำนวนการหมุนของแขนกลของรอก รูปแสดงระยะการจัดตำแหน่งของส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างหลักแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปถ่ายของ โครงสร้างหลักแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ระยะการจัดตำแหน่งของส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างหลัก



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายโครงสร้างหลัก

3.24 ถังน้ำ

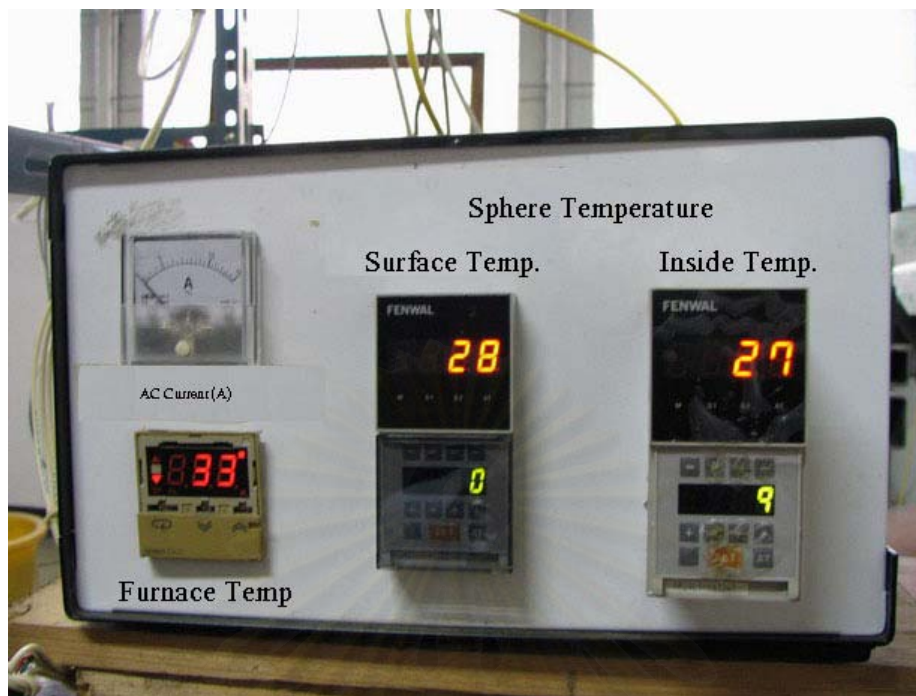
ถังน้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นถังน้ำรูปทรงกลมที่ประกอบขึ้นจากท่อ PVC มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ยาว 2.10 เมตรและอุดใต้ท่อด้วยฝาปิดท่อ PVC พร้อมทั้งติดตั้ง ก๊อกน้ำสำหรับถ่ายน้ำทิ้งเมื่อต้องการเปลี่ยนน้ำ โดยถังน้ำที่เงื่อนไขการทดลองได้ทำการบรรจุน้ำไว้ที่ความสูงประมาณ 1.80 เมตรจากก้นถังซึ่งเป็นระยะซึ่งมั่นใจได้ว่าน้ำที่กระเด็นจากการที่โลหะทรงกลมตันตกลงไปในน้ำจะไม่กระเด็นเข้าไปในเตาอันอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่เตาเผาได้นอกจากนั้นที่บริเวณก้นถังได้ทำการวางก้อนหินขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร หนาประมาณ 3 เซนติเมตรไว้เพื่อไม่ให้ผิวของโลหะทรงกลมตันซึ่งมีอุณหภูมิสูงสัมผัสโดยตรงกับก้นถังซึ่งเป็นพลาสติก จนเกิดการละลายซึ่งอาจจะทำให้ถังรั่วซึมได้

3.25 ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรด

ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรดเป็นชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบสำเร็จรูปประกอบไปด้วย เซนเซอร์ตัวส่ง ตัวตรวจจับ แสงอินฟราเรด และแผงวงจรชุดควบคุม ซึ่งได้นำมาติดตั้งกับระบบการทดลอง โดยเจาะรูที่ตัวถังน้ำและติดตั้งตัวเซนเซอร์ตัวส่งและตรวจจับแสงอินฟราเรดไว้ที่ด้านตรงข้ามกันของถังน้ำบริเวณด้านบนบนของถังน้ำ ที่ตำแหน่งห่างจากปากถังประมาณ 25 cm และเพื่อทำการตรวจจับการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมตันเมื่อโลหะทรงกลมตันถูกปล่อยตกและเคลื่อนที่ผ่านลำแสงอินฟราเรด ทำให้อุปกรณ์ตรวจจับแสงอินฟราเรดไม่สามารถตรวจพบแสงอินฟราเรด จากนั้นวงจรควบคุมสัญญาณอินฟราเรดจะส่งสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าไปยังหน่วยรับข้อมูลของคอมพิวเตอร์เพื่อให้ระบบเก็บข้อมูลเริ่มทำการเก็บข้อมูลจากสัญญาณเทอร์โมคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิของโลหะทรงกลมตัน

3.26 ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ

สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลซึ่งมีสัญญาณอยู่ในระดับมิลลิโวลต์นั้นต้องเข้ามาขยายสัญญาณที่ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ เมื่อประมวลผลแสดงเป็นตัวเลขให้ทราบค่าอุณหภูมิที่แท้จริง นอกจากนั้น หน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิจะทำหน้าที่ตัดและต่อกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดความร้อนในเตาเผาเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าที่ตั้งไว้ ในการทดลองนี้ใช้หน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ ทั้งหมด 3 ชุด ชุดแรกมีไว้สำหรับวัดและแสดงผลอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน โดยต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิลที่ปลายสายหัววัดติดอยู่กับสกรูที่ผิวทรงกลม ชุดที่สองมีไว้สำหรับวัดและแสดงผลอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมีทรงกลม โดยหน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ ชุดที่สองนี้ยังทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเตาเผา เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดไว้ หน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิที่สองนี้จะตัดกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดความร้อนในเตาเผา และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้จะต่อกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดความร้อนในเตาเผา เป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในทรงกลมให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ชุดสุดท้ายไว้สำหรับแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาเผา โดยต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิลที่ปลายหัววัดสัมผัสกับอากาศในเตาเผา เพื่อใช้อ้างอิงเทียบกับค่าอุณหภูมิในโลหะทรงกลมตันและผิวทรงกลม โดยชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิที่หนึ่งและสองซึ่งใช้วัดอุณหภูมิเป็นของยี่ห้อ FENWAL รุ่น AR24L และชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิแสดงผลชุดที่สามเป็นของยี่ห้อ OMROM รุ่น E5CS รูปที่ 3.9 แสดงรูปถ่ายของชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9 ชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ

3.27 หน่วยรับข้อมูล

หน่วยรับข้อมูลประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ และ Digital acquisition card ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงสัญญาณ อนุภาคจากชุดควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ ไอบีเอ็ม รุ่น Intel 80486 CPU, 66 MHz, 20 MB memory, 3.5 inch floppy and 800 MB hard disk โดยระบบปฏิบัติการที่ใช้เป็น DOS for WINDOW 95 โปรแกรม GCC for DOS ถูกใช้ในการควบคุมการส่งและรับสัญญาณระหว่าง Digital acquisition card และหน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ

หน่วยรับข้อมูลสามารถ สุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่ อัตรา $0.8 \mu\text{s}$ ต่อ 1 sampling อย่างไรก็ตาม ตาม Time scale ของการทดลองอยู่ในระดับ milliseconds ดังนั้นการบันทึกข้อมูลถูกกำหนดไว้ที่ 0.8 ms ต่อ 1 sampling แต่ละ sample จะถูกแปลงเป็น 1 byte ข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำ (RAM) ก่อนจะถูกเขียนลงบน hard disk เมื่อเก็บข้อมูลครบตามจำนวน

ด้วยเงื่อนไขการทดลองปัจจุบันจะต้องสุ่มรับข้อมูล 5000 Sampling ต่อ 1 channel และใช้เวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 4-5 วินาทีซึ่งสามารถครอบคลุมช่วงเวลาการตกของโลหะทรงกลมต้นจากเตาเผาสู่ก้นถังน้ำ



รูปที่ 3.10 หน่วยรับข้อมูล

3.3 เงื่อนไขการทดลองและขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระในของเหลวระบายความร้อน เงื่อนไขการทดลองได้ถูกแบ่งไปตามตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตัน นอกจากนั้นระดับอุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะทรงกลมตันก่อนหล่นลงในของเหลวระบายความร้อนก็เป็นเงื่อนไขที่ถูกกำหนดขึ้น

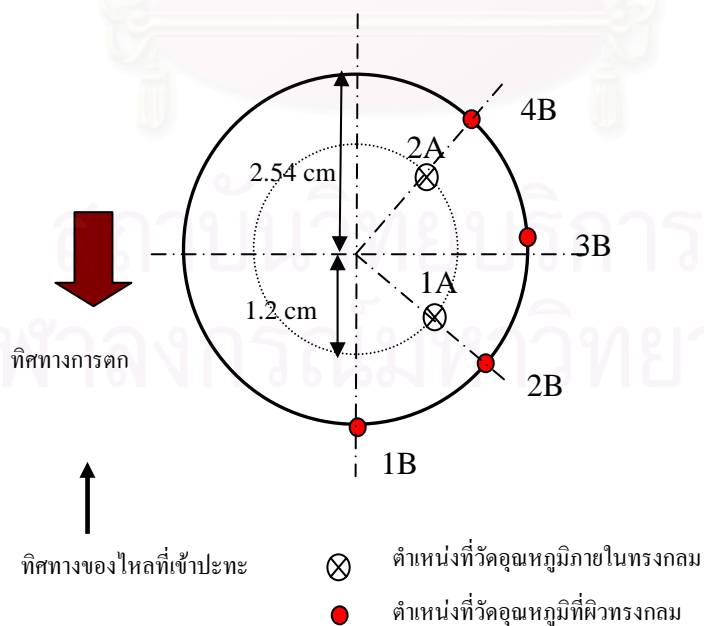
เนื่องด้วยข้อจำกัดของความสามารถของหน่วยรับข้อมูลที่มีอยู่ทำให้การทดลองแต่ละครั้งสามารถทำการบันทึกอุณหภูมิได้พร้อมๆกันเพียง 2 Channel ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการวัดอุณหภูมิภายในทรงกลม 1 จุด และอุณหภูมิที่ผิว 1 จุด พร้อมๆกันต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง โดยได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่มุมต่างๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองตามตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ

เงื่อนไข	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในทรงกลม	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ผิวทรงกลม
1	1 A (45°)	1B (0°)
2		2B (45°)
3		3B (90°)
4		4B (135°)
5	2 A(135°)	1B (0°)
6		2B (45°)
7		3B (90°)
8		4B (135°)

ในส่วนของตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ปรากฏในตารางที่ 3.2 มีคำอธิบายถึงรายละเอียดดังนี้

- ตำแหน่ง 1A และ 2A วัดอุณหภูมิภายในทรงกลมวัดที่ตำแหน่งลึกเข้าไปในทรงกลม ประมาณ ครึ่งหนึ่งขนาดรัศมีทรงกลม (ประมาณ 1.25 เซนติเมตร) ที่ตำแหน่ง 45 และ 135 องศาทำมุมกับของไหลที่เข้าปะทะด้านหน้าทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.11
- ตำแหน่ง 1B, 2B, 3B และ 4B วัดอุณหภูมิที่ผิวทรงกลมวัดที่ตำแหน่ง 0, 45, 90 และ 135 องศาทำมุมกับของไหลที่เข้าปะทะด้านหน้าทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในโลหะทรงกลม

โดยเงื่อนไขทั้งหมดที่แสดงดังตารางที่ 3.2 จะทำการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิตั้งต้นของโลหะทรงกลมตัน เท่ากับ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิดังกล่าวเป็นไปได้ว่าเกิดปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์มรอบผิวโลหะทรงกลมตัน โดยอ้างอิงการทดลองในลักษณะเดียวกันของ AZIZ [9] ซึ่งได้ทำการทดลองปล่อยโลหะผสม นิกเกิลทองแดงทรงกลมขนาดประมาณ 20 มิลลิเมตรอุณหภูมิที่ผิวสูงประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ลงในน้ำ อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส และทำการบันทึกภาพ ภาพที่บันทึกได้เห็นถึงปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์มเกิดขึ้นรอบผิวทรงกลม

สำหรับระดับอุณหภูมิสูงสุดในการทดลองที่กำหนดไว้ 500 องศาเซลเซียส ก็เนื่องจากการทดลองที่ระดับสูงกว่า 500 องศาเซลเซียสจากการทดสอบ เมื่อทดลองไปได้สัก 2-3 ครั้งปลายเทอร์โมคัพเปิดจะหลุดออกจากรูของโลหะทรงกลมตันทำให้ทดลองต่อไม่ได้ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดมากกว่าที่อุณหภูมิสูงพอจนกระทั่งปลอกโลหะที่ติดกับสายเทอร์โมคัพเปิดขยายตัวจนหลุดจากการยึดไว้

เพื่อทำการตรวจสอบความแม่นยำของระบบการทดลองจึงจะทำการทดสอบในแต่ละเงื่อนไขจำนวน 2 ครั้ง เพื่อนำผลที่ได้ไปประเมินความคลาดเคลื่อน

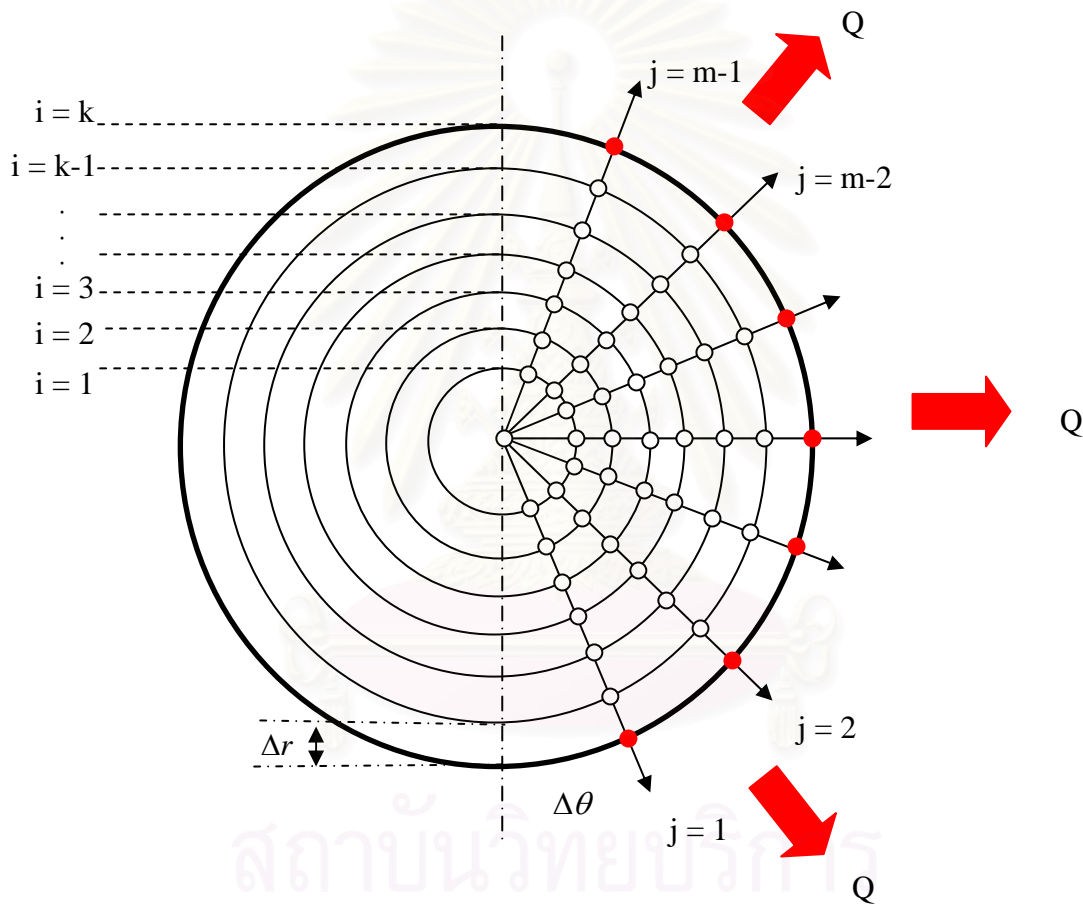
สำหรับขั้นตอนการทดลองนั้นมีลำดับการ ปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ดึงรอกเพื่อให้โลหะทรงกลมตันอยู่ในเตาเผาในตำแหน่งที่กำหนดไว้ แล้วทำการล็อกด้วยคันทิ้ง
2. เปิดสวิตช์เครื่อง ควบคุมเตาเผา และคอมพิวเตอร์ เปิดการทำงานชุดอุปกรณ์เซนเซอร์อินฟราเรด
3. ทำการตั้งอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิชุดที่สอง ซึ่งอยู่ด้านขวาสุดที่มีไว้ควบคุมอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันให้อยู่ในระดับอุณหภูมิที่ต้องการตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้
4. เมื่ออุณหภูมิที่ผิวและภายในทรงกลมซึ่งอ่านได้จากเครื่องควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิที่หนึ่งและที่สองถึงช่วงประมาณระดับที่ต้องการ ให้ปลดล็อกที่ชุดควบคุมการทำงานของรอก
5. ปิดสวิตช์เครื่อง ควบคุมเตาเผา เมื่อการทดลองเสร็จหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง นำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ไปวิเคราะห์และประมวลผล

3.4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม

ในบทที่ 2 สมการที่ 2.9 แสดงถึงสมการการนำความร้อนในพิกัดทรงกลมเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในทรงกลม และไม่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันในการศึกษาครั้งนี้

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะทำการพิจารณาโลหะทรงกลมตันเป็นระนาบ 2 มิติ โดยแบ่งโลหะทรงกลมที่จะพิจารณาทั้งหมด K โหนด ตามแนวแกนมุม และ M โหนดตามแนวแกนรัศมี ซึ่งมีระยะระหว่างโหนดตามแนวแกนรัศมีที่เท่าๆ กันคือ Δr และระยะระหว่างโหนดตามแนวแกนมุมที่เท่าๆ กันคือ $\Delta \theta$ โดยพิจารณาทรงกลมเป็นพิภคย่อย i และ j ตามแนวแกนรัศมีและแกนมุม โดยเลือกพิจารณาเฉพาะครึ่งหนึ่งของทรงกลม สมมติให้การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีความสมมาตรตามแนวเส้นแบ่งครึ่งทรงกลมในแนวตั้ง ตามที่แสดงในรูป 3.12 ด้วยวิธีผลต่างสมการเชิงอนุพันธ์ จากสมการที่ 2.9 จะสามารถแปลงสมการให้อยู่ในรูปผลต่างสี่เหลี่ยม เพื่อทำการคำนวณหาอุณหภูมิที่กระจายอยู่ภายในทรงกลมตามแนวรัศมีและแนวแกนมุม ที่เวลาต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.12 การแบ่งองค์ประกอบภายในทรงกลมเพื่อทำการคำนวณ

จากสมการที่ 2.9 แปลงสมการให้อยู่ในรูปผลต่างสี่เหลี่ยมได้เป็นสมการต่างๆตามลำดับดังนี้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\Delta T_{i,j}}{\Delta t} = \left[\frac{1}{r_i^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{i,j} + \frac{1}{r_i^2 \sin \theta_j} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) \right]_{i,j} \right] \quad (3.1)$$

$$\Delta T_{i,j} = \alpha \Delta t \left[\frac{1}{r_i^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{i,j} + \frac{1}{r_i^2 \sin \theta_j} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right]_{i,j} \right] \quad (3.2)$$

$$\text{กำหนดให้ } A = \frac{1}{r_i^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{i,j} \quad (3.3)$$

$$B = \frac{1}{r_i^2 \sin \theta_j} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right]_{i,j} \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$\Delta T_{i,j} = \alpha \Delta t (A + B) \quad (3.5)$$

กำหนดให้ $r_i = i \Delta r$ นำค่า r_i แทนค่าในสมการที่ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{r^2} \frac{\left[\left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i-\frac{1}{2}} \right]_{i,j}}{\Delta r} \\ &= \frac{1}{i^2 \Delta r^3} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right)^2 \Delta r^2 \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta r} - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 \Delta r^2 \frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta r} \right] \\ &= \frac{1}{i^2 \Delta r^2} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right)^2 (T_{i+1} - T_i) - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 (T_i - T_{i-1}) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

กำหนดให้ $\theta_i = j \Delta \theta$ นำค่า θ_j แทนค่าในสมการที่ (3.4) จะได้

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{r_i^2 \sin \theta_j} \frac{\left[\left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_{j+\frac{1}{2}} - \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_{j-\frac{1}{2}} \right]_{i,j}}{\Delta \theta} \\ &= \frac{1}{i^2 \Delta r^2 \Delta \theta \sin(j \Delta \theta)} \left[\sin \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] \frac{(T_{j+1} - T_j)}{\Delta \theta} - \sin \left[\left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] \frac{(T_j - T_{j-1})}{\Delta \theta} \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{i^2 \Delta r^2 (\Delta \theta)^2 \sin(j \Delta \theta)} \left[\sin \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_{j+1} - T_j) - \sin \left[\left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_j - T_{j-1}) \right] \quad (3.7)$$

แทนค่า A จากสมการ ที่ 3.6 และ B จากสมการที่ 3.7 ลงไปในสมการ 3.5 จะได้

$$\Delta T_{i,j} = \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right)^2 (T_{i+1} - T_i) - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 (T_i - T_{i-1}) \right] + \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2 (\Delta \theta)^2 \sin(j \Delta \theta)} \left[\sin \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_{j+1} - T_j) - \sin \left[\left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_j - T_{j-1}) \right] \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เวลาที่ n และ โหนดที่ i และ j $(\Delta T_{i,j}^{[n]})$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta T_{i,j}^{[n]} = \frac{1}{2} (\Delta T_{i,j}^{[n]'} + \Delta T_{i,j}^{[n]''}) \quad (3.9)$$

โดยที่

$$\Delta T_{i,j}^{[n]'} = \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right)^2 (T_{i+1}^{[n]} - T_i^{[n]}) - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 (T_i^{[n]} - T_{i-1}^{[n]}) \right] + \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2 (\Delta \theta)^2 \sin(j \Delta \theta)} \left[\sin \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_{j+1}^{[n]} - T_j^{[n]}) - \sin \left[\left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_j^{[n]} - T_{j-1}^{[n]}) \right] \quad (3.10)$$

$$\Delta T_{i,j}^{[n]''} = \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right)^2 (T_{i+1}^{[n]'} - T_i^{[n]'}) - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 (T_i^{[n]'} - T_{i-1}^{[n]'}) \right] + \frac{\alpha \Delta t}{i^2 \Delta r^2 (\Delta \theta)^2 \sin(j \Delta \theta)} \left[\sin \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_{j+1}^{[n]'} - T_j^{[n]'}) - \sin \left[\left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta \theta \right] (T_j^{[n]'} - T_{j-1}^{[n]'}) \right] \quad (3.11)$$

$$T_{i,j}^{[n]'} = T_{i,j}^{[n]} + \Delta T_{i,j}^{[n]'} \quad (3.12)$$

และเช่นเดียวกันที่เวลา n+1 อุณหภูมิ ณ จุดที่ i, j คือ

$$T_{i,j}^{[n+1]} = T_{i,j}^{[n]} + \Delta T_{i,j}^{[n]} \quad (3.13)$$

โดยในการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมมันจะมีสมมติฐานของเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิในทรงกลมทุกจุดที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) มีค่าเท่ากัน เท่ากับค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิภายในทรงกลมที่วัดได้จากการทดลองในช่วงเวลาเริ่มต้น 0.05 วินาทีแรก
2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับรัศมีที่ตำแหน่งใกล้จุดศูนย์กลางทรงกลมมีค่าเท่ากับศูนย์ $\left(\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \right)$ หรือ $\left[\frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta r} \right]_{i=1} = 0$
3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับมุมที่ตำแหน่งใกล้ 0 และ 180 องศา มีค่าเท่ากับศูนย์ $\left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0,\pi} = 0 \right)$ หรือ $\left[\frac{(T_j - T_{j-1})}{\Delta \theta} \right]_{j=1,m} = 0$
4. อุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละตำแหน่ง ถูกกำหนดจากค่าที่ประเมินโดยฟังก์ชันที่ประดิษฐ์ขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ($T_{k,j} = T_{func}$) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3.53 ต่อไป

3.5 ขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของทรงกลม

ในลำดับแรกก่อนเริ่มทำการคำนวณเพื่อประเมินอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆที่เปลี่ยนไปตามเวลาของโลหะทรงกลมตันอุณหภูมิสูงที่ตกลงบนของเหลวระบายความร้อน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะกำหนดเงื่อนไขต่างๆและเตรียมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณดังต่อไปนี้

3.5.1 ขอบเขตเวลาในการคำนวณ

การประเมินเวลาที่ใช้ในการคำนวณ พิจารณาจากเวลาที่โลหะทรงกลมตันใช้ในการเคลื่อนที่ด้วยการตกลงอย่างอิสระในระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำในถังประมาณ 2 เมตร ในถังน้ำโดยไม่คิดผลเนื่องจากแรงเสียดทานใดๆ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{จากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุ} \quad S = ut + \frac{1}{2}gt^2 \quad (3.14)$$

เมื่อ S เป็นระยะทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (m , เมตร)

- u ความเร็วเริ่มต้นของโลหะทรงกลมตัน (m/s , เมตรต่อวินาที)
- t เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมตัน (t , วินาที)
- g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($m \cdot s^{-2}$, เมตรต่อวินาที²)

ถ้าโลหะทรงกลมตันเคลื่อนที่ลงสู่พื้นก้นถังด้วยความเร่ง $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ โดยไม่คิดผลจากแรงเสียดทานเมื่อโลหะทรงกลมตันเคลื่อนที่ในน้ำ รวมถึงผลจากแรงเสียดทานของระบบรอกสลิง และกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของโลหะทรงกลมตันขณะปล่อยตกเป็นศูนย์ ระยะทางในการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมตันเท่ากับ 1.8 เมตร

จากสมการที่ 3.13 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปจะได้ว่า

$$1.8 = 0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot 9.81 t^2$$

จะได้ $t^2 = \frac{3.6}{9.81}$

$$t = \sqrt{\frac{3.6}{9.81}} = 0.60578 \text{ วินาที}$$

ดังนั้นขอบเขตเวลาในการคำนวณจะใช้ที่เวลา ประมาณ 0.6 วินาที เพื่อให้มั่นใจว่าช่วงเวลาดังกล่าวโลหะทรงกลมตันยังเคลื่อนที่อยู่น้ำในถัง

3.5.2 ค่าคงที่ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ

เนื่องจากในบทที่ 3.2 กล่าวถึงค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ (α) ซึ่งใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของทรงกลมด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการหาค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุดังกล่าว โดยค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุนี้สามารถคำนวณได้จากค่า ความหนาแน่น (ρ) ค่าสภาพการนำความร้อน (k) และค่าความจุความร้อน (c) จะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha = k / \rho c \tag{3.15}$$

ซึ่งในกรณีของโลหะทรงกลมตันที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นโลหะเหล็กมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ค่าความหนาแน่น $7,735 (\rho) \text{ kg/m}^3$

ค่าสภาพการนำความร้อน (k) $73 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

ค่าความจุความร้อน (c) $460 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

นำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในสมการที่ 3.13 จะได้

$$\alpha = \frac{73}{7735 \times 460}$$

$$\alpha = 2.05165 \times 10^{-5}$$

ดังนั้น ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุได้เท่ากับ $2.05165 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ เมื่อพิจารณาว่าค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของโลหะทรงกลมตันไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปในช่วงระดับ 200-500 °C

3.5.3 การประเมินอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อใช้เป็นขอบเขตเบื้องต้นในการคำนวณ

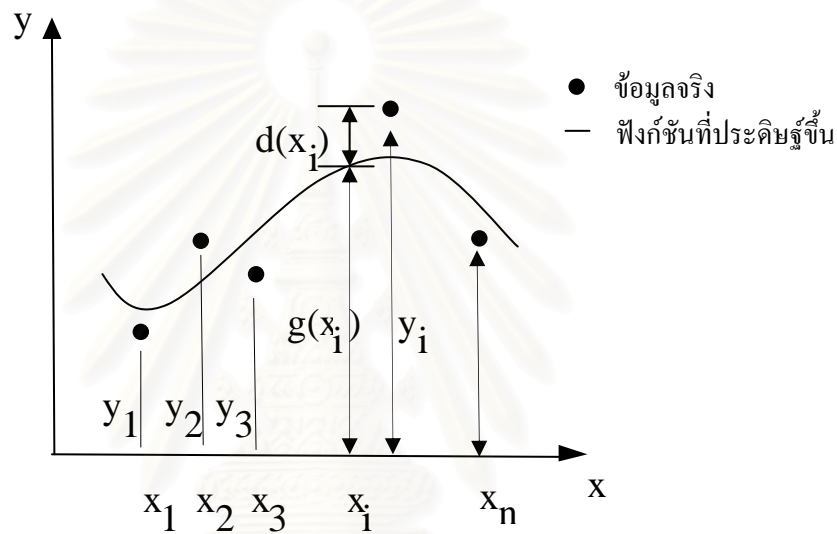
อุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมตามพิกัดต่างๆในการคำนวณจะเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่จะถูกกำหนดไว้ให้มีค่าคงที่ ณ เวลาหนึ่งๆ โดยการประเมินอุณหภูมิที่ผิวดังกล่าวจะถูกทำโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ผิวที่ขึ้นกับตำแหน่งมุม จากข้อมูลที่ได้รับจากการทดลอง

จากที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3 ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันนั้นจะวัดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือที่ตำแหน่ง 0, 45, 90 และ 135 องศา เนื่องจากระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 เมื่อมีการแบ่งจำนวนเชิงมุมให้มีความละเอียดจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องทราบอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่งต่างๆตั้งแต่ตำแหน่ง 0 จนถึง 180 องศาซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้โดยตรงในการคำนวณ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการประดิษฐ์ฟังก์ชันขึ้นมาเพื่อใช้ประเมินอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่งใดๆที่พิกัดต่างๆในการคำนวณ โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวที่ทั้ง 4 ตำแหน่งที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธี ผลต่างกำลังสองน้อยสุด (Least square fit) ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลแล้วจะเลือกใช้ผลต่างกำลังสองน้อยสุดแบบการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) [9] ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการดังนี้

พิจารณารูปที่ 3.13 แสดงถึง วิธีการสร้างฟังก์ชัน สำหรับชุดของข้อมูลที่กำหนดมาให้ โดยใช้ชุดของข้อมูลซึ่งประกอบด้วย x_i และ y_i โดย $i=1,2,\dots,n$ นั่นคือมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูล ซึ่งสามารถสร้างสมการในรูปแบบของฟังก์ชันพหุนามกำลัง m ได้ดังนี้

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (3.16)$$

เนื่องจาก $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่รู้ค่า สำหรับเทคนิคผลต่างกำลังสองน้อยสุด จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ ของ สมการ 3.16 ซึ่งทำให้เกิดค่าความผิดพลาด กำลังสองโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากข้อมูลทุกข้อมูลที่กำหนดมา



รูปที่ 3.13 การถดถอยแบบพหุนามโดยประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามจากข้อมูลที่กำหนดมาให้

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าตำแหน่ง x_i ของข้อมูล i ใดๆ ค่าของฟังก์ชัน $g(x)$ ที่สร้างขึ้นมีค่าที่แตกต่างไปจากค่าของข้อมูล y_i เท่ากับ $d(x_i)$ นั่นหมายถึงค่าความผิดพลาด (E) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูล ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad (3.17)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad (3.18)$$

หากนำสมการที่ (3.16) ที่ $x=x_i$ แทนลงในสมการที่ (3.18) จะได้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m)]^2 \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.17) สามารถหาตัวไม่รู้ค่า $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ ที่ต้องการโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของค่าความผิดพลาดโดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่า คือ

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = 0$$

:

$$\frac{\partial E}{\partial a_m} = 0$$

และจากสมการที่ (3.20) ให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m)](-1) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n a_0 - \sum_{i=1}^n x_i a_1 - \sum_{i=1}^n x_i^2 a_2 - \dots - \sum_{i=1}^n x_i^m a_m &= 0 \\ na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^m\right)a_m &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (3.22)$$

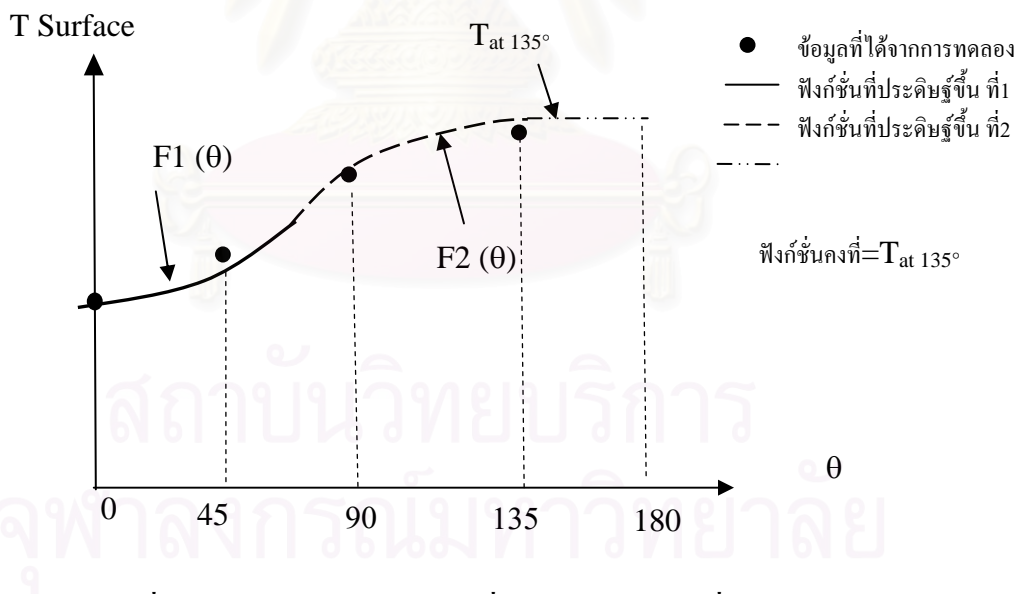
และจากสมการที่ (3.21) ให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m)](-x_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i a_0 - \sum_{i=1}^n x_i^2 a_1 - \sum_{i=1}^n x_i^3 a_2 - \dots - \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} a_m &= 0 \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+1}\right)a_m &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \quad (3.23)$$

และสมการอื่นๆที่เหลือก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยสมการทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ใน รูปแบบของระบบสมการที่ประกอบด้วย $m + 1$ สมการย่อยดังนี้ เขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

โดยเมตริกซ์จัตุรัสขนาด $(m+1) \times (m+1)$ ทางด้านซ้ายของระบบสมการนี้เป็นเมตริกซ์สมมาตรที่รู้ค่าและเวกเตอร์ขนาด $(m+1) \times 1$ ทางด้านขวาของระบบสมการก็รู้ค่าเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่า $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ ทั้งหมด $m+1$ ค่า



รูปที่ 3.14 การประดิษฐ์ฟังก์ชันเพื่อประเมินอุณหภูมิที่ผิว

สำหรับวิธีประดิษฐ์ฟังก์ชันเพื่อใช้ประเมินอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่งใดๆ โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวที่ทั้ง 4 ตำแหน่งที่ได้จากการทดลอง จะทำโดยสร้างฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง โดยอาศัยวิธีผลต่างกำลังสองน้อยสุดสองฟังก์ชันแสดงในรูปที่ 3.16 โดยฟังก์ชันแรกจะอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งอุณหภูมิที่ผิว ที่ 0, 45 และ 90 องศา และฟังก์ชันที่สองจะสร้างจาก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งอุณหภูมิที่ผิว ที่ 45, 90 และ 135 องศา สำหรับเกณฑ์การตัดสินใจในการเลือกใช้ฟังก์ชันใดฟังก์ชันหนึ่งนั้น ยึดหลักดังนี้ว่า ในกรณีที่ ค่ามูนน้อยกว่าเท่ากับ 67.5 องศา ให้ใช้ค่าที่คำนวณได้จาก ฟังก์ชันแรก และกรณีมูนมากกว่าเท่ากับ 67.5 องศา ให้ใช้ค่าที่คำนวณได้จากฟังก์ชันที่สอง และในช่วงที่มูนมากกว่า 135 องศา สมมติให้อุณหภูมิที่ผิวเท่ากับ อุณหภูมิที่ผิว ณ ตำแหน่ง 135 องศา

ฟังก์ชันที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นเป็นฟังก์ชันพหุนามกำลังสองซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าตัวแทนข้อมูล a_0, a_1, a_2 ในการแก้ระบบสมการเพื่อหาค่า a_0, a_1, a_2 จะใช้ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) เพื่อแก้ระบบสมการเมตริกซ์ (3×3) ตามสมการ 3.24 ในกรณี $m = 2$

หลักการของระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การกำจัดไปข้างหน้า (Forward elimination) หากเรามีระบบสมการที่ประกอบด้วย 3 สมการย่อยดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

การกำจัดไปข้างหน้าจะเปลี่ยนระบบสมการ 3.25 ให้ไปอยู่ในรูปแบบซึ่งเมตริกซ์จัตุรัสทางด้านซ้ายของสมการ จะเป็นเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยค่าศูนย์ตลอดแถบด้านซ้ายของเมตริกซ์นั้นในรูปแบบ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} \\ 0 & 0 & a''_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b'_2 \\ b''_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

โดยเครื่องหมายที่เป็นครรชนบนสัมประสิทธิ์แสดงถึงว่าสัมประสิทธิ์นั้นเป็นค่าใหม่ซึ่งเปลี่ยนไปจากสัมประสิทธิ์เดิมในสมการ 3.25

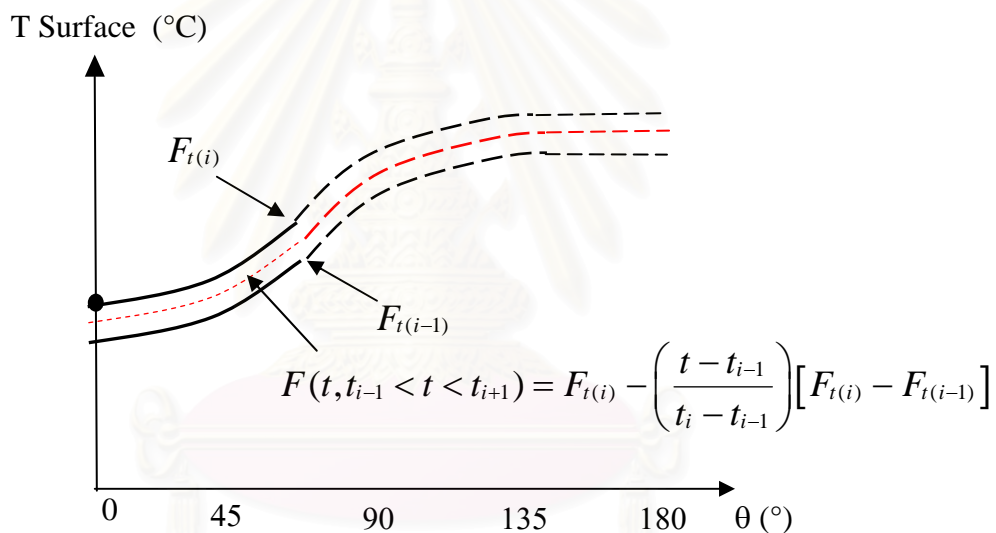
2. การแทนค่าย้อนกลับ (Back substitution) เมื่อจัดระบบสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการ 3.26 ได้แล้วเป็นการง่ายที่เดียวที่จะคำนวณหาค่า x_i โดยเริ่มจากสมการท้ายสุดก่อนแล้วทำไต่ย้อนกลับไปเพื่อหาค่า x_i ทีละสมการดังนี้

$$\begin{aligned} x_3 &= b''_3 / a''_{33} \\ x_2 &= (b'_2 - a'_{23} x_3) / a'_{22} \\ x_1 &= (b_1 - a_{12} x_2 - a_{13} x_3) / a_{11} \end{aligned} \quad (3.27)$$

จากการแก้ระบบสมการด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้เราทราบถึงฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ผิวที่เวลาหนึ่งๆซึ่งในรูปแบบของฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง ในการทดลอง อุณหภูมิที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นการประดิษฐ์ฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ผิวจึงต้องคำนวณในแต่ละช่วงเวลาด้วย

เนื่องด้วยช่วงระยะห่างการเก็บข้อมูลอุณหภูมิแต่ละหนึ่งจุดข้อมูล นั้นสั้นมากเป็นระดับมิลลิวินาที ดังนั้นสำหรับการหาค่าอุณหภูมิที่ผิวที่จุดเวลาใดๆซึ่งไม่ใช่จุดเวลาเดียวกันกับค่าที่ได้จากการทดลองนั้นจะใช้ทำการประมาณด้วยวิธีการประมาณเชิงเส้น (Linear Interpolation) ของฟังก์ชันที่ประดิษฐ์ขึ้นที่เวลามากกว่าและน้อยกว่าจุดเวลาที่สนใจไปหนึ่งขั้นเวลาดังแสดงในสมการที่ 3.28 และรูปที่ 3.15 แสดงการประเมิน ฟังก์ชันประดิษฐ์ที่เวลา t ใดๆ

$$F(t, t_{i-1} < t < t_{i+1}) = F_{t(i)} - \left(\frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) [F_{t(i)} - F_{t(i-1)}] \quad (3.28)$$

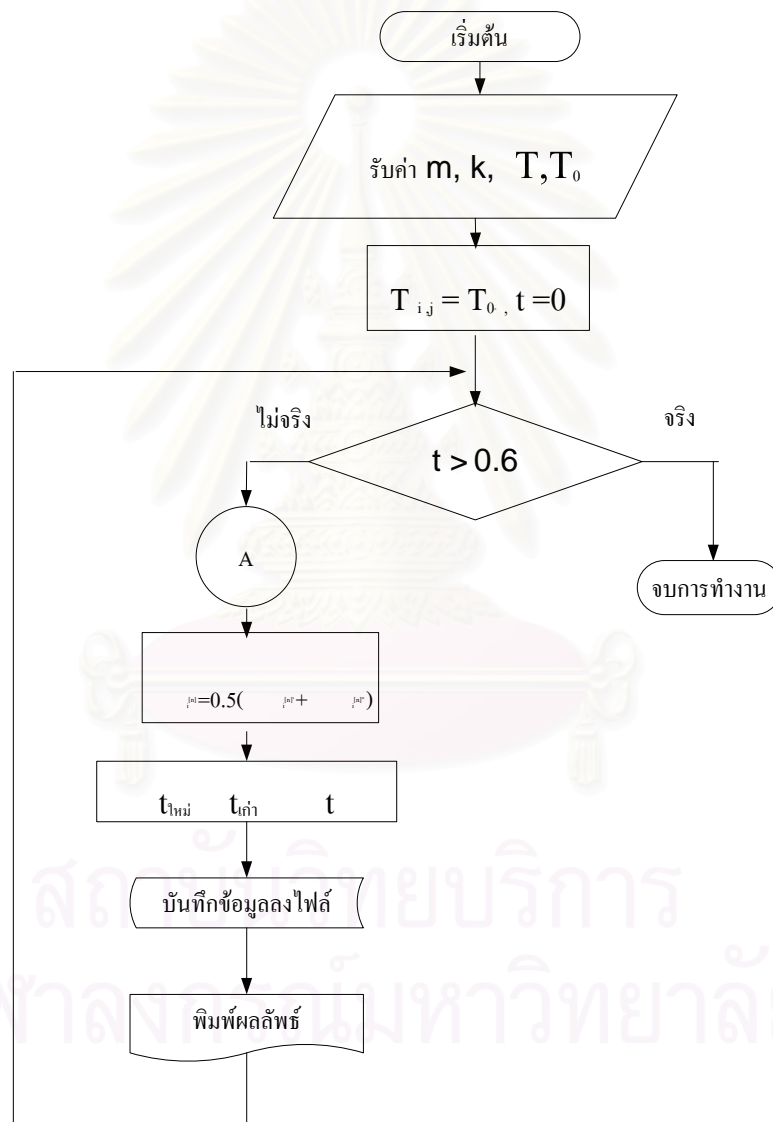


รูปที่ 3.15 การประมาณฟังก์ชันที่เวลา t ใดๆ

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณจะทำการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวในแต่ละจุดภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รับจำนวนขั้นเวลาในการคำนวณ, โหนดตามแนวแกนรัศมี และแกนมุม และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นภายในทรงกลม ($\Delta t, m, k, T_0$)
2. ทุกๆ โหนดภายในทรงกลมมีค่าเท่ากับ $T_{i,j} = T_0$
3. ตรวจสอบเวลาที่เกิดขึ้นในการคำนวณ (t) ว่ามากกว่า 0.6 วินาทีหรือไม่ ซึ่งสามารถเขียนได้ คือ หากเป็นจริงให้ทำข้อ 4 และหากไม่จริงให้ข้ามไปทำข้อ 5

4. จริง หยุดการทำงาน
5. ไม่จริง ทำการประเมินอุณหภูมิที่ผิวที่ ตำแหน่งโหนด $T_{k,j}$ โดยเรียกโปรแกรมย่อย A จากนั้น นำสมการที่ 3.1 และ 3.12 มาเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาที่แต่ละโหนด ได้ตามลำดับ
6. ทำการเพิ่มเวลาที่จะพิจารณา คือ $t_{\text{ใหม่}} = t_{\text{เก่า}} + \Delta t$ และบันทึกลงไฟล์ พิมพ์ผลลัพธ์
7. ย้อนกลับไปทำข้อ 3



รูปที่ 3.16 แผนผังขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา

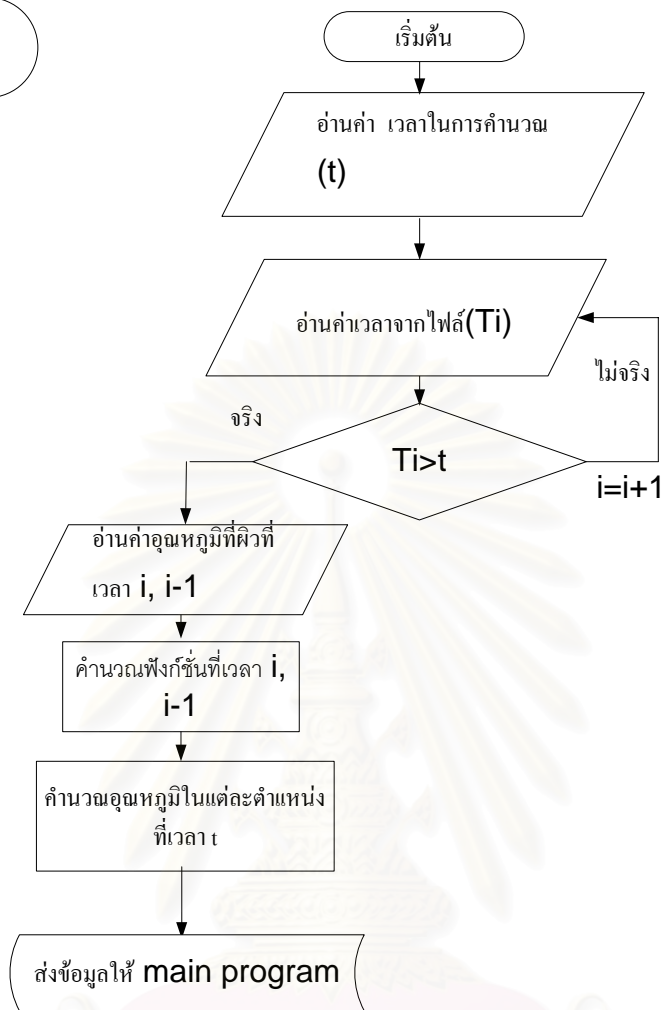
สำหรับโปรแกรมย่อย A ที่ใช้ในการคำนวณจะทำการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมตามตำแหน่งต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รับเวลาในการคำนวณ (t)
2. เปิดไฟล์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่ผิว อ่านค่าเวลาในข้อมูล (t_i) ในแถว ที่ 1
3. ตรวจสอบเวลาในข้อมูล ว่ามากกว่า เวลาในการคำนวณ (t) หรือไม่ ซึ่งสามารถเขียนได้ คือ หากไม่เป็นจริงให้ทำข้อ 4 และหากจริงให้ข้ามไปทำข้อ 5
4. ไม่จริง ให้ $i = i+1$ คือโดยเลื่อนไปอ่านข้อมูลเวลาในข้อมูลในแถวถัดมา และทำในขั้นตอนที่ 3 อีกครั้งหนึ่ง
5. จริง ทำการคำนวณสมการของอนุกรมเวลาที่ผิวที่ ตำแหน่งเวลา i และ $i+1$ ตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ใน หัวข้อ สมการที่ (3.16) ถึง (3.28)
6. ทำการประเมินอนุกรมเวลาที่ผิวในแต่ละตำแหน่งที่เวลา t โดยการประมาณค่า (linear interpolation)
7. ส่งข้อมูลอนุกรมเวลาที่ผิวแต่ละพิกัด ไปยัง main program เพื่อทำการคำนวณต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A



รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะแสดงถึง ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากสัญญาณดิจิทัลของอุปกรณ์หน่วยรับข้อมูลซึ่งรับข้อมูลมาจากเทอร์โมคัพเปิด รวมถึงผลการทดลองจริงในแต่ละเงื่อนไข โดยจะนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบของกราฟ พร้อมทั้งคำอธิบายต่างๆไว้ด้วย สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองในประเด็นที่น่าสนใจ และการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น จะนำเสนอในบทถัดไป

4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ

เนื่องจากหน่วยรับข้อมูลทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกของเทอร์โมคัพเปิดเป็นสัญญาณดิจิทัล และบันทึกในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในการที่จะนำสัญญาณดิจิทัลที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายในและที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน ไปใช้ จำเป็นจะต้องทำการเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากหน่วยรับข้อมูล เพื่อหาความสัมพันธ์นำไปสู่การประเมินอุณหภูมิที่ถูกต้องได้

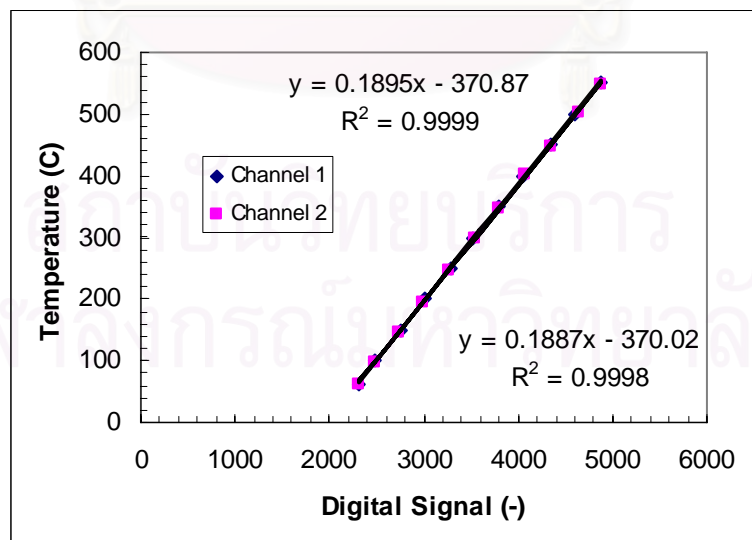
เนื่องจากหน่วยรับข้อมูลมีช่องรับข้อมูล 2 ช่อง ช่องรับข้อมูลที่ 1 รับสัญญาณจากเทอร์โมคัพเปิดที่วัดอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันและช่องรับข้อมูลที่ 2 รับสัญญาณจากเทอร์โมคัพเปิดที่วัดอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน โดยหน่วยรับข้อมูลจะทำการแปลงสัญญาณทั้งสองให้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะทำการสอบเทียบสัญญาณดิจิทัลของทั้ง 2 ช่องรับข้อมูลไปพร้อมๆกัน

การเปรียบเทียบทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่โลหะทรงกลมตัน (ซึ่งมีการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิดที่ในทรงกลมและที่ผิวของทรงกลม) ด้วยเตาเผา ในขั้นแรกเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่ง 63 องศาเซลเซียส เมื่อระดับอุณหภูมิภายในและที่ผิวของโลหะทรงกลมตันอยู่ในระดับที่ต้องการ ซึ่งแสดงผลที่หน้าจอหน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ จากนั้นทำการบันทึกสัญญาณดิจิทัล 2 ช่องรับข้อมูล จำนวนช่องรับข้อมูลละ 5000 ข้อมูล กระทำการแบบเดียวกันที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 100 องศาเซลเซียส และทำการเก็บข้อมูลเหมือนเดิม และเพิ่มอุณหภูมิอีกทีละประมาณ 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงที่ระดับ 550 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำค่าสัญญาณที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณดิจิทัลในแต่ละค่าอุณหภูมิ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญญาณดิจิทัลและค่าอุณหภูมิที่อ่านได้

ค่าที่ได้จาก ช่องรับข้อมูล ที่ 1 (อุณหภูมิที่ผิว)		ค่าที่ได้จาก ช่องรับข้อมูล ที่ 2 (อุณหภูมิที่ผิว)	
สัญญาณดิจิทัลจากหน่วยรับข้อมูล	อุณหภูมิที่อ่านค่าได้ (°C)	สัญญาณดิจิทัลจากหน่วยรับข้อมูล	อุณหภูมิที่อ่านค่าได้ (°C)
2308	63	2314	63
2491	100	2486	98
2751	150	2737	147
3006	200	2987	196
3278	250	3265	246
3523	300	3531	299
3787	350	3787	347
4049	400	4072	401
4347	450	4343	448
4602	500	4644	503
4877	550	4874	549

จากข้อมูลทั้งสองชุดดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 ทำการสร้างฟังก์ชันด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นตรงซึ่งใช้วิธีผลต่างกำลังสองน้อยสุด หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากหน่วยรับข้อมูลและอุณหภูมิที่อ่านค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากหน่วยรับข้อมูลและอุณหภูมิที่อ่านค่าได้

สำหรับสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากช่องรับข้อมูลที่ 1 สามารถหาสมการถดถอยเชิงเส้นได้
เป็น

$$T = 0.1895x - 370.87 \quad \text{ที่ } R^2 = 0.999 \quad (4.1)$$

สำหรับสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากช่องรับข้อมูลที่ 2 สามารถหาสมการถดถอยเชิงเส้นได้
เป็น

$$T = 0.1887x - 370.02 \quad \text{ที่ } R^2 = 0.998 \quad (4.2)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และ x คือ ค่าสัญญาณดิจิทัลจากหน่วยรับข้อมูล
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทั้งสองที่ได้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าใกล้เคียงกัน
มาก และค่า R^2 มีค่าใกล้ 1 เหมือนกัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการแปลงค่าสัญญาณดิจิทัลจาก
หน่วยรับข้อมูล จะใช้สมการเส้นตรงสมการเดียวที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณดิจิทัลที่
ได้และอุณหภูมิ ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยสัมประสิทธิ์หน้าค่า x และค่าตัดแกน y ของสมการที่ 4.1
และ 4.2 และประเมินสมการตัวแทน เป็น

$$T = 0.1891x - 370.45 \quad (4.3)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวให้ค่าความผิดพลาดจากการประเมินอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิจริงที่
อ่านได้จากหน้าจอของหน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจริงและอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ

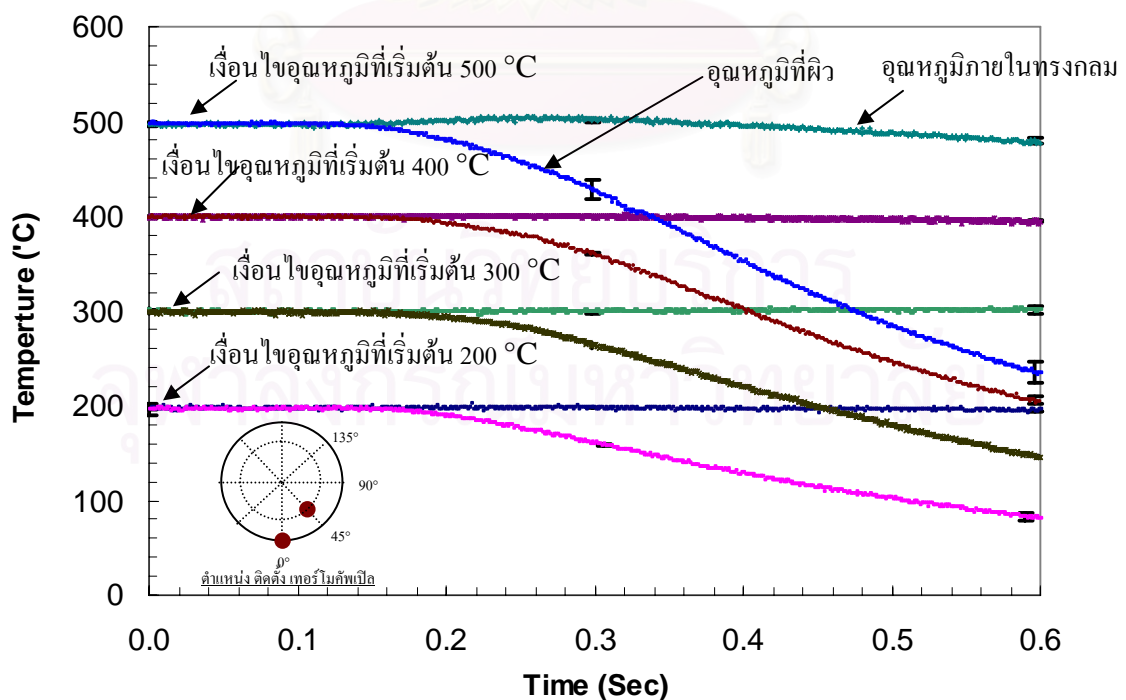
ค่าที่ได้จาก ช่องรับข้อมูล ที่ 1 (อุณหภูมิที่วัด)			ค่าที่ได้จาก ช่องรับข้อมูล ที่ 2 (อุณหภูมิที่วัด)		
อุณหภูมิที่อ่านค่า ได้ (°C)	อุณหภูมิที่ได้จาก การคำนวณ (°C)	% ความแตกต่าง (%)	อุณหภูมิที่อ่านค่า ได้ (°C)	อุณหภูมิที่ได้จาก การคำนวณ (°C)	% ความแตกต่าง (%)
63	65.90553	4.61%	63	67.20399	6.67 %
100	100.6592	0.66%	98	99.70356	1.74%
150	149.6991	-0.20%	147	147.0397	0.03%
200	197.9386	-1.03%	196	194.3067	-0.86%
250	249.4277	-0.23%	246	246.962	0.39%
300	295.6674	-1.44%	299	297.2474	-0.59%
350	345.7559	-1.21%	347	345.5777	-0.41%
400	395.1442	-1.21%	401	399.4908	-0.38%
450	451.5958	0.35%	448	450.7223	0.61%
500	499.8192	-0.04%	503	507.7521	0.94%
550	551.7459	0.32%	549	551.2672	0.41%

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่อ่านได้จริงจากหน่วยควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิทั้งสองช่องรับข้อมูลไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส โดยที่ระดับอุณหภูมิ 100 ถึง 550 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นระดับที่ใช้ในเงื่อนไขการทดลอง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแล้วไม่เกิน 1.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะพิจารณาว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ไม่มีนัยยะสำคัญ และสามารถละไว้ไม่พิจารณาได้

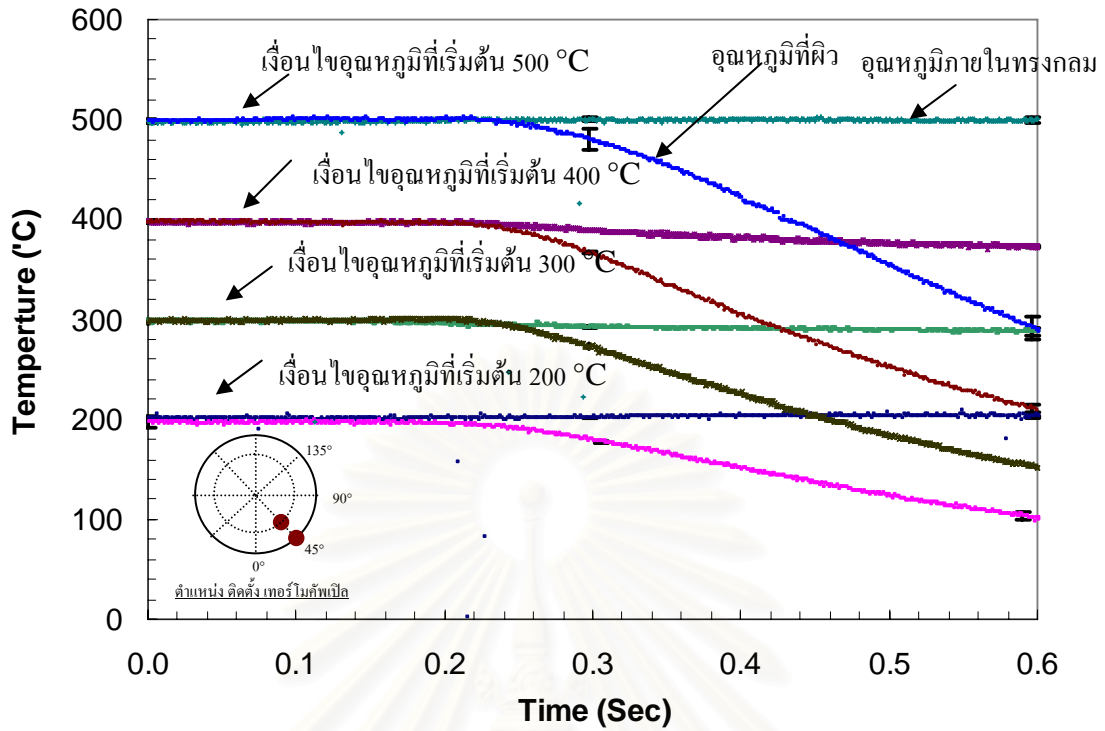
4.2 ผลการทดลอง

ดังที่ได้แสดง ตารางที่ 3.3 เกี่ยวกับเงื่อนไขในการวัดอุณหภูมิในการทดลองที่กระทำขึ้นในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งแตกต่างไปตามตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิลที่ตำแหน่งภายในและที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน โดยแต่ละเงื่อนไข ตั้งแต่เงื่อนไขที่ 1 ถึงเงื่อนไขที่ 8 กระทำขึ้นที่ระดับอุณหภูมิของโลหะทรงกลมตันก่อนปล่อยตกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆกัน ที่ประมาณ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ถูกแปลงมาจากสัญญาณดิจิทัลของหน่วยรับข้อมูลโดยสมการที่ 4.3

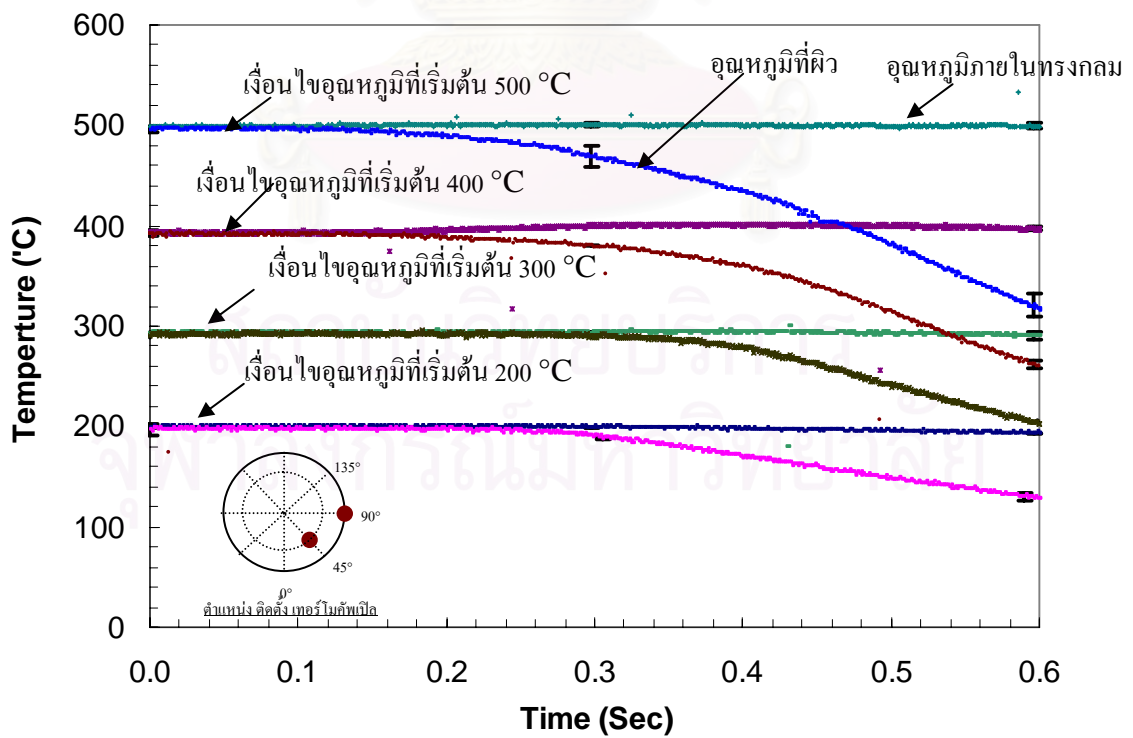
ในการทดลอง 1 เงื่อนไขการทดลองที่ระดับอุณหภูมิเริ่มต้นหนึ่งๆ นั้นทำการทดลอง 2 ครั้ง และนำผลอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองทั้งสองมาเฉลี่ยและหาค่าความผิดพลาด นำเสนอในรูปแบบของกราฟซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในและที่ผิวของโลหะทรงกลมตันเทียบกับเวลา โดยที่เวลาเท่ากับศูนย์เป็นตำแหน่งที่โลหะทรงกลมตันที่ตกลงมาจากเตาเผาเริ่มสัมผัสผิวน้ำ ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.9 ดังนี้



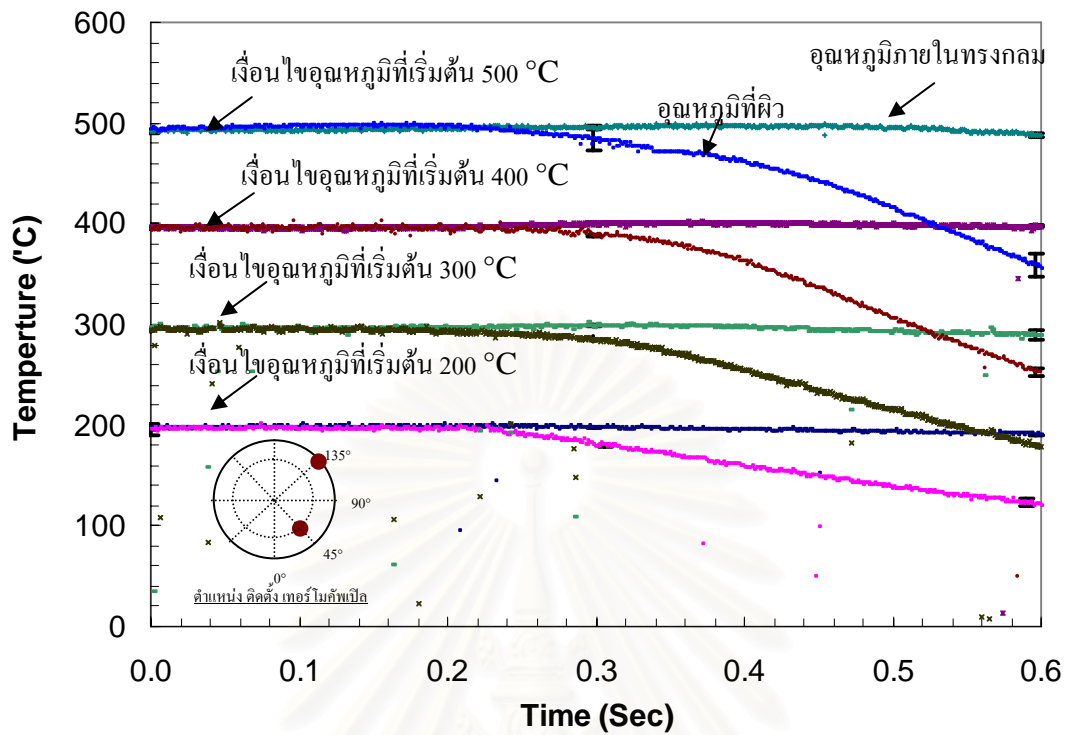
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 0°



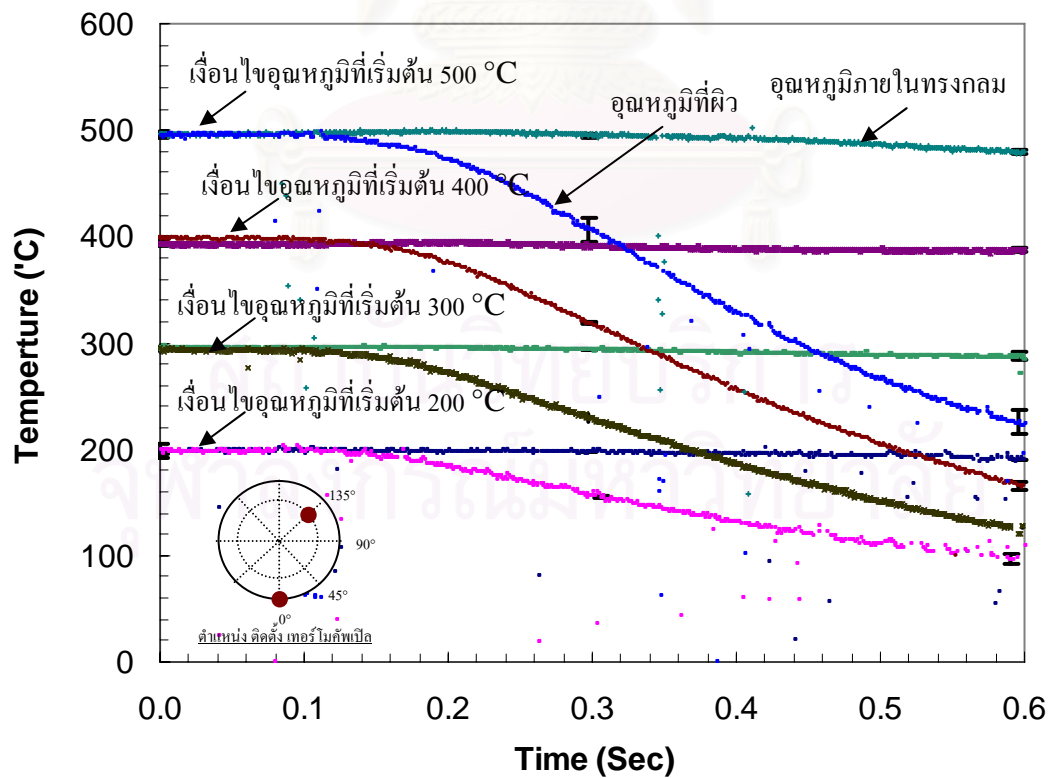
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°



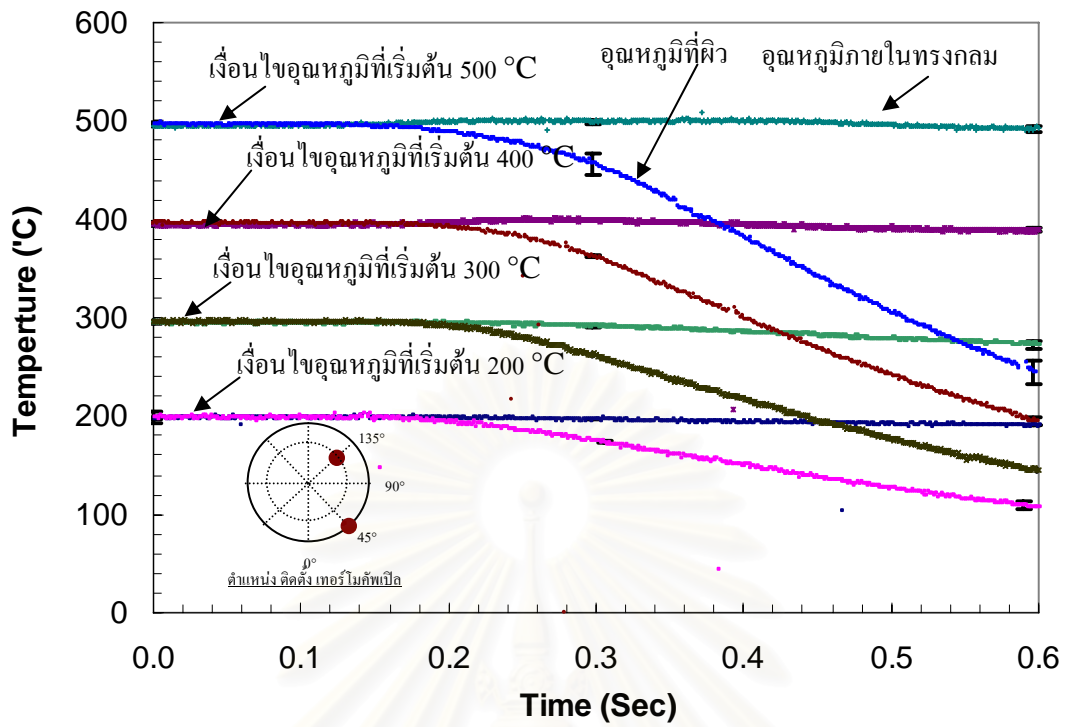
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 90°



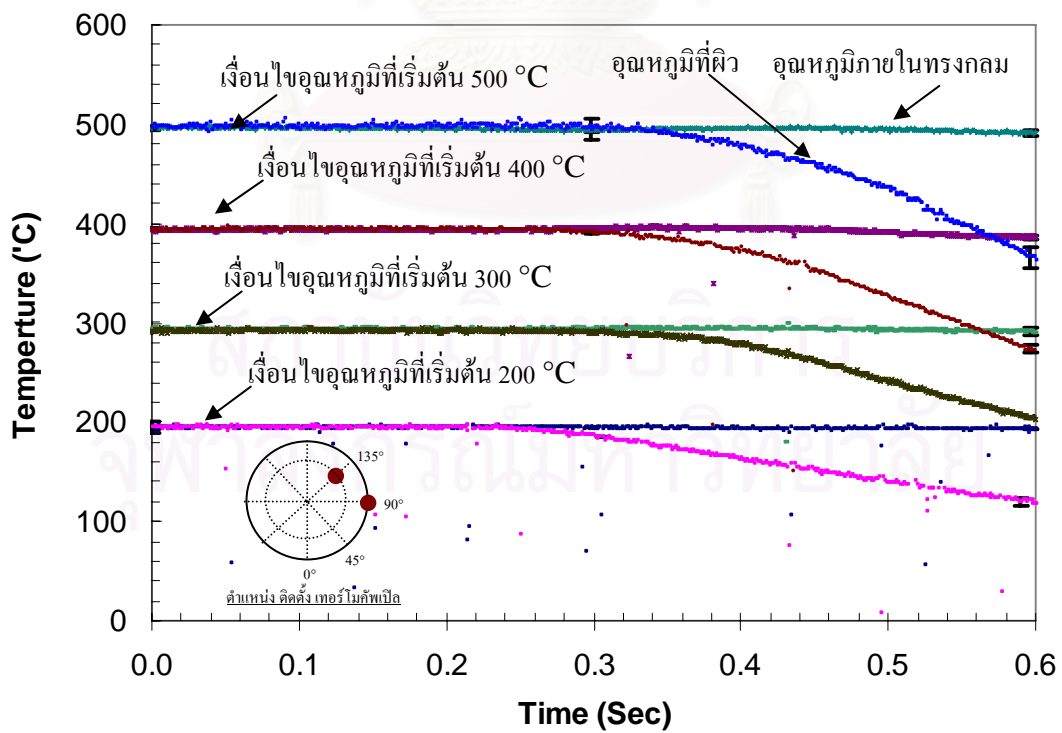
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°



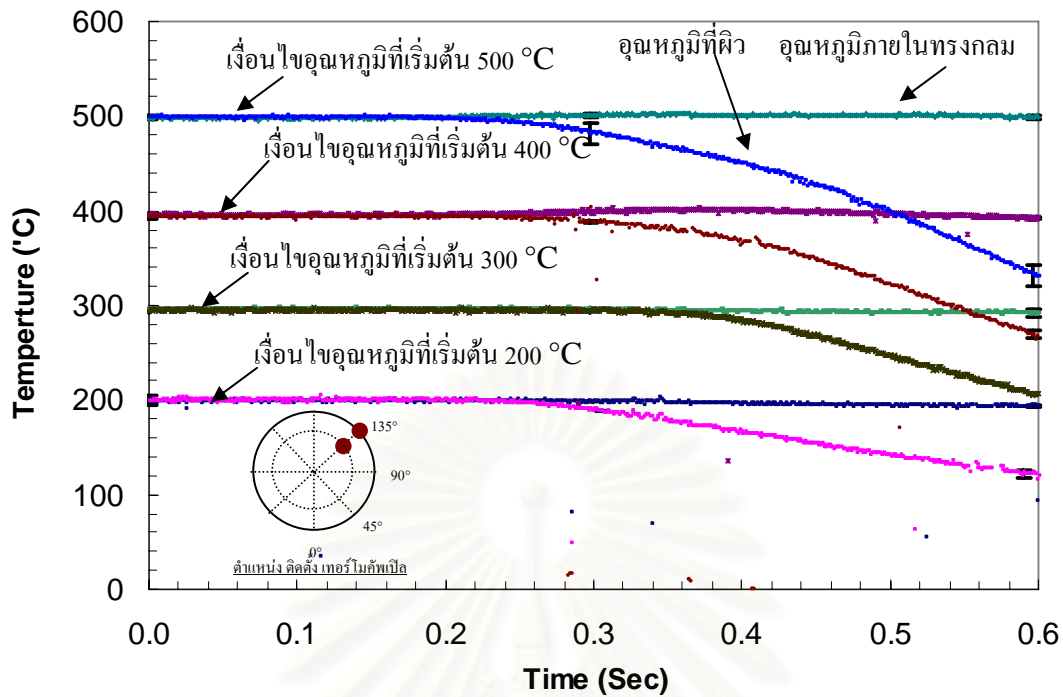
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 0°



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 45°



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง 90°



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่ง 135°และที่ผิวทรงกลมที่ตำแหน่ง135°

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.9 แต่ละรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลม และที่ผิวทรงกลมในแต่ละเงื่อนไขการวัดอุณหภูมิและระดับอุณหภูมิเริ่มต้น ผลการทดลองในทุกเงื่อนไขการวัดอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรก ประมาณ 0 ถึง 0.2 วินาที ที่ทุกเงื่อนไขระดับอุณหภูมิเริ่มต้น ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งในส่วนอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตัน โดยค่าอุณหภูมิที่ผิวและภายในทรงกลมยังคงมีค่าใกล้เคียงกันและเท่ากันค่าอุณหภูมิ ณ เวลาเท่ากับศูนย์ สำหรับในช่วงเวลาถัดมา ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.4 วินาที ค่าอุณหภูมิที่ผิวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ ระดับอุณหภูมิภายในทรงกลมซึ่งยังค่าอยู่ที่ระดับอุณหภูมิเดิม และ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ณ เมื่อเวลาเริ่มต้น หลังจากนั้นที่เวลาตั้งแต่ 0.4-0.6 วินาที อุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันยังมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่อุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันยังมีค่าอยู่ในระดับเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

สำหรับค่าความผิดพลาดที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิลบด้วยค่าอุณหภูมิในการทดลองแต่ละครั้ง (2 ครั้ง) จากการประเมิน มีค่าประมาณ บวกลบ 1-3 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส และเท่ากับ ประมาณบวกลบ 1-4 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

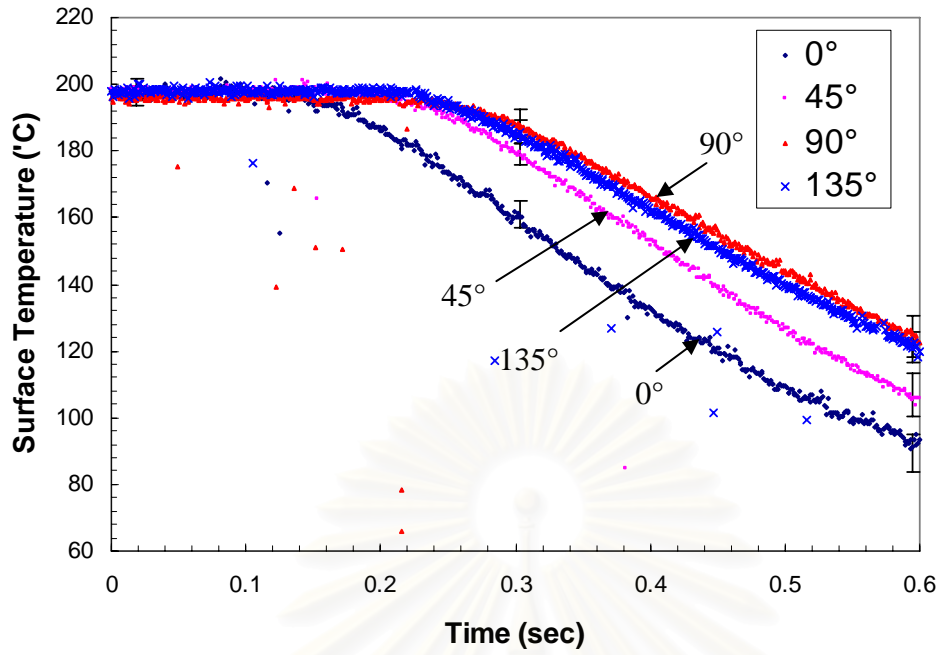
วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะแสดงถึง การวิเคราะห์ และอธิบาย ผลการทดลองที่ได้ในแง่มุมต่างๆที่น่าสนใจ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันตามตำแหน่งมุมต่างๆ ที่ 0° , 45° , 90° และ 135° ตามข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง และการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ได้จากผลการทดลองและค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่คำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นและสุดท้าย การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งต่างๆที่ เปลี่ยนไปตามเวลาด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

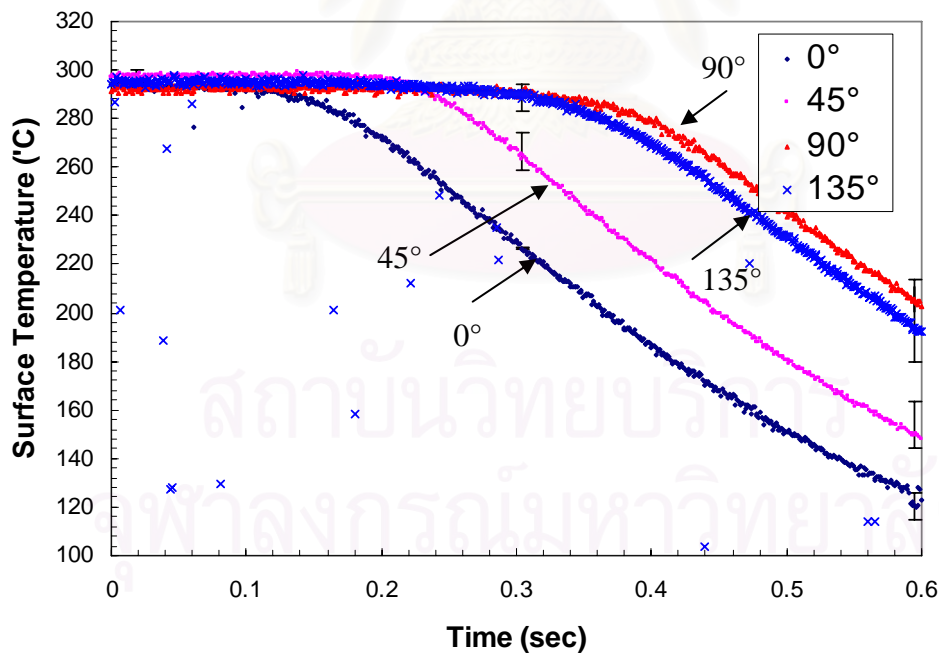
5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันตามตำแหน่งมุมต่างๆจากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวในตำแหน่งมุมต่างๆของโลหะทรงกลมตันอุณหภูมิสูงซึ่งตกลงอย่างอิสระในของเหลวระบายความร้อนเป็นสิ่งที่ถูกพิจารณา เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถูกนำมาใช้เป็นขอบเขตเริ่มต้นในการคำนวณของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆภายในทรงกลม ดังนั้นการเข้าใจถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันในแต่ละตำแหน่งในทิศทางมุมต่างๆ จะนำไปสู่การเข้าใจถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตัน และการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มในแต่ละตำแหน่งที่ผิวของโลหะทรงกลมตันด้วย

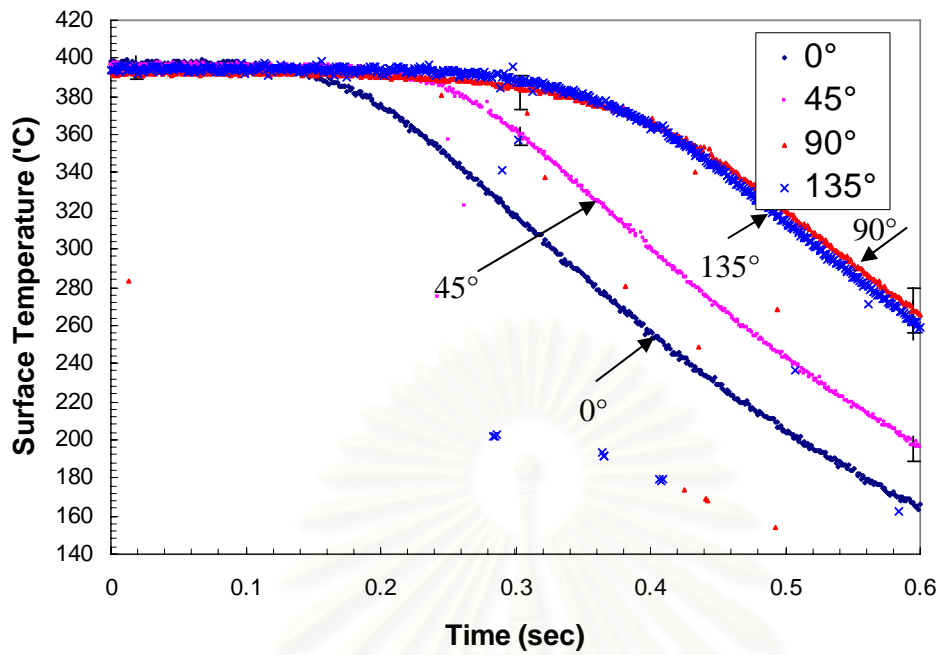
ในบทที่แล้วได้แสดงผลการทดลองในลักษณะที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันในแต่ละเงื่อนไขตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ ในการที่จะเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวในแต่ละตำแหน่งมุนั้น จึงได้นำค่าอุณหภูมิที่ผิวในแต่ละตำแหน่งการวัดที่ 0 , 45 , 90 และ 135 องศาที่ได้จากการทดลองจำนวนทั้งหมดประมาณ 8 ครั้งมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (± 1 S.D.) แล้วสร้างกราฟค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวในแต่ละตำแหน่งตามมุมเทียบกับเวลา โดยกระทำแบบเดียวกันที่เงื่อนไขของระดับอุณหภูมิต่างๆกัน ที่ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 ดังนี้



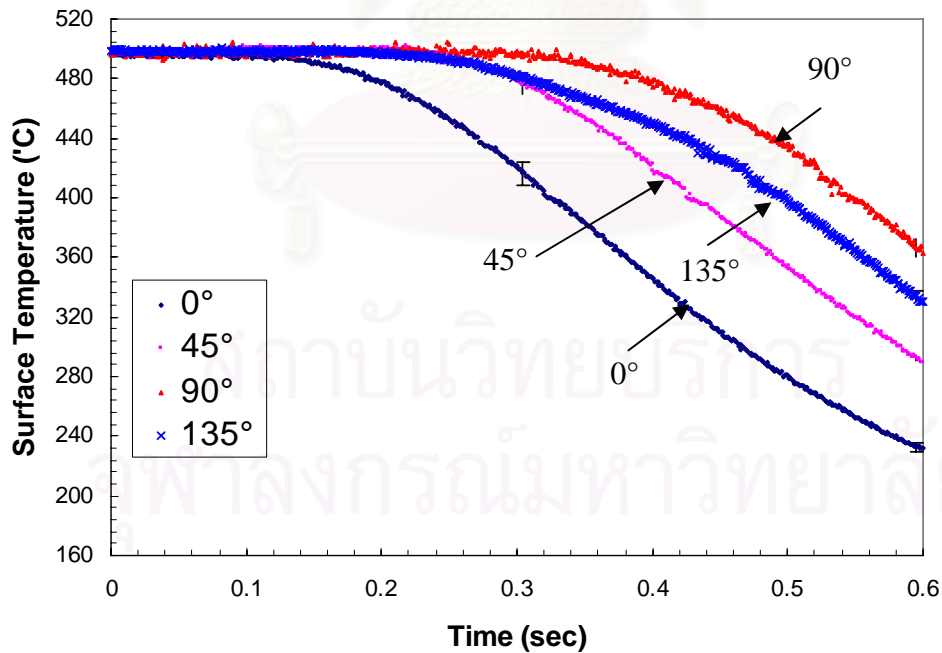
รูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่เงื่อนไข อุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่เงื่อนไข อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่เงื่อนไข อุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุมต่างๆ ที่เงื่อนไข อุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.1 ถึง รูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของโลหะทรงกลมตัน ตามตำแหน่งอุณหภูมิที่ผิว ที่ระดับอุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆกัน ทุกๆกราฟแสดงว่า ที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ$ ค่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงลดลงก่อน เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งอื่นๆ โดยเริ่มลดลงที่เวลาประมาณ 0-0.15 วินาที และค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาถัดมา จนกระทั่งถึง 0.6 วินาที ตำแหน่งตามแนวมุมของโลหะทรงกลมตันที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงถัดมาก็คือที่ตำแหน่ง 45° โดยเริ่มต้นลดลงที่เวลาประมาณ 0.25 วินาที สำหรับเงื่อนไขระดับอุณหภูมิเริ่มต้น 200,300 และ 400 องศาเซลเซียส และเริ่มต้นลดลงที่เวลาประมาณ 0.3 วินาที สำหรับเงื่อนไขระดับอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส และมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่เหลือ จนกระทั่งถึง 0.6 วินาที สำหรับที่ตำแหน่งมุม 90° และ 135° ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.1 มีแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งเวลาการเริ่มต้นลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.22 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับที่ตำแหน่งมุม 45° แต่หลังจากนั้นแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิมีน้อยกว่า จึงทำให้การลดลงของอุณหภูมิจากตำแหน่งมุม 45°

สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นถัดมาที่ 300 องศาเซลเซียส แนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน แต่เวลาในการเริ่มลดลงของอุณหภูมิจากตำแหน่งที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 200 องศาเซลเซียส คือที่เวลาประมาณ 0.3 วินาที หลังจากนั้นจนกระทั่งถึง 0.6 วินาที การลดลงของอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ก็มีการอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 135° มีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 90° เล็กน้อย

สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นถัดมาที่ 400 องศาเซลเซียส แนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน และเวลาในการเริ่มลดลงของอุณหภูมิจากตำแหน่งที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 300 องศาเซลเซียส คือที่เวลาประมาณ 0.3 วินาที หลังจากนั้นจนกระทั่งถึง 0.6 วินาที การลดลงของอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ก็มีการอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 135° มีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 90° เล็กน้อย

สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นถัดมาที่ 500 องศาเซลเซียส แนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ดังแสดงในรูปที่ 5.4 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่างกันเล็กน้อย โดยเวลาการเริ่มลดลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง 90° อยู่ที่เวลาประมาณ 0.35 วินาที และเวลาการเริ่มลดลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง 135° อยู่ที่เวลาประมาณ 0.3 วินาที หลังจากนั้นจนกระทั่งถึง 0.6 วินาที การลดลงของอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่ง 90° และ 135° ก็มีการอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 135° มีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 90° ประมาณ 30 องศาเซลเซียส

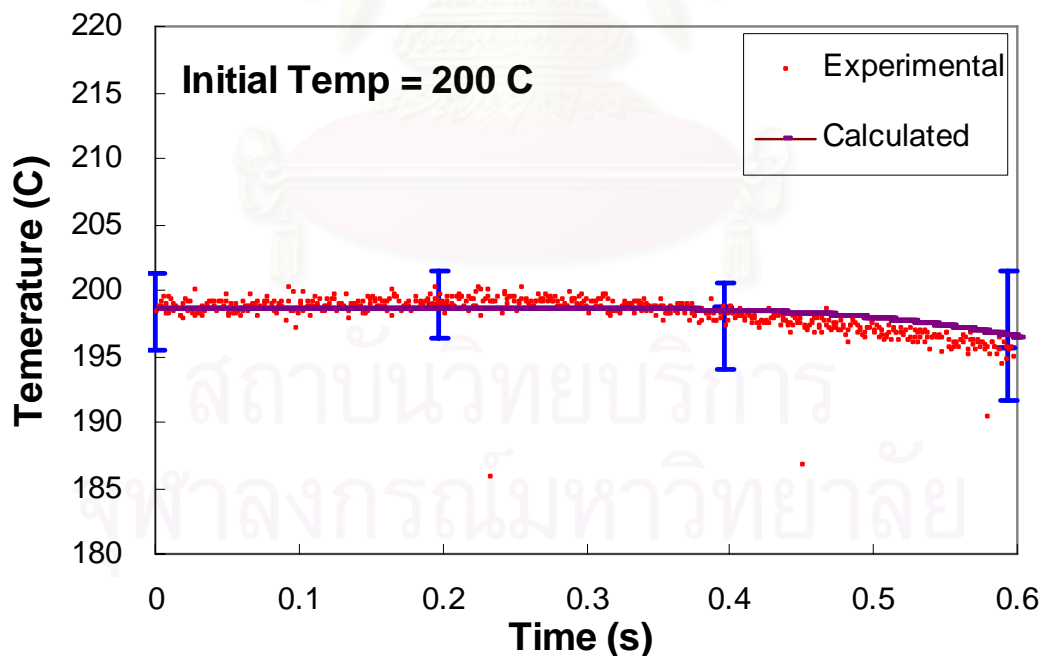
ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 0° ก่อนตำแหน่งอื่นๆบนผิวของทรงกลมนี้ ถ้าพิจารณาว่าโลหะทรงกลมสัมผัสก่อนสัมผัสพื้นน้ำมีอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่งต่างๆในทรงกลมมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่งมุม สำหรับในกรณีที่ชั้นฟิล์มเกิดขึ้นอย่างเสถียรการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 0° อาจจะเป็นเพราะของไหลที่เข้าปะทะคือน้ำมีมุมปะทะกับผิวโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งนี้ตรงข้ามกัน ในกรณีที่ความร้อนจากโลหะทรงกลมตันก่อให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆรอบๆทรงกลมอย่างเสถียร การปะทะของน้ำในแนวตรงที่ตำแหน่งนี้น่าจะกดทับชั้นฟิล์มให้มีความหนาแน่นกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบางหรือมีค่าน้อยทำให้ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat Flux) มีค่ามาก เมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆซึ่งมุมปะทะของน้ำไม่เป็นไปในลักษณะตรงกันข้าม ทำให้ชั้นฟิล์มไม่ถูกกดทับในลักษณะตรงๆ ทำให้ที่ตำแหน่งหน้าสุดของทรงกลมที่ $\theta = 0^\circ$ ความหนาของชั้นฟิล์มน่าจะบางสุด ในขณะที่ตำแหน่งอื่นๆ เช่นที่ $\theta = 45^\circ$ ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีขนาดหนาขึ้น และที่ตำแหน่ง $\theta = 90^\circ$ และ 135° ชั้นฟิล์ม มีขนาดหนาขึ้นอีก โดยมีความหนาใกล้เคียงกัน สำหรับในกรณีที่ชั้นฟิล์มไม่เสถียรอาจจะเป็นเพราะชั้นฟิล์ม หรือฟองเดือดที่เกิดขึ้นปะทะเข้ากับของไหลในลักษณะมุมตรงข้าม ทำให้ มีความไม่เสถียรสูงสุดในตำแหน่งนี้ ฟองเดือดหรือชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นเกิดการหลุดออกจากผิวได้ง่าย เมื่อหลุดออกจากผิวทรงกลมที่ตำแหน่งนี้ ก็พาเอาความร้อน ทำให้ที่ตำแหน่ง 0° นี้ มีการลดลงของอุณหภูมิเร็วกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆซึ่งฟองเดือดหรือชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นน่าจะมีความเสถียรมากกว่าจากการที่ของไหลคือน้ำไม่ได้ไหลเข้าปะทะในลักษณะมุมตรงข้าม

อย่างไรก็ดีแนวความคิดทั้งสองดังกล่าวนี้จะสมบูรณ์มากขึ้น หากว่าสามารถบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มเมื่อเทียบกับเวลาได้

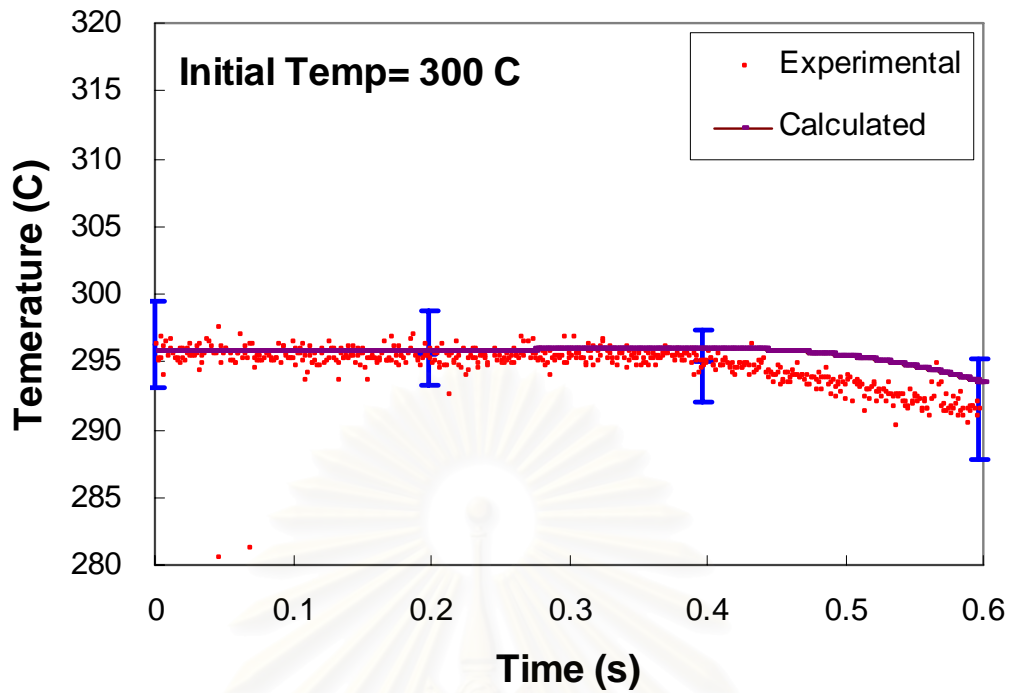
อีกสมมติฐานหนึ่งที่เป็นไปได้ นั่นก็คือ เนื่องจากโมเลกุลน้ำที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณผิวทรงกลมด้านหน้า $\theta = 0^\circ$ เป็น โมเลกุลใหม่ซึ่งยังไม่เคยสัมผัสกับผิวชั้นฟิล์มของโลหะทรงกลมตัน อุณหภูมิสูงทำให้มีอุณหภูมิตั้งต้นต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวชั้นฟิล์มทรงกลมได้ดี หลังจากนั้น โมเลกุลดังกล่าวอาจจะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นรอบวง ที่ตำแหน่งมุม θ มากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ตัวมันเองมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยลง สามารถที่จะดึงความร้อนจากผิวทรงกลมได้น้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิว เมื่อ θ มากขึ้น มีการลดลงที่ช้าลง อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง $\theta = 90^\circ$ โมเลกุลเหล่านี้ น่าจะเคลื่อนหลุดออกจากผิวชั้นฟิล์ม ทำให้ที่มุมหลังจากนั้น ไม่มีผลกระทบต่อเรื่องนี้มากนัก

5.2 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมีจากผิวที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นและค่าที่วัดได้จากการทดลอง

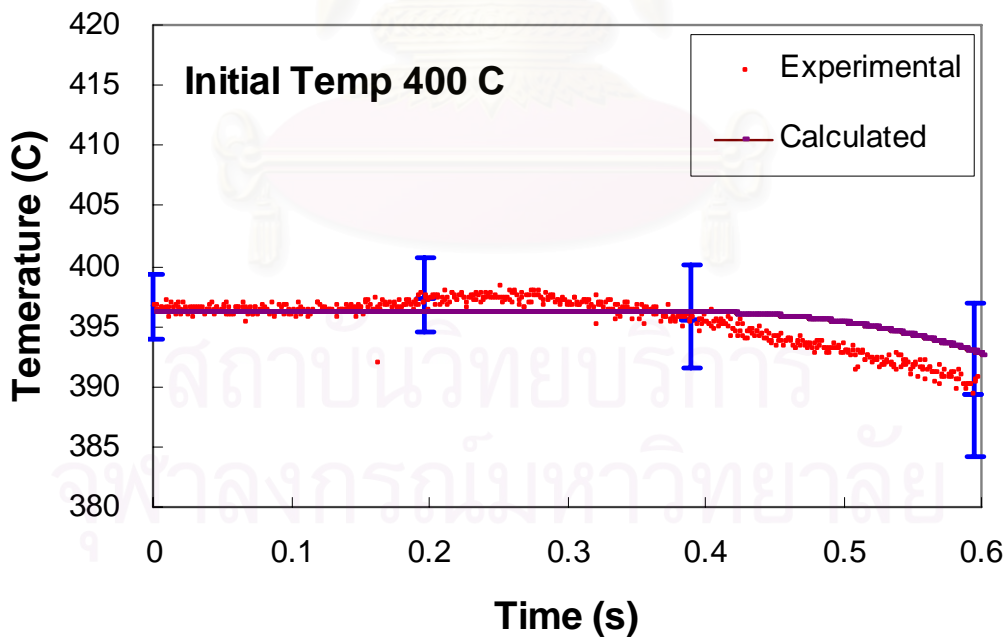
การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระภายใต้ปรากฏการณ์เดือดเป็นชั้นฟิล์มนั้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวที่ตำแหน่งต่างๆที่ผิวของโลหะทรงกลมตันที่ได้จากการทดลองเป็นค่าขอบเขตเริ่มต้น เพื่อให้มั่นใจว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะใช้ทำนายอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง และน่าเชื่อถือ จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนไปตามเวลา ที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจำนวน 8 ครั้ง ด้วยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันนั้นเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเดียวกันที่ตำแหน่งภายในทรงกลมลึกลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีจากผิวทรงกลม ในแนวทำมุม 45° และ 135° โดยการเปรียบเทียบทำขึ้นที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส รวมทั้งหมด 8 เงื่อนไข ซึ่งสำหรับค่าที่ได้จากการทดลองจะแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเป็น แถบช่วงความคลาดเคลื่อนซึ่งเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (± 1 S.D.) ที่ตำแหน่งเวลาต่างๆ ไปด้วย ผลการเปรียบเทียบในแต่ละเงื่อนไขแสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.12 ดังต่อไปนี้



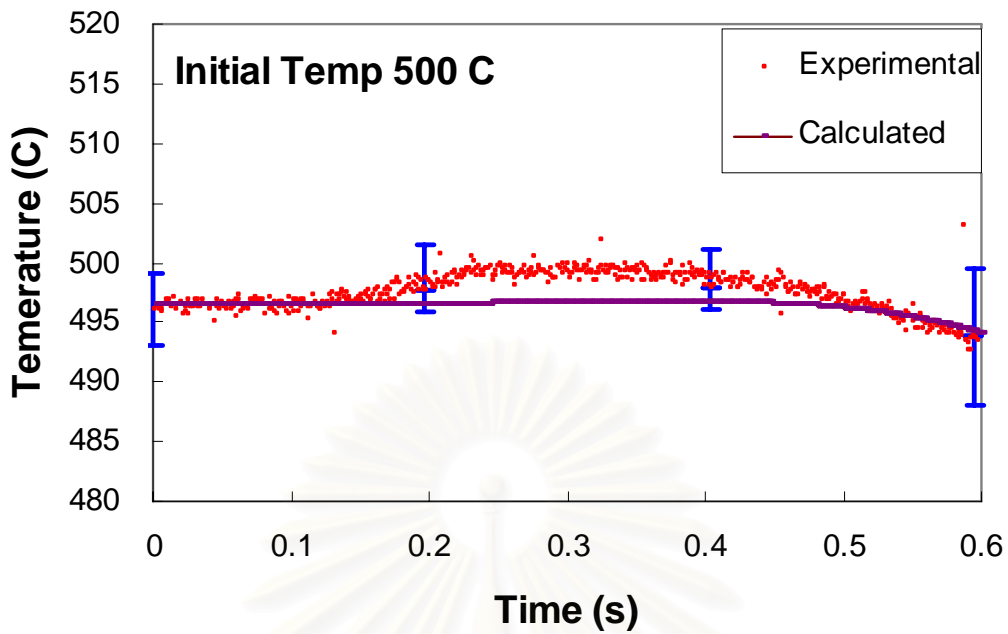
รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส



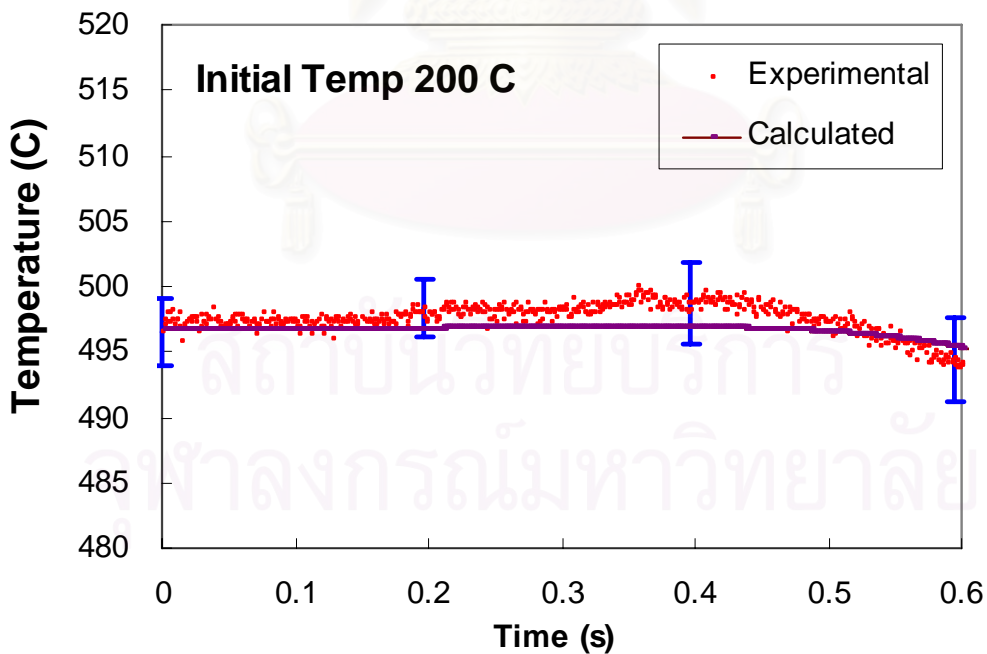
รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส



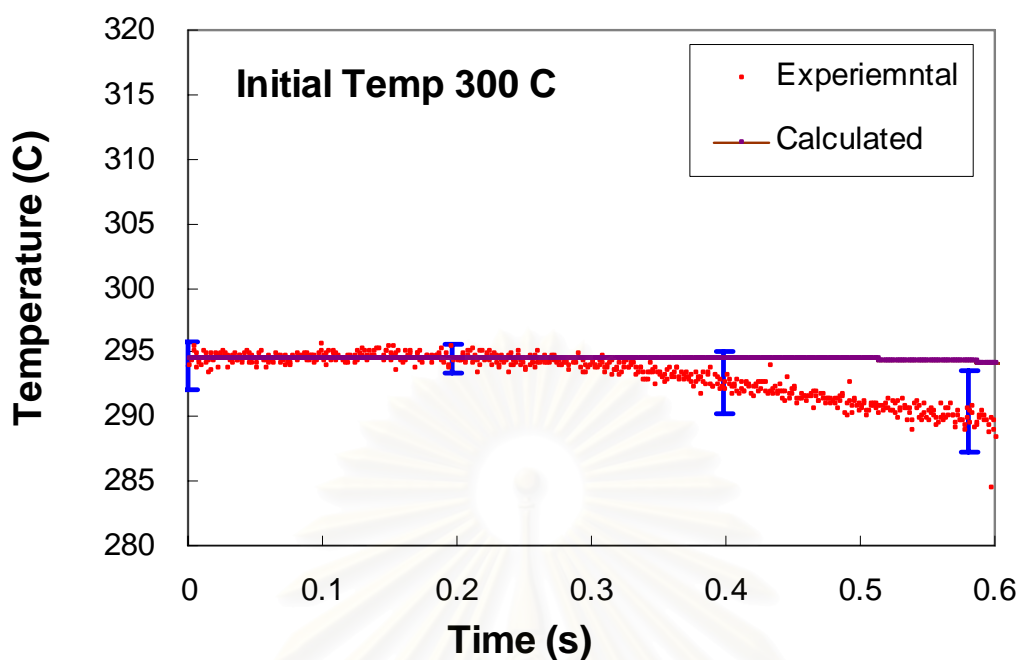
รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส



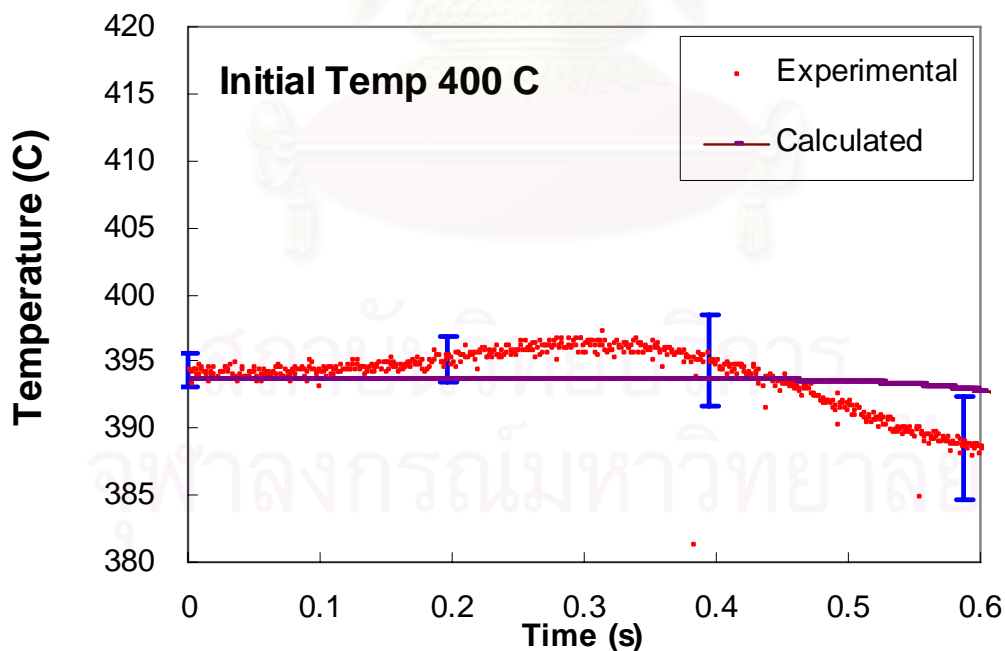
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส



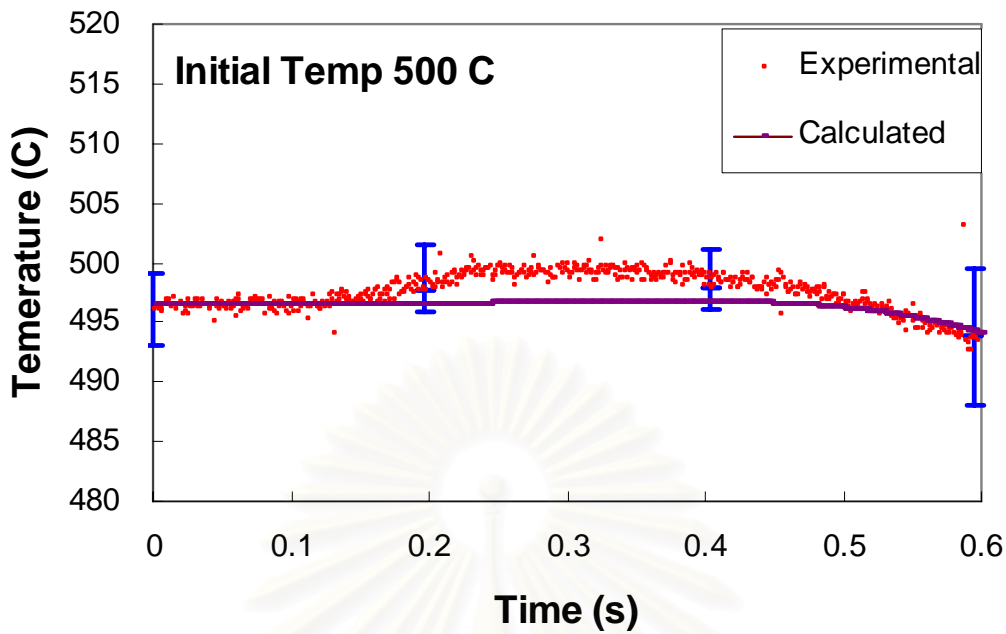
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° และ 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่ได้การคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น ต่างๆกันนั้น เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆกัน และตำแหน่งอุณหภูมิภายในต่างๆกันสามารถอธิบายผลการทดลอง แยกเป็นแต่ละเงื่อนไขได้ดังนี้

ที่เงื่อนไขแรกเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.4 วินาที มีค่าค่อยๆลดลงอย่างช้าๆในช่วงหลังที่ 0.4-0.6 วินาที และโดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ องศาเซลเซียส ในช่วง 0-0.4 วินาที และมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 0-2 องศาเซลเซียส ในช่วง 0.4-0.6 วินาทีต่อมา

เงื่อนไขที่ 2 และ 3 สำหรับการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 และ 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และ 5.7 ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ทั้งในส่วนที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณค่อนข้างจะสอดคล้องกัน แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.4 วินาที มีค่าค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงหลังที่ 0.4-0.6 วินาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองมีการลดลงที่เร็วกว่า ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณอยู่ประมาณ 1 -3 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาดังกล่าว

ในเงื่อนไขที่ 4 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.2 วินาที หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 0.2-0.4 วินาที และค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงเวลาที่เหลือ ในขณะที่ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าค่อนข้างจะคงที่ในช่วงเวลา 0-0.5 วินาที และค่อยๆ ลดลงในช่วงเวลา 0.5-0.6 วินาที โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสในช่วง 0.2 -0.5 วินาที และมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงเวลาที่เหลือ

สำหรับเงื่อนไขที่ 5 ถึง 8 นั้นได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ใช้ในการเปรียบเทียบจากที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง เป็นในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่างเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการประเมินอุณหภูมิของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพิ่มเติมขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งในแนวทำมุมกับแนวตั้ง ซึ่งผลการเปรียบเทียบเป็นดังนี้

ในเงื่อนไขที่ 5 ทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135 °กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.5 วินาที มีค่าค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงหลังที่ 0.5-0.6 วินาที และ โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสในช่วง 0.2 -0.5 วินาที และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณในช่วง 0.4-0.6 วินาที

โดยเงื่อนไข 6 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับค่าที่คำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โดยมีค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.6 วินาที ในขณะที่ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่ในช่วง 0-0.3 วินาที และค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงหลังที่ 0.3-0.6 วินาที ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยประมาณ 1-5 องศาเซลเซียสในช่วง 0.3 -0.6 วินาที

โดยเงื่อนไข 7 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.6 วินาที ในขณะที่ค่าที่ได้จากผลการทดลองมีค่าคงที่ในช่วง 0-0.2 วินาที และเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงหลังที่ 0.2-0.4 วินาที และค่อยๆลดลงอย่างช้าๆในช่วงเวลาถัดมา ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส ในช่วง 0.2 -0.4 วินาที และมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 1-5 องศาเซลเซียส ในช่วง 0.4-0.6 วินาที

โดยเงื่อนไข 8 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งลึกลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าคงที่เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก 0-0.6 วินาที ในขณะที่ค่าที่ได้จากผลการทดลองมีค่าคงที่ในช่วง 0-0.2 วินาที และเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงหลังที่ 0.2-0.4 วินาที และค่อยๆลดลงอย่างช้าๆในช่วงเวลาถัดมา ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส ในช่วง 0.2 -0.5 วินาที

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วกับแนวโน้มผลที่ได้จากเงื่อนไข 6 และ 7 ผลที่ได้จากการคำนวณส่วนใหญ่แตกต่างจากผลที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนทั้งสิ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าผลการคำนวณมีความถูกต้องสามารถยอมรับได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามผลที่ได้ในเงื่อนไข 6 และ 7 ที่มีความแตกต่างกันระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่ชั้นฟิล์มบริเวณด้านหลังของทรงกลมมีลักษณะที่ไม่เสถียร ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าชั้นฟิล์มที่เสถียร ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันเมื่อเทียบกับเวลา ที่สังเกตได้จากผลการทดลองทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อเทียบกับเวลาเร็วว่าการค่าที่ได้คำนวณได้จากผลการคำนวณทั้งสิ้น

และจากเงื่อนไขทั้งหมดที่แสดง ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่เงื่อนไขตำแหน่งอุณหภูมิที่ลดลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 45° กับแนวตั้งด้านล่าง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณและค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าอุณหภูมิทั้งสองคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาแรกๆ และค่อยๆลดลงในช่วงเวลาท้าย ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีการลดลงที่ช้ากว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง สำหรับเงื่อนไขตำแหน่งอุณหภูมิที่ลดลงไปครึ่งหนึ่งของรัศมี ในแนวทำมุม 135° กับแนวตั้งด้านล่าง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมีค่าค่อนข้างจะคงที่ตลอดช่วงเวลาที่น่าสนใจ ในขณะที่แนวโน้มค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในช่วงท้ายๆ ประมาณ 0.4 -0.6 วินาที ทำให้มีความแตกต่างกันอยู่บ้างของค่าอุณหภูมิประมาณ 1-5 องศาเซลเซียสในช่วงดังกล่าว ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดได้จากสองสาเหตุ สาเหตุแรกจากค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งอาจจะมีค่าไม่แม่นยำเพียงพอ หรือสาเหตุที่สองจาก เงื่อนไขเริ่มต้น การคำนวณ แบบจำลองต่างๆที่ใช้ยังไม่สอดคล้องกับ สภาพความเป็นจริงของการถ่ายเทความร้อนของโลหะทรงกลมตันซึ่งตกลงอย่างอิสระในของเหลวระบายความร้อน

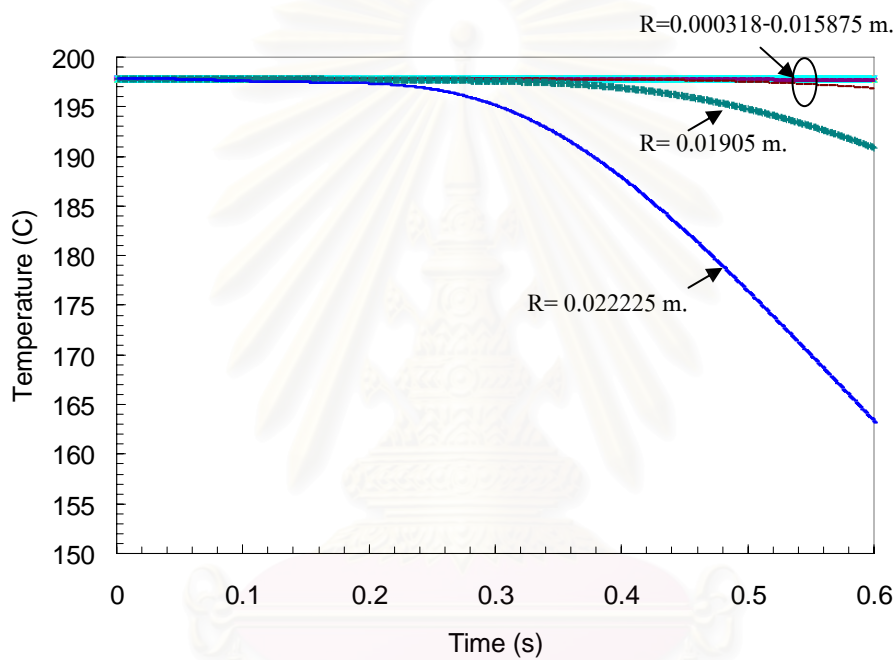
5.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนวมุมและรัศมีต่างๆซึ่งประเมินได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จุดประสงค์หลักของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่เปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของเหลวระบายความร้อนขณะที่เคลื่อนตัวตกลงมาสัมผัสกับน้ำ ในบทนี้จะได้นำผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งต่างๆในแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นซึ่งคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าว มาแสดงเพื่อจะได้เข้าใจถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และนำไปสู่การอธิบายได้ถึงสาเหตุของลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันนั้นในการศึกษานี้จะแยกพิจารณาในสองส่วนอันได้แก่ หนึ่ง การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิตามแนวรัศมีเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งมุมใดมุมหนึ่งที่ทำกับแนวตั้ง และการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิตามแนวมุมเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีหนึ่งๆ โดยการพิจารณาที่ตำแหน่งมุมใดมุมหนึ่ง จะเลือกตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เช่น ที่ตำแหน่ง 2 องศา ทำกับแนวตั้งซึ่งที่ตำแหน่ง 0° ในผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่ามี

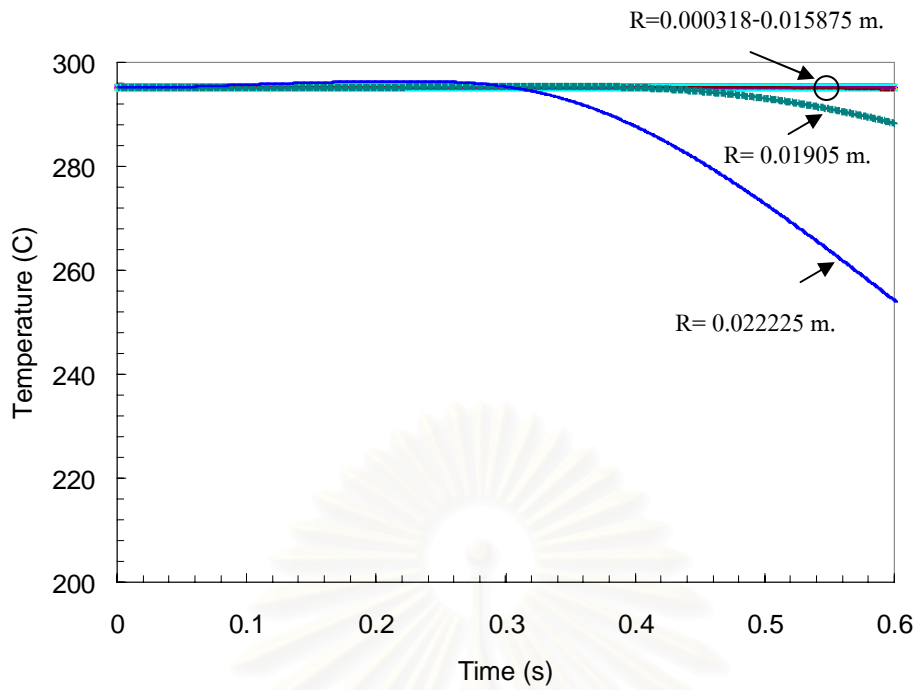
เปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิชัดเจนเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งมุมอื่นๆ สำหรับการพิจารณาที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีหนึ่งๆจะพิจารณาที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีเท่ากับ 1.905 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางทรงกลมซึ่งเป็นตำแหน่งอุณหภูมิที่ใกล้ผิวของโลหะทรงกลมตันซึ่งคาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัดเจน

ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่เปรียบเทียบกับตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆกันที่ 0.000318 m. ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้จุดศูนย์กลางทรงกลมจนถึงตำแหน่ง 0.022225 m. ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้ผิวทรงกลม ที่ ตำแหน่งตามแนวมุม 2 องศาทำมุมกับแนวตั้ง ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ 200,300,400 และ 500 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 ดังนี้

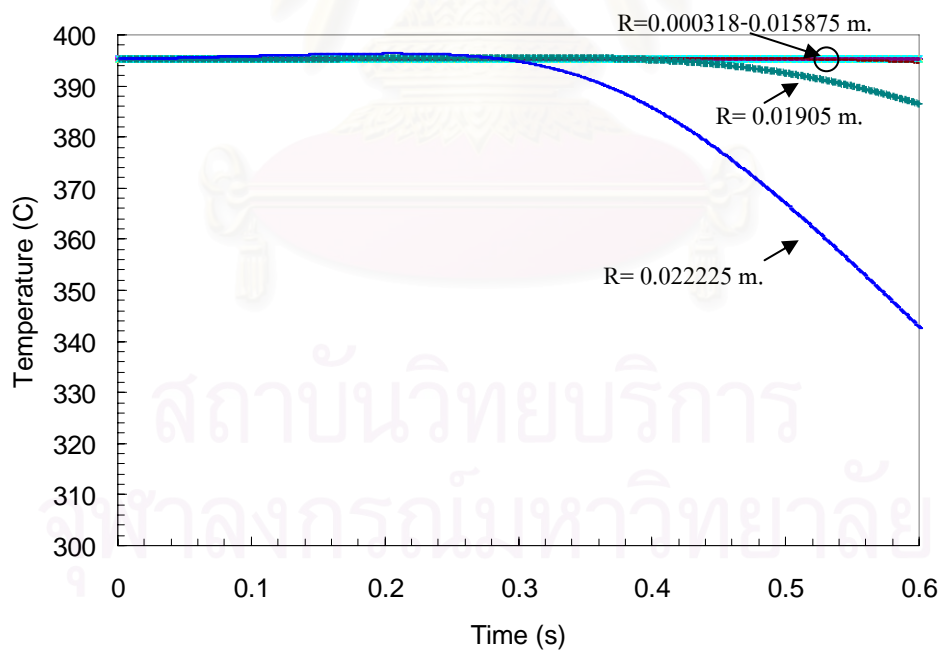


รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศา และตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส

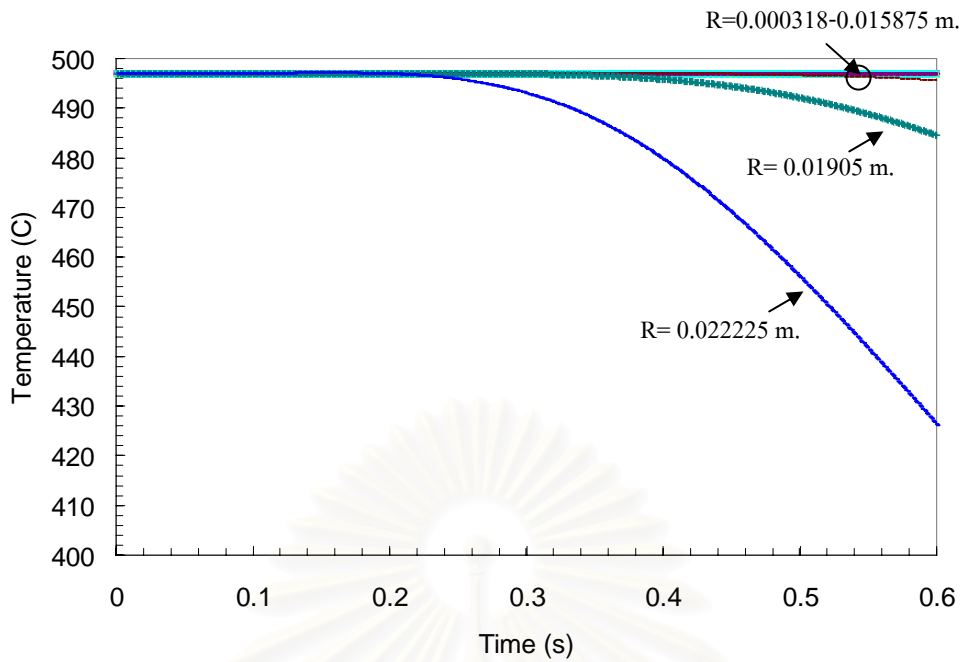
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศา และตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆ ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศาและตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆ ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส

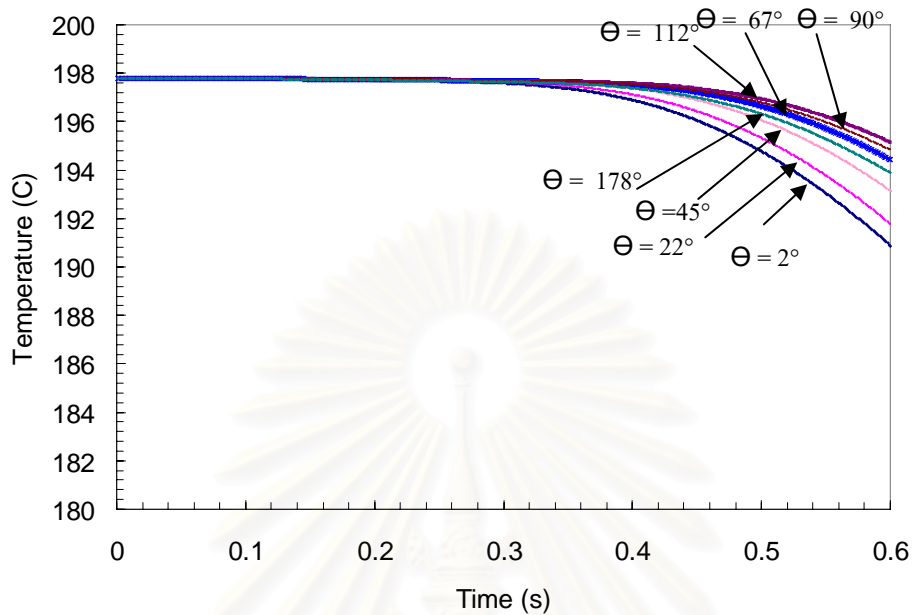


รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งมุม 2 องศา และตำแหน่งตามแนวรัศมีค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส

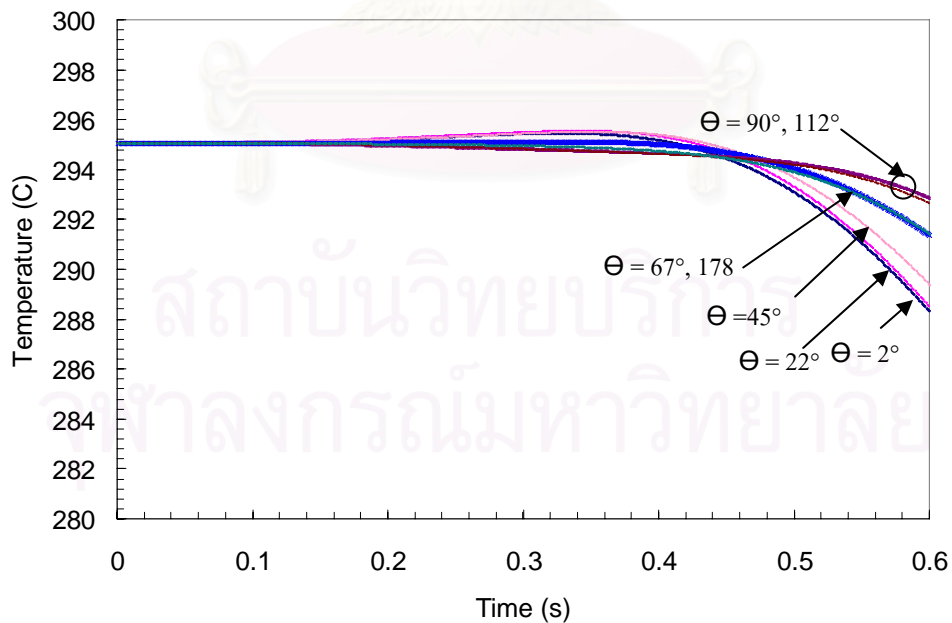
จากรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.16 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆกัน ที่ตำแหน่งมุมเดียวกัน ที่ 2 องศา ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณในทุกเงื่อนไขชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมตามตำแหน่งในแนวรัศมีนั้น จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ที่ตำแหน่งเท่ากับ 0.01905 m. จากจุดศูนย์กลางขึ้นมา สำหรับที่ตำแหน่งลึกลงไปจากที่ตำแหน่ง 0.01905 m. นั้น การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในช่วง 0-0.6 วินาทีที่พิจารณา ซึ่งอาจจะอธิบายได้ดังนี้ว่า เมื่อโลหะทรงกลมตันอุณหภูมิสูงเคลื่อนตัวสัมผัสผิวน้ำนั้นความร้อนบริเวณใกล้ผิวโลหะทรงกลมตันนั้นถูกดึงไปใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มห่อหุ้มโลหะทรงกลม และเมื่อเกิดขึ้นฟิล์มดังกล่าวซึ่งจะทำให้หน้าที่เป็นฉนวนกั้นความร้อนไม่ให้ความร้อนถูกถ่ายเทได้อย่างสะดวกทำให้ ความร้อนภายในโลหะทรงกลมตันไม่สามารถถ่ายเทสู่ของเหลวระบายความร้อนได้โดยง่าย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจึงเกิดเฉพาะที่บริเวณใกล้ผิวโลหะทรงกลมตัน

สำหรับผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน โลหะทรงกลมตันที่เปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งตามแนวมุมต่างๆกันตั้งแต่ ที่ตำแหน่งมุม 2 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้ตำแหน่งล่างสุดของทรงกลมเป็นตำแหน่งที่ของเหลวระบายความร้อนวิ่งเข้าปะทะเป็นตำแหน่งแรกจนถึงตำแหน่ง มุม 178 องศา เป็นตำแหน่งใกล้ตำแหน่งหลังสุดของทรงกลม ที่ ตำแหน่ง ตามแนวรัศมี เท่ากับ 0.01905

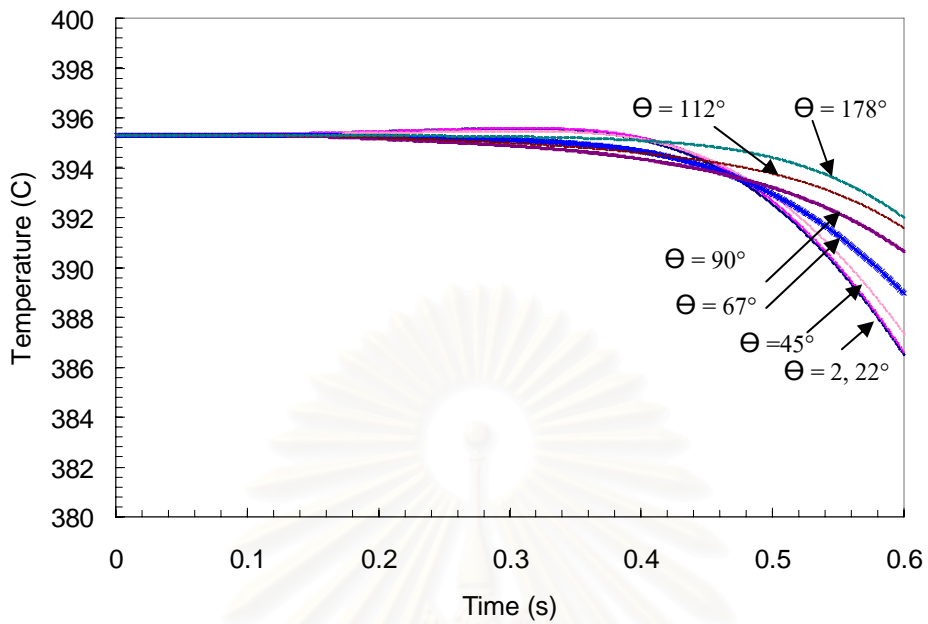
m. ณ เงื่อนไขว้ของอุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 5.17 ถึง 5.20 ดังนี้



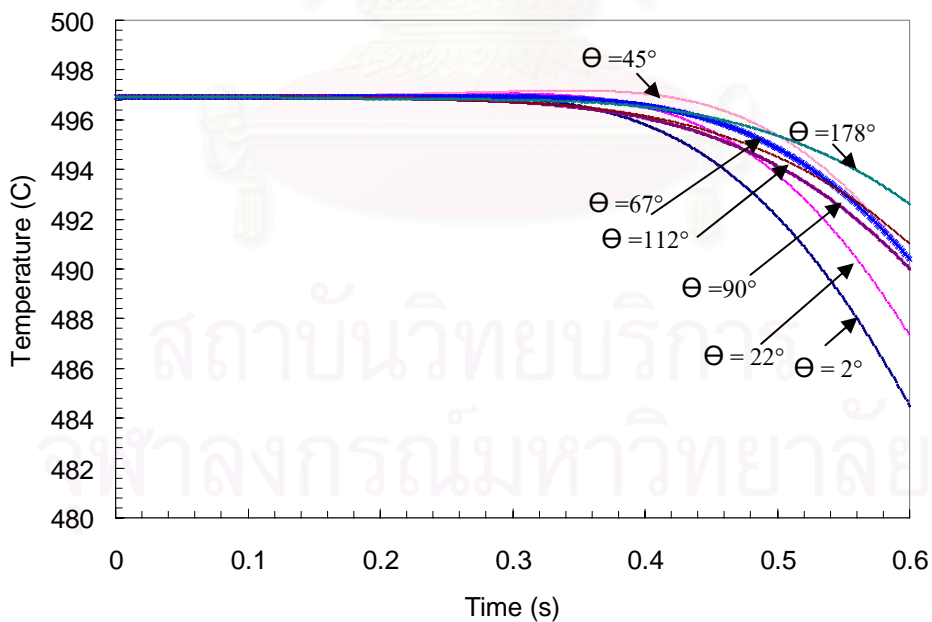
รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ($R = 0.01905 \text{ m.}$) และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขว้ของอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ($R = 0.01905 \text{ m.}$) และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขว้ของอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนว รัศมี ($R= 0.01905 \text{ m.}$) และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ($R= 0.01905 \text{ m.}$) และตำแหน่งตามแนวมุมค่าต่างๆกัน ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.20 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวมุมต่างๆกัน ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ที่ $R = 1.905 \text{ cm}$. ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมมีการลดลงอย่างรวดเร็วที่สุดที่ค่ามุม เท่ากับ 2 องศาซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้จุดล่างสุดของทรงกลมซึ่งเป็นตำแหน่งที่ของเหลวระบายความร้อนเข้าปะทะเป็นตำแหน่งแรก และ ลดลงรวดเร็วถัดมาที่มุม 22, 45 และ 67 องศา ตามลำดับ หลังจากค่ามุมนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงในอัตราที่ช้ากว่า ตำแหน่งมุมที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ โดยมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนนักเมื่อเทียบกับค่าของตามตำแหน่งมุมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าการลดลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ ตำแหน่งตามมุมต่างๆนั้นน่าจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการระบายความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจึงบริเวณผิวของโลหะทรงกลม ณ ตำแหน่งมุมต่างๆกัน ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5.1

สำหรับค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี $r = 0.022225 \text{ m}$. ดังที่แสดงในรูปที่ 5.14, 5.15 และค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวมุม $\theta = 2, 22$ และ 45 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 5.18, 5.19 ในช่วงเวลาประมาณ 0.2-0.4 วินาที ค่าอุณหภูมิจึงค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 0.2-1.0 องศาเซลเซียส และกลับลดลงเป็นปกติในช่วงเวลาถัดมา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในบางตำแหน่งนี้อธิบายได้ว่าเป็นผลอันเนื่องมาจากการใช้ค่าอุณหภูมิจึงที่ได้จากการทดลอง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละครั้งการทดลองมาใช้ในการกำหนดขอบเขตเริ่มต้นของการคำนวณ เนื่องจากค่าอุณหภูมิภายในเริ่มต้นของโลหะทรงกลมต้นถูกกำหนดจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ได้จากการทดลองหลายครั้ง ซึ่งค่าอุณหภูมิจึงผิวในบางตำแหน่งในช่วงเวลาเริ่มต้น อาจจะถูกประเมินให้มีความมากกว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้นภายในทรงกลม ดังที่กล่าวมาทำให้ผลการคำนวณในตำแหน่งดังกล่าวแสดงผลทำให้ค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมในบางตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างเห็นใน รูปที่ 5.14, 5.15, 5.18 และ 5.19

บทที่ 6

บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุปงานวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองวัดค่าอุณหภูมิภายในและที่ตำแหน่งที่ผิวโลหะต้นทรงกลม อุณหภูมิสูงซึ่งตกลงอย่างอิสระภายใต้ปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์ม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ ประกอบในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆภายในทรงกลม เพื่อสามารถอธิบายถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมต้นเทียบกับเวลา

โดยสำหรับในส่วนการทดลองนั้นได้ทำการติดตั้งระบบการทดลองที่สามารถวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของโลหะทรงกลมต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ได้พร้อมกัน 2 จุด ในเวลาเดียวกัน โดยแต่ละเงื่อนไขการวัดได้ทำการวัดอุณหภูมิภายในโลหะต้นทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีระยะประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีทรงกลม ประมาณ 1.3 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางทรงกลม และ ตำแหน่งที่ผิวของโลหะต้นทรงกลม โดยตำแหน่งตามแนวมุมของ จุดที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล สำหรับวัดนั้น ประกอบไปด้วยที่ตำแหน่ง 45° และ 135° สำหรับการวัดอุณหภูมิภายในทรงกลม และที่ตำแหน่ง 0° , 45° , 90° และ 135° สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ผิวของทรงกลม สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะต้นทรงกลมก่อนปล่อยลงตกสัมผัสของเหลวระบายความร้อน อยู่ที่ระดับ ประมาณ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในทุกเงื่อนไขการทดลองแสดงว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งภายในทรงกลม มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาค่อนข้างจะคงที่ในช่วงแรก 0- 0.3 วินาที และลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 0.3 ถึง 0.6 วินาที ถัดมา ไม่ขึ้นกับตำแหน่งมุมที่วัด ในช่วงเวลาที่โลหะต้นทรงกลม เคลื่อนที่ผ่านของเหลวระบายความร้อน ในขณะที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ผิวของโลหะต้นทรงกลมในช่วงเวลาแรกตั้งแต่ประมาณ 0-0.3 วินาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวเมื่อเทียบกับเวลา สำหรับช่วงเวลาหลังตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.6 วินาที จึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวเมื่อเทียบกับเวลา โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ผิวเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาหลังจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งมุมที่กระทำต่อแนวตั้ง โดยที่ตำแหน่งมุม 0° มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ผิวเร็วสุดและช้าลงที่ตำแหน่ง 45° สำหรับ ที่ตำแหน่ง 90° และ 135° มีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นเพราะการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ดีที่ตำแหน่งบริเวณด้านหน้าของโลหะต้นทรงกลมซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้ามีขนาดบางกว่า เมื่อเทียบกับด้านอื่นอันเนื่องมาจากการปะทะกับของไหลในลักษณะตรงๆ และเกิดจากของไหลคือน้ำซึ่งมีอุณหภูมิที่ไหลเข้ามาถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งแรกและค่อยๆเคลื่อนตัวไปตามผิวทรงกลม

รับความร้อนที่ตำแหน่งอื่นๆต่อไป ทำให้ การลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 0° และ 45° มีการลดลงที่เร็วกว่าบริเวณส่วนอื่นๆ

จากนั้นได้นำข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ผิวของโลหะต้นทรงกลมที่ได้จากการทดลอง ไปประกอบในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เคยประดิษฐ์ขึ้นสำหรับการคำนวณอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันแบบหนึ่งมิติ [11] โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ถูกเขียนให้สามารถคำนวณอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันแบบสองมิติ เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ได้ทำการคำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งเดียวกันกับที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกันอย่างสมเหตุสมผล

และสุดท้ายได้ทำการคำนวณอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งต่างๆและเพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่างๆที่ขึ้นกับตำแหน่งมุมที่กระทำต่อแนวตั้งและตำแหน่งตามแนวรัศมี

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวมุมต่างๆกัน ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ที่ $R=0.01905$ m. ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆกัน ที่ตำแหน่งมุมเดียวกัน ที่ 2 องศา ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณในทุกเงื่อนไขชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมตามตำแหน่งในแนวรัศมีนั้น จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ที่ตำแหน่งเท่ากับ 0.01905 m. จากจุดศูนย์กลางขึ้นมาสำหรับที่ตำแหน่งลึกลงไปจากที่ตำแหน่ง 0.01905 m. นั้น การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในช่วง 0-0.6 วินาทีที่พิจารณา

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรงกลมที่ตำแหน่งตามแนวมุมต่างๆกัน ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี ที่ $R=0.01905$ m. ณ เงื่อนไขอุณหภูมิเริ่มต้น 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขชี้ให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตำแหน่งทุกค่ามุมแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมเมื่อเทียบกับเวลาที่มีการลดลงอย่างรวดเร็วที่สุดที่ค่ามุมเท่ากับ 2 องศา จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมลดลงเร็วถัดมาที่ค่ามุม 22, 45 และ 67 องศา ตามลำดับ โดยตั้งแต่ที่ตำแหน่งค่ามุม 90 องศา การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมเมื่อเทียบกับเวลาลดลงช้ากว่าตำแหน่งมุมที่กล่าวถึงก่อนหน้าทั้งหมดและมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนนักเมื่อเทียบกับค่าของตำแหน่งมุมที่เพิ่มขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจาก จุดหลักของการคำนวณ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิที่ผิว เป็นขอบเขตเริ่มต้น ดังนั้นความถูกต้อง แม่นยำ ของค่าที่ได้จากการทดลองนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ด้วย ข้อจำกัดของระบบการทดลองในปัจจุบันซึ่งสามารถวัดตำแหน่งอุณหภูมิได้เพียงที่ละ 2 ตำแหน่งวัด เท่านั้น ซึ่งหนึ่งในสองต้องนำไปใช้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งภายใน โลหะตันทรงกลม ซึ่งทำให้เหลือ ตำแหน่งการวัดอีกหนึ่งตำแหน่งที่สามารถนำไปวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวได้ ซึ่งการได้มาซึ่งข้อมูล อุณหภูมิที่ผิวในแต่ละตำแหน่งตามแนวมุมต่างๆกันนั้น ได้มาจาก การประเมิน โดยอาศัยข้อมูล อุณหภูมิที่ผิวจากการทดลองที่ตำแหน่ง 0° , 45° , 90° และ 135° ซึ่งได้มาจากการทดลองที่ละครั้ง ดังนั้นความถูกต้องของข้อมูลจึงมีอยู่ในระดับ หนึ่ง หากสามารถที่จะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่ ผิวที่ตำแหน่งต่างๆได้พร้อมๆกันหลายจุด และที่เวลาเดียวกัน จะทำให้ข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวที่จะ นำไปใช้ในการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ ผลลัพธ์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิใน โลหะทรงกลมตันที่ถูกต้อง นำเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

นอกจากนั้นช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมตันในน้ำจากตำแหน่งบนสุด จนถึงพื้นถึงน้ำนั้นเป็นเวลาที่สั้นมากไม่ถึง หนึ่ง วินาที ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในทรง กลมส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณใกล้ๆผิว ซึ่งทำให้ในระบบการทดลองในการศึกษา ครั้งนี้ การวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งภายในโลหะทรงกลมตันที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของรัศมี ไม่เห็นผล การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในทรงกลมได้อย่างชัดเจน หากสามารถสร้างระบบการ ทดลองที่ให้ลูกเหล็กสามารถเคลื่อนตัวผ่านของเหลวระบายความร้อนเป็นเวลานานขึ้น ซึ่งอาจจะทำ ได้โดยการเพิ่มขนาดความสูงของถังเก็บน้ำขึ้น ก็น่าจะสามารถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในทรงกลมที่ตำแหน่งบริเวณด้านในของโลหะทรงกลมได้มากขึ้น และสามารถนำค่าดังกล่าว ไปตรวจสอบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้เราสามารถประเมินความสามารถ ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในทรงกลมได้อย่างดียิ่งขึ้น

ในส่วนสุดท้าย หากสามารถที่จะสังเกตจากลักษณะทางกายภาพของโลหะทรงกลมตัน ขณะตกลงผ่านของเหลวระบายความร้อน อาทิเช่น ลักษณะการเดือดรอบผิวทรงกลม ปริมาณความ หนาชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ลักษณะฟองน้ำที่เกิดขึ้นรอบผิวทรงกลม ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระบบการทดลอง ที่สามารถสังเกตและบันทึก การเปลี่ยนแปลงและเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่น การสร้างถัง น้ำให้มีความโปร่งใส และ การติดตั้งระบบบันทึกภาพความเร็วสูง จะทำให้สามารถอธิบายลักษณะ การเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมตันซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับ ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. สัญชัย นิลสุวรรณ โฆษิต. A Numerical Model for Time Dependent Film Boiling on a Sphere. The Fourth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering March 2000.
2. K.H. BANG. Numerical prediction of force convection film boiling heat transfer from a sphere. Int.J.Heat Mass transfer 37, 16 (1994):2415-2424
3. L.C.WITT. Film Boiling From a Sphere. I & EC Fundamentals (1968):517-518
4. Kiyoshi KOBAYASHI. Film Boiling Heat Transfer around a Sphere in Forced Convection. Journal of Nuclear Science and Technology, 2 (1965):62-67
5. J.P. Holman. Heat Transfer -8th ed. McGraw-Hill, 1997.
6. Nukiyama, S. The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling under Atmospheric Pressure. Journal Japan Soc.Mech. Engrs 37, (1934):367-374
7. Farber, E.A. and Scorah, R.L. Heat Transfer to Water Boiling under Pressure. Trans. ASME 79, (1948): 369-384
8. David B.R. Kenning. Optical studied of boiling heat transfer: insights and limitations. International Journal of Heat and Fluid Flow 25, (2004): 209-222
9. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
10. Bancha Ounpanich, Temsiri Pomprapha, Urith Archakositt, Sunchai Nilsuwakosit. Experiments on Time Dependent Film Boiling on a Sphere. The Second National Congress on Fluids Engineering. KOREA, August 2002.
11. เต็มศิริ ป้อมประภา. การจำลองการเดือดเป็นชั้นฟิล์มที่ขึ้นกับเวลาบนพื้นผิววัตถุทรงกลม วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณ

สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโลหะทรงกลมเทียบกับเวลา นั้นถูกเขียนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซี ซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียด Source code ดังต่อไปนี้

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <alloc.h>
#define pi 4.0*atan(1.0)

char str[34];
float t,z,TS,TS3,dr,dz,A;
void GAUSS ();
void temps();
void main()
{
    float
r0,ks,dt,cp,den,b,c,d,e,f;
    float Tm;
    float a;
    float
T1[100][100],T[100][100],dT1[100][100],dT2[100][100],T2[100][100];
    int i,j,h,m,n,k,ndr,ndz;
    FILE *f1;
    ndr=80;
    ndz=80;
    dt=0.0001;
    Tm=197.7717;
    n=0.8/dt;
    r0=0.0254;
    ks=73.0;
    cp=0.46;
    den=7735.0;
    dr=r0/ndr;
    dz=pi/ndz;
    A=(ks/(den*cp*1000.0)) ;
    k=ndr;
    m=ndz-1;
    // time =0
    /* initialize value of array*/
    printf("Running...please wait...");
    for (i=0;i<=99;i++) {
        for(j=0;j<=99;j++) {
            T[i][j]=0.0;
            T1[i][j]=0.0;
            T2[i][j]=0.0;
            dT1[i][j]=0.0;
            dT2[i][j]=0.0;
        }
    }
    for (i=1;i<k;i++)
        for(j=1;j<=m;j++) {
            T[i][j]=Tm;
        }
    t=0.0;
    i=k;
    for(j=1;j<=m;j++){
        z=dz*j;
        temps();
        { if(z<3.0*pi/4.0)
            T[i][j]=TS;
          else
            T[i][j]=TS3; }
    }
    f1=fopen("output201.txt","w");
    // for (i=1;i<=k;i++){
    //     for(j=1;j<=m;j++){
    //         fprintf (f1,"%3.10f %3.10f %3.10f %3.10f %d %d %f\n",T[i][j],T1[i][j],dT1[i][j],dT2[i][j],i,j,t);
    //         fprintf (f1,"%3.6f %3.6f %3.6f\n",dr*i,dz*j,T[i][j],t);
    //     }
    // }
    // gets(str);
    // gets(str);
    // calculation at time =t
    for(h=1;h<=n;h++){
        t=t+dt;
        i=k;
        for(j=1;j<=m;j++){
            z=dz*(j);
            temps();

```

```

{ if( z<3.0*pi/4.0 )
    T[i][j]=TS;
  else
    T[i][j]=TS3;}
}

for (i=1;i<k;i++){
  for(j=1;j<=m;j++){
    if((i==1)&&(j==1)) {
      a=A*dt/(i*i*dr*dr);

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T[i+1][j]-
T[i][j]);
      d=0.0;

e=sin((j+0.5)*dz)*(T[i][j+1]-
T[i][j]);
      f=0.0;
    } else
    if((i==1)&&(j==m)) {
      a=A*dt/(i*i*dr*dr);

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T[i+1][j]-
T[i][j]);
      d=(i-0.5)*(i-
0.5)*(T[i][j]-T[i-1][j]);
      e=0.0;
      f=sin((j-
0.5)*dz)*(T[i][j]-T[i][j-1]);
    } else {
      a=A*dt/(i*i*dr*dr);

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T[i+1][j]-
T[i][j]);
      d=(i-0.5)*(i-
0.5)*(T[i][j]-T[i-1][j]);
      e=sin((j+0.5)*dz)*(T[i][j+1]-
T[i][j]);
      f=sin((j-
0.5)*dz)*(T[i][j]-T[i][j-1]);
      dT1[i][j] =((a*(c-
d)))+(b*(e-f));
    }
  }
}

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T[i+1][j]-
T[i][j]);
      d=0.0;

e=sin((j+0.5)*dz)*(T[i][j+1]-
T[i][j]);
      f=sin((j-
0.5)*dz)*(T[i][j]-T[i][j-1]);
    } else if(j==1) {
      a=A*dt/(i*i*dr*dr);

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T[i+1][j]-
T[i][j]);
      d=(i-0.5)*(i-
0.5)*(T[i][j]-T[i-1][j]);

for (i=1;i<=k;i++){
  for(j=1;j<=m;j++){
    T1[i][j]=T[i][j]+
dT1[i][j];
  }
}

for (i=1;i<=k;i++){
  for(j=1;j<=m;j++){
    if((i==1)&&(j==1)) {
      a=A*dt/(i*i*dr*dr);

b=(A*dt/(i*i*dr*dr))*(1.0/((sin
(j*dz))*dz*dz));

c=(i+0.5)*(i+0.5)*(T1[i+1][j]-
T1[i][j]);
      d=0.0;

e=sin((j+0.5)*dz)*(T1[i][j+1]-
T1[i][j]);

```



```

fp=fopen("T201.DAT","r");
if (fp==NULL) printf("File
not found");
for (I=1;I<=203;I++)
fscanf(fp,"%f %f %f %f
%f",&TI[I],&T0[I],&T45[I],&T90[
I],&T135[I]);

for (I=1;I<=203;I++)
if (TI[I]<=t)
N1=I;
// I=N1;
if(z<=3.0*pi/8.0) {
T11=T0[N1];
T12=T45[N1];
T13=T90[N1];
T21=T0[N1+1];
T22=T45[N1+1];
T23=T90[N1+1];
XX1=0.0000000000000000001;
XX2=pi/4.0;
XX3=pi/2.0;    }
else {
T11=T45[N1];
T12=T90[N1];
T13=T135[N1];
T21=T45[N1+1];
T22=T90[N1+1];
T23=T135[N1+1];
XX1=pi/4.0;
XX2=pi/2.0 ;
XX3=3.0*pi/4.0; }

for (I=1;I<=3;I++){
X[1] =XX1;
X[2] =XX2;
X[3] =XX3;
Y1[1]=T11;
Y1[2]=T12;
Y1[3]=T13;    }
for (I=1;I<=3;I++){
X[1] =XX1;
X[2] =XX2;
X[3] =XX3;
Y2[1]=T21;
Y2[2]=T22;
Y2[3]=T23;    }

/*....Initialize A1,B1,A2,B2
*/
for (IR=1;IR<=10;IR++){
B1[IR]=0.;
B2[IR]=0.; }
for (IR=1;IR<=10;IR++){
for (IC=1;IC<=10;IC++){
A1[IR][IC]=0.;
A2[IR][IC]=0.;}
}

M=2;

N=3;
/*....VECTOR ON RHS OF SYSTEM
EQUATIONS;    */
for (IR=1;IR<=M+1;IR++) {
for (IC=1;IC<=M+1;IC++)
{
K=IR+IC-2;
for (I=1;I<=N;I++) {
A1[IR][IC]=A1[IR][IC]+pow(X[I],
K);
A2[IR][IC]=A2[IR][IC]+pow(X[I],
K);}
}
for (I=1;I<=N;I++) {
B1[IR]=B1[IR]+Y1[I]*pow(X[I],IR
-1);
B2[IR]=B2[IR]+Y2[I]*pow(X[I],IR
-1);}
}
/*....CALL SUBROUTINE
FORSOLVING SYSTEM EQS: */
MP1=M+1;
GAUSS(MP1,A1,B1,X1);
GAUSS(MP1,A2,B2,X2);

TEMP1=(X1[3]*z*z)+(X1[2]*z)+(X1
[1]);
TEMP2=(X2[3]*z*z)+(X2[2]*z)+(X2
[1]);

if (t<=0.) TS=TEMP1;
else {
TS=TEMP1+((t-
TI[N1]))/(TI[N1+1]-
TI[N1]))*(TEMP2-TEMP1);}

for (I=1;I<=203;I++)
if (TI[I]<=t){
N1=I;
TS3=T135[N1]+((t-
TI[N1]))/(TI[N1+1]-
TI[N1]))*(T135[N1+1]-T135[N1]);
}
fclose(fp);
return;
}

void GAUSS (int MP1, float
A[11][11],float B[11],float
XX[11])
{
int IC,IE,IP;
float RATIO,SUM;
for(IP=1; IP<=MP1-1; IP++) {
for(IE=IP+1;IE <=MP1;
IE++) {

```

```

        RATIO
=A[IE][IP]/A[IP][IP];
        for(IC=IP+1;IC <=MP1;
IC++) {
            A[IE][IC]=A[IE][IC]-
RATIO*A[IP][IC];}
            B[IE]=B[IE]-RATIO*B[IP];
        }
        for (IE=IP+1;IE<=MP1;
IE++)
            A[IE][IC] =0.;    }

        SUM=0.;
        for(IC=IE+1; IC <=MP1
;IC++){
            SUM=
SUM+A[IE][IC]*XX[IC]; }
            XX[IE]=(B[IE]-
SUM)/A[IE][IE];
        }
        return;
    }

XX[MP1]=B[MP1]/A[MP1][MP1];

    for (IE=MP1-1; IE>=1; IE-
-) {

```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับติดต่อระหว่างระบบเก็บบันทึกข้อมูลและคอมพิวเตอร์

โปรแกรมนี้พัฒนาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาของรศ.ดร.สัตย์ชัย นิลสุวรรณโฆษิต [10] โดยทำการพัฒนาเพิ่มเติมจากตัวโปรแกรมเดิม สอง ส่วน ดังนี้

1. การเริ่มต้นรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลจากสัญญาณกระตุ้นโดยชุดอินฟราเรด โดยเซนเซอร์อินฟราเรดที่ติดตั้งไว้ที่ตัวถัง เมื่อลูกเหล็กเคลื่อนที่ผ่านจะส่งสัญญาณให้ชุดควบคุมอินฟราเรดจ่ายสัญญาณแรงดันขนาด 5 โวลต์ ไปยัง A/D Card และโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกสั่งให้เริ่มการทำงานเริ่มต้นเก็บข้อมูลเมื่อ เมื่อ A/D ได้รับสัญญาณดังกล่าว
2. การเพิ่มช่องทางการรับสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็น 2 ช่องทาง เนื่องจากโปรแกรมเดิมมีการเขียนการรับสัญญาณไว้เพียง 1 ช่องทาง สำหรับวัดอุณหภูมิภายในลูกเหล็ก แต่ในการศึกษาครั้งนี้มีการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ผิวของลูกเหล็กเพิ่มขึ้นอีก 1 ตำแหน่ง ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มเติมในตัวโปรแกรมในส่วนที่รับสัญญาณจาก ชุดควบคุมและบันทึกค่าอุณหภูมิ และ A/D Card โดยการอ่านและบันทึกของคอมพิวเตอร์จะกระทำสลับกันทีละหนึ่งช่องสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆประมาณ 50 μ s

รายละเอียดตัวโปรแกรมดังแสดงต่อไปนี้

```
/*this program is developed to record the digital data from Analog to Digital Converter at the port address H270 */
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <memory.h>
#include <malloc.h>
#include <pc.h>
#include <time.h>
#include <conio.h>

void main()
{
short channel; /* each analog input is called channel */
short port; /* port for the Analog to Digital card */
int NumberOfSamplings;

unsigned short *cvp1,*cvx; /* time stamp for pressure transducer p1*/
unsigned short *cvp2; /* time stamp for pressure transducer p2*/
long time_add1,time_add2;
unsigned short read_timer0_mode3();
/* counter timer from Kris Heidenstrom (kheidens@actrix.gen.nz) */

short a;
/*variable for receiving the value from inportb function */
short i; /* counting index for the loop back of the card spec. */
```

```

long j,k; /* counting index
for the samplings */

short lb, hb; /* low byte
and high byte data */

short *datap1,*datax;
/*data after adjusted by card
formula for pressure transducer
1*/

short *datap2;
/*data after adjusted by card
formula for pressure transducer
2*/

short *trigger,*triggerx;
/*data after adjusted by card
formula for triggering signal
*/

FILE *fp,*fp1; /* for writing
all complete data in a file */

char yymmddhh[10],fn[100],fnx[100];

void
test_short_allocation(short *);
/* function declaration */
void
test_unsigned_allocation(unsigned
short *);/* function
declaration */
void test_file_opening(FILE *);
long mem_available;

clrscr();

printf("Enter YYMMDDHH > ");
scanf("%s",yymmddhh);
printf("\n%s",yymmddhh);

i = 0;
k = 0;

while (yymmddhh[i] != '\0' &&
yymmddhh[i] != '.')
{
    fn[i] = yymmddhh[i];
    fnx[i] = yymmddhh[i];
    i++;
    printf("\n%d", i);
}
fn[i] = '.';
fn[i+1] = 'r';

fn[i+2] = 'o';
fn[i+3] = 'w';

fnx[i] = '.';
fnx[i+1] = 'd';
fnx[i+2] = 'a';
fnx[i+3] = 't';

printf("\n**filename** =
**%s**",fn);
printf("\n**filename** =
**%s**",fnx);

printf("\nNumber Of Samplings >
");
scanf("%d",&NumberOfSamplings);

/*memory allocation for pressure
transducer signal #1 and #2*/

trigger = (short
*)malloc(sizeof(short));
test_short_allocation(trigger);

datap1 = (short
*)malloc(NumberOfSamplings*size
of(short));
test_short_allocation(datap1);
datax = (short
*)malloc(sizeof(short));
test_short_allocation(datax);

cvp1 = (unsigned short
*)malloc(NumberOfSamplings*size
of(unsigned short));
test_unsigned_allocation(cvp1);
cvx = (unsigned short
*)malloc(sizeof(unsigned
short));
test_unsigned_allocation(cvx);

k = NumberOfSamplings;
printf("\nAnalog to Digital
Conversion
\nNumber of Samplings =
%12d",k);

port = 0x270;

do
{
    channel = 12;
    lb = 0;
    hb = 0;

```

```

        outportb(0x271, 0);
        outportb(0x270, channel);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x278);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x27c);
        lb = inportb(0x272);
        hb = inportb(0x273);
        *trigger = (hb -
64*(hb/64))*256+lb;

        printf("\n%5u\n", *trigger
);
    }
    while ( *trigger < 1000);

    printf("\nTRIGGER    READY    to
respond\n");

    do
    {
        channel = 12;
        lb = 0;
        hb = 0;
        outportb(0x271, 0);
        outportb(0x270, channel);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x278);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x27c);
        lb = inportb(0x272);
        hb = inportb(0x273);
        *trigger = (hb -
64*(hb/64))*256+lb;
    }
    while ( *trigger > 1000);

    printf(" *trigger
%5u\n", *trigger);

    for ( j = 0; j < 10000; j++ )
    {
        channel = 8;
        lb = 0;
        hb = 0;
        outportb(0x271, 0);
        outportb(0x270, channel);
        /* select channel 8*/
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x278);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x27c);
        lb = inportb(0x272);
        hb = inportb(0x273);
        if (k==0)
            { *(datap1+j) = (hb -
64*(hb/64))*256+lb;
            *(cvp1+j) =
            read_timer0_mode3(); }
            else
            { *datax = (hb -
64*(hb/64))*256+lb;
            *cvx =
            read_timer0_mode3(); }
        channel = 10;
        lb = 0;
        hb = 0;
        outportb(0x271, 0);
    }
}

```



```

        outportb(0x270, channel); /* select channel 10
*/
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x278);
        for ( i = 1; i <= 8; i++ )
            a = inportb(0x27c);
        lb = inportb(0x272);
        hb = inportb(0x273);
        *(datap2+j) = (hb -
64*(hb/64))*256+lb;
        *(cvp2+j) =
read_timer0_mode3(); /*
}
/*writing all data into a file
*/
fp = fopen(fn,"w");
test_file_opening(fp);

for (j=0; j <
NumberOfSamplings; j++)
{
fprintf(fp,"%d %d %d %d\n",
*(datap1+j),*(cvp1+j),
*(datap2+j),*(cvp2+j));
}
for (j=0; j<NumberOfSamplings;
j++)
    fprintf(fp,"%d
%d\n",*(datap1+j), *(cvp1+j));

fclose(fp);

fp = fopen(fnx,"w");
test_file_opening(fp);

time_add1=0;
time_add2=*(cvp2+0)-*(cvp1+0);

fprintf(fp,"%d %ld %d
%ld\n",*(datap1+0),time_add1,*(da
tap2+0),time_add2);
/*
    fprintf(fp,"%d
%ld\n",*(datap1+0),time_add1);/*

for (j = 1; j <
NumberOfSamplings; j++)
{
    if ( *(cvp1+j) >=
*(cvp1+j-1)
        {
            time_add1 =
time_add1+*(cvp1+j)-(*(cvp1+j-
1));
            if ( *(cvp2+j) >=
*(cvp2+j-1)
                time_add2 =
time_add2 +
time_add2+*(cvp2+j) - (*(cvp2+j-
1));
            else
                time_add2 = time_add2+65536-
*(cvp2+j-1)+*(cvp2+j); /*
        }
        else
            {
                time_add1 =
time_add1 + 65536 -( *( cvp1 + j-
1))+*(cvp1+j);
                if ( *(cvp2+j) >=
*(cvp2+j-1)
                    time_add2 =
time_add2 +
time_add2+*(cvp2+j) -(*(cvp2+j-
1));
                else
                    time_add2 = time_add2+65536-
*(cvp2+j-1)+*(cvp2+j); /*
            }
            fprintf(fp,"%d %ld %d
%ld\n",
*(datap1+j),time_add1,
*(datap2+j),time_add2); /*
            fprintf(fp,"%d %ld\n",
*(datap1+j),time_add1);
        }
    }
    fclose(fp);
/* finish the file writing */

free(datap1);
free(datax);
free(cvp1);
free(cvx);
/*free(datap2);
free(cvp2);*/
free(trigger);
}

```

```

/*
Function to read the count
register (down-counter) of
timer channel zero,
assuming that the timer is in
mode three, with a divisor of
65536.

Returns the count in up-counter
format. Requires an 8254 timer
chip.

Part of the PC timing FAQ /
Application notes
By K. Heidenstrom
(kheidens@actrix.gen.nz)
*/

unsigned short
read_timer0_mode3(void) {
    unsigned char st1, st2;
    /* Status read-back
values */
    unsigned short cv;
    /* Count value */
    disable();
    /* No ints please - can use asm
cli */
    outportb(0x43, 0xE2);
    /* Latch and read back status
byte */
    st1 = inportb(0x40);
    /* Read status byte */
    outportb(0x43, 0x00);
    /* Latch count for timer 0*/
    cv = inportb(0x40);
    /* Lobyte of count */
    cv += inportb(0x40) <<
8; /* Hobyte of count */
    cv = ((unsigned short)
(0-cv)) >> 1; /* Convert to up-
count, 0-32767*/
    outportb(0x43, 0xE2);
    /* Latch and read back status
byte */
    st2 = inportb(0x40);
    /* Read status byte */
    enable();
    /* Ints back on - can use asm
sti */
    if ((st1 ^ st2) & 0x80) /*
If output pin changed state...
*/
        if (cv < 0x4000) /*
If reload just occurred... */
            st1 = st1 ^ 0x80;
    /* Use newer output pin status
*/
    if ((st1 & 0x80) == 0) /* If
on second countdown... */
        cv = cv | 0x8000;
    /* Set b15*/
    return cv;
    /* Return as up-counter */
}

void
test_short_allocation(short *a)
{
    if (a == NULL)
    {
        printf("\nSorry!
not enough memory.\n");
        getch();
        exit(1);
    }
}

void
test_unsigned_allocation(unsigned
short *a)
{
    if (a == NULL)
    {
        printf("\nSorry!
unsigned int not enough
memory.\n");
        getch();
        exit(1);
    }
}

void
test_file_opening(FILE
*fp)
{
    if (fp == NULL)
    {
        printf("\nError!
can't open the file.\n");
        getch();
        exit(1);
    }
}

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมบูรณ์ รัศมี เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2519 ที่ จังหวัดนนทบุรี จบการศึกษา
ระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2540 และเข้าศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
นิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย