

ผลของสมบัติพินอติกเรซินผสมต่อประสิทธิภาพของวัสดุเสียดทาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of mixed phenolic resin properties on friction material performance



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสมบัติพีนอลิกเรซินผสมต่อประสิทธิภาพของวัสดุ เสียดทาน
โดย	น.ส.วรัชยา เอกวิริยะภิชาติ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ)	

วรรษยา เอกวิริยะภิกษาคติ : ผลของสมบัติฟีนอลิกเรซินผสมต่อประสิทธิภาพของวัสดุเสียดทาน. ( Effect of mixed phenolic resin properties on friction material performance) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินผสมต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของผ้าเบรก โดยฟีนอลิกเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เรซินเอ และเรซินบี ในสัดส่วนของเรซินเอและเรซินบีที่แตกต่างกัน คือ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินบีในสัดส่วนฟีนอลิกเรซินผสมส่งผลให้ค่าระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสมมีค่ามากขึ้น ซึ่งค่าระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสมที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ อุณหภูมิการสลายตัว ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าอัตราการสึกหรอของผ้าเบรก แต่ส่งผลต่อค่าความเป็นรูพรุน ค่าความแข็ง ค่ายังมอดุลัส ค่าความแข็งแรงแบบเฉือนและค่าความเหนียวของผ้าเบรก โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอผ้าเบรกในสัดส่วนการใช้เรซินเอต่อเรซินบีเท่ากับ 25:75 (ตัวอย่าง R4) ซึ่งให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟีนอลิกเรซินชนิดเอที่ใช้ในปัจจุบัน (ตัวอย่าง R1) อีกทั้งการใช้ผ้าเบรก R4 ช่วยให้ทางบริษัทประหยัดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 90,750 บาทต่อปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอร์

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6072216823 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Phenolic resin, Brake pad, Friction materials

Waratchaya Eakviriyapichat : Effect of mixed phenolic resin properties on friction material performance. Advisor: Assoc. Prof. SIRILUX POOMPRADUB, Ph.D.

The objective of this research is to study the effect of mixed phenolic resin properties on the physical, mechanical and thermal properties of brake pads. Phenolic resins used in this study were resin A and resin B, the different ratios of which were 100:0, 75:25, 50:25, 25:75 and 0:100. The results showed that the increase in resin B content in mixed phenolic resin resulted in greater flow distance. The flow distance of different mixed phenolic resins did not affect the apparent specific gravity, degradation temperature, friction coefficient and wear rate but they affected the porosity, hardness, Young's modulus, shear strength, and toughness of brake pads. In this study, the mixed phenolic resin with resin A to resin B of 25:75 (sample R4) gave the superior mechanical properties to the current phenolic resin (sample R1). Moreover, the use of R4 brake pad can save the production cost of 90,750 THB per year.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ภายนอก ที่ได้สละเวลาอันมีค่าและให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการดำเนินเอกสารที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ คุณกฤษณา แก้วลบล และคุณกมลรัตน์ เพ่งพินิจ จากบริษัท คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือเรื่องการขึ้นรูปชิ้นงานและทดสอบชิ้นงานเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณทุนสำหรับการศึกษาและวิจัยภายใต้โครงการย่อยที่ 1/2560 โครงการ “ยกระดับความสามารถของอุตสาหกรรมขนาดกลางด้านงานวิจัย พัฒนาและอุตสาหกรรม (Research Development and Industrialization capability of Medium enterprise) ภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือ โครงการยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม” จากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

วรรษยา เอกวิริยะภิกษาคติ

## สารบัญ

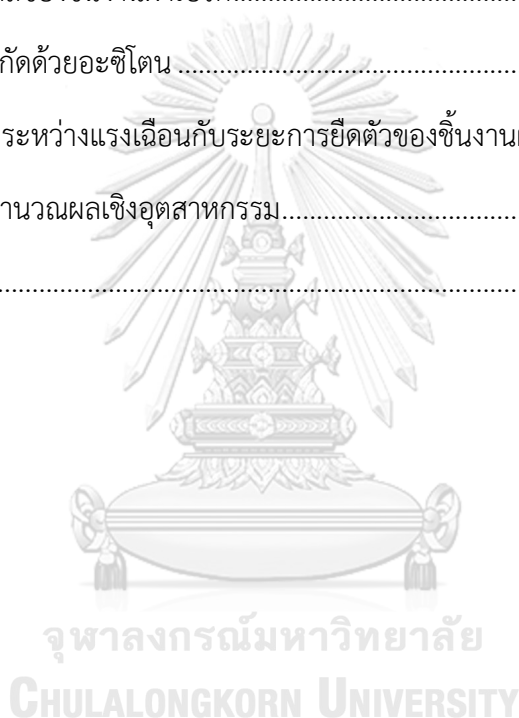
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบเบรกของรถยนต์.....	4
2.1.1 หน้าที่ของเบรกรถยนต์.....	4
2.1.2 ชนิดของเบรก.....	5
2.1.3 การใช้แรงเสียดทานในการเบรกรถ .....	6
2.1.4 แรงเสียดทานของผ้าเบรก .....	8
2.1.5 ความร้อน.....	9
2.1.6 ผลที่เกิดจากน้ำหนักและความเร็วของรถต่อการเบรก.....	9
2.1.7 ผลของยางและถนนต่อการเบรก.....	10
2.1.8 สมรรถนะเบรก.....	11

2.1.9 ลำดับเวลาของการทำงานการเบรก.....	12
2.2 ผ้าเบรก .....	13
2.2.1. สารยึดติด .....	13
2.2.2. เส้นใย.....	13
2.2.3. ผงขัด.....	14
2.2.4. สารตัวเติม .....	15
2.2.5. สารหล่อลื่น .....	15
2.3 ฟีนอลิกเรซิน .....	16
2.3.1 วิธีเตรียมโมโนเมอร์ฟีนอล พอร์มาลดีไฮด์ และเฮกซาเมธิลีนเตตระมีน.....	16
2.3.2 วิธีเตรียมเรซิน.....	20
2.3.3 การเกิดการเชื่อมโยง.....	25
2.3.4 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ .....	27
2.3.5 สมบัติของฟีนอลิกเรซินที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตผ้าเบรก .....	28
2.4 กระบวนการผลิตวัสดุเสียดทาน .....	29
2.5 การเฟด .....	29
2.5.1 แดดเฟด.....	29
2.5.2 กรีนเฟด.....	30
2.5.3 เบรกฟู๊ดเฟด .....	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	33
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	33
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.3.1 การทดสอบระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสม.....	35



3.3.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสม.....	35
3.3.3 การเตรียมชิ้นงาน.....	36
3.3.4 การทดสอบความถ่วงจำเพาะปรากฏของชิ้นงาน.....	39
3.3.5 การคำนวณความเป็นรูพรุนของชิ้นงาน.....	39
3.3.6 การทดสอบความแข็งของชิ้นงาน.....	40
3.3.7 การทดสอบไดนามิกมอดุลัสของชิ้นงาน.....	40
3.3.8 การทดสอบสมบัติความทนแรงเฉือน.....	41
3.3.9 การทดสอบปริมาณการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซิน.....	42
3.3.10 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของผ้าเบรก.....	44
3.3.11 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกของชิ้นงาน.....	44
3.3.12 การตรวจสอบสัญญาณวิทยุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
4.1 สมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรก.....	48
4.2 สมบัติเชิงกลของผ้าเบรก.....	49
4.3 สมบัติเชิงความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสม.....	52
4.4 การสกัดอะซิโตนของผ้าเบรก.....	53
4.5 ความเสถียรทางความร้อนของผ้าเบรก.....	54
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรก.....	54
4.7 ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรก.....	58
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุน.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	61
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	66

ภาคผนวก ก พฤติกรรมทางความร้อนของพีนอลิกเรซินผสมด้วย เครื่องดีฟเฟอร์นเซียสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ .....	67
ภาคผนวก ข อุณหภูมิการสลายตัวของผ้าเบรกด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก .....	71
ภาคผนวก ค สัณฐานวิทยา ก่อนและหลังการทดสอบการสึกของชิ้นงาน .....	75
ภาคผนวก ง ความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานผ้าเบรก .....	78
ภาคผนวก จ ความแข็งของชิ้นงานผ้าเบรก .....	82
ภาคผนวก ฉ มอดูลัสของชิ้นงานผ้าเบรก .....	86
ภาคผนวก ช การสกัดด้วยอะซิโตน .....	89
ภาคผนวก ซ กราฟระหว่างแรงเสียดทานกับระยะการยึดตัวของชิ้นงานผ้าเบรก .....	93
ภาคผนวก ด การคำนวณผลเชิงอุตสาหกรรม .....	119
ประวัติผู้เขียน .....	122



## สารบัญญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การกดกำมเบรกลงบนล้อเพื่อให้ล้อหยุดหมุน .....	4
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์กับกำลังที่ใช้ในการหยุดรถและการ เปรียบเทียบแรงเหยียบเบรกกับแรงบีบผ้าเบรกของดิสเบรก .....	5
รูปที่ 2.3 ดรัมเบรก (Drum brake) .....	5
รูปที่ 2.4 ดิสเบรก (Disc brake) .....	6
รูปที่ 2.5 ลักษณะการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน .....	6
รูปที่ 2.6 ลักษณะการกดกำมเบรกบนดรัมเบรกและการกดแผ่นเบรกบนดิสเบรก.....	7
รูปที่ 2.7 ผู้หญิงที่สวมรองเท้าส้นแหลมทำให้เกิดรอยกดบนพื้นในขณะที่เท้าข้างจะไม่ทำให้เกิดรอยกด ขึ้น และการจับเพลลาที่หมุนอยู่ด้วยแรงของมือทั้งสองข้าง .....	8
รูปที่ 2.8 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	8
รูปที่ 2.9 การแผ่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเบรก .....	9
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบระยะทางเบรก เมื่อรถยนต์มีประสิทธิภาพเบรก 60 เปอร์เซ็นต์ กับ 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรถยนต์แล่นด้วยความเร็วแตกต่างกัน .....	10
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อใหญ่กับเล็ก .....	11
รูปที่ 2.12 ช่วงเวลาและระยะทางที่ใช้ในการเบรกให้รถหยุดแต่ละครั้ง .....	13
รูปที่ 2.13 เส้นใยแร่ใยหิน (Asbestos).....	14
รูปที่ 2.14 ลักษณะ รูปร่าง ของอนุภาคของผงขัด.....	15
รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบชั้น.....	15
รูปที่ 2.16 ปฏิกริยาในกระบวนการซิลโฟเนชัน.....	18
รูปที่ 2.17 ปฏิกริยากระบวนการ Raschig.....	18
รูปที่ 2.18 ปฏิกริยากระบวนการ DOW.....	19
รูปที่ 2.19 ฟีนอลรูปแบบอื่น ๆ .....	19

รูปที่ 2.20 ปฏิกริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไปในสภาวะเบส .....	21
รูปที่ 2.21 ปฏิกริยาควบแน่นของ O- และ p- methylolphenols .....	21
รูปที่ 2.22 ลักษณะของ Resol.....	22
รูปที่ 2.23 ปฏิกริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไปในสภาวะกรด.....	22
รูปที่ 2.24 ปฏิกริยาการเกิด dihydroxydiphenyl methane.....	23
รูปที่ 2.25 ไอโซเมอร์ของ dihydroxydiphenyl methane .....	23
รูปที่ 2.26 ลักษณะของ Novolac.....	24
รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงการเตรียมโนโวแลกเรซิน .....	25
รูปที่ 2.28 โครงร่างสายโซ่ของรีโซลเรซิน.....	26
รูปที่ 2.29 โครงร่างสายโซ่ของโนโวแลกเรซิน .....	26
รูปที่ 2.30 ด้ามจับเตารีด และด้ามจับภาชนะต่าง ๆ ในครัวที่ทำด้วยฟีนอลิกเรซิน.....	27
รูปที่ 2.31 กระบวนการทั่วไปในการผลิตวัสดุเสียดทาน.....	29
รูปที่ 2.32 ลักษณะการคายแก๊สขณะการใช้งาน .....	30
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ (ก) ขั้นตอนการอัดแท่งฟีนอลิกเรซิน และ (ข) กระจกเอียง 45 องศาับระนาบ .....	35
รูปที่ 3.2 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ .....	36
รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมชิ้นงาน.....	38
รูปที่ 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความถ่วงจำเพาะ .....	39
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง .....	40
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัส .....	41
รูปที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ .....	41
รูปที่ 3.8 เครื่องยูนิเวอร์แซล และลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน.....	41
รูปที่ 3.9 การสกัดด้วยอะซิโตน .....	43
รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก.....	44

รูปที่ 3.11 ชิ้นงานผ้าเบรกขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 7 มิลลิเมตร ..... 45

รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและทดสอบอัตราการสึก..... 46

รูปที่ 3.13 เครื่องเบรกไดนาโมมิเตอร์ ..... 46

รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 47

รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรกโดยใช้สัดส่วนพินอลิกเรซินผสม เรซินเอต่อเรซินปีที่แตกต่างกัน ..... 48

รูปที่ 4.2 ค่าระยะการไหลของพินอลิกเรซินผสมที่สัดส่วนเรซินเอต่อเรซินปีแตกต่างกัน ..... 49

รูปที่ 4.3 แบบจำลองลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล ..... 51

รูปที่ 4.4 DSC เทอร์โมแกรมของพินอลิกเรซินผสมแต่ละสัดส่วน ..... 52

รูปที่ 4.5 ปริมาณสารที่สกัดได้จากการสกัดอะซิโตน..... 53

รูปที่ 4.6 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าเบรก (ก) Weight loss และ (ข) Derivative weight ..... 55

รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกจากการทดสอบด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ใน  
ภาวะเฟดครั้งที่ 1 (ก) และเฟดครั้งที่ 2 (ข)..... 57

รูปที่ 4.8 สันฐานวิทยาของผ้าเบรกก่อน (ก) (ค) (จ) (ช) (ฉ) และหลัง (ข) (ง) (ฉ) (ญ) การทดสอบ  
หาอัตราการสึกของผ้าเบรก R1, R2, R3, R4 และ R5 ตามลำดับที่กำลังขยาย 500 เท่า 59

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดพินอลิกเรซินที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	28
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	34
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนองค์ประกอบสารของวัสดุเสียดทาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	37
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกที่มีสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบีแตกต่างกัน .....	50
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดสอบโดยเครื่อง Constant speed type friction test machine.....	56
ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรก.....	58
ตารางที่ 4.4 ต้นทุนค่าใช้จ่ายพินอลิกเรซินต่อปี.....	60
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสมบัติของผ้าเบรกชนิด R1 และ ผ้าเบรกชนิด R4 ต่อผลกระทบต่อสมบัติ ต่าง ๆ ของผ้าเบรก.....	62

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในด้านความปลอดภัยของรถยนต์ ผ้าเบรกถูกจัดเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ โดยหน้าที่ของผ้าเบรคนั้นใช้ในการชะลอความเร็วของรถยนต์หรือหยุดรถขณะที่กำลังใช้งาน หลักการทำงานของผ้าเบรก คือ การเปลี่ยนพลังงานจลน์ของจานเบรกที่กำลังหมุนไปเป็นพลังงานความร้อนจากการเกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีของผิวหน้าผ้าเบรกกับจานเบรก เรียกค่าที่ได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient;  $\mu$ ) ผ้าเบรกจัดเป็นวัสดุเสียดทานประเภทหนึ่ง อยู่ในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) องค์ประกอบของวัสดุเสียดทานมีมากกว่า 10 ชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ได้แก่ สารยึดติด (Binder) เส้นใยเสริมแรง (Reinforced fiber) สารหล่อลื่น (Lubricant) ผงขัด (Abrasive) และสารตัวเติม (Filler) ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ กว่า 10 ชนิดนี้ถูกยึดติดกันและสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ด้วยสารยึดติด โดยทั่วไปนิยมใช้ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เนื่องจากมีราคาถูก สามารถยึดติดองค์ประกอบอื่น ๆ ได้ดี อีกทั้งยังให้สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการขัดถูที่ดี โดยฟีนอลิกเรซินเป็นสารเพียงชนิดเดียวที่เกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการผลิตผ้าเบรก แต่บ่อยครั้งปัญหาที่พบในผ้าเบรกประเภทนี้เกิดขึ้นขณะผู้ใช้งานเหยียบเบรกเป็นเวลานานและทำให้เกิดความร้อนบริเวณผ้าเบรกและจานเบรก โดยความร้อนที่เกิดขึ้นสูงถึง 500 องศาเซลเซียส เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกลดลงหรือเรียกการเกิดลักษณะนี้ว่า การเฟด (Fade phenomenon) หนึ่งในปัจจัยของการเกิดเฟด คือ ฟีนอลิกเรซินที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดีพอจากกระบวนการผลิต ทำให้ขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของเรซินได้ผลพลอยได้เป็นแก๊สแอมโมเนีย แก๊สที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรกลดลงเนื่องจากแก๊สแอมโมเนียที่ออกมาจากตัวเนื้อผ้าเบรกดันให้ตัวผ้าเบรกและจานเบรกออกจากกัน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกลดลง และทำให้ความสามารถในการชะลอหรือหยุดรถหายไปก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

การศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับผ้าเบรกและกระบวนการผลิตผ้าเบรก ปัจจุบันโรงงานผลิตผ้าเบรกกังยังมีเกณฑ์ในการเลือกฟีนอลิกเรซินที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีคุณภาพและไม่เกิดปัญหาขณะใช้งาน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่มีต่อประสิทธิภาพของวัสดุเสียดทาน สมบัติของฟีนอลิกเรซินที่ใช้ในการพิจารณา คือ ระยะเวลาไหลซึ่งอาจส่งผลต่อความเป็นรูพรุนและค่าความแข็งของวัสดุเสียดทาน

และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาไหลกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ฟีนอลิกเรซินที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตวัสดุเสียดทาน และได้วัสดุเสียดทานมีคุณภาพตามที่ต้องการ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่มีต่อวัสดุเสียดทาน โดยพิจารณาอิทธิพลของระยะไหล (Flow distance) ต่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซินและสมบัติของวัสดุเสียดทาน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสารยึดติดที่ใช้ในผ้าเบรก คือ ฟีนอลิกเรซิน

1.3.2 ใช้ฟีนอลิกเรซินที่ไม่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง (Straight phenolic resin) 2 ชนิด มีสมบัติดังนี้

- **ชนิดที่ 1** เรซินเอ (Resin A) ระยะการไหล 17-30 มิลลิเมตร ค่าเวลาความเป็นเจล (Gelation time) 52-72 วินาที และปริมาณเฮกซามีน (% Hexamine) 5.5-6.6 เปอร์เซ็นต์
- **ชนิดที่ 2** เรซินบี (Resin B) ระยะการไหล 30-50 มิลลิเมตร ค่าเวลาความเป็นเจล 70-90 วินาที และปริมาณเฮกซามีน 7.3-8.3 เปอร์เซ็นต์

1.3.3 สัดส่วน Resin A:Resin B ที่ศึกษาเป็น 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ

1.3.4 วิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพของฟีนอลิกเรซินผสมด้วยการทดสอบระยะการไหลของเรซินเพื่อพิจารณาสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำเรซินมาผสมตามสัดส่วน

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของฟีนอลิกเรซินแต่ละสัดส่วนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeters; DSC) เพื่อพิจารณาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของเรซินผสม

1.3.6 วิเคราะห์สมบัติของผ้าเบรกที่ได้จากการปรับสัดส่วนของฟีนอลิกเรซิน ดังนี้ สมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ความเป็นรูพรุนของชิ้นงาน (Porosity) ความแข็งของชิ้นงาน (Hardness) และค่าไดนามิกมอดุลัส (Dynamic modulus) สมบัติเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงเฉือน (Shear strength) และสมบัติเชิงความร้อนของผ้าเบรกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA)



1.3.7 ศึกษาประสิทธิภาพของผ้าเบรกด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกของวัสดุเสียดทานผ้าเบรก จากเครื่องทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุเสียดทาน (Constant speed type friction test machine) และเครื่องเบรกไดนาโมมิเตอร์ (Brake Dynamometer) และวิเคราะห์ลักษณะการสึกของผ้าเบรกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเลือกชนิดของฟีนอลิกเรซินที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตวัสดุเสียดทานตลอดจนสมบัติของวัสดุเสียดทานมีคุณภาพตามที่ต้องการ

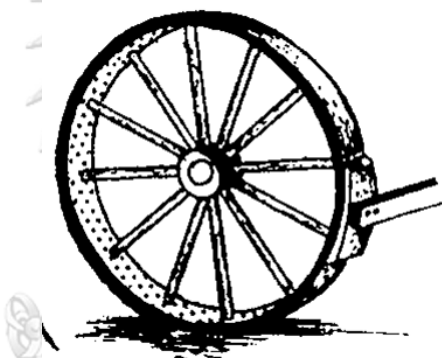


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบเบรกของรถยนต์

ระบบเบรก (Brake systems) เป็นระบบที่สำคัญที่สุดอันดับแรกระบบหนึ่งของยานยนต์ เพราะเกี่ยวกับความปลอดภัยและชีวิตของผู้ใช้ยานยนต์ ผู้ร่วมใช้ถนนหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง ในสมัยโบราณ การประดิษฐ์เบรกของยานล้อเลื่อนต่าง ๆ ใช้หลักการง่าย ๆ โดยการกดก้ามเบรกลงบนล้อเพื่อให้ล้อหยุดหมุนเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในปัจจุบันรถยนต์ใช้เป็นล้อสบูบลมและถูกใช้บรรทุกขนส่งของเป็นจำนวนมาก ระยะทางไกล และแล่นด้วยความเร็วสูง ด้วยเหตุนี้ระบบเบรก (Brake System) ของรถยนต์ ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นระบบเบรกจึงมีความซับซ้อนและต้องได้รับการบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง [1]



รูปที่ 2.1 การกดก้ามเบรกลงบนล้อเพื่อให้ล้อหยุดหมุน [1]

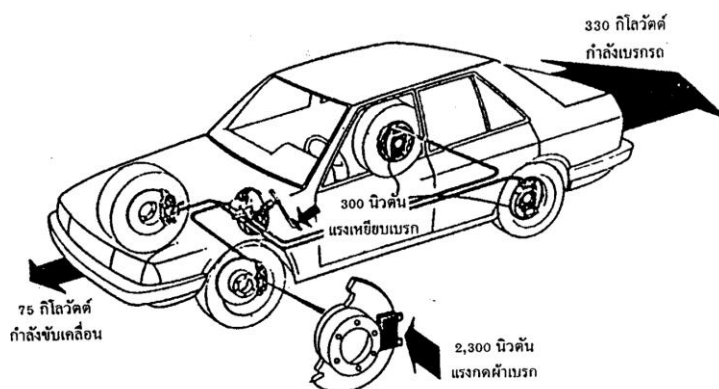
#### 2.1.1 หน้าที่ของเบรกรถยนต์

ระบบเบรกของรถยนต์มีหน้าที่ 3 อย่าง ดังนี้

- ลดความเร็วของรถ หรือรักษาความเร็วของรถให้คงที่ขณะรถแล่นลงจากเขา หรือทางลาด
- ทำให้รถหยุด
- ยึดรถให้อยู่กับที่ในกรณีที่รถจอดอยู่บนทางลาดขณะที่ไม่มีคนขับ

ระบบเบรกของรถยนต์ปัจจุบันได้รับการพัฒนาออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพและการใช้งานการเบรก การทำให้รถหยุดต้องใช้กำลังถึง 600-800 แรงแม้มากระทำให้เพื่อให้รถยนต์สามารถหยุดได้ในระยะ 1 ใน 6 ของระยะทางที่รถใช้เร่งให้เร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุดของรถนั้น โดยขณะเบรกกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะต้องมีน้อยกว่ากำลังในการเบรก

และแรงเหยียบเบรกจะถูกส่งผ่านระบบไฮดรอลิกไปยังคาร์ลิปเปอร์ทำให้แรงกดที่ผ้าเบรกของดิสเบรกมีค่ามากกว่าแรงที่ใช้ในการเหยียบเบรก ดังแสดงในรูปที่ 2.2

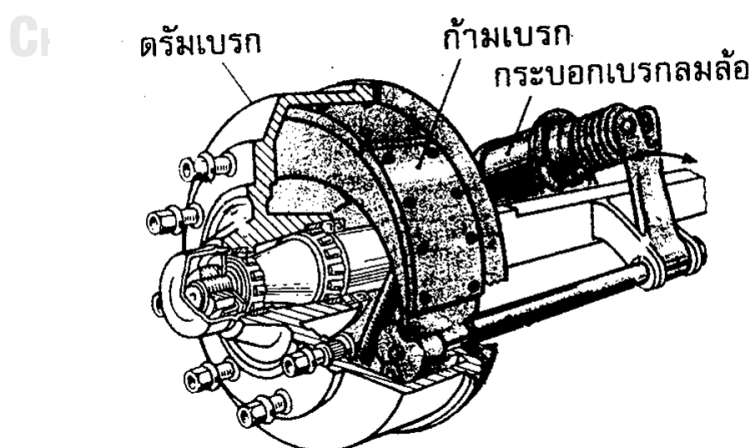


รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์กับกำลังที่ใช้ในการหยุดรถและการเปรียบเทียบแรงเหยียบเบรกกับแรงบีบผ้าเบรกของดิสเบรก [1]

### 2.1.2 ชนิดของเบรก

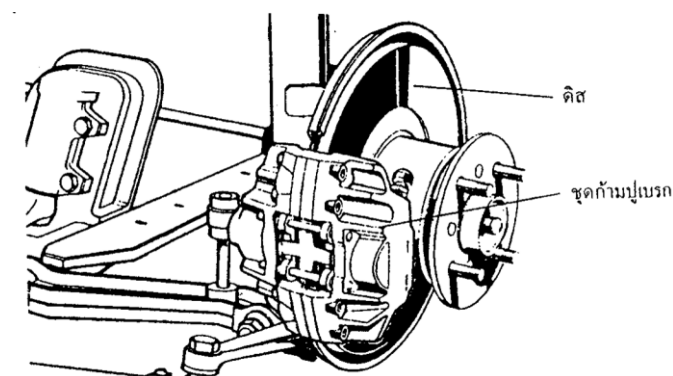
แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- **ดรัมเบรก (Drum Brake)** มีรูปร่างเป็นรูปกระบอกกลมสั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก้ามเบรกสองตัวถูกยึดอยู่ภายในดรัมเบรกและทำงานโดยถ่างออกตามทิศทางเคลื่อนที่ของรถยนต์อัดตัวอยู่กับผิวด้านในของดรัมในแนวเส้นรอบวง



รูปที่ 2.3 ดรัมเบรก (Drum brake) [1]

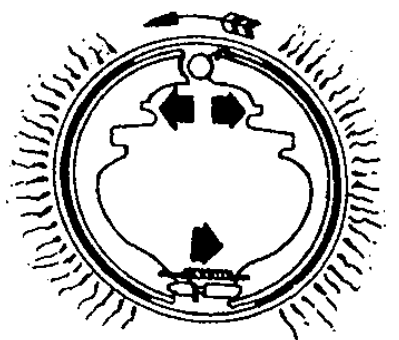
- **ดิสเบรก (Disc Brake)** มีรูปร่างเป็นจานกลมที่มีผิวเรียบทั้งสองข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ผ้าเบรกทำงานเป็นมุมฉากกับตัวดิสเบรกและทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ผ้าเบรกจะถูกบีบเข้าทั้งสองข้างบนผิวเรียบของดิสเบรกโดยตัวคาลิปเปอร์หรือชุดก้ามปูเบรกเหมือนกับการบีบปากกาจ็บบงาน



รูปที่ 2.4 ดิสเบรก (Disc brake) [1]

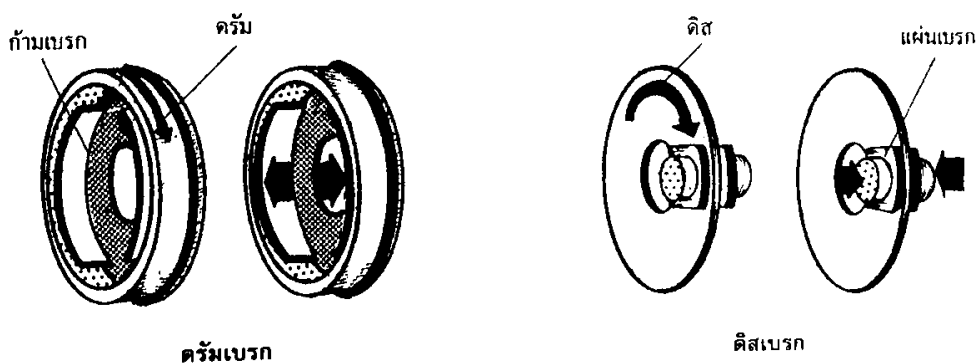
### 2.1.3 การใช้แรงเสียดทานในการเบรก

แรงเสียดทานเป็นวิถีธรรมชาติที่หน่วงการเคลื่อนที่ โดยแรงเสียดทานกระทำบนผิวของวัตถุที่จะต้านการเคลื่อนที่และเปลี่ยนพลังงานจากการเคลื่อนที่เป็นพลังงานความร้อน ตัวอย่างของแรงเสียดทานในชีวิตประจำวัน เช่น แรงเสียดทานระหว่างเท้าและพื้นถนนเราสามารถเดินได้และแรงเสียดทานทำให้เบรกสามารถหยุดรถได้โดยการทำให้อล้อหยุดหมุนและยางล้อรถถูไปบนผิวถนน การเบรกเป็นการนำเอาการเคลื่อนที่ออกจากล้อของรถโดยการทำการควบคุมความเสียดทานเปลี่ยนพลังงานจลน์ของรถไปเป็นพลังงานความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายไปสู่อากาศรอบ ๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน [1]

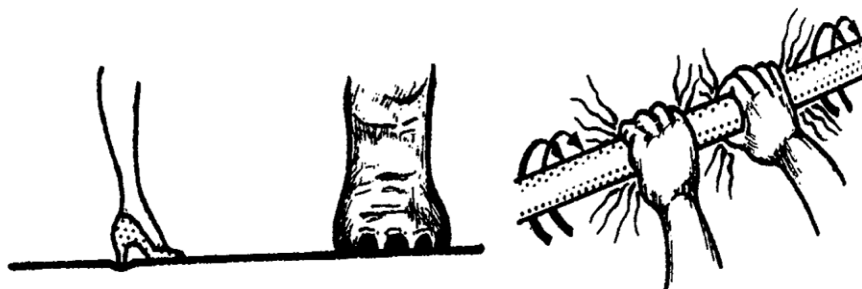
ลักษณะการกดก้ามเบรก (Brake Shoes) หรือแผ่นเบรก (Brake Pads) ให้ถูอัดกับหน้าสัมผัสของตัวดรัมเบรก (Brake Drum) หรือดิสเบรก (Brake Disc) แสดงในรูปที่ 2.6 การหยุดหมุนของล้อเพื่อให้มีการเบรกตามต้องการจะต้องได้รับการควบคุมการทำงานอย่างถูกต้องและสร้างด้วยวัสดุที่มีความเสียดทานเป็นพิเศษพร้อมกันนั้นระหว่างล้อกับผิวของถนนก็ต้องมีความเสียดทานเพียงพอด้วย ดังนั้นการเบรกที่ตีผ้าเบรกดรัมเบรกหรือดิสเบรก ยางรถและผิวถนนจะต้องทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกดก้ามเบรกบนดรัมเบรกและการกดแผ่นเบรกบนดิสเบรก [1]

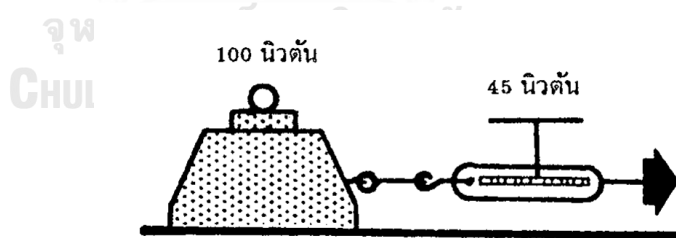
ปัจจัย 2 อย่างที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานโดยพิจารณาเฉพาะแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสผ้าเบรกกับตัวดรัมเบรกหรือดิสเบรก

- **แรง (Force)** เป็นปัจจัยแรกที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทาน แรงเสียดทานกระทำต่อผิวของวัตถุในทิศทางตั้งฉากและทำให้เกิดการต้านทาน การเคลื่อนที่ระหว่างกัน โดยจำนวนแรงรวมทั้งหมดจะกระจายไปทั่วผิวสัมผัส ซึ่งหมายความว่าถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นก็ไม่มีผลต่อความเสียดทานที่จะเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลต่อแรงกดและความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวสัมผัส เช่น ผู้หญิงที่สวม รองเท้าส้นแหลมทำให้เกิดรอยกดบนพื้น ในขณะที่เท้าข้างจะไม่ทำให้เกิดรอยกด ขึ้นเลยแต่รองเท้าส้นแหลมมีโอกาสจะเกิดการสึกได้เร็วกว่าเนื่องจากแรงที่ได้รับ และความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากกว่าหรือการจับเพลลาที่หมุนอยู่ด้วยแรงของมือทั้งสอง ข้างให้เพลลาหมุนช้าลงจะง่ายกว่าการจับเพียงมือเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ด้วย เหตุนี้ผ้าเบรกต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดที่จะสัมผัสกับดรัมหรือดิสให้เหมาะสมกับ แรงกดที่กดลงบนผ้าเบรก



รูปที่ 2.7 ผู้หญิงที่สวมรองเท้าส้นแหลมทำให้เกิดรอยกดบนพื้นในขณะที่เท้าข้างจะไม่ทำให้เกิดรอยกดขึ้น และการจับเพลาที่หมุนอยู่ด้วยแรงของมือทั้งสองข้าง [1]

- สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) เป็นปัจจัยที่สองด้วยเหตุจากธรรมชาติหรือคุณภาพของวัสดุทำให้เกิดลักษณะเฉพาะของผิวสัมผัสระหว่างผิวผ้าเบรกกับผิวของตัวดิสเบรกหรือดรัมเบรก ซึ่งจำนวนความต้านทานการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับความเสียดทานระหว่างกันว่ามีมากหรือน้อย ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถอธิบายเป็นอัตราส่วนของแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนไปบนผิวส่วนด้วยน้ำหนักของวัตถุหรือแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่กดให้ผิวสัมผัสติดกัน ดังรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างถ้าแรงดึง 45 นิวตัน ลากให้วัตถุหนัก 100 นิวตัน เคลื่อนไปบนผิวราบด้วยความเร็วคงที่ อัตราส่วนของแรงลากกับน้ำหนักคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.45 คือแรง 45 นิวตันส่วนด้วยน้ำหนัก 100 นิวตัน



รูปที่ 2.8 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน [1]

#### 2.1.4 แรงเสียดทานของผ้าเบรก

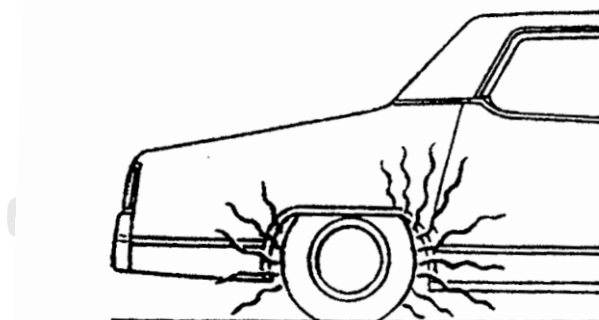
ถ้าเบรกทำงานมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงเกินไปจะทำให้ผ้าเบรกดรัมหรือดิสสีกเร็ว ด้วยเหตุนี้การผลิตผ้าเบรกของรถยนต์จึงมีการจำกัดและแบ่งเกรดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกออกเป็นชั้น คือ ต่ำ กลาง กลางค่อนข้างสูงและสูง โดยมีช่วงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ	0.25 - 0.30
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานปานกลาง	0.30 - 0.35
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานปานกลางค่อนข้างสูง	0.35 - 0.40
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูง	0.40 - 0.45

การเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเบรกจะต้องพิจารณาจากน้ำหนักรถ ขนาดล้อ และความต้องการในประสิทธิภาพเบรกและความปลอดภัยในการหยุดรถด้วยจำนวนแรงที่ใช้ในการเบรกลดน้อยที่สุดเป็นหลัก

### 2.1.5 ความร้อน

ความร้อนและความเสียดทานเป็นตัวทำให้เกิดการสึกขื่นที่ผิวสัมผัสของการเบรก การสัมผัสที่ดีเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ผิวของผ้าเบรกและตัวดิสเบรกหรือดรัมเบรกเกิดการถูกันได้มากขึ้นและสามารถกระจายความดันได้ทั่วพร้อมทั้งกระจายความร้อนออกไปมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ขณะเบรกความเร็วในการขับขึ้นและน้ำหนักของรถหมายถึงจำนวนพลังงานที่จะต้องถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและพลังงานความร้อนนี้จะถูกกระจายผ่านตัวดิสเบรกหรือตัวดรัมเบรกไปสู่อากาศรอบ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นรถยนต์จะหยุดเมื่อพลังงานทั้งหมดของการเคลื่อนที่ได้เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนหมดแล้ว

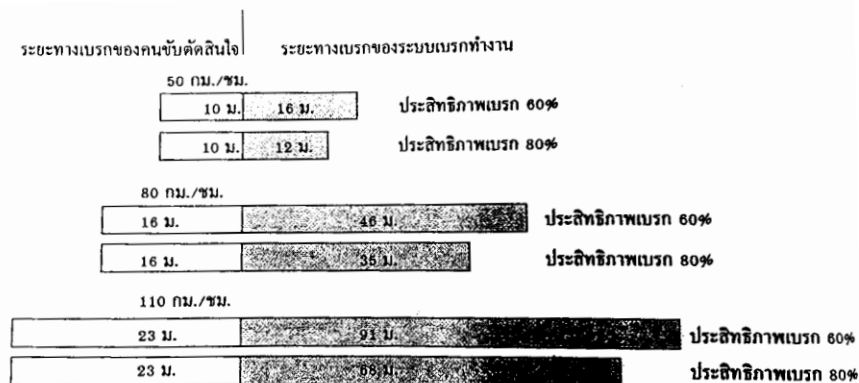


รูปที่ 2.9 การแผ่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเบรก [1]

### 2.1.6 ผลที่เกิดจากน้ำหนักและความเร็วของรถต่อการเบรก

- **น้ำหนัก** ถ้าน้ำหนักของรถยนต์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าพลังงานของการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจะเพิ่มเป็นสองเท่าด้วย ตัวอย่างเช่น เบรกที่ออกแบบไว้ควบคุมการเบรกรถยนต์ที่มีน้ำหนักรวม 45,000 นิวตัน จะไม่สามารถแผ่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นเป็น 2 เท่า ของรถคันนั้นได้ เมื่อต้องบรรทุกน้ำหนักรวม 90,000 นิวตัน

- **ความเร็ว** ผลที่เกิดจากความเร็วที่สูงจะมีผลมากกว่าผลที่เกิดจากน้ำหนัก เมื่อความเร็วของรถยนต์เพิ่มขึ้น 2 เท่า พลังงานของการเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นเป็น 4 เท่า ผลที่ตามมา คือ ถ้าความเร็วเพิ่มขึ้นสองเท่าการเบรกจะต้องแผ่ความร้อนออกเป็น 4 เท่าและถ้าน้ำหนักของรถยนต์เพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า การเบรกจะต้องแผ่กระจายความร้อนออกเป็น 8 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



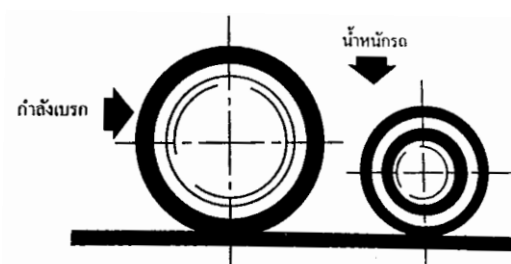
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบระยะทางเบรก เมื่อรถยนต์มีประสิทธิภาพเบรก 60 เปอร์เซ็นต์ กับ 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรถยนต์แล่นด้วยความเร็วแตกต่างกัน [1]

### 2.1.7 ผลของยางและถนนต่อการเบรก

เมื่อเบรกล้อจะหยุดหมุนขณะเดียวกันผิวสัมผัสระหว่างดอกยางรถยนต์กับพื้นถนนเกิดแรงเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction) และการเสียดทานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเบรกที่จะทำให้รถหยุด ถ้าขณะเบรกแรงเบรกที่ตรึงเบรกหรือดิสเบรกมีมากกว่าจะชนะแรงเสียดทานแบบกลิ้งระหว่างล้อรถยนต์กับพื้นถนนทำให้เกิดล้อล็อกตาย ความร้อนจะเกิดขึ้นที่จุดเดียวที่ล้อล็อกตาย เนื่องจากคลื่นไกลไปบนถนนเป็นผลให้ต้องใช้เวลาและระยะทางในการหยุดรถมากขึ้นและไม่สามารถควบคุมรถได้ทั้งทำให้ยางสึกเร็วขึ้น ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของถนน (Road's Coefficient of friction) จึงมีอิทธิพลต่อการที่จะทำให้รถหยุดใน ระยะทางที่สั้นที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของถนนมีค่าอยู่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ บนถนนคอนกรีตผิวแห้ง และน้อยลงตามลำดับดังนี้ บนผิวยางมะตอย บนผิวถนนเปียกน้ำ และบนผิวน้ำแข็ง ผลจากการหน่วงการเบรกของถนนเป็นแรงหนึ่งที่กำหนดจำนวนอัตราหน่วงของการเบรก เรียกว่า อัตราเบรก (Braking ratio) หรือประสิทธิภาพเบรก (Brake Efficiency) คือ แรงรวมของการหน่วงรถเพื่อที่จะทำให้รถหยุดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรถ รถที่ใช้บนทางหลวงกำหนดไว้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์เป็นอย่างต่ำ



ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ (รูปที่ 2.11) ก็เป็นตัวร่วมด้วยอันหนึ่งด้วยผลจากการจัดตัวระหว่างตัวดรัมเบรกหรือตัวดิสเบรกกับล้อ ถ้าเพิ่มขนาดล้อขึ้นรัศมีการหมุนก็จะมีมากขึ้น ทำให้ลดแรงบิดของการหยุดล้อที่เกิดขึ้นที่ตัวดรัมเบรกหรือตัวดิสเบรกเพราะฉะนั้นจำนวนแรงบิดเบรก (กำลังของการหยุดรถ) ขึ้นกับน้ำหนักรวมของรถ ขนาดยางและค่าอัตราการเบรกที่ต้องการ ความสามารถของแรงบิดเบรกที่สูงเกินไปไม่เป็นการส่งเสริมสมรรถนะการเบรกแต่ทำให้การเบรกไวเกินไปเกิดการลดความสามารถในการขับเคลื่อนด้วยล้อคล้อยหยุดรถบนสภาพของผิวถนนที่ลื่น



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อใหญ่กับเล็ก [1]

### 2.1.8 สมรรถนะเบรก

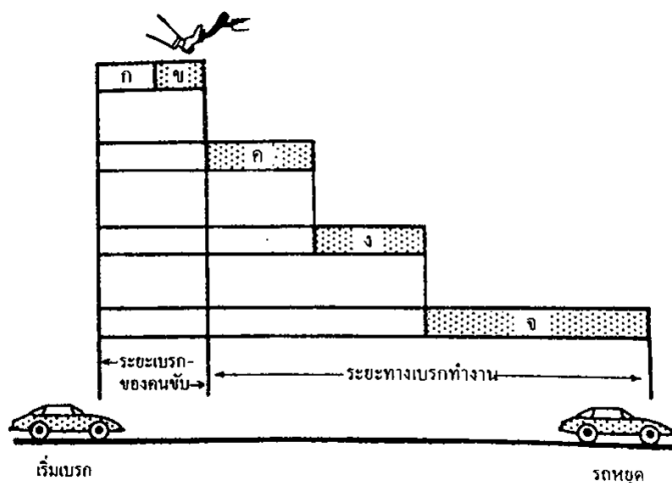
สมรรถนะเบรก (Brake Performance) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

- จำนวนพื้นที่ของผิวหน้าผ้าเบรกส่งผลถึงอายุการใช้งานของผ้าเบรกและความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลต่อความสิ้นเปลืองเบรก
- รัศมีของดรัมเบรกหรือดิสเบรก
- รัศมีล้อหมุน (Rolling Radius)
- สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับตัวดรัมเบรกหรือดิสเบรก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปกับสภาพการสึก ผลของความชื้น ความสกปรกและความร้อน
- สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับผิวถนนซึ่งเปลี่ยนแปลงไปกับผิวหน้าของดอกยาง ผิวหน้าถนน และสภาพของอากาศ
- การปรับตั้งแก้ไขหน้าผิวด้านสัมผัสที่ถูกันระหว่างผ้าเบรกกับตัวดรัมเบรกหรือดิสเบรก ที่ถูกต้อง การปรับศูนย์ก้ามเบรกและการติดตั้งเบรก
- การควบคุมแรงที่กระทำบนผ้าเบรกให้กดบนตัวดรัมเบรกหรือดิสเบรก

### 2.1.9 ลำดับเวลาของการทำงานการเบรก

เนื่องจากการทำงานของการหยุดรถทั้งหมดเป็นการทำงานร่วมกันของคนขับรถและส่วนประกอบเบื้องต้นของระบบเบรกรถยนต์ ดังนั้นเวลาในการเบรกจึงประกอบขึ้นด้วยเวลาการทำงานของคนขับและเวลาการทำงานของระบบเบรกรถยนต์นั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12

- **เวลาการทำงานของคนขับ** เป็นช่วงเวลารับความรู้สึกสั่งการ (Moment of Alarm) ซึ่งประกอบขึ้นด้วยสองช่วงเวลาก่อนการเหยียบเบรก ช่วงเวลาแรกคือช่วงรับรู้ความรู้สึก (Period of Alarm) เป็นช่วงที่มองเห็นอันตรายหรือสิ่งกีดขวางเป็นสัญญาณเตือนภัยที่คนขับรับรู้และตัดสินใจ ช่วงที่สองเป็นช่วงประสาทสั่งการหรือช่วงปฏิกิริยาโต้ตอบ (Reaction Time) เป็นช่วงเวลาที่ขึ้นอยู่กับสภาพร่างกายและจิตใจของคนขับที่จะตัดสินใจทำการเบรก เช่น ขณะง่วงนอน มึนเมา หรือเห็นดเนิน้อยเมื่อยล้า คนขับจะมีปฏิกิริยาโต้ตอบช้าที่จะสั่งการให้เท้าทำการเริ่มเหยียบเบรก
- **เวลาการทำงานของระบบเบรก (Total Braking Time)** ประกอบด้วยช่วงเวลา 3 ช่วง เริ่มตั้งแต่เริ่มเหยียบคันเหยียบเบรกจนกระทั่งถึงรถหยุด ช่วงแรกเป็นช่วงเวลาที่เท้าคนขับตอบรับการสั่งการของประสาทรู้สึกให้เหยียบเบรกจากจุดเริ่มเหยียบจนกระทั่งก้านกระทู้เบรกเลื่อนผ่านระยะฟรีคันเหยียบเบรกและผ้าเบรกเลื่อนผ่านระยะฟรีเข้าชิดกับดรัมเบรกหรือดิสเบรก เรียกว่า ช่วงเวลาตอบรับ (Response Time) ช่วงที่สองเป็นช่วงเวลาสร้างความดันเบรก (Pressure Build-up Time) เมื่อผ้าเบรกชิดกับดรัมเบรกหรือดิสเบรก ความดันในการเบรกจะเริ่มเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งความดันสูงสุดให้ล้อหยุดหมุนระยะเวลาช่วงนี้ขึ้นอยู่กับระบบเบรก ระบบเบรกลมจะใช้เวลาน้อยมากที่สุด ช่วงที่สามเป็นช่วงเวลาการหน่วงให้รถหยุด ซึ่งขึ้นกับอัตราหน่วงของเบรกและสภาพของถนนที่ทำการเบรก



รูปที่ 2.12 ช่วงเวลาและระยะทางที่ใช้ในการเบรกให้รถหยุดแต่ละครั้ง  
 (ก) ช่วงมองเห็น (ข) ช่วงตัดสินใจ (ค) ช่วงเหยียบผ่านระบบพรีคั้นเหยียบเบรก  
 (ง) ช่วงน้ำมันเบรกสร้างความดัน (จ) ช่วงล้อหยุดหมุนเกิดการหน่วงให้รถหยุด [1]

## 2.2 ผ้าเบรก

ผ้าเบรก (Brake pads) จัดเป็นวัสดุเสียดทานประเภทหนึ่ง มีลักษณะเป็นของผสมหลายองค์ประกอบยึดติดให้เป็นชิ้นเดียวกันด้วยสารยึดติด องค์ประกอบของวัสดุเสียดทานอาจมีมากถึง 10 ถึง 25 ชนิด แต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่เฉพาะในการทำงาน บางชนิดอาจมีหน้าที่มากกว่า 1 หน้าที่ ตัวอย่างขององค์ประกอบในผ้าเบรกได้แก่ สารยึดติด เส้นใย ผงขัด สารตัวเติม สารหล่อลื่น เป็นต้น [2-5]

### 2.2.1. สารยึดติด

สารยึดติด (Binder) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญทำหน้าที่ยึดองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้วัสดุที่มีความแข็งแรงระดับหนึ่ง สารยึดติดที่นิยมใช้ทั่วไปมักเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกเรซิน ทั้งในรูปแบบผ่านการดัดแปร (Modified phenolic resins) และไม่ผ่านการดัดแปร (Straight phenolic resin) โดยส่วนใหญ่แล้วฟีนอลิกเรซินชนิดดัดแปรจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านเสียดทาน การสึก และความกระด้างของวัสดุเสียดทาน ปริมาณสารยึดติดที่ใช้ในวัสดุเสียดทานอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์

### 2.2.2. เส้นใย

เส้นใย (Fiber) ทำให้การขึ้นรูปวัสดุเสียดทานง่ายขึ้น มีความคงตัวก่อนที่จะมีการอัดด้วยความร้อน สำหรับผ้าเบรกรุ่นเก่าเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เส้นใยแร่ใยหิน (Asbestos) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 โดยใช้ปริมาณสูงถึง 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ใยหินคือ

องค์ประกอบของ Magnesium silicate ( $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ) ที่มีน้ำในโครงสร้างผลึก (Hydrated form) นอกจากนี้เส้นใยแร่ใยหินยังมีข้อดีอื่นที่ทำให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น

- มีความเสถียรต่อความร้อนอุณหภูมิได้ถึง 500 องศาเซลเซียสก่อนที่จะกลายเป็นซิลิเกต
- ช่วยให้พื้นผิวกลับมามีความเสียดทานอีกในระหว่างการใช้งาน
- ซิลิเกตที่เกิดจากใยหินในระหว่างการใช้งานจะมีความแข็งและความสามารถในการขัดถูมากกว่าเส้นใยแร่ใยหินเอง
- เส้นใยแร่ใยหินมีความเป็นฉนวนที่ดี
- ช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น
- ช่วยลดอัตราการสึกของวัสดุเสียดทาน
- มีความแข็งแรงแต่ก็ตัดโค้งได้ในขณะเดียวกัน
- ราคาเหมาะสม



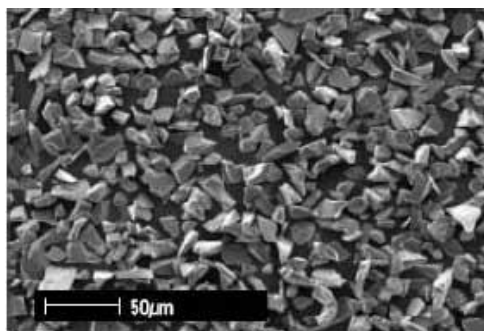
รูปที่ 2.13 เส้นใยแร่ใยหิน (Asbestos) [6]

เนื่องจากเส้นใยหินทำให้เกิดปัญหาทางสุขภาพจึงมีการประกาศห้ามใช้ทำให้ผู้ผลิตผ้าเบรกต่างไปหาวัสดุทดแทนอย่างอื่น เช่น เส้นใยอินทรีย์ (เส้นใยอะรามิด เส้นใยเพน) เส้นใยอนินทรีย์ (เส้นใยแก้ว เส้นใยโลหะ เส้นใยเซรามิก) เป็นต้น

### 2.2.3. ผงขัด

ผงขัด (Abrasive) เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงสูงช่วยเพิ่มระดับของแรงเสียดทาน โดยเฉพาะในช่วงต้นของการเหยียบเบรกให้รถหยุด ในลักษณะของการ “จับ” หรือ “กัด” นอกจากนี้ยังช่วยในการรักษาความสะอาดของพื้นผิวโลหะที่สัมผัสกับวัสดุเสียดทาน และควบคุมการสะสมของฟิล์ม (Film) ที่เกิดบนผิวโลหะ โดยลักษณะ รูปร่าง และขนาดของ

อนุภาคของผงขัด มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ที่ต้องการ เช่น สำหรับกรณี ผงขัด จะต้องการอนุภาคที่มีเหลี่ยม มีมุมที่คม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เพื่อที่จะสามารถขูดผิว โลหะได้ดีกว่าอนุภาคที่มีลักษณะมนไม่มีเหลี่ยม



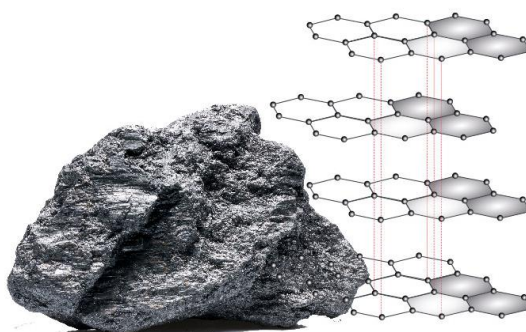
รูปที่ 2.14 ลักษณะ รูปร่าง ของอนุภาคผงขัดชนิดเพชรสังเคราะห์ [3]

#### 2.2.4. สารตัวเติม

สารตัวเติม (Fillers) ใช้ในการควบคุมอัตราส่วนโดยรวมของวัสดุเสียดทาน ลดต้นทุน การผลิต ปรับปรุงความพรุน สารตัวเติมบางชนิดอาจมีหน้าที่พิเศษอย่างอื่นอีก เช่น ปรับปรุง ระดับของแรงเสียดทานสารตัวเติมนี้อาจเป็นผงโลหะ โลหะผสม เซรามิก หรือสารอินทรีย์ ก็ได้

#### 2.2.5. สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubricants) ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเสียดทาน และผิวโลหะที่สัมผัส ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกของผิวโลหะลดลง อาจมีการใช้สารหล่อลื่นหลาย ชนิด เพื่อให้สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง สารหล่อลื่นที่ใช้ในวัสดุเสียดทานเป็น ของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำ สามารถเลื่อนสไลด์ระหว่างชั้นแรงงานตัวอย่างสารหล่อลื่น เช่น แกรไฟต์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ( $\text{MoS}_2$ )



รูปที่ 2.15 รูปร่างผลึกของแกรไฟต์และลักษณะการจำลองโครงสร้างแบบชั้น [3]

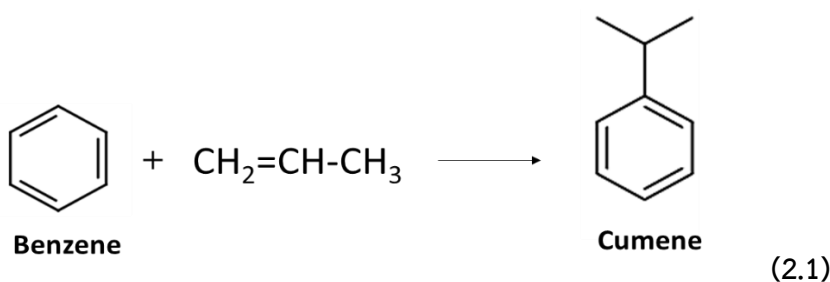
## 2.3 ฟีนอลิกเรซิน

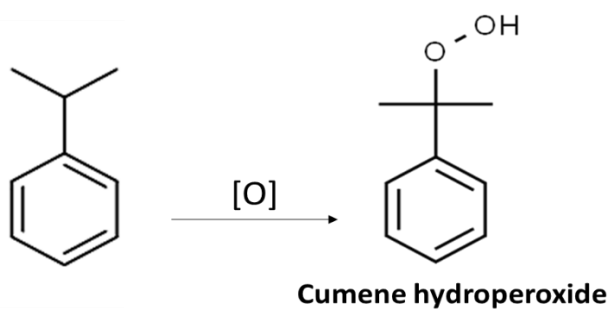
ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) จัดเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นในทางการค้าชนิดแรก เป็นผลิตภัณฑ์ขึ้นแรกได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งพบโดยแบกเคลแลนด์ ในปี ค.ศ. 1907 ในปัจจุบันวัสดุชนิดนี้ใช้มากในรูปแบบผงและถูกใช้ขึ้นรูปเป็นพวกอุปกรณ์ทางไฟฟ้าโดยวิธีอัด เช่น ด้ามจับของใช้ต่าง ๆ ภายในบ้าน และใช้ในรูปแบบแผ่นฟิล์มกาว วัสดุเคลือบผิว ก็ได้ [2, 7]

### 2.3.1 วิธีเตรียมโมโนเมอร์ฟีนอล ฟอร์มัลดีไฮด์ และเฮกซาเมธิลีนเตตระมีน

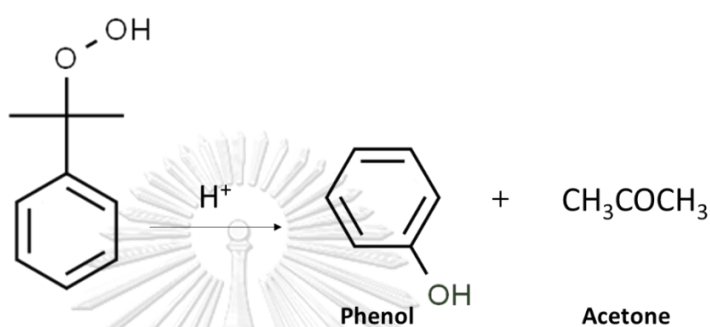
- **ฟีนอล (Phenol)** สมัยก่อนเคยเตรียมฟีนอลได้โดยการกลั่นจากน้ำมันถ่านหิน แต่เนื่องจากฟีนอลในธรรมชาติไม่ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของความต้องการที่จะใช้งานปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องสังเคราะห์จากฟีนอลขึ้นมาจากเบนซินที่ได้จากปิโตรเลียมวิธีสังเคราะห์มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น

วิธีแรก คือ กระบวนการคิวมีน (cumene process) เริ่มต้นจากเบนซินถูกแอลคิลเลตด้วยโพรพิลีนไดไอโซโพรพิลเบนซิน (คิวมีน) นิยมทำในภาวะไอ มีกรดฟอสฟอริกบน kieselguhr เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาคายความร้อน ฉีดน้ำเข้าไปเล็กน้อยเพื่อรักษาแอกติวิตีของตัวเร่ง จากนั้นผ่านต่อไปยังคอลัมน์สำหรับกลั่นได้คิวมีนออกมา (สมการที่ 2.1) หลังจากนั้นออกไซด์คิวมีนด้วยอากาศในสภาวะต่างอุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส ได้คิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (สมการที่ 2.2) แล้วคิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ถูกสลายตัวด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ได้ฟีนอลและอะซิโตน (สมการที่ 2.3) แยกฟีนอลออกมาโดยการกลั่นความดันต่ำ ฟีนอลเป็นผลึกของแข็ง จุดหลอมเหลวประมาณ 41 องศาเซลเซียส ในกระบวนการนี้อาจได้เบนโซฟีโนนเป็นผลพลอยได้ด้วย [7]





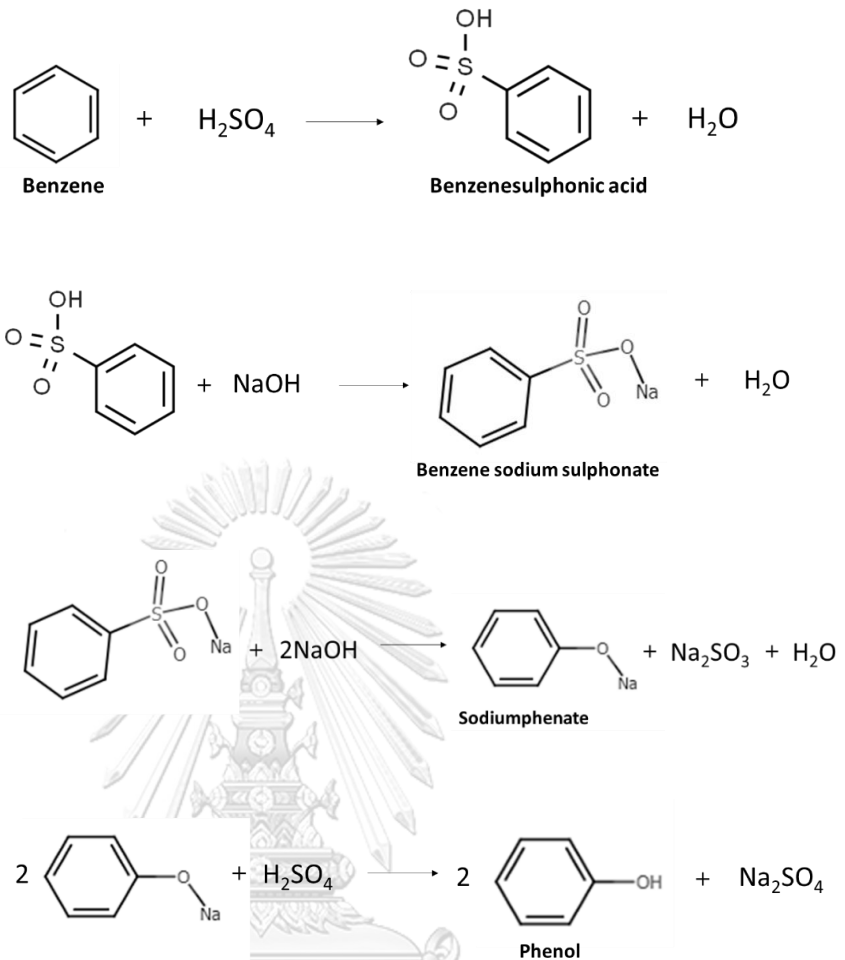
(2.2)



(2.3)

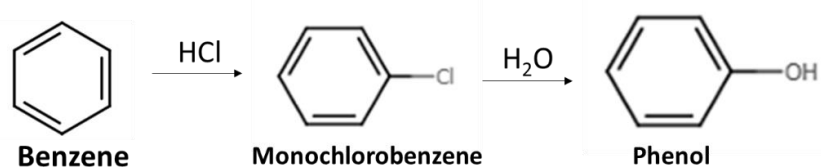
ในสมการที่ (2.2) คิวมินถูกออกซิไดซ์ด้วยอะตอมอิสระ (Free radical mechanism) กระบวนการนี้ในแง่การลงทุนขึ้นอยู่กับราคาของอะซิโตนที่เป็นผลิตภัณฑ์หรือไม่น่า ปัจจุบันกระบวนการนี้นิยมใช้มากเพราะได้วัตถุดิบจากปิโตรเลียม [7]

วิธีที่สอง คือ กระบวนการซัลโฟเนชัน (Sulfonation process) เริ่มต้นจากเบนซีนในสถานะไอผ่านเข้าไปยังกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส ได้กรดเบนซีนซัลโฟนิคแล้วทำให้เป็นกลางด้วยโซดาแอช ได้เบนซีนโซเดียมซัลโฟเนต หลังจากนั้นเพิ่มโซดาแอชให้มากขึ้นพอทำให้ร้อนถึง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส จะได้โซเดียมฟีนีตทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกจะได้ฟีนอลออกมาแยกได้โดยการกลั่น ปฏิกิริยาเขียนได้แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ปฏิกริยาในกระบวนการซัลโฟเนชัน [7]

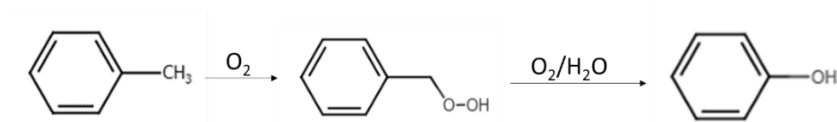
วิธีที่สาม คือ กระบวนการ Raschig ซึ่งใช้ในทางการค้ามากเหมือนกัน โดยเริ่มจากเบนซีนในสถานะไอทำปฏิกริยากับกรดเกลือมีตัวเร่ง เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกลือเชิงซ้อนของทองแดงได้โมโนคลอโรเบนซีนแล้วไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำโดยมีตัวเร่งและอุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส จะได้ฟีนอลดังแสดงในรูปที่ 2.17 [7]



รูปที่ 2.17 ปฏิกริยากระบวนการ Raschig [7]

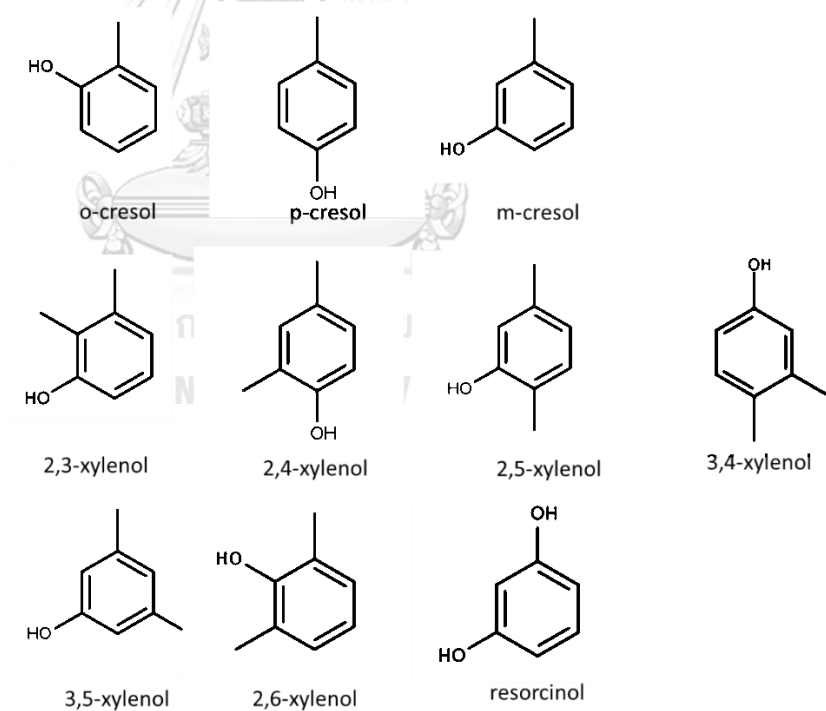


วิธีที่สี่ คือ The Dow process โดยเริ่มต้นจากโทลูอินถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศมีตัวเร่งจะได้กรดเบนโซอิกผ่านต่อเข้าไปในเตาปฏิกรณ์อุณหภูมิ 110 ถึง 150 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 3 atm มีโคบอลต์อะซีเตต-แมงกานีสอะซีเตตเป็นตัวเร่ง จะได้ฟีนอลดังแสดงในรูปที่ 2.18 [7]



รูปที่ 2.18 ปฏิกริยากระบวนการ DOW [7]

วิธีเตรียมฟีนอลตัวอื่น ๆ มักกลั่นจากถ่านหิน ในอุตสาหกรรมการผลิตฟีนอลิกเรซินส่วนใหญ่จะใช้ฟีนอลตัวอื่น ๆ มีใช้บ้างก็ไม่มากนัก เช่น Cresol, Xylenol และ Resorcinol ดังแสดงในรูปที่ 2.19

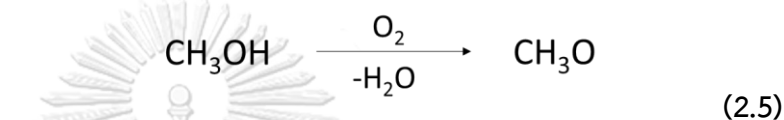


รูปที่ 2.19 ฟีนอลรูปแบบอื่น ๆ [7]

- **ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)** มอนอเมอร์ฟอร์มัลดีไฮด์เตรียมได้โดยปฏิกิริยาของ CO กับ H<sub>2</sub> ได้ CH<sub>3</sub>OH (ใช้สังกะสีออกไซด์เป็นตัวเร่ง) ดังปฏิกิริยาที่ 2.4

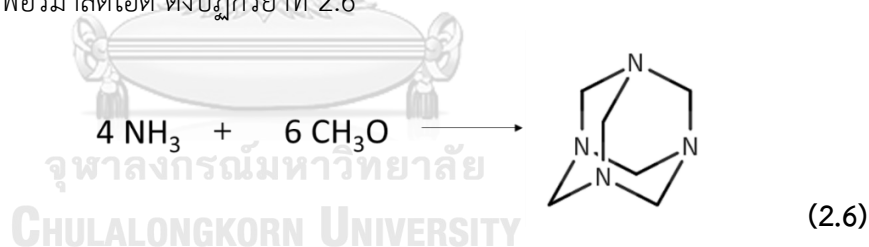


เมธานอลที่ได้ออกซิไดส์ไปเป็นฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้ตัวเร่งโมลิบดีนัมออกไซด์กับเหล็กที่อุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส ดังปฏิกิริยาที่ 2.5



ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นก๊าซจุดเดือด -21 องศาเซลเซียส

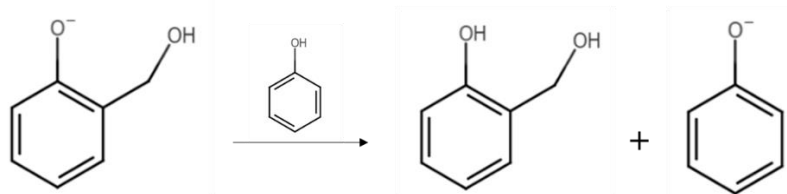
- **เฮกซะเมธิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine)** หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า เฮกซามีน หรือ HMT ใช้เป็นตัวเชื่อมโยงที่สำคัญสำหรับโนโวแลกเรซิน ในกรณีที่ขึ้นรูปในลักษณะที่เป็นผงด้วยแรงอัดเตรียมได้จากแอมโมเนียกับฟอร์มัลดีไฮด์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.6



### 2.3.2 วิธีเตรียมเรซิน

ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์จะเกิดแบบควบแน่นหรือแบบขั้น โครงสร้างของเรซินที่ได้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ รวมทั้ง pH ของของผสมในปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ในทางการค้าต้องเตรียมพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำก่อนและยังไม่เกิดการเชื่อมโยง เพราะฉะนั้นผลผลิตในขั้นแรกนี้ยังสามารถหลอมเหลวได้หรือละลายได้ เรียกว่า เรซิน จากนั้นจึงผ่านกระบวนการขั้นที่ 2 เป็นการเชื่อมโยงโมเลกุลเข้าด้วยกันเกิดพอลิเมอร์แบบร่างแหเป็นเทอร์โมเซต ไม่หลอมละลาย ขั้นตอนแรกที่ได้เรซินนั้นมี 2 กลุ่ม [7] คือ

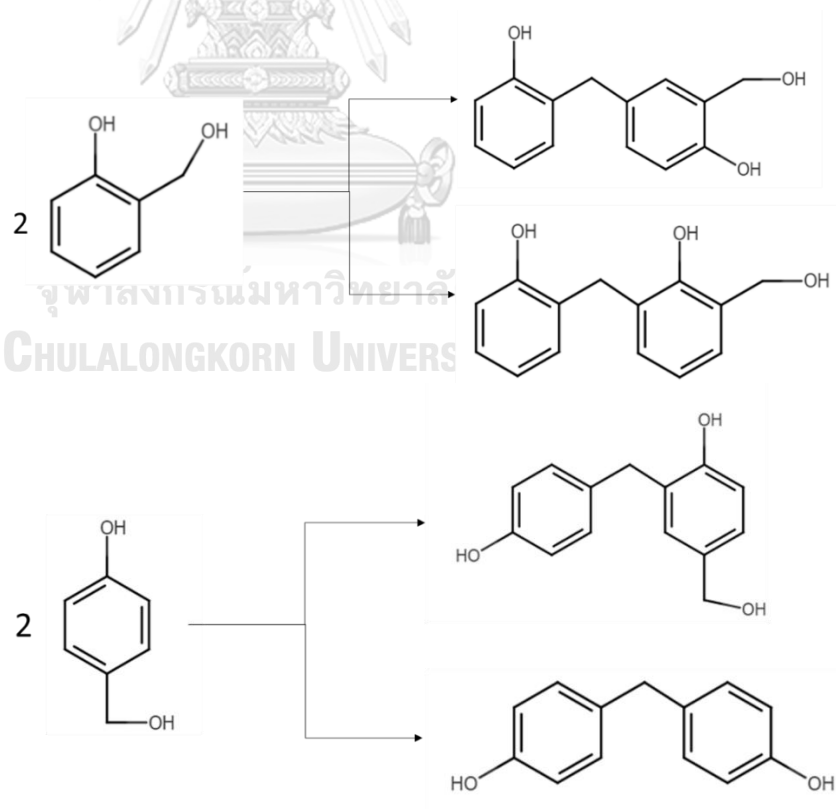
- รีโซลเรซิน (Resol resins) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไปในภาวะเบส อัตราส่วนอาจจะประมาณ 1 : 2 ปฏิกิริยาจะเกิดดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไป

ในสภาวะเบส [7]

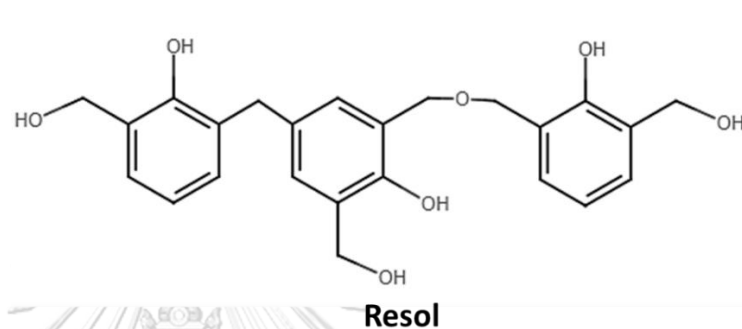
จะเกิดหมู่ O- และ p- methylol ได้ O- และ p- methylolphenols และจากนี้ O- หรือ p- methylolphenols 2 โมลจะเกิดปฏิกิริยาควบนั่นต่อแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาควบนั่นของ O- และ P- methylolphenols [7]

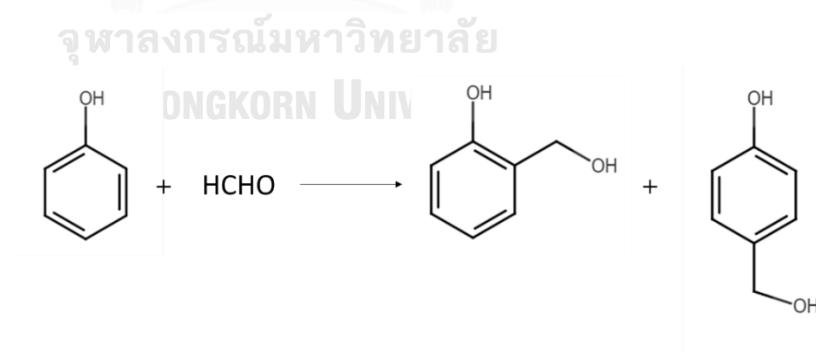
จะได้ของผสมหลายตัว มีฟินอลเชื่อมด้วยหมู่  $-CH_2$  และสามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อไปได้ Polynuclear polyalcohols ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยฟินอลถูกเชื่อมด้วยหมู่  $-CH_2$  และ  $-CH_2OCH_2-$  เนื่องจากฟอร์มัลดีไฮด์มีปริมาณมากกว่า

ริโซลที่เป็นของเหลวมีวงเบนซีนน้อยกว่า 2 วงในหนึ่งโมเลกุล ถ้าเป็นของแข็งก็มี 3 ถึง 4 วง ดังแสดงในรูปที่ 2.22



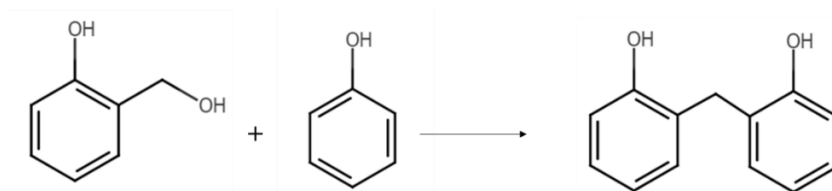
รูปที่ 2.22 ลักษณะของ Resol [7]

- โนวอลแลกรีซิน (Novolac resin) เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์น้อยกว่า คือ ใช้สัดส่วนประมาณ 1: 0.8 ในสภาวะกรดได้ O- และ p- methylol phenols ดังแสดงในรูปที่ 2.23



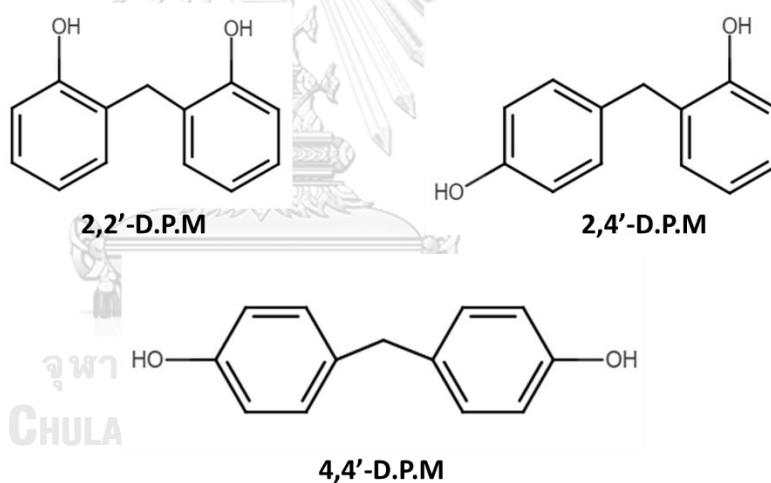
รูปที่ 2.23 ปฏิกิริยาระหว่างฟินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไปในสภาวะกรด [7]

จากนี้เกิดปฏิกิริยาควบแน่นได้ dihydroxydiphenyl methane (D.P.M.)  
 ดังแสดงในรูปที่ 2.24



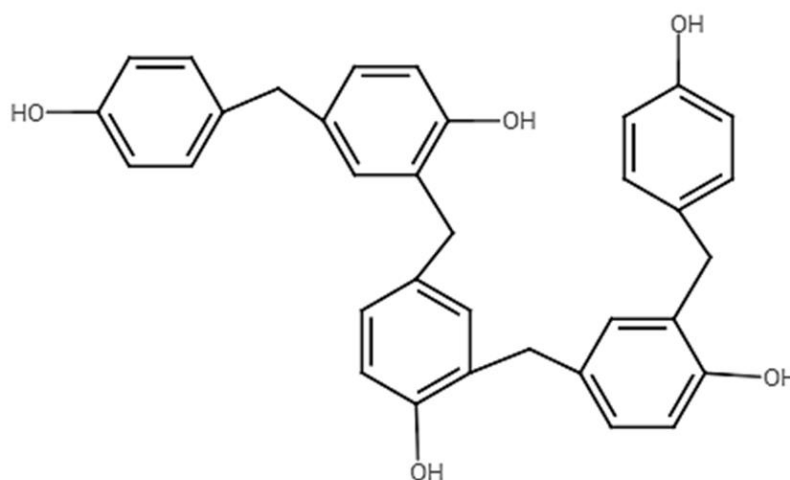
รูปที่ 2.24 ปฏิกิริยาการเกิด dihydroxydiphenyl methane [7]

มีไอโซเมอร์ที่เกิดขึ้นได้ 3 แบบ ตัวไหนมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับ pH ของ  
 สารละลายที่เตรียม แต่ในอุตสาหกรรมผลิตโนโวแลก นิยมใช้ 2,4'- กลับ 4,4'-  
 D.P.M. ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ไอโซเมอร์ของ dihydroxydiphenyl methane [7]

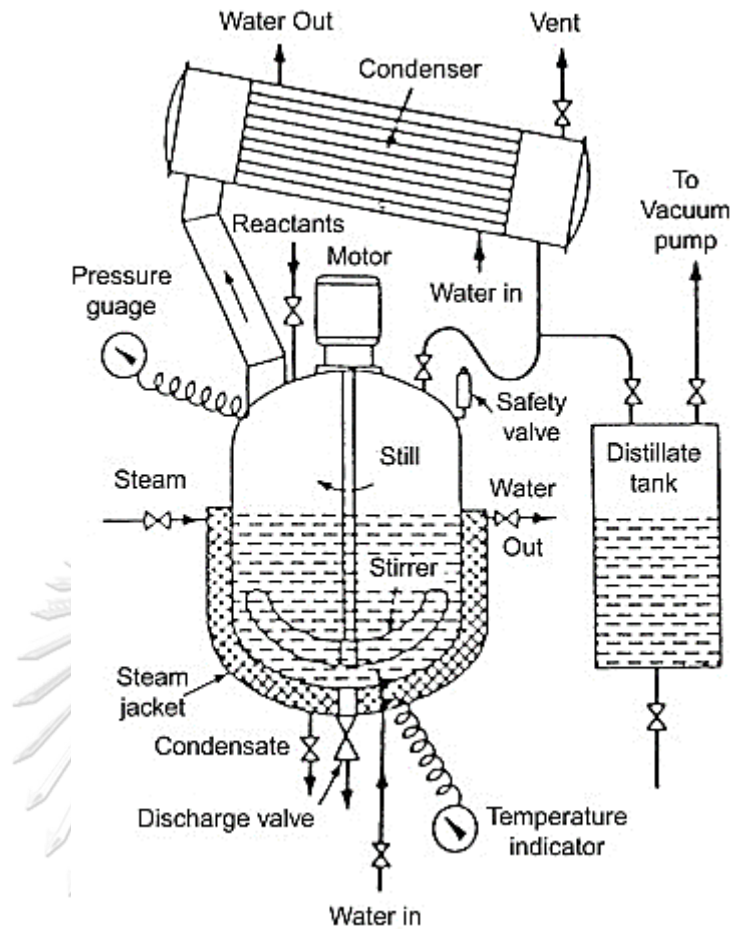
ทั้ง 2,4' - D.P.M. กับ 4,4' - D.P.M. จะเกิดปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ต่อ  
 ได้ polynuclear phenols แต่เนื่องจากฟีนอลมีมากกว่าจึงเป็นตัวควบคุม  
 น้ำหนักโมเลกุลไม่ให้สูงเกินไป ปกติจะมีวงเบนซีนประมาณ 5-6 วงต่อ 1  
 โมเลกุล ได้โนโวแลกเรซิน มีลักษณะดังในรูปที่ 2.26



## Novolac

รูปที่ 2.26 ลักษณะของ Novolac [7]

โนโวแลกเรซินที่ได้ไม่มีหมู่ Methylol ที่ว่องไวจึงไม่เกิดการเชื่อมโยง โดยความร้อนจึงมักจะใช้เฮกซาเมธิลีนเตตระมินเป็นตัวเชื่อมโยงแผนภาพแสดง การเตรียมโนโวแลกเรซิน แสดงในรูปที่ 2.27 เริ่มตั้งแต่ใส่สารตั้งต้นลงไปในเตา ปฏิกรณ์ที่มีที่กวน ถ้าเตรียมรีโซลเรซินใช้  $\text{NH}_3$  เป็นตัวเร่งแทนกรดซัลฟูริก กระบวนการจะสิ้นสุดในเตาปฏิกรณ์ แต่ถ้าเป็นโนโวแลกเรซินต้องมีการเติม ตัวกระตุ้น (Activator) เช่น เฮกซาเมธิลีนเตตระมินลงไปบัดให้อยู่ในรูปผงแล้ว เก็บไว้ในถังสำหรับเก็บเรซิน หลังจากนั้นอาจเติมสารตัวเติมพวกซีลีออยหรือแอส เบสทอส เส้นใยเซลลูโลส ไยแก้ว ลงไปจะทำให้สมบัติดีขึ้นแล้วบดเก็บไว้ในรูป ผงพร้อมที่จะใช้งานขึ้นรูปต่าง ๆ ได้

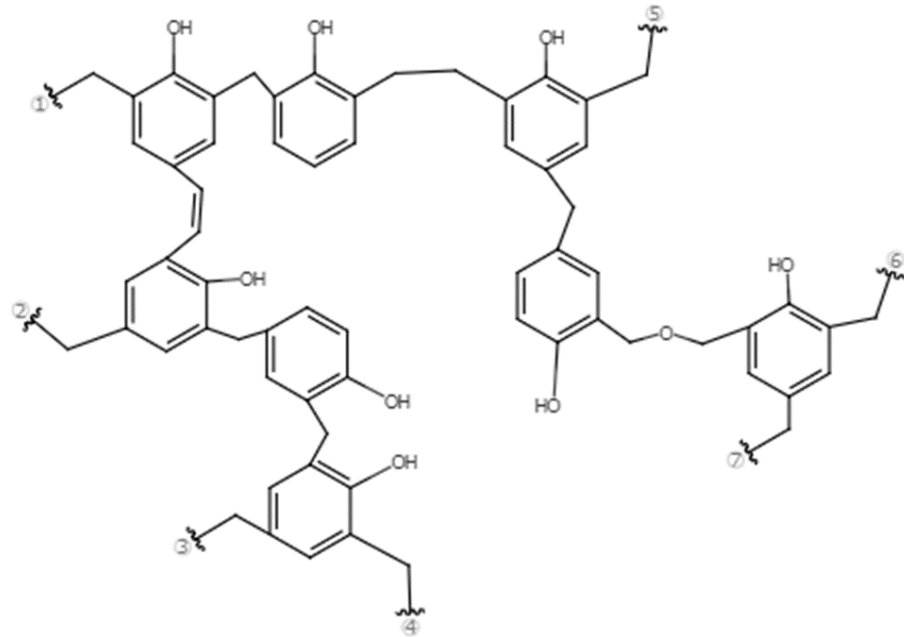


รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงการเตรียมโนโวแลกเรซิน [8]

### 2.3.3 การเกิดการเชื่อมโยง

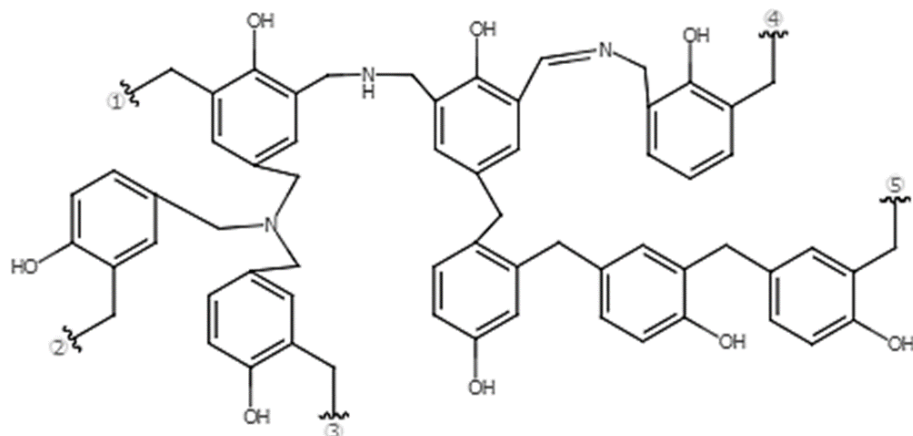
ในขั้นที่เตรียมรีไซโคลเรซินและโนโวแลกเรซินผลิตผลที่ได้เป็นเทอร์โมพลาสติก นิยมเรียกว่า A-stage resin คือ ยังละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์และหลอมเหลวได้ แต่ถ้ามีการเติมสารตัวเติม ตัวให้สี สารหล่อลื่น และเฮกซะเมธิลีนเตตระมีนลงไป เรซินที่ได้จะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถหลอมเหลวด้วยความร้อนและความดันได้แล้วทำให้เรซินอยู่ในรูปผง ขั้นนี้เรียกว่า B-stage resin ขั้นสุดท้ายเรียก C-stage resin เป็นขั้นที่เรซินถูกทำให้มีรูปร่างตามต้องการที่เรียกว่า ชิ้นรูป ได้ผลิตผลออกมาเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลาย ไม่หลอมเหลว เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงสมบูรณ์

ในกรณีของรีไซโคลเรซินการเชื่อมโยงทำได้โดยให้ความร้อน ฟีนอลจะถูกเชื่อมโยงโดยหมู่เมธิลีนเป็นส่วนใหญ่แต่อาจมีตัวเชื่อมโยงแบบอื่น ๆ บ้าง ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงกันมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 โครงร่างสายโซ่ของรีโซลเรซิน [7]

สำหรับโนโวลแลกเรซินการเชื่อมโยงจะทำให้ต่อเมื่อใส่ตัวเชื่อมโยงลงไป เช่น เฮกซาเมธิลีนเตตระมีน ซึ่งฟีนอลจะถูกเชื่อมโยงด้วยหมู่เมธิลีนและอาจมีไนโตรเจนอยู่ด้วย โครงสร้างที่เชื่อมโยงแล้วจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 โครงร่างสายโซ่ของโนโวลแลกเรซิน [7]



### 2.3.4 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

ฟีนอลิกเรซินที่มีโครงสร้างเชื่อมโยงกันจะแข็งและรับแรงอัดได้ดีมาก ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับฟิลเลอร์ที่เติมลงไป โดยทั่ว ๆ ไปรับแรงอัดได้ถึง 276 เมกะปาสคาล ความทนต่อแรงดึงประมาณ 21-172 เมกะปาสคาล ทนต่อความร้อนได้ดี แม้ว่าอุณหภูมิถึง 200 องศาเซลเซียส ก็พบว่ามือน้ำหนักหายไปเล็กน้อยเท่านั้น สมบัติเกี่ยวกับทางไฟฟ้าไม่ค่อยใช้ เพราะว่าเป็นพอลิเมอร์มีขั้วแต่สมบัติการนำความร้อนต่ำมาก จึงใช้เป็นด้ามวัสดุที่ใช้ในครัวได้ดี ด้านทานสารเคมีดีมากรวมทั้งตัวทำลายอินทรีย์ มีข้อเสียตรงที่ทนต่อรอยขีดข่วนได้ไม่ดีในสภาวะที่มีความชื้น

ในด้านการนำไปใช้ประโยชน์แต่เดิมเบคิไลต์ (Bakelite) ใช้มากกว่า 5 ปี ใช้ในลักษณะรูปหล่อ เช่น เครื่องรับโทรทัศน์ ที่จับเตารีด หูหม้อ หุกะทะ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ปัจจุบันมีใช้งานในรูปแบบแผ่น เช่น แผ่นเคลือบผิวโต๊ะทำงาน แผ่นปิดฝาผนัง ที่ใช้ในรูปเป็นสารยึดติด เช่น ทำกระดาษทราย ผ้าเบรก ใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวและกาว ส่วนใหญ่ใช้ทำไม้อัดในรูปของ ion-exchange resins ก็ใช้มากโดยมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น เอมีน กรดซัลโฟนิก ไฮดรอกซิล หรือ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น



รูปที่ 2.30 ด้ามจับเตารีด และด้ามจับภาชนะต่าง ๆ ในครัวที่ทำด้วยฟีนอลิกเรซิน [7, 9]

### 2.3.5 สมบัติของฟีนอลิกเรซินที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตผ้าเบรก

- **ระยะการไหล (Flow distance)** ส่งผลต่อความเป็นรูพรุนและความหนาแน่นของวัสดุเสียดทาน ถ้าระยะการไหลน้อยจะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเสียดทานลดลงและความเป็นรูพรุนสูงขึ้น
- **ปริมาณสารเฮกซามีน** ส่งผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซิน ถ้าปริมาณสารเฮกซามีนสูงส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง วัสดุเสียดทานมีความแข็งแรงสูงและทนอุณหภูมิได้ดีขึ้น
- **เวลาการแข็งตัว (Gel time)** เกี่ยวกับความเร็วที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซิน ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์รีออน ถ้ามีเวลาการแข็งตัวมากเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานก็ใช้มากทำให้ผลิตได้น้อยลง

ฟีนอลิกเรซิน 2 ชนิดที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมผลิตวัสดุเสียดทาน Resin A และ Resin B มีระยะการไหล เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณสารเฮกซามีน ที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจศึกษา ระยะการไหลที่ต่างกันและระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซิน 2 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยการผสมสัดส่วนของฟีนอลิกเรซินทั้ง 2 ชนิดตามอัตราส่วนต่าง ๆ กัน เพื่อทดสอบสมบัติฟีนอลิกเรซินในเชิงเคมีและคุณภาพของวัสดุเสียดทาน

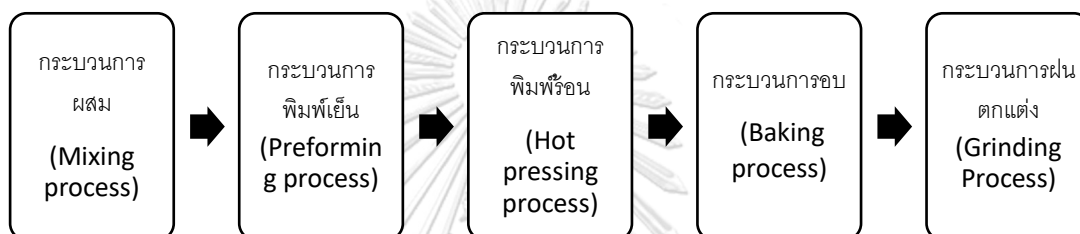
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดฟีนอลิกเรซินที่นำมาใช้ในงานวิจัย\*

Details	Resin A		Resin B	
	Specification	Result of analysis	Specification	Result of analysis
Appearance	White or yellow powder	Yellow powder	White or yellow powder	Yellow powder
Flow (mm)	17-30	22	30-50	42
Gelation time (sec)	52-72	63	70-90	70
Hexamine (%)	5.6-6.6	6.2	7.3-8.3	7.8

\*ข้อมูลจากเอกสารตรวจรับวัตถุดิบของบริษัท คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด

## 2.4 กระบวนการผลิตวัสดุเสียดทาน

กระบวนการผลิตวัสดุเสียดทานประกอบด้วยกระบวนการหลายขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ได้แก่ กระบวนการผสมสารตามสูตรที่กำหนดโดยเครื่องปั่นผสม หลังจากนั้นสารผสมจะนำเข้าสู่พิมพ์เย็น เพื่ออัดสารผสมให้คงรูปร่างและได้น้ำหนักตามเกณฑ์ที่กำหนด จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ร้อน เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินในสารผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลและยึดทุก ๆ องค์ประกอบเข้าด้วยกัน การเข้าสู่กระบวนการอบให้ความร้อนสูงทำให้วัสดุเสียดทานเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากขึ้น กระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการฝนตกแต่งวัสดุเสียดทานให้ได้ขนาดตามแบบที่กำหนดและส่งไปบรรจุภัณฑ์ต่อไป [3]



รูปที่ 2.31 กระบวนการทั่วไปในการผลิตวัสดุเสียดทาน

## 2.5 การเฟด

เฟด (Fade) เป็นคำนิยามของการเบรกที่มีประสิทธิภาพแย่งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกมีค่าลดลงทำให้ต้องออกแรงในการเหยียบเบรกมากขึ้น โดยเซอร์วูด ลี (Sherwood Lee) ได้แบ่งประเภทการเฟดออกเป็น 3 ชนิด [10, 11] คือ

### 2.5.1 แพนดเฟด

ผ้าเบรกแต่ละชนิดถูกออกแบบในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบของผ้าเบรกแต่ละชนิดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากที่สุดที่อุณหภูมิหนึ่ง แต่เมื่อนำผ้าเบรกไปใช้งานจริงการเหยียบเบรกบ่อยทำให้อุณหภูมิในการเบรกสูงขึ้น องค์ประกอบต่าง ๆ ในผ้าเบรกเกิดการสลายตัว เช่น เส้นใย หรือ สารหล่อลื่น จากการสลายตัวของสารเหล่านี้ สารจะเคลือบอยู่บริเวณผิวหน้าของผ้าเบรกและจานเบรกส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงอย่างรวดเร็ว การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลักษณะนี้สามารถเรียกว่า แพนดเฟด (Pad fade)

### 2.5.2 กรีนเฟด

การเกิดกรีนเฟด (Green Fade) สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากมีสาเหตุจากสารยึดติดในผ้าเบรกเกิดการคายแก๊สออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของเรซิน โดยแก๊สที่คายออกมานั้นดันผ้าเบรกกับจานเบรกรอกออกจากกันขณะใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับผ้าเบรกที่เพิ่งเปลี่ยนใหม่และใช้งานได้ประมาณ 100 กิโลเมตร สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแพดเฟด



รูปที่ 2.32 ลักษณะการคายแก๊สขณะการใช้งาน [12]

### 2.5.3 เบรกฟลูอิดเฟด

เบรกฟลูอิดเฟด (Brake fluid fade) เกิดจากของเหลวในระบบเบรกมีความร้อนสูงจนถึงจุดเดือดของของเหลวในระบบมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทำให้ของเหลวในระบบเบรกเดือดและเกิดฟองอากาศขึ้น เนื่องจากระบบเบรกเป็นระบบปิดการเกิดฟองอากาศลักษณะนี้ภายในระบบเบรก ทำให้ลูกสูบไฮดรอลิกในระบบเบรกทำงานได้ไม่เต็มที่ส่งผลการทำงานของคาลิปเปอร์เบรกผิดปกติไม่สามารถเคลื่อนที่บีบผ้าเบรกกับจานเบรกได้เหมือนเดิม ซึ่งอาจจะต้องใช้แรงในการเหยียบเบรกที่เพิ่มขึ้น

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. A. Sai [10] ศึกษาปัจจัยของมวลโมเลกุลของฟีนอลิกเรซินปรับปรุงคุณภาพด้วยแอลคิลเบนซีนที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเฟด (Fade) พบว่าวัสดุเสียดทานที่เตรียมจากเรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีเปอร์เซ็นต์การเฟดน้อยที่สุด เนื่องจากวัสดุเสียดทานที่เตรียมจากเรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดการเปลี่ยนแปลงพลาสติกได้ง่ายทำให้พื้นผิวสัมผัสของวัสดุเสียดทานกับจานเบรกมีปริมาณที่มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์จึงเพิ่มสูงขึ้น

R. J. Talib [13] และคณะ ศึกษาปัจจัยของสัดส่วนของฟีนอลิกเรซินเมื่อใช้ปริมาณ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต่อค่าความแข็งและค่าความเป็นรูปพรุนในวัสดุเสียดทาน พบว่าใช้ฟีนอลิกเรซินในสัดส่วน 15 เปอร์เซ็นต์ วัสดุเสียดทานมีค่าความเป็นรูปพรุนต่ำที่สุด เนื่องจากฟีนอลิกเร

ซินที่ผสมลงในวัสดุเสียดทานเกิดการหลอมตัวเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคสารชนิดอื่น ๆ ได้มากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างสารลดลง และได้วัสดุเสียดทานมีความแข็งมากที่สุด

C. Peng [14] และคณะ ศึกษาปัจจัยของสัดส่วนฟีนอลิกเรซิน 2 ชนิด คือ โนโวแลกฟีนอลิกเรซินถูกปรับแต่งด้วยยางไนไต์ล (NPR) เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและรีซอลฟีนอลิกเรซินถูกปรับแต่งด้วยโบรอน (BPR) เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น ในสัดส่วน NPR:BPR ดังนี้ 1:0 0.75:0.25 0.50:0.50 0.25:0.75 และ 0:1 ต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของวัสดุเสียดทาน พบว่าการเพิ่ม BPR ในสัดส่วนผสมส่งผลให้ค่าความเป็นรูปพูนของวัสดุเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น และสัดส่วน 0.25:0.75 ให้สมบัติทางความร้อนดีที่สุด เนื่องจาก BPR มีพันธะที่แข็งแรงการทำลายพันธะจึงต้องใช้พลังงานสูงกว่า NPR ซึ่ง NPR ช่วยเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซินช่วยให้วัสดุเสียดทานมีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถทนความร้อนได้ดีมากขึ้น

Y. C. Kim [15] และคณะ ศึกษาปัจจัยของฟีนอลิกเมื่อใช้ปริมาณฟีนอลิกเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ ต่อประสิทธิภาพของวัสดุเสียดทาน พบว่าใช้ปริมาณฟีนอลิกมากทำให้ความแข็งของวัสดุเสียดทานมีค่าสูงขึ้นแต่ค่าความเป็นรูปพูนและค่าแรงกดอัดที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากฟีนอลิกเรซิน ปริมาณมากสามารถไหลสู่บริเวณช่องว่างระหว่างสารได้มากทำให้ค่าความเป็นรูปพูนลดลง ความแข็งของวัสดุเสียดทานเพิ่มขึ้นความสามารถในการกดอัดวัสดุเสียดทานน้อยลงส่งผลให้วัสดุเสียดทานมีพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสที่แท้จริงมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจึงมีค่าสูงขึ้น

K. Tanaka [16] และคณะ ศึกษาผ้าเบรกที่มีองค์ประกอบของฟีนอลิกเรซินและแร่ใยหิน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถึงภาวะการทดสอบสุดท้ายที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแร่ใยหินเมื่อผ้าเบรกได้รับความร้อนและแรงกระทำต่อบริเวณผิวหน้าผ้าเบรกทำให้ผ้าเบรกมีพื้นที่ผิวสัมผัสจานเบรกได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำลงเมื่ออุณหภูมิในการเบรกสูงขึ้นจนถึงจุดที่สารหล่อลื่นในผ้าเบรกเกิดการสลายตัวทำให้เกิดเป็นของเหลวหรือแก๊สขึ้นบริเวณผิวหน้าของผ้าเบรกส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกมีค่าลดลง

H. Q. Wang [17] และคณะ ศึกษาสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกโดยใช้ฟีนอลิกเรซิน 2 ชนิดทำหน้าที่เป็นสารยึดติดในผ้าเบรก คือ เรซินเอ (Binary structure) ผ่านการปรับแต่งพอลิเมอร์เมทริก ดังนี้ PF-Carboxylate และเรซินบี (Ternary structure) ผ่านการปรับแต่งพอลิเมอร์เมทริกดังนี้ PF-Epoxy-Carboxylate โดยเรซินบีจะให้หมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายกว่าเรซินเอทำให้การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงในโครงสร้างของเรซินบีสามารถเกิดได้มากกว่าเรซินเอ พบว่าเรซินบีให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเรซินเอ เนื่องจากเรซินบีสามารถยึดสารองค์ประกอบอื่น ๆ ได้ดีกว่าเรซินเอด้วยสมบัติเชิงความร้อนของเรซินบีที่มีการสลายตัวที่ซับซ้อนและใช้อุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่าเรซินเอ

J. Bijwe [18] และคณะ ศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วย CNSL (Cashew nut shell liquid) ต่อประสิทธิภาพการใช้งานในการเฟดและการกลับคืนของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Fade and recovery behavior) พบว่าการปรับปรุงโครงสร้างของฟีนอลิกเรซินด้วย CNSL ไม่ช่วยปรับปรุงการเฟดและการกลับคืนของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานให้ดีขึ้น และยังไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกอย่างมีนัยสำคัญ

J. Bouajila [19] และคณะ ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของฟีนอลิกเรซิน ด้วยเครื่อง TGA/IR ที่ภาวะเฉื่อย (Inert atmosphere) พบว่าสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds; VOC) ตรวจวัดได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 850 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิก่อน 300 องศาเซลเซียส ค่า VOC ถูกวัดได้เพียงเล็กน้อย ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ค่า VOC ถูกวัดค่าได้สูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของฟีนอลิกเรซินเกิดการสลายตัวของพันธะเมทิลีน (Methylene bridges) และสามารถวัดค่าได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ต่อมาในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส ค่า VOC มีค่าลดลง และลดลงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากพันธะเมทิลีนเกิดการแตกหักเกิดเป็นฟีนอลิกไฮดรอกซิลฟังก์ชัน (Phenolic hydroxyl functions) ขึ้น สุดท้ายในช่วง 700 ถึง 850 องศาเซลเซียส ค่า VOC วัดค่าได้เพิ่มขึ้นจากการเกิด polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ของสารขึ้นมากที่สุดที่อุณหภูมินี้

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจาก บริษัท คอมแพ็คอินเตอร์เนชันแนล (1994) จำกัด

- 3.1.1 แบเรียมซัลเฟต (Barium Sulphate,  $BaSO_4$ ) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม
- 3.1.2 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide,  $Ca(OH)_2$ ) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม
- 3.1.3 เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) ทำหน้าที่เป็นเส้นใย
- 3.1.4 เส้นใยโลหะ (Steel fiber) ทำหน้าที่เป็นเส้นใย
- 3.1.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $CaCO_3$ ) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม
- 3.1.6 ฉนวนใยหิน (Rock wool) ทำหน้าที่เป็นเส้นใย
- 3.1.7 อนุภาคยาง (Rubber particle) ทำหน้าที่เป็นสารให้ความยืดหยุ่น
- 3.1.8 แกรไฟต์ (Graphite) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น
- 3.1.9 พลวง (Antimony, Sb) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น
- 3.1.10 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น
- 3.1.11 ฝุ่นแรงเสียดทาน (Friction dust) ทำหน้าที่เป็นผงขัด
- 3.1.12 เรซินเอ (Resin A) ระยะการไหล 17-30 มิลลิเมตร เวลาในการเป็นเจล 52-73 วินาที ปริมาณเฮกซามีน 5.6-6.6 เปอร์เซ็นต์ และราคา 83 บาทต่อกิโลกรัม
- 3.1.13 เรซินบี (Resin B) ระยะการไหล 30-50 มิลลิเมตร เวลาในการเป็นเจล 70-90 วินาที ปริมาณเฮกซามีน 7.3-8.3 เปอร์เซ็นต์ และราคา 72 บาทต่อกิโลกรัม

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานผ้าเบรกของสัดส่วนพินอลิกเรซินผสม การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และประสิทธิภาพของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1

### ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

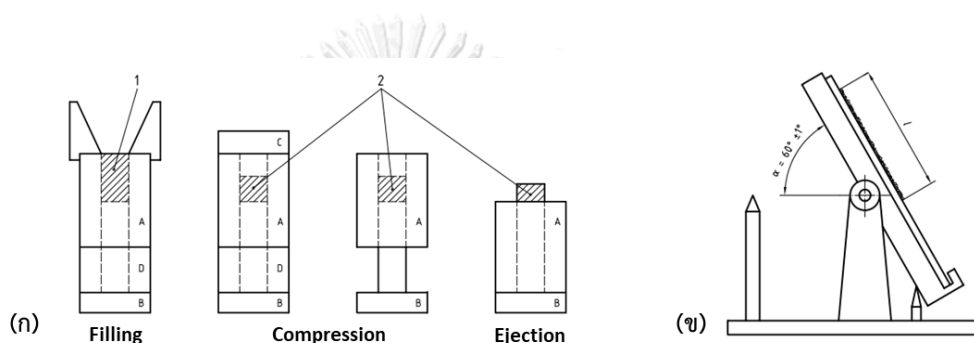
เครื่องมือ	บริษัท
➤ เครื่องผสมแบบแบบไถเฉือน (Ploughshare mixer)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ เครื่องขึ้นรูปแม่พิมพ์เย็น (Preforming molding machine)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ เครื่องขึ้นรูปแม่พิมพ์ร้อน (Hot-pressing molding machine)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ ตู้อบชิ้นงาน (Baking oven)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ เครื่องฝนตกแต่งผิวหน้า (Grinding machine)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing machine)	➤ Mitutoyo รุ่น WiZhard HR-521
➤ เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine)	➤ Narin Instrument รุ่น NRI TS501-100
➤ เครื่องทดสอบมอดุลัสพลวัต (Dynamic modulus testing machine)	➤ Industrial Measurement System รุ่น iETEK
➤ เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและทดสอบอัตราการสึก (Constant speed type friction test machine)	➤ Tokyo plant รุ่น HP-SA-LC
➤ เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis)	➤ TGA Q50 V6.7
➤ เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeters)	➤ PerkinElmer รุ่น DSC7
➤ ชุดสกัดแบบซอกเล็ต (Soxhlet Extractor)	➤ คอมแพ็คอินเตอร์เนชั่นแนล (1994), เพชรบุรี
➤ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	➤ Hitachi รุ่น Tabletop Microscope TM3030



### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การทดสอบระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสม

การทดสอบระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสม (Flow distance) โดยนำเรซินเอ และเรซินบีมาผสมกันด้วยอัตราส่วนเรซินเอต่อเรซินบีเป็น 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ จากนั้นนำฟีนอลิกเรซินผสมที่ได้มาทำการทดสอบระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินตามมาตรฐาน ISO 8619 โดยนำฟีนอลิกเรซินปริมาณ 1 มิลลิกรัม มาทำการอัด จากนั้นนำฟีนอลิกเรซินที่ผ่านการอัดแท่งวางบนกระจกเอียง 45 องศาที่กระดานบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ (ก) ขั้นตอนการอัดแท่งฟีนอลิกเรซิน และ (ข) กระจกเอียง 45 องศาที่กระดานบ [20]

#### 3.3.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสม

ทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสมด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้ฟีนอลิกเรซินน้ำหนัก 10 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม (Aluminum sample pans) จากนั้นทำการอัดจานอะลูมิเนียมที่ใส่สารตัวอย่าง วางจานอะลูมิเนียมเข้าเครื่องทดสอบซึ่งอยู่ภายใต้เตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยให้ความร้อนเริ่มต้นจาก 50 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 11357-5:2013(E) เพื่อพิจารณาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซินเมื่อผ่านการให้ความร้อน



รูปที่ 3.2 เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

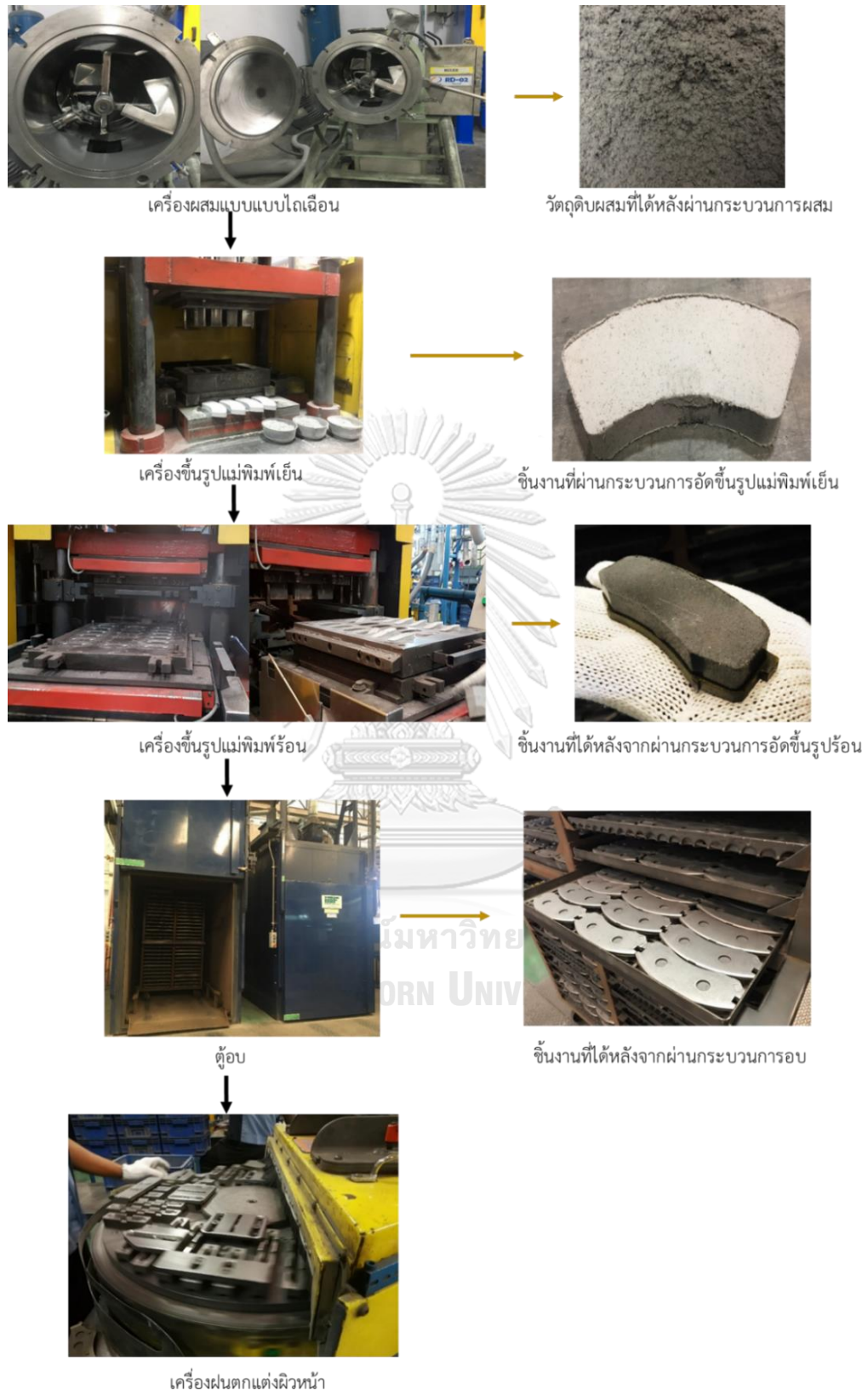
### 3.3.3 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานผ้าเบรกสามารถเตรียมได้โดยนำวัตถุดิบดังตารางที่ 3.2 เข้าเครื่องผสมแบบไถเดือนใช้อัตราเร็วใบกวนที่ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาที และใช้อัตราเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำวัตถุดิบผสมที่ได้มาอัดขึ้นรูปเย็นด้วยเครื่องขึ้นรูปแม่พิมพ์เย็น โดยใช้แรงดันในการกดอัด 8.27 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์เย็นเข้าสู่เครื่องอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ร้อน โดยภาวะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ร้อนเป็นดังนี้ ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (Preheating) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ขั้นที่ 2 อัดย้ำ (Venting) จำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 3 วินาที ขั้นที่ 3 อัดขึ้นงาน (Compression) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดันในการกดอัด 20.68 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนไปทำการอบในตู้อบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สุดท้ายนำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอบไปฝนผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรกด้วยเครื่องฝนตกแต่ง เพื่อเตรียมไปวิเคราะห์และสมบัติต่าง ๆ โดยกระบวนการเตรียมชิ้นงานแสดงได้ ดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนองค์ประกอบสารของวัสดุเสียดทาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

Components	R1	R2	R3	R4	R5
Fiber	9	9	9	9	9
Filler	57.5	57.5	57.5	57.5	57.5
Abrasive	8	8	8	8	8
Lubricant	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
Elastomer	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Resin A	5.5	4.12	2.75	1.38	0
Resin B	0	1.38	2.75	4.12	5.5
Total	100	100	100	100	100





รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

### 3.3.4 การทดสอบความถ่วงจำเพาะปรากฏของชิ้นงาน

การทดสอบความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) ทำการทดสอบโดยนำชิ้นงานผ้าเบรกที่ได้หลังกระบวนการอบมาชั่งน้ำหนักในอากาศด้วยเครื่องชั่งละเอียด จากนั้นนำชิ้นงานผ้าเบรกชิ้นเดิมมาชั่งน้ำหนักในน้ำ โดยการผูกชิ้นงานถ่วงในอ่างน้ำเป็นเวลา 1 นาที และบันทึกน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4417 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏได้ดังสมการที่ 3.1

$$d = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.1)$$

โดย  $d$  แทนความถ่วงจำเพาะปรากฏของชิ้นงาน  $m_1$  แทนน้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (g) และ  $m_2$  แทนน้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำเป็นเวลา 1 นาที (g)



รูปที่ 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

### 3.3.5 การคำนวณความเป็นรูพรุนของชิ้นงาน

ความเป็นรูพรุน (Porosity) สามารถคำนวณได้จากค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน ดังสมการที่ 3.2

$$\%Porosity = 100 - \left( \frac{S.G. \text{ true}}{S.G. \text{ theory}} \times 100 \right) \quad (3.2)$$

โดย  $S.G. \text{ theory}$  แทนค่าความถ่วงจำเพาะจากการคำนวณ และ  $S.G. \text{ true}$  แทนค่าความถ่วงจำเพาะจากการทดสอบชิ้นงาน

### 3.3.6 การทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

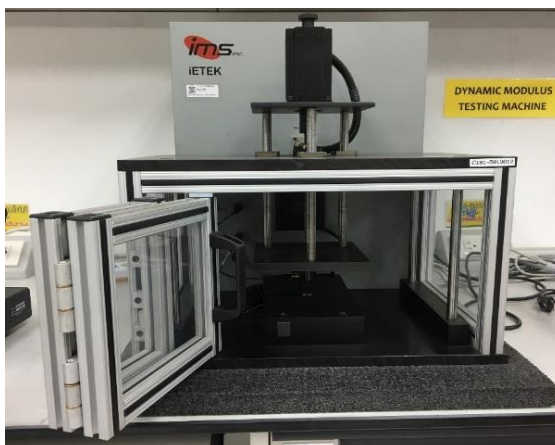
ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน (Hardness) ทำได้โดยนำชิ้นงานมาวัดค่าความแข็ง ร็อกเวล (Rockwell hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing machine) แสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้ภาวะในการทดสอบ ดังนี้ ใช้สเกล S (HRS) แรงในการกดที่ 980.7 นิวตัน และใช้หัวบอลเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.7 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS D 4421



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง

### 3.3.7 การทดสอบไดนามิกมอดุลัสของชิ้นงาน

การทดสอบไดนามิกมอดุลัส (Dynamic Modulus) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ามอดุลัสของชิ้นงาน โดยวัดค่าผ่านเครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัส (Dynamic modulus testing machine) แสดงในรูปที่ 3.6 การทำงานของเครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัสจะปล่อยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave) ผ่านชิ้นงานที่ทดสอบคลื่นที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านชิ้นงานจะถูกนำไปคำนวณเป็นค่ามอดุลัสออกมา ตามมาตรฐานการทดสอบ SAE J2725 โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น มีการวัด 5 ตำแหน่งอย่างทั่วถึง



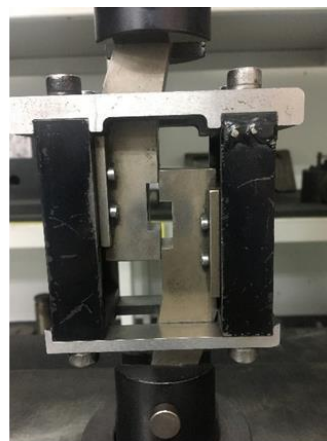
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัส

### 3.3.8 การทดสอบสมบัติความทนแรงเฉือน

การทดสอบสมบัติความทนแรงเฉือน (Shear strength test) ของชั้นงานทำได้โดยการนำชั้นงานหลังผ่านกระบวนการอบขนาดตามมาตรฐาน JIS D 4415 แสดงในรูปที่ 3.7 ทดสอบด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) แสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อหาแรงเฉือนที่มากที่สุดของชั้นงานเมื่อชั้นงานขาดออกจากกัน โดยใช้อัตราเร็วในการดึงเฉลี่ย  $4,500 \pm 500$  นิวตันต่อวินาที



รูปที่ 3.7 ลักษณะชั้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.8 เครื่องยูนิเวอร์แซล และลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน

### 3.3.9 การทดสอบปริมาณการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของพีนอลิกเรซิน

การสกัดอะซิโตน (Acetone extraction) ทำได้โดยการนำชิ้นงานผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการอบมาทำการบดให้ละเอียด จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการบดมาคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ให้ชิ้นงานมีขนาดระหว่าง 425 ไมโครเมตร และ 106 ไมโครเมตร และนำชิ้นงานที่ได้มาชั่งบนกระตาศกรองปริมาณ 3 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปเข้าสู่ชุดสกัดซอกเลต (Soxhlet extraction) ที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM 494 เมื่อครบเวลานำอะซิโตนที่ใช้เป็นตัวทำละลายออกมาใส่ในกระตาศฟอยล์ (Foil) รอให้แห้ง แสดงในรูปที่ 3.9 แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะซิโตน ตามสมการที่ 3.3

$$\% \text{ Acetone Extraction} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.3)$$

โดย  $W_1$  แทนน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)  $W_2$  แทนน้ำหนักกระตาศฟอยล์ (g) และ  $W_3$  แทนน้ำหนักกระตาศฟอยล์หลังอะซิโตนแห้ง (g)



ชิ้นงานผ่านการบด



เครื่องร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Shaker)



ชิ้นงานขนาด 425 - 106 ไมโครเมตร



ชุดสกัดซอกเลต (Soxhlet extraction)



ระเหยเอาตัวทำละลายออก



ลักษณะกระดาษฟอยล์ที่แห้งแล้ว

รูปที่ 3.9 การสกัดด้วยอะซิโตน

### 3.3.10 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของผ้าเบรก

การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวเป็นการทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวของผ้าเบรกด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และปริมาณเถ้า (Residue) โดยนำผงชิ้นงานที่ผ่านการบดหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ลงภาชนะที่ทำจากอะลูมินา ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ใช้ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก [21]

### 3.3.11 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกของชิ้นงาน

- ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าการสึกของชิ้นงานด้วยเครื่อง

#### Constant speed type friction test machine

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกด้วยเครื่อง Constant speed type friction test machine ทำได้โดยการนำชิ้นงานผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการอบขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จำนวน 2 ชิ้น เข้าทดสอบด้วยเครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและทดสอบอัตราการสึก (Brake lining tester) แสดงในรูปที่ 3.12 โดยวัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของจานเบรกกับตัวผ้าเบรกมีสภาวะในการทดสอบดังนี้ ช่วงการทดสอบอุณหภูมิขาขึ้นที่ 100 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วในการหมุนจาน 7 รอบต่อวินาที แรงดันในการกดชิ้นงานทดสอบ 1 เมกะปาสคาล และจำนวนรอบการหมุนของจานที่ใช้ในการทดสอบ 5000 รอบ

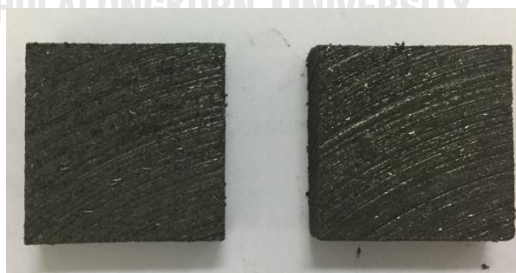
ในรอบการทดสอบของแต่ละอุณหภูมิชิ้นงานจะถูกนำมาวัดความหนาและชั่งน้ำหนักหลังทดสอบ จากนั้นทดสอบที่อุณหภูมิ 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในการทดสอบข้างคล้ายกับการทดสอบข้างขึ้นแต่แตกต่างกันที่จำนวนรอบการหมุนของงานที่ใช้ในการทดสอบการทดสอบข้างใช้จำนวนรอบการหมุน 1500 รอบ ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4411 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ดังสมการที่ 3.4

$$\mu = \frac{f}{F} \quad (3.4)$$

โดย  $\mu$  แทนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  $f$  แทนแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น (N) และ  $F$  แทนแรงทั้งหมดที่ถูกกดบนชิ้นงานทดสอบ (N) และสามารถคำนวณหาค่าการสึกของชิ้นงานได้ดังสมการที่ 3.5

$$V = \frac{1}{2\pi R} \times \frac{1}{n} \times \frac{W_1 - W_2}{f_m \rho} \quad (3.5)$$

โดย  $V$  แทนค่าอัตราการสึกของชิ้นงาน ( $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )  $R$  แทนค่าระยะทางของตรงกลางชิ้นงานถึงจุดศูนย์กลางของงานทดสอบ (150 mm)  $n$  แทนจำนวนรอบในการทดสอบ  $W_1$  แทนน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (g)  $W_2$  แทนน้ำหนักชิ้นงานหลังทดสอบ (g)  $f_m$  แทนแรงเสียดทานเฉลี่ยทั้งหมดระหว่างการทดสอบ และ  $\rho$  แทนความหนาแน่นของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานผ้าเบรกขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและทดสอบอัตราการสึก

- **ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์**

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ เริ่มจากการนำชิ้นงานผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการผลิต ทำการขัดผิวหน้าและผ่าร่องให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ จากนั้นนำผ้าเบรกไปติดตั้งบนเครื่องไดนาโมมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และทำการทดสอบการเบรกในภาวะจำลองการใช้งานจริงตามมาตรฐานการทดสอบการเบรก AK-MASTER SAE J2522 ในช่วงการทดสอบเฟด



รูปที่ 3.13 เครื่องเบรกไดนาโมมิเตอร์

### 3.3.12 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ก่อนและหลังการทดสอบการสึกของชิ้นงาน เพื่อดูลักษณะการสึกของชิ้นงานที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.14



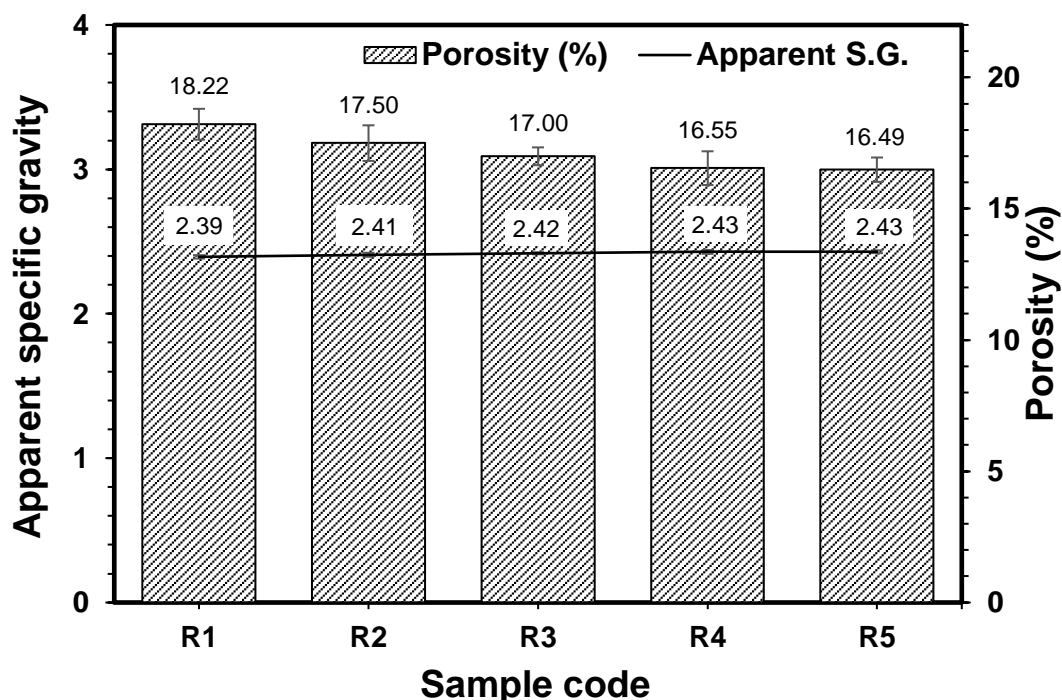
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [22]

## บทที่ 4

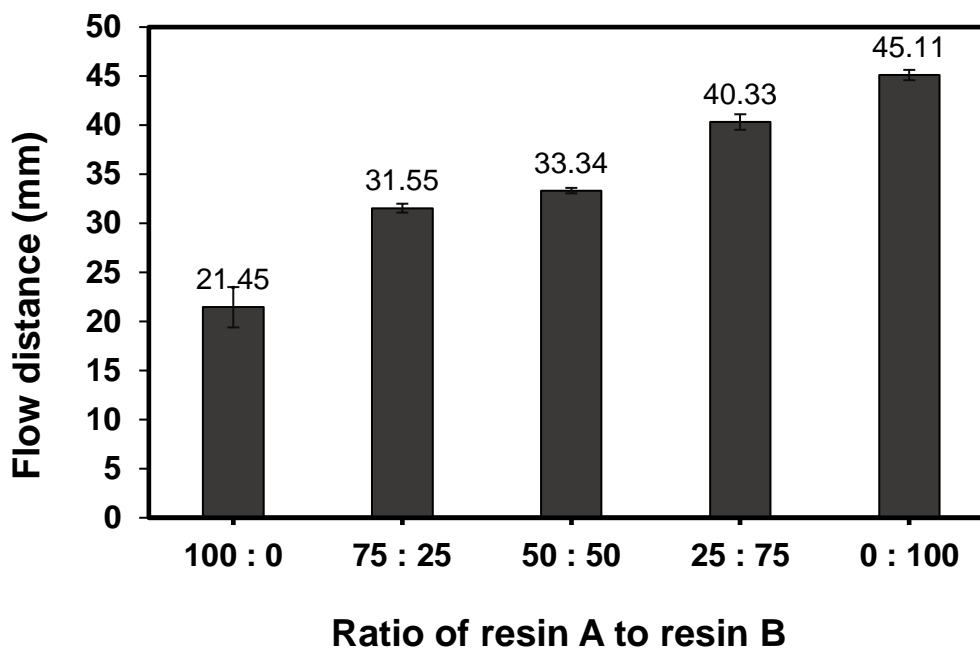
### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรก

รูปที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรกโดยใช้สัดส่วนฟีนอลิกเรซินผสมเรซินเอต่อเรซินบีที่แตกต่างกัน พบว่าผ้าเบรกสูตร R1 ที่ใช้แต่เฉพาะเรซินเอ มีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเฉลี่ยเท่ากับ 2.39 และผ้าเบรก R5 ที่ใช้แต่เรซินบีมีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเฉลี่ย เท่ากับ 2.43 ดังนั้น จากค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเฉลี่ยของผ้าเบรกที่ได้เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเรซินบีในสัดส่วนผสมไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกในปริมาณสัดส่วนที่ต่างกัน เมื่อนำค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏที่ได้ไปคำนวณหาความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก ดังสมการที่ 3.1 พบว่าค่าความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเรซินบีในสัดส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเรซินบีส่งผลให้ค่าระยะการไหลของฟีนอลิกเรซินผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.2) เรซินบีจึงสามารถไหลเข้าแทรกระหว่างช่องว่างองค์ประกอบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างสารองค์ประกอบถูกเติมเต็มได้มากขึ้น [13, 23]



รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรกโดยใช้สัดส่วนฟีนอลิกเรซินผสมเรซินเอต่อเรซินบีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 ค่าระยะการไหลของฟันอลิกเรซินผสมที่สัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบีแตกต่างกัน

#### 4.2 สมบัติเชิงกลของผ้าเบรก

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกโดยใช้สัดส่วนฟันอลิกเรซินผสมที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งและค่ายังมอดุลัสของผ้าเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเรซินบีในสัดส่วนฟันอลิกเรซินผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบภายในเรซินบีมีปริมาณเฮกซามีนสูงกว่าเรซินเอ โดยเรซินเอมีปริมาณเฮกซามีน 6.2 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เรซินบีมีปริมาณเฮกซามีน 7.8 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งโครงสร้างของเฮกซามีนยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งเกร็ง (Rigidity) ของผ้าเบรก นอกจากนี้การเติมเฮกซามีนยังทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงในปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของฟันอลิกเรซิน [24] ทำให้ผ้าเบรกที่มีเรซินบีอยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลได้สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งและค่ายังมอดุลัสของผ้าเบรกเพิ่มมากขึ้น [14]

การทดสอบค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือนและค่าความเหนียว (คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียดของการทดสอบการทนแรงเฉือน) ของผ้าเบรกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนเรซินบีเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในตัวอย่างผ้าเบรกชนิด R3 (สัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบี 50 ต่อ 50) หลังจากเพิ่มปริมาณเรซินบีมากขึ้น ค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือนจะมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากปริมาณรูพรุนในระดับ microvoid มีค่าเพิ่มขึ้น (หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานในกระบวนการพิมพ์ร้อน) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัตถุ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือนและความเหนียวของผ้าเบรกที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากความร้อนที่ชิ้นงานได้รับมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์

เช่น ฟีนอลิกเรซินบางส่วนได้ ทำให้ความแข็งแรงในการยึดกันระหว่างสารองค์ประกอบอื่น ๆ มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือนและความเหนียวของผ้าเบรคมีค่าลดลง [17]

เมื่อจำลองลักษณะของเรซินเอและเรซินบีหลังจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กระบวนการแรกของการผลิตผ้าเบรคคือกระบวนการผสมเคมี ซึ่งจะมีการนำองค์ประกอบจำพวก เส้นใยเสริมแรง สารตัวเติม สารหล่อลื่น และสารยึดติด (เรซินเอและเรซินบี) มาผสมเข้าด้วยกันเพื่อให้สารกระจายตัวได้สม่ำเสมอ จากนั้นนำสารผสมเข้ากระบวนการอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์เย็น สารองค์ประกอบต่าง ๆ มีการเรียงตัวแบบสุ่มทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างสารขนาดใหญ่ 10-50 ไมโครเมตร (Macrovoid) [25] เกิดขึ้น ซึ่งในขั้นนี้ฟีนอลิกเรซินยังไม่เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเพื่อยึดสารองค์ประกอบต่าง ๆ จากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการอัดแม่พิมพ์ร้อน เมื่อฟีนอลิกเรซินได้รับความร้อนจะเกิดการไหลเข้าแทรกระหว่างสารองค์ประกอบต่าง ๆ ทำให้ช่องว่างระหว่างสารบางส่วนถูกเติมเต็ม ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างสารขนาดใหญ่บางส่วนกลายเป็นช่องว่างขนาดเล็ก 2-10 ไมโครเมตร (Microvoid) นอกเหนือจากนั้นการสลายตัวของเฮกซามีนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดแก๊สแอมโมเนีย ส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กเกิดได้มากขึ้นในเนื้อของฟีนอลิกเรซินหลังเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล จากปริมาณเฮกซามีนของเรซินบีที่มีมากกว่าเรซินเอ ทำให้เรซินบีมีโอกาสเกิดช่องว่างขนาดเล็กได้มากกว่าเรซินเอ ซึ่งการมีช่องว่างขนาดเล็กในผ้าเบรคที่มากเกินไปส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่อได้รับแรงจากการดึงชิ้นงาน เนื่องจากปริมาณช่องว่างขนาดเล็กที่มีมากทำให้ระยะห่างระหว่างช่องว่างของผ้าเบรคลดลง เมื่อมีแรงมากกระทำต่อผ้าเบรคแรงกระทำนั้นสามารถส่งผ่านเนื้อผ้าเบรคได้น้อยลงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของผ้าเบรคมีค่าลดลง [26]

**ตารางที่ 4.1** ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของผ้าเบรคที่มีสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบีแตกต่างกัน

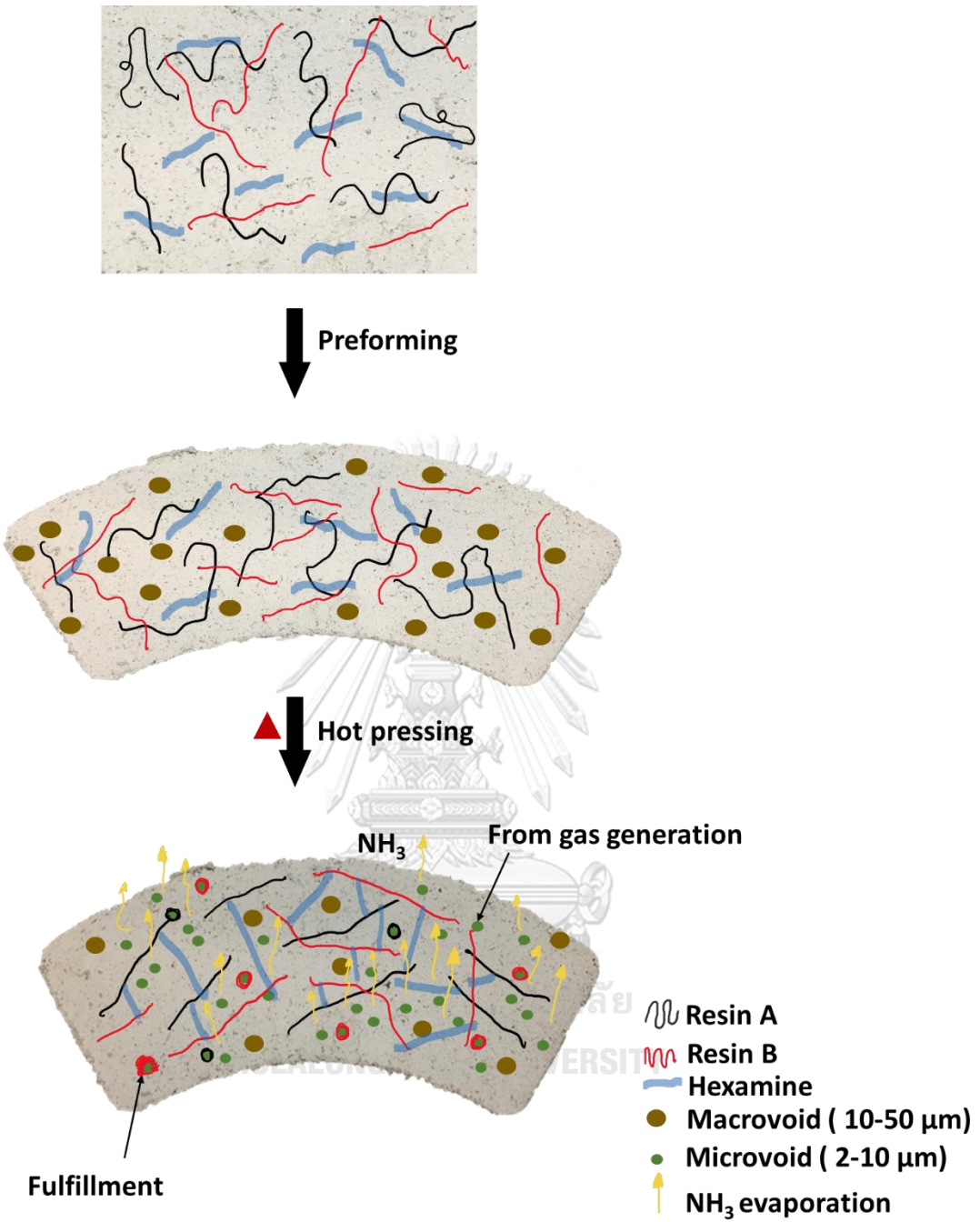
Sample code	Hardness <sup>1</sup> (HRS)	Young's modulus <sup>2</sup> (GPa)	Shear strength <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )		Toughness <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	
			RT.	300 (°C)	RT.	300 (°C)
R1	54.6 ± 1.17	1.59 ± 0.028	4.50 ± 0.29	4.45 ± 0.58	5.09 ± 1.14	4.98 ± 1.22
R2	61.9 ± 2.13	1.85 ± 0.043	4.96 ± 0.38	4.30 ± 0.34	6.03 ± 1.19	4.00 ± 0.88
R3	66.9 ± 1.21	1.96 ± 0.039	5.62 ± 0.47	4.84 ± 0.34	7.31 ± 1.30	5.04 ± 0.78
R4	70.4 ± 1.69	2.00 ± 0.037	5.23 ± 0.61	4.62 ± 0.38	7.28 ± 1.97	4.76 ± 0.59
R5	73.1 ± 1.13	2.09 ± 0.048	5.18 ± 0.57	4.23 ± 0.42	5.78 ± 1.66	4.10 ± 0.79

<sup>1</sup>Determined by a hardness testing machine

<sup>2</sup>Determined by a dynamic modulus testing machine

<sup>3</sup>Determined by a universal testing machine

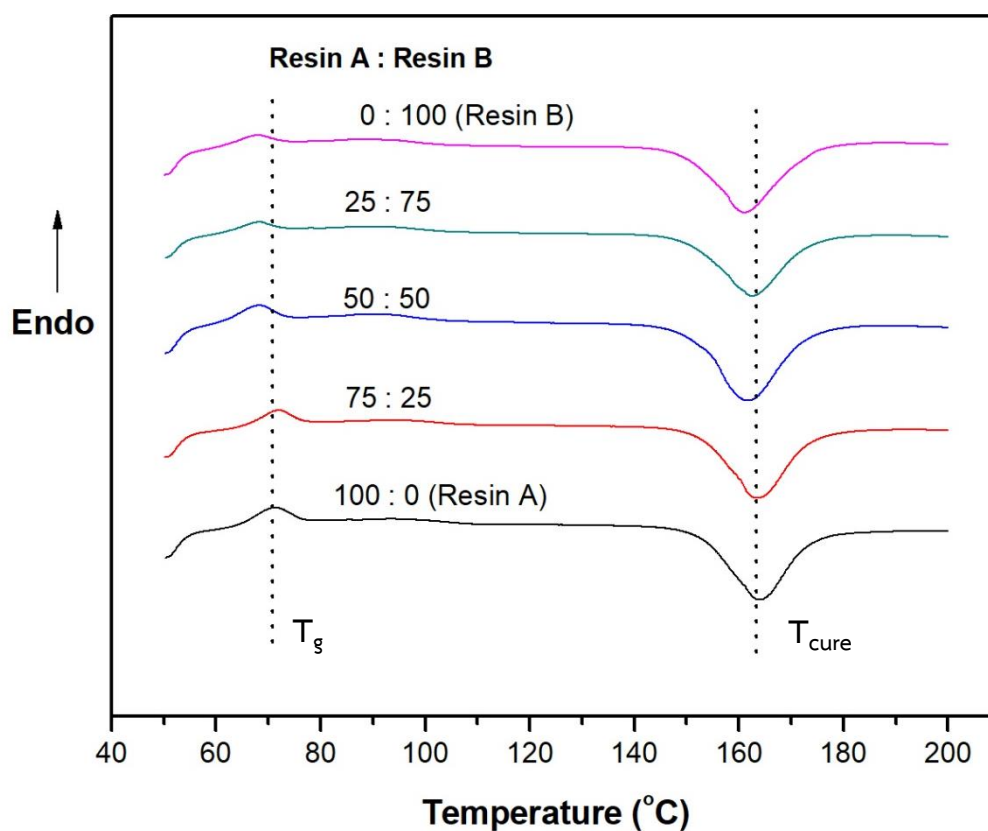




รูปที่ 4.3 แบบจำลองลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โม่เลกุล

### 4.3 สมบัติเชิงความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสม

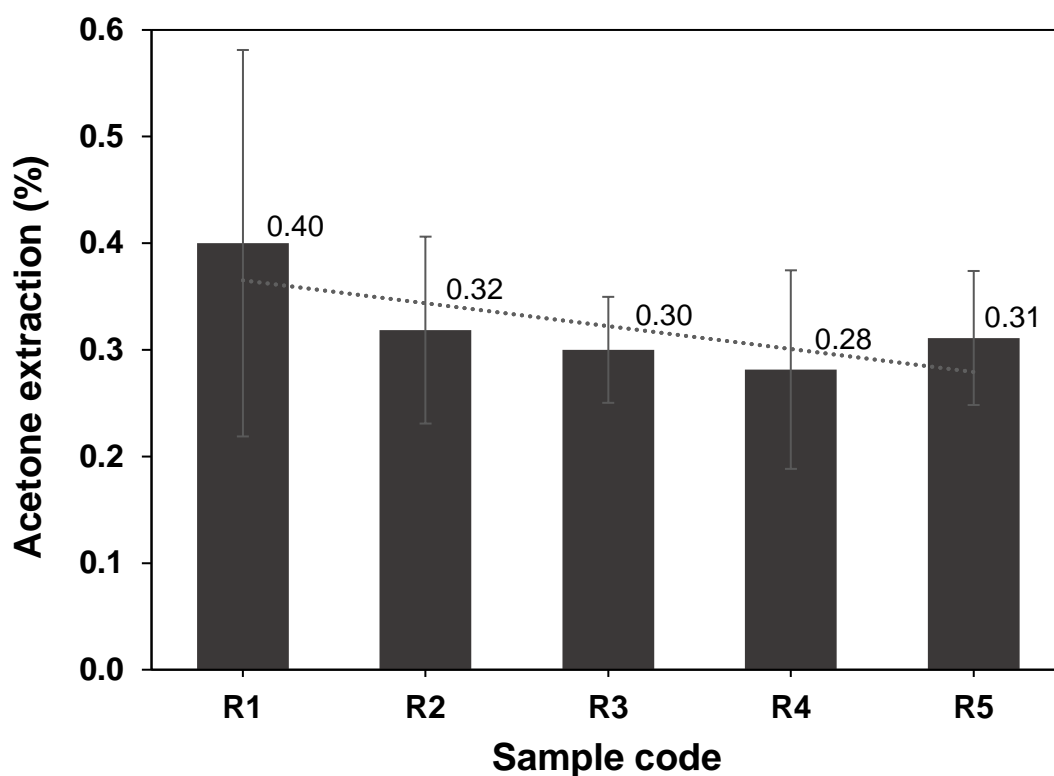
รูปที่ 4.4 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของฟีนอลิกเรซินผสม พบว่า ฟีนอลิกเรซินแต่ละสัดส่วนให้ลักษณะ DSC เทอร์โมแกรมที่คล้ายกัน โดยมีพิกปรากฏขึ้น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส พิกที่เกิดขึ้นเป็นพิกดูดความร้อนแสดงถึงอุณหภูมิทรานสิชันแก้ว ( $T_g$ ) ของฟีนอลิกเรซิน ณ อุณหภูมินี้สายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซินสามารถเคลื่อนไหวได้ และช่วงอุณหภูมิ 145 ถึง 175 องศาเซลเซียส ปรากฏพิกคายความร้อนบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ฟีนอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ( $T_{cure}$ ) จาก DSC เทอร์โมแกรมของฟีนอลิกเรซิน พบว่าจุดยอดของพิกทั้ง 2 เกิดการย้ายไปทางอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อสัดส่วนของเรซินบีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการทดสอบระยะเวลาการไหลของฟีนอลิกเรซิน ณ เวลาการทดสอบเท่ากัน (รูปที่ 4.2) ระยะเวลาการไหลของเรซินบีมีค่ามากกว่าเรซินเอ เป็นไปได้ว่าเรซินบีมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิกเรซินได้ที่ต่ำกว่าเรซินเอ จากข้อมูลนี้สรุปได้ว่าการใส่เรซินบีเพิ่มในอัตราส่วนส่งผลให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลในฟีนอลิกเรซินเกิดได้เร็วขึ้น (เกิดที่อุณหภูมิต่ำลง) [14, 27]



รูปที่ 4.4 DSC เทอร์โมแกรมของฟีนอลิกเรซินผสมแต่ละสัดส่วน

#### 4.4 การสกัดอะซิโตนของผ้าเบรก

รูปที่ 4.5 แสดงปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายของโซโมเลกุลด้วยวิธีการสกัดอะซิโตน พบว่า ผ้าเบรก R1 มีปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซโมเลกุลน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดส่วนที่เหลือ (Residue) หลังจากสกัดด้วยอะซิโตนมากที่สุด จากผลการทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินผสมด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซโมเลกุลของเรซินบีสูงกว่าเรซินเอ ซึ่งในงานวิจัยนี้การขึ้นรูปชิ้นงานของผ้าเบรกในกระบวนการอัดแม่พิมพ์ร้อนศึกษาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที โดยเรซินบีมีอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิในกระบวนการอัดแม่พิมพ์ร้อนมากกว่าส่วนอื่น ดังนั้นการเพิ่มเรซินบีในส่วนฟีนอลิกเรซินผสมจะช่วยเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซโมเลกุลได้ดีขึ้น ส่งผลให้เหลือปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซโมเลกุลน้อยลง [28]



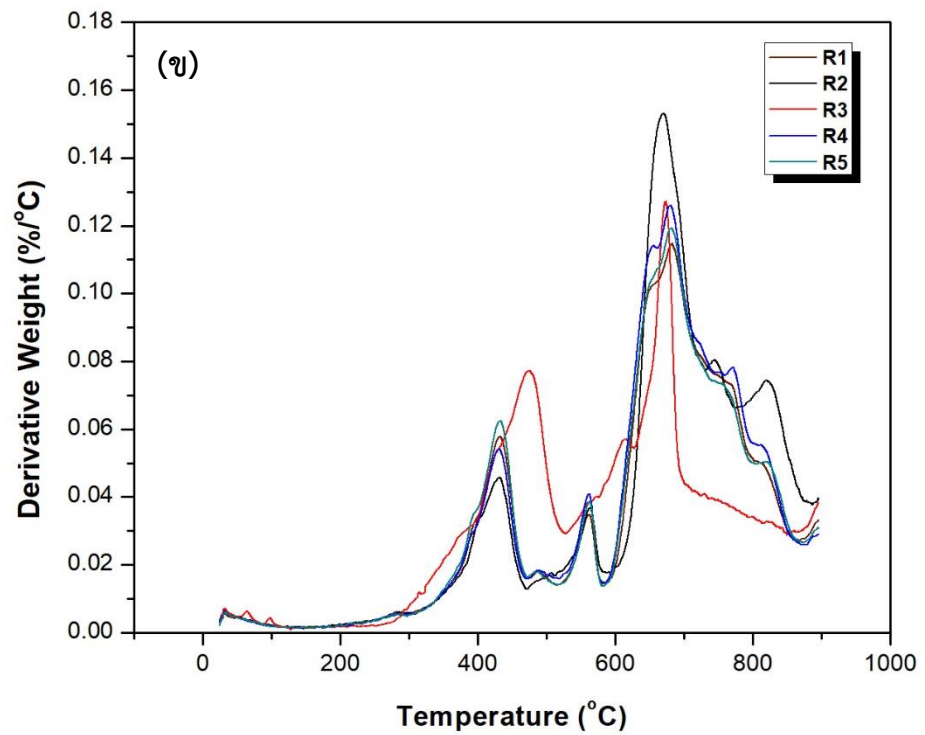
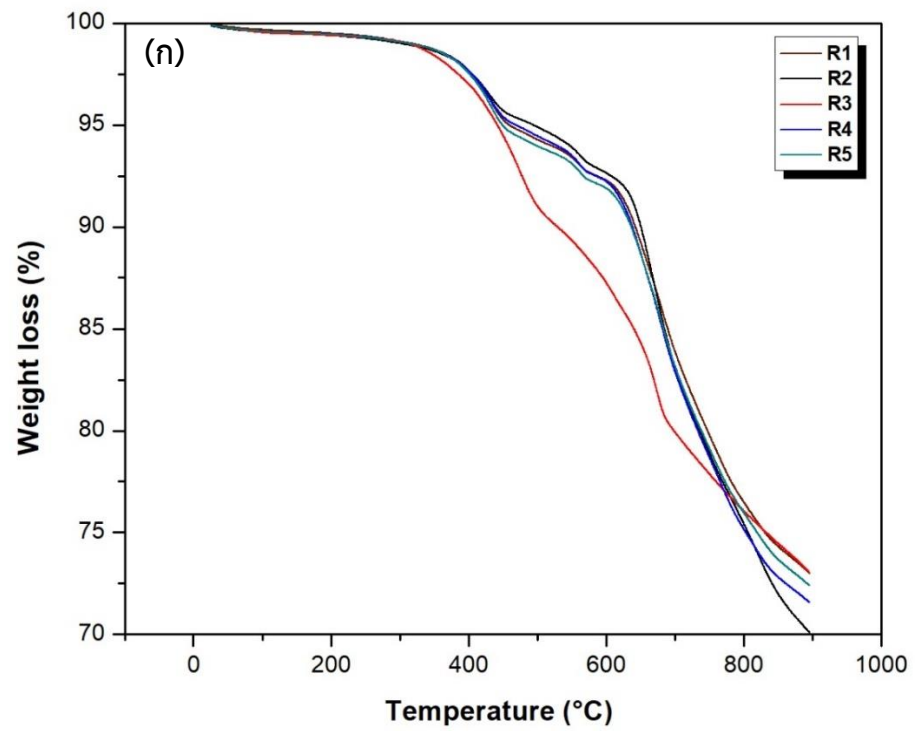
รูปที่ 4.5 ปริมาณสารที่สกัดได้จากการสกัดอะซิโตน

#### 4.5 ความเสถียรทางความร้อนของผ้าเบรก

รูปที่ 4.6 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของผ้าเบรก พบว่าทุกชนิดของผ้าเบรกแสดง TGA เทอร์โมแกรมที่คล้ายกัน โดยน้ำหนักของสารที่หายไปแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิระหว่าง 330 ถึง 450 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของฟีนอลิกเรซินบางส่วน ช่วงที่ 2 อุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 690 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของเส้นใยเคพลาร์และฟีนอลิกเรซินซึ่งการสลายตัวของฟีนอลิกเรซินจะมีช่วงการสลายตัวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส [19] และช่วงที่ 3 อุณหภูมิระหว่าง 690 ถึง 900 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของพลาสม่าและสารอินทรีย์ที่เหลือในผ้าเบรก นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักสารเหลือหลังการทดสอบอยู่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น โดยสารที่เหลือจากการทดสอบส่วนใหญ่เป็นสารประเภทอนินทรีย์ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมในผ้าเบรก เช่น แบเรียมซัลเฟต เป็นต้น อีกทั้งน้ำหนักของสารที่เหลือยังรวมถึงเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ร่วมด้วย

#### 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรก

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน คือ อัตราส่วนระหว่างแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุต่อแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ใช้อบ่งบอกถึงความสามารถของผ้าเบรกในการลดความเร็วของรถขณะใช้งาน การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่โรงงานผลิตผ้าเบรกใช้มี 2 ลักษณะ ดังนี้ ลักษณะที่ 1 ใช้ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเบื้องต้นของผ้าเบรก โดยเครื่อง Constant speed type friction test machine เมื่อนำผ้าเบรกเข้าทดสอบผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ที่อุณหภูมิการทดสอบเดียวกันผ้าเบรกให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น ผ้าเบรกเมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากจะเกิดการขยายตัวสัมผัสบริเวณจานเบรกได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



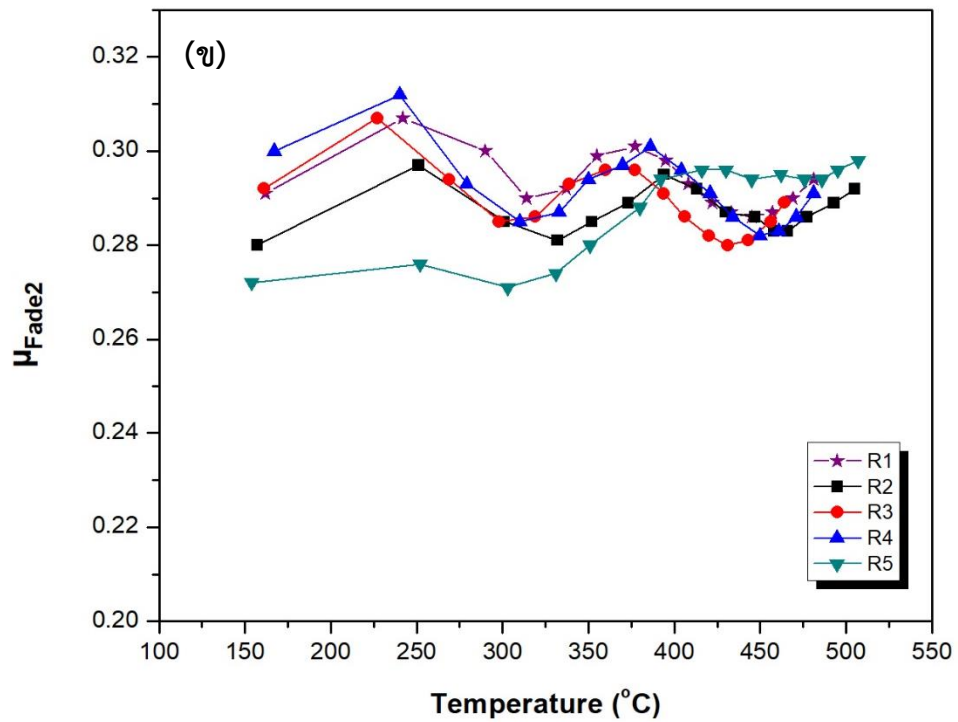
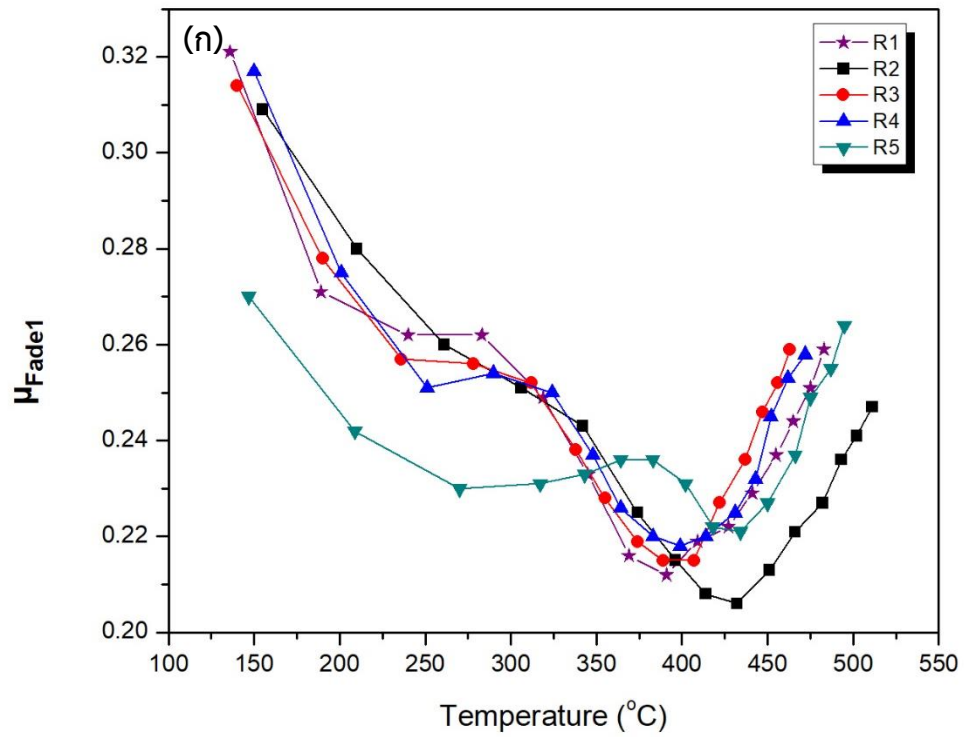
รูปที่ 4.6 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าเบรก (ก) Weight loss และ (ข) Derivative weight

ลักษณะที่ 2 ใช้เพื่อพิจารณาการจำลองการใช้งานจริงที่ภาวะการขับเคลื่อนต่าง ๆ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์ ในการทำงานวิจัยนี้จำลองเพียงช่วงเฟด ซึ่งช่วงเฟดเป็นการจำลองการใช้งานจริงของผ้าเบรกขณะที่ผ้าเบรกมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 500 องศาเซลเซียส ในการทดสอบจะทำการทดสอบ 2 รอบในผ้าเบรกหนึ่งชิ้น ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ทุกชนิดของผ้าเบรกแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกันทั้งในการทดสอบเฟดรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ในการทดสอบเฟดรอบแรกจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าการเฟดรอบที่ 2 เนื่องจากในเฟดรอบแรกจะมีการเกิดกรีนเฟดร่วมด้วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้มีค่าน้อย การเกิดกรีนเฟดคือการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงหลังใช้งานเนื่องจากเกิดการคายแก๊สแอมโมเนีย แก๊สดังกล่าวเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดแม่พิมพ์ร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของพีนอลิกเรซินในชิ้นงานผ้าเบรก

การทดสอบเฟดรอบที่สอง สังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกลดลงอยู่ 2 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ ช่วง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส และ ช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยช่วงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ลดลงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA โดยช่วง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เริ่มมีการสลายตัวของพีนอลิกเรซินบางส่วน และช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของเส้นใยเคฟลาร์และพีนอลิกเรซิน จากการสลายตัวของสารประกอบในผ้าเบรกส่งผลให้ความแข็งแรงของผ้าเบรกลดลง การฉีกผิวหน้าของงานเบรกมีประสิทธิภาพน้อยลงเป็นผลทำให้แรงเสียดทานของผ้าเบรกมีค่าลดลงเมื่อมีการสลายตัวขององค์ประกอบดังกล่าวในเนื้อผ้าเบรก [15]

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดสอบโดยเครื่อง Constant speed type friction test machine

Temperature (°C)	Friction coefficient ( $\mu$ )				
	R1	R2	R3	R4	R5
100	0.18	0.22	0.22	0.22	0.19
150	0.25	0.32	0.32	0.32	0.25
200	0.30	0.38	0.35	0.37	0.30
250	0.34	0.36	0.35	0.35	0.35
300	0.36	0.36	0.31	0.33	0.35



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกจากการทดสอบด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ใน  
ภาวะเฟดครั้งที่ 1 (ก) และเฟดครั้งที่ 2 (ข)

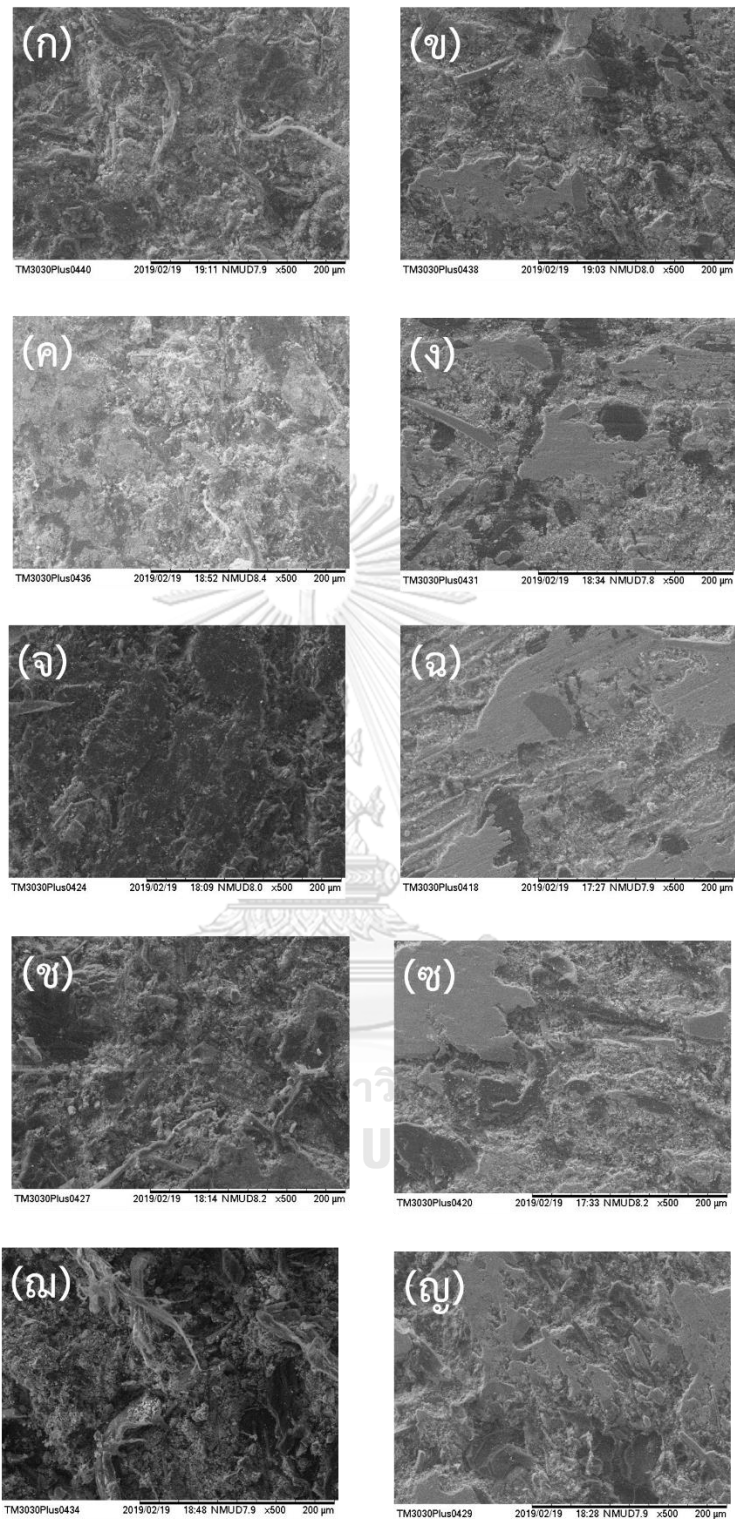
#### 4.7 ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรก

ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรกที่อุณหภูมิการทดสอบ 100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 ถึง 250 ให้อัตราการสึกที่ใกล้เคียงกัน และมีอัตราการสึกเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบการสลายตัวของผ้าเบรก รูปที่ 4.7 ในช่วงแรกแสดงการสลายตัวของฟีนอลิกเรซินบางส่วนเป็นผลให้พันธะของเรซินสูญเสียความแข็งแรงทำให้เส้นใยที่ถูกยึดอยู่ในเนื้อเรซินหลุดออกได้ง่ายขึ้น เมื่อแรงกดจากจานเบรกมากกระทำกับเส้นใยส่งผลให้เกิดฟิล์มของแรงเสียดทานขึ้น (Friction films) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยฟิล์มเสียดทานนี้สามารถเปลี่ยนรูปแตกออกและกลายเป็นฝุ่นที่ได้จากการเบรกในที่สุด [29]

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรก

Temperature (°C)	Wear by Mass ( $\times 10^{-7}$ cm <sup>3</sup> /Nm)				
	R1	R2	R3	R4	R5
100	0.12	0.09	0.07	0.07	0.05
150	0.07	0.06	0.05	0.06	0.09
200	0.08	0.04	0.03	0.04	0.06
250	0.09	0.11	0.09	0.09	0.09
300	0.34	0.26	0.39	0.31	0.26





รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของผ้าเบรกก่อน (ก) (ค) (จ) (ข) (ณ) และหลัง (ข) (ง) (ฉ) (ช) (ญ) การทดสอบหาอัตราการสึกของผ้าเบรก R1, R2, R3, R4 และ R5 ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

#### 4.8 การวิเคราะห์ต้นทุน

ในเชิงอุตสาหกรรมเรื่องต้นทุนการผลิตสินค้ามีความสำคัญต่อผลประกอบการของบริษัท ดังนั้นในส่วนนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 4.4 การใช้สัดส่วนผสมของเรซินปีที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่บริษัทใช้เพียงแต่เรซินเอนั้นจะส่งผลให้บริษัทประหยัดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้เรซินปีเพื่อทดแทนการใช้เรซินเอนั้นทั้งหมดนั้นยังไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการใช้สัดส่วนเรซินปีทั้งหมดให้ความแข็งแรงทางแรงเฉือนและความเหนียวของผ้าเบรกที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส น้อยที่สุดเมื่อเทียบค่ากับชิ้นงานทั้งหมด ผู้วิจัยจึงนำเสนอเลือกใช้สูตร R4 เนื่องจากผ้าเบรก R4 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเทียบกับสูตร R1 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และส่งผลให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้ 8.25 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งถ้าคิดเป็นปริมาณรวมทั้งปี ต้นทุนจะถูกระงับไป 90,750 บาท จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนปรับสัดส่วนของฟีนอลิกเรซินในผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกทำให้ทางบริษัทได้กำไรเพิ่มขึ้นถึง 90,750 บาทต่อปี

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนค่าใช้จ่ายฟีนอลิกเรซินต่อปี

Sample code	สัดส่วนเรซินเอนต่อเรซินปี	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (บาทต่อปี)
R1	100:0	83.00	0
R2	75:25	80.25	30,250
R3	50:50	77.50	60,500
R4	25:75	74.75	90,750
R5	0:100	72.00	121,000

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของฟีนอลิกเรซินผสมต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และประสิทธิภาพการใช้งาน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1 พบว่า การเพิ่มปริมาณเรซินบีในสัดส่วนผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงความร้อน และประสิทธิภาพการใช้งานของผ้าเบรก แต่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของผ้าเบรก โดยผู้วิจัยสนใจเลือกใช้สูตร R4 มานำเสนอ เนื่องจากในตัวอย่างผ้าเบรกชนิดนี้แสดงสมบัติเชิงกลที่ดี เมื่อเทียบกับค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือน และค่าความเหนียวของผ้าเบรก ซึ่งผ้าเบรกชนิด R1 เป็นตัวอ้างอิงของสูตรปัจจุบันที่ทางโรงงานดำเนินการอยู่ โดยสูตร R4 ปรับปรุงค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรงทางแรงเฉือน ค่าความเหนียวและยังช่วยให้ผ้าเบรกสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลในกระบวนการได้ดีขึ้น ในขณะที่ค่าความเสถียรทางความร้อนของผ้าเบรก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าอัตราการสึกยังคงอยู่ในเกณฑ์การใช้งานที่กำหนด จากการคำนวณต้นทุนราคาของฟีนอลิกเรซินในสัดส่วนผ้าเบรกชนิด R4 เทียบกับราคาผ้าเบรกที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน (R1) ยังสามารถช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 90,750 บาทต่อปี

#### ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยศึกษาผลของฟีนอลิกเรซินผสมต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและประสิทธิภาพของผ้าเบรก พบว่าการปรับสัดส่วนของเรซินเอต่อเรซินบีเป็น 25 ต่อ 75 สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกให้ดีขึ้น โดยให้สมบัติอื่น ๆ ไม่แตกต่างจากเดิมอีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึงปีละ 90,750 บาทต่อปี ดังนั้นผู้วิจัยจึงอยากแนะนำให้นำสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบี 25 ต่อ 75 ไปทดลองใช้กับสูตรการผลิตที่มีการปรับสัดส่วนขององค์ประกอบอื่น ๆ แตกต่างกันไป อาทิเช่น สารตัวเติม สารหล่อลื่น ผงขัด เป็นต้น ซึ่งอาจช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกให้ดีขึ้นได้

**ตารางที่ 5.1** เปรียบเทียบสมบัติของผ้าเบรกชนิด R1 และ ผ้าเบรกชนิด R4 ต่อผลกระทบ ต่อสมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรก

สมบัติของผ้าเบรก	ผ้าเบรกชนิด R1	ผ้าเบรกชนิด R4	ผลกระทบของการเพิ่มเรซินบีโน สัดส่วนผสม
<b>สมบัติเชิงกายภาพ</b>			
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.39 ± 0.012	2.43 ± 0.013	✗
ความเป็นรูพรุน (%)	18.22 ± 0.588	16.55 ± 0.643	✗
<b>สมบัติเชิงกล</b>			
ความแข็ง (HRS)	54.6 ± 1.17	70.4 ± 1.69	✓
ค่ายังมอดุลัส (GPa)	1.59 ± 0.028	2.00 ± 0.037	✓
ความแข็งแรงทางแรงเฉือน			
• อุณหภูมิห้อง (N/mm <sup>2</sup> )	4.5 ± 0.29	5.23 ± 0.61	✓
• อุณหภูมิ 300 °C (N/mm <sup>2</sup> )	4.45 ± 0.58	4.62 ± 0.38	✓
ค่าความเหนียว			
• อุณหภูมิห้อง (N/mm <sup>2</sup> )	5.09 ± 1.14	7.28 ± 1.97	✓
• อุณหภูมิ 300 °C (N/mm <sup>2</sup> )	4.98 ± 1.22	4.76 ± 0.59	✓
<b>สมบัติเชิงความร้อน</b>			
การสลายตัวทางความร้อนของผ้าเบรก	ให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน	ให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน	✗
<b>ประสิทธิภาพการใช้งาน</b>			
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (0.30-0.39)	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	✗
ค่าอัตราการสึก (0.30-1.50)	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	✗

✗ ไม่ส่งผลกระทบ และ ✓ ส่งผลกระทบ

## บรรณานุกรม

- [1] เสียรชัย บุญยะกุล, ระบบกันกระเทือนและเบรก, กรุงเทพฯ: บริษัท ศูนย์การพิมพ์แก่นจันทร์ จำกัด, 2543.
- [2] กฤษณา แก้วลอบ, "การอบรมความรู้พื้นฐานเรื่องความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุดีบุก และปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในการผลิต (สไลด์อบรม)," 2550.
- [3] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, "วัสดุเสียดทาน องค์ประกอบ และหน้าที่," 2548, หน้า 30.
- [4] C. D. Roberto, *Handbook of friction materials and their applications*, Cambridge: Elsevier, 2016.
- [5] D. Chan, and G. W. Stachowiak, "Review of automotive brake friction materials," *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 218, pp. 953-966, 2004.
- [6] บริษัท วอลล์ เทคโนโลยี จำกัด. "แร่ใยหิน หรือ Asbestos คือ อะไร?," 24 พฤษภาคม, 2562; <https://www.wtg.co.th/index.php/th/news/knowledge-insulated-sandwich-panel/413-what-is-asbestos.html>.
- [7] ปรีชา พหลเทพ, "โพลีเมอร์," ครั้งที่ 8: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2540, หน้า 436.
- [8] A. Pizzi, and C. C. Ibeh, "Phenol-Formaldehydes," *Handbook of Thermoset Plastics*, pp. 13-44: William Andrew, 2014.
- [9] เอกชัย จันทรา และ ศุภกร แดงฝู. "เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ให้พลังงานความร้อน," 28 พฤษภาคม <https://kwaithai.wordpress.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%83%E0%B8%AB%E0%B9%89%E0%B8%9E-2/>.
- [10] M. A. S. Balaji, "Effect of organic ingredients in a non-asbestos disc brake pad in relation to fade and wear," Faculty of Mechanical Engineering, Anna University, India, 2014.
- [11] P. Kosbe, "Characterization of fade and recovery behavior of brake friction material," *Institute of Technology*, 2011.

- [12] DIXCEL. "Brake Literature/PAD Literature," 24 May, 2019;  
<http://www.dixcel.co.jp/en/subcontent/literature/literature03.html>.
- [13] R. J. Talib, O.Eliasidi, M.Hisyam, N.I.Ismail, and K.Ramlan, "Effect of phenolic resin on the friction behaviors with respect to temperature and operating speed." pp. 1-6.
- [14] C. Peng, W. Yanming, W. Tingmei, and W. Qihua, "Effect of resin on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials," *Tribology International*, vol. 87, pp. 1-10, 2015.
- [15] Y. C. Kim, M. H. Cho, S. J. Kim, and H. Jang, "The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials," *Wear*, vol. 264, pp. 204-210, 2008.
- [16] K. Tanaka, S. Ueda, and N. Noguchi, "Fundamental studies on the brake friction of resin-based friction materials," *Wear*, vol. 23, pp. 349-365, 1973.
- [17] H. Q. Wang, X. X. Wu, T. S. Li, X. J. Liu, and P. H. Cong, "Effect of the matrix resin structure on the mechanical properties and braking performance of organic brake pads," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 126, pp. 1746-1753, 2012.
- [18] J. Bijwe, N. Mazumdar, and Nidhi, "Influence of amount and modification of resin on fade and recovery behavior of non-abestos organic (NAO) friction materials," *Tribology Letters*, vol. 23, pp. 215-222, 3 September 2006.
- [19] J. Bouajila, G. Raffin, S. Alamerçery, H. Waton, C. Sanglar, and M. F. Grenier-Loustalot, "Phenolic resin (IV). Thermal degradation of crosslinked resin in controlled atmospheres," *Polymer & Polymer Composites* vol. 11, pp. 345-358, 2003.
- [20] International standard, "Plastic- Phenolic resin powder- Determination of flow distance on a heated glass plate," *ISO 8619*, 2003.
- [21] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยขั้นสูง. "Thermogravimetric Analysis/Differential Scanning Calorimeter (TGA/DSC)," 17 มิถุนายน, 2562;  
[http://www.sat.tu.ac.th/tucsear/tucsear\\_main.php?page=tool](http://www.sat.tu.ac.th/tucsear/tucsear_main.php?page=tool).
- [22] A. R. Service. "TM3030," <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/beltsville-md-barc/beltsville-agricultural-research-center/soybean-genomics-improvement-laboratory/docs/TM3030/>.

- [23] B. D. park, B. Riedl, Y. S. Kim, and W. T. So, "Effect of synthesis parameters on thermal behavior of phenol-formaldehyde resol resin," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 83, pp. 1415-1424, 2002.
- [24] H. Timon, A. Leila, R. Jouni, and T. P. Tuula, "Phenol- formaldehyde resol resins studied by  $^{13}\text{C}$ -NMR spectroscopy, gel permeation chromatography and Differential scanning calorimetry," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 66, pp. 1183-1193, 1997.
- [25] M. R. Rekny, J. Zartman, W. B. Krantz, A. R. Greenberg, and P. Todd, "Flow-visualization during macrovoid pore formation in dry-cast cellulose acetate membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 211, pp. 71-90, 2003.
- [26] A. Nigel, and R. B. James, "Flexural and interlaminar shear properties of glass-reinforced phenolic composites," *Composites Part A*, vol. 29A, pp. 939-946, 1998.
- [27] Y. Wu, M. Zeng, Q. Xu, S. Hou, H. Jin, and L. Fan, "Effect of glass to rubber transition of thermosetting resin matrix on the friction and wear properties of friction materials," *Tribology International*, vol. 54, pp. 51-57, 2012.
- [28] A. B. Samsuri, "Effect of acetone extraction on elastic constants and mechanical strengths," *Journal of Rubber Research*, vol. 15, no. 1, pp. 1-18, 2012.
- [29] X. Xingming, Y. Yan, B. Jiusheng, L. Lijian, and F. Xuejun, "Review on the friction and wear of brake materials," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1-10, 2016.

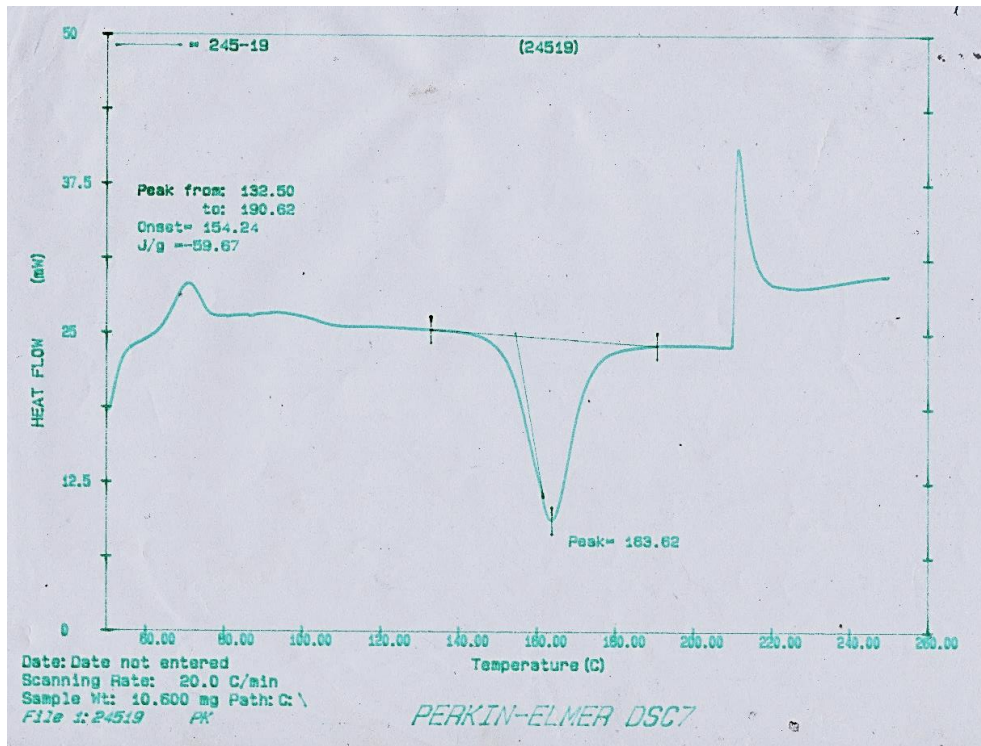


# ภาคผนวก

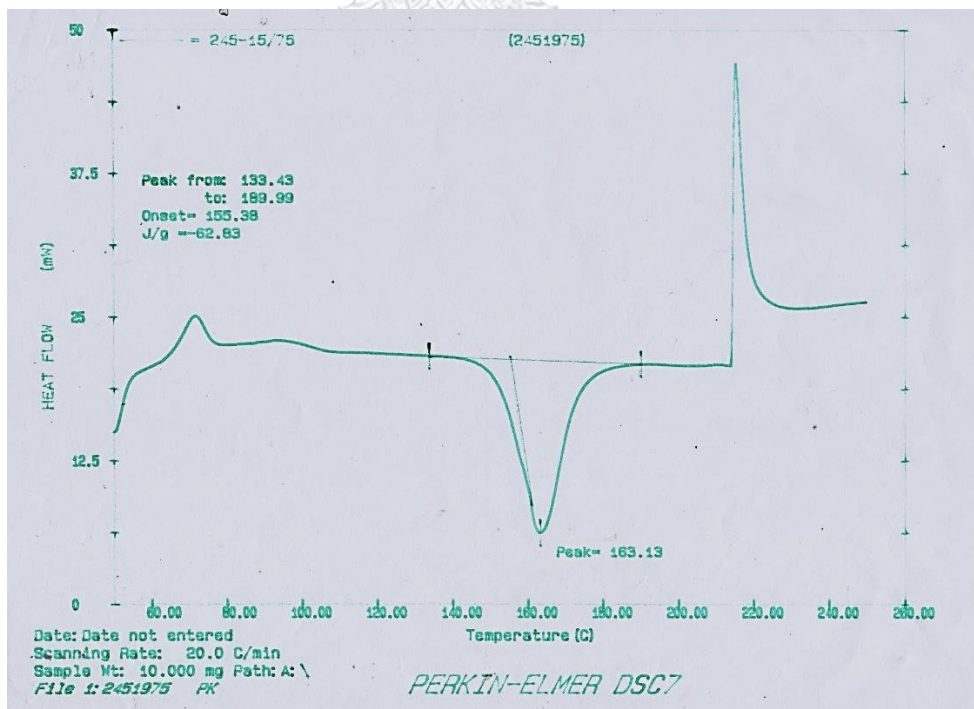
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



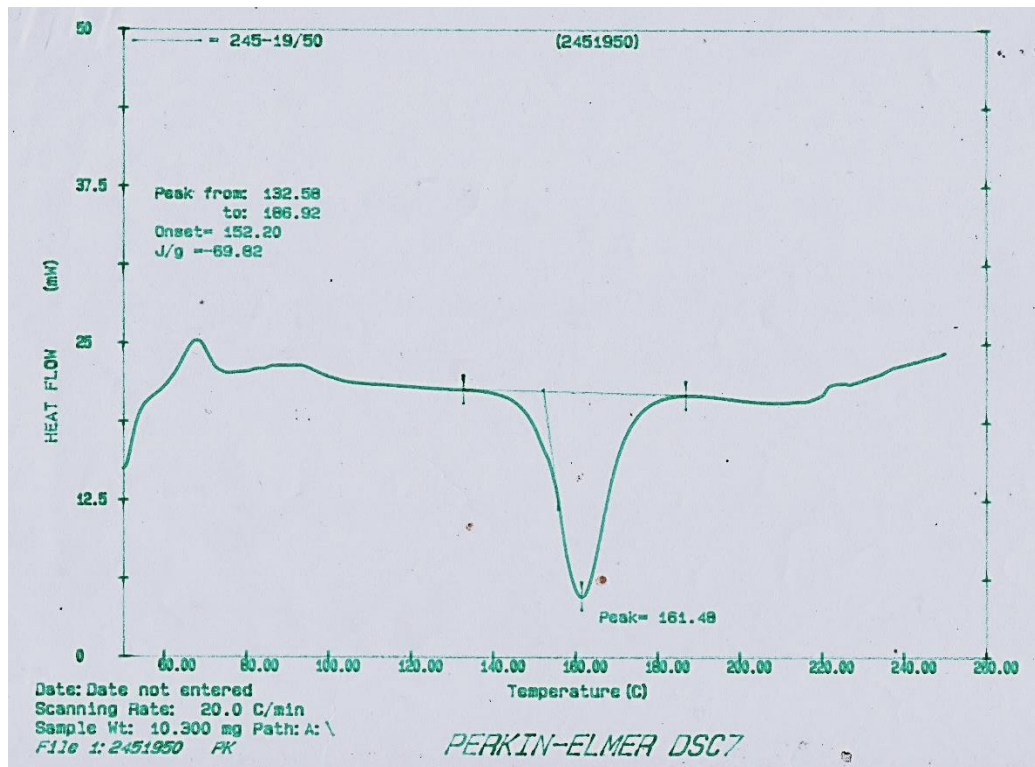




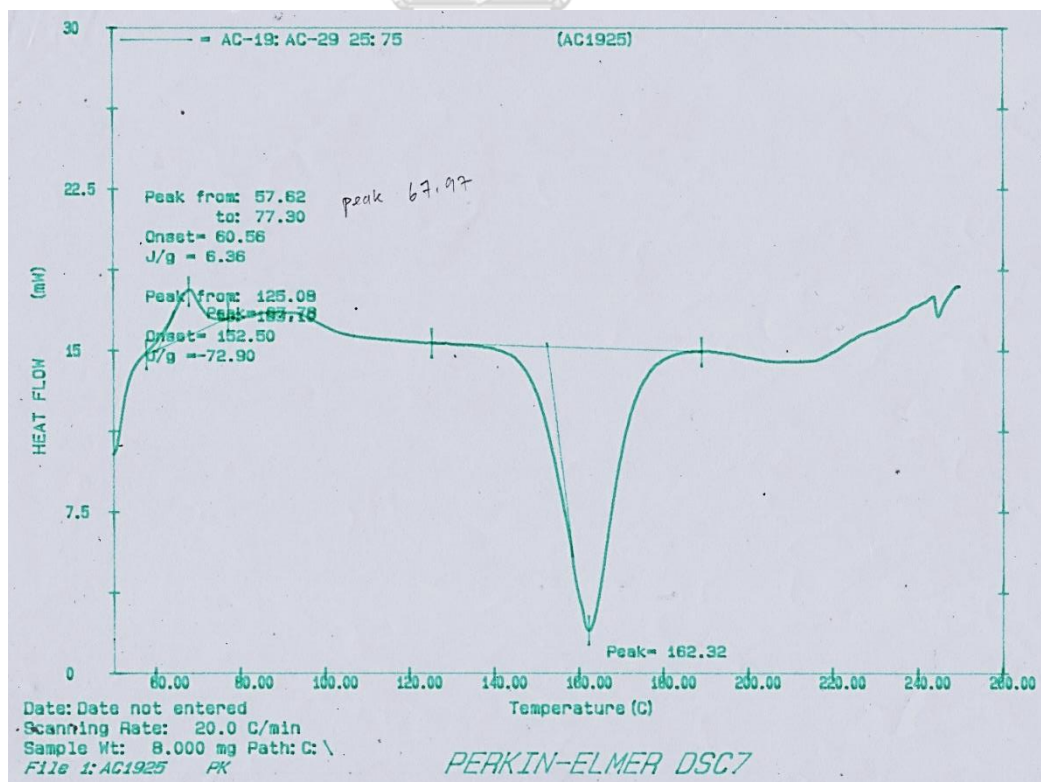
รูปที่ ก.1 กราฟ DSC ของสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบี 100 ต่อ 0



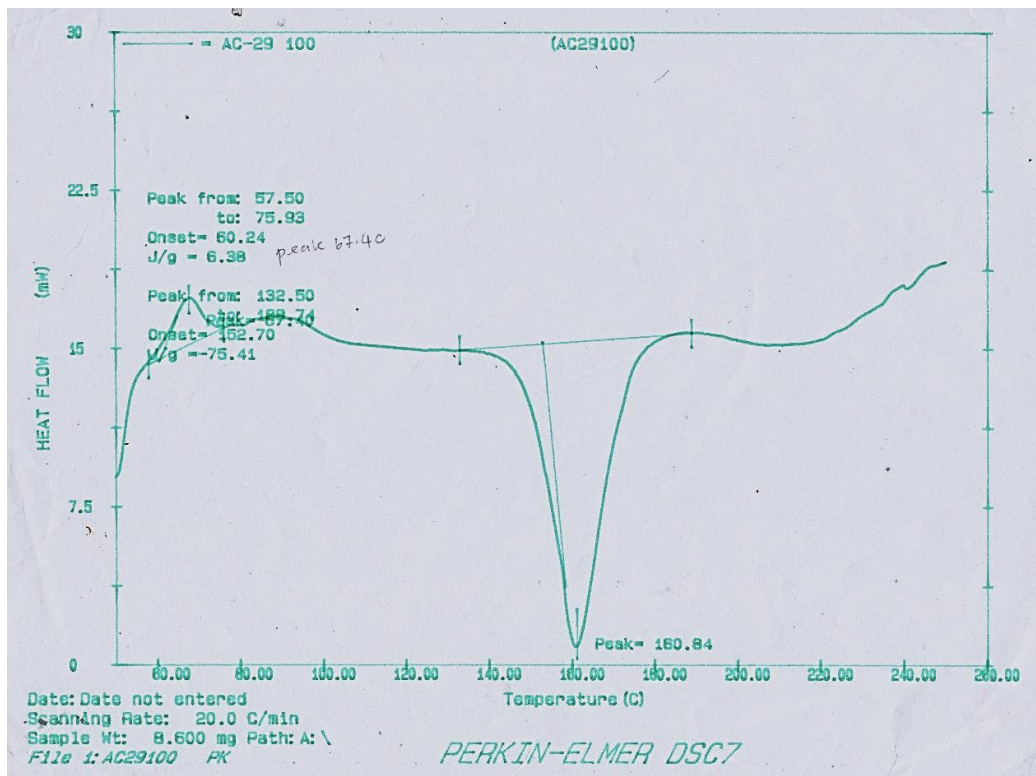
รูปที่ ก.2 กราฟ DSC ของสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบี 75 ต่อ 25



รูปที่ ก.3 กราฟ DSC ของสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินปี 50 ต่อ 50

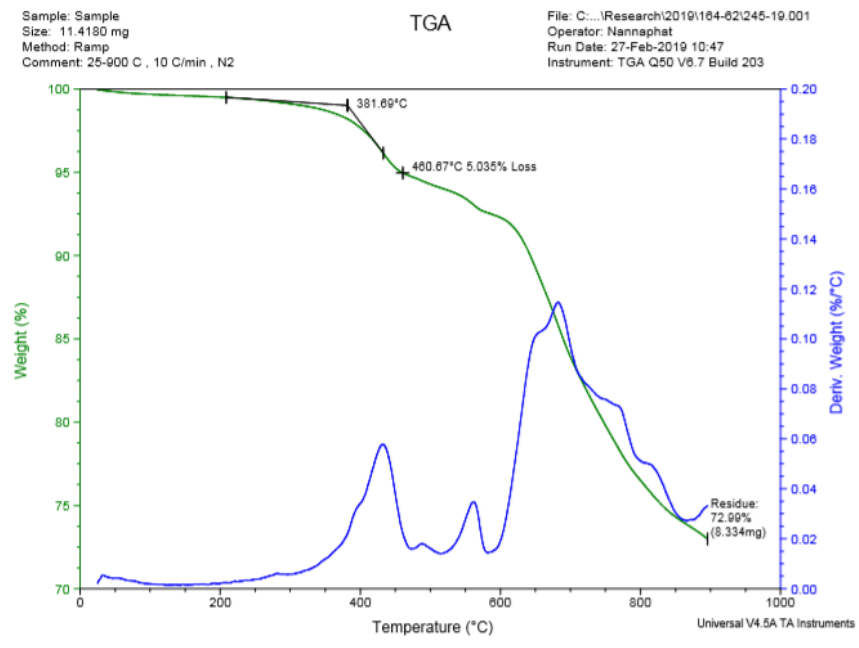


รูปที่ ก.4 กราฟ DSC ของสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินปี 25 ต่อ 75

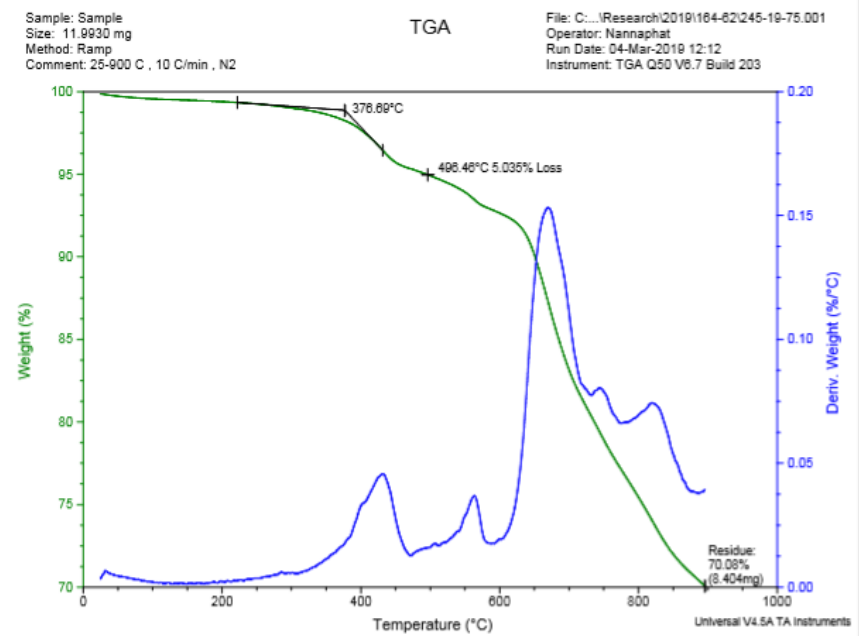


รูปที่ ก.5 กราฟ DSC ของสัดส่วนเรซินเอต่อเรซินบี 0 ต่อ 100

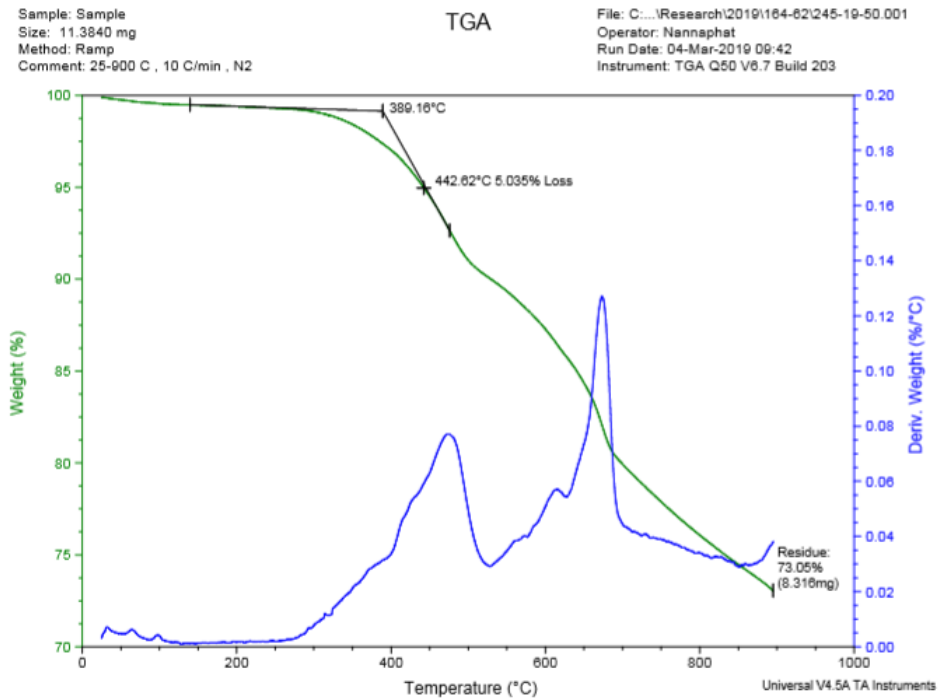




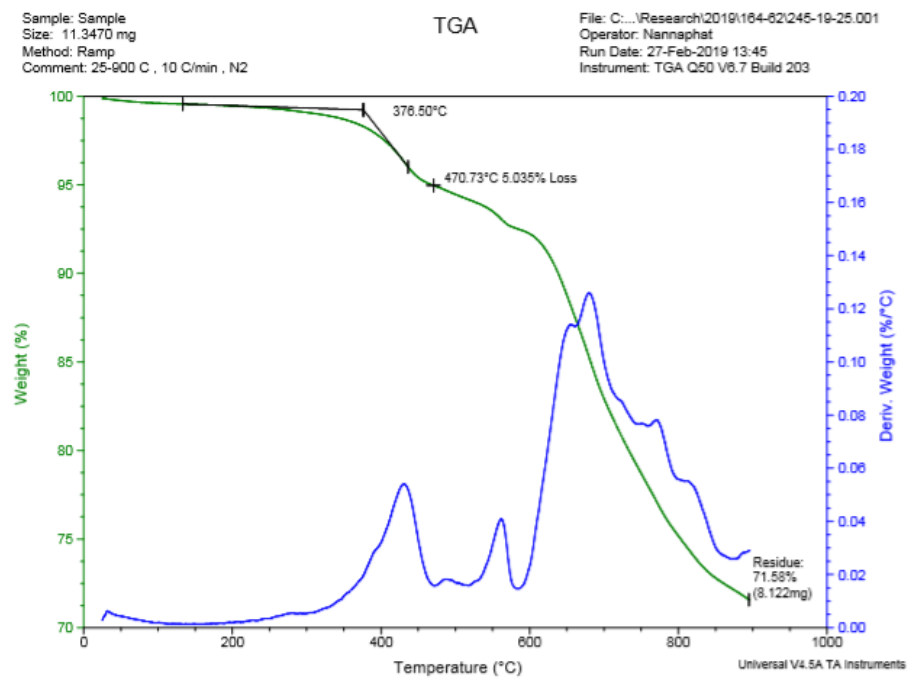
รูปที่ ข.1 กราฟ TGA ของผ้าเบรกชนิด R1



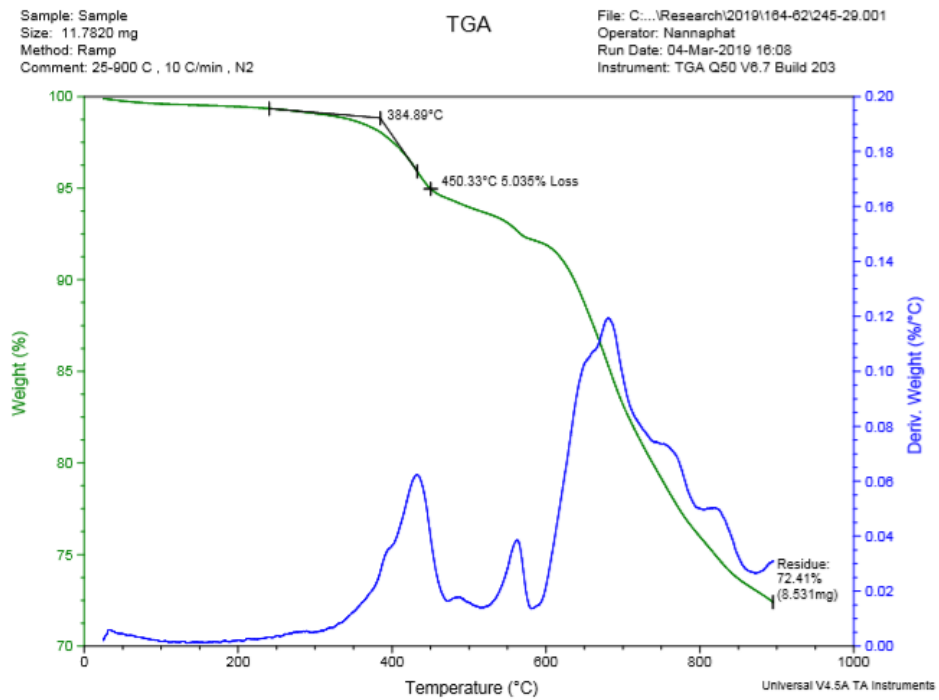
รูปที่ ข.2 กราฟ TGA ของผ้าเบรกชนิด R2



รูปที่ ข.3 กราฟ TGA ของผ้าเบรกชนิด R3



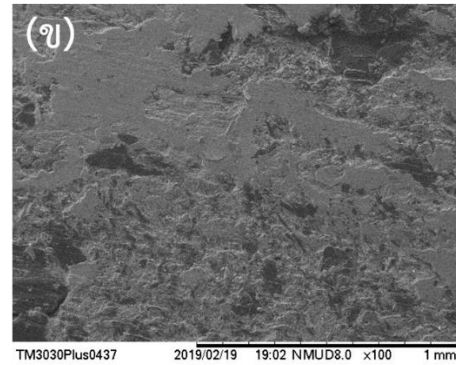
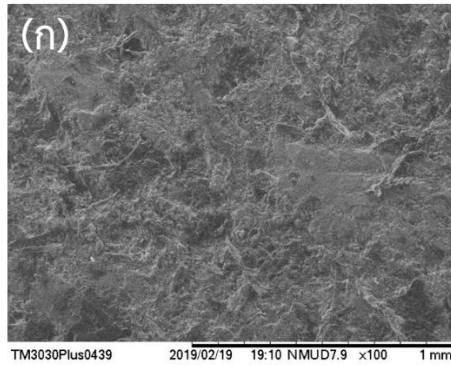
รูปที่ ข.4 กราฟ TGA ของผ้าเบรกชนิด R4



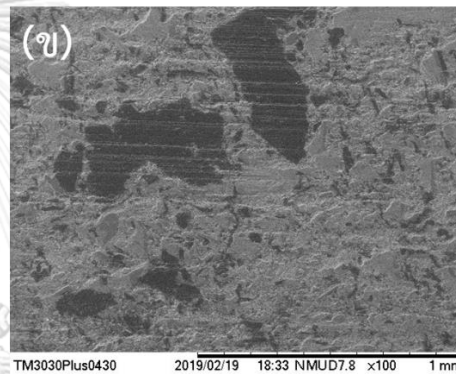
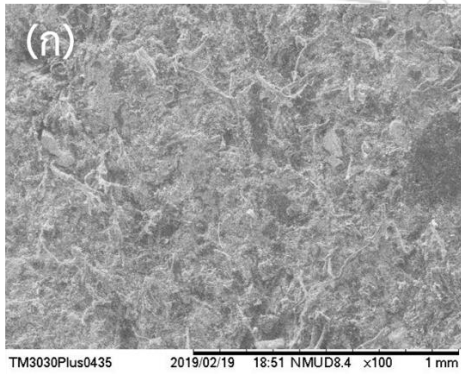
รูปที่ ข.5 กราฟ TGA ของผ้าเบรกชนิด R5



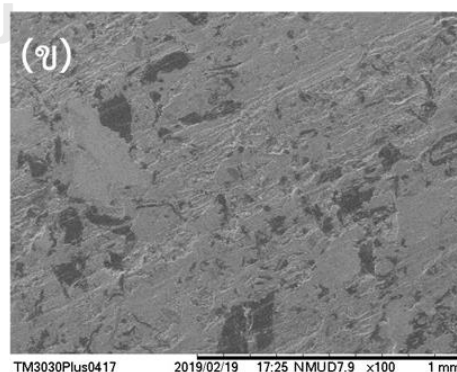
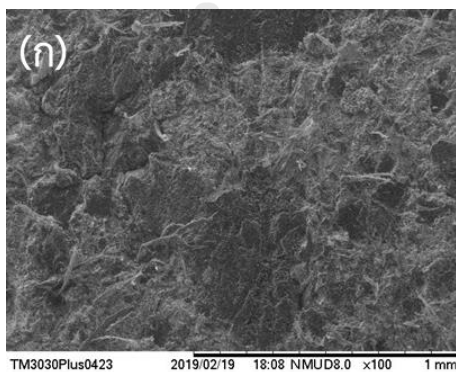




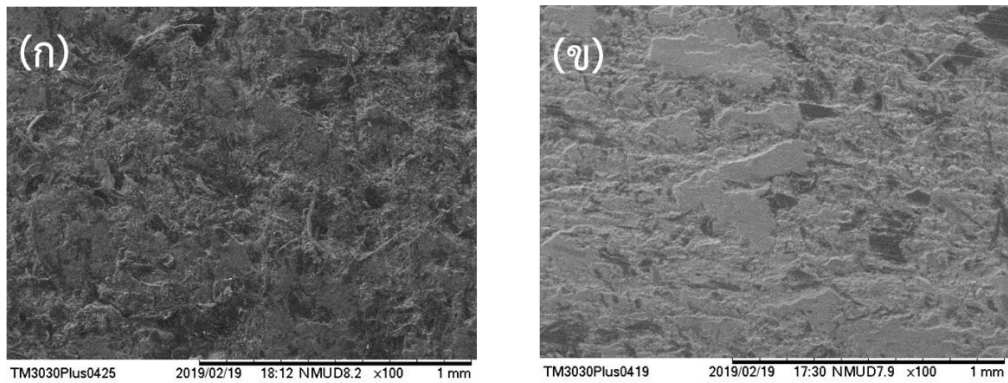
รูปที่ ค.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าเบรคชนิด R1 (ก) ขึ้นงานก่อนทดสอบการสึก กำลังขยาย 100 เท่า (ข) ขึ้นงานหลังทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า



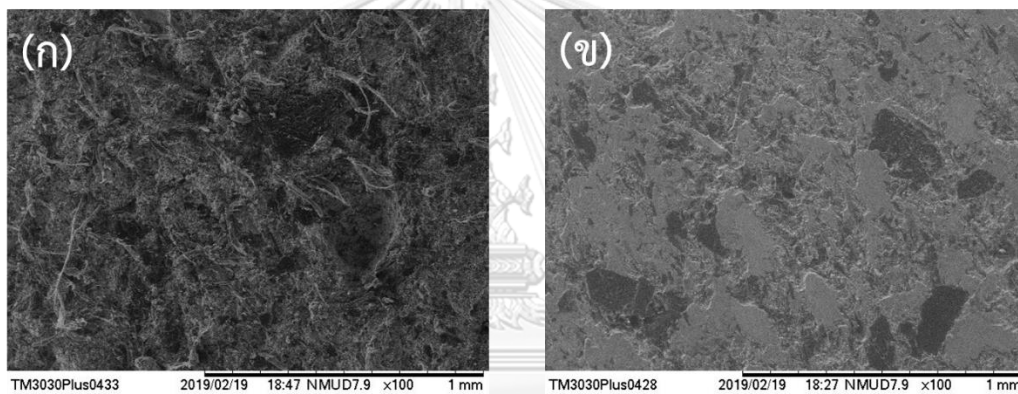
รูปที่ ค.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าเบรคชนิด R2 (ก) ขึ้นงานก่อนทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า (ข) ขึ้นงานหลังทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ค.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าเบรคชนิด R3 (ก) ขึ้นงานก่อนทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า (ข) ขึ้นงานหลังทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ค.4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าเบรกชนิด R4 (ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการสึก กำลังขยาย 100 เท่า (ข) ชิ้นงานหลังทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ค.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าเบรกชนิด R5 (ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการสึก กำลังขยาย 100 เท่า (ข) ชิ้นงานหลังทดสอบการสึกกำลังขยาย 100 เท่า



$$S.G. = \frac{m_1}{m_1 - m_2}$$

โดย S.G. แทน ความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน

$m_1$  แทน น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (g)

$m_2$  แทน น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำเป็นเวลา 1 นาที (g)

ตารางที่ ง.1 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของผ้าเบรกชนิด R1

ชิ้นงานที่	$m_1$	$m_2$	S.G.
1	158.24	91.83	2.38
2	158.74	92.46	2.39
3	158.69	92.00	2.38
4	158.96	93.07	2.41
5	158.52	92.46	2.40
Average $\pm$ S.D.			2.39 $\pm$ 0.012



ตารางที่ ง.2 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของผ้าเบรกชนิด R2

ชิ้นงานที่	$m_1$	$m_2$	S.G.
1	159.92	93.37	2.40
2	159.02	92.86	2.40
3	158.84	92.37	2.39
4	158.53	92.89	2.42
5	159.22	93.73	2.43
Average $\pm$ S.D.			2.41 $\pm$ 0.014

ตารางที่ ง.3 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของผ้าเบรกชนิด R3

ชั้นงานที่	$m_1$	$m_2$	S.G.
1	158.54	92.94	2.42
2	158.34	92.69	2.41
3	158.67	92.87	2.41
4	158.45	93.15	2.43
5	158.29	93.09	2.43
Average $\pm$ S.D.			2.42 $\pm$ 0.007

ตารางที่ ง.4 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของผ้าเบรกชนิด R4

ชั้นงานที่	$m_1$	$m_2$	S.G.
1	158.55	92.90	2.42
2	159.03	93.43	2.42
3	159.07	93.19	2.41
4	157.93	93.43	2.45
5	159.23	93.94	2.44
Average $\pm$ S.D.			2.43 $\pm$ 0.013

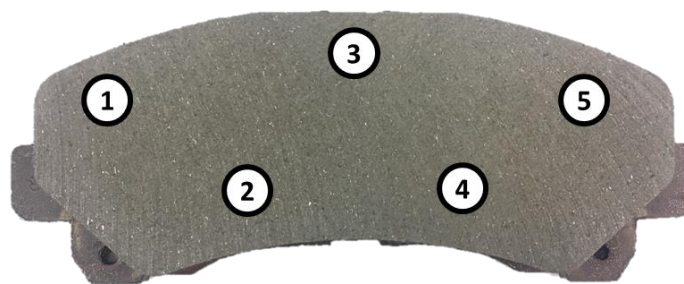
ตารางที่ ง.5 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของผ้าเบรกชนิด R5

ชั้นงานที่	$m_1$	$m_2$	S.G.
1	158.20	92.65	2.41
2	158.72	93.44	2.43
3	158.91	93.45	2.43
4	158.91	93.55	2.43
5	159.03	93.95	2.44
<b>Average <math>\pm</math> S.D.</b>			<b>2.43 <math>\pm</math> 0.010</b>









รูปที่ จ.1 ตำแหน่งในการวัดค่าความแข็งของผ้าเบรก

ตารางที่ จ.1 ค่าความแข็งของผ้าเบรกชนิด R1

ชั้นงานที่	ตำแหน่งที่					Average (HRS)
	1	2	3	4	5	
1	57.9	54.7	52.8	51.0	60.7	55.4
2	58.1	54.7	52.0	53.0	55.1	54.6
3	55.3	49.6	49.6	52.7	54.7	52.4
4	58.0	50.6	56.9	50.0	60.0	55.1
5	61.2	52.7	54.2	51.2	58.6	55.6
Average ± S.D.						54.6 ± 1.17

ตารางที่ จ.2 ค่าความแข็งของผ้าเบรกชนิด R2

ชั้นงานที่	ตำแหน่งที่					Average (HRS)
	1	2	3	4	5	
1	63.0	58.5	65.8	67.1	71.7	65.2
2	65.9	66.5	57.4	58.2	58.5	61.3
3	67.7	62.7	54.5	58.0	63.9	61.4
4	62.4	56.1	58.1	61.9	54.9	58.7
5	65.2	62.1	61.7	65.2	59.3	62.7
Average $\pm$ S.D.						61.9 $\pm$ 2.13

ตารางที่ จ.3 ค่าความแข็งของผ้าเบรกชนิด R3

ชั้นงานที่	ตำแหน่งที่					Average (HRS)
	1	2	3	4	5	
1	69.9	65.6	60.6	69.7	71.8	67.5
2	66.5	68.1	68.7	69.0	67.4	67.9
3	70.4	62.2	64.5	69.8	69.6	67.3
4	66.9	61.7	64.2	69.8	60.0	64.5
5	67.4	68.1	61.4	69.1	69.0	67.0
Average $\pm$ S.D.						66.9 $\pm$ 1.21

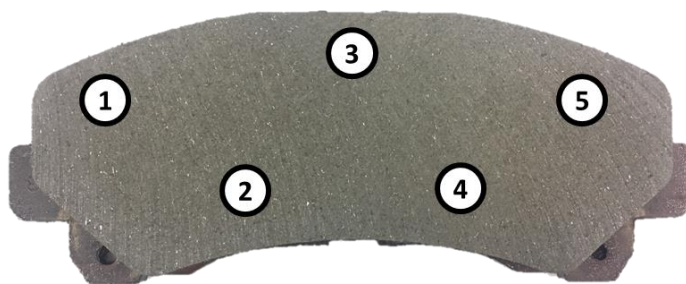
ตารางที่ จ.4 ค่าความแข็งของผ้าเบรกชนิด R4

ชั้นงานที่	ตำแหน่งที่					Average (HRS)
	1	2	3	4	5	
1	73.5	76.1	69.6	69.4	74.5	72.6
2	71.6	74.2	66.8	70.0	71.0	70.7
3	73.8	69.9	71.3	67.6	68.8	70.3
4	65.9	72.2	63.3	70.8	64.7	67.4
5	70.7	73.3	65.5	71.3	73.3	70.8
<b>Average ± S.D.</b>						70.4 ± 1.69

ตารางที่ จ.5 ค่าความแข็งของผ้าเบรกชนิด R5

ชั้นงานที่	ตำแหน่งที่					Average (HRS)
	1	2	3	4	5	
1	69.8	77.5	75.6	76.8	66.8	73.3
2	65.6	70.8	75.7	73.1	71.8	71.4
3	71.9	73.9	74.7	76.8	75.8	74.6
4	69.4	76.2	72.8	73.6	70.3	72.5
5	69.5	72.4	78.1	75.7	74.1	74.0
<b>Average ± S.D.</b>						73.1 ± 1.13





รูปที่ ๑.1 ตำแหน่งในการวัดค่ายังมอดุลัสของผ้าเบรก

ตารางที่ ๑.1 ค่ายังมอดุลัสของผ้าเบรกชนิด R1

ชิ้นงานที่	Young's modulus (GPa)
1	1.55
2	1.62
3	1.61
4	1.57
5	1.60
Average $\pm$ S.D.	1.59 $\pm$ 0.028

ตารางที่ ๑.2 ค่ายังมอดุลัสของผ้าเบรกชนิด R2

ชิ้นงานที่	Young's modulus (GPa)
1	1.77
2	1.86
3	1.89
4	1.87
5	1.86
Average $\pm$ S.D.	1.85 $\pm$ 0.043

ตารางที่ ๓.3 ค่า Young's modulus ของผ้าเบรคชนิด R3

ชั้นงานที่	Young's modulus (GPa)
1	1.89
2	1.98
3	2.00
4	1.96
5	1.98
Average $\pm$ S.D.	1.96 $\pm$ 0.039

ตารางที่ ๓.4 ค่า Young's modulus ของผ้าเบรคชนิด R4

ชั้นงานที่	Young's modulus (GPa)
1	1.93
2	1.99
3	2.00
4	2.02
5	2.05
Average $\pm$ S.D.	2.00 $\pm$ 0.037

ตารางที่ ๓.5 ค่า Young's modulus ของผ้าเบรคชนิด R5

ชั้นงานที่	Young's modulus (GPa)
1	2.01
2	2.13
3	2.14
4	2.08
5	2.11
Average $\pm$ S.D.	2.09 $\pm$ 0.048



$$\% \text{ Acetone Extraction} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$

โดย  $W_1$  แทน น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

$W_2$  แทน น้ำหนักกระดาษฟอยล์ (g)

$W_3$  แทน น้ำหนักกระดาษฟอยล์หลังอะซิโตนแห้ง (g)

ตารางที่ ข.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยอะซิโตนของผ้าเบรกชนิด R1

ครั้งที่	$w_1$	$w_2$	$w_3$	% Acetone Extraction
1	3.000	0.575	0.590	0.500
2	3.000	0.590	0.605	0.500
3	3.000	0.575	0.600	0.833
4	3.000	0.533	0.544	0.367
5	3.000	0.520	0.530	0.333
6	3.000	0.515	0.525	0.333
7	3.000	0.614	0.620	0.200
8	3.000	0.536	0.545	0.300
9	3.000	0.560	0.567	0.233
Average $\pm$ S.D.				0.400 $\pm$ 0.181



ตารางที่ ข.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยอะซิโตนของผ้าเบรกชนิด R2

ครั้งที่	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	% Acetone Extraction
1	3.000	0.473	0.484	0.367
2	3.000	0.493	0.503	0.333
3	3.000	0.482	0.490	0.267
4	3.000	0.605	0.611	0.200
5	3.000	0.608	0.617	0.300
6	3.000	0.625	0.633	0.267
7	3.000	0.516	0.531	0.500
8	3.000	0.490	0.502	0.400
9	3.000	0.470	0.477	0.233
Average ± S.D.				0.319 ± 0.088

ตารางที่ ข.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยอะซิโตนของผ้าเบรกชนิด R3

ครั้งที่	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	% Acetone Extraction
1	3.000	0.524	0.535	0.367
2	3.000	0.542	0.551	0.300
3	3.000	0.527	0.535	0.267
4	3.000	0.644	0.653	0.300
5	3.000	0.709	0.718	0.300
6	3.000	0.692	0.698	0.200
7	3.000	0.789	0.799	0.333
8	3.000	0.579	0.590	0.367
9	3.000	0.569	0.577	0.267
Average ± S.D.				0.300 ± 0.050

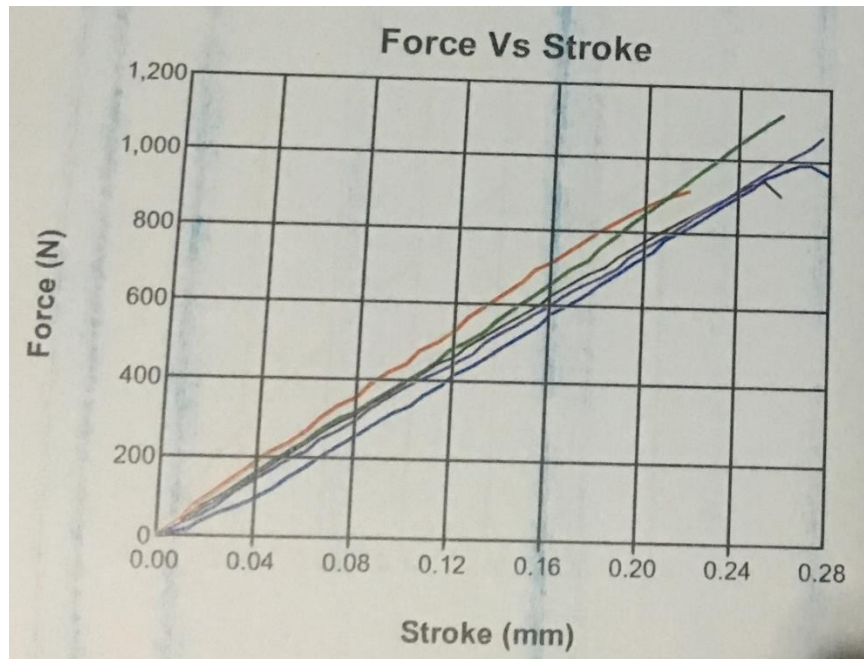
ตารางที่ ข.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยอะซิโตนของผ้าเบรคชนิด R4

ครั้งที่	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	% Acetone Extraction
1	3.000	0.730	0.733	0.100
2	3.000	0.761	0.768	0.233
3	3.000	0.754	0.762	0.267
4	3.000	0.762	0.770	0.267
5	3.000	0.618	0.626	0.267
6	3.000	0.579	0.587	0.267
7	3.000	0.556	0.570	0.467
8	3.000	0.544	0.555	0.367
9	3.000	0.742	0.751	0.300
Average ± S.D.				0.981 ± 0.093

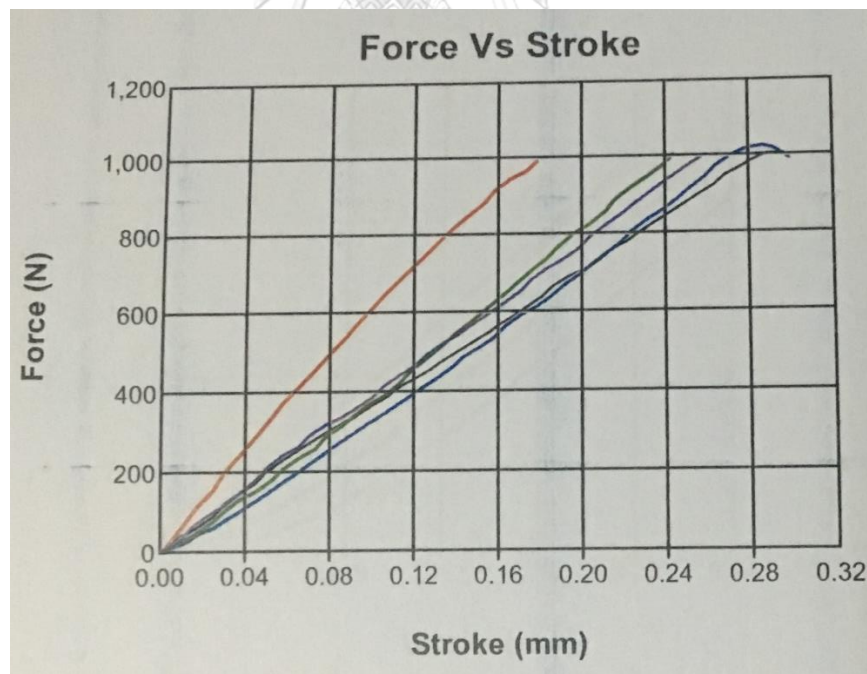
ตารางที่ ข.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยอะซิโตนของผ้าเบรคชนิด R5

ครั้งที่	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	% Acetone Extraction
1	3.000	0.781	0.793	0.400
2	3.000	0.746	0.758	0.400
3	3.000	0.744	0.754	0.333
4	3.000	0.625	0.633	0.267
5	3.000	0.601	0.608	0.233
6	3.000	0.701	0.712	0.367
7	3.000	0.755	0.764	0.300
8	3.000	0.771	0.778	0.233
9	3.000	0.748	0.756	0.267
Average ± S.D.				0.311 ± 0.063

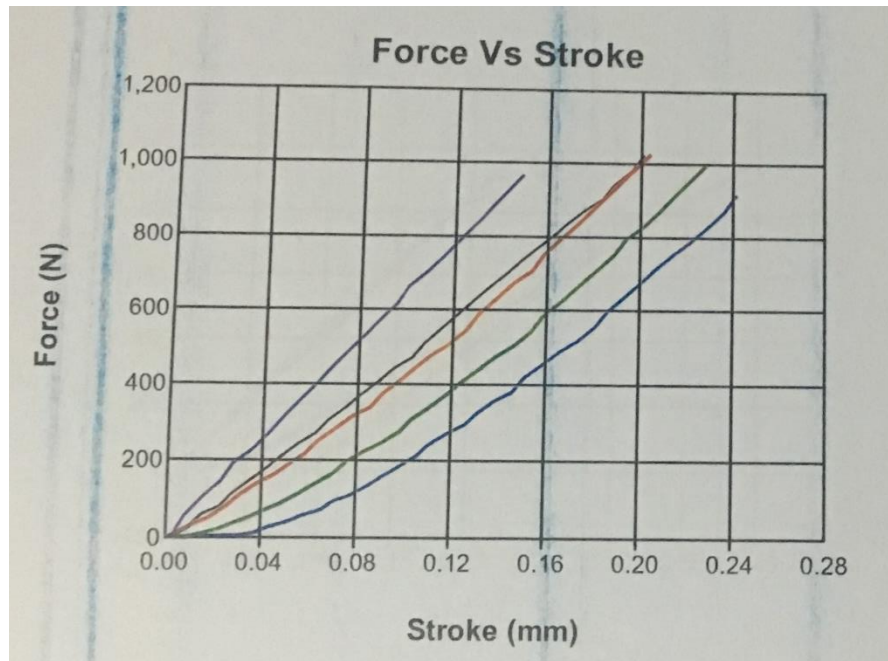




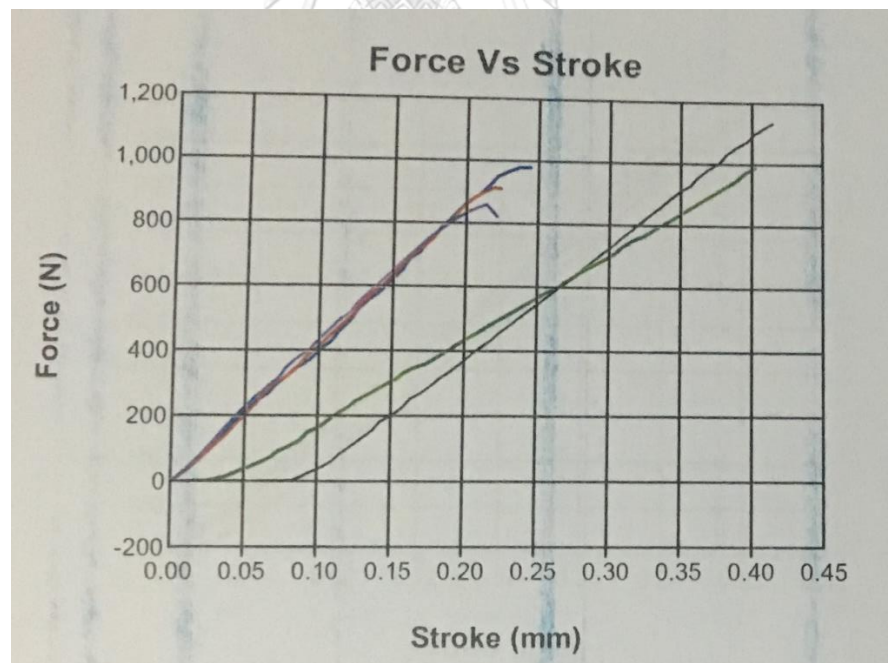
รูปที่ ซ.1 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิห้อง



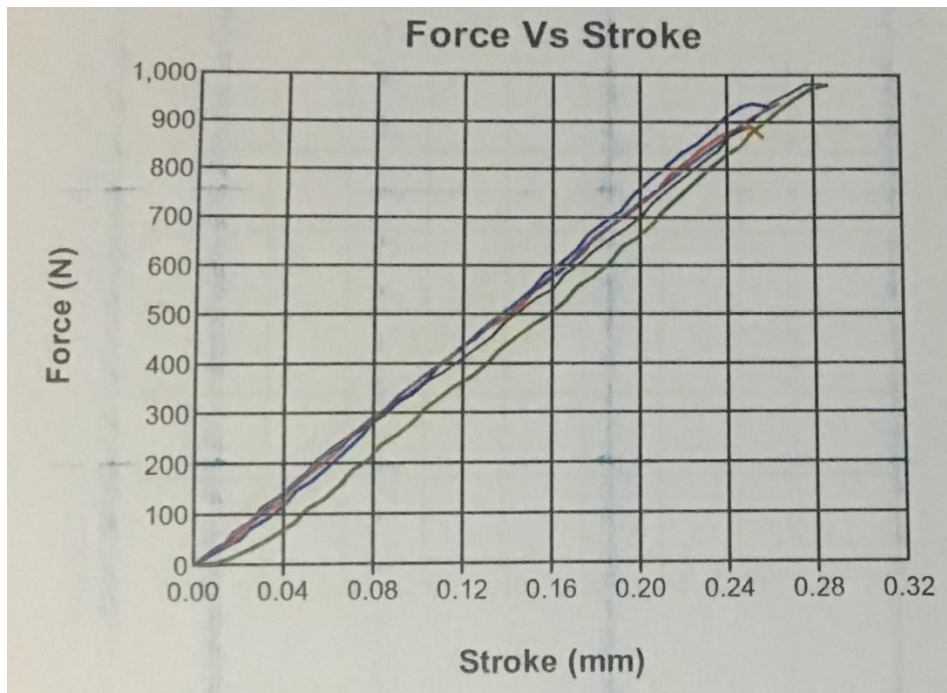
รูปที่ ซ.2 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง



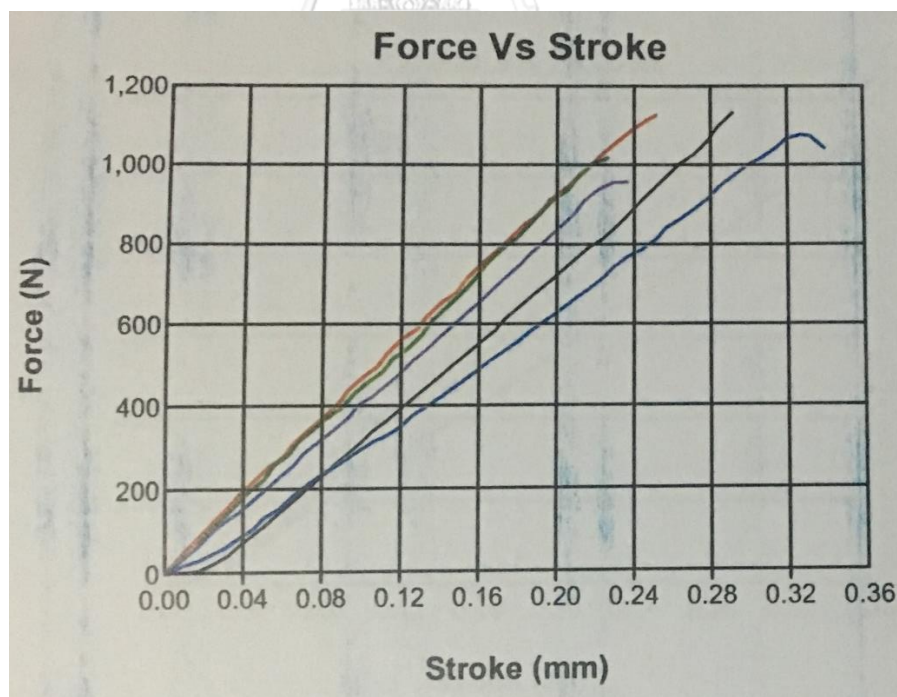
รูปที่ ช.3 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ช.4 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิห้อง

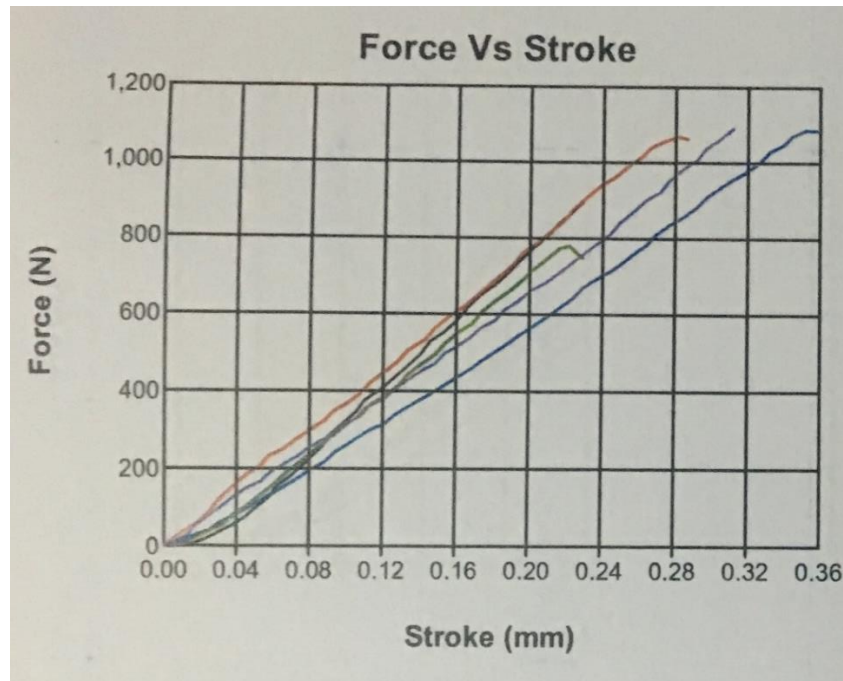


รูปที่ ซ.5 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

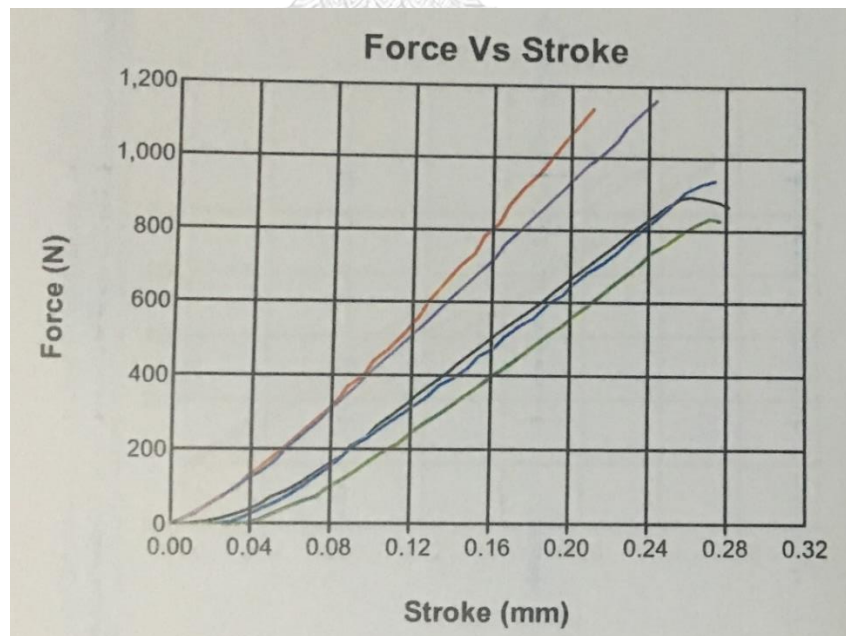


รูปที่ ซ.6 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300

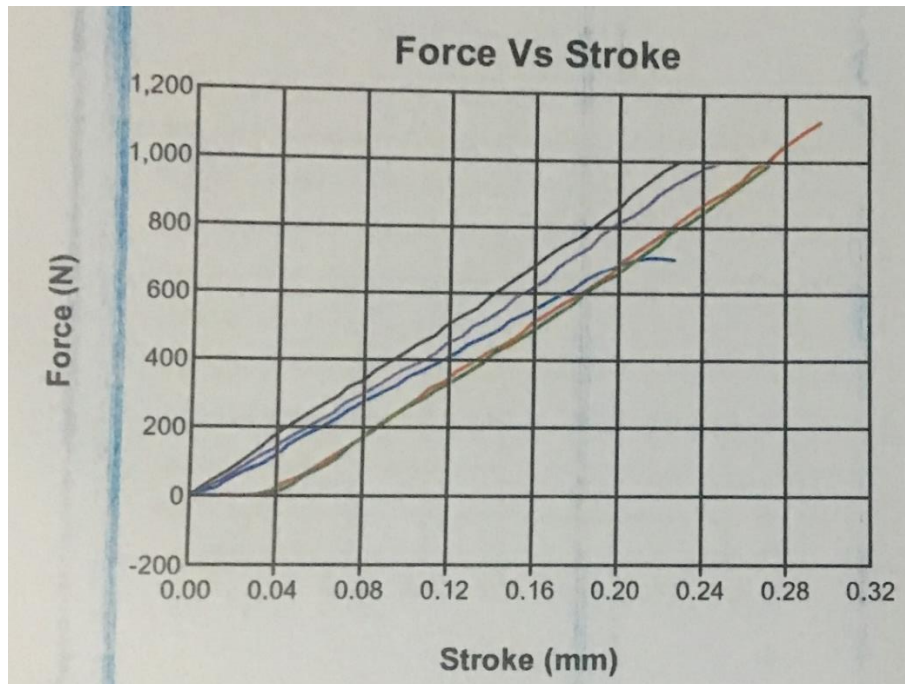
องศาเซลเซียส



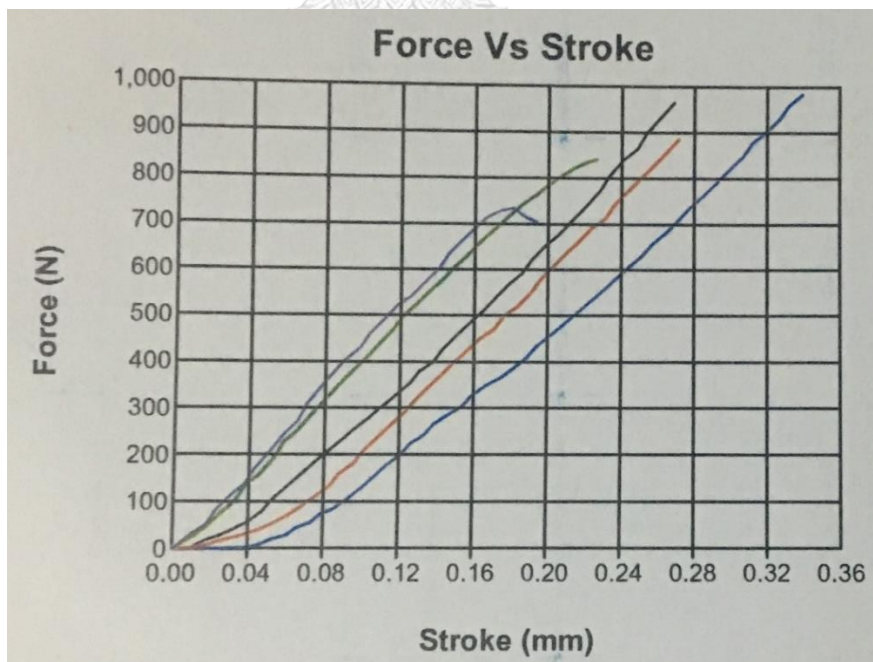
รูปที่ ซ.7 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ ซ.8 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

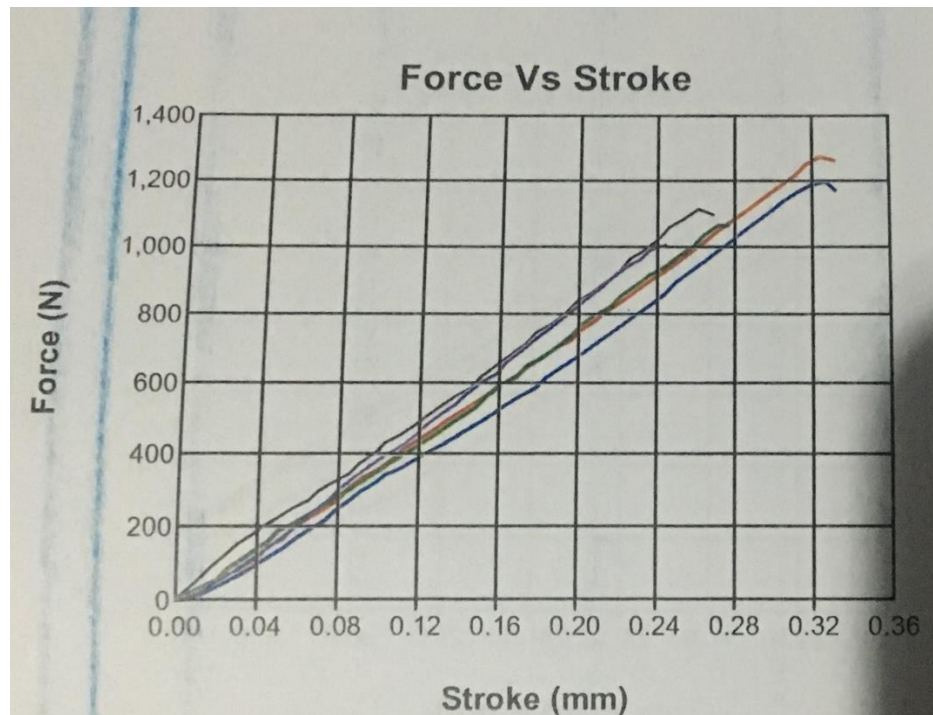


รูปที่ ๙.9 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

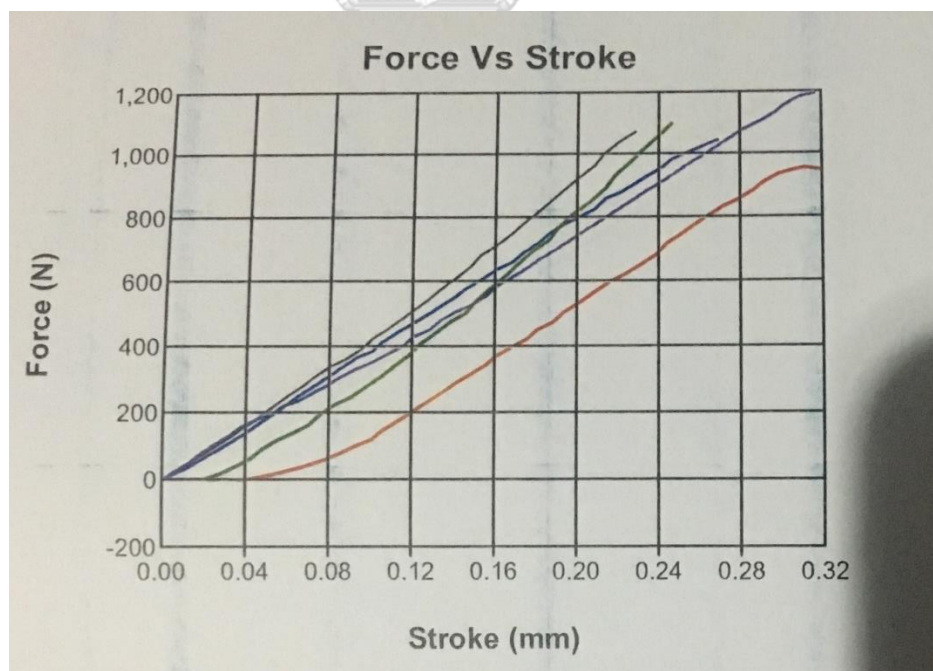


รูปที่ ๙.10 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R1 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

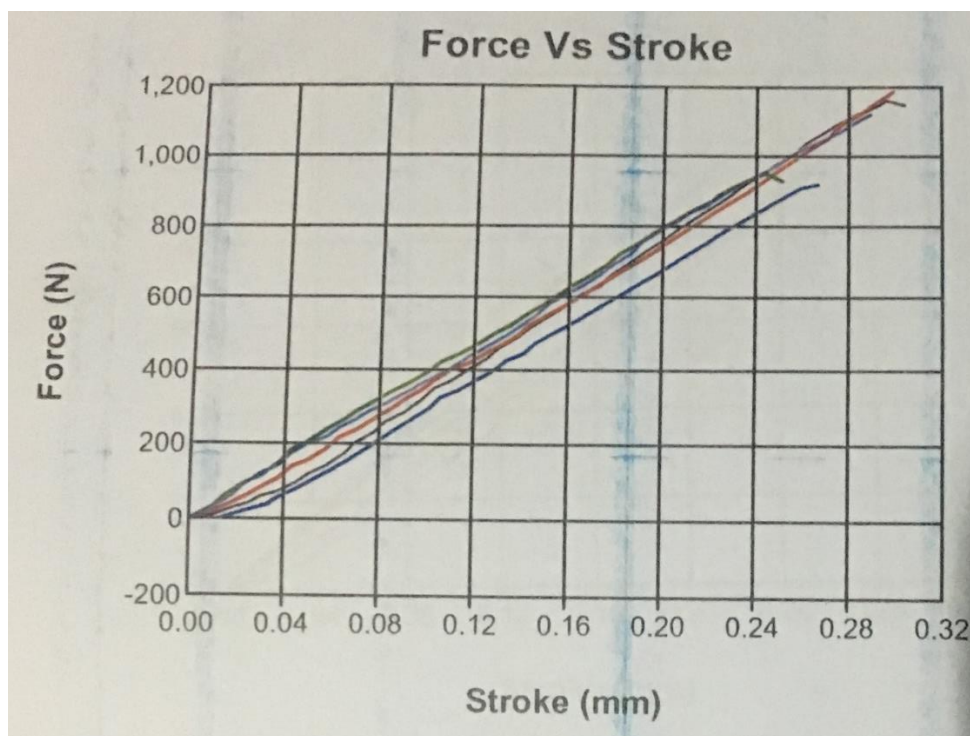




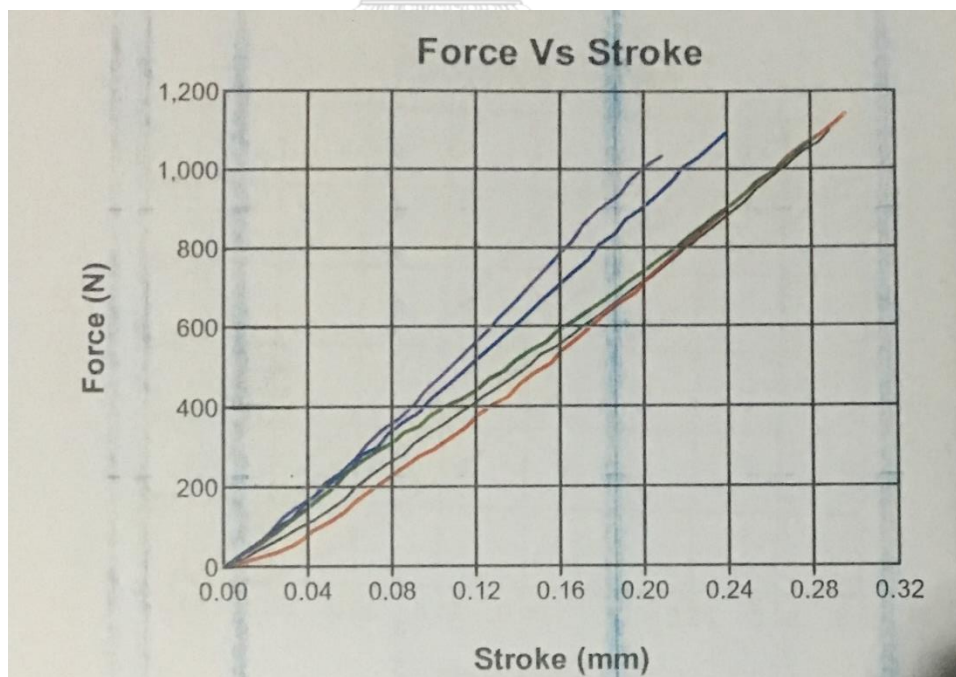
รูปที่ ซ.11 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิห้อง



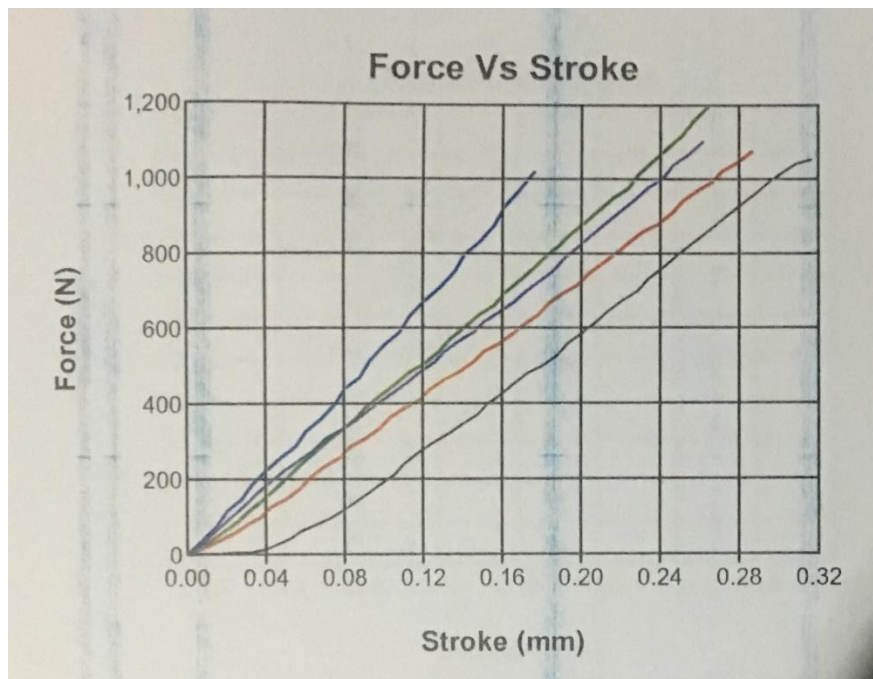
รูปที่ ซ.12 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง



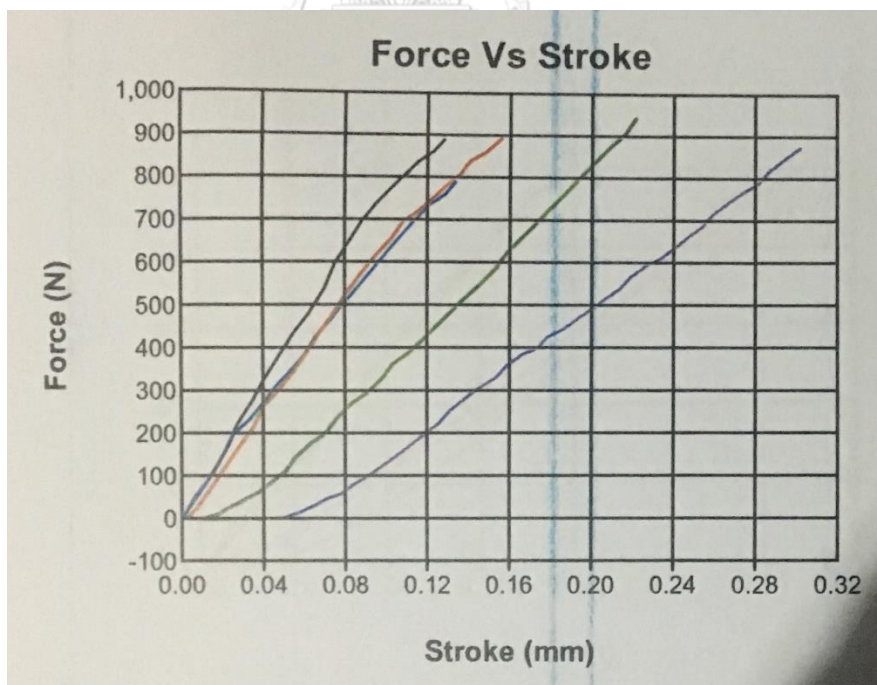
รูปที่ ๑๓.13 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ๑๓.14 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิห้อง

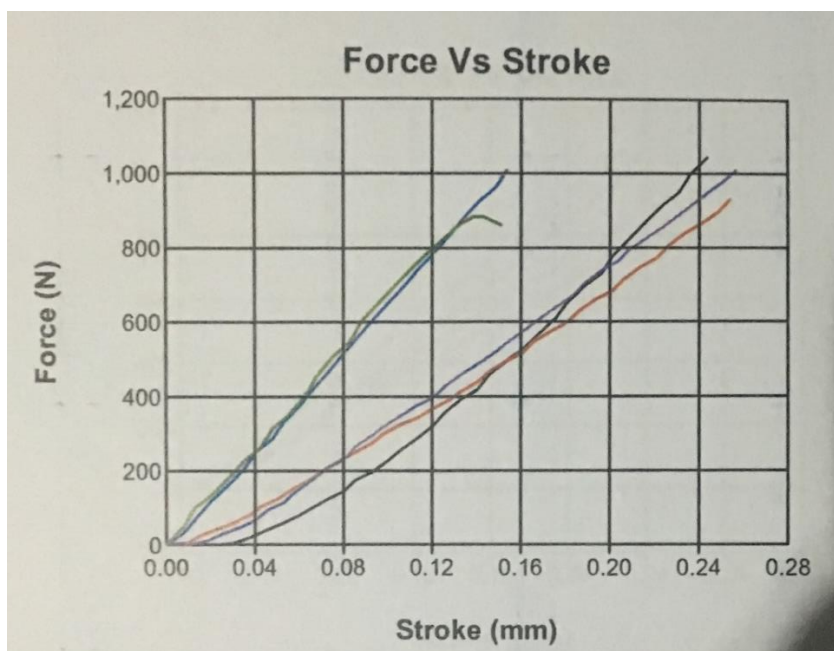


รูปที่ ซ.15 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

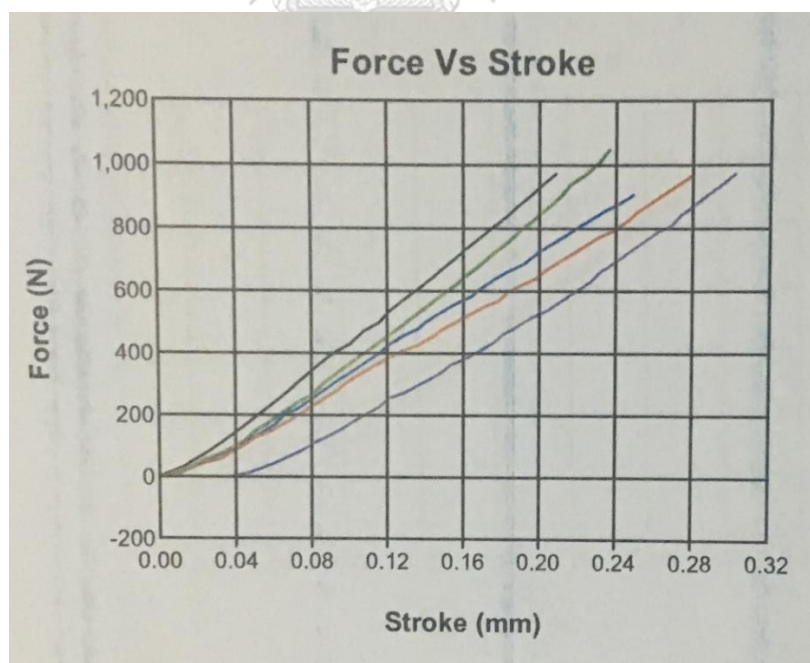


รูปที่ ซ.16 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300

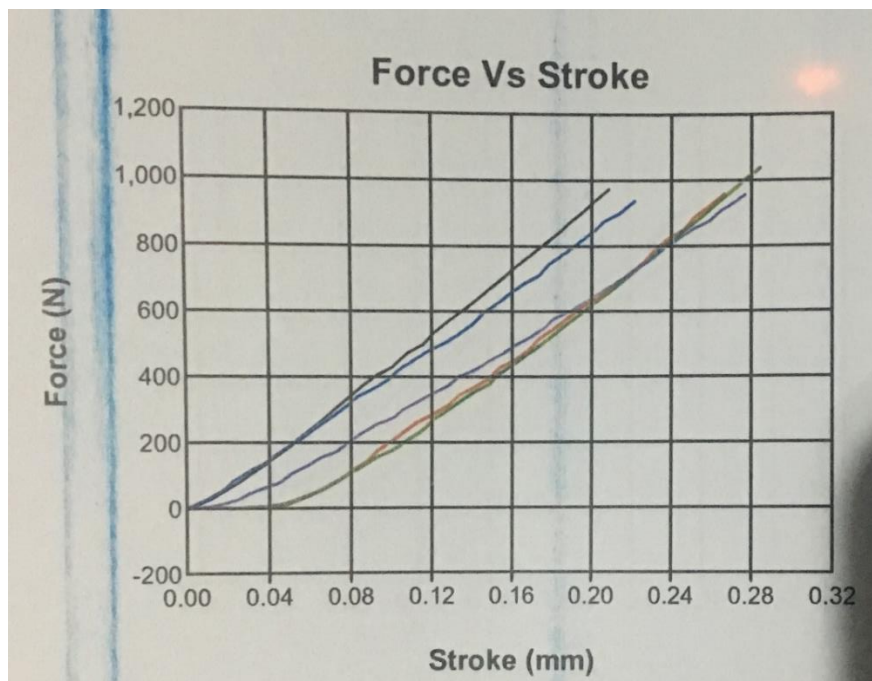
องศาเซลเซียส



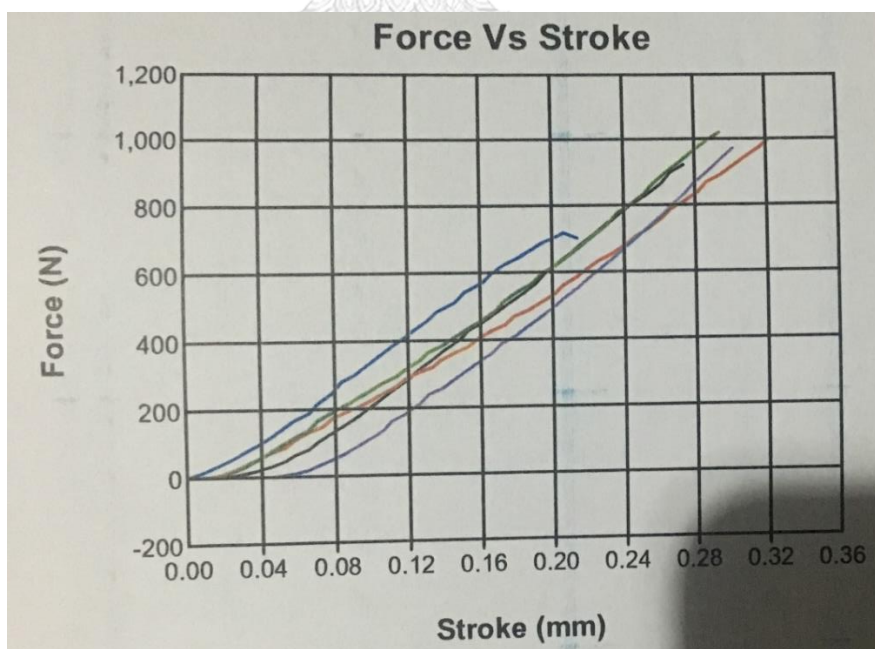
รูปที่ ข.17 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



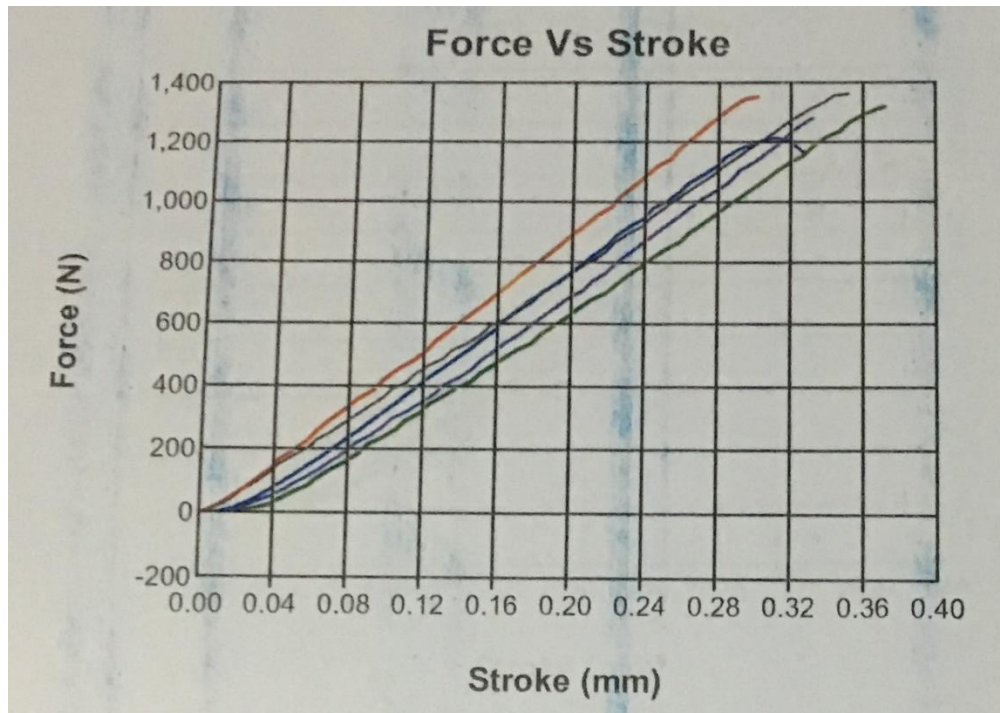
รูปที่ ข.18 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



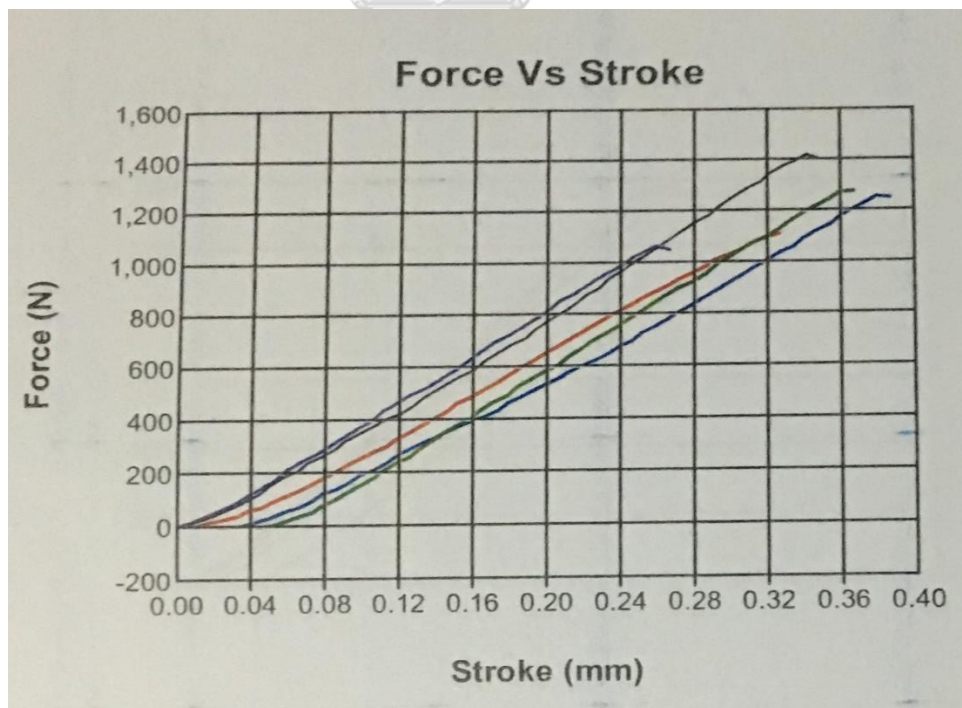
รูปที่ ช.19 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



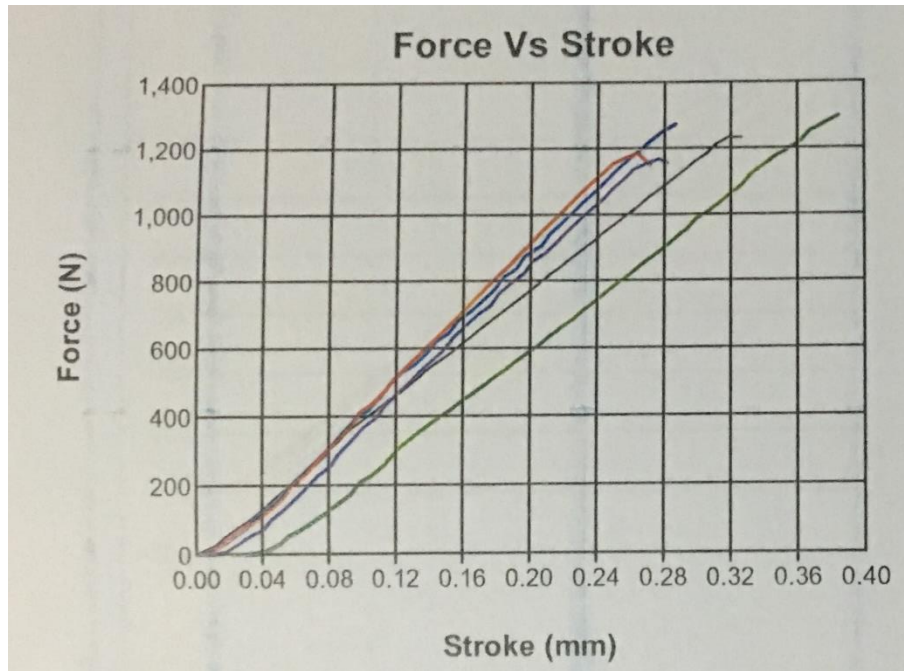
รูปที่ ช.20 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R2 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



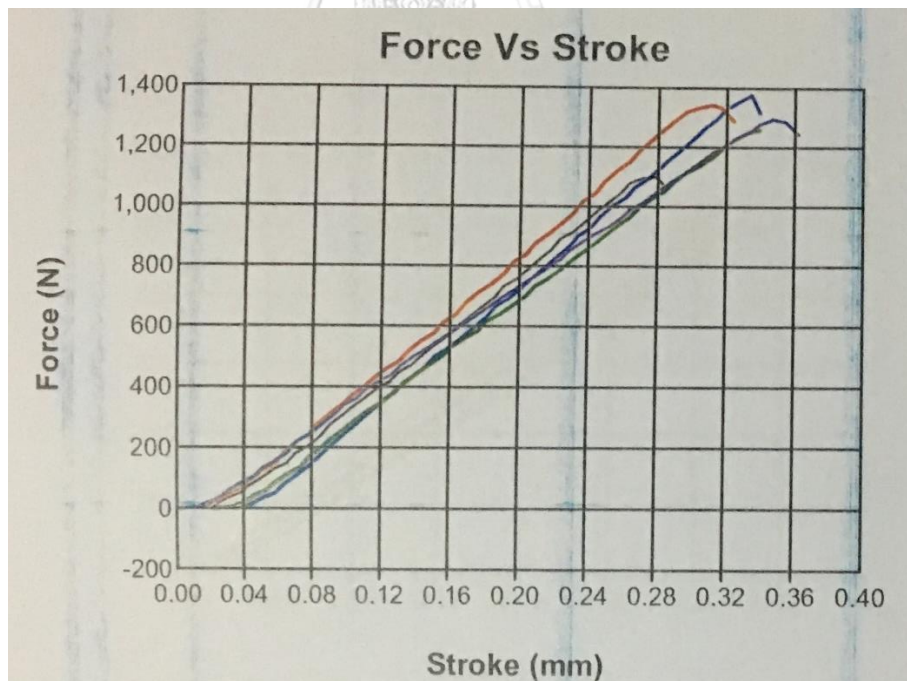
รูปที่ ๗.21 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิห้อง



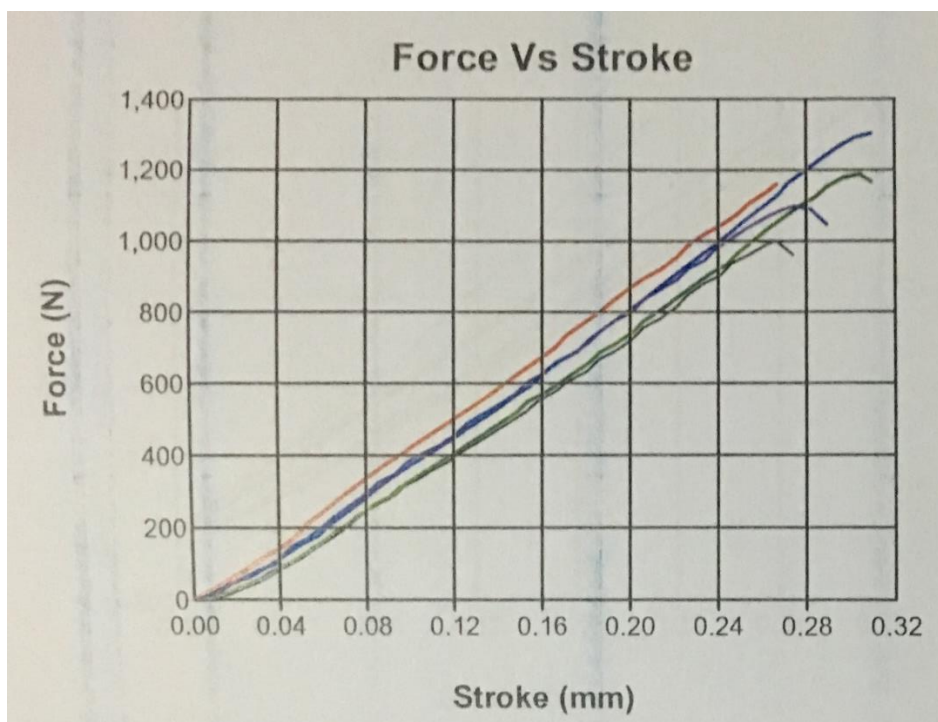
รูปที่ ๗.22 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง



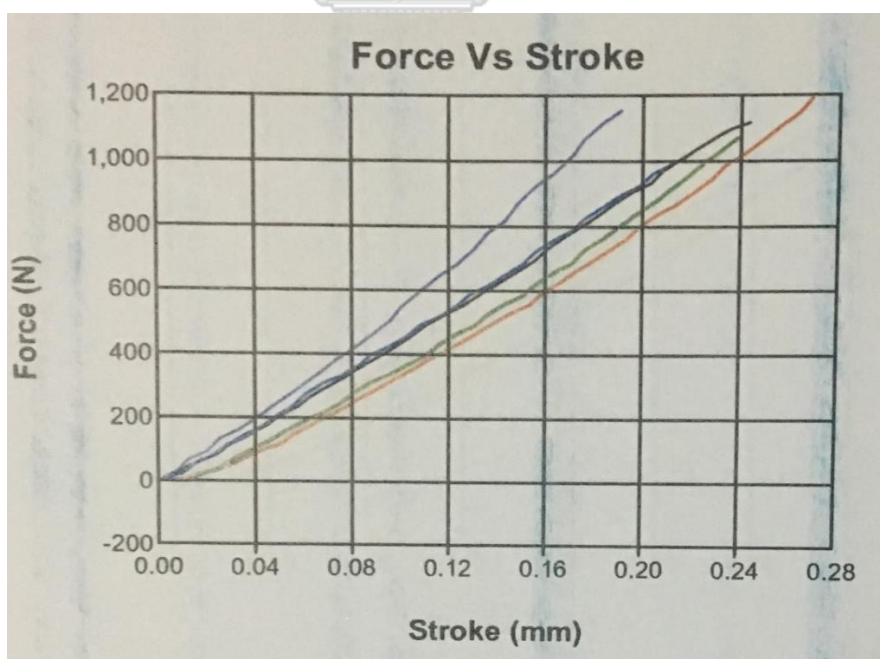
รูปที่ ซ.23 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิต้อง



รูปที่ ซ.24 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิต้อง

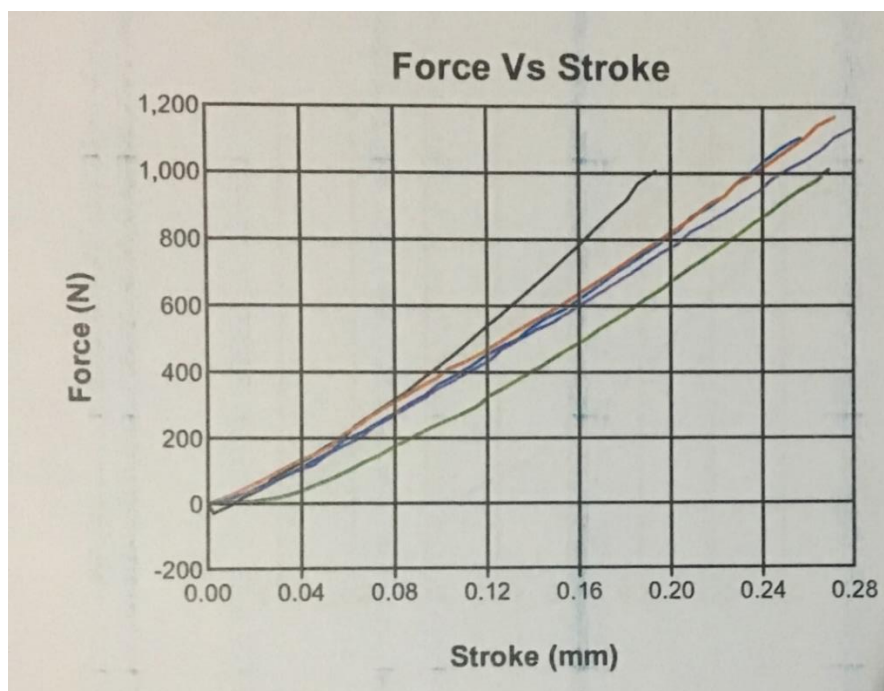


รูปที่ ซ.25 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

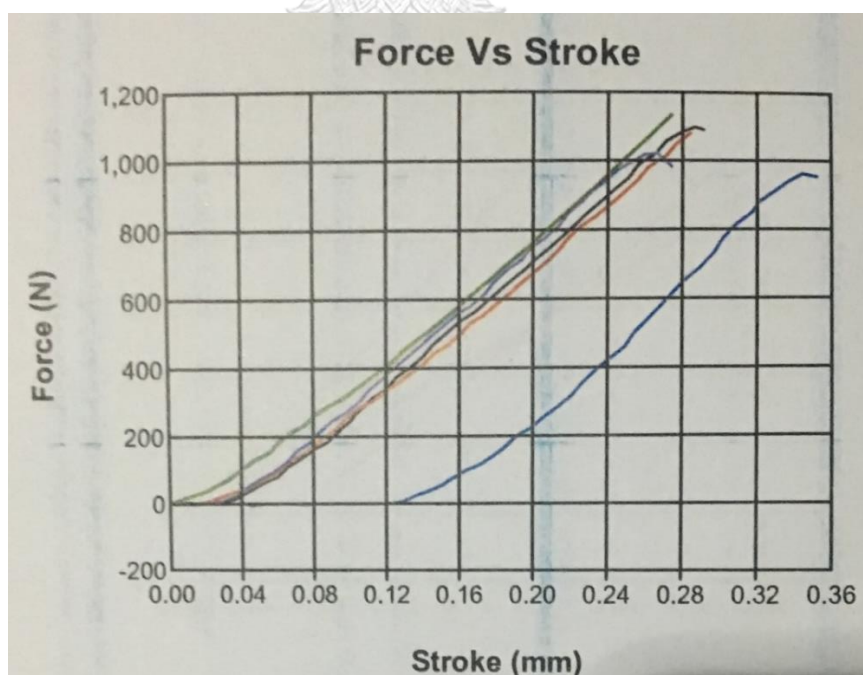


รูปที่ ซ.26 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

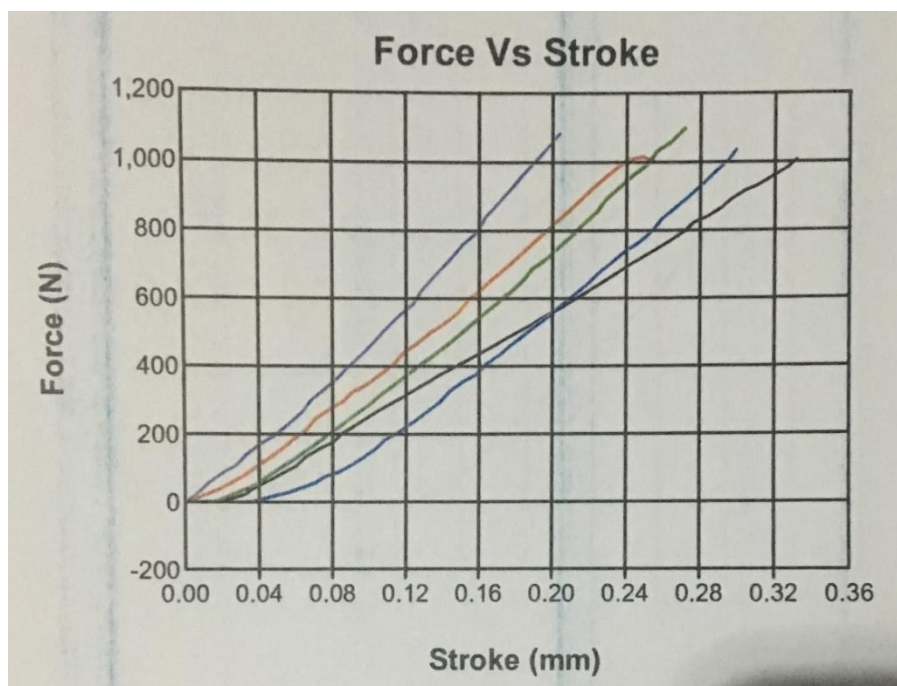




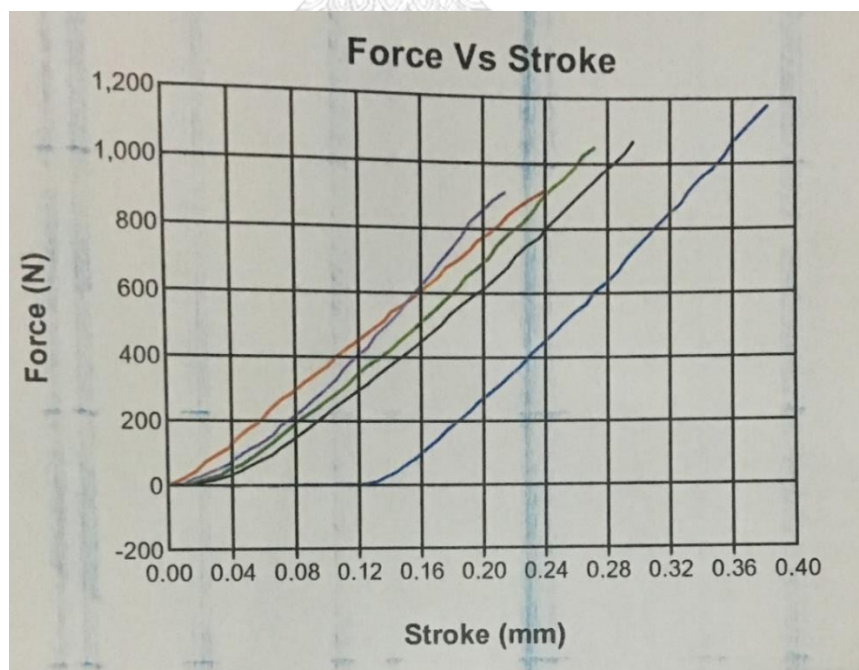
รูปที่ ซ.27 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



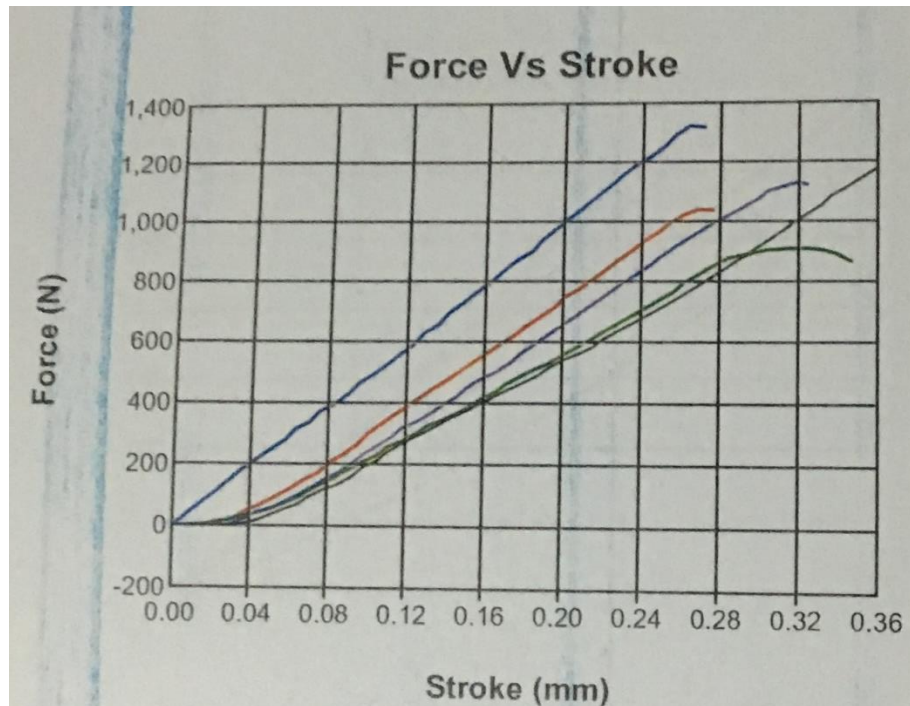
รูปที่ ซ.28 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



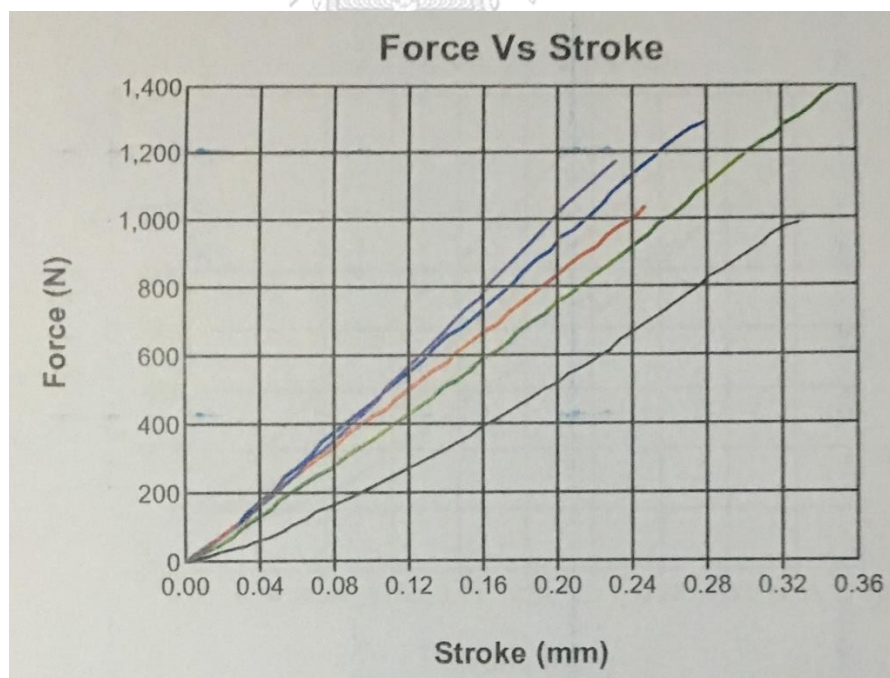
รูปที่ ซ.29 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



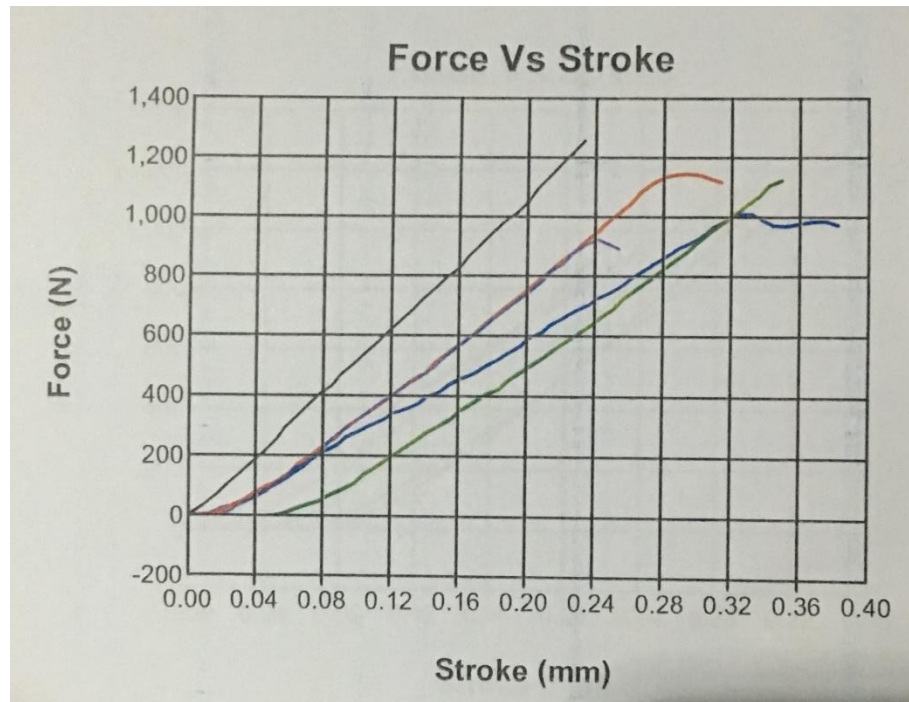
รูปที่ ซ.30 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R3 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



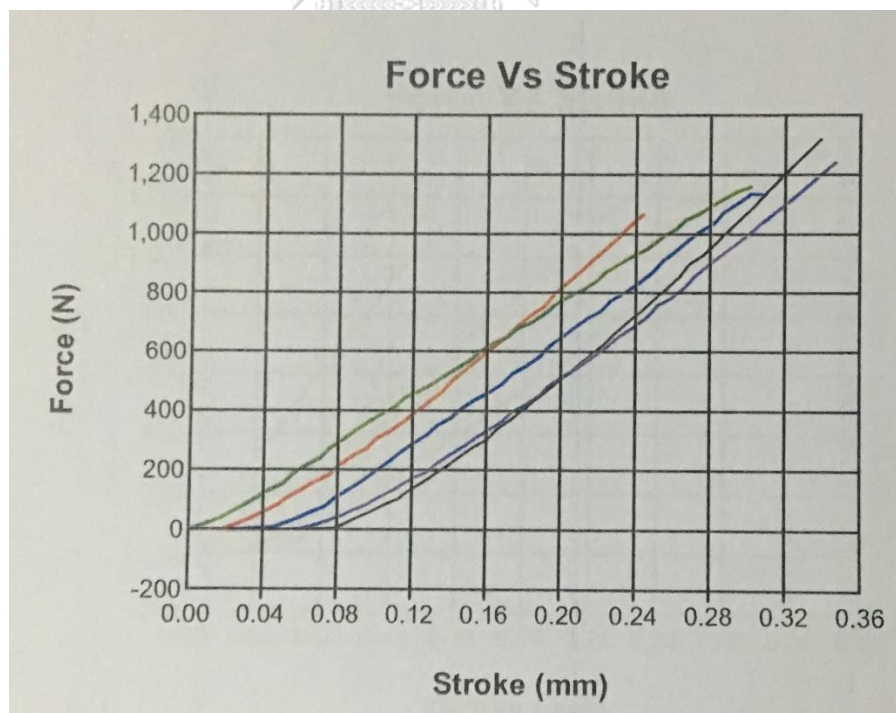
รูปที่ ๗.31 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิห้อง



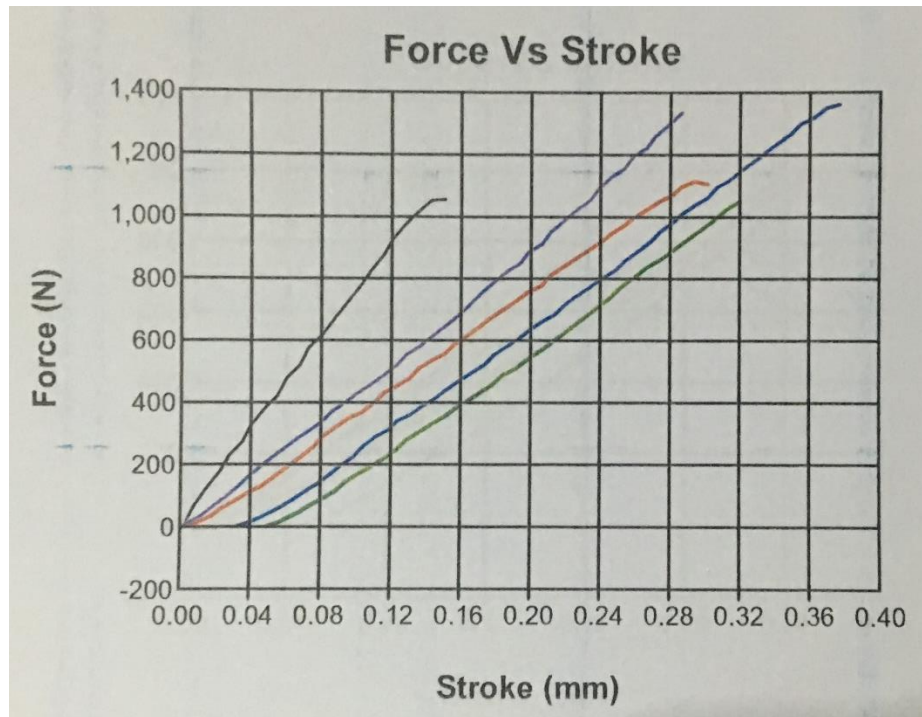
รูปที่ ๗.32 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง



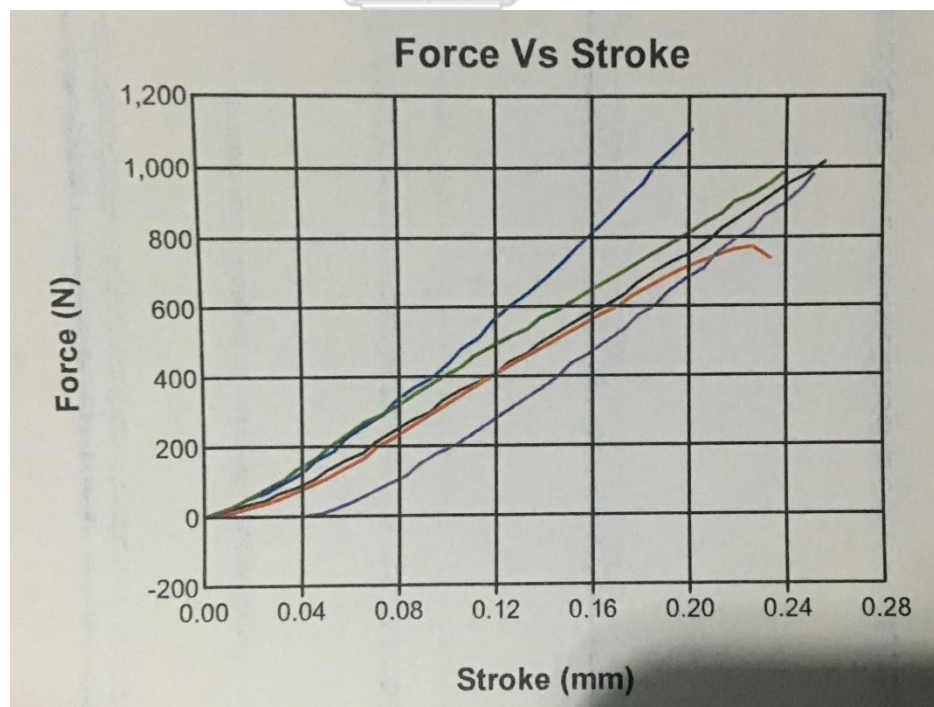
รูปที่ ๓.33 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยึดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ๓.34 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยึดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิห้อง

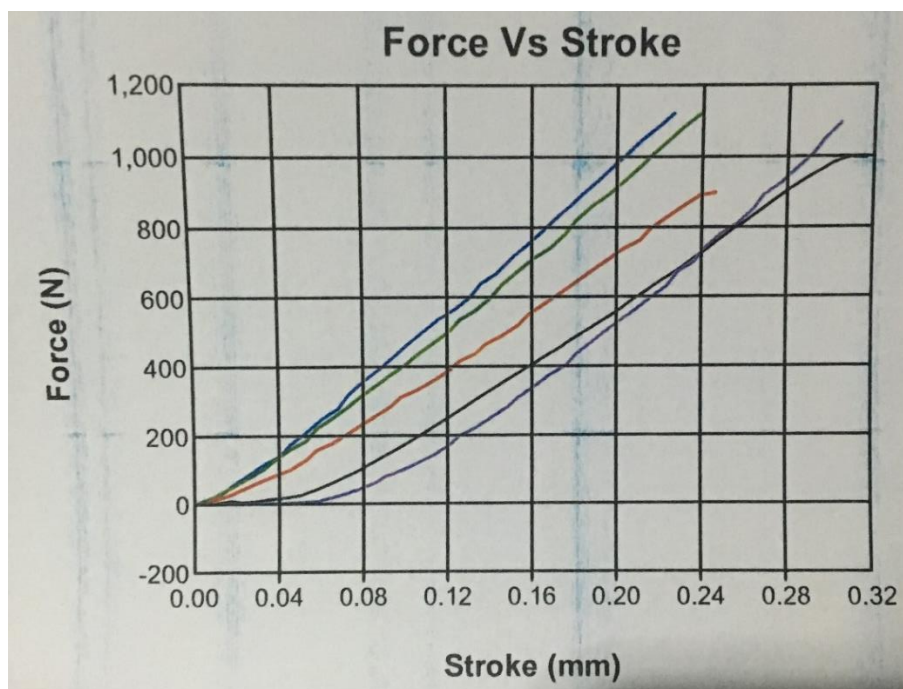


รูปที่ ๓.35 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

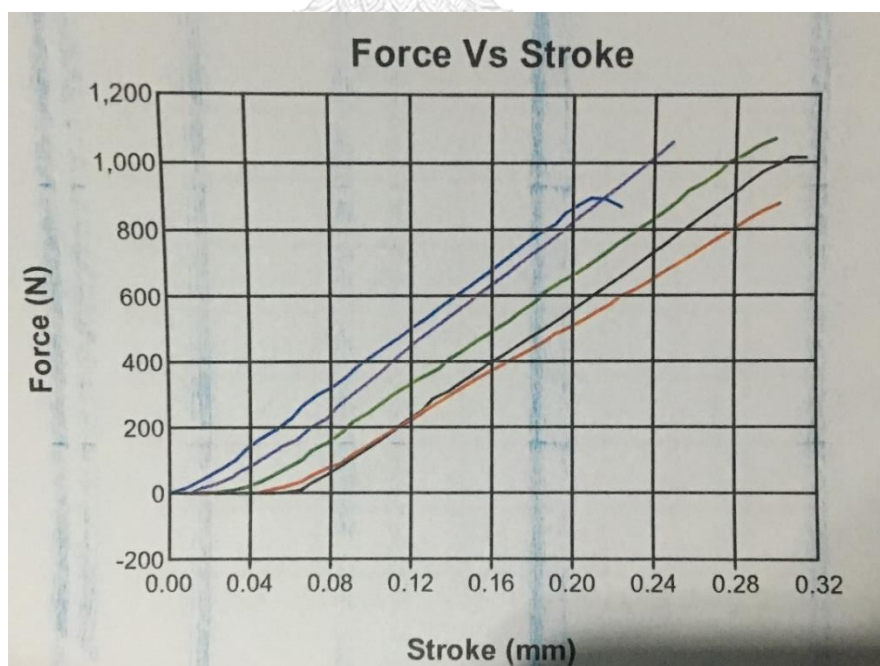


รูปที่ ๓.36 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300

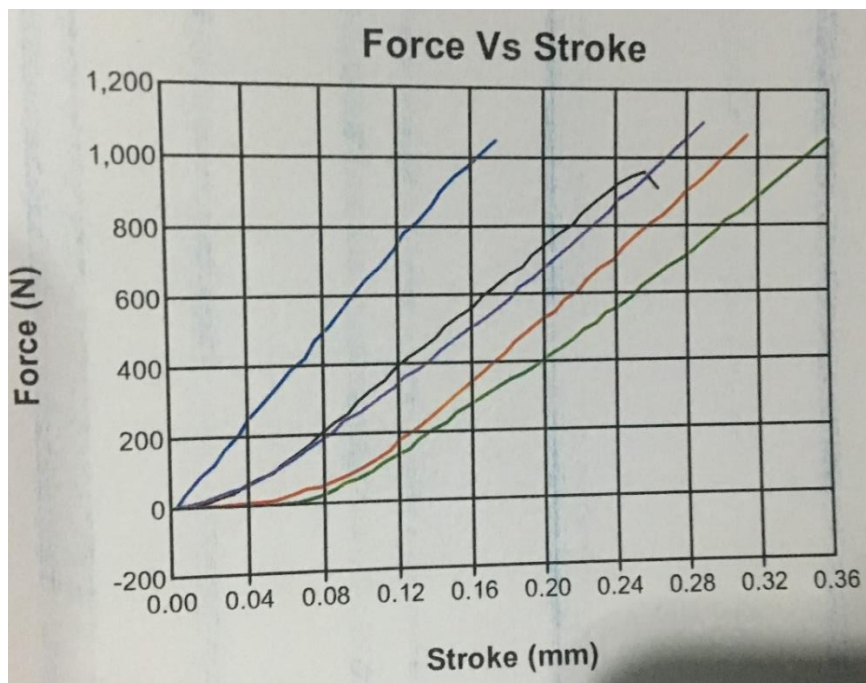
องศาเซลเซียส



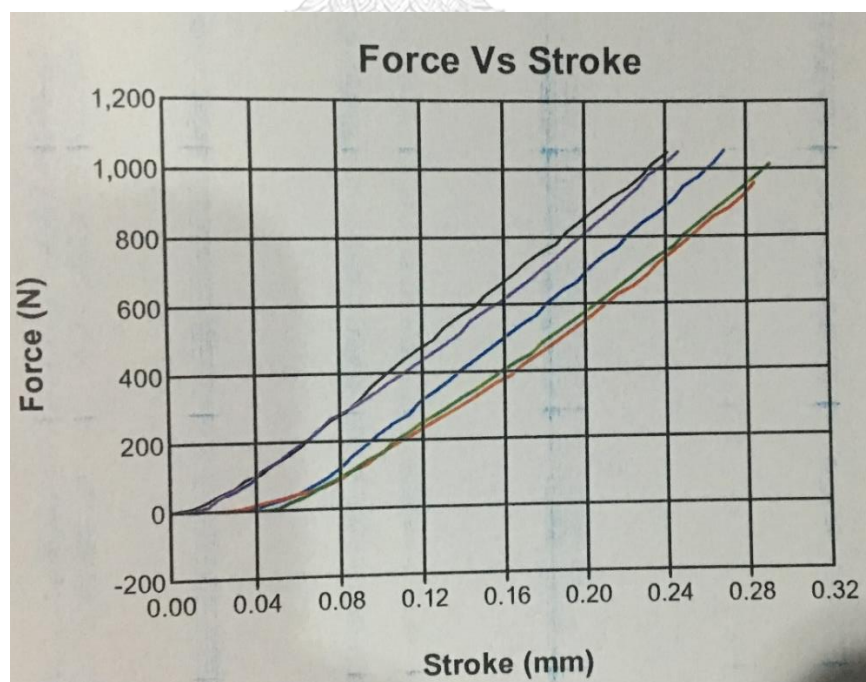
รูปที่ ช.37 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



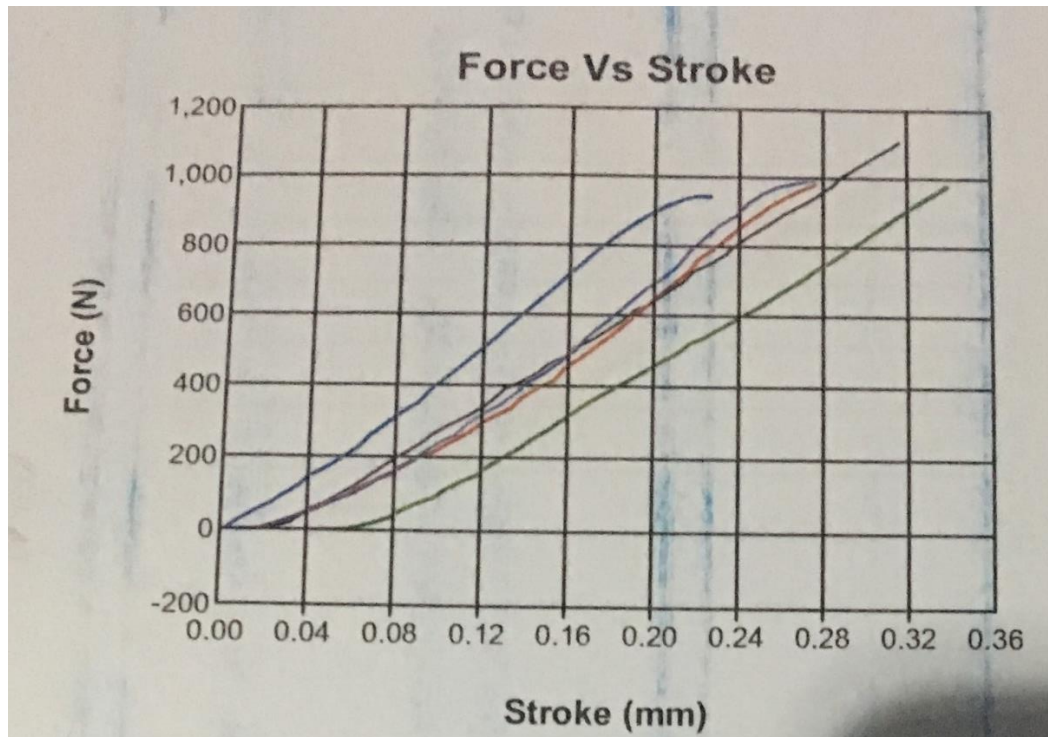
รูปที่ ช.38 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



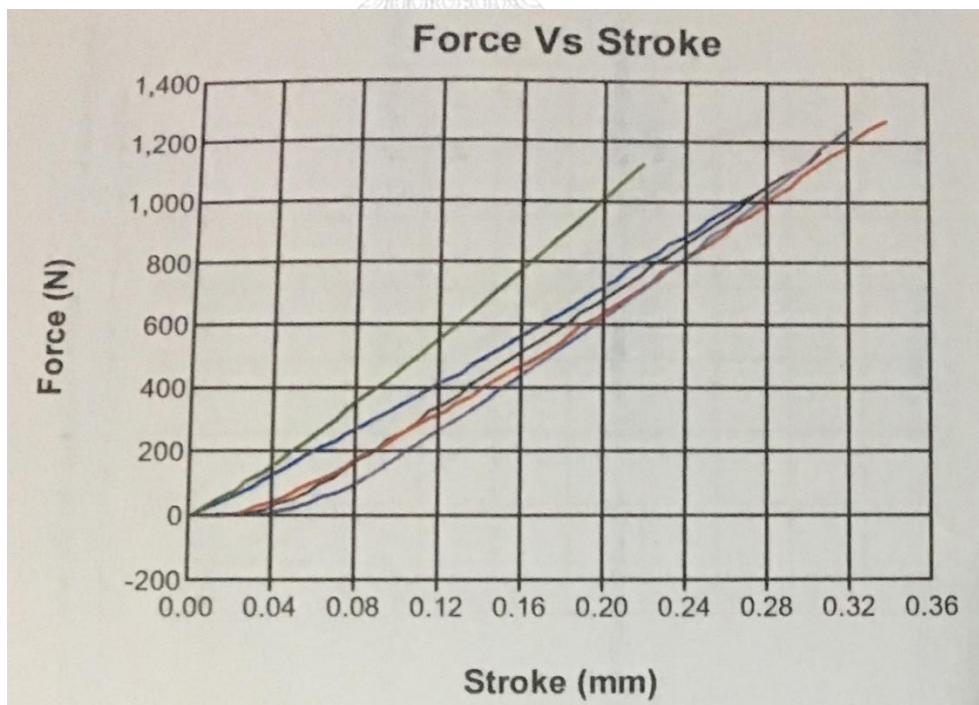
รูปที่ ซ.39 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ ซ.40 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R4 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

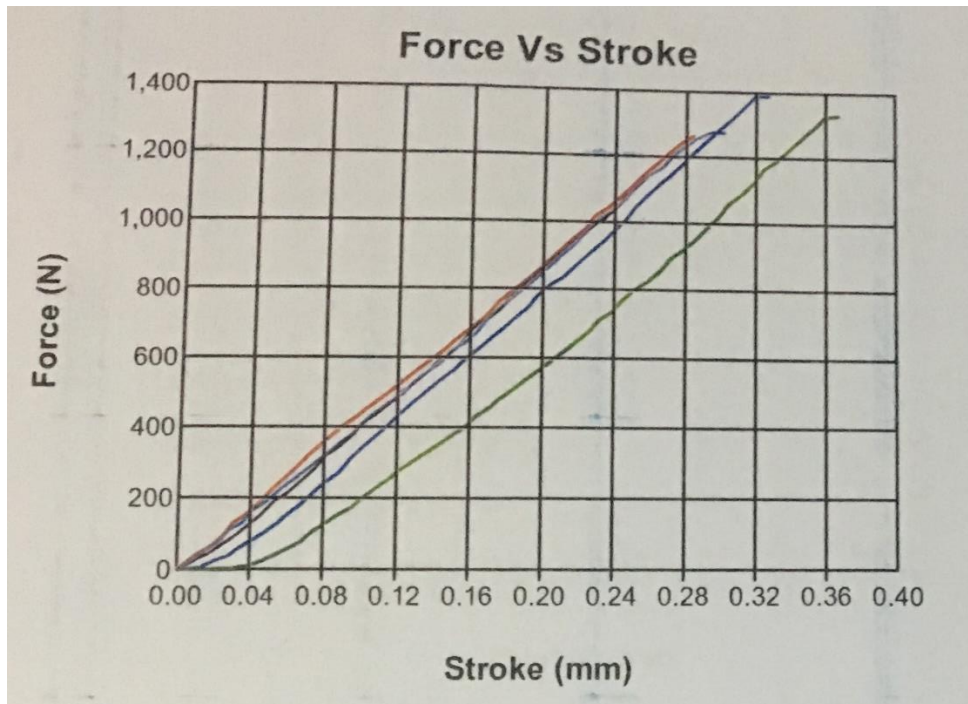


รูปที่ ๔.41 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิห้อง

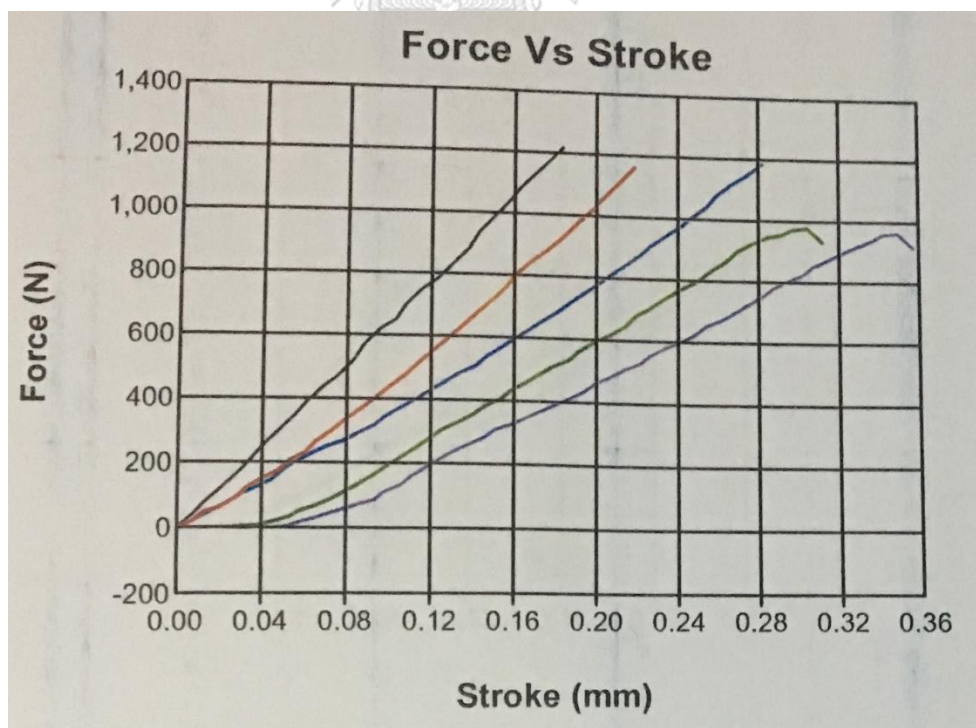


รูปที่ ๔.42 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง

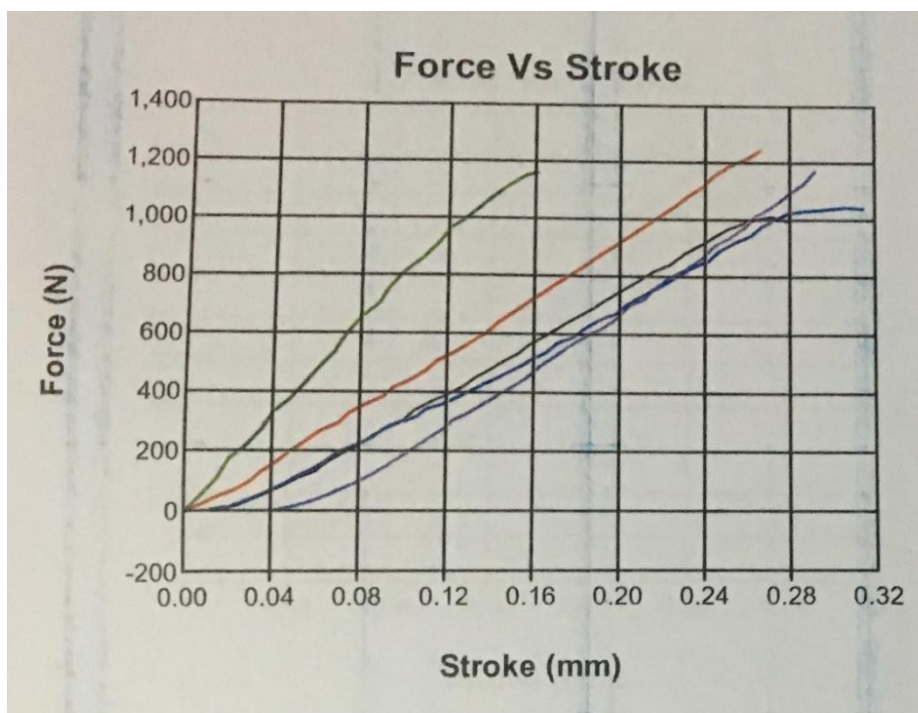




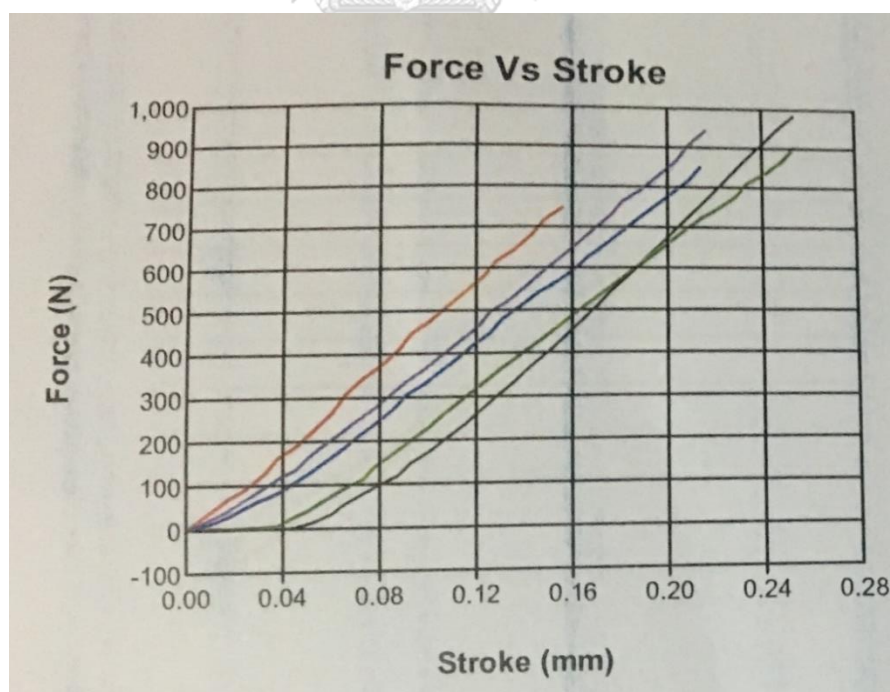
รูปที่ ๔.๔๓ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ๔.๔๔ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิห้อง

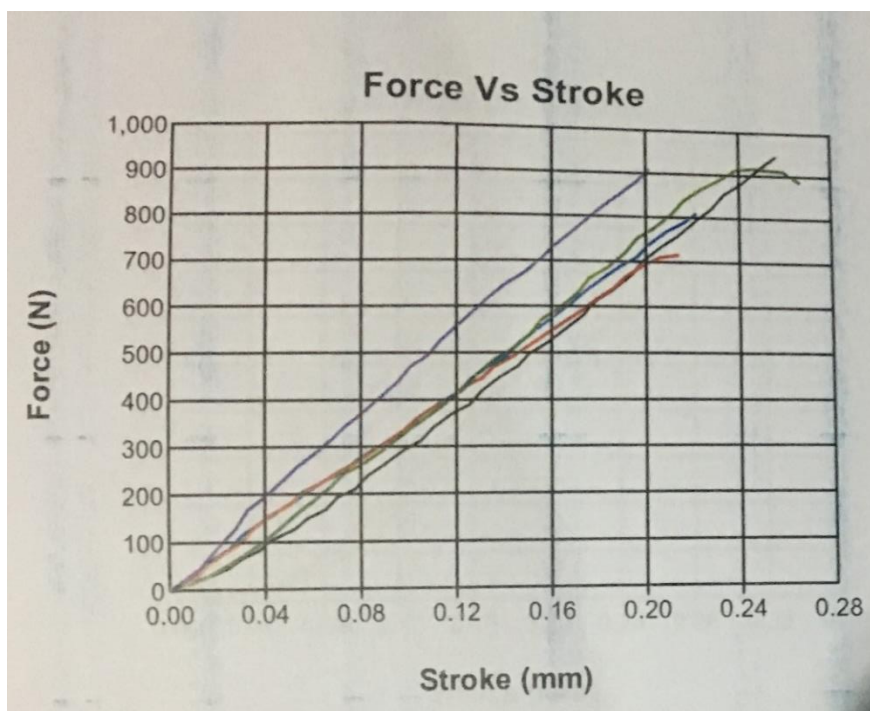


รูปที่ ๔.๔๕ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยึดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง



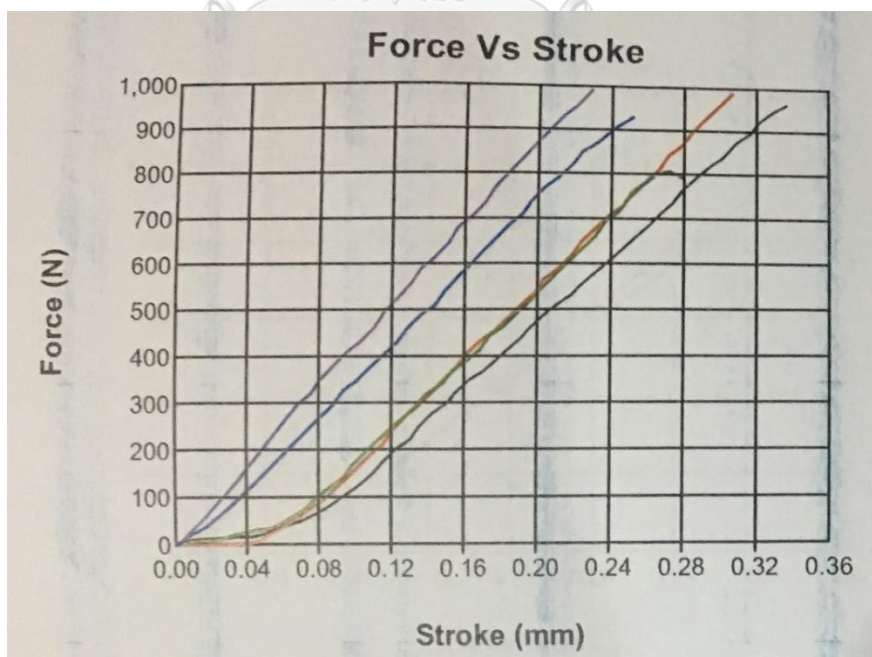
รูปที่ ๔.๔๖ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยึดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส



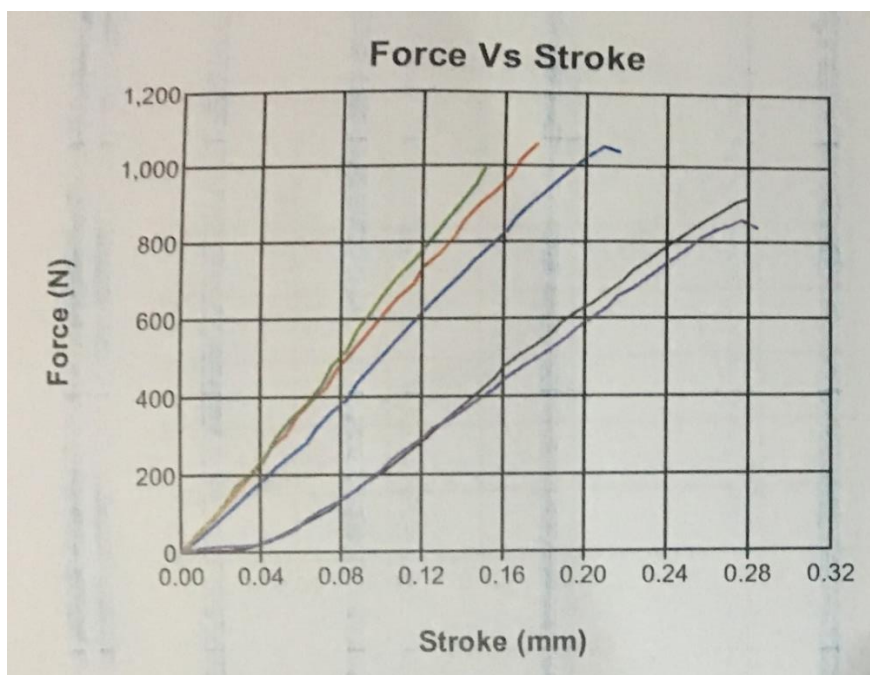
รูปที่ ๔.๔๗ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส

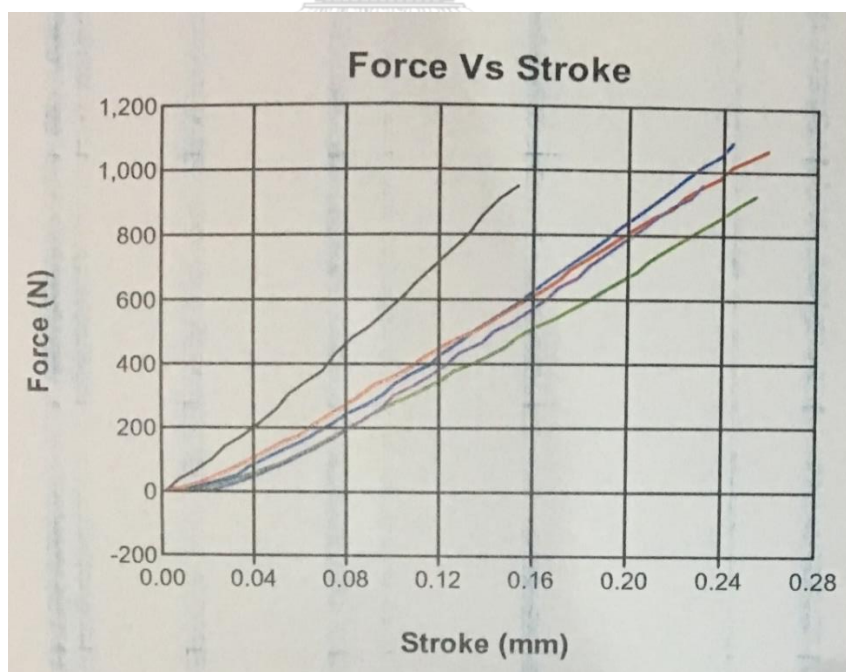


รูปที่ ๔.๔๘ กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส



รูปที่ ๔.49 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 4 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ ๔.50 กราฟระหว่างแรงเฉือนกับระยะการยืดตัวของผ้าเบรกชนิด R5 ชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



ในเชิงอุตสาหกรรมเรื่องต้นทุนการผลิตสินค้ามีความสำคัญต่อผลประกอบการของบริษัท จากปริมาณยอดการผลิตผ้าเบรกสูตร X ปี 2561 ผลิตอยู่ที่ 200,000 กิโลกรัมต่อปี

ปริมาณฟีนอลิกที่ใช้คิดเป็น 5.5 เปอร์เซ็นต์ของยอดการผลิตทั้งหมด

$$\text{ได้ว่า ปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ใช้} = \frac{200,000 \times 5.5}{100}$$

$$= 11,000 \text{ กิโลกรัมต่อปี}$$

เมื่อนำมาคิดราคาค่าใช้จ่ายของฟีนอลิกเรซิน

**สูตร R1** โดยมีราคาค่าฟีนอลิกเรซิน 83 บาทต่อกิโลกรัม

$$\text{ค่าฟีนอลิกเรซิน สูตร R1} = 11,000 \times 83$$

$$= 913,000 \text{ บาทต่อปี}$$

โดยผ้าเบรกสูตร R1 เป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตปกติของทางบริษัท

**สูตร R2** โดยมีราคาค่าฟีนอลิกเรซิน 80.25 บาทต่อกิโลกรัม

$$\text{ค่าฟีนอลิกเรซิน สูตร R2} = 11,000 \times 80.25$$

$$= 882,750 \text{ บาทต่อปี}$$

สามารถลดค่าใช้จ่ายต่อปีลงได้  $913,000 - 882,750 = 30,250$  บาทเมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินในสัดส่วนผ้าเบรก R2

**สูตร R3** โดยมีราคาค่าฟีนอลิกเรซิน 77.55 บาทต่อกิโลกรัม

$$\text{ค่าฟีนอลิกเรซิน สูตร R3} = 11,000 \times 77.55$$

$$= 852,500 \text{ บาทต่อปี}$$

สามารถลดค่าใช้จ่ายต่อปีลงได้  $913,000 - 852,500 = 60,500$  บาทเมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินในสัดส่วนผ้าเบรก R3

**สูตร R4** โดยมีราคาค่าฟีนอลิกเรซิน 74.75 บาทต่อกิโลกรัม

$$\text{ค่าฟีนอลิกเรซิน สูตร R4} = 11,000 \times 74.75$$

$$= 822,250 \text{ บาทต่อปี}$$

สามารถลดค่าใช้จ่ายต่อปีลงได้  $913,000 - 822,250 = 90,750$  บาทเมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินในสัดส่วนผ้าเบรก R4

สูตร R5 โดยมีราคาค่าฟีนอลิกเรซิน 72.00 บาทต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}\text{ค่าฟีนอลิกเรซิน สูตร R5} &= 11,000 \times 72.00 \\ &= 792,000 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

สามารถลดค่าใช้จ่ายต่อปีลงได้  $913,000 - 792,000 = 121,000$  บาทเมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินในสัดส่วน  
ผ้าเบรค R5



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรรษยา เอกวิริยะภิชาติ
วัน เดือน ปี เกิด	20 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	ลำปาง
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	61/1 หมู่ 8 ตำบลอ่แก้ว อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52000
ผลงานตีพิมพ์	W. Eakviriyapichat, K. Keawlop and S. Poompradub, "Effect of mixed resin properties on friction material performance", Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019), Bangkok, Thailand, February 7 - 8, 2019, (Poster).