

ปัจจัยที่ส่งผลถึงการประมาณค่าการนำความร้อนในยางคอมพาวด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORS AFFECTING THE ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY IN RUBBER  
COMPOUND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่ส่งผลถึงการประมาณค่าการนำความร้อนในยางคอมพาวด์
โดย	นายสุทธิพัฒน์ กมลสุทธิไพจิตร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.รติ บวรรัตนารักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.รติ บวรรัตนารักษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศรังสรรค์)	

สุทธิพัฒน์ กมลสุทธิไพจิตร : ปัจจัยที่ส่งผลถึงการประมาณค่าการนำความร้อนในยางคอมพาวด์. (FACTORS AFFECTING THE ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY IN RUBBER COMPOUND) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ชิตี บวรรัตนารักษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ

การวัดค่าไนซ์เซชันยางในอุตสาหกรรมต้องอาศัยอุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปขึ้นงานซึ่งระยะเวลาในการคงรูปขึ้นงานจะขึ้นกับค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวด์ที่แต่ละสูตร โดยงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหลักการและกระบวนการทดสอบค่าการนำความร้อน การประมาณค่าการนำความร้อนในยางคอมพาวด์และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนในกระบวนการคงรูป โดยขั้นแรกได้ศึกษาการประมาณค่าการนำความร้อน พบว่า การประมาณค่าการนำความร้อนของแบบจำลองขนานเทียบกับค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดสอบ HFM จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่เกิน 5 % สำหรับยางคอมพาวด์ที่วัดค่าไนซ์เซชันอย่างสมบูรณ์ ขั้นที่สองเป็นศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อน พบว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมมีผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนที่จะเปลี่ยนแปลงไปรวมถึงปริมาณน้ำมันที่ส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนอย่างมาก ส่วนยางที่วัดค่าไนซ์เซชันอย่างสมบูรณ์จะให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่ายางคอมพาวด์และยางที่วัดค่าไนซ์เซชันร้อยละ 50 จะมีฟองอากาศภายในยางส่งผลให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่ายางคอมพาวด์ ส่วนยางที่เกิด และขึ้นที่สามออกแบบชุดทดสอบสำหรับหาค่าการนำความร้อน พบว่า ชุดต้นแบบใช้วิธีการหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่ซึ่งต้องควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและป้องกันสูญเสียความร้อนของชุดต้นแบบ ดังนั้นชุดต้นแบบจะมีส่วนประกอบหลักเป็นฮีตเตอร์สำหรับเป็นแหล่งความร้อน โดยจะใช้น้ำหล่อเย็นสำหรับการควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วยฉนวนกันความร้อนสำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยจะใช้การไหลของความร้อนในหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นตัวกำหนดค่าการนำความร้อน

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิติคดี .....
ปีการศึกษา	2564	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6370212223 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: thermal conductivity, steady state, parallel model, filler, vulcanization, heat flux

Sutthipat Kamonsutthipajit : FACTORS AFFECTING THE ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY IN RUBBER COMPOUND. Advisor: Assoc. Prof. THITI BOVORNARATANARAKS, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Pongsak Nimdum, Ph.D.

Industrial rubber vulcanization requires temperature and workpiece curing time, and workpiece curing time depends on the thermal conductivity of each formulation of rubber compounds. This research aims to study the principles and processes of thermal conductivity testing. Thermal conductivity estimation in rubber compounds and factors affecting thermal conductivity in the curing process. The first step was to study the thermal conductivity estimation. It was found that the estimation of the thermal conductivity of the parallel model compared with the thermal conductivity obtained from the HFM test had a deviation of not more than 5% for fully vulcanized rubber compounds. The second step was to study the factors affecting the thermal conductivity. It was found that the volumetric proportion of the filler had an effect on the thermal conductivity that would change as well as the amount of oil that had an impact on the thermal conductivity. The fully vulcanized rubber has a higher thermal conductivity than the compound rubber and 50% vulcanized rubber will have air bubbles inside the rubber. Thermal conductivity is lower than compound rubber. The third step is to design a prototype for determining the thermal conductivity. It was found that the prototype used a constant-state thermal conductivity method to control the heat uniformity and prevent heat loss. Therefore, the prototype is mainly composed of a heater as a heat source, it uses a coolant for temperature control, along with an insulator to prevent heat loss. It uses the heat flow per unit area to determine the thermal conductivity.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตี บวรรัตนารักษ์อาจารย์ที่ปรึกษาและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้ความรู้ แลกเปลี่ยนประสบการณ์และให้คำปรึกษาด้านต่างๆ สำหรับการทําวิจัย ตลอดจนคำแนะนำการใช้ชีวิตนอกมหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการ พัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.), สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) และ บริษัท เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา วัชรภาสกร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องการทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะคงที่

ขอขอบคุณ คุณชิตินุสั วนิชเพิ่มทรัพย์ ในความช่วยเหลือการเขียนแบบของชุดต้นแบบและให้คำแนะนำเรื่องการออกแบบแม่พิมพ์



สุทธิพัฒน์ กมลสุทธิไพจิตร

## สารบัญ

	หน้า
.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่1.....	1
บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ .....	1
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 .....	3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ยางคอมปาวด์ .....	3
2.1.1 ยาง(Rubber) .....	3
2.1.2 สารตัวเติม(Filler).....	5
2.1.2.1 คาร์บอนแบล็ก(Carbon black).....	5
2.1.2.2 ซิลิกา(Silica).....	5

2.1.2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium carbonate).....	6
2.1.3 สารตัวเร่งปฏิกิริยา.....	6
2.1.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา.....	6
2.1.5 สารช่วยในกระบวนการผลิต .....	6
2.1.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ .....	6
2.1.7 สารช่วยคงรูป .....	6
2.2 กระบวนการผลิตยางคอมปาวด์ .....	7
2.3 กระบวนการผลิตชิ้นงานยาง .....	8
2.4 การถ่ายเทความร้อน .....	9
2.5 ทฤษฎีการนำความร้อนของของผสม.....	10
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
บทที่ 3 .....	17
วิธีการดำเนินงาน .....	17
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	17
3.2 การประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ .....	20
3.3 การทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน.....	22
3.3.1 ปริมาณ Filler(Carbon black, Silica, CaCO <sub>3</sub> ) ที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	22
3.3.2 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	23
3.3.3 ผลกระทบของระบบวัลคาไนเซชันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	24
3.3.4 ปริมาณของ ZnO และ Oil ต่อค่าการนำความร้อน.....	24
3.4 ระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อน .....	25
3.5 การออกแบบชุดค้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน .....	26
บทที่ 4 .....	27



ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	27
4.1 ผลการประมาณค่าการนำความร้อน .....	27
4.2 ผลการทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	28
4.2.1 ผลของปริมาณ Filler(Carbon black, Silica, CaCO <sub>3</sub> ) ที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	28
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	31
4.2.3 ผลของระบบวัลคาไนเซชันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	31
4.2.4 ผลของปริมาณของซิงค์ออกไซด์และน้ำมันต่อค่าการนำความร้อน .....	32
4.3 ผลของระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อน .....	33
4.5 ผลการออกแบบชุดค้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน .....	39
บทที่ 5 .....	44
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	44
5.1 การประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ .....	44
5.2 การทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	44
5.3 ระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน .....	44
5.4 การออกแบบชุดค้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน .....	44
5.5 ข้อเสนอแนะ .....	45
บรรณานุกรม .....	46
ประวัติผู้เขียน .....	49

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงยางเอทิลีนไดอินที่เติมน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินิก(วินส์รินท์ อินทร์ด ยะ, 2551).....	15
ตารางที่ 2 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ A และ B .....	17
ตารางที่ 3 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CB.....	17
ตารางที่ 4 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ SC.....	18
ตารางที่ 5 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CA.....	18
ตารางที่ 6 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ ZnO4 และ Oil40.....	19
ตารางที่ 7 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CV, EV, SEMI และ Peroxide .....	20
ตารางที่ 8 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CBN330, CBN550 และ CBN660.....	20
ตารางที่ 9 แสดงการคำนวณค่าการนำความร้อนของสูตร A.....	27
ตารางที่ 10 แสดงการคำนวณค่าการนำความร้อนของสูตร B.....	28
ตารางที่ 11 แสดงค่าการนำความร้อนของยางและสารเคมี .....	28
ตารางที่ 12 แสดงค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ B ที่วัลคาไรไนซ์ชั้นสมบูรณ์แบบขัดผิวและไม่ ขัดผิว.....	39
ตารางที่ 13 แสดงส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ของชุดต้นแบบ.....	42
ตารางที่ 14 ความแตกต่างของคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด.....	43

## สารบัญภาพ

### หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ(สุดาเกียรติกำจรวงศ์, 2560) .....	3
ภาพที่ 2 โครงสร้างของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน.....	4
ภาพที่ 3 โครงสร้างของยางสไตรีนบิวทาได .....	4
ภาพที่ 4 แสดงขนาดกับฟังก์ชันการใช้งานของซิลิกาจากธรรมชาติและการสังเคราะห์ .....	5
ภาพที่ 5 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง.....	7
ภาพที่ 6 เครื่องผสมระบบปิดแบนบูรี .....	8
ภาพที่ 7 เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นงานยาง .....	9
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับ % สัดส่วนโดยปริมาตรของ CB โดยที่ N539 N134 N234 และ N330 ปั่นเกรดของ CB (Song et al., 2019).....	13
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับปริมาณ ZnO ชนิด sZnO และ cZnO (Suntako, 2017).....	14
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ (Kerschbaumer et al., 2019).....	16
ภาพที่ 11 เครื่อง Heat flow meter รุ่น HFM300.....	21
ภาพที่ 12 แสดงตัวเครื่อง THB1 และลักษณะการวางชิ้นงาน .....	23
ภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งการวางยางในเครื่อง HFM300 โดย A คือตัวอย่างชิ้นงานยาง .....	26
ภาพที่ 14 แสดงค่าการนำความร้อนของคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน.....	29
ภาพที่ 15 แสดงค่าการนำความร้อนของซิลิกาที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน .....	30
ภาพที่ 16 แสดงค่าการนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน .....	30
ภาพที่ 17 แสดงค่าการนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน .....	31
ภาพที่ 18 แสดงผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของของระบบวัลคาไนเซชันที่แตกต่างกัน .....	32

ภาพที่ 19 แสดงค่าผลกระทบของปริมาณของ ZnO และ Oil ที่ลดต่อค่าการนำความร้อน .....33

ภาพที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....34

ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 50% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....35

ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 100% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....36

ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....37

ภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 50% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....38

ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 100% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300 .....38

ภาพที่ 26 แสดงส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ของชุดต้นแบบ .....41

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมรับจ้างผลิตยางผลิตชิ้นส่วนหรือ Original Equipment Manufacturer (OEM) จะต้องใช้ผลิตชิ้นงานหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่แตกต่างกัน โดยการผลิตชิ้นงานในแต่ละรูปแบบจะต้องใช้สูตรยางที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติต่างๆตามที่ลูกค้าต้องการ นั่นจึงทำให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นมีต้นทุนที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนสำหรับชิ้นงานทุกรูปแบบนี้ก็คือระยะเวลาการคงรูปของยางเพราะคอมพิวเตอร์ก่อนจะเป็นผลิตภัณฑ์ยางได้ต้องผ่านขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานหรือการวัลคาไรซ์เซชันเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและให้ชิ้นงานนั้นคงรูป โดยระยะเวลาการคงรูปของยางจะถูกกำหนดโดยการทดสอบด้วยเทคนิคการคงรูปของยางด้วยเครื่องทดสอบ Oscillating Disc Rheometer (ODR) ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการขึ้นรูปยางคอมพิวเตอร์ได้แต่จากคุณสมบัติเฉพาะยางที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งมีความเป็นฉนวนสูง ส่งผลให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนาจะเกิดการสะสมของความร้อน ณ จุดกึ่งกลาง แสดงว่าระยะเวลาการคงรูปของยางมากเกินไปจนทำให้เกิดการสะสมของความร้อนส่งผลให้เกิดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตและต้นทุนที่เพิ่มขึ้นโดยการทำนายระยะเวลาของคงรูปของยางต้องอาศัยค่าการนำความร้อนของยางคอมพิวเตอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการประมาณค่าการนำความร้อนในยางคอมพิวเตอร์
2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนในกระบวนการคงรูป
3. ศึกษาหลักการและกระบวนการเพื่อทำนายระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป

**ขอบเขตของงานวิจัย**

1. ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะการนำความร้อน
2. ศึกษารูปแบบการหาค่านำการความร้อน
3. ศึกษาแบบจำลองการหาค่าการนำความร้อน
4. ศึกษาผลกระทบของสารตัวเติม 3 ชนิดได้แก่ คาร์บอนแบล็ค ซิลิกา แคลเซียมคาบอเนต

**ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ได้ทราบถึงวิธีการหาค่าการนำความร้อน
2. ได้ทราบถึงผลกระทบของสารตัวเติมต่อค่าการนำความร้อน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

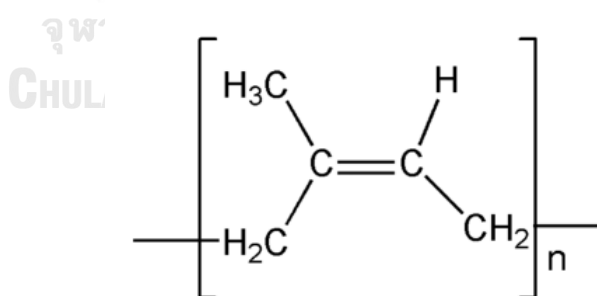
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางคอมปาวด์(Rubber Compound) กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานยาง(Rubber processing) ทฤษฎีการนำความร้อน(heat conduction) และทฤษฎีการนำความร้อนของของผสม

#### 2.1 ยางคอมปาวด์

ยางคอมปาวด์หมายถึงยางที่ผสมกับสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ให้ได้ตามความต้องการ โดยยางและสารเคมีจะแบ่งออกเป็น 7 กลุ่มหลัก ได้แก่ ยาง, สารตัวเติม, สารตัวเร่ง, สารกระตุ้น, สารช่วยในกระบวนการผลิต, สารป้องกันการเสื่อมสภาพ และสารช่วยคงรูป

##### 2.1.1 ยาง(Rubber)

ยางสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ 2 กลุ่ม คือ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งยางธรรมชาติ(Natural rubber) โดยส่วนใหญ่มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea brasiliensis* ซึ่งนำยางจากต้นยางจะกระบวนการแปรสภาพเป็นน้ำยางข้นที่ใช้ผลิตถุงมือยางและยางแท่งที่ใช้ขึ้นรูปในอุตสาหกรรม ซึ่งมีโครงสร้างของยางธรรมชาติจะแสดงดังภาพที่ 1 โดยยางธรรมชาติจะมีคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง มีความสามารถในการยืดที่สูงและต้านทานต่อการฉีกขาดเป็นต้น

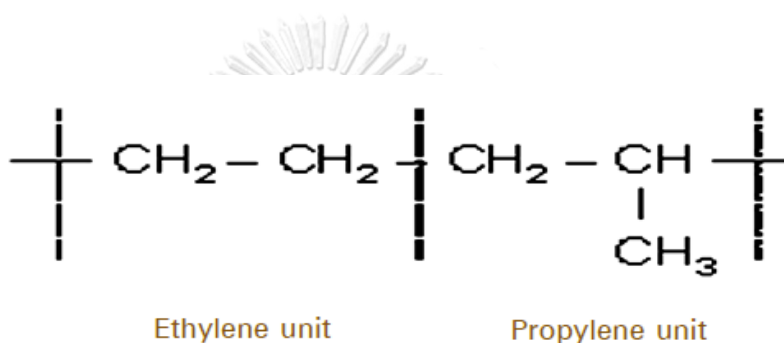


ภาพที่ 1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ(สุดาเกียรติกำจรวงศ์, 2560)

ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) เป็นการปรับปรุงบางอย่างที่ดีกว่ายางธรรมชาติ เช่น ความทนทานต่อการขีดถูและการสึกกร่อนและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่สูงกว่า

ยางธรรมชาติเป็นต้น ซึ่งยางสังเคราะห์ที่ใช้งานในงานวิจัยนี้ได้แก่ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและยางสไตรีนบิวทาได (styrene-butadiene rubber, SBR)

ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene-Diene) เป็นยางที่สังเคราะห์มาจากมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) และโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งมีคุณสมบัติทนทานต่อความร้อน โอโซน สารเคมี รวมถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากคุณสมบัติของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่กล่าวไปข้างต้นทำให้นิยมใช้ในอุตสาหกรรม โดยยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนสามารถใช้ทำปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนแสดงดังภาพที่ 2 (วินัสรินทร์ อินทร์ตยะ, 2551)

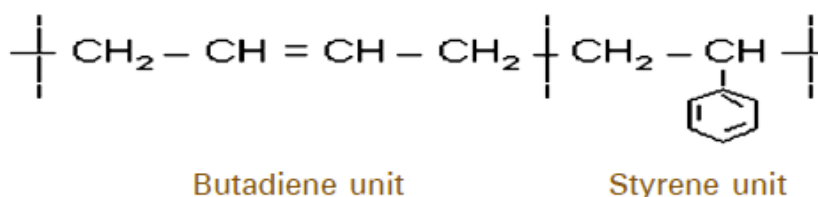


ภาพที่ 2 โครงสร้างของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน

ที่มา : <https://www.mdr-thai.com/wp-content/uploads/2018/11/8.png>

ยางสไตรีนบิวทาได (styrene-butadiene rubber, SBR) เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ระหว่างสไตรีนกับบิวทาไดอีน ซึ่งยางสไตรีนบิวทาไดมีปริมาณของสไตรีนสูงจะส่งผลให้ความยืดหยุ่นนั้นจะต่ำลงเนื่องจากสไตรีนที่มีโครงสร้างของมีวงอะโรมาติก ซึ่งเป็นยางที่ยางทนต่อการเสียดสีได้ดีจึงนิยมนำมาทำพื้นรองเท้าหรือยางรถยนต์ ซึ่งโครงสร้างของยางสไตรีนบิวทาไดแสดงดังภาพที่

3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของยางสไตรีนบิวทาได



ที่มา : <https://www.mdr-thai.com/wp-content/uploads/2018/11/3.png>

### 2.1.2 สารตัวเติม(Filler)

สารตัวเติมมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของยางคอมปาวด์และการลดต้นทุนการผลิตยางคอมปาวด์ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ตัว ดังนี้

#### 2.1.2.1 คาร์บอนแบล็ก(Carbon black)

คาร์บอนแบล็ก(Carbon black) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติเพิ่มความต้านทานต่อการเสียดสี ความต้านทานต่อแรงดึง และโมดูลัสของยางคอมปาวด์ ซึ่งเกรดของคาร์บอนแบล็กมีหลากหลายเกรด ตัวอย่างเช่น N330 จะจำแนกตามขนาดของอนุภาคของคาร์บอนแบล็กโดยตัวเลขหลัง โดยคาร์บอนแบล็กนิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย อาทิ ยางรถยนต์เนื่องจากทนต่อการเสียดสีได้ดี

#### 2.1.2.2 ซิลิกา(Silica)

ซิลิกามีสารประกอบของธาตุซิลิกอนและออกซิเจนซึ่งมีชื่อทางเคมีจะเรียกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ โดยซิลิกาสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ 2 แหล่ง ได้แก่ ซิลิกาจากธรรมชาติและซิลิกาจากการสังเคราะห์ ซึ่งซิลิกาแต่ละแบบเหมาะกับการฟังก์ชันในทางที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ - (Hewitt, 2007) โดยซิลิกามีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีจึงมักใช้เป็นสารเสริมแรง ซึ่งโครงสร้างของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลหมู่ -OH หรือหมู่ซิลานอลส่งผลให้ซิลิกาไม่มีความสามารถความเข้ากันกับยางที่ไม่มีขั้วเนื่องจากหมู่ดังกล่าวมีความเป็นขั้วสูง

	Primary Size, $\mu\text{m}$	Function in Rubber
<b>Natural (crystalline):</b>		
Ground quartz	1-10	Extending
Diatomite	1-5	Processing; Extending
Neuberg silica	1-5	Extending
<b>Synthetic (amorphous):</b>		
Fumed	0.005-0.02	Reinforcing
Precipitated	0.01-0.03	Reinforcing
Precipitated	0.04	Semi-reinforcing
Precipitated	0.08	Processing; Color
Ferro-silicon by-product	0.10	Extending

ภาพที่ 4 แสดงขนาดกัฟฟังก์ชันการใช้งานของซิลิกาจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์

### 2.1.2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium carbonate) เป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สารเสริมแรงให้กับยางคอมพาวด์แต่ในเชิงอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อและใช้ในการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เยอะจำเป็นต้องใส่สารช่วยในกระบวนการผลิตในปริมาณมากเพื่อให้สามารถผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตได้

### 2.1.3 สารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปหรือการวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้นซึ่งสามารถลดระยะเวลาการคงรูปสั้นลง และส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ตัวอย่างของสารตัวเร่งเช่น เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (2- mercaptobenzothiazole; MBT) จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง, ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2- benzothiazole sulfonamide; CBS ) จะทำให้ยางมีสมบัติมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง และเททระเมทิลไทยูรามไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide; TMTD) มีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมาก เป็นต้น

### 2.1.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยาจะช่วยให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีขึ้น ซึ่งจะนิยมใช้ในระบบวัลคาไนซ์เซชันแบบกัมมะถัน ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก

### 2.1.5 สารช่วยในกระบวนการผลิต

สารช่วยในกระบวนการผลิตจะช่วยในการผสมระหว่างยางกับสารตัวเติมและอื่นๆ ให้ผสมกันได้ง่ายขึ้นและช่วยลดพลังงานในการผสมและระยะเวลาในการผสม ซึ่งสารช่วยในกระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันซึ่งจะทำให้ยางนิ่มลงในกระบวนการผสม

### 2.1.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

สารป้องกันการเสื่อมสภาพจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนสีของยาง ป้องกันการเสื่อมเสื่อมเนื่องจากแสงแดด และยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานยาง

### 2.1.7 สารช่วยคงรูป

สารช่วยในคงรูปหลักๆ มี 2 ระบบ ได้แก่ ระบบกัมมะถันกับระบบเพอร์ออกไซด์ ซึ่งกัมมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กับยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลซึ่งการวัลคาไนซ์เซชันจะเกิดอย่างรวดเร็วและ

มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำนอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่วัลคาไนซ์เซชันแบบเพอร์ออกไซด์ ส่วนเพอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับที่มีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธคู่โดยการวัลคาไนซ์ระบบนี้จะนิยมใช้ใน ชิ้นงานที่ต้องการทนต่อความร้อนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าระบบกำมะถัน

## 2.2 กระบวนการผลิตยางคอมปาวด์

การผลิตยางคอมปาวด์จะนำยางและสารเคมีมาผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งหรือ Two roll mill ซึ่งเป็นการผสมแบบเปิดจะมีข้อดีคือจะเห็นส่วนผสมของสารต่างๆ ระหว่างกระบวนการผสมจึงสามารถประเมินความเข้ากันของยางคอมปาวด์ได้เบื้องต้นและสามารถทำความสะอาด เครื่องจักรได้ง่ายกว่าการผสมแบบปิดที่จะใส่ยางและสารเคมีไว้ในห้องผสมซึ่งจะไม่สามารถเห็นความ เข้ากันของยางยางและสารเคมีได้เบื้องต้นซึ่งเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งแสดงดังภาพที่ 5 และเครื่องผสม ระบบปิดแบบนบุรีแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

ที่มา : <http://rubber.oie.go.th/box/Images/01.jpg>



ภาพที่ 6 เครื่องผสมระบบปิดแบบบุรี

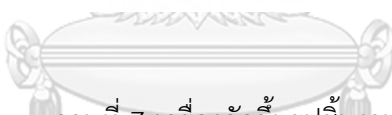
ที่มา : [http://rubber.oie.go.th/box/Article/3403/05\\_3403.jpg](http://rubber.oie.go.th/box/Article/3403/05_3403.jpg)

### 2.3 กระบวนการผลิตชิ้นงานยาง

ในกระบวนการผลิตชิ้นงานยางมีหลากหลายรูปแบบซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดเป็นกระบวนการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตชิ้นงานยางที่ไม่มีความซับซ้อน โดยการขึ้นรูปจะเริ่มจากการเตรียมแม่พิมพ์ยึดกับเพลตของเครื่องอัด หลังจากนั้นให้กำหนดอุณหภูมิและเวลาขึ้นรูปจากการทดสอบ ODR หลังจากนั้นจะเตรียมคอมปาวด์ให้มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสมกับเข้าแม่พิมพ์โดยจะคำนวณปริมาตรของหลุมชิ้นงานในเข้าแม่พิมพ์หลังจากนั้น

จึงนำค่าปริมาตรของหลุมขึ้นงานไปคำนวณหาหน้าพื้นที่ยางคอมปาวด์จากความหนาแน่นของยางคอมปาวด์ เมื่อได้ยางคอมปาวด์ที่ผ่านการเตรียมแล้วจะนำไปวางลงในแม่พิมพ์และทำการประกบแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป



ภาพที่ 7 เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงานยาง

ที่มา : [https://thairubbtech.com/wp-](https://thairubbtech.com/wp-content/uploads/apollo13_images/1311571302652_.pic_hd-TRT-72fbbxcehjqa001ajr8swvlq1zvpqh25u.jpg)

[content/uploads/apollo13\\_images/1311571302652\\_.pic\\_hd-TRT-72fbbxcehjqa001ajr8swvlq1zvpqh25u.jpg](https://thairubbtech.com/wp-content/uploads/apollo13_images/1311571302652_.pic_hd-TRT-72fbbxcehjqa001ajr8swvlq1zvpqh25u.jpg)

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนของของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะเริ่มต้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและจะหยุดการถ่ายความร้อนเมื่ออุณหภูมิของวัสดุทั้งนั้นเท่ากัน โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งตามการเคลื่อนที่ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการนำความร้อนเป็นหลัก

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนของวัตถุที่อยู่ติดกันโดยผ่านตัวกลางที่ไม่มี การเคลื่อนที่ เช่น เหล็กที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ติดกับแผ่นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส โดยวัสดุทั้งสองถูกรอบล้อมไปด้วยผนังความชื้นและเป็นการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนก่อนหน้าจะพบว่าอุณหภูมิของเหล็กจะลดลงจนอุณหภูมิเข้าสู่จุด สมดุลระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม โดยความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนขึ้นกับค่าการนำความ ร้อนของวัสดุต่างๆ ซึ่งค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากกฎของฟูเรียร์ตามสมการที่ 1

$$Q = \frac{kA\Delta T}{\Delta e} \text{ (สมการที่ 1)}$$

ซึ่ง Heat Flux เป็นไปตามสมการที่ 2

$$q = \frac{Q}{A} \text{ (สมการที่ 2)}$$

แทนสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 1 จะได้

$$k = \frac{qe}{\Delta T} \text{ (สมการที่ 3)}$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ(W/mK)

$q$  คือ ค่าการไหลของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่(W/m<sup>2</sup>)

$e$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ(m)

$\Delta T$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ(°K)

$A$  คือ พื้นที่ที่ได้รับความร้อน (m<sup>2</sup>)

$Q$  คือ ความร้อนในหน่วยของวัตต์(W)

## 2.5 ทฤษฎีการนำความร้อนของของผสม

การนำความร้อนในของของผสมขึ้นกับคุณสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกและสารตัวเติมที่ใส่เข้าไป ตัวอย่างเช่น ยางคอมปาวด์ประกอบไปด้วยยาง EPDM ,คาร์บอนแบล็ก(Carbon Black)และอื่นๆ ซึ่งค่าการนำความร้อนของ EPDM มีค่าอยู่ที่ 0.218 W/mK(Gao et al., 2009) และค่าการนำความ ร้อนของคาร์บอนแบล็ก(Carbon Black) มีค่าอยู่ที่ 0.908 W/mK(Song et al., 2019) ดังนั้นค่าการ นำความร้อนของคอมปาวด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์บอนแบล็ก(Carbon Black)สูงขึ้น เนื่องจาก ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนแบล็ก(Carbon Black) ที่สูงกว่ายาง EPDM จึงส่งผลให้ค่าการนำ

ความร้อนของคอมปาวด์นั้นสูงขึ้นจากเดิมในทางกลับกันถ้าสารตัวเดิมที่ใส่เป็นซิลิกาที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ายาง EPDM จะส่งผลค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์นั้นต่ำลง

การประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมอย่างมาก เนื่องจากค่าดังกล่าวมีประโยชน์ในการใช้วิเคราะห์และประเมินต้นทุนการผลิตทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น รอบในการผลิต ระยะเวลาในคงรูปชิ้นงาน วิเคราะห์ของเสียเนื่องจากความร้อน เป็นต้น โดยการประมาณค่าการนำความร้อนมีหลากหลายวิธี เช่น Series model, Maxwell model, Nielsen model หรือ Agari's model เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่ Parallel model ในอุตสาหกรรมการประเมินที่เร็วจะส่งผลดีในการวิเคราะห์ปัญหาหน้างานที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาการประมาณค่าของ Parallel model

การประมาณค่าการนำความร้อนด้วย Parallel model เป็นการนำค่าการนำความร้อนกับสัดส่วนโดยปริมาตรของยางและสารตัวเดิม ซึ่งงานวิจัยนี้จะเพิ่มค่าการนำความร้อนของน้ำมันในส่วนของการคำนวณเนื่องจากในอุตสาหกรรมใช้ปริมาณน้ำมันในส่วนประกอบของสูตรยางค่อนข้างมาก เพื่อช่วยในการผสมและลดต้นทุนการผลิตจึงจำเป็นต้องใช้ในประมาณค่าการนำความร้อน โดยการประมาณค่าการนำความร้อนมีหลากหลายวิธีซึ่งวิธีที่เลือกเป็นวิธีการแบบขนาน ซึ่งง่ายต่อการคำนวณ และไม่มีควมสับสนของสูตรจึงเหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่จะใช้ประเมินค่าการนำความร้อนได้เบื้องต้นตามสมการที่ 1

$$k(c) = k(1)v(1) + k(2)v(2) \quad (\text{สมการที่ 4})$$

โดย  $k(c)$  คือ ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์

$k(1)$  คือ ค่าการนำความร้อนของส่วนประกอบชนิดที่ 1

$v(1)$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนประกอบชนิดที่ 1

$k(2)$  คือ ค่าการนำความร้อนของส่วนประกอบชนิดที่ 2

$v(2)$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนประกอบชนิดที่ 2

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรรวม  $V_{รวม}$  เท่ากับ 1 จะได้

$$V_{รวม} = V(1) + V(2) = 1 \quad (\text{สมการที่ 5})$$

โดยจัดรูปสมการที่ 5 จะได้

$$V(2) = 1 - V(1) \text{ (สมการที่ 6)}$$

เมื่อแทนสมการที่ 6 ลงในสมการที่ 4 จะได้

$$k(c) = k(1)V(1) - k(2)[1 - V(1)] \text{ (สมการที่ 5)}$$

ซึ่งสัดส่วนโดยปริมาณสามารถคำนวณได้จาก

$$V(1) = \frac{a}{a+b+c+\dots+n} \times 100 \text{ (สมการที่ 6)}$$

โดยที่ a,b,c,...,n คือปริมาตรของส่วนประกอบของคอมปาวด์แต่ละตัวจนถึง n ตัว  
ซึ่งปริมาตรของส่วนประกอบของคอมปาวด์แต่ละตัวหาได้จาก

$$a = \frac{m}{D} \text{ (สมการที่ 7)}$$

โดยที่ D คือความหนาแน่นของส่วนประกอบของคอมปาวด์

m คือน้ำหนักของส่วนประกอบของคอมปาวด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

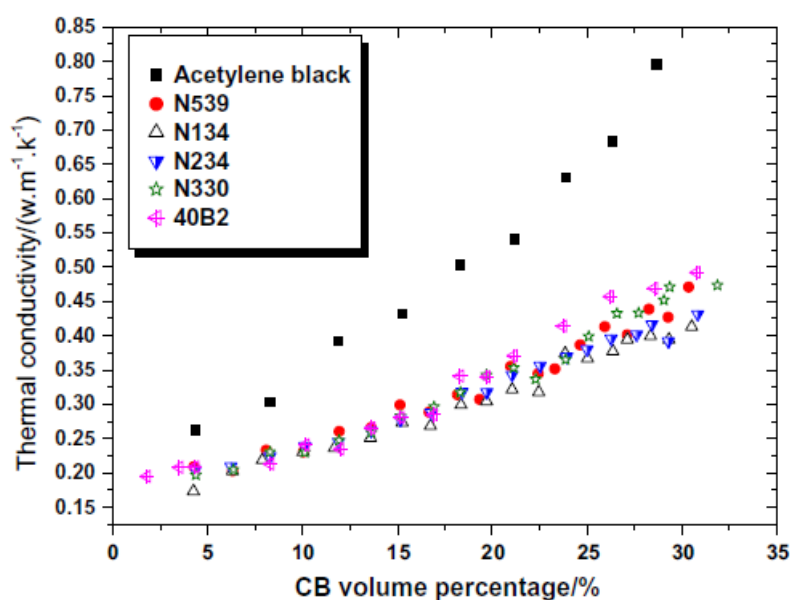
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากงานวิจัย Thermal Conductivity of Rubber Compounds Versus the State of Cure (CHEHEB, 2012) พบว่า แบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบ Compression โดยมีฉนวนกันความร้อนอยู่สองข้างของแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการนำความร้อนซึ่งค่าการนำความร้อนที่ได้จากทดลองกับการทดลองมีความคาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่ช่วง -0.0006 ถึง 0.0006 จากทดลองผลกระทบของอัตราการผลิตไคนเซชันกับการนำความร้อนของคอมปาวด์พบว่า เมื่ออัตราการผลิตไคนเซชันเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย



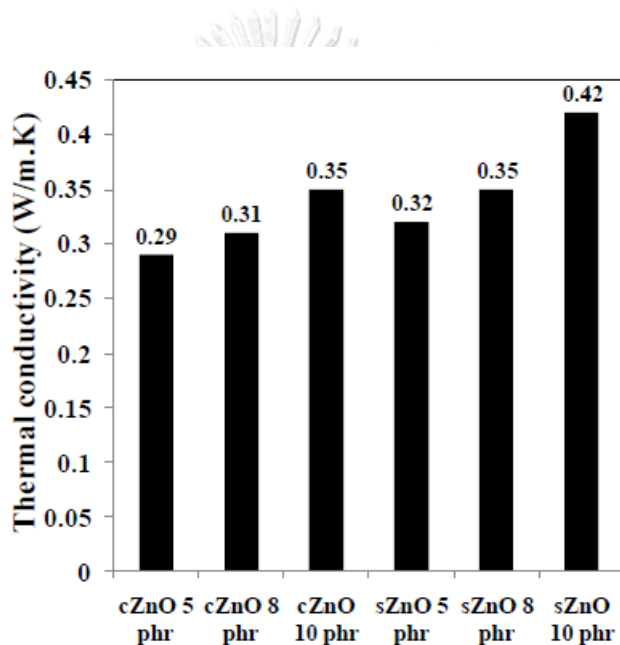
จากงานวิจัย *Mesure des propriétés thermiques des mélanges à base de caoutchouc dans les conditions de mise en oeuvre* (M. Alain DEGIOVANNI et al., 2012) พบว่า การหาค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวด์โดยวิธีการฉีดยาจะได้อผลของความดันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนซึ่งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวด์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นและความคาดเคลื่อนของค่าการนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณกับค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกัน

งานวิจัยของ Jun-ping Song ในหัวข้อ “The effect of carbon black morphology to the thermal conductivity of natural rubber composites” (Song et al., 2019) พบว่า ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มในยางคอมพาวด์ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวด์นั้นเพิ่มในสถานะที่การกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางคอมพาวด์มีความสม่ำเสมอเนื่องด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของคาร์บอนแบล็กใกล้กันมากขึ้นในกรณีที่มีการกระจายตัวมีความสม่ำเสมอและการเชื่อมต่อที่เพิ่มขึ้นของ CB ในยางและ CB ที่รวมเข้ากับโซ่จำนวนมากขึ้นทำให้มีการนำความร้อนที่สูงขึ้น ส่วนผลของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ใส่ในปริมาณที่น้อยทำให้เกิดระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ส่งผลให้อนุภาคที่เล็กกว่าจะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำ



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับ %สัดส่วนโดยปริมาณของ CB โดยที่ N539 N134 N234และN330 ป็นเกรดของ CB (Song et al., 2019)

จากงานวิจัยของ ฤดีรัตน์ สันตะโก ในหัวข้อ “ Effect of synthesized ZnO nanoparticles on thermal conductivity and mechanical properties of natural rubber ” พบว่า ค่าการนำความร้อนยางธรรมชาติ(NR) ที่ใส่ ZnO ชนิด sZnO ต่ำกว่ายางธรรมชาติ(NR) ที่ใส่ ZnO ชนิด cZnO เนื่องจาก ขนาดอนุภาคของ sZnO เท่ากับ 41.50 นาโนเมตร และพื้นที่จำเพาะ 27.92 m<sup>2</sup>/g ส่วนขนาดอนุภาคของ cZnO คือ 312.92 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.35 m<sup>2</sup>/g ซึ่ง sZnO มีขนาดเล็กกว่าและพื้นที่สัมผัสมากกว่า cZnO จึงทำให้การนำความร้อนมาก ส่วนปริมาณที่เพิ่มของของ sZnO และ cZnO ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามรูปด้านล่าง



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับปริมาณ ZnO ชนิด sZnO และ cZnO(Suntako, 2017)

จากงานวิจัยของ วินัสรินทร์ อินทร์ติยะ ในหัวข้อ “ อิทธิพลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติของยางเอทิลีนไดอีน(EPDM) ” พบว่า การเติมน้ำมันพาราฟินิกในยางเอทิลีนไดอีนส่งผลให้พลังงานการผสมและความหนืดมูนี่ของยางมีแนวโน้มที่ลดลงมากกว่าการเติมน้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อยเนื่องจากน้ำมันพาราฟินิกมีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงของพันธะเดี่ยวแบบอิลิฟาติกจึงทำให้น้ำมันชนิดนี้นอกจากจะมีความหนืดต่ำกว่าแล้ว ยังระดับความเป็นขั้วที่ต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติกอีก

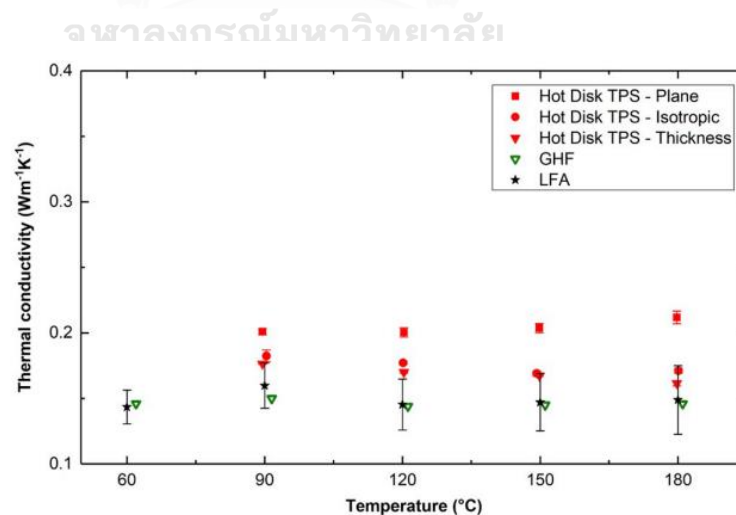
ด้วยดังนั้นน้ำมันพาราฟินจึงสามารถผสมเข้าในยางเอทิลีนไดอินที่มีความเป็นขั้วที่ต่ำมากได้อย่างดี ตามกฎ like dissolves like โดยโมเลกุลของน้ำมันพาราฟินสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของยางได้ง่ายส่งผลให้โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นและค่า T90 ของยางเอทิลีนไดอินที่เติมน้ำมันพาราฟินที่ปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ T90 นั้นเพิ่มขึ้นอาจแสดงว่าค่าการนำความร้อนของยางเอทิลีนไดอินที่เติมน้ำมันพาราฟินมีค่าลดเมื่อปริมาณน้ำมันนั้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงยางเอทิลีนไดอินที่เติมน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟิน(วินส์รินทร์ อินทร์ด  
ยะ, 2551)



ชนิด	ปริมาณ (phr)	พลังงาน ( $\times 10^5$ J)	ความหนืด มูนี* (MU)	ลักษณะการคงรูป		
				$t_{c,90}$ (นาทีก)	$t_{s,2}$ (นาทีก)	ผลต่าง แรงบิด (dN.m)
น้ำมันอะโรมาติก	0	3.81	97.9	6.98	1.79	1.68
	2	3.68	90.4	6.48	1.78	1.62
	4	3.50	86.2	6.46	1.87	1.60
	6	3.35	80.8	6.62	2.05	1.54
	8	3.37	76.0	6.96	2.01	1.48
น้ำมันพาราฟินิก	0	3.81	97.9	6.98	1.79	1.68
	2	3.61	89.2	6.92	1.86	1.68
	4	3.45	82.3	6.72	1.99	1.62
	6	3.34	75.7	7.09	2.18	1.54
	8	3.22	72.1	7.32	2.34	1.51

จากงานวิจัยของ R.C. Kerschbaumer ในหัวข้อ “ Comparison of steady-state and transient thermal conductivity testing methods using different industrial rubber compounds” พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางจะคงที่หลังอุณหภูมิทดสอบมากกว่า  $60^\circ\text{C}$  ดังภาพที่ 10 และการทดสอบค่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่จะมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าแบบไม่คงที่ ซึ่งความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของยางทดสอบจะส่งผลต่อค่าการนำความร้อนที่ได้ของการทดสอบแบบไม่คงที่



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ(Kerschbaumer et al., 2019)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยสูตร A, B, CB, SC, CA, ZnO<sub>4</sub>, Oil<sub>40</sub>, CV, EV, SEMI, Peroxide, CBN330, CBN550 และ CBN660 จะแสดงส่วนประกอบต่างๆดังรูปด้านล่าง โดยสูตรคอมปาวด์ A และ B เป็นตัวแทนของสูตรที่ใช้ในอุตสาหกรรม เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด ส่วนสูตร CB, SC และ CA เป็นการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมโดย CB แทนผลกระทบของคาร์บอนแบล็กต่อค่าการนำความร้อน SC แทนผลกระทบของซิลิกาต่อค่าการนำความร้อน และ CA แทนผลกระทบของเซียมคาร์บอนเนตต่อค่าการนำความร้อน ส่วน ZnO<sub>4</sub> และ Oil<sub>40</sub> เป็นการศึกษาผลกระทบของซิงค์ออกไซด์และน้ำมันที่ลดลงจากสูตร A ต่อค่าการนำความร้อน ส่วน CV, EV, SEMI และ Peroxide เป็นการศึกษาผลกระทบของระบบวัลคาไนซ์เซชันต่อค่าการนำความร้อน ส่วน CBN330, CBN550 และ CBN660 เป็นการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กต่อค่าการนำความร้อน

ตารางที่ 2 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ A และ B

สูตรยาง A	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)	สูตรยาง B	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)
EPDM	22.47%	NR	38.46%
Carbon black	20.22%	SBR	16.48%
Silica	3.37%	Carbon black	16.48%
CaCO <sub>3</sub>	33.71%	Silica	9.89%
ZnO	1.80%	ZnO	2.75%
Oil	17.98%	Oil	15.38%
Sulfur	0.45%	Sulfur	0.55%

ตารางที่ 3 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CB

ยางและสารเคมี	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)			
	สูตร CB5	สูตร CB10	สูตร CB15	สูตร CB20
NR#3	83.09%	78.71%	74.34%	69.97%
Carbon black	5.00%	10.00%	15.00%	20.00%
Oil	9.21%	8.72%	8.24%	7.75%
Sulfur	0.58%	0.55%	0.52%	0.49%
ZnO	0.71%	0.68%	0.64%	0.60%
Stearic acid	0.85%	0.81%	0.76%	0.72%
TMTD	0.56%	0.53%	0.50%	0.47%

ตารางที่ 4 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ SC

ยางและสารเคมี	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)			
	สูตร SC5	สูตร SC10	สูตร SC15	สูตร SC20
NR#3	83.09%	78.71%	74.34%	69.97%
Silica	5.00%	10.00%	15.00%	20.00%
Oil	9.21%	8.72%	8.24%	7.75%
Sulfur	0.58%	0.55%	0.52%	0.49%
ZnO	0.71%	0.68%	0.64%	0.60%
Stearic acid	0.85%	0.81%	0.76%	0.72%
TMTD	0.56%	0.53%	0.50%	0.47%

ตารางที่ 5 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CA

ยางและสารเคมี	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)			
	สูตร CA5	สูตร CA10	สูตร CA15	สูตร CA20
NR#3	83.09%	78.71%	74.34%	69.97%
CaCO3	5.00%	10.00%	15.00%	20.00%
Oil	9.21%	8.72%	8.24%	7.75%
Sulfur	0.58%	0.55%	0.52%	0.49%
ZnO	0.71%	0.68%	0.64%	0.60%
Stearic acid	0.85%	0.81%	0.76%	0.72%
TMTD	0.56%	0.53%	0.50%	0.47%

ตารางที่ 6 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ ZnO4 และ Oil40

สูตรยาง A	สัดส่วนโดยปริมาตร(%)		
	อ้างอิง	ใส่ ZnO ลดลง(Z) *	ใส่ Oil ลดลง(O) *
EPDM	22.47%	22.68%	24.69%
Carbon black	20.22%	20.41%	22.22%
Silica	3.37%	3.40%	3.70%
CaCO3	33.71%	34.01%	37.04%
ZnO	1.80%	0.91%	1.98%
Oil	17.98%	18.14%	9.88%
Sulfur	0.45%	0.45%	0.49%

ตารางที่ 7 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CV, EV, SEMI และ Peroxide

สูตรยาง	ปริมาณสาร (phr.)			
	CV	Semi-EV	EV	Peroxide
NR	100.00	100.00	100.00	100.00
CB	20.00	20.00	20.00	20.00
ZnO	5.00	5.00	5.00	-
Stearic acid	1.00	1.00	1.00	-
MBTS	0.75	1.50	3.00	-
Sulfur	2.50	1.50	0.50	-
CO-Agent	-	-	-	1.00
Peroxide	-	-	-	2.40

ตารางที่ 8 แสดงสูตรยางคอมปาวด์ CBN330, CBN550 และ CBN660

ยางและสารเคมี	ปริมาณ(phr)		
	CBN330	CBN550	CBN660
NR#3	100.00	100.00	100.00
CB N330	10	-	-
CB N331	-	10	-
CB N332	-	-	10
Oil-P150	5	5	5
Sulfur	1.5	1.5	1.5
ZnO	5.00	5.00	5.00
Stearic acid	1.00	1.00	1.00
TMTD	1.00	1.00	1.00

### 3.2 การประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์

1. คำนวณหรือทดสอบค่าการนำความร้อนของยางธรรมชาติ EPDM SBR คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนตและน้ำมัน โดยการทดสอบหาค่าการนำความร้อนด้วยเครื่อง THB1 ที่ใช้วิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ โดยการทดสอบลักษณะตัวอย่างที่ทดสอบมีทั้งของแข็ง ของเหลว และผง ในกรณีของแข็งจะต้องเตรียมตัวอย่างจำนวน 2 ชิ้น ที่มีขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 50 mm และความหนา 10-20 mm ซึ่งการทดสอบจะนำเซนเซอร์ไว้ตรงกลาง



ระหว่างชิ้นงานทั้งสอง หลังจากนั้นจะให้อุณหภูมิกับตัวอย่าง(ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง)และบันทึกผลต่างของความต้านทานในตัวเซนเซอร์แล้วเครื่อง THB1 จะคำนวณค่าการนำความร้อน ส่วนของเหลวและผงจะแตกต่างกันของแข็งตรงที่การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยของเหลวจะต้องนำของเหลวที่จะทดสอบมาใส่บีกเกอร์ขนาด 250 ml แล้วนำเซนเซอร์จุ่มลงในของเหลวตัวอย่างจะเซนเซอร์สัมผัสกับของเหลวทั้งหมด ส่วนผงจะนำผงดังกล่าวใส่ลงในบีกเกอร์และนำเซนเซอร์วางไว้ในบีกเกอร์โดยให้ผงสัมผัสกับแผ่นเซนเซอร์ซึ่งในกรณีนี้ต้องอัดให้แน่นและผงหรือสารเคมีที่จะทดสอบอาจต้องอบชิ้นงานก่อนการทดสอบเพื่อลดความชื้นซึ่งส่งผลให้ค่าการนำความร้อนที่ไม่แม่นยำ

2. สั่งผลิตคอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยาคอมปาวด์เป็น 2 สูตรได้แก่ ยาคอมปาวด์ A และคอมปาวด์ B

3. เตรียมคอมปาวด์ทั้งหมด 4 ตัวอย่างโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มคอมปาวด์ที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันและกลุ่มคอมปาวด์ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันโดยให้มีขนาดความกว้าง 300 mm ความยาว 300 mm และความหนา 20-25 mm ซึ่งคอมปาวด์ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันจะขึ้นรูปคอมปาวด์ A ที่อุณหภูมิ 180 °C ระยะเวลา 360 วินาที และขึ้นรูปคอมปาวด์ B ที่อุณหภูมิ 180 °C ระยะเวลา 104 วินาที

4. ทดสอบคอมปาวด์ทั้ง 4 ตัวอย่างด้วยวิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่ด้วยเครื่อง Heat Flow Meter รุ่น HFM300 ที่สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิ 60 °C



ภาพที่ 11 เครื่อง Heat flow meter รุ่น HFM300

ที่มา : [https://kinetics.co.th/wp-content/uploads/2022/04/Thermal-conductivity\\_01\\_HFM.jpg](https://kinetics.co.th/wp-content/uploads/2022/04/Thermal-conductivity_01_HFM.jpg)

5. ประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์โดยเริ่มจากการนำความหนาแน่นและมวลมาคำนวณหาสัดส่วนโดยปริมาตรของยางและสารตัวเติมแต่ละตัวหลังจากนั้นจะนำค่าการนำความร้อนและสัดส่วนโดยปริมาตรของยางและสารตัวเติมแต่ละตัวมาแทนค่าในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาการนำความร้อนของยางคอมปาวด์แล้วนำค่าการประมาณมาเปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดสอบ

### 3.3 การทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

#### 3.3.1 ปริมาณ Filler(Carbon black, Silica, CaCO<sub>3</sub>) ที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

1. สังเคราะห์คอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยางคอมปาวด์เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ยางคอมปาวด์ที่มีคาร์บอนแบล็กเป็นส่วนประกอบ(CB), ยางคอมปาวด์ที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ(SC) และยางคอมปาวด์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบ(CA) ซึ่งแต่ละสูตรจะประกอบด้วย ยางธรรมชาติ(Nature rubber; NR), น้ำมันพาราฟินนิค(Paraffinic oil), ซิงค์ออกไซด์(Zinc oxide; ZnO), เทตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide; TMTD), กรดสเตียริก (Stearic acid) และกำมะถัน (sulfur) ที่เหมือนกันทั้งสามสูตรจะแตกต่างกันที่สารตัวเติมโดยจะใส่ปริมาณสารตัวเติมตามสัดส่วนโดยปริมาตร 5,10,15 และ 20 ตามลำดับ

2. เตรียมคอมปาวด์โดยเตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 50 mm และความหนา 10-20 mm เพื่อให้เซ็นเซอร์สัมผัสกับชิ้นงานได้เต็มพื้นที่สัมผัส

3. ทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่มด้วยวิธีทดสอบหาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ด้วยเครื่อง THB1 ที่สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการทดสอบจะวางเซนเซอร์ระหว่างตัวอย่างชิ้นงานทั้งสอง 2 ชิ้นหลังจากนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างวางลงบนตรงกลางของแท่นวางตัวอย่างดังรูป หลังจากนั้นเครื่องจะทำการทดสอบค่าการนำความร้อนและรายงานผลออกมา



ภาพที่ 12 แสดงตัวเครื่อง THB1 และลักษณะการวางชิ้นงาน

ที่มา: [https://www.linseis.com/wp-content/uploads/2020/02/Linseis-THB-1\\_Detail\\_1-1280x786.jpg](https://www.linseis.com/wp-content/uploads/2020/02/Linseis-THB-1_Detail_1-1280x786.jpg)

### 3.3.2 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

1. สังกะสีคอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยางคอมปาวด์เป็น 3 ตัวอย่าง ได้แก่ยางคอมปาวด์ที่มีสารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็กเกรด N330 , ยางคอมปาวด์ที่มีสารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็กเกรด N550 และ ยางคอมปาวด์ที่มีสารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็กเกรด N660 ซึ่งแต่ละสูตรจะประกอบด้วย ยางธรรมชาติ(Nature rubber; NR), น้ำมันพาราฟินนิค(Paraffinic oil), ซิงค์ออกไซด์(Zinc oxide; ZnO), เทตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide; TMTD), กรดสเตียริก(Stearic acid) และกำมะถัน (sulfur) ที่เหมือนกันซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างจะแตกต่างกันที่เกรดของสารตัวเติม ซึ่งเหตุผลที่เลือกสารตัวเติมทั้ง 3 เกรดนั้นเนื่องจากทางอุตสาหกรรม เอส.เค โพลีเมอร์ ใช้สารตัวเติมเกรด N330,N550และN660 เป็น 3 อันดับแรกโดยเรียงจากมากไปน้อย

2. เตรียมคอมปาวด์โดยเตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 50 mm และความหนา 10-20 mm เพื่อให้เซ็นเซอร์สัมผัสกับชิ้นงานได้เต็มพื้นที่สัมผัส

3. ทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 ตัวอย่างด้วยวิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ด้วยเครื่อง THB1 ที่สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งวางเซนเซอร์ระหว่างตัวอย่างชิ้นงานยางทั้งสอง 2 ชิ้นหลังจากนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างวางลงบนตรงกลางของแท่นวางตัวอย่างหลังจากนั้นเครื่องจะทำการทดสอบค่าการนำความร้อนและรายงานผล

### 3.3.3 ผลกระทบของระบบวัดคาโนเซนชันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

1. สั่งผลิตคอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยางคอมปาวด์เป็น 4 ตัวอย่าง ได้แก่ยางคอมปาวด์ที่สูตร CV, คอมปาวด์สูตร EV, และคอมปาวด์สูตร SEMI และคอมปาวด์สูตร Peroxide

2. เตรียมคอมปาวด์โดยเตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 50 mm และความหนา 10-20 mm เพื่อให้เซนเซอร์สัมผัสกับชิ้นงานได้เต็มพื้นที่สัมผัส

3. ทดสอบชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างด้วยวิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ด้วยเครื่อง THB1 ที่สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะวางเซนเซอร์ระหว่างตัวอย่างชิ้นงานยางทั้งสอง 2 ชิ้นหลังจากนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างวางลงบนตรงกลางของแท่นวางตัวอย่างหลังจากนั้นเครื่องจะทำการทดสอบค่าการนำความร้อนและรายงานผล

### 3.3.4 ปริมาณของ ZnO และ Oil ต่อค่าการนำความร้อน

1. สั่งผลิตคอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยางคอมปาวด์เป็น 3 ตัวอย่าง ได้แก่ยางคอมปาวด์ที่สูตร A, คอมปาวด์สูตร A ที่ลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ลงร้อยละ 50 (ZnO4) และคอมปาวด์สูตร A ที่ลดปริมาณน้ำมันลงร้อยละ 50 (Oil40)

2. เตรียมคอมปาวด์โดยเตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 50 mm ความยาว 50 mm และความหนา 10-20 mm เพื่อให้เซนเซอร์สัมผัสกับชิ้นงานได้เต็มพื้นที่สัมผัส

3. ทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 ตัวอย่างด้วยวิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ด้วยเครื่อง Hot disk TPS2500 ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติหรือ MTEC โดยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะวางเซนเซอร์ระหว่างตัวอย่างชิ้นงานยางทั้งสอง 2 ชิ้นหลังจากนั้นจะนำชิ้นงานตัวอย่างวางลงบนตรงกลางของแท่นวางตัวอย่างหลังจากนั้นเครื่องจะทำการทดสอบค่าการนำความร้อนและรายงานผล

### 3.4 ระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อน

1. สั่งผลิตคอมปาวด์จากบริษัท ไทยรับเทค จำกัด โดยแบ่งยางคอมปาวด์เป็น 2 กลุ่มได้แก่ ยางคอมปาวด์สูตร A และ คอมปาวด์สูตร B สูตรที่ใช้เป็นสูตรในอุตสาหกรรม เอส.เค. โพลีเมอร์
2. เตรียมคอมปาวด์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนในส่วนแรกจะเป็นการเตรียมคอมปาวด์ที่ยังไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันซึ่งจะตัดคอมปาวด์ให้ได้ขนาดความกว้าง 300 mm ความยาว 300 mm และความหนา 20-25 mm ในแต่ละสูตร ส่วนที่สองเป็นการเตรียมยางที่ผ่านการการวัลคาไนซ์เซชันไปแล้ว 50% โดยอ้างอิงอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปจากการทดสอบการคงรูปของยางด้วย ODR แสดงดังภาคผนวก ข ซึ่งจะทำการขึ้นรูปคอมปาวด์ A ที่อุณหภูมิ 180°C ระยะเวลา 180 วินาที และขึ้นรูปคอมปาวด์ B ที่อุณหภูมิ 180°C ระยะเวลา 52 วินาที ส่วนที่สองเป็นการเตรียมยางที่ผ่านการการวัลคาไนซ์เซชัน 100% โดยอ้างอิงอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปจากการทดสอบการคงรูปของยางด้วย ODR แสดงดังภาคผนวก ก ซึ่งจะทำการขึ้นรูปคอมปาวด์ A ที่อุณหภูมิ 180 °C ระยะเวลา 360 วินาที และขึ้นรูปคอมปาวด์ B ที่อุณหภูมิ 180 °C ระยะเวลา 104 วินาที
3. ทดสอบชิ้นงานทั้ง 6 ตัวอย่างด้วยวิธีทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสภาวะคงที่ด้วยเครื่อง HFM300 ที่สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิ 25,30,40,50 และ 60 °C ซึ่งจะวางตัวอย่างชิ้นงานยาวไว้ในเครื่องทดสอบหลังจากนั้นเครื่องจะทำการประกบชิ้นงานและให้ความร้อนใน 1 มิติโดยไม่มี การสูญเสียความร้อนซึ่งจะให้ความร้อนเริ่มต้นจากอุณหภูมิ 25 °C จนอุณหภูมิที่ 25 °C หลังจากนั้นเครื่องจะทำการบันทึกผลของ Heat Flux ที่เกิดขึ้นและแสดงออกมาเป็นค่าการนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิ 25 °C หลังจากนั้นเครื่องจะให้ อุณหภูมิเพิ่มไปที่ 30 และรอจนอุณหภูมิคงที่แล้วทำตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปข้างต้น หลังจากนั้นจากเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 40,50 และ 60 ตามลำดับ(กราฟอุณหภูมิที่ได้จะอยู่ในลักษณะของขั้นบันไดดังรูป)



ภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งการวางยางในเครื่อง HFM300 โดย A คือตัวอย่างชิ้นงานยาง

4. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

### 3.5 การออกแบบชุดต้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน

1. ศึกษารูปแบบการหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่
2. กำหนดวิธีการคำนวณหาค่าการนำความร้อนและวิธีการหาค่าการนำความร้อน
3. ออกแบบชุดต้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน
4. กำหนดส่วนประกอบต่างๆ สำหรับการทดสอบ
5. สรุปแบบของชุดต้นแบบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ผลการประมาณค่าการนำความร้อน

ผลการประมาณค่าการนำความร้อนคอมปาวด์ที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาร์ไนซ์เซชันและที่ผ่านการวัลคาร์ไนซ์เซชันเปรียบเทียบกับผลการประมาณค่าการนำความร้อน พบว่า คอมปาวด์ A และสูตร B ที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาร์ไนซ์เซชันเมื่อเทียบกับการประมาณค่าการนำความร้อนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 22.20% และ 21.94% ตามลำดับ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากฟองอากาศภายในของคอมปาวด์ทำให้ค่าการนำความร้อนที่ได้แตกต่างออกไป ส่วนคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาร์ไนซ์เซชันมีเมื่อเทียบกับการประมาณค่าการนำความร้อนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 4.94% จะเห็นว่าค่าการนำความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางประกอบกับชิ้นงานที่ทดสอบผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดทำให้ไม่มีฟองอากาศภายในเนื้ออย่าง ส่วนคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาร์ไนซ์เซชันมีเมื่อเทียบกับการประมาณค่าการนำความร้อนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 92.09% ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของยางที่ผ่านการขึ้นรูปซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.3

ตารางที่ 9 แสดงการคำนวณค่าการนำความร้อนของสูตร A

สูตรยาง A	k(W/mK)	m(phr)	density(g/cm <sup>3</sup> )	V	V(f)	ki	%ki
EPDM	0.216	100.00	0.86	116.28	0.37	0.08	27.66%
CB	0.908	90	1.8	50.00	0.16	0.14	49.92%
Silica	0.040	15	3.5	4.29	0.01	0.00	0.19%
CaCO <sub>3</sub>	0.125	150	2.71	55.35	0.18	0.02	7.61%
Oil	0.150	80.00	0.90	88.69	0.28	0.04	14.63%
Sulfur		2.00	2.07	0.97	0.00	0.00	0.00%
Total	-	437.00	-	315.57	1.00	0.2882	100.00%
	Compound	Cure 100					
ค่า k จาก HFM	0.2358	0.2746					
ความคลาดเคลื่อน	22.20%	4.94%					

ตารางที่ 10 แสดงการคำนวณค่าการนำความร้อนของสูตร B

สูตรยาง B	k(W/mK)	m(phr)	density(g/cm <sup>3</sup> )	V	V(f)	ki	%ki
NR	0.142	70.00	0.91	76.67	0.47	0.07	28.55%
SBR	0.225	30	0.94	31.91	0.20	0.04	18.88%
CB	0.908	30	1.8	16.67	0.10	0.09	39.79%
Silica	0.04	18	3.5	5.14	0.03	0.00	0.54%
Oil	0.15	28.00	0.90	31.04	0.19	0.03	12.24%
Sulfur		1.00	2.07	0.48	0.00	0.00	0.00%
Total	-	177.00	-	161.92	1.00	0.2349	100.00%
	Compound	Cure 100					
ค่า k จาก mtec	0.1926	0.1223					
ความคลาดเคลื่อน	21.94%	92.09%					

ตารางที่ 11 แสดงค่าการนำความร้อนของยางและสารเคมี

ยางและสารเคมี	ค่าการนำความร้อน[W/nK]	ที่มา
EPDM	0.216	ทดสอบ Hot disk TPS2500 MTEC
SBR	0.255	<a href="https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/styrene-butadiene-rubber">https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/styrene-butadiene-rubber</a>
CB	0.908	(Song et al., 2019)
Silica	0.04	ทดสอบด้วย THB มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
CaCO <sub>3</sub>	0.125	ทดสอบด้วย THB มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Oil	0.15	ทดสอบด้วย THB มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

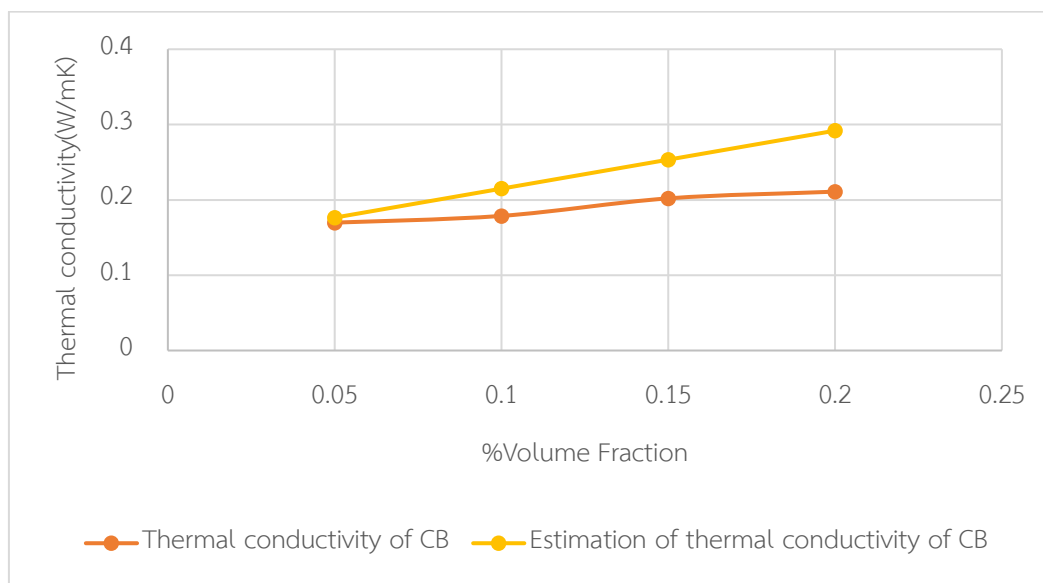
#### 4.2 ผลการทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

##### 4.2.1 ผลของปริมาณ Filler(Carbon black, Silica, CaCO<sub>3</sub>) ที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

1. ผลกระทบของคาร์บอนแบล็กต่อค่าการนำความร้อน พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวด์เมื่อใช้สารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณสัดส่วนโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีคุณสมบัติมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่ายางธรรมชาติ

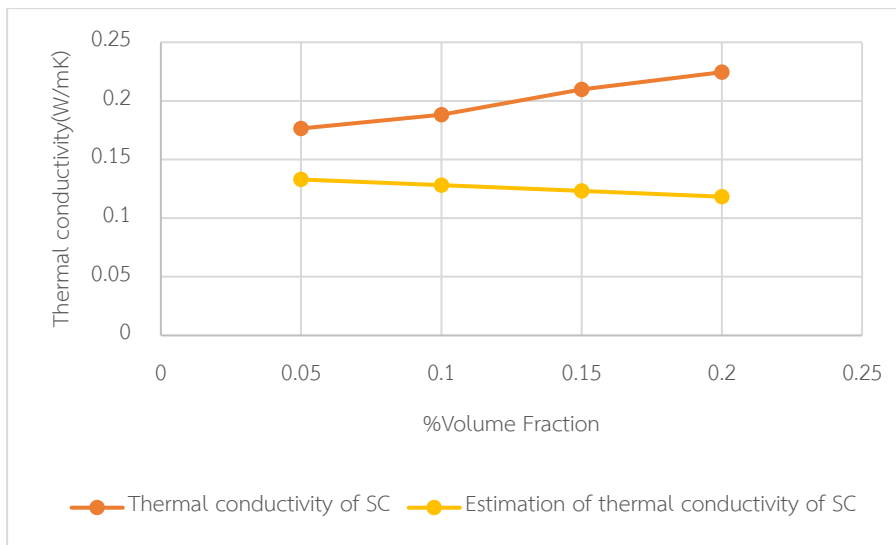


ประกอบกับมีการเชื่อมต่อของคาร์บอนแบล็กภายในยางที่เพิ่มขึ้น (สมเจตน์ พิชรพันธ์ et al., 2010) เมื่อใส่ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่สูงขึ้นทำให้ค่าการนำความร้อนสูงขึ้นตามสัดส่วนโดยปริมาตรและเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนที่ได้จากการประมาณพบว่าค่าการนำความร้อนแนวโน้มน่าจะจากการทดลองกับผลการประมาณค่าเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกัน



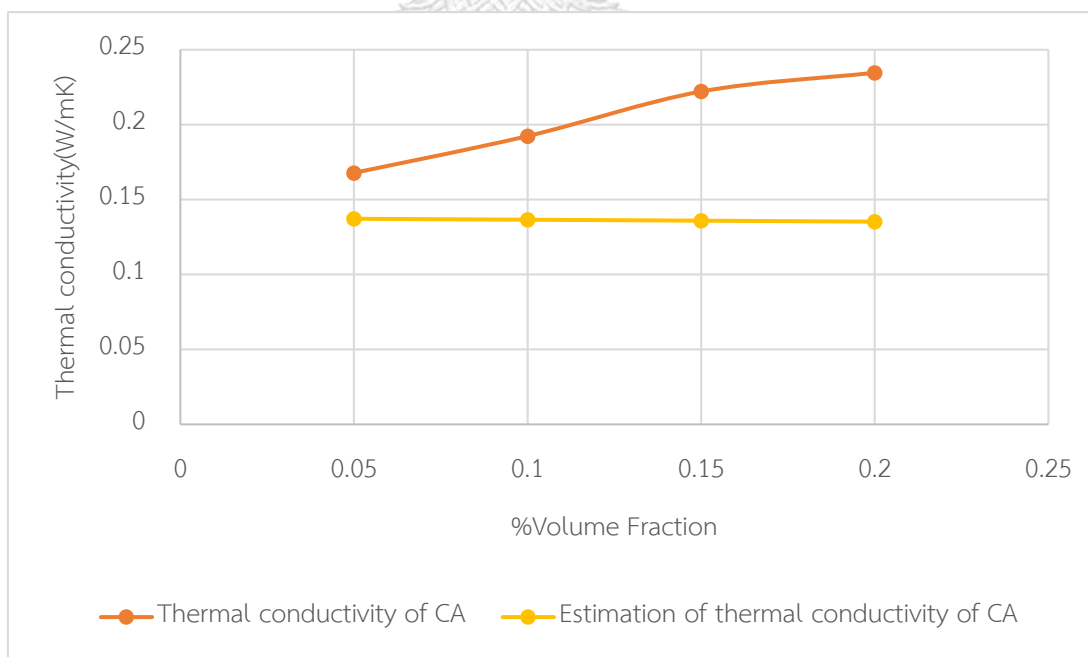
ภาพที่ 14 แสดงค่าการนำความร้อนของคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน

2. ผลกระทบของซิลิกาต่อค่าการนำความร้อน พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์เมื่อใช้สารตัวเติมเป็นซิลิกาที่ปริมาณสัดส่วนโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการกระจายตัวของซิลิกาที่ไม่ดีซึ่งโดยปกติแล้วซิลิกาจะใส่สารไซเลนเพื่อเป็นตัวช่วยในการแตกตัวของซิลิกา ถ้าไม่ใส่สารไซเลนในบางครั้งซิลิกาอาจจะเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มส่งผลให้ค่าการนำความร้อนนั้นไม่เป็นไปตามการประมาณค่าการนำความร้อนบาง



ภาพที่ 15 แสดงค่าการนำความร้อนของซิลิกาที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน

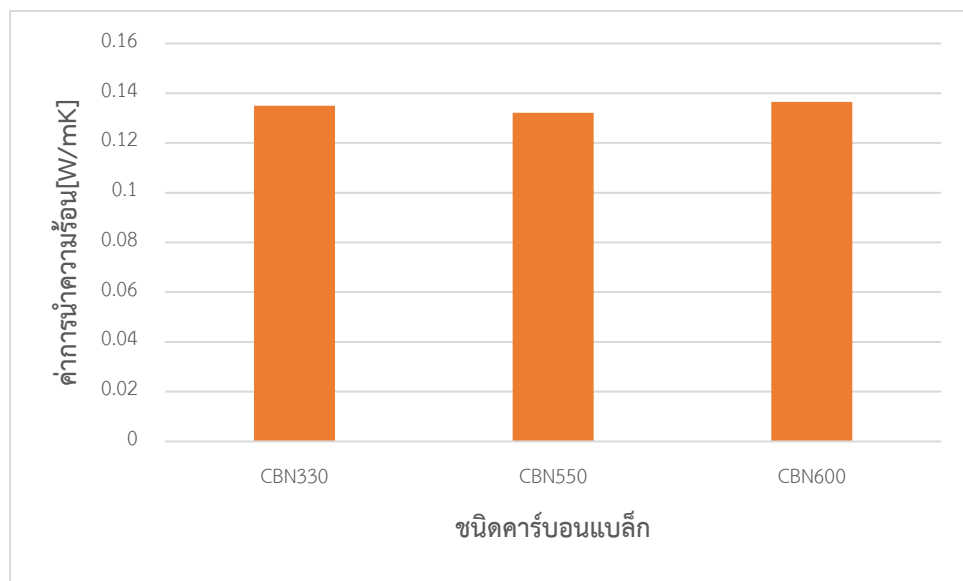
3. ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่าการนำความร้อน พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์เมื่อใช้สารตัวเติมเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณสัดส่วนโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนการประมาณมีค่าการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 16 แสดงค่าการนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน

#### 4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

จากภาพที่ 15 แสดงผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ต่างกัน พบว่า ค่าการนำความร้อนแทบจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าชนิดของคาร์บอนแบล็กไม่ได้มีผลต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่กระบวนการผลิตคอมปาวด์เดียวกัน

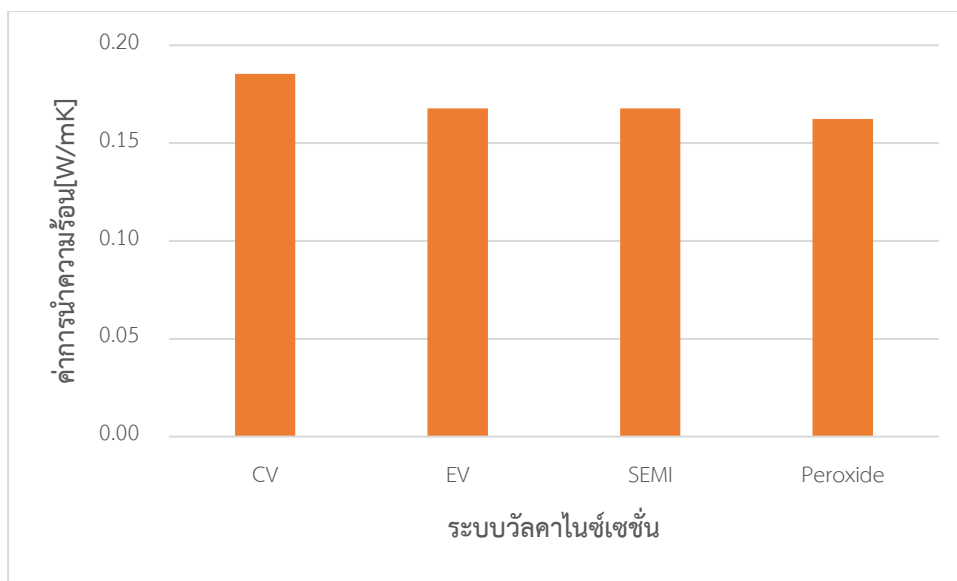


ภาพที่ 17 แสดงค่าการนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่างกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.2.3 ผลของระบบวัลคาไนเซชันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

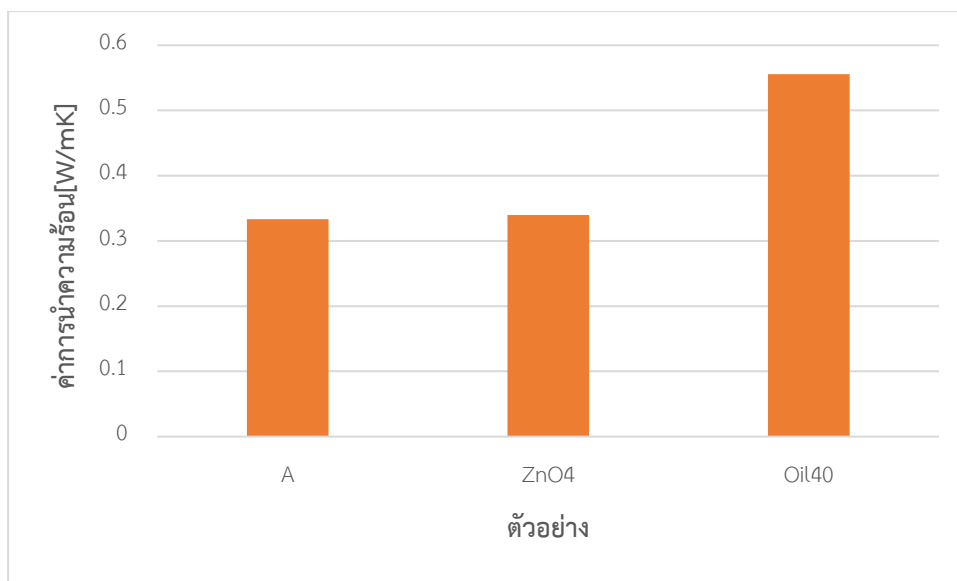
จากภาพที่ 16 แสดงผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของของระบบวัลคาไนเซชันที่ต่างกัน พบว่า ค่าการนำความร้อนของระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 4 ระบบแทบจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 18 แสดงผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของของระบบวัสดุไนซ์เซชั่นที่แตกต่างกัน

#### 4.2.4 ผลของปริมาณของซิงค์ออกไซด์และน้ำมันต่อค่าการนำความร้อน

จากภาพที่ 17 แสดงผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของซิงค์ออกไซด์และน้ำมันที่ลดปริมาณลงจากสูตร A ร้อยละ 50 พบว่า ค่าการนำความร้อนของซิงค์ออกไซด์ที่ลดแทบไม่แตกต่างจากตัวอย่าง A เนื่องจากด้วยปริมาณที่ใส่ในยางทั่วไปนั้นน้อยมากจึงไม่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนน้ำมันเมื่อทำการลดปริมาณลงร้อยละ 50 พบว่า ค่าการนำความร้อนสูงกว่าคอมปาวด์ A เนื่องจากน้ำมันมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่ายาง EPDM จึงทำให้คอมปาวด์ A ที่ใส่น้ำมันมากกว่าจึงมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าโดยน้ำมันมีผลค่อนข้างมากต่อค่าการนำความร้อนสำหรับยางคอมปาวด์ที่ผลิตในอุตสาหกรรมเนื่องจากต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตเป็นสำคัญ ถ้าดูจากสัดส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใส่ไปเพื่อเพิ่มเนื้อและช่วยลดต้นทุนจึงจำเป็นต้องใส่น้ำมันในปริมาณที่เยอะเพื่อให้สามารถผสมยางกับสารเคมีต่างๆได้

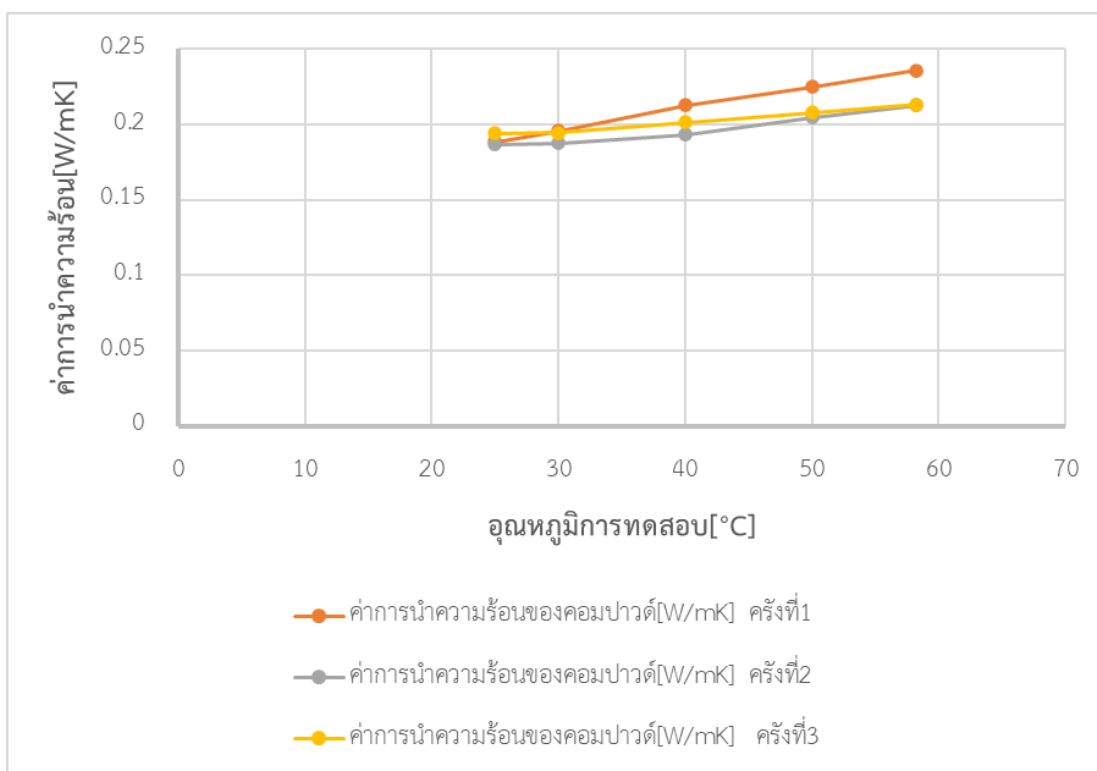


ภาพที่ 19 แสดงค่าผลกระทบของปริมาณของ ZnO และ Oil ที่ลดต่อค่าการนำความร้อน

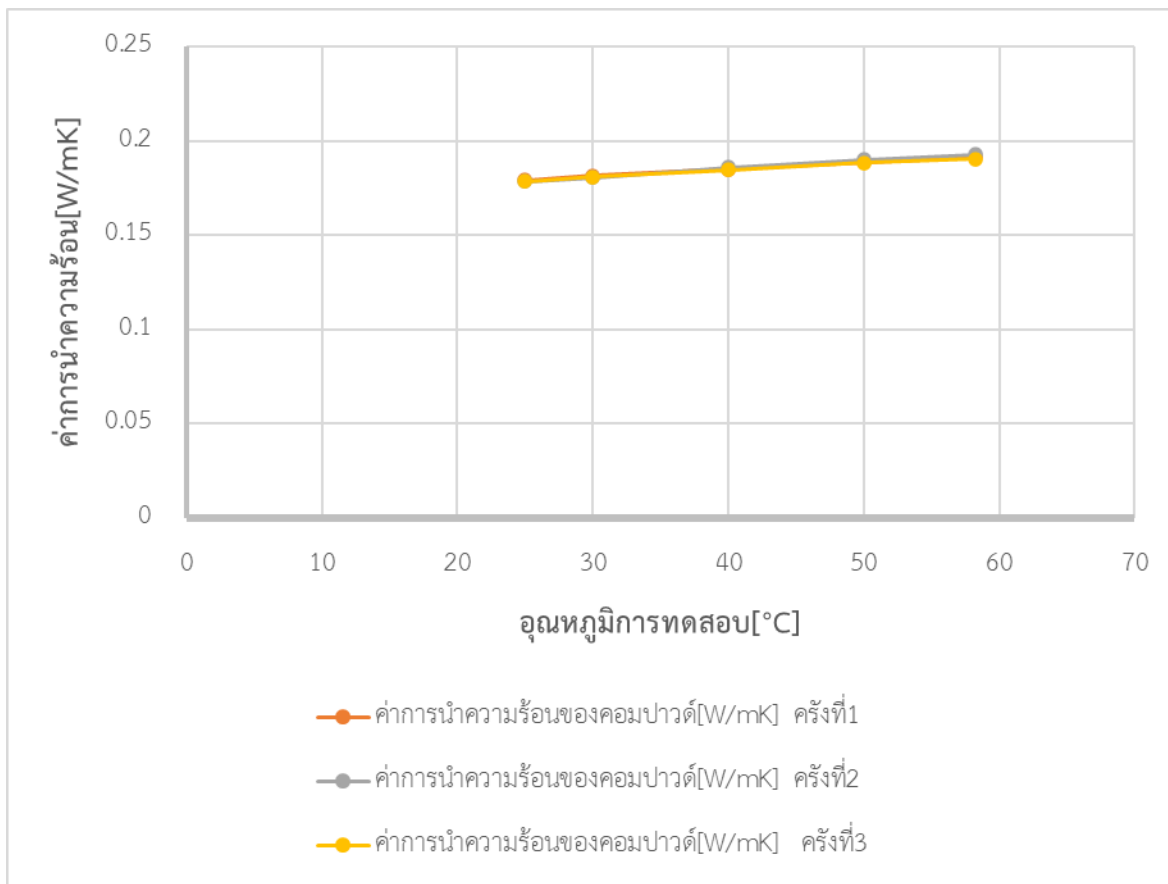
#### 4.3 ผลของระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อน

จากผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ A พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ A ที่ยังไม่ได้การวัลคาไนซ์เซชันด้วย Heat flow meter นั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้นและค่าการนำความร้อนจะใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิช่วง  $50^{\circ}\text{C}$  และ  $60^{\circ}\text{C}$  ส่วนค่าการนำความร้อนของการทดสอบครั้งที่ 1 ที่แตกต่างจากครั้งที่ 2 และ 3 เนื่องจากการทดสอบครั้งที่ 1 ไม่ได้ทำวันในวันเดียวกัน ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ A ได้รับความชื้นทำให้ค่าการนำความร้อนที่ได้้นั้นต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนทดสอบหาค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันมาแล้วร้อยละ 50 ด้วย Heat flow meter พบว่า ค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ A จากการทดสอบ 3 ครั้ง มีค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้นซึ่งแต่ละครั้งจะแตกต่างกัน โดยค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าการทดสอบหลังจากนี้ค่าการนำความร้อนจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น(ยกเว้นในกรณีที่อุณหภูมิสูงเกินจนยางคอมปาวด์ A เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน) ส่วนการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ A ที่ระดับการวัลคาไนซ์เซชันอยู่ที่ 100 ด้วย Heat flow meter พบว่า ค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ A จากการทดสอบ 3 ครั้ง มีค่าการนำความร้อนแทบจะคงที่เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้นแสดงว่าอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ A ที่

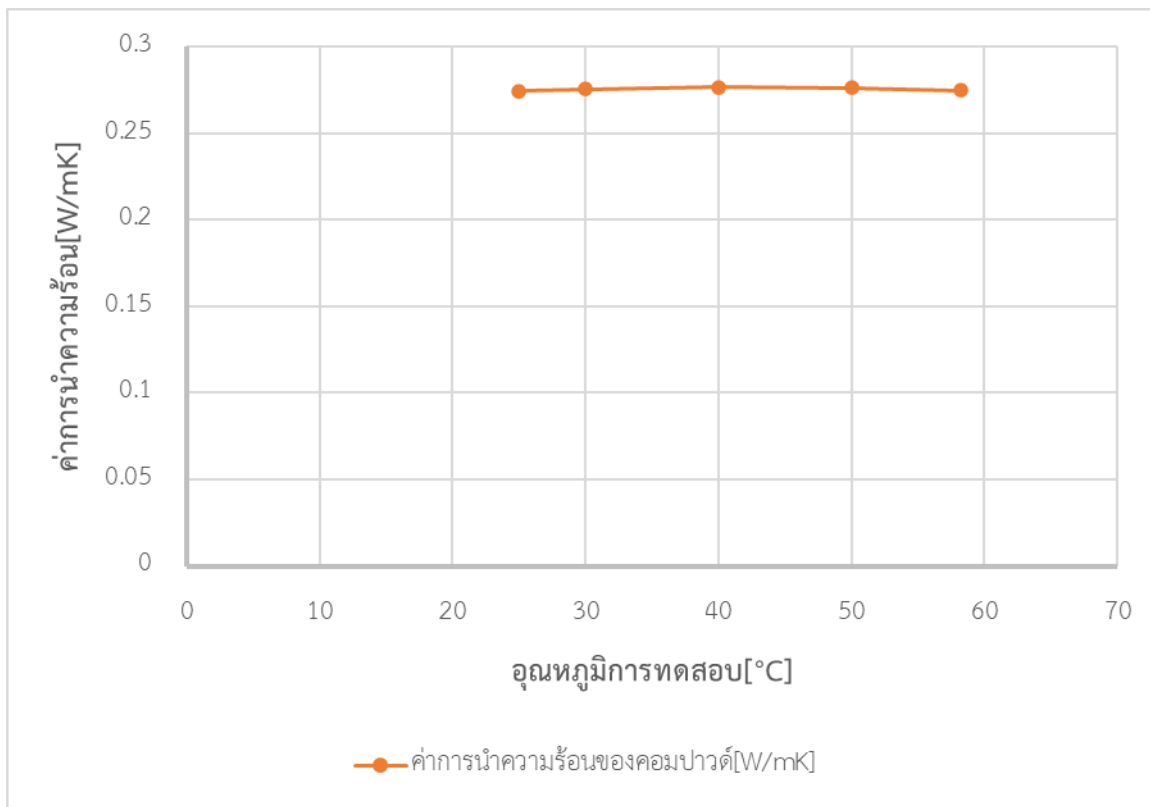
ระดับการวัดค่าไนซ์เซชันอยู่ที่ 100 อย่างมีนัยสำคัญและเมื่อเปรียบเทียบคอมปาวด์ A ที่ที่ไม่ผ่านการวัดค่าไนซ์เซชัน, คอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัดค่าไนซ์เซชัน 50 % และคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัดค่าไนซ์เซชัน 100% พบว่าเมื่อระดับการวัดค่าไนซ์เซชันนั้นสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนนั้นสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Zied Cheheb, 2012) และจากการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิของคอมปาวด์ให้ค่าการนำความร้อนที่คงที่ในช่วงอุณหภูมิที่  $60^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ยังไม่ผ่านการวัดค่าไนซ์เซชันด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300



ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 50% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300

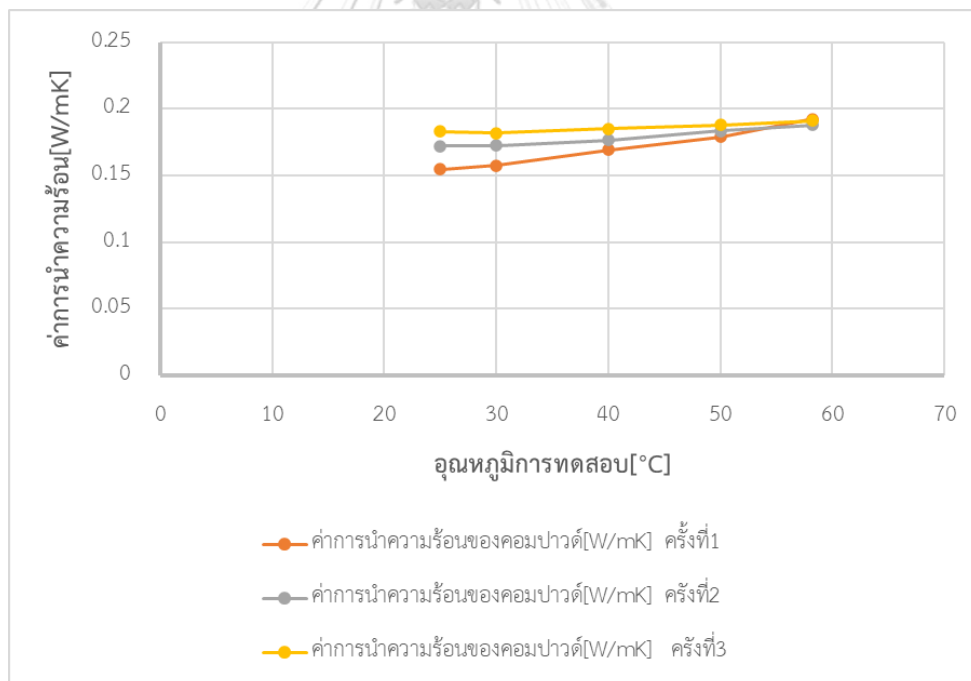


ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ A ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 100% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300

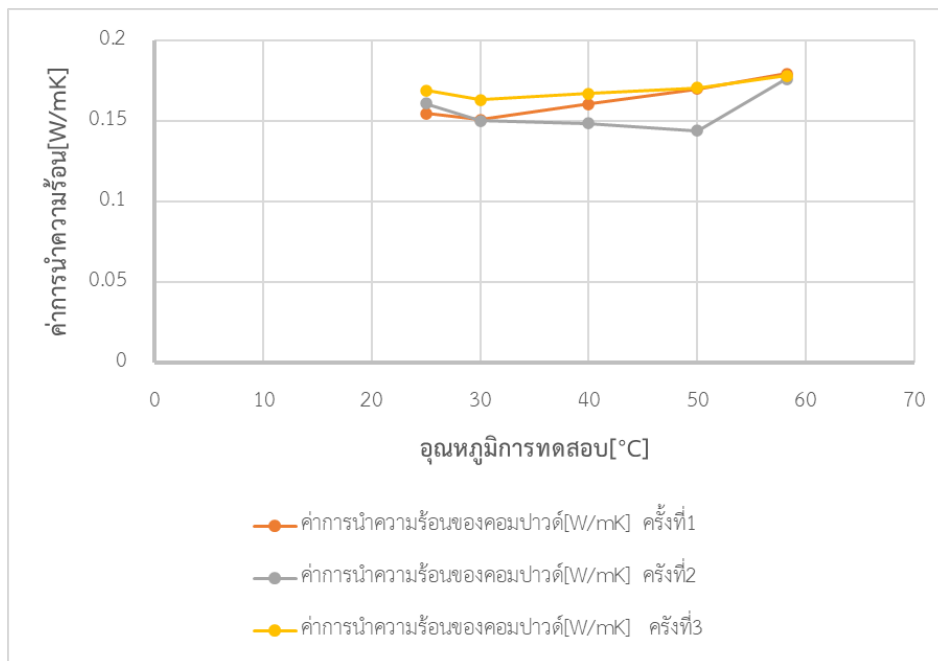
จากการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ B ที่ยังไม่ได้การวัลคาไนซ์เซชันด้วย Heat flow meter พบว่า ค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ B เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้นและค่าการนำความร้อนจะใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิช่วง 50 °C และค่าการนำความร้อนลู่เข้าที่อุณหภูมิ 60 °C ส่วนยางคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันไปแล้ว 50% และยางคอมปาวด์ B ที่การวัลคาไนซ์เซชันสมบูรณ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลของค่าการนำความร้อนก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่ที่อุณหภูมิ 60 °C เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระดับการวัลคาไนซ์เซชันทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ B ที่ยังไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันสูงกว่าคอมปาวด์ B ที่วัลคาไนซ์เซชันสมบูรณ์ สันนิษฐานว่าเกิดจากคอมปาวด์เกิด Reversion ในการทดสอบ ODR ตามภาพที่--- จึงทำให้บริเวณผิวของคอมปาวด์เมื่อได้รับความร้อนนานเกิน T90 จะเกิดการเสื่อมของยางเนื่องจากความร้อน เหตุที่ได้รับความร้อนเกินที่ T90 ทั้งๆที่ขึ้นรูปที่ T90 เนื่องจากการขึ้นรูปจะมีระยะเวลาที่ยางอยู่สัมผัสแม่พิมพ์ที่ร้อนขณะทำการวางยางและระยะเวลาที่แม่พิมพ์เลื่อนเข้าเพื่อประกบกับแม่พิมพ์บน



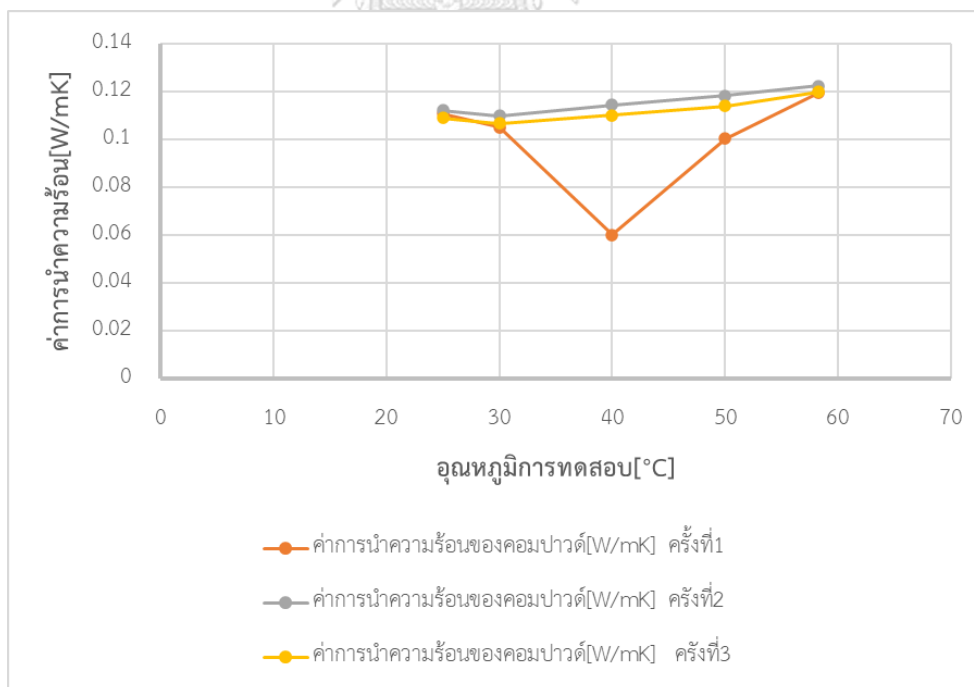
รวมถึงชิ้นงานที่ติดกับแม่พิมพ์ขณะทำการเอาชิ้นงานออกจากเบ้า จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการขัดผิวของคอมปาวด์ B ไปทดสอบด้วย THB1 เพื่อตรวจสอบว่าที่ตั้งสมมุติฐานไว้ก่อนหน้าจริงหรือไม่ ซึ่งเหตุผลที่ใช้ THB1 เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างไม่นานเพราะขนาดชิ้นทดสอบเล็กกว่า HFM ถึง 36 เท่า จึงสามารถขัดผิวของตัวอย่างได้ง่ายกว่าโดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่--- พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ B ที่วัลคาไนซ์ชั้นสมบูรณ์แบบไม่ขัดผิวมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าแบบขัดผิว นั้นแสดงว่าบริเวณผิวอาจเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนเนื่องจากค่าการนำความร้อนของแบบขัดผิวนั้นที่ต่ำกว่าแบบไม่ขัดผิว และความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากเครื่องทดสอบซึ่งมีเหตุผลสนับสนุน 2 ประการ ได้แก่ ประการแรกในการทดสอบด้วย THB1 ได้ทดสอบ 3 ซ้ำทั้งสองตัวอย่างซึ่งค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ B แบบขัดผิวกับไม่ขัดผิวมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างต่ำ ประการที่ 2 ชิ้นงานทดสอบเป็นชิ้นงานที่มาจาก การเตรียมชิ้นงานแผ่นเดียวกันนั้นแสดงว่าตัวอย่างได้รับอุณหภูมิขณะขึ้นรูปและเวลาการคงรูปเท่ากัน



ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300



ภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 50% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิการทดสอบของคอมปาวด์ B ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน 100% ด้วยเครื่อง Heat Flow meter รุ่น HFM300

ตารางที่ 12 แสดงค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ B ที่วัลคาไนซ์ชั้นสมบูรณ์แบบขัดผิวและไม่ขัดผิว

ตัวอย่าง	ผลค่าการนำความร้อน(W/mK)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	%ความคาดเคลื่อนของแบบขัดผิว
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ค่าการนำความร้อนของ %Cure 100%(W/mK) 50X33(Non-scrape)	0.2228	0.2207	0.2217	0.2217	0.001	3.33%
ค่าการนำความร้อนของ %Cure 100%(W/mK) 50X33 (Scrape)	0.2275	0.2303	0.2303	0.2294	0.002	

คอมปาวด์ A และ B ที่การวัลคาไนซ์เซชันผ่านไรร้อยละ 50 พบว่า ค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์ทั้งสองต่ำกว่าที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันเนื่องจากยางที่เกิดวัลคาไนซ์เซชันที่ไม่สมบูรณ์ในระหว่างปฏิกิริยาจะมีแก๊สที่เกิดขึ้นทำให้เกิดฟองอากาศที่แทรกอยู่ในเนื้อยางจึงเป็นผลให้ค่าการนำความร้อนนั้นต่ำลง

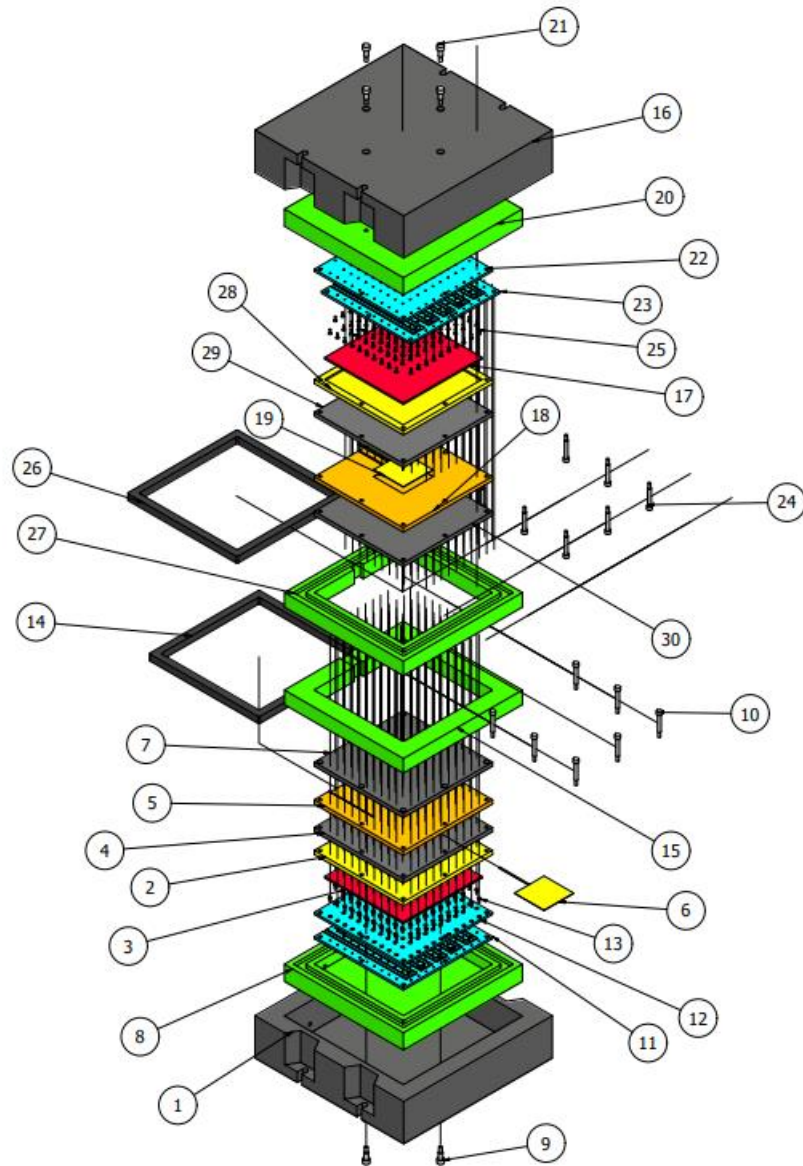
#### 4.5 ผลการออกแบบชุดต้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน

ชุดต้นแบบใช้หลักการหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่เนื่องจากวิธีการคำนวณและส่วนประกอบต่างๆ ไม่ซับซ้อน ส่วนวิธีการนำความร้อนในสถานะไม่คงที่นั้นไม่มีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนและต้องอาศัยเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ได้ค่าการนำความร้อนที่แม่นยำเพราะการวัดค่าการนำความร้อนในสถานะไม่คงที่จะใช้ระยะเวลาการทดสอบที่สั้นซึ่งแตกต่างจากการนำความร้อนสถานะคงที่ที่จะต้องรออุณหภูมิเข้าสู่สมดุลจึงทำให้เก็บค่าตัวแปรๆสำหรับการคำนวณ แม้การทดสอบในสถานะคงที่จะใช้ระยะเวลานานแต่อุณหภูมิการทดสอบที่ใช้ไม่ได้สูงพอ(อุณหภูมิ 60 °C)จนส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการวัลคาไนซ์เซชันขณะทำการทดสอบดังนั้นจึงใช้วิธีการหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่

การทดสอบค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่จะเริ่มต้นจากการให้ความร้อนกับตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างโดยให้ด้านอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างแตกต่างกันที่ 10°C หลังจากนั้นเตรียมอุณหภูมิในแนวแกน X, Y และ Z เพื่อตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ, ตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและตรวจสอบการสูญเสียความร้อนออกทางด้านข้าง เมื่ออุณหภูมิในทุกแนวแกนคงที่และมีผลต่างของอุณหภูมิที่ 10°C โดยจะควบคุมอุณหภูมิที่

ผิวชิ้นงานใช้ระบบน้ำหล่อเย็นหลังจากที่อุณหภูมิคงที่จะนำค่าการไหลผ่านของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือ Heat Flux มาเฉลี่ยแล้วนำค่าดังกล่าวมาคำนวณในสมการที่ 3

หลังจากทราบถึงหลักการและวิธีการคำนวณทางผู้วิจัยได้ออกชุดทดสอบโดยดัดแปลงจาก (CHEHEB, 2012) และ (เขาทอง, 2563) โดยชุดต้นแบบจะมีส่วนประกอบด้วยแม่พิมพ์รองรับจะทำหน้าที่รับแรงที่เครื่องอัดขนาด 300 ตัน ซึ่งจะใช้เหล็กเกรด S50C ที่ทางของอุตสาหกรรม เอส.เค.โพลีเมอร์ ใช้สำหรับการทำแม่พิมพ์ยางโดยเหล็กเกรด S50C, แบล็กกาไลท์ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนขณะทำการทดสอบเนื่องจากการทดสอบต้องให้อุณหภูมิของตัวอย่างนั้นคงที่ ซึ่งแบล็กกาไลท์มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำโดยค่าการนำความร้อนจะอยู่ที่ 0.14-0.15 W/mK, แผ่นหล่อเย็นจะกำหนดท่อหล่อเย็นไว้ที่ 6.45 mm จากการคำนวณท่อหล่อเย็นที่ใช้ในอุตสาหกรรม เอส.เค.โพลีเมอร์, แผ่นรองรับฮีตเตอร์ทำหน้าที่ป้องกันฮีตเตอร์ ถ่ายเทความร้อนไปยังชิ้นงานและเป็นแผ่นที่ฝังเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ที่มีค่าความคาดเคลื่อนที่ต่ำซึ่งมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 0.5K$  ส่วนแผ่นพิมพ์แผ่นรองรับจะเลือกใช้อลูมิเนียมเกรด 7075 ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ทำแม่พิมพ์และมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าเหล็ก S50C ที่ทางอุตสาหกรรมใช้ในการทำแม่พิมพ์, แผ่นฮีตเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนโดยฮีตเตอร์มีขนาด 800 W และมีความกว้าง 265 mm ความยาว 265 mm ความหนา  $3.5 \pm 1$  mm ซึ่งผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด อินเตอร์ ฮีท แมนูแฟคเจอร์ริง โดยการกำหนดขนาดฮีตเตอร์จะต้องให้การกระจายความร้อนเต็มทั่วแผ่นโดยเหตุผลที่ไม่ใช้ขนาดฮีตเตอร์ตามขนาดชิ้นงานเนื่องจากต้องเผื่อระยะยึดของแผ่นฮีตเตอร์และให้แผ่นรองรับมาป้องกันความเสียหายของฮีตเตอร์, แผ่นรองรับ Heat Flux sensor ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนไปยัง Heat Flux sensor และป้องกันไม่ให้เทอร์โมคัปเปิลโดนกับตัวเซนเซอร์, แผ่น Heat Flux sensor ใช้ของ Eko ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าการนำความร้อนในเครื่อง HFM โดยรุ่นที่ใช้จะเป็น HS-10 เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าขนาดชิ้นงานทดสอบเพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่ได้จากเซนเซอร์ที่เป็นค่าที่ความร้อนจะไหลผ่านไปยังชิ้นงานประกอกับขนาดของเซนเซอร์ค่อนข้างบางทำให้ไม่ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนไปยังตัวอย่าง, แผ่นวัดอุณหภูมิทำหน้าที่วัดอุณหภูมิในแนวแกน X และแนวแกน Y ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ด้วยเหตุผลเดียวกันกับจุดที่กำหนดอุณหภูมิฮีตเตอร์, แผ่นปิดทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของเทอร์โมคัปเปิล และส่วนสุดท้ายคือชิ้นงานตัวอย่างที่ได้อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C518 และขนาดชิ้นงานตามเครื่องทดสอบ Heat Flow Meter รุ่น HFM300 โดยขนาดชิ้นงานทดสอบที่ใช้สำหรับชุดทดสอบจะมีความกว้าง 300 mm ความยาว 300 mm และความหนา 25 mm



ภาพที่ 26 แสดงส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ของชุดต้นแบบ

ตารางที่ 13 แสดงส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ของชุดต้นแบบ

PARTS LIST				
ITEM	PART NUMBER	SIZE	MATERIAL	QTY
1	แม่พิมพ์รองรับล่าง	500 X 500 X 122.5 MM	S50C	1
2	แผ่นรองรับ Heater ล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
3	HEATER ล่าง	265 X 265 X 4.5 MM	-	1
4	รองรับ Heat flux sensor ล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
5	แผ่นฉนวนลึกลงล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
6	Heat flux sensor ล่าง	100 X 100 X 0.5 MM	-	1
7	แผ่นยึดล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
8	ฉนวนล่างส่วนล่าง	400 X 400 X 50 MM	Bakelite	1
9	Bolt M10 ล่าง		STEEL	4
10	Bolt 2 ล่าง		STEEL	7
11	แผ่น Cooling 1 ล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
12	แผ่น Cooling 2 ล่าง	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
13	Bolt 3 ล่าง (สกรูหัวเตเปอร์)		STEEL	119
14	ชุดล็อคฉนวนล่าง	370 X 370 X 20 MM	Bakelite	1
15	ฉนวนล่างส่วนบน	400 X 400 X 42.5 MM	Bakelite	1
16	แม่พิมพ์รองรับส่วนบน	500 X 500 X 122.5 MM	S50C	1
17	HEATER บน	265 X 265 X 4.5 MM	-	1
18	แผ่นฉนวนลึกลงบน	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
19	Heat flux sensor บน	100 X 100 X 0.5 MM	-	1
20	ฉนวนบนส่วนล่าง	400 X 400 X 50 MM	Bakelite	1
21	Bolt M10 บน		STEEL	4
22	ชุด Cooling 1 บน	300 X 300 X 6 MM	Aluminium 7075	1
23	ชุด Cooling 2 บน	300 X 300 X 6 MM	Aluminium 7075	1
24	Bolt 2 บน		STEEL	7
25	Bolt 3 บน (สกรูหัวเตเปอร์)		STEEL	119
26	ชุดล็อคฉนวนบน	370 X 370 X 12 MM	Bakelite	1
27	ฉนวนบนส่วนบน	400 X 400 X 50 MM	Bakelite	1
28	แผ่นรองรับ Heater บน	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
29	รองรับ Heat flux sensor บน	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1
30	แผ่นยึดบน	300 X 300 X 12 MM	Aluminium 7075	1

ตารางที่ 14 ความแตกต่างของคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด

**Tolerance table**

TC	Measuring range class 1	Tolerance
T	-50...+350 °C	-50...+125 °C $\pm 0.5$ °C 125...+350 °C $\pm 0.004 \times T^\circ$
J	-50...+750 °C	-50...+375 °C $\pm 1.5$ °C 375...+750 °C $\pm 0.004 \times T^\circ$
K	-50...+1000 °C	-50...+375 °C $\pm 1.5$ °C 375...+1000 °C $\pm 0.004 \times T^\circ$
N	-50...+1000 °C	-50...+375 °C $\pm 1.5$ °C 375...+1000 °C $\pm 0.004 \times T^\circ$
S	0...+1600 °C	0...+1100 °C $\pm 1$ °C 1100...+1600 °C $\pm (1 + 0.003 \times (T^\circ - 1100))$



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การประมาณค่าการนำความร้อนของคอมปาวด์

การประมาณค่าการนำความร้อนแบบขนานสามารถประเมินได้เบื้องต้นสำหรับค่าการนำความร้อนโดยรวมของคอมปาวด์ที่ผ่านการวัดค่าไนซ์เซชันแล้วแต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการทั้งขนาดของอนุภาค การกระจายตัว ปฏิกริยาเคมีระหว่างกระบวนการทำให้ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงไป

#### 5.2 การทดลองสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

ยางคอมปาวด์ที่ใส่สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนที่เพิ่มตามสัดส่วนโดยปริมาตร ส่วนยางคอมปาวด์ที่ใส่สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าการนำความร้อนที่เพิ่มซึ่งมีปัจจัยของการกระจายตัวของซิลิกามาเกี่ยวข้อง และส่วนยางคอมปาวด์ที่เพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่าการนำความร้อนที่เพิ่ม ส่วนขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กหรือเกรดของคาร์บอนแบล็กไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน(กล่าวถึงเฉพาะขนาดของคาร์บอนแบล็กเพียงอย่างเดียว) ส่วนระบบวัลคาไนซ์เซชันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ(ในกรณีที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี) และปริมาณซิงค์ออกไซด์ไม่มีต่อค่าการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนน้ำมันมีต่อค่าการนำความร้อนในทางอุตสาหกรรมอย่างมาก เพราะใช้ในปริมาณที่สูง

#### 5.3 ระดับการวัลคาไนซ์เซชันและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน

เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์เซชันค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นและยางคอมปาวด์ที่มีทดสอบด้วย ODR แล้วเกิดกราฟแบบ Reversion ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์เมื่อผ่านการคงรูปจะต่ำลง ส่วนปฏิกริยาเคมีจะส่งผลต่อค่าการนำความร้อนที่ลดลงตามการทดสอบค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่ผ่านการวัลคาไนซ์เซชันร้อยละ 50

#### 5.4 การออกแบบชุดต้นแบบสำหรับหาค่าการนำความร้อน

การหาค่าการนำความร้อนจะใช้การทดสอบหาค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่ โดยชุดต้นแบบจะใช้วิธีการคำนวณตามกฎของฟูเรียร์ ซึ่งการทดสอบจำเป็นต้องให้เกิดการนำความร้อนในทิศทางเดียวและไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกทางด้านข้างซึ่งจะควบคุมด้วยฉนวนที่มีค่าการนำ



ความร้อนอยู่ที่ 0.14-0.15 W/mK ส่วนการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบไปยังตัวอย่างควรมีความสม่ำเสมอซึ่งสามารถตรวจสอบจากการวัดอุณหภูมิในแนวแกนเมื่ออุณหภูมิคงที่จึงนำค่าการไหลของความร้อนต่อหนึ่งหนึ่งพื้นที่มาใช้ในการคำนวณ

### 5.5 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาต่อจากนี้ควรทดสอบปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดวัลคาไนซ์เซชันที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนและควรจัดทำชุดทดสอบเพื่อทดสอบความแม่นยำของการหาค่าการนำความร้อนในสภาวะคงที่โดยแนะนำให้วางที่ทราบค่าการนำความร้อนเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ



## บรรณานุกรม

- CHEHEB, Z. (2012). *Mesure des propriétés thermiques des mélanges à base de caoutchouc dans les conditions de mise en œuvre* University of Nantes].
- Gao, G., Zhang, Z., Li, X., Qingjie, M., & Yuansuo, Z. (2009). An excellent ablative composite based on PBO reinforced EPDM. *Polymer Bulletin*, 64, 607-622.  
<https://doi.org/10.1007/s00289-009-0204-2>
- Hewitt, N. (2007). CHAPTER 1 - SILICA AS A REINFORCING FILLER. In N. Hewitt (Ed.), *Compounding Precipitated Silica in Elastomers* (pp. 1-23). William Andrew Publishing.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-081551528-9.50003-5>
- Kerschbaumer, R. C., Stieger, S., Gschwandl, M., Hutterer, T., Fasching, M., Lechner, B., Meinhart, L., Hildenbrandt, J., Schritteser, B., Fuchs, P. F., Berger, G. R., & Friesenbichler, W. (2019). Comparison of steady-state and transient thermal conductivity testing methods using different industrial rubber compounds. *Polymer Testing*, 80, 106121.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106121>
- Song, J.-p., Tian, K.-y., Ma, L.-x., Li, W., & Yao, S.-c. (2019). The effect of carbon black morphology to the thermal conductivity of natural rubber composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 184-191.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.078>
- Suntako, R. (2017, 21–23 October 2017). Effect of synthesized ZnO nanoparticles on thermal conductivity and mechanical properties of natural rubber. In Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Engineering Materials (ICIEM 2017), Philadelphia, PA, USA.
- Zied Cheheb, P. M., Alain Sarda, Re´mi Deterre. (2012). Thermal Conductivity of Rubber Compounds Versus the State of Cure. *Macromolecular Materials and Engineering*, 228-236. <https://doi.org/DOI: 10.1002/mame.201100127>
- เขาทอง, ก. (2563). ชุดทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผ้าทอทางสถาปัตยกรรม [Physical Sciences]. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 31(1), 145-154.
- วินัสรินทร์ อินทร์ดะ, อ. เ., ชาคริต สิริสิงห์ และ พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2551). อิทธิพลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติของยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดีน (EPDM). *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 24(1), 111-124.

สมเจตน์ พิชรพันธ์, น., รัชดาภรณ์ สุดโต, น., ธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนขันธุ์, น., & วัชรพงษ์ ชูแก้ว, น. (2010). การศึกษา  
พฤติกรรมการนำความร้อนของสารประกอบอย่างธรรมชาติในระหว่างกระบวนการ  
ดัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา: ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์.  
สุดาเกียรติ์กำลังวงศ์, ภ. ว. แ. (2560). การดัดแปรยางธรรมชาติด้วยวิธีการทางเคมี : การทบทวนวรรณกรรมอย่าง  
กระชับ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 40(4), 491-508.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุทธิพัฒน์ กมลสุทธิไพจิตร
วัน เดือน ปี เกิด	29 สิงหาคม 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลมงกุฎวัฒนะ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต(เทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	111/443 หมู่บ้านเปี่ยมสุข ซอย5 หมู่5 ตำบลบางเดื่อ อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY