

ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผ้าเบรก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HOT MOLDING PARAMETERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF BRAKE PADS



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	ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผ้าเบรก
โดย	น.ส.ธนภร วิไลรัตน์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณชี่ระนันท์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	กรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

ธนกร วิไลรัตน์ : ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผ้าเบรก. ( EFFECTS OF HOT MOLDING PARAMETERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BRAKE PADS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พรนภา สุจริตวรกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.วันทนี พุกกะคุปต์

กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผ้าเบรก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ซึ่งสมบัติเหล่านี้ต่างส่งผลต่อการสั่นและการเกิดเสียงของผ้าเบรก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติของผ้าเบรก ได้แก่ ความเป็นรูพรุน สภาพอัดตัวได้ มอดูลัส และความแข็งของผ้าเบรก โดยทำการทดสอบอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของพีนอลิกเรซินด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์เพื่อนำมากำหนดช่วงอุณหภูมิในการทดลอง ปัจจัยทั้ง 3 ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัด ถูกทำการปรับเปลี่ยนและออกแบบด้วยวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทั้งหมดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์สมการการถดถอย และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติสภาพอัดตัวได้ มอดูลัส ความแข็ง และความเป็นรูพรุน โดยพิจารณาจากความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกรวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีปริมาณรูพรุนต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองพบว่าความเป็นรูพรุนเป็นสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อความถี่ธรรมชาติ และมีแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนที่ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าแรงดันเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเป็นรูพรุนมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และเวลาอัด ตามลำดับ จากผลการทดสอบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกพบว่าผ้าเบรกที่มีความเป็นรูพรุน  $14.3 \pm 0.6$  เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มในการเกิดเสียงน้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองความเป็นรูพรุนด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่าภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ทำให้ผ้าเบรกมีแนวโน้มการสั่นและการเกิดเสียงน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส แรงดัน 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเวลาอัด 2.43 นาที

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6072170523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Brake pads, Hot molding process, Box-Behnken design, Surface response methodology

Thanaporn Wilairat : EFFECTS OF HOT MOLDING PARAMETERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BRAKE PADS. Advisor: Assoc. Prof. PORNAPA SUJARIDWORAKUN, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Wantanee Buggakupta, Ph.D.

Hot molding is one of the most important manufacturing processes of friction materials in automotive brake system because it directly impacts on physical and mechanical properties which affects brake vibration and noise. The purpose of this work is to study the effects of hot molding conditions on porosity, compressibility, modulus, and hardness of friction materials. Reaction temperature of phenolic resin was characterized by DSC to designate the temperature range for the experiment. The hot molding parameters i.e. temperature, pressure and holding time, were varied in the hot molding process using by Box-Behnken method. The property-molding parameter relationship was analyzed using ANOVA and multiple regression analysis. Correlations among compressibility, modulus, hardness and porosity were also considered based on natural frequencies of the brake pad test pieces. Brake pad microstructures with different porosity levels were characterized using SEM technique. The results showed that only porosity directly related to natural frequency of the brake pads. Good agreement between experimental result and model proved that porosity was the most appropriate variable in order to investigate optimum condition in hot molding process. Molding pressure gave the highest influence on porosity, followed by molding temperature and holding time, respectively. The porosity of  $14.3 \pm 0.6\%$  showed the lowest vibration and noise propensity. According to response surface methodology, the optimum molding temperature of  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ , molding pressure of  $300\text{ kg/cm}^2$ , and holding time of 2.43 min provided lowest vibration.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature .....

Academic Year: 2018 Advisor's Signature .....  
Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร. พรนภา สุจริตวรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งความรู้ด้านวิชาการ การทดสอบต่าง ๆ การเขียนงานวิจัย รวมถึงการแก้ไขปัญหาระหว่างการดำเนินงาน อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงขอโอกาสนี้กราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา ทิณชิตระนนท์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาและให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร. บรรพต หอบันลือกิจ ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งด้านการจัดการและกระบวนการคิดตั้งแต่เริ่มคิดหัวข้อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำแนะนำแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากโครงการย่อย 1/2560 โครงการยกระดับความสามารถของอุตสาหกรรมขนาดกลางด้านงานวิจัย พัฒนาและอุตสาหกรรม (Research Development and Industrialization capability of Medium enterprise) ภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือโครงการ “ยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม” จากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

ขอขอบพระคุณบริษัท คอมแพค อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ รวมถึงขอขอบพระคุณพี่ ๆ ทุกคนในฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของบริษัท โดยเฉพาะ นาย นันทวุฒิ แซ่ฉิน ที่ให้คำปรึกษาด้านกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออนและการวิเคราะห์ผลตลอดการทำงานวิจัยนี้ นาย เอกนัย กาญจนวราภรณ์ ที่ให้คำแนะนำในการวางแผนการทดลอง ติดต่อประสานงานในการดำเนินการทดลอง สอนการใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ และคำแนะนำด้านการวิเคราะห์ผล และนาย วรินทร์ วราสินธุ์ ที่ให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน ตลอดจนพนักงานฝ่ายผลิตที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงในที่สุด

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ผ้าเบรก .....	4
2.1.1 องค์ประกอบของผ้าเบรก.....	4
2.1.2 ประเภทของผ้าเบรก .....	4
2.1.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	6
2.2 ฟีนอลิกเรซิน .....	7
2.3 การอัดขึ้นรูปร้อน .....	8
2.4 สภาพอัดตัวได้ .....	10

2.5 การวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน .....	10
2.5.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวัดการสั่นสะเทือน .....	10
2.5.2 สัญญาณดิจิทัลของการสั่นสะเทือน .....	12
2.5.3 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ .....	13
2.6 การออกแบบการทดลอง .....	14
2.6.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง .....	14
2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง .....	15
2.6.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน .....	16
2.7 หลักการวิเคราะห์ผลทางสถิติ .....	17
2.7.1 การวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโต .....	17
2.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	18
2.7.3 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง .....	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	24
3.1 วิธีการและแผนการดำเนินงานวิจัย .....	24
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	25
3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพีนอลิกเรซิน .....	25
3.4 การออกแบบการทดลอง .....	26
3.5 การเตรียมผ้าเบรกทดสอบ .....	27
3.5.1 การผสมวัสดุดิบเคมี .....	27
3.5.2 การอัดขึ้นรูปเย็น .....	28
3.5.3 การอัดขึ้นรูปร้อน .....	28
3.5.4 การอบ (การบ่ม) .....	29
3.5.5 การฝนตกแต่ง .....	30



3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรก .....	30
3.6.1 ความถ่วงจำเพาะ .....	30
3.6.2 ความเป็นรูปพรุน .....	31
3.6.3 ความถี่ธรรมชาติ .....	32
3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	33
3.7.1 มอดุลัส 33 .....	
3.7.2 ความแข็ง .....	34
3.7.3 สภาพอัดตัวได้ .....	34
3.8 ประสิทธิภาพของผ้าเบรก .....	35
3.9 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	36
3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	38
4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ .....	38
4.2 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติของผ้าเบรก .....	39
4.2.1 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสภาพอัดตัวได้ .....	40
4.2.2 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อมอดุลัส .....	43
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของผ้าเบรก .....	51
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดุลัสของผ้าเบรก .....	51
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความแข็งของผ้าเบรก .....	52
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูปพรุนของผ้าเบรก .....	52
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูปพรุนของผ้าเบรก .....	53
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก .....	54
4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูปพรุนและความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก .....	55

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกด้ายกลิ้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..	57
4.4.1 ผลของอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรค .....	58
4.4.2 ผลของแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรค .....	58
4.4.3 ผลของเวลาอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรค .....	59
4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	60
4.5.1 การตรวจสอบสมมติฐานของควมมีเสถียรภาพของข้อมูลส่วนตกค้าง .....	60
4.5.2 การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูลส่วนตกค้าง.....	60
4.5.3 การตรวจสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของข้อมูลส่วนตกค้าง.....	61
4.6 การหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน .....	62
4.6.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นรูปทรงจากการทดลอง .....	62
4.6.2 การวิเคราะห์แผนภาพพื้นผิวผลตอบ 2 มิติ.....	65
4.6.3 การกำหนดภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	69
5.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	71
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก ก .....	78
ภาคผนวก ข .....	115
ภาคผนวก ค .....	122
ประวัติผู้เขียน .....	123

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารหล่อลื่นและโลหะในสูตรผ้าเบรกแต่ละประเภท [15] .....	5
ตารางที่ 2.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบร็ทที่มี 3 ปัจจัย .....	17
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของผ้าเบรกที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก .....	25
ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษา.....	27
ตารางที่ 3.3 ภาวะการทดลอง 3 ปัจจัย ที่ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบร็ท.....	27
ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบสมบัติสภาพอัดตัวได้ มอดูลัส ความแข็ง และความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก..	39
ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก.....	40
ตารางที่ 4.3 ความแปรปรวนของสภาพอัดตัวได้.....	42
ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของแบบจำลองสภาพอัดตัวได้.....	43
ตารางที่ 4.5 ความแปรปรวนของมอดูลัส.....	44
ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของแบบจำลองมอดูลัส.....	45
ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของความแข็ง.....	47
ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของแบบจำลองความแข็ง.....	47
ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของความเป็นรูพรุน.....	50
ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของแบบจำลองความเป็นรูพรุน.....	50
ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดูลัส.....	52
ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสและความแข็ง.....	52
ตารางที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูพรุน.....	53
ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสและความเป็นรูพรุน.....	54
ตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสและความถี่ธรรมชาติ.....	54

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การตัดสีนใจของความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูปพรุนและความถี่ธรรมชาติ ..... 55

ตารางที่ 4.17 อัตราการสึกหรอของผ้าเบรกที่อุณหภูมิ 100-300 องศาเซลเซียส ..... 63

ตารางที่ 4.18 ผลต่างความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกและจานเบรก ..... 65

ตารางที่ 4.19 ความเป็นรูปพรุนของภาวะที่ทำให้มีโอกาสเกิดเสียงน้อยที่สุด ..... 65

ตารางที่ 4.20 การเปรียบเทียบเวลาการอัดขึ้นรูปรีนระหว่างภาวะเดิมและภาวะใหม่ ..... 68

ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตที่ผลิตได้ระหว่างภาวะเดิมและภาวะใหม่ ..... 68



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	กระบวนการผลิตและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกในแต่ละกระบวนการ [11]	6
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ [16]	7
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เฮกซามีนเตตระมีน [17]	7
รูปที่ 2.4	สารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมโยงโมเลกุลโนโวแลคเรซิน: (ก) เบนซอกซาซีน และ..	8
รูปที่ 2.5	โครงสร้างการเชื่อมโยงโมเลกุลของโนโวแลคเรซิน [16]	8
รูปที่ 2.6	การอัดขึ้นรูปร้อนผ้าเบรกแบบมีครีบ [11]	9
รูปที่ 2.7	การอัดขึ้นรูปร้อนผ้าเบรกแบบมีครีบ-ภายในช่องว่างของแม่พิมพ์ [11]	9
รูปที่ 2.8	เซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) [20]	11
รูปที่ 2.9	impulse hammer [21]	11
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างระบบการวัดการสั่นสะเทือน [19]	12
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างการสุ่มวัดการสั่นสะเทือน [19]	13
รูปที่ 2.12	ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ [22]	13
รูปที่ 2.13	รูปแบบของกระบวนการโดยทั่วไป [23]	14
รูปที่ 2.14	พื้นผิวผลตบสนอง และเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตบ [25]	16
รูปที่ 2.15	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ปัจจัย [30]	16
รูปที่ 2.16	ตัวอย่างแผนภูมิพาเรโตที่แสดงเส้นอ้างอิง [31]	18
รูปที่ 3.1	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) [40]	26
รูปที่ 3.2	(ก) เครื่องผสมวัตถุดิบ และ (ข) วัตถุดิบผสม	28
รูปที่ 3.3	ชิ้นงานผ้าเบรกหลังการอัดขึ้นรูปเย็น	28
รูปที่ 3.4	เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	29
รูปที่ 3.5	ผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน	29

รูปที่ 3.6	ตู้อบผ้าเบรก.....	29
รูปที่ 3.7	เครื่องฝนหน้าผ้าเบรก .....	30
รูปที่ 3.8	ผิวหน้าผ้าเบรกหลังผ่านการฝน.....	30
รูปที่ 3.9	การทดสอบความถ่วงจำเพาะ .....	31
รูปที่ 3.10	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง และการเคาะของ (ก) ความถี่ที่ 1 และ 4 และ (ข) ความถี่ที่ 2 และ 3.....	32
รูปที่ 3.11	เครื่องบันทึกข้อมูลเสียง และการสั่นสะเทือน .....	33
รูปที่ 3.12	iETEK ultrasonic measurement .....	33
รูปที่ 3.13	ตำแหน่งการทดสอบมอดูล์สบนผ้าเบรก .....	33
รูปที่ 3.14	เครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวลล์ .....	34
รูปที่ 3.15	ตำแหน่งการทดสอบความแข็งบนผ้าเบรก.....	34
รูปที่ 3.16	เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ .....	35
รูปที่ 3.17	เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน .....	36
รูปที่ 3.18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-6480LV [45] .....	37
รูปที่ 3.19	ลักษณะผ้าเบรกที่เตรียมทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	37
รูปที่ 4.1	ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาของพินอลิกเรซิน.....	38
รูปที่ 4.2	แผนภูมิพาเรโตของสภาพอัดตัวได้ .....	41
รูปที่ 4.3	การเปลี่ยนแปลงของสภาพอัดตัวได้เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัด ในกระบวนการขึ้นรูปร้อน .....	43
รูปที่ 4.4	แผนภูมิพาเรโตของมอดูลัส.....	43
รูปที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาอัดในกระบวนการขึ้นรูปร้อน.....	45
รูปที่ 4.6	แผนภูมิพาเรโตของความแข็ง.....	46
รูปที่ 4.7	การเปลี่ยนแปลงของความแข็งเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาอัดในกระบวนการขึ้นรูปร้อน .....	48

รูปที่ 4.8 แผนภูมิพาเรโตของความเป็นรูปพรุน .....	48
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัดใน กระบวนการขึ้นรูปร้อน .....	50
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดุลัส .....	51
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความแข็ง.....	52
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูปพรุน.....	53
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูปพรุน .....	54
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความถี่ธรรมชาติ (โหมดที่ 1).....	55
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูปพรุนและความถี่ธรรมชาติ (โหมดที่ 1).....	55
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 4 (165 °C) และ (ข) ภาวะที่ 3 (135 °C) .....	58
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 3 (300 กก./ตร.ซม.) และ (ข) ภาวะที่ 1 (100 กก./ตร.ซม.).....	59
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 12 (6 นาที) และ (ข) ภาวะที่ 10 (2 นาที) .....	59
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนตกค้างและค่าความเป็นรูปพรุนที่ได้จากแบบจำลอง .....	60
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของแบบจำลองความเป็นรูป พรุน.....	61
รูปที่ 4.21 แนวโน้มข้อมูลส่วนตกค้างของแบบจำลองความเป็นรูปพรุน .....	61
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อุณหภูมิ 100-300 องศาเซลเซียส ....	63
รูปที่ 4.23 แผนภาพพื้นผิวผลตอบ 2 มิติของความเป็นรูปพรุน .....	66
รูปที่ 4.24 ภาวะในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่เหมาะสม .....	67
รูปที่ 4.25 ภาวะกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนปัจจุบันของโรงงาน.....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเสียง และการสั่นจากการเบรกกลายเป็นปัญหาหลักของผู้ผลิตรถยนต์หลายราย จากผลการสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าของ เจ.ดี.พาวเวอร์ (J.D.Power) ในปี 2014 พบว่าปัญหาหลักของผู้ประกอบการรถยนต์ (Original Equipment Manufacturer: OEM) คือลูกค้าให้ความสำคัญเรื่องเสียงเป็นอันดับต้น ๆ โดยเฉพาะเสียงที่เกิดขึ้นในการเบรกซึ่งมีข้อร้องเรียนมาเป็นอันดับ 3 และเมื่อศึกษาถึงปัญหาเรื่องเบรกโดยตรง พบว่าเสียงที่เกิดขณะเบรกเป็นปัญหาที่มีการร้องเรียนเป็นอันดับแรก แม้ว่าเสียงที่เกิดขึ้นจะไม่ได้เป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าผ้าเบรกไม่มีประสิทธิภาพ หรือไม่มีความปลอดภัยก็ตาม แต่เป็นสิ่งที่ทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกไม่ปลอดภัย และเข้าใจว่าระบบเบรกเกิดความผิดพลาด อีกทั้งก่อให้เกิดความรำคาญ ทำให้ลดความพึงพอใจในการขับขี่ [1] นอกจากนี้ยังพบว่ามีข้อบังคับทางกฎหมายของสหภาพยุโรปที่กำหนดให้ระดับเสียงของเครื่องยนต์มีระดับความดังไม่เกิน 68 เดซิเบล ภายในปี ค.ศ. 2026 [2] รวมถึงจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีระดับเสียงเครื่องยนต์เบากว่ารถยนต์พลังงานเชื้อเพลิง มีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกปี [3] โดยเสียงเครื่องยนต์ที่เบาจะส่งผลให้ผู้ขับขี่มีแนวโน้มในการได้ยินเสียงจากการเบรกมากขึ้น

เสียงเบรกและการสั่นที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ ทั้งจากกระบวนการติดตั้ง และกระบวนการผลิต โดยในกระบวนการผลิตประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนของวัสดุที่ใช้ และกระบวนการอัดขึ้นรูปผ้าเบรก ซึ่งทั้งสองส่วนส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ (physical properties) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) รวมถึงประสิทธิภาพ (performance) ของผ้าเบรก เช่น การเกิดเสียง อัตราการสึกหรอ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรก ถึงแม้ว่าปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของผ้าเบรก แต่ยังคงพบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของกระบวนการผลิตน้อยมากโดยในกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ คือ กระบวนการผสมสาร (mixing process) กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น (preforming process) กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (hot molding process) กระบวนการอบ (post-curing process) กระบวนการฝนตกแต่ง (grinding process) และกระบวนการผ่าร่องและปาดข้าง (slots and chamfers) โดยกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อสมบัติของผ้าเบรกอย่างมาก คือ กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เนื่องจากเป็นกระบวนการแรกที่มีการให้ความร้อนแก่วัสดุ ทำให้เรซินที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะหลอมละลาย และยึดสารอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยกัน [4, 5] โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) เป็นสารยึดเกาะในผ้าเบรกเนื่องจากมีราคาถูก มีสมบัติที่ดีทั้งสมบัติทางความร้อน (thermal properties) เชิงกลและการขัดถู (tribological properties) อีกทั้งสามารถยึดเกาะองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยกันได้เป็นอย่างดี [6] นอกจากนี้เรซินยังเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกมากกว่าองค์ประกอบชนิดอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพด้านการทนความ



ร้อนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง (fade resistance) ความรู้สึกขณะเหยียบเบรกความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) และแนวโน้มการเกิดเสียงเป็นต้น [7]

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของผ้าเบรกในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ (temperature) แรงดัน (pressure) และเวลาในการอัด (time) ซึ่งความเหมาะสมของปัจจัยเหล่านี้จะถูกกำหนดโดยสมบัติของเรซินที่ใช้ในสูตรผ้าเบรคนั้น ๆ เนื่องจากเรซินในแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่น (density) และความเป็นรูพรุน (porosity) เมื่อเรซินได้รับความร้อนจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลเรซิน เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเกิดปฏิกิริยา โดยแก๊สที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความเป็นรูพรุนในผ้าเบรก [8] ซึ่งมีค่าแปรผกผันกับค่ามอดูลัส (modulus) และยังพบว่าค่ามอดูลัสแปรผกผันกับสภาพอัดตัวได้ (compressibility) ที่เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงระยะยุบตัวของผ้าเบรกเมื่อให้แรงดัน ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อการสั่นของผ้าเบรก โดยวัสดุที่มีสภาพอัดตัวน้อยกว่าจะส่งผลให้เกิดการสั่นมาก ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดเสียงจากการเบรกได้มากกว่า [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาผลของภาวะในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล โดยการปรับอุณหภูมิ เวลา และแรงดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความเป็นรูพรุน และความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก สมบัติเชิงกล ได้แก่ สภาพอัดตัวได้ มอดูลัส และความแข็ง ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ โดยจะได้ข้อมูลที่เป็นแนวทางในการเลือกภาวะของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีสมบัติตามต้องการ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อความเป็นรูพรุน สภาพอัดตัวได้ และการสั่นของผ้าเบรก

1.2.2 วิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของเรซิน เพื่อนำมากำหนดช่วงอุณหภูมิทดลองในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ที่แรงดันที่ 100-300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเวลาการอัดที่ 2-4 นาที

1.3.2 ศึกษาผลของตัวแปรทั้ง 3 ต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความเป็นรูพรุน และความถี่ธรรมชาติ และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง มอดูลัส และสภาพอัดตัวได้

1.3.3 วิเคราะห์ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทั้งหมดด้วยวิธีการทางสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance: ANOVA) การวิเคราะห์การถดถอย

(regression analysis) และแผนภาพพื้นผิวแบบ 2 มิติ (contour analysis) เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

1.3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

1.3.5 วิเคราะห์หาแบบจำลองของสมบัติที่เหมาะสมและส่งผลต่อการสั่นของผ้าเบรกมากที่สุด  
วิเคราะห์แผนภาพพื้นผิวแบบ 2 มิติ (contour analysis)

1.3.6 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีสมบัติต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

1.3.7 ศึกษาประสิทธิภาพของผ้าเบรก ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) และอัตราการสึกหรอ (wear rate)

1.3.8 วิเคราะห์แนวโน้มการเกิดเสียงของผ้าเบรกจากการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกกับจานเบรกเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมของสมบัติที่เลือก

1.3.9 วิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยพิจารณาจากความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกที่มีแนวโน้มส่งผลให้เกิดเสียงจากการเบรคน้อยที่สุด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลที่เป็นแนวทางในการเลือกภาวะของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ผ้าเบรก

ผ้าเบรกเป็นวัสดุเสียดทานชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับหยุด หรือลดความเร็วของรถยนต์ขณะขับขี่ เมื่อผู้ขับขี่ทำการเหยียบเบรก จะเกิดแรงดันน้ำมันเบรกในระบบไฮดรอลิกส่งแรงดันไปยังคาลิปเปอร์ที่มีผ้าเบรกประกอบอยู่ แล้วดันผ้าเบรกให้ประกบกับจานเบรกที่กำลังหมุนเคลื่อนที่อยู่ เกิดแรงเสียดทานระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานจลน์ (kinetic energy) ไปเป็นพลังงานความร้อน เมื่อความร้อนมากขึ้นวัสดุเสียดทานบางส่วนจะไปติดอยู่บนจานเบรก และเมื่อพื้นผิวของผ้าเบรกและจานเบรกมีวัสดุเสียดทานทั้งคู่ เกิดการยึดเกาะระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรกมากขึ้น จนเกิดความเสียดทานและทำให้รถหยุดในที่สุด [10]

##### 2.1.1 องค์ประกอบของผ้าเบรก [11, 12]

ผ้าเบรก คือ วัสดุเสียดทานที่มีลักษณะเป็นของผสมที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายชนิด และยึดติดเป็นชิ้นเดียวกันด้วยสารยึดติด โดยสามารถแบ่งองค์ประกอบวัสดุตามหน้าที่ในการทำงาน ได้ดังนี้

I. เส้นใยเสริมแรง (fiber reinforcements) ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุเสียดทาน ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น มีความคงตัวก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพร้อม

II. สารยึดติด (binders) ทำหน้าที่ในการยึดทุกองค์ประกอบเข้าด้วยกัน ส่วนใหญ่นิยมใช้ฟีนอลิกเรซิน

III. สารเติมเต็ม (fillers) ใช้ในการควบคุมอัตราส่วนโดยรวมของผ้าเบรก ลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงความเป็นรูปทรง

IV. สารปรับแรงเสียดทาน (friction modifiers) เป็นสารที่ใช้ปรับประสิทธิภาพของผ้าเบรก (ความเสียดทาน) ให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยใช้เป็นสารหล่อลื่น (แกรไฟต์) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรก หรือใช้เป็นสารขัดถู (abrasive) เพื่อเพิ่มความเสียดทาน

##### 2.1.2 ประเภทของผ้าเบรก [13-15]

ในสมัยอดีตนิยมใช้แร่ใยหินแอสเบสตอส (Asbestos) เป็นองค์ประกอบหลักในผ้าเบรก เนื่องจากมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี มีความคงทนสูง และมีราคาถูก แต่ภายหลังมีการวิจัยค้นพบว่าแร่ใยหินส่งผลกระทบต่อปัญหาทางสุขภาพ เมื่อสูดดมเข้าไปสามารถเข้าไปฝังตัวในร่างกายมนุษย์ และก่อให้เกิดมะเร็งปอด นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นจึงทำให้ความนิยมลดลงไป และนิยมใช้ผ้าเบรกไร้ใยหิน (Non Asbestos Organic: NAO) มากขึ้น [13, 14] ในปัจจุบันผ้าเบรกมีอยู่หลายประเภท สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.1 [15] ซึ่งแบ่งประเภทหลัก ๆ ของผ้าเบรกได้ดังนี้

I. **ผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะ (semi-metallic formulas)** เป็นผ้าเบรกที่มีองค์ประกอบของโลหะในปริมาณสูงกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งโลหะเหล่านั้นส่วนใหญ่เป็นเส้นใยเหล็ก ทองแดง โลหะผสมของทองแดง (copper alloys) ดีบุกและสังกะสีสำหรับบางสูตร ปริมาณโลหะที่มากทำให้ผ้าเบรกมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง สามารถระบายความร้อนได้เร็ว แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้เกิดเสียงดังขณะเบรก และเกิดฝุ่นจากจานเบรกมาก

II. **ผ้าเบรกสูตรโลหะต่ำ (low metallic formulas)** เป็นผ้าเบรกที่มีองค์ประกอบของโลหะในปริมาณต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 30) ทั้งเส้นใยเหล็กและโลหะอื่น ๆ เช่น ทองแดง และโลหะผสมของทองแดง เป็นต้น ทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะ จะเน้นประสิทธิภาพในเรื่องของการเกิดเสียงที่ต่ำ มีฝุ่นจากจานเบรคน้อย และความรู้สึกขณะเบรก เช่น ความนุ่ม เป็นต้น

III. **ผ้าเบรกสูตรเส้นใยเหล็กต่ำ (low steel formulas)** เป็นผ้าเบรกที่มีสูตรคล้ายกับสูตรโลหะต่ำแต่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก และโลหะอื่น ๆ สูงกว่า ทำให้สามารถระบายความร้อนได้เร็ว และมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าสูตรโลหะต่ำ

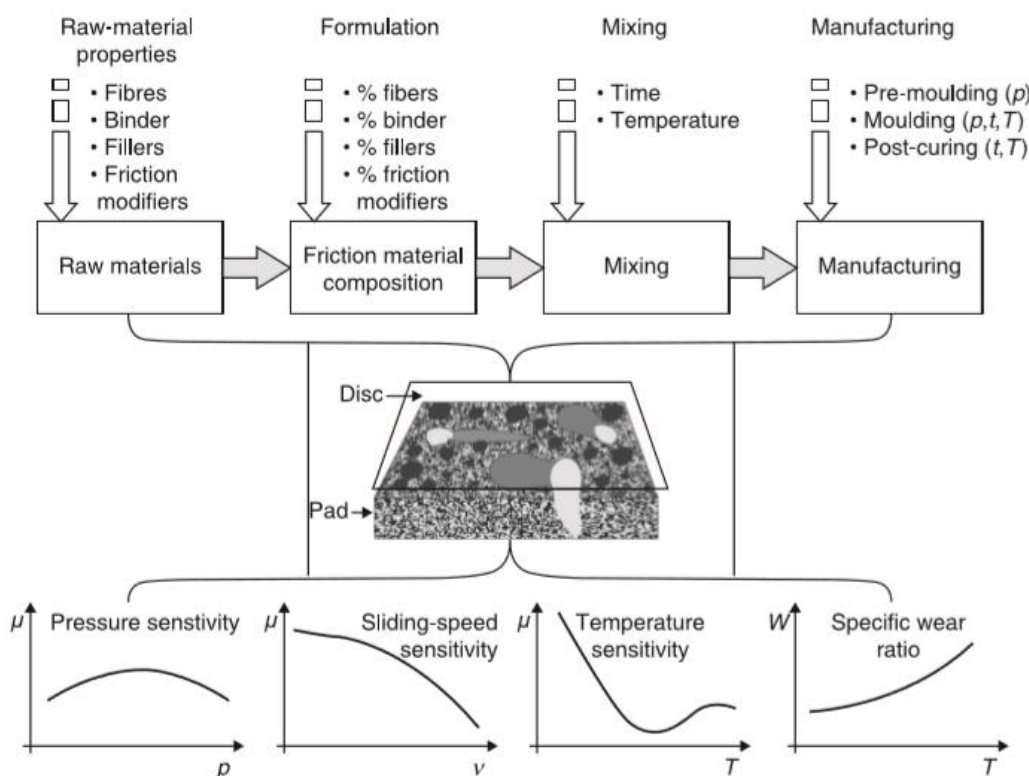
IV. **ผ้าเบรกสูตรเซรามิก (ceramic formulas)** เป็นผ้าเบรกที่ไม่มีองค์ประกอบของเส้นใยเหล็ก แต่มีองค์ประกอบเป็นเส้นใยเซรามิก เช่น แคลเซียม-แมงกานีสซิลิเกต (Ca-Mg silicates) เส้นใยหินบะซอลท์ (rock wool) และเส้นใยไททานเนต ทำให้สามารถทนความร้อนได้สูง ผสมกับโลหะทองแดง และโลหะผสมของทองแดง เพื่อช่วยในการระบายความร้อน

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารหล่อลื่นและโลหะในสูตรผ้าเบรกแต่ละประเภท [15]

Raw material	Ceramic (%)	Low steel (%)	Low metal (%)	Semi-metallic (%)
<b>Lubricants</b>				
Fine graphite	4-9	2-8	4-10	4-10
Coarse graphite	2-5	0-7	4-8	5-10
<b>Sulfides</b>				
Sn/Sb sulfides	2-5	2-5	2-5	2-7
Cu sulfide	2-5	2-5	2-5	2-10
Other sulfides	0-4	0-4	0-4	2-5
<b>Ferrous metals</b>				
Steel fibers	0	10-18	5-10	20-35
Iron powder	0	2-5	1-2	2-7
<b>Nonferrous metals</b>				
Copper	10-16	6-15	0-6	2-10
Copper alloys	5-10	5-10	0-5	2-10
Zinc/Sn	0-4	0-4	0-2	0-4

### 2.1.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรก [11]

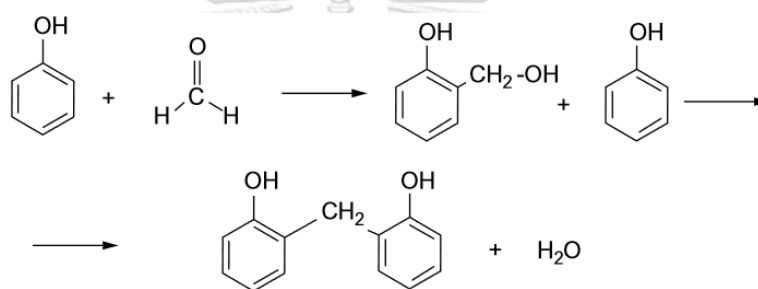
กระบวนการผลิตผ้าเบรกประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนก็มีปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรก ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยเริ่มจากการผสมองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน นำเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น โดยทำการควบคุมแรงดัน เพื่อให้ผ้าเบรกเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แล้วนำเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาในการอัด เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง และสามารถยึดเกาะสารทุกชนิดเข้าด้วยกันได้ อีกทั้งยังทำให้กาวบริเวณแผ่นเหล็กรองหลังเบรก (backing plate) ละลายยึดติดกับผ้าเบรก จากนั้นเข้าสู่กระบวนการอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาในการอบ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์มากขึ้น และกระบวนการสุดท้าย คือ กระบวนการฝนตกแต่ง ซึ่งเป็นการตกแต่งให้ผิวหน้าผ้าเบรกเกิดความสวยงามมากขึ้น แต่จากกระบวนการผลิตทั้งหมดนั้นมี 3 กระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรก ได้แก่ กระบวนการผสมวัตถุดิบ กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น และกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกในแต่ละกระบวนการ [11]

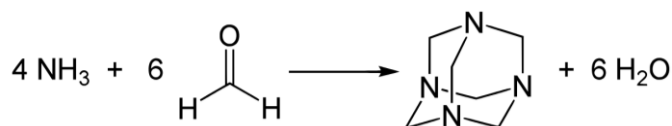
## 2.2 ฟีนอลิกเรซิน [16, 17]

ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ หรือเรียกอีกชื่อว่า ฟีนอลิกเรซิน เป็นสารที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล (phenol) และฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินเกิดขึ้นผ่านการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ขั้นแรกฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไฟล์จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลฟีนอล เกิดเป็นสารกลุ่มไฮดรอกซีเมทิล (hydroxymethyl group) จากนั้นในขั้นที่สองหมู่ไฮดรอกซีเมทิลจะไปเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพารา (para) หรือออร์โท (ortho) ของฟีนอลอีกโมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยฟีนอลิกเรซินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ รีโซล (resole) กับ โนวอลแลค (novolac) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกันที่ปริมาณสัดส่วนระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ในระหว่างการสังเคราะห์ โดยรีโซลจะมีสัดส่วนของปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์มากกว่าฟีนอล (formaldehyde/phenol > 1) ในขณะที่โนวอลแลคมีสัดส่วนของปริมาณฟีนอลมากกว่าฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde/phenol < 1)



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ [16]

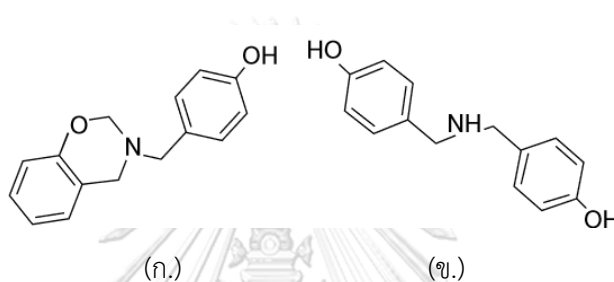
ในอุตสาหกรรมผลิตเบรกรถยนต์นิยมใช้ฟีนอลิกเรซินประเภทโนวอลแลค (เทอร์โมเซตเรซิน) ซึ่งเป็นประเภทที่ไม่มีกลุ่มไฮดรอกซีเมทิลอิสระ เนื่องจากมีปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุล ดังนั้นจึงต้องทำการเติมสารที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ เฮกซามีนเตตระมิน (hexamethylenetetramine: HEXA) หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า เฮกซามีน (hexamine) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนีย (ammonia) และฟอร์มัลดีไฮด์ (รูปที่ 2.3)



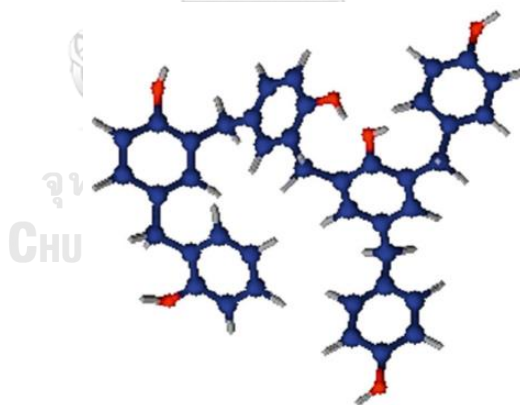
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เฮกซามีนเตตระมิน [17]

ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลเรซินจะเกิดขึ้นได้เมื่อเรซินได้รับความร้อน หรือถูกทำการบ่ม (ส่วนใหญ่เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลมากที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 140 ถึง 160 องศาเซลเซียส) ในกรณีของการผลิตผ้าเบรคจะเกิดขึ้นที่กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โมเลกุลของเฮกซามีนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับวงแหวนแอริล

ของโมเลกุลฟีนอลโนโวนอวอแลคพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) หลังจากทำปฏิกิริยาในขั้นแรก (สมการที่ 2.1) จะเกิดเป็นสารมัธยันต์ (intermediate) 2 ชนิด ได้แก่ เบนซิลามีน (benzylamine) และเบนซอกซาซีน (benzoxazine) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และ 2.4 (ข) จากนั้นสารมัธยันต์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลฟีนอลโนโวนอวอแลคพอลิเมอร์อีกครั้ง เกิดเป็นโมเลกุลเรซินที่เชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างร่างแห ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นแก๊สแอมโมเนีย (สมการที่ 2.2)



รูปที่ 2.4 สารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมโยงโมเลกุลโนโวนอวอแลคเรซิน: (ก) เบนซอกซาซีน และ (ข) เบนซิลามีน [16]

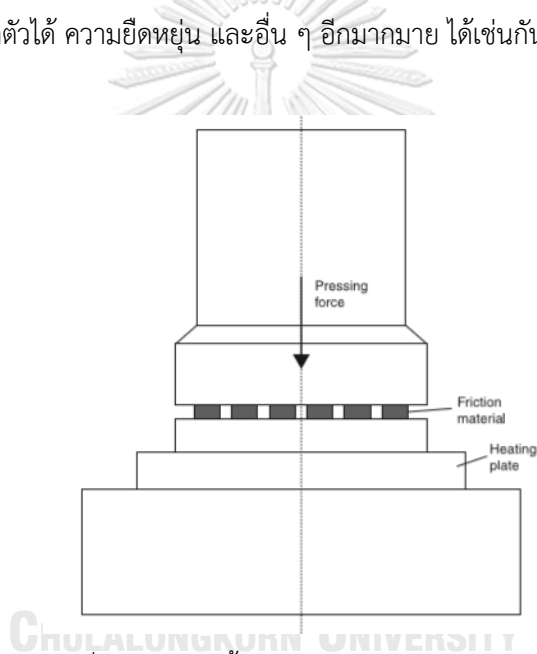


รูปที่ 2.5 โครงสร้างการเชื่อมโยงโมเลกุลของโนโวนอวอแลคเรซิน [16]

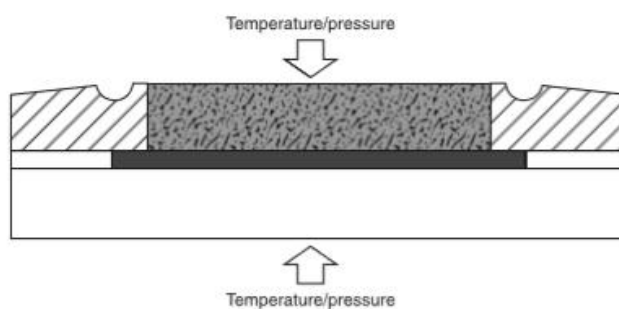
### 2.3 การอัดขึ้นรูปร้อน [11]

การอัดขึ้นรูปร้อนสามารถอัดขึ้นรูปได้ทั้งการอัดขึ้นรูปแบบมีครีป (flash mold method) และการอัดขึ้นรูปแบบโพซิทีฟ (positive molding) แต่กระบวนการที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ใช้การอัดขึ้นรูปร้อนแบบมีครีป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งเป็นการอัดที่มีการกำหนดปริมาณของแต่ละส่วนไว้คงที่ ทำให้หลังจากทำการอัดเกิดสารส่วนเกิน หรือที่เรียกว่าครีปผ้าเบรก (flashed) ล้นออกมาจากแม่พิมพ์

การอัดขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในการผลิตผ้าเบรก เนื่องจากเป็นขั้นตอนแรกที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของพีนอลิกเรซินโดยอาศัยความร้อนและแรงดัน ในขั้นตอนนี้จะเริ่มจากการนำผ้าเบรกที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเย็นมาแล้วมาทำการอัดที่อุณหภูมิ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส ที่แรงดัน 30 ถึง 70 เมกะปาสกาล ทำให้พีนอลิกเรซินเกิดการหลอม และไหลแทรกไปตามเนื้อวัสดุ เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซิน แล้ววัสดุเกิดการยึดติดกันมากที่สุด แต่ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเกิดแก๊สแอมโมเนียออกมาเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ดังนั้นจึงมีอัดและคลายแรงดันสลับกันเป็นระยะเวลาสั้น ๆ (breathing cycle) ในช่วงแรกของการอัด เพื่อทำการปล่อยแก๊สออกนอกระบบ ในกระบวนการพิมพ์ร้อนมีปัจจัยหลักที่ต้องทำการกำหนดให้เหมาะสมกับสูตรของผ้าเบรก ได้แก่ อุณหภูมิการอัด แรงดัน และเวลาในการอัด เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อความเสียหาย และการสึกหรอของผ้าเบรก นอกจากนี้การใช้สูตรผ้าเบรกเดียวกันแต่กำหนดค่าปัจจัยในกระบวนการพิมพ์ร้อนต่างกันก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรูพรุน สภาพอัดตัวได้ ความยืดหยุ่น และอื่น ๆ อีกมากมาย ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.6 การอัดขึ้นรูปร้อนผ้าเบรกแบบมีครีป [11]



รูปที่ 2.7 การอัดขึ้นรูปร้อนผ้าเบรกแบบมีครีป-ภายในช่องว่างของแม่พิมพ์ [11]



## 2.4 สภาพอัดตัวได้ [11, 18]

ค่าสภาพอัดตัวได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการคัดเลือกและพัฒนาผ้าเบรก ซึ่งเป็นผลจากตั้งค่าต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต และชนิดของวัสดุหรือสูตรของผ้าเบรกที่ใช้ สภาพอัดตัวได้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะยุบตัวของผ้าเบรกเมื่อให้แรงดันลงไป โดยผ้าเบรกต้องมีระยะยุบตัวไม่เกิน 2 % เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และไม่เกิน 5 % เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่ทำให้ทราบถึงการเสียรูปทั้งแบบยืดหยุ่น และแบบพลาสติก ที่ขึ้นกับความเหนียวและยืดหยุ่นของวัสดุผ้าเบรก หากผ้าเบรกมีความยืดหยุ่นมากจะมีค่าสภาพอัดตัวได้ต่ำ เนื่องจากวัสดุสามารถคืนตัวได้หลังจากได้รับแรงดัน นอกจากนี้ค่าสภาพอัดตัวได้ควรมีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแน่นอน เพื่อที่จะสามารถช่วยยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพต่าง ๆ ของผ้าเบรก ไม่ว่าจะเป็นความรู้สึกขณะเหยียบเบรกที่ดี ผ้าเบรกมีอัตราการสึกหรอต่ำ และมีการถ่ายโอนพลังงานที่เพียงพอจากผ้าเบรกไปยังจานเบรก ในขณะเดียวกันก็ควรมีความยืดหยุ่นที่มากพอเพื่อที่จะยืนยันได้ว่าผ้าเบรกสามารถยึดเกาะกับจานเบรกที่มีพื้นผิวที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดี จากที่กล่าวมานี้ทำให้บอกได้ว่าค่าสภาพอัดตัวได้เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่สุดในด้านคุณภาพของกระบวนการผลิต ที่เกี่ยวข้องกับ

- I. คุณภาพของวัตถุดิบ
- II. วิธีการผสมวัตถุดิบ
- III. คุณภาพและความสม่ำเสมอของกระบวนการอัดขึ้นรูป
- IV. การบวมของผ้าเบรกระหว่างการอัดขึ้นรูปร้อน
- V. การแตกของผ้าเบรก
- VI. กระบวนการเชื่อมระหว่างวัสดุผ้าเบรกกับแผ่นเหล็กรองหลังเบรก

## 2.5 การวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน [19]

### 2.5.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวัดการสั่นสะเทือน

I. เซ็นเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนแรงหรือการเคลื่อนที่ทางกลให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะการติดตั้ง ได้แก่ เซ็นเซอร์ที่สัมผัสกับชิ้นงาน เช่น สเตรนเกจ (strain gauge) seismic velocity transducer หรือที่พบเห็นมากที่สุดคือ เซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดความสั่นสะเทือน หรือการตอบสนอง ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกในงานวิจัยนี้ด้วย และเซ็นเซอร์ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงาน เช่น proximity sensor และ Laser Doppler vibrometer โดยเซ็นเซอร์ที่สัมผัสกับชิ้นงานมักมีราคาถูก ใช้งานง่าย แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์ติดอยู่กับชิ้นงาน ดังนั้นมวลของเซ็นเซอร์จึงอาจมีผลต่อมวลรวมของระบบการสั่นสะเทือนได้ เพราะฉะนั้นหากต้องการวัดการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้องมวลของเซ็นเซอร์จึงต้องมีขนาดน้อยกว่ามวลของระบบมาก ๆ สำหรับเซ็นเซอร์ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงานจะมีข้อดีคือตัวเซ็นเซอร์จะไม่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งเซ็นเซอร์จะต้องระวังไม่ให้เซ็นเซอร์ได้รับผลของการสั่นสะเทือนของชิ้นงานด้วย



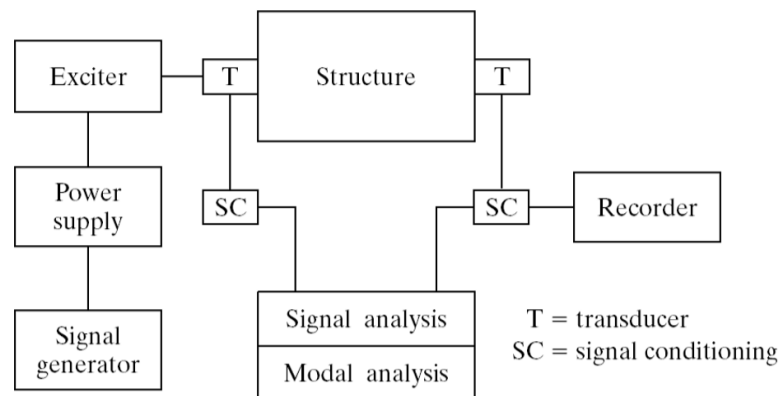
รูปที่ 2.8 เซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) [20]

II. ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน (actuators) เป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงกระตุ้นกับระบบ ตัวกระตุ้นที่พบเห็นบ่อย ๆ ได้แก่ impulse hammer ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงกระตุ้นจากแรงดลหรืออิมพัลส์ (impulse) กับระบบทำให้ระบบเกิดการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของมัน โดยช่วงความถี่ที่กระตุ้นได้จะสัมพันธ์กับคาบเวลาที่เกิดการกระแทก



รูปที่ 2.9 impulse hammer [21]

III. ตัววิเคราะห์สัญญาณ (signal analyzers) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกสัญญาณและจัดการสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ต่อไป โดยอาจมีส่วนขยายสัญญาณ (signal amplifiers) รวมอยู่ด้วย โดยอุปกรณ์นี้มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย ทั้งการบันทึกลักษณะสัญญาณในโดเมนเวลา การกรองสัญญาณ (filtering) การแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) และการหาค่าฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response function) เป็นต้น ตัวอย่างระบบวัดการสั่นสะเทือนประกอบด้วยอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.10 โดย structure คือชิ้นงานที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือน ในขั้นแรกชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน รูปแบบการกระตุ้นถูกกำหนดโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) จากนั้นเซ็นเซอร์จะทำการรับสัญญาณ และเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณรบกวน หรือสัญญาณความถี่สูงที่ไม่เกี่ยวข้องจะถูกกรองด้วย signal conditioner ก่อนจะถูกบันทึกด้วย recorder หรือถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (signal analyzer)

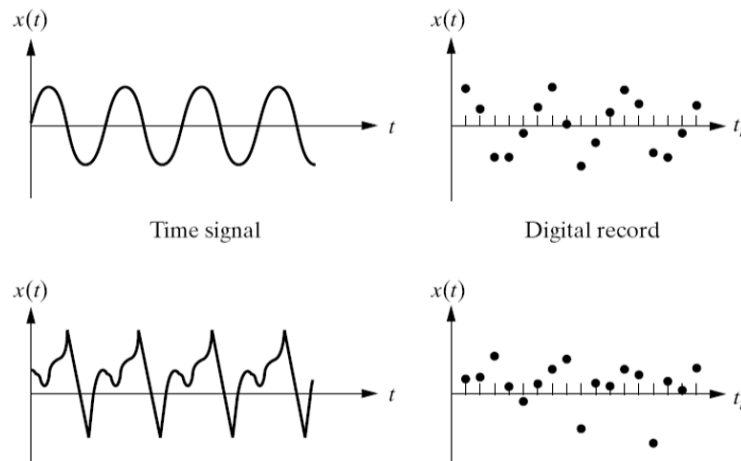


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างระบบการวัดการสั่นสะเทือน [19]

### 2.5.2 สัญญาณดิจิทัลของการสั่นสะเทือน

ในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเครื่องวัดสัญญาณจะทำการสุ่มวัดสัญญาณ โดยเวลาที่แต่ละจุดถูกสุ่มวัดจะห่างเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับช่วงเวลาในแต่ละจุดข้อมูลห่างกันนั้นสามารถคำนวณได้จากความถี่สุ่มสัญญาณ (sampling frequency) ดังสมการที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่ายิ่งใช้ความถี่สุ่มสัญญาณสูงขึ้นเท่าใดก็จะทำให้วัดสัญญาณได้ตรงกับลักษณะสัญญาณจริงมากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามหากใช้ความถี่สุ่มสัญญาณสูงมากเกินไปก็จะส่งผลต่อจำนวนจุดข้อมูลที่ต้อจจัดเก็บและดำเนินการต่อมากขึ้นเกินกว่าความจำเป็น ในทางกลับกันหากใช้จำนวนจุดความถี่สุ่มสัญญาณน้อยมากเกินไป อาจทำให้สัญญาณที่สร้างใหม่จากจุดข้อมูลที่สุ่มได้มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงควรกำหนดความถี่สุ่มสัญญาณให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถตรวจวัดสัญญาณได้แม่นยำและใกล้เคียงสัญญาณจริงมากที่สุด

$$t = \frac{1}{\text{sampling frequency}} \quad (2.3)$$



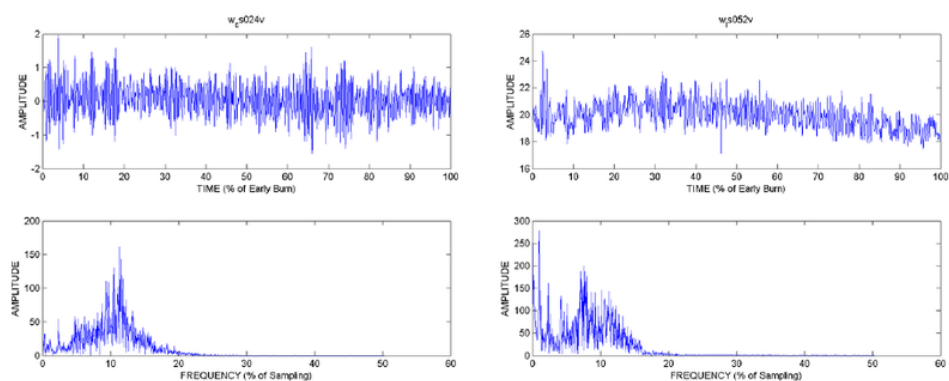
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการสุ่มวัดการสั่นสะเทือน [19]

### 2.5.3 การวิเคราะห์ฟูเรียร์

การวิเคราะห์สัญญาณพื้นฐานที่นิยมใช้กันมากคือ การเปลี่ยนสัญญาณในเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ ซึ่งมีหลักการคล้ายกับการเขียนสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันคาบให้เป็นผลรวมของฟังก์ชันไซน์ซายด์ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงฟูเรียร์ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.4)$$

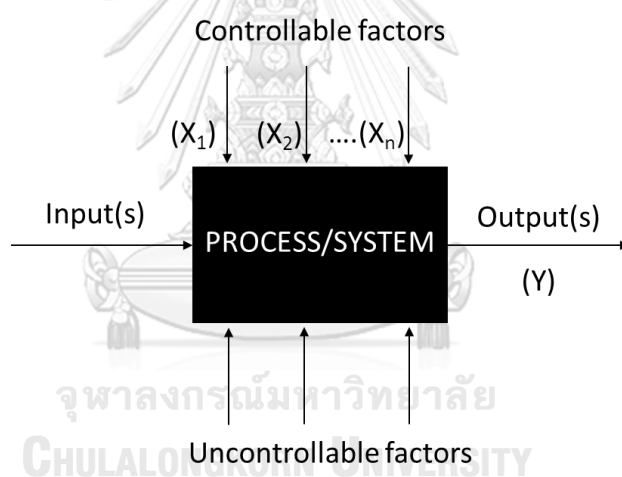
โดย  $X(\omega)$  คือสัญญาณในโดเมนความถี่ และ  $x(t)$  คือสัญญาณในโดเมนเวลา โดยตัวอย่างของการแปลงโดเมนแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อวัสดุได้รับแรงกระตุ้นเกิดการสั่นขึ้น ตัวรับสัญญาณจะตรวจจับสัญญาณได้ดังรูปทางด้านซ้ายซึ่งแสดงข้อมูลของสัญญาณในโดเมนเวลา และเมื่อผ่านการแปลงฟูเรียร์แล้วจะได้ข้อมูลของสัญญาณในโดเมนความถี่ (รูปด้านขวา) และสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ว่าวัตถุนั้นจะมีการสั่นและการเกิดเสียงที่ความถี่เท่าไรบ้าง



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ [22]

## 2.6 การออกแบบการทดลอง [23, 24]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการของการวางแผน ออกแบบ และการวิเคราะห์การทดลอง เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ถูกต้อง และตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา โดยนำวิธีการทางสถิติเข้ามาวิเคราะห์ ร่วมกับการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน และมีความน่าเชื่อถือ การออกแบบการทดลองของภาคอุตสาหกรรมจะประสบผลสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับการวางแผนที่ดี การเลือกการออกแบบที่เหมาะสม การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และทักษะการทำงานเป็นทีมของพนักงาน นอกจากนี้การเข้าใจถึงกระบวนการ หรือระบบที่จะทำการศึกษาก็จะช่วยให้สามารถวางแผน และกำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลองได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งกระบวนการเป็นการที่นำวัตถุดิบเข้า (input) เข้ากระบวนการแล้วถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นวัตถุดิบขาออก (output) หรือบางครั้งอาจเรียกว่าผลตอบ หรือตัวแปรตอบสนอง (response variable) ผ่านตัวแปรอิสระ (independent variable) ต่าง ๆ ในกระบวนการทั้งตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เช่น เวลาการอัดขึ้นรูป ความเร็วรอบของเครื่องผสม และชนิดของวัตถุดิบ เป็นต้น และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ เป็นต้น (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 รูปแบบของกระบวนการโดยทั่วไป [23]

### 2.6.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยพื้นฐานถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

I. การวางแผน เป็นขั้นตอนการกำหนดปัญหา หรือสิ่งที่ต้องการจากการทดลองให้ชัดเจน กำหนดผลตอบ หรือคุณสมบัติของวัตถุดิบขาออกที่ต้องการศึกษา เช่น ความกว้าง ความหนา และความหนืด เป็นต้น พร้อมทั้งกำหนดเครื่องมือ และวิธีการทดสอบผลตอบนั้น ๆ นอกจากนี้ระบบการตรวจสอบผลตอบควรมีความคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมได้ง่าย คัดเลือก จำแนกตัวแปรในกระบวนการว่า เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้หรือไม่ได้ และกำหนดระดับของตัวแปรที่จะศึกษา

II. การออกแบบ เป็นการเลือกใช้วิธีการออกแบบที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากวัตถุประสงค์ การทดลอง จำนวนตัวแปรในกระบวนการ และระดับของตัวแปรนั้น ๆ

III. การดำเนินการทดลอง เป็นการดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามแผนการดำเนินงาน ไม่ว่าจะ เป็นวิธีการดำเนินงาน วิธีการตรวจวัดผลตอบเพื่อให้ได้ข้อมูลผลการทดลอง

IV. การวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากดำเนินการทดลองทั้งหมดแล้ว ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมา วิเคราะห์เพื่อหาคำตอบ และข้อสรุปของวัตถุประสงค์ ว่าตัวแปรในกระบวนการส่งผลต่อผลตอบอย่างไร ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการเป็นเท่าไรเพื่อให้ได้ค่าผลตอบที่ดีที่สุด หรือมีเงื่อนไขอะไรบ้างที่จะ ทำให้สามารถพัฒนาต่อไปได้

### 2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง [25-27]

การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) เป็นการประมาณค่าจริงของผลตอบ ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$y = f(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k) + \varepsilon \quad (2.5)$$

เมื่อ  $y$  คือผลตอบที่วัดได้ เป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษา  $(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)$  และ  $\varepsilon$  คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลตอบ นอกจากนี้ค่าของตัวแปรอิสระจะถูกกำหนดเป็นรหัส (code) เพื่อ เปรียบเทียบผลกระทบภายในช่วงของการออกแบบ โดยสามารถคำนวณได้จากการนำค่าตัวแปรอิสระที่ทำการ ออกแบบไว้มาคำนวณด้วยสมการที่ 2.6

$$X_i = \frac{(\phi_i - \phi_{\min})}{\Delta\phi} - 1 \quad (2.6)$$

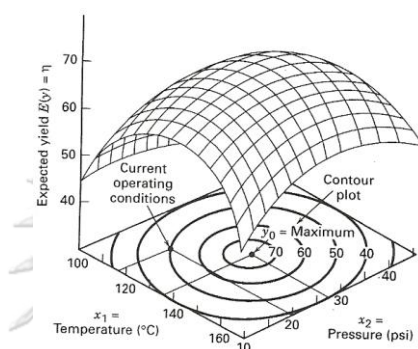
โดยที่  $X_i$  คือ รหัสของตัวแปร (coded value) ในขณะที่  $\phi_i$   $\phi_{\min}$  และ  $\Delta\phi$  คือ ค่าของตัวแปรอิสระที่ ออกแบบไว้ ค่าของตัวแปรอิสระที่น้อยที่สุด และผลต่างระหว่างค่าตัวแปรอิสระที่มากที่สุดกับตัวแปรอิสระที่ น้อยที่สุด ตามลำดับ

โดยส่วนมากปัญหาของการออกแบบด้วยวิธีนี้คือการไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและ ตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบที่แท้จริงและตัวแปรอิสระ จะนำสมการถดถอยกำลังสอง (quadratic regression equation) มาช่วยในการประมาณค่าผลตอบ (สมการที่ 2.7)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\beta_0$  คือค่าจุดตัดแกน  $y$  (intercept) โดยที่  $\beta_i$   $\beta_{ij}$  และ  $\beta_{ii}$  คือสัมประสิทธิ์ถดถอย  $X_i$  และ  $X_i^2$  คือรหัสของตัวแปร และ  $\epsilon$  คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลตอบ

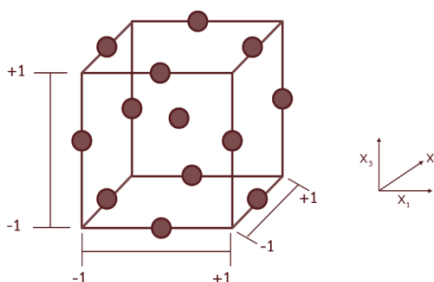
การแสดงผลของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ส่วนมากจะนำผลตอบ ( $y$ ) มาพล็อตกับระดับของตัวแปรอิสระ ( $X_1$  และ  $X_2$ ) เพื่อให้สามารถมองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังถูกนำมาพล็อตเส้นโครงร่าง (contour plot) ของพื้นผิวผลตอบ โดยเส้นที่มีค่าผลตอบคงที่จะถูกพล็อตอยู่ในระนาบ  $X_1$  และ  $X_2$  ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 พื้นผิวผลตอบสนอง และเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [25]

### 2.6.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [26, 28, 29]

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เป็นการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองชนิดหนึ่ง ที่ถูกสร้างโดยมีพื้นฐานมาจากการออกแบบการทดลองของปัจจัย 3 ระดับแบบแฟคทอเรียลไม่สมบูรณ์ (incomplete factorial design) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และพบว่าแต่ละจุดในบล็อก (ลูกบาศก์) มาจากการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  และไม่ได้รวมจุดยอดของลูกบาศก์ที่ถูกสร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรอิสระเอาไว้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในกรณีที่จุดตรงมุมลูกบาศก์เป็นการรวมระดับของปัจจัยที่ใช้ต้นทุนในการทดลองสูงหรือไม่สามารถที่จะทำการทดลองได้เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของกระบวนการ



รูปที่ 2.15 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ปัจจัย [30]

จำนวนการทดลองของการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน (N) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (2.8)$$

โดยที่  $k$  คือ จำนวนปัจจัย หรือจำนวนตัวแปรอิสระ

$C_0$  คือ จำนวนการทดลองที่จุดกึ่งกลางของลูกบาศก์ (central point)

ซึ่งในการงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย และมีจำนวนการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลางของลูกบาศก์ทั้งหมด 3 การทดลอง ดังนั้นจึงมีการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง และสามารถออกแบบได้ดัง

ตารางที่ 2.2 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มี 3 ปัจจัย

Run	Factor		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

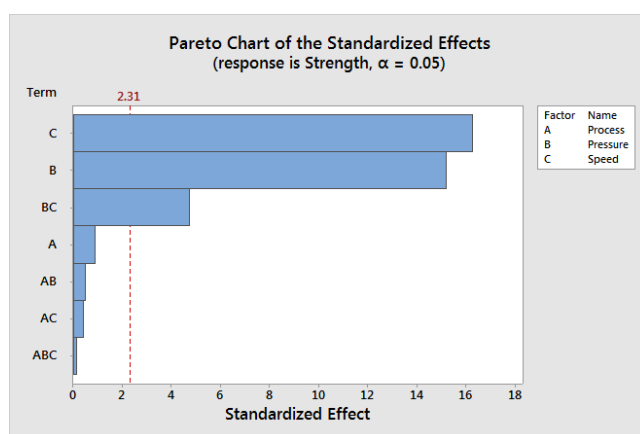
## 2.7 หลักการวิเคราะห์ผลทางสถิติ [27, 29, 31-33]

### 2.7.1 การวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโต

แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) เป็นแผนภูมิที่แสดงค่าผลกระทบมาตรฐาน (standardized effects) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ตั้งแต่ปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดไปจนถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบน้อย



ที่สุด โดยค่าผลกระทบมาตรฐานก็คือค่าสถิติ  $t$  (t-statistic) ที่เป็นค่าทดสอบสมมติฐานว่าปัจจัยที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อผลตอบหรือไม่ หากปัจจัยมีค่าสถิติ  $t$  มากกว่าค่าสถิติ  $t$  ของเส้นอ้างอิง (reference line) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในแผนภูมิพาเรโตจะแสดงเส้นอ้างอิงเป็นเส้นประสีแดงดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยค่าสถิติ  $t$  ของเส้นอ้างอิงสามารถวิเคราะห์ได้จากตารางสถิติ  $t$  (ภาคผนวก ค.) ด้วยค่าดีกรีอิสระของส่วนผิดพลาด ( $df_{error}$ ) และควอนไทล์  $(1-\alpha/2)$  เมื่อ  $\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ (significant levels)



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแผนภูมิพาเรโตที่แสดงเส้นอ้างอิง [31]

## 2.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ประกอบไปด้วยประชากรตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียว ทำให้การวิเคราะห์ผลมีประสิทธิภาพมากกว่าการทดสอบของประชากรทีละคู่ ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลตอบสนองและลักษณะทางคุณภาพ จะทำให้ทราบถึงผลลัพธ์ของกระบวนการหรือระบบ และสามารถแยกสาเหตุความแตกต่างของผลลัพธ์ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้ ดังนี้

I. **ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (explained variable)** หรือเรียกอีกชื่อว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (between group variation) เป็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากวิธีการปฏิบัติที่ถูกใช้ในการออกแบบการทดลอง

II. **ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation)** เป็นความแตกต่างที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากอาจจะยังไม่มีความรู้ หรือความรู้ที่มีเกี่ยวกับระบบนั้น ๆ ยังไม่มากพอ ในบางกรณีผู้ศึกษาอาจจะทราบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคืออะไร แต่ไม่สามารถควบคุมได้ขณะทำการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะบ่งบอกลักษณะความแตกต่างนี้ในรูปแบบของความผิดพลาด

หรือส่วนที่ไม่สามารถจะอธิบายได้ (error or residual) เมื่อผู้ทดลองมีความรู้และความสามารถในการควบคุมการทดลองเพิ่มมากขึ้น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก็จะลดลง

ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยทั่วไปจะแสดงผลในรูปแบบของตาราง ANOVA ซึ่งประกอบไปด้วยผลวิเคราะห์ข้อมูลส่วนต่าง ๆ ได้แก่

I. ข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ และความผิดพลาด (source of variation) เป็นตัวแปรอิสระ (ปัจจัย) การเกี่ยวข้องกันระหว่างปัจจัย รวมถึงความผิดพลาดหรือความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ ที่ใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าผลตอบสนอง

II. ดีกรีอิสระ (degree of freedom: DF) ค่าดีกรีอิสระของแบบจำลอง (model) คือจำนวนสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยทั้งหมด และค่าดีกรีอิสระของตัวแปรต่าง ๆ คือจำนวนสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของตัวแปรนั้น ๆ ส่วนค่าดีกรีอิสระของความผิดพลาดเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้ (สมการที่ 2.9)

$$DF_{\text{error}} = n - (k + 1) \quad (2.9)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด และ  $k$  คือ จำนวนพจน์ของปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด รวมถึงพจน์ของปัจจัยร่วม (interaction effect) และพจน์ของปัจจัยหลักกำลังสองด้วย

III. ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน (sum of square: SS) เป็นการหาค่าเบี่ยงเบนของข้อมูล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำค่ากำลังสองของผลต่างระหว่างข้อมูลในแต่ละการทดลองกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดมาบวกกัน ดังสมการที่ 2.10

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

โดยที่  $\bar{y}$  เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยข้อมูลจากตัวอย่าง

IV. ความแปรปรวน (mean square: MS) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความเบี่ยงเบนเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (2.11)$$

V. ค่าความแปรปรวนของข้อมูลเทียบกับความแปรปรวนของความผิดพลาด (F-value) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อค่าผลตอบสนอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 และจะสังเกตเห็นว่าหากตัวแปรอิสระใดมีค่า F-value สูง แสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นมีอิทธิพลที่จะทำให้ค่าผลตอบสนองมีความแปรปรวนมาก

$$F - \text{value} = \frac{MS}{MS_{\text{error}}} \quad (2.12)$$

นอกจากนี้ F-value ยังเป็นค่าที่สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยว่ามีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ โดยมีการตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_i = 0 \text{ ทุกพารามิเตอร์}$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 พารามิเตอร์}$$

ในการทดสอบสมมติฐานจะต้องมีการออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และอยู่ในระดับต่ำ โดยส่วนใหญ่นิยมกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ซึ่งในการทดสอบสมมติฐานนี้จะเป็นการพิจารณาค่า F-value หาก F-value มีค่ามากกว่า  $F_{0.05, DF(\text{model}), DF(\text{error})}$  จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และยอมรับสมมติฐานรอง ( $H_1$ )

**VI. ค่าความน่าจะเป็น (P-value)** เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานของข้อมูล เพื่อพิสูจน์ว่าข้อมูลชุดที่ศึกษาระดับนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยมีสมมติฐานคือ

$$H_0: \text{ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่สามารถใช้ทำนายตัวแปรตาม (ผลตอบสนอง) ได้}$$

$$H_1: \text{ตัวแปรอิสระบางตัวสามารถใช้ทำนายตัวแปรตาม (ผลตอบสนอง) ได้}$$

ในการทดสอบสมมติฐานหากค่าความน่าจะเป็นมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ จะทำการปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  และยอมรับสมมติฐาน  $H_1$  ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระที่ศึกษาสามารถใช้ทำนายตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญ

### 2.7.3 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง

I. **ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square:  $R^2$ )** เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความสามารถของสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำค่าผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของแบบจำลอง ( $SS_{\text{model}}$ ) เทียบกับค่าผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนรวม ( $SS_{\text{total}}$ ) ดังสมการที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากขึ้นเท่าใด ยิ่งบ่งบอกถึงความเหมาะสมของสมการถดถอยนั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีจำนวนข้อมูลมากขึ้น แต่การที่มีข้อมูลมากขึ้นอาจทำให้ความเหมาะสมของแบบจำลองลดลงได้ เนื่องจากอาจมีผลจากตัวแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้เข้ามาเกี่ยวข้องในแบบจำลองมากกว่าผลจากตัวแปรที่ต้องการศึกษา ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ( $R^2_{\text{adj}}$ ) มาพิจารณาแทน ซึ่งมีการนำค่าดีกรีอิสระของความผิดพลาดมาคำนวณด้วย ดังสมการที่ 2.14

$$R^2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_{\text{total}}} = 1 - \frac{SS_{\text{error}}}{SS_{\text{total}}} \quad (2.13)$$

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{SS_{\text{res}}/DF_{\text{error}}}{SS_{\text{total}}/DF_{\text{total}}} \quad (2.14)$$

II. การขาดความเหมาะสมของสมการ (lake-of-fit) ในการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการจะต้องดำเนินการพิจารณากรณีที่ต้องมีการเก็บข้อมูลซ้ำ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้มีค่าแตกต่างกัน ความเหมาะสมนั้นสามารถสรุปได้จากการเปรียบเทียบค่า P-value กับค่าระดับนัยสำคัญ หากมีค่า P-value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญจะสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยนั้นมีความเหมาะสมในการนำมาใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Ertan และ N. Yavuz [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน ต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $\mu$ ) และอัตราการสึกหรอของผ้าเบรก จากผลการศึกษาพบว่าแรงดันส่งผลกระทบบต่อความหนาแน่นของผ้าเบรกมากที่สุด แรงดันมากทำให้ห้องค้ประกอบในผ้าเบรกถูกบีบอัดและเรียงชิดกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มแรงดันทำให้ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน แต่หากใช้แรงดันที่ต่ำเกินไปจะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic deformation) หากใช้แรงดันสูงเกินไปผ้าเบรกจะมีความเป็นรูพรุนน้อย (รูพรุนจะเป็นสิ่งที่ขัดขวางการนำความร้อนในเนื้อผ้าเบรก) ทำให้เกิดการนำความร้อนในเนื้อวัสดุได้เร็วขึ้นขณะใช้งาน ซึ่งส่งผลให้การเบรกขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพลดลง

D. Aleksendric และ A. Senatore [4] ทำการศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตผ้าเบรกต่ออัตราการสึกหรอ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตที่ทำให้ได้ผ้าเบรกมีอัตราการสึกหรอน้อยที่สุด จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอ ได้แก่ แรงดัน อุณหภูมิ และเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน รวมถึงเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอบ แต่แรงดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนส่งผลต่ออัตราการสึกหรอมากที่สุด โดยเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น

Y. C. Kim และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) ต่อสมบัติของผ้าเบรก และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนน้อยลง เนื่องจากมีปริมาณเรซินที่สามารถไหลแทรกไปตามช่องว่างของเนื้อวัสดุในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณรูพรุนและช่องว่างระหว่างภายในเนื้อผ้าเบรกลดลง และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติพบว่าเมื่อปริมาณรูพรุนลดลง ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น ค่าสภาพอัดตัวได้จะลดลง และส่งผลให้มีแนวโน้มในการสั่นและการเกิดเสียงจากการเบรกมากขึ้น

M. Makrahy และคณะ [9] ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และแนวโน้มการเกิดการสั่นของผ้าเบรกจำนวน 3 ยี่ห้อ โดยทำการทดสอบการสั่นด้วยเครื่องไดนามอมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งเป็นการจำลองการเบรกตามการใช้งานจริง จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อผ้าเบรกมีสภาพอัดตัวได้สูงขึ้น แนวโน้มการสั่นลดลงในทุกการทดสอบ ในทางกลับกันถ้าผ้าเบรกมีสภาพอัดตัวได้ลดลง แนวโน้มการสั่นสูงขึ้นในทุกการทดสอบเช่นกัน เนื่องจากว่าผ้าเบรกที่มีสภาพอัดตัวน้อยมีความแข็งของวัสดุ

สูงกว่าทำให้เมื่อนำไปทดสอบการเบรกเกิดการสั้นในช่วงความถี่ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงสรุปว่าสภาพอัดตัวได้ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มการสั้นของเบรก

A.P. Rusdja และคณะ [8] ทำการศึกษาผลของการปล่อยแก๊สในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ เวลาอดักระหว่างช่วงการปล่อยแก๊ส จำนวนครั้งที่ปล่อยแก๊ส และเวลาอดัต่อเนื่อง ต่อค่าความต้านทานต่อการโค้งงอ (flexural strength) ของผ้าเบรก จากการศึกษาพบว่า การปล่อยแก๊สในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนส่งผลต่อการเกิดรูพรุน และการหลุดออกของเส้นใย (fiber pull-out) หากใช้เวลาอดัต่อเนื่องมากเกินไปและมีการปล่อยแก๊สออกจากระบบน้อย แก๊สแอมโมเนียและไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่งกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะค้างอยู่ในเนื้อผ้าเบรก เกิดรูพรุนทำให้เกิดการหลุดออกของเส้นใยมากขึ้น และเป็นผลให้ผ้าเบรกมีค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอน้อยลง

J. Abutu และคณะ [35] ทำการศึกษาผลของเวลาการอัด อุณหภูมิ และแรงดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และเวลาในกระบวนการอบ ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการขัดถู (สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ) ของผ้าเบรกที่ใช้เปลือกหอยเป็นสารเสริมความแข็งแรง จากการศึกษาพบว่า เวลาการอัดในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนส่งผลต่อสมบัติเชิงกลน้อยที่สุด แต่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอมากที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาอัดลดลง แรงดัน และอุณหภูมิในการอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันน้อยลง อุณหภูมิและเวลาในการอัดเพิ่มขึ้น

P. Cai และคณะ [36] นำเรซิน 2 ชนิดมาผสมตามอัตราส่วนต่าง ๆ และใช้เป็นสารยึดติดในผ้าเบรก แล้วศึกษาผลทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการขัดถูของผ้าเบรก พบว่าผ้าเบรกที่มีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซินมากกว่าจะเป็นผ้าเบรกที่มีความสามารถในการทนความร้อนได้มากกว่า ใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการสลายตัว จะมีความเปราะมากกว่า ซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกมีความเสถียรมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเบรกเพิ่มขึ้น และมีอัตราการสึกหรอมากขึ้น แต่ความสามารถในการทนความร้อนก็ไม่ได้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการสึกหรอเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกด้วย จากผลการศึกษาพบว่าผ้าเบรกที่มีปริมาณรูพรุนสูงจะมีค่าความแข็ง โมดูลัส และความแข็งแรงต่อการโค้งงอต่ำ ส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอมาก

S.J. Kim และคณะ [37] ทำการศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ เวลาในการอัด แรงดัน และอุณหภูมิการอัด และตัวแปรในกระบวนการอบ ได้แก่ อุณหภูมิการอบ และเวลาในการอบ เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้ผ้าเบรกมีอัตราการสึกหรอน้อย และมีความเสถียรของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมาก จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณรูพรุนในเนื้อผ้าเบรกขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดมากที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อการไหลของเรซิน ในขณะที่ค่าความแข็งขึ้นกับแรงดันมากที่สุด รองลงมาเป็นเวลาในการอัด ปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นส่งผลให้ผ้าเบรคนั้นมีค่าความแข็งน้อยลง ส่วนสมบัติด้านการขัดถูจะขึ้นกับอุณหภูมิในการอบมากที่สุด แต่ยังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ และสมบัติด้านการขัดถูของผ้าเบรกได้อย่างชัดเจน

S.J. Lee และคณะ [38] ทำการปรับค่าสภาพอดตัวได้ของผ้าเบรกจากการปรับความหนาของผ้าเบรกชั้นใน (underlayer) โดยใช้ภาวะในการอัดขึ้นรูปเหมือนกันทุกชั้น พบว่าเมื่อปรับความหนาของผ้าเบรกชั้นในให้หนาขึ้น ทำให้ผ้าเบรกมีค่าสภาพอดตัวได้มากขึ้น ความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นต่าง ๆ ลดลง และส่งผลให้มีค่าการหน่วง (damping) มากขึ้น เนื่องจากผ้าเบรกที่มีค่าสภาพอดตัวได้มากเป็นผ้าเบรกที่มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งน้อยกว่า

U.S. Hong และคณะ [7] ทำการศึกษาผลของชนิดเรซินต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอ พบว่าเรซินชนิดที่มีสมบัติการทนความร้อนได้ดีกว่า (ใช้อุณหภูมิสูงในการสลายตัว) ทำให้ผ้าเบรกมีความเสถียรของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากขึ้น และทำให้มีอัตราการสึกหรอน้อยลงเมื่อผ่านการเบรกในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

จากงานวิจัยที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าในตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอ รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรก ทั้งความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและสภาพอดตัวได้ และความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอดตัวได้และการสั่นหรือความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก เพื่อลดแนวโน้มหรือโอกาสในการเกิดเสียงขณะใช้งานเบรกได้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วิธีการและแผนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทดสอบช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาของพีนอลิกเรซินด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter: DSC)
3. ออกแบบการทดลอง เตรียมอุปกรณ์และวัสดุเคมีที่ใช้สำหรับการทดลอง
4. จัดเตรียมผ้าเบรกตามกระบวนการผลิตของโรงงาน ได้แก่ กระบวนการผสมเคมี อัดขึ้นรูปเย็น อัดขึ้นรูปร้อน การอบ และการฝนตกแต่ง โดยทำการปรับค่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่
  - 4.1 ปรับอุณหภูมิการอัด 135 150 และ 165 องศาเซลเซียส
  - 4.2 ปรับแรงดันในช่วง 100 200 และ 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - 4.3 ปรับเวลาการอัด 2 4 และ 6 นาที
5. ทดสอบสมบัติ และประสิทธิภาพของผ้าเบรก
  - 5.1 สมบัติทางกายภาพของผ้าเบรก ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ความเป็นรูพรุน และความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของผ้าเบรก
  - 5.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของผ้าเบรก ได้แก่ โมดูลัส ความแข็ง และสภาพอัดตัวได้
  - 5.3 ทดสอบประสิทธิภาพของผ้าเบรก ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) และอัตราการสึกหรอ
  - 5.4 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุผ้าเบรกโดยอาศัยสมบัติเชิงความร้อน
6. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล
7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนและความเป็นรูพรุน ด้วยวิธีการทางสถิติ
8. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีความเป็นรูพรุนต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
9. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของผ้าเบรกพร้อมกับสมบัติต่าง ๆ เพื่อกำหนดปริมาณความเป็นรูพรุนที่ทำให้ผ้าเบรกมีค่าความถี่ธรรมชาติห่างจากความถี่ธรรมชาติของจานเบรกมากที่สุด ในขณะที่ประสิทธิภาพยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
10. นำค่าปริมาณความเป็นรูพรุนที่กำหนดจากข้อที่ 9 มาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาค่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพิมพ์ร้อน

### 3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้เป็นองค์ประกอบของผ้าเบรกเพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก ได้แก่ เส้นใย สารเติมเต็ม ผงโลหะ สารขัดถู สารหล่อลื่น สารยึดหยุ่น และสารยึดติด ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีปริมาณที่ใช้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของผ้าเบรกที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก

ประเภทสารเคมี	ร้อยละของปริมาณที่ใช้ (wt%)
เส้นใย (fiber)	9.00
สารเติมเต็ม (filler)	50.10
ผงโลหะ (metal)	4.50
สารขัดถู (abrasive)	10.70
สารหล่อลื่น (lubricant)	17.50
สารยึดหยุ่น (elastomer)	2.70
สารยึดติด (binder)	5.50

### 3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟีนอลิกเรซิน

นำฟีนอลิกเรซินที่ใช้เป็นสารยึดติดในผ้าเบรกประมาณ 10 มิลลิกรัม มาทำการอัดใส่จานอะลูมิเนียม (aluminum sample pan) แล้วนำเข้าเครื่องดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.1) เครื่องจะทำการให้ความร้อนตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ในภาวะอากาศ ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 11357-5: 2013 (E) เป็นทดสอบการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนของสารเทียบกับสารอ้างอิง เพื่อหาอุณหภูมิที่ฟีนอลิกเรซินเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเพื่อเชื่อมโยงโมเลกุล (temperature of onset reaction,  $T_{i,r}$ ) และอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนมากที่สุด (temperature of maximum reaction rate,  $T_{p,r}$ ) โดยเป็นการทดสอบแบบ Power compensation calorimetry ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่มีการแยกแหล่งให้ความร้อนและเซ็นเซอร์ของสารตัวอย่างและสารอ้างอิง แต่มีอัตราการให้ความร้อนที่เท่ากัน เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนระบบจะพยายามชดเชยพลังงานเข้าไปเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุตัวอย่างและวัสดุอ้างอิงเท่ากัน และเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดในโปรแกรมไว้ โดยพลังงานที่ชดเชยให้กับวัสดุทั้งสองจะเท่ากับพลังงานที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป [39] จากการทดสอบนี้จะทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่ฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างโมเลกุล เพื่อนำช่วงอุณหภูมินี้มาใช้ในการกำหนดอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อไป





รูปที่ 3.1 เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) [40]

### 3.4 การออกแบบการทดลอง

กำหนดตัวแปร และช่วงของตัวแปรที่จะศึกษาในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ อุณหภูมิการอัดที่ 135 150 และ 165 องศาเซลเซียส แรงดันที่ 100 200 และ 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเวลาอัดที่ 2 4 และ 6 นาที ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซิน (จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1) แรงดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนสามารถใช้ได้สูงสุดที่ 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนไม่ควรต่ำกว่า 100 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เนื่องจากควรมีแรงดันที่สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น (แรงดัน 94 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) จึงกำหนดการทดลองที่แรงดัน 100 ถึง 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนเวลาในการอัดกำหนดจากเวลาในการอัดของผ้าเบรกส่วนใหญ่ในบริษัทอยู่ที่ประมาณ 4 นาที และจากข้อมูลของบริษัทพบว่าไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ที่เวลาต่ำกว่า 2 นาที จึงกำหนดเวลาในการอัดขึ้นรูปที่ 2 ถึง 6 นาที จากนั้นนำค่าตัวแปรมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินผิวตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการศึกษาปัจจัย หรือตัวแปรอิสระ (independent variables) 3 ตัวแปร โดยแต่ละตัวแปรค่าต่างกัน 3 ระดับ และควรจะเป็นค่าขีดจำกัดของตัวแปรนั้น ๆ เนื่องจากในการออกแบบนี้เป็นการกำหนดค่าที่ขอบของขอบเขตการทดลอง (รูปที่ 2.15) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษา หรือตัวแปรตอบสนอง ที่ยังไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในงานวิจัยนี้คือค่าสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก ผ่านการสร้างแบบจำลองพหุนามกำลังสอง (quadratic polynomial model) ในการหาค่าของตัวแปรตอบสนอง และการวิเคราะห์ผ่านกราฟคอนทัวร์ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปร และอิทธิพลของตัวแปรอิสระร่วม 2 ตัวแปร ต่อค่าตัวแปรตอบสนอง [26, 30] โดยการออกแบบนี้สามารถลดจำนวนการทดลองได้จากปกติที่มีทั้งหมด 27 การทดลอง ให้เหลือ 15 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษา

ปัจจัย หรือตัวแปรอิสระ	ระดับปัจจัย		
	-1	0	+1
X <sub>1</sub> : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	135	150	165
X <sub>2</sub> : แรงดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	100	200	300
X <sub>3</sub> : เวลาอัด (นาที)	2	4	6

ตารางที่ 3.3 ภาวะการทดลอง 3 ปัจจัย ที่ออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

การทดลองที่	Coded levels			Actual levels		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	0	135	100	4
2	1	-1	0	165	100	4
3	-1	1	0	135	300	4
4	1	1	0	165	300	4
5	-1	0	-1	135	200	2
6	1	0	-1	165	200	2
7	-1	0	1	135	200	6
8	1	0	1	165	200	6
9	0	-1	-1	150	100	2
10	0	1	-1	150	300	2
11	0	-1	1	150	100	6
12	0	1	1	150	300	6
13	0	0	0	150	200	4
14	0	0	0	150	200	4
15	0	0	0	150	200	4

### 3.5 การเตรียมผ้าเบรกทดสอบ

#### 3.5.1 การผสมวัตถุดิบเคมี

นำเส้นใย ผงโลหะ และสารยึดติด มาผสมเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องผสมเคมีที่ความเร็วใบกวน 6000 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำส่วนผสมที่เหลือ ได้แก่ สารเติมเต็ม สารขัดถู สารหล่อลื่น และสารยึดหยุ่น เติมเข้าไปเพื่อทำการผสม โดยใช้ความเร็วใบกวน 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที และได้วัตถุดิบผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องผสมวัตถุดิบ และ (ข) วัตถุดิบผสม

### 3.5.2 การอัดขึ้นรูปเย็น

นำวัตถุดิบที่ผ่านการผสมแล้วมาตักแยกเพื่อชั่งน้ำหนัก แล้วทำการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 94 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยให้แต่ละชิ้นมีน้ำหนักเท่ากับ  $170 \pm 3$  กรัม และได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.3



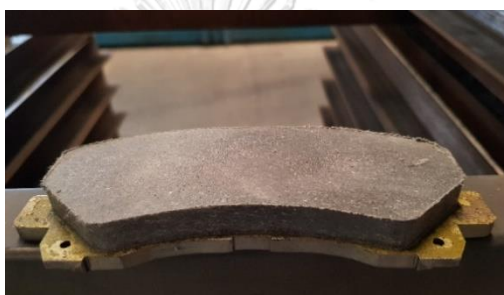
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานผ้าเบรกหลังการอัดขึ้นรูปเย็น

### 3.5.3 การอัดขึ้นรูปร้อน

นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเย็น มาทำการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ฟิสิกส์เรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของโมเลกุล และยึดองค์ประกอบอื่น ๆ เข้าไว้เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ทำให้กาวที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นเหล็กหลอมละลาย และยึดแผ่นเหล็กให้ติดกับวัตถุดิบผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 โดยทำการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัดต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3.3 ในข้อ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 3.5 ผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

#### 3.5.4 การอบ (การป่ม)

นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนแล้ว มาทำการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตู้อบผ้าเบรก

### 3.5.5 การฝนตกแต่ง

นำผ้าเบรกที่ผ่านการอบ มาทำการฝนหน้าผ้าเบรกเพื่อให้พื้นผิวบริเวณหน้าผ้าเบรกมีความเรียบเสมอกันตลอดทั้งชิ้น ตกแต่งบริเวณขอบของผ้าเบรกให้เรียบมากขึ้น เพื่อให้ให้ผ้าเบรกมีความหนาตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 เครื่องฝนหน้าผ้าเบรก



รูปที่ 3.8 ผิวหน้าผ้าเบรกหลังผ่านการฝน

## 3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรก

### 3.6.1 ความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบความถ่วงจำเพาะเป็นการทดสอบโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) ซึ่งทำได้โดยนำผ้าเบรกที่ไม่ได้ทำการติดแผ่นเหล็ก และผ่านการอบผ่านการอบมาแล้ว มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทั้งการชั่งน้ำหนักในอากาศ และการชั่งน้ำหนักขณะถ่วงผ้าเบรกลงในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และนำค่าน้ำหนักมาคำนวณผ่านสมการที่ 3.1 ตามมาตรฐานการทดสอบความถ่วงจำเพาะ JIS D4417 (1986) ซึ่งเรียกค่าความถ่วงจำเพาะนี้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะทดลอง (experimental specific gravity: S.G.<sub>E</sub>)

$$S. G. E = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.1)$$

โดยที่  $m_1$  คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (กรัม)  
 $m_2$  คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)



รูปที่ 3.9 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

### 3.6.2 ความเป็นรูพรุน

ร้อยละของปริมาณรูพรุนในผ้าเบรกสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความถ่วงจำเพาะทดลองที่ได้จากข้อ 3.6.1 มาคำนวณเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะทฤษฎี (theoretical specific gravity:  $S.G. T$ ) ของผ้าเบรก โดยความถ่วงจำเพาะทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 (สูตรที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับ 2.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) จากนั้นนำค่าความถ่วงจำเพาะทฤษฎีและความถ่วงจำเพาะปรากฏมาคำนวณผ่านสมการที่ 3.3 เพื่อหาปริมาณรูพรุนหรือช่องว่างในผ้าเบรก ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2734 [41]

$$S. G. T = \frac{100}{\frac{w_b}{S.G.b} + \frac{w_{fb}}{S.G.fb} + \frac{w_{fl}}{S.G.fl} + \frac{w_m}{S.G.m} + \frac{w_a}{S.G.a} + \frac{w_l}{S.G.l} + \frac{w_e}{S.G.e}} \quad (3.2)$$

โดยที่  $w_b, w_{fb}, w_{fl}, w_m, w_a, w_l, w_e$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของสารยึดติด เส้นใย สารเติมเต็ม ผงโลหะ สารขัดถู สารหล่อลื่น และสารให้ความยืดหยุ่น ตามลำดับ

$S. G. b, S. G. fb, S. G. fl, S. G. m, S. G. a, S. G. l, S. G. e$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของสารยึดติด เส้นใย สารเติมเต็ม ผงโลหะ สารขัดถู สารหล่อลื่น และสารให้ความยืดหยุ่น ตามลำดับ

$$\%porosity = \left(1 - \frac{S.G.E}{S.G.T}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.6.3 ความถี่ธรรมชาติ

การทดสอบความถี่ธรรมชาติ หรือการสั่นสะเทือนของวัสดุผ้าเบรกสามารถวิเคราะห์ได้โดยการนำอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง ติดบนผ้าเบรกด้านแผ่นเหล็ก และใช้ค้อนเคาะเบา ๆ ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนผ้าเบรกเพื่อกระตุ้นให้วัสดุเกิดการสั่น และเนื่องจากความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการสั่น (mode shape) หนึ่งของผ้าเบรก [42] ดังนั้นตำแหน่งการเคาะ และการติดอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ต่างกันส่งผลให้มีค่าความถี่ธรรมชาติแตกต่างกัน ในการทดสอบใช้มาตรฐานการทดสอบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก SAE J2598 เป็นแนวทางในการหาตำแหน่งการติดอุปกรณ์และการเคาะ ซึ่งมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่ง และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งการเคาะ โดยจะศึกษาความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกที่เกิดขึ้น 3 ความถี่แรก (รูปแบบการสั่นที่ 1-3) หลังจากทำการเคาะผ้าเบรกความเร่งของการสั่นที่เวลาต่าง ๆ จะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง ก่อนถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลเสียง และการสั่นสะเทือน (model LINK 3802S Compact Data Acquisition system) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เพื่อทำการแปลงค่าของข้อมูลด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) และแสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ออกมาในรูปของกราฟที่แสดงความเร่ง ณ ความถี่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง และการเคาะของ (ก) ความถี่ที่ 1 และ 4 และ (ข) ความถี่ที่ 2 และ 3



รูปที่ 3.11 เครื่องบันทึกข้อมูลเสียง และการสิ้นสะท้อน

### 3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.7.1 มอดุลัส

นำชิ้นงานผ้าเบรกที่ผ่านการฝนหน้าผ้าเบรกแล้วมาทดสอบไดนามิกมอดุลัส (dynamic modulus) โดยวิธีการส่งคลื่นอัลตราโซนิกไปยังผ้าเบรก พร้อมทั้งตรวจวัดความเร็วเฟสของคลื่นที่ส่งไป และคำนวณค่าไดนามิกมอดุลัสด้วยเครื่อง iETEK ultrasonic measurement (รูปที่ 3.12) ในการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่ามอดุลัส 5 ตำแหน่งบนผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 iETEK ultrasonic measurement



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการทดสอบมอดุลัสบนผ้าเบรก



### 3.7.2 ความแข็ง

นำชิ้นงานผ้าเบรกที่ผ่านการฝนหน้าผ้าเบรกแล้วมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness tester) โดยทำการทดสอบความแข็ง 5 ตำแหน่งบนหน้าผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ในสเกล S (หน่วย HRS) ด้วยหัวกดเหล็กทรงกลม (steel ball) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ที่แรงกดมาตรฐาน (standard load) 98.07 นิวตัน และแรงกดทดสอบ (test load) 980.7 นิวตัน ตามมาตรฐาน JIS D4421 (1996)



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์

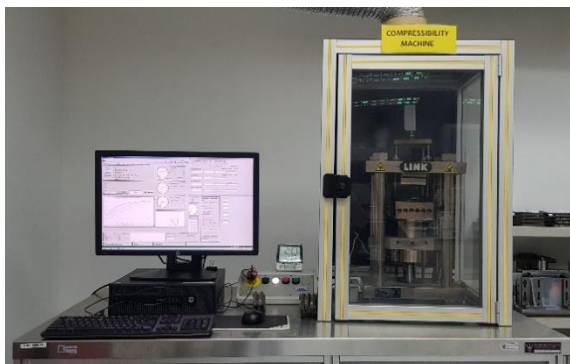


รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งบนผ้าเบรก

### 3.7.3 สภาพอัดตัวได้

สภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความหนา หรือระยะยุบตัวของผ้าเบรกเมื่อให้แรงดันหนึ่งตลอดทั้งพื้นผิวผ้าเบรก ซึ่งระยะยุบตัวสามารถบอกได้ถึงความยืดหยุ่นของวัสดุผ้าเบรก ผ้าเบรกที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า จะสามารถคืนตัวกลับมาเหมือนเดิมได้ทำให้ความหนาหลังได้รับแรงดันมีค่าใกล้เคียงกับความหนาเริ่มต้นมากกว่า [43] ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสภาพอัดตัวได้ด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดันของผ้าเบรก (compressibility machine LINK 1620-H) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยทำการอัดด้วยลูกสูบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและด้านนอก 46.5 และ 58.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ให้แรงดันเริ่มต้นที่ 0.5 เมกะปาสคาล และเพิ่มแรงดันด้วยอัตรา 8 เมกะปาสคาลต่อวินาที จนถึงค่าแรงดัน 16 เมกะปาสคาล แล้วทำการลดแรงดันลงให้เท่ากับค่าเริ่มต้น และทำการเพิ่ม-ลดแรงดันเป็น

จำนวนทั้งหมด 3 รอบ ซึ่งค่าสภาพอดตัวได้ของรอบสุดท้ายจะเป็นค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์ผล ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 6310 (2009)



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสภาพอดตัวได้

### 3.8 ประสิทธิภาพของผ้าเบรก

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอของผ้าเบรกถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (constant speed friction machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยนำชิ้นงานผ้าเบรกที่ต้องการทดสอบไปตัดให้มีขนาด กว้าง x ยาว xหนา เท่ากับ 25 มิลลิเมตร x 25 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวางบนจานเบรกที่เป็นเหล็กหล่อเทา (gray cast iron FC250) ซึ่งถูกกดด้วยแรงดัน 1 เมกะปาสคาล ตัววัดอุณหภูมิจะถูกวางอยู่ห่างจากพื้นผิวผ้าเบรกเป็นระยะ 50-100 มิลลิเมตร จากนั้นเริ่มทำการทดสอบโดยกำหนดให้จานเบรกหมุน 5000 รอบ ด้วยอัตราเร็ว 6-8 เมตร/วินาที ที่อุณหภูมิ 100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส และปรับลดอุณหภูมิลงจาก 300 250 200 150 และ 100 องศาเซลเซียส เครื่องจะทำการบันทึกค่าแรงเสียดทานทุก ๆ 250 ถึง 500 รอบ และนำชิ้นงานไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบในทุกช่วงอุณหภูมิ ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D4411 (1993) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณในสมการที่ 3.4 และ 3.5 เพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอตามลำดับ

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

โดยที่  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  
 $f$  คือ แรงเสียดทานเฉลี่ยในช่วงหลังที่อุณหภูมิคงที่ (นิวตัน)  
 $F$  คือ แรงทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นงาน (นิวตัน) ซึ่งเท่ากับ แรงกดชิ้นงาน  $\times$  พื้นที่ชิ้นงาน

$$V = 1.06 \times \frac{1}{n} \times \frac{W_1 - W_2}{f_m \rho} \quad (3.5)$$

โดยที่	V	คือ	อัตราการสึกหรือ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/นิวตันเมตร)
	n	คือ	จำนวนครั้งการหมุนของจานเบรกระหว่างช่วงทดสอบอัตราการสึกหรือ
	W <sub>1</sub>	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)
	W <sub>2</sub>	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ (กรัม)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

### 3.9 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ความเป็นรูพรุนที่ต่างกันในแต่ละภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-6480LV (รูปที่ 3.18) ซึ่งในการวิเคราะห์ต้องทำการเตรียมชิ้นงานผ้าเบรกโดยการตัดผ้าเบรกให้มีขนาด 8 มิลลิเมตร x 8 มิลลิเมตร x 8 มิลลิเมตร แล้วทำการขัดหน้าผ้าเบรกที่ต้องการส่องกล้องด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบ 3 ระดับ ได้แก่ กระดาษทรายเบอร์ 120 320 และ 1000 เรียงจากความหยาบที่สุดไปถึงความละเอียดที่สุดตามลำดับ จากนั้นนำไปวางบนแท่นวางชิ้นงานพร้อมติดเทปคาร์บอน (รูปที่ 3.19) แล้วนำเข้าเครื่อง อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จะถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อควบคุมขนาดของลำอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) และเมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของธาตุในวัสดุ เกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ออกมา [44] ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของพื้นผิวผ้าเบรกที่มีปริมาณรูพรุนต่างกันได้



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-6480LV [45]



รูปที่ 3.19 ลักษณะผ้าเบรกที่เตรียมทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

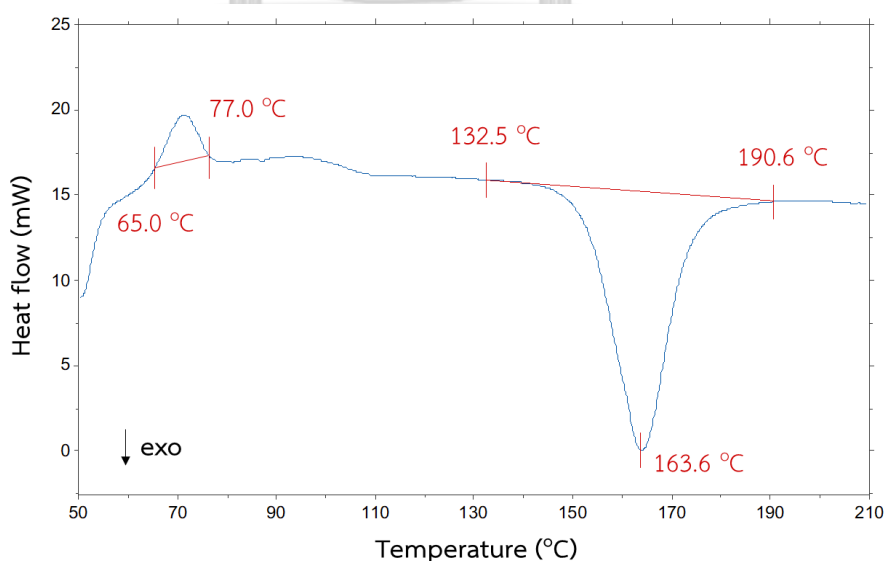
นำข้อมูลของการออกแบบการทดลองทั้ง 15 การทดลอง และผลของค่าสภาพอัดตัวได้ในแต่ละการทดลอง มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติในฟังก์ชันของการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (response surface design) แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อศึกษาว่ามีตัวแปรใดในกระบวนการพิมพ์ร้อนที่ส่งผลกระทบต่อค่าสภาพอัดตัวได้ และทราบว่าตัวแปรใดส่งผลมาก หรือน้อยกว่ากัน จากนั้นทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อหาสมการพหุนามกำลังสองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ร้อนกับค่าสภาพอัดตัวได้ แล้วทำการเทียบค่าสภาพอัดตัวได้ที่ได้จากการทดลองจริง กับค่าที่ได้จากการคำนวณผ่านสมการเพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำในการทำนายผลของสมการที่ได้ และสุดท้ายคือการวิเคราะห์แผนภาพพื้นผิวแบบ 2 มิติ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการ 2 ตัวแปร กับค่าสภาพอัดตัวได้ และกำหนดค่าสภาพอัดตัวได้ที่เหมาะสมเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่เหมาะสมที่สุด [26, 30]

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

วัสดุผ้าเบรกเป็นวัสดุผสม (composite materials) ที่ประกอบไปด้วยวัสดุมากกว่า 15 ชนิด และทุกองค์ประกอบสามารถยึดติดกันด้วยฟีนอลิกเรซินเพียงอย่างเดียว โดยเรซินจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโองโมเลกุลเมื่อมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาและมีความสามารถในการยึดติดได้ [5] ดังนั้นก่อนการกำหนดอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจึงจำเป็นต้องศึกษาช่วงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซินก่อน จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 65-77 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการระเหยของฟีนอล ฟอรั่มลดีไฮด์ และความชื้นในฟีนอลิกเรซิน [6] และในช่วงอุณหภูมิ 132.50-190.62 องศาเซลเซียส เรซินเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเพื่อสร้างพันธะเชื่อมโองระหว่างโมเลกุล และอุณหภูมิที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด คือ 163.62 องศาเซลเซียส แต่การให้อุณหภูมิที่สูงเกินไปตั้งแต่แรกของการอัดขึ้นรูปร้อนจะทำให้ผ้าเบรกเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและเกิดการแข็งตัวบริเวณหน้าผ้าเบรกก่อนบริเวณอื่น ๆ ทำให้ไปขัดขวางการระบายแก๊สออกจากผ้าเบรกเมื่อเรซินบริเวณด้านในผ้าเบรกเกิดปฏิกิริยา [46] ดังนั้นอุณหภูมิในการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนจึงกำหนดตั้งแต่ช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาไปจนถึงช่วงที่เกิดปฏิกิริยามากที่สุด ได้แก่ 135 150 และ 165 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลิกเรซิน

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติของผ้าเบรก

จากการทดลองอัดขึ้นรูปผ้าเบรกทั้งหมด 15 ภาวะ ตามที่ออกแบบด้วยวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน และทดสอบสภาพอัดตัวได้ มอดุลัส ความแข็ง ความเป็นรูพรุน และความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกได้ผลดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยผลของสมบัติทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ ผลกระทบจากตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน สมการถดถอย และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าควรเลือกใช้แบบจำลองของสมบัติใดที่จะทำให้มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการทางสถิติเหล่านี้เป็นอีกหนึ่งวิธีการวิเคราะห์ที่ช่วยให้ทราบว่าแต่ละตัวแปรส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรกอย่างไรบ้าง นอกจากนี้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับตัวแปรในกระบวนการยังสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการทดลองอัดขึ้นรูปเพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบสมบัติสภาพอัดตัวได้ มอดุลัส ความแข็ง และความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก

Run	Parameter			Compressibility (%)	Modulus (GPa)	Hardness (HRS)	Porosity (%)
	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> )	t (min)				
1	135	100	4	1.37±0.07	0.90±0.02	32.6±1.8	22.7±0.4
2	165	100	4	0.87±0.04	1.22±0.03	47.5±1.9	19.7±0.1
3	135	300	4	1.61±0.08	1.00±0.03	39.6±3.5	17.1±0.7
4	165	300	4	1.40±0.09	1.16±0.04	51.3±2.9	13.7±0.2
5	135	200	2	2.66±0.36	0.62±0.14	21.2±4.7	23.3±2.9
6	165	200	2	1.55±0.15	1.02±0.06	46.0±4.1	16.8±0.4
7	135	200	6	1.09±0.04	1.20±0.02	54.2±1.3	16.8±0.5
8	165	200	6	1.04±0.05	1.31±0.03	57.9±1.3	14.7±0.5
9	150	100	2	1.45±0.12	0.89±0.03	38.5±1.7	21.5±0.2
10	150	300	2	1.89±0.08	0.96±0.03	43.8±1.8	16.2±0.1
11	150	100	6	0.86±0.01	1.23±0.02	50.7±1.5	19.3±0.1
12	150	300	6	1.26±0.12	1.18±0.07	54.9±2.3	14.0±0.3
13	150	200	4	1.22±0.05	1.17±0.02	54.1±3.7	15.9±0.3
14	150	200	4	1.14±0.04	1.18±0.02	55.1±1.5	16.0±0.1
15	150	200	4	1.20±0.08	1.17±0.05	54.2±1.5	15.7±0.4

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก

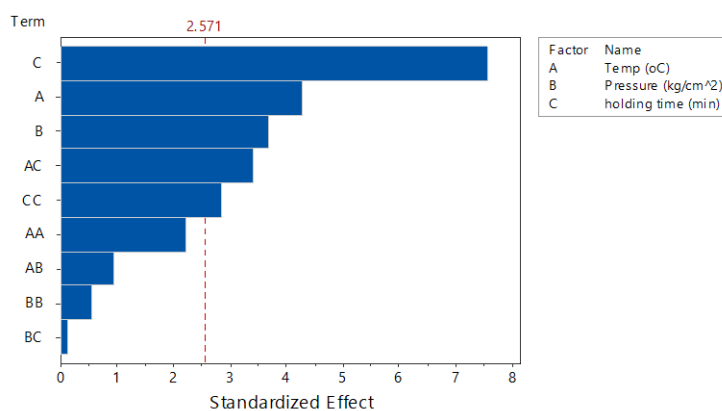
Run	Parameter			Natural Frequency(kHz)			
	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> )	t (min)	mode1	mode2	mode3	mode4
1	135	100	4	2.36±0.01	3.56±0.01	4.67±0.03	5.92±0.03
2	165	100	4	2.48±0.04	3.68±0.07	4.89±0.06	6.07±0.10
3	135	300	4	2.57±0.03	3.77±0.04	5.00±0.04	6.19±0.05
4	165	300	4	2.62±0.01	3.80±0.02	5.09±0.04	6.22±0.04
5	135	200	2	2.28±0.12	3.45±0.15	4.51±0.20	5.79±0.15
6	165	200	2	2.48±0.06	3.71±0.07	4.91±0.12	6.05±0.09
7	135	200	6	2.58±0.01	3.80±0.04	5.06±0.04	6.23±0.05
8	165	200	6	2.65±0.02	3.87±0.03	5.18±0.03	6.31±0.04
9	150	100	2	2.35±0.02	3.51±0.05	4.46±0.04	5.87±0.08
10	150	300	2	2.53±0.01	3.72±0.03	4.95±0.02	6.11±0.03
11	150	100	6	2.50±0.02	3.70±0.05	4.93±0.02	6.11±0.04
12	150	300	6	2.63±0.01	3.82±0.00	5.12±0.03	6.24±0.01
13	150	200	4	2.59±0.03	3.80±0.02	5.06±0.01	6.21±0.06
14	150	200	4	2.59±0.01	3.80±0.03	5.07±0.03	6.22±0.04
15	150	200	4	2.58±0.01	3.77±0.00	5.04±0.01	6.18±0.01

#### 4.2.1 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสภาพอัดตัวได้

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะเริ่มพิจารณาจากแผนภูมิพาร์เรโต (Pareto chart) เพื่อดูว่าตัวแปรไหนบ้างที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา ถ้าแบบจำลองหรือตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะทำการยอมรับสมมติฐาน  $H_1$  บ่งบอกได้ว่าแบบจำลองหรือตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์และสามารถใช้ทำนายตัวแปรตอบสนองได้ จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ามีตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ส่งผลต่อสภาพอัดตัวได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $\alpha < 0.05$ ) ได้แก่ เวลาอัด (C) อุณหภูมิ (A) แรงดัน (B) ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาอัด (AC) และเวลาการอัดกำลังสอง (CC) ส่วนตัวแปรที่ไม่ส่งผลจะถูกตัดออกจากแบบจำลอง ก่อนที่จะทำการศึกษาถึงผลกระทบ และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพอัดตัวได้ที่เป็นผลจากการปรับตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ร้อน เพื่อให้สามารถศึกษาผลได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

### Pareto Chart of the Standardized E ffects

(response is Compressibility (micron),  $\alpha = 0.05$ )



รูปที่ 4.2 แผนภูมิพาเรโตของสภาพอัดตัวได้

เมื่อกำจัดตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพอัดตัวได้ออกจากแบบจำลองแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวแปรที่เหลือทุกตัวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทุกตัวมีความสัมพันธ์และสามารถใช้ทำนายผลสภาพอัดตัวได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาที่ค่า F-value พบว่าเวลาการอัดมีค่าสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าเวลาอัดส่งผลกระทบต่อสภาพอัดตัวได้มากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ แรงดัน อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาอัด และเวลาการอัดกำลังสอง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากแผนภาพแสดงผลกระทบของตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัด ต่อสภาพอัดตัวได้ในรูปที่ 4.3 ที่แสดงให้เห็นว่าเวลาในการอัดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพอัดตัวได้มากที่สุด โดยเมื่อใช้เวลาอัดสูงขึ้นค่าสภาพอัดตัวได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาอัดที่สูงขึ้นทำให้พินอลิเกรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลได้มาก ส่งผลให้เรซินมีเวลาในการหลอมแล้วมีประสิทธิภาพในการยึดติดต่อประกอบอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยกันได้อย่างแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ผ้าเบรกมีการยุบตัวน้อยลง (สภาพอัดตัวได้ต่ำ) เมื่อได้รับแรงดัน ส่วนตัวแปรที่ส่งผลรองลงมาคือ อุณหภูมิ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพอัดตัวได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในกระบวนการพิมพ์ร้อนส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลและการไหลของเรซิน ดังนั้นหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้เรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล และมีความสามารถในการไหลมากขึ้น ทำให้เรซินสามารถไหลแทรกไปยังช่องว่างระหว่างองค์ประกอบอื่น ๆ ได้ดีและเกิดการยึดติดที่แน่นขึ้น จึงทำให้ผ้าเบรกมีการยุบตัวที่น้อยลงได้ และเมื่อพิจารณาแรงดันในกระบวนการพิมพ์ร้อน พบว่าเมื่อแรงดันสูงขึ้นค่าสภาพอัดตัวได้มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากการในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของเรซิน จะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นแก๊สแอมโมเนีย ดังนั้นเมื่อมีการให้แรงดันแก่ตัววัสดุมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดแรงดันจากแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นภายในวัสดุผ้าเบรกเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งแรงดันนี้อาจทำให้เกิดการรอยแตกภายในวัสดุผ้าเบรกได้ ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นก็จะกลายเป็นช่องว่างภายในวัสดุ [5, 46] แล้วทำให้ผ้าเบรกเกิดการยุบตัวได้มากขึ้น (สภาพอัดตัวได้สูง)

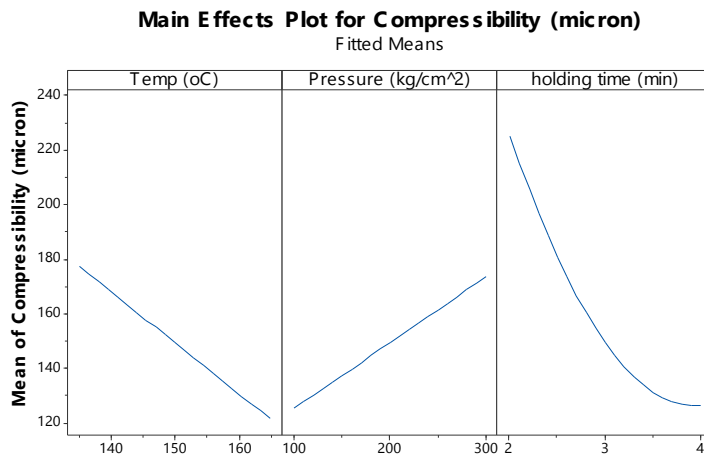


ตารางที่ 4.3 ความแปรปรวนของสภาพอัดตัวได้

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	5	36845.1	7369.0	17.18	0.000
<b>Linear</b>	3	30311.9	10104.0	23.56	0.000
(A) Temperature	1	6216.1	6216.1	14.49	0.004
(B) Pressure	1	4627.9	4627.9	10.79	0.009
(C) holding time	1	19467.9	19467.9	45.39	0.000
<b>Square</b>	1	2586.7	2586.7	6.03	0.036
(C <sup>2</sup> ) holding time*holding time	1	2586.7	2586.7	6.03	0.036
<b>2-Way Interaction</b>	1	3946.5	3946.5	9.20	0.014
(AC) Temperature*holding time	1	3946.5	3946.5	9.20	0.014
<b>Error</b>	9	3860.0	428.9		
Lack-of-Fit	7	3823.7	546.2	30.08	0.033
Pure Error	2	36.3	18.2		
<b>Total</b>	14	40705.1			

สมการทำนายค่าสภาพอัดตัวได้ถูกวิเคราะห์ผ่านสมการถดถอยกำลังสอง และหลังจากผ่านการกำจัดพจน์ของตัวแปรที่ไม่ส่งผลต่อสภาพอัดตัวได้ออกไปแล้ว ทำให้ได้สมการทำนายดังสมการที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรแสดงถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงระหว่างตัวแปรกับค่าสภาพอัดตัวได้ หากสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกับค่าสภาพอัดตัวได้ ในขณะที่สัมประสิทธิ์มีค่าบวกแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันกับค่าสภาพอัดตัวได้ ซึ่งเมื่อดูค่าสัมประสิทธิ์ก็พบว่าทิศทาง การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรและสภาพอัดตัวได้เป็นไปตามผลในรูปที่ 4.3 ความแม่นยำในการทำนายผลจากแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) 90.52 % แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมาก และจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าผลจากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนกับผลจากแบบจำลองอยู่ 20.71 % เมื่อพิจารณาร่วมกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า (adjusted  $R^2$ ) ซึ่งเป็นค่าที่นำค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมาปรับให้สอดคล้องกับจำนวนพจน์ตัวแปรที่ใช้ทำนายผล พบว่ามีค่า 85.25 % แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออนและสภาพอัดตัวได้ และสามารถทำนายผลได้แม่นยำ 59.19 % (predicted  $R^2$ )

$$\text{Compressibility } (\mu\text{m}) = 1707 - 8.14 A + 0.2405 B - 521 C + 26.3 C^2 + 2.094 AC \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของสภาพอัดตัวได้เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัด ในกระบวนการขึ้นรูปร้อน

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองสภาพอัดตัวได้

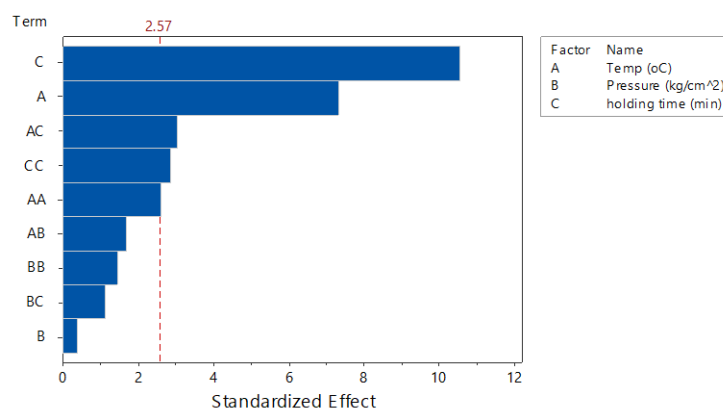
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
20.71	90.52%	85.25%	59.19%

#### 4.2.2 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อมอดูลัส

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ส่งผลต่อมอดูลัสที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้แก่ เวลาอัด (C) อุณหภูมิ (A) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลา (AC) เวลาอัดกำลังสอง (C<sup>2</sup>) และอุณหภูมิกำลังสอง (A<sup>2</sup>) ดังนั้นจึงทำการกำจัดตัวแปรอื่นที่ไม่ส่งผลออกจากแบบจำลอง

#### Pareto Chart of the Standardized E effects

(response is Modulus (GPa),  $\alpha = 0.05$ )

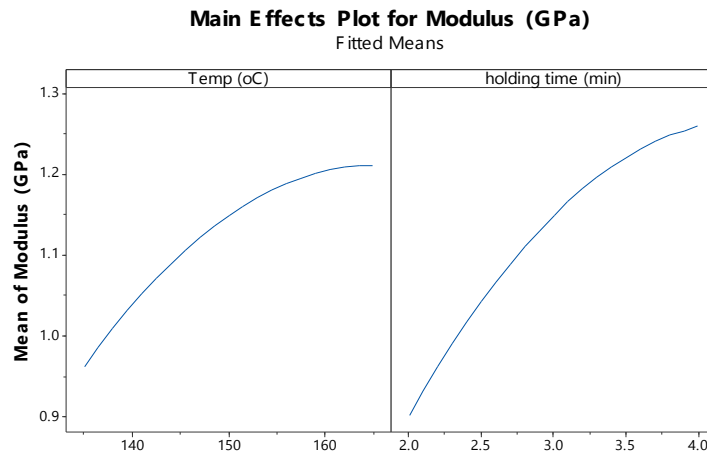


รูปที่ 4.4 แผนภูมิพาเรโตของมอดูลัส

ผลความแปรปรวนของแบบจำลองมอดูลัสในตารางที่ 4.5 พบว่าแบบจำลองและตัวแปรทุกตัวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทุกตัวในแบบจำลองสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ผลของ F-value แสดงให้เห็นว่าปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ส่งผลต่อมอดูลัสมากที่สุด ได้แก่ เวลาอัด (C) อุณหภูมิ (A) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลา (AC) เวลาอัดกำลังสอง ( $C^2$ ) และอุณหภูมิกำลังสอง ( $A^2$ ) ตามลำดับ โดยการเพิ่มเวลาอัดในกระบวนการพิมพ์ร้อนส่งผลให้มอดูลัสมีแนวโน้มสูงขึ้น (รูปที่ 4.5) เนื่องจากมอดูลัสเป็นสมบัติที่แสดงถึงความยืดหยุ่นของผ้าเบรก ดังนั้นเมื่อใช้เวลาอัดในกระบวนการพิมพ์ร้อนมากขึ้น จะทำให้เรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสามารถยึดเกาะองค์ประกอบอื่นเข้าไว้ด้วยกันได้แน่นมากขึ้น ซึ่งความหนาแน่นที่เกิดขึ้นแสดงถึงช่องว่างหรือปริมาณรูพรุนที่น้อยลง เป็นผลให้ผ้าเบรกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ไม่แตกเปราะง่ายเมื่อเทียบกับผ้าเบรกที่มีช่องว่างหรือปริมาณรูพรุนสูง และเมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน พบว่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอัด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลเรซินเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิยังช่วยให้เรซินเกิดการไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่างต่าง ๆ ภายในเนื้อวัสดุได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ผ้าเบรกดัดเกาะกันแน่นขึ้นและปริมาณช่องว่างหรือปริมาณรูพรุนที่น้อยลง [34, 46, 47]

ตารางที่ 4.5 ความแปรปรวนของมอดูลัส

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	5	0.429	0.086	29.28	0.000
<b>Linear</b>	2	0.378	0.189	64.58	0.000
(A) Temperature	1	0.123	0.123	42.14	0.000
(C) holding time	1	0.255	0.255	87.02	0.000
<b>Square</b>	2	0.029	0.015	5.02	0.034
( $A^2$ ) Temperature*Temperature	1	0.014	0.014	4.87	0.055
( $C^2$ ) holding time*holding time	1	0.017	0.017	5.88	0.038
<b>2-Way Interaction</b>	1	0.021	0.021	7.19	0.025
(AC) Temperature*holding time	1	0.021	0.021	7.19	0.025
<b>Error</b>	9	0.026	0.003		
Lack-of-Fit	7	0.026	0.004	47.34	0.021
Pure Error	2	0.000	0.000		
<b>Total</b>	14	0.455			



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาอัดในกระบวนการขึ้นรูปร้อน

สมการที่ 4.2 เป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองจากแบบจำลอง เพื่อใช้เป็นสมการทำนายค่ามอดุลัสจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองนี้มีค่า 94.21 % พจน์ของตัวแปรทุกตัวในสมการสามารถใช้อธิบายค่ามอดุลัสได้ 90.99 % แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายค่ามอดุลัส โดยค่าที่ได้จากการทำนายมีความแม่นยำ 75.27 % นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าผลจากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนกับผลจากแบบจำลองอยู่เพียง 0.05 % (ตารางที่ 4.6)

$$\begin{aligned} \text{Modulus (GPa)} = & -9.62 + 0.1054 A + 1.312 C - 0.000275 A^2 - 0.0681 C^2 \\ & - 0.00484 AC \end{aligned} \quad (4.2)$$

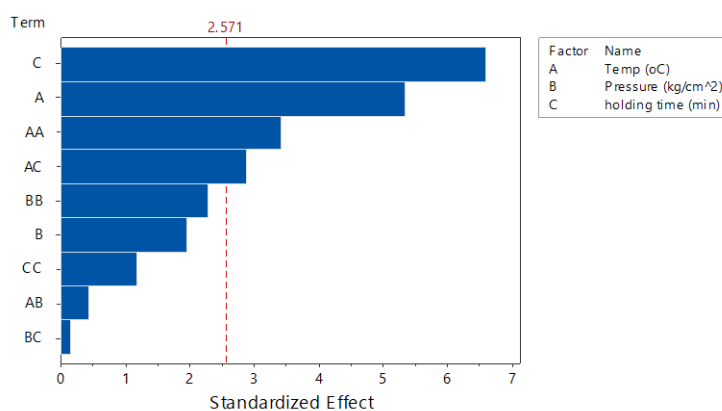
ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองมอดุลัส

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.05	94.21%	90.99%	75.27%

#### 4.2.3 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อความแข็ง

จากผลการทดลองพบว่าตัวแปรในแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์หรือส่งผลต่อค่าความแข็งของผ้าเบรกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้แก่ เวลาอัด (C) อุณหภูมิ (A) อุณหภูมิกำลังสอง ( $A^2$ ) และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาอัด (AC) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

**Pareto Chart of the Standardized Effects**  
(response is Hardness (HRS),  $\alpha = 0.05$ )



รูปที่ 4.6 แผนภูมิพาเรโตของความแข็ง

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองความแข็งหลังจากกำจัดพจน์ของตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแล้ว พบว่าตัวแปรทุกตัวในแบบจำลองสามารถใช้อธิบายผลการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งได้อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (P-value น้อยกว่า 0.05) และพบว่าเวลาอัดเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ (A) อุณหภูมิกำลังสอง (A<sup>2</sup>) และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาอัด (AC) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) โดยทิศทางการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักในกระบวนการกับค่าความแข็งเป็นไปตามรูปที่ 4.7 ผ้าเบรกจะมีความแข็งมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอัดนานขึ้น เนื่องจากยิ่งใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปร้อนเท่าไรยิ่งทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซินมากขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เรซินมีความสามารถในการยึดเกาะได้ดีและเกิดความแข็งแรงทางโครงสร้างของผ้าเบรกได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความแข็งของผ้าเบรกมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มปริมาณการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซิน และทำให้เรซินมีประสิทธิภาพในการไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อวัสดุได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ผ้าเบรกมีความหนาแน่นและความแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดหนึ่งพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้บริเวณหน้าผ้าเบรกที่ได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์โดยตรงเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซินได้เร็ว ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าเกิดการยึดเกาะและแข็งตัวของเรซินก่อนบริเวณอื่น ๆ แล้วไปกั้นทางออกของแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเมื่อเรซินบริเวณด้านในได้รับความร้อนมากขึ้นแล้ว ดังนั้นแก๊สที่เกิดขึ้นจึงค้างอยู่ภายในเกิดเป็นช่องว่างและรูพรุนที่มากขึ้น จึงทำให้ผ้าเบรกมีค่าความแข็งลดลง [5, 34, 46]

ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของความแข็ง

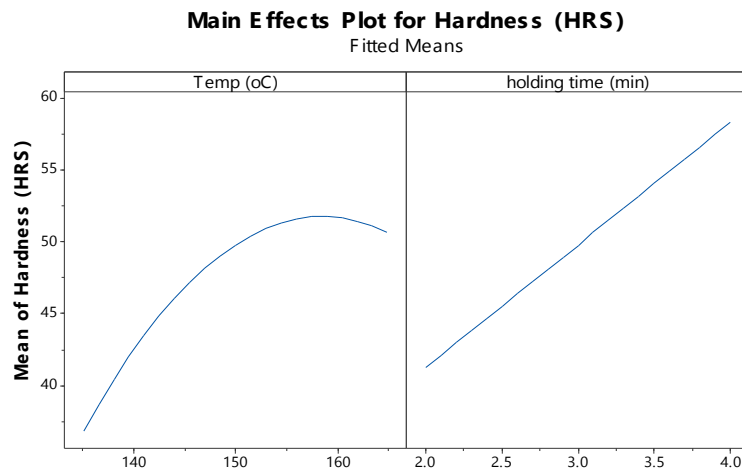
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	4	1203.17	300.79	14.78	0.000
<b>Linear</b>	2	957.05	478.53	23.51	0.000
(A) Temperature	1	378.60	378.60	18.60	0.002
(C) holding time	1	578.46	578.46	28.42	0.000
<b>Square</b>	1	135.14	135.14	6.64	0.028
(A <sup>2</sup> ) Temperature*Temperature	1	135.14	135.14	6.64	0.028
<b>2-Way Interaction</b>	1	110.97	110.97	5.45	0.042
(AC) Temperature*holding time	1	110.97	110.97	5.45	0.042
<b>Error</b>	10	203.53	20.35		
Lack-of-Fit	8	196.23	24.53	6.72	0.136
Pure Error	2	7.30	3.65		
<b>Total</b>	14	1406.70			

สมการถดถอยกำลังสองของแบบจำลองความแข็งแสดงดังสมการที่ 4.3 โดยพบว่าค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณผ่านสมการมีค่าใกล้เคียงกัน 85.53 % (R<sup>2</sup>) นอกจากนี้ยังพบว่าพจน์ของตัวแปรทุกตัวในสมการสามารถใช้อธิบายค่าความแข็งได้ 75.74 % โดยสมการนี้สามารถใช้ทำนายค่าความแข็งได้แม่นยำ 62.45 % และจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าผลจากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนกับผลจากแบบจำลองอยู่ 4.51 % ดังแสดงในตารางที่ 4.8

$$\text{Hardness (HRS)} = -804 + 9.53 A + 61.2 C - 0.0267 A^2 - 0.351 AC \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองความแข็ง

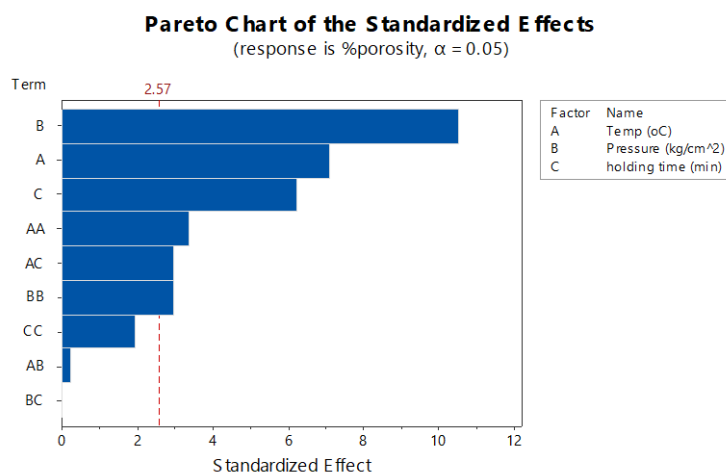
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.51	85.53%	79.74%	62.45%



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาอัดในกระบวนการขึ้นรูปรีออน

#### 4.2.4 ผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออนต่อความเป็นรูพรุน

จากแผนภูมิพารेटโตในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ามีตัวแปรที่ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นรูพรุนมีเพียง 3 ตัวแปร ได้แก่ เวลาอัดกำลังสอง ( $C^2$ ) ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและแรงดัน (AB) และปัจจัยร่วมระหว่างแรงดันและเวลาอัด (BC) ดังนั้นทั้ง 3 ตัวแปรนี้จึงถูกกำจัดออกจากแบบจำลองก่อนจะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน



รูปที่ 4.8 แผนภูมิพารेटโตของความเป็รูพรุน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองความเป็นรูพรุน (ตารางที่ 4.9) พบว่าตัวแปรทุกพจน์ในแบบจำลองสามารถมีความสัมพันธ์กับความเป็นรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (P-value น้อยกว่า 0.05) และพบว่าแรงดัน (B) ส่งผลต่อความเป็นรูพรุนมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ (A) เวลาอัด (C) อุณหภูมิกำลังสอง ( $A^2$ ) ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาอัด (AC) และแรงดันกำลังสอง ( $B^2$ ) ตามลำดับ (เรียงลำดับจากค่า F-value มากไปน้อย) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเป็นรูพรุนเมื่อได้รับผลกระทบจากตัวแปรในกระบวนการ (รูปที่ 4.9) พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันในกระบวนการ เนื่องจากแรงดันที่มากขึ้นทำให้เนื้อวัสดุแต่ละองค์ประกอบถูกอัดให้ชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างและรูพรุนภายในเนื้อผ้าเบรกลดลง ส่วนอุณหภูมิในกระบวนการอัดนั้นส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลและการไหลของเรซิน โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยให้เรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลได้ดีและสมบูรณ์มากขึ้น และช่วยเพิ่มการไหลของเรซินให้แทรกไปยังช่องว่างระหว่างเนื้อวัสดุ ทำให้เรซินเข้าไปเติมเต็มช่องว่างหรือรูพรุนภายในเนื้อผ้าเบรกได้มากขึ้น แล้วส่งผลให้ปริมาณรูพรุนลดลง และเมื่อพิจารณาที่เวลาอัด พบว่าปริมาณรูพรุนน้อยลงเมื่อใช้เวลาในการอัดมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของเรซินสามารถเกิดได้มากขึ้น ช่วยให้ประสิทธิภาพในการยึดติดของเรซินดียิ่งขึ้น สามารถยึดองค์ประกอบอื่นเข้าไว้ด้วยกันได้แน่นขึ้น จึงส่งผลให้ผ้าเบรรมีปริมาณรูพรุนลดลง [5, 34, 46]

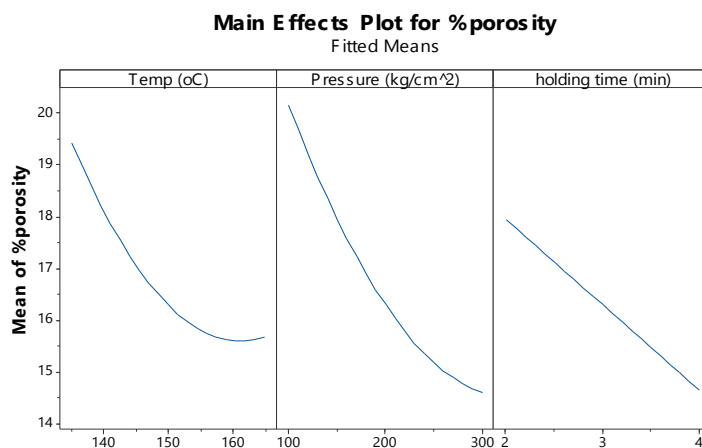
จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทำให้ได้สมการทำนายความเป็นรูพรุน ซึ่งเป็นสมการที่วิเคราะห์ผ่านสมการถดถอยกำลังสอง (สมการที่ 4.4) และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่พบว่าค่าความเป็นรูพรุนที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณผ่านสมการมีค่าใกล้เคียงกัน 96.24 % ( $R^2$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าพจน์ของตัวแปรทุกตัวในสมการสามารถใช้อธิบายค่าความเป็นรูพรุนได้ 93.42 % โดยสมการนี้สามารถใช้ทำนายค่าความแข็งได้แม่นยำ 78.59 % และจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าผลจากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนกับผลจากแบบจำลองอยู่ 0.78 % (ตารางที่ 4.10)

$$\begin{aligned} \%porosity = & 208.1 - 2.013 A - 0.0711 B - 12.74 C + 0.00555 A^2 \\ & + 0.000108 B^2 + 0.0740 AC \end{aligned} \quad (4.4)$$



ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของความเป็นรูพรุน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	6	125.27	20.88	34.11	0.000
<b>Linear</b>	3	110.84	36.95	60.37	0.000
(A) Temperature	1	27.97	27.97	45.70	0.000
(B) Pressure	1	61.36	61.36	100.26	0.000
(C) holding time	1	21.51	21.51	35.15	0.000
<b>Square</b>	2	9.50	4.75	7.76	0.013
(A <sup>2</sup> ) Temperature*Temperature	1	5.80	5.80	9.48	0.015
(B <sup>2</sup> ) Pressure*Pressure	1	4.37	4.37	7.14	0.028
<b>2-Way Interaction</b>	1	4.93	4.93	8.06	0.022
(AC) Temperature*holding time	1	4.93	4.93	8.06	0.022
<b>Error</b>	8	4.90	0.61		
Lack-of-Fit	6	4.86	0.81	43.08	0.023
Pure Error	2	0.04	0.02		
<b>Total</b>	14	130.16			



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งเมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัดใน กระบวนการขึ้นรูปรีออน

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองความความเป็นรูพรุน

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.78	96.24%	93.42%	78.59%

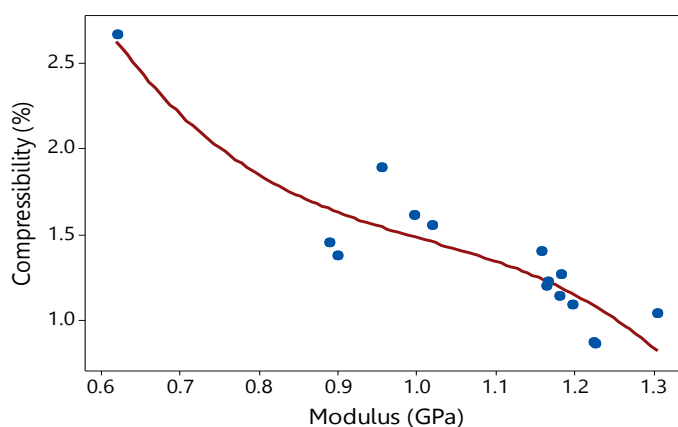
จากการวิเคราะห์แบบจำลองและผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติสภาพอัดตัวได้ มอดูลัส ความแข็ง และความเป็นรูพรุน พบว่าทุกสมบัติมีความสัมพันธ์กับตัวแปรในกระบวนการทั้งสิ้น แต่ในการเลือกแบบจำลองนั้นจะต้องพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า (adjusted R<sup>2</sup>) ซึ่งเป็นการนำค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมาคำนวณเทียบกับจำนวนพจน์ในแบบจำลอง เนื่องจากในแต่ละแบบจำลองมีจำนวนพจน์ของตัวแปรที่ต่างกัน [48] และจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่าและความแม่นยำในการทำนายผลของแบบจำลองความเป็นรูพรุนมีค่าสูงที่สุด (93.42 และ 78.59 % ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมีผลหรือมีความสัมพันธ์ต่อความเป็นรูพรุนมากที่สุด ดังนั้นจึงพิจารณาให้แบบจำลองความเป็นรูพรุนเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ต่อไป

#### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของผ้าเบรก

##### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดูลัสของผ้าเบรก

ผลความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดูลัสแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าผ้าเบรกที่มีค่าสภาพอัดตัวได้ลดลงจะส่งผลให้มอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (แปรผกผันกัน) ซึ่งมีผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ R.J. Canali และ A. Tamagna [49] และเมื่อพิจารณาถึงผลของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) ในตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสภาพอัดตัวได้มีความสัมพันธ์กับมอดูลัสอยู่ 84.6 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า 80.4 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ บ่งบอกได้ว่าสภาพอัดตัวได้มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับมอดูลัส และจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพอัดตัวได้ที่ได้จากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากสมการที่ 4.5 อยู่ 0.20 %

$$\text{Compressibility} = 13.71 - 33.55 \text{ Modulus} + 31.77 \text{ Modulus}^2 - 10.44 \text{ Modulus}^3 \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดูลัส

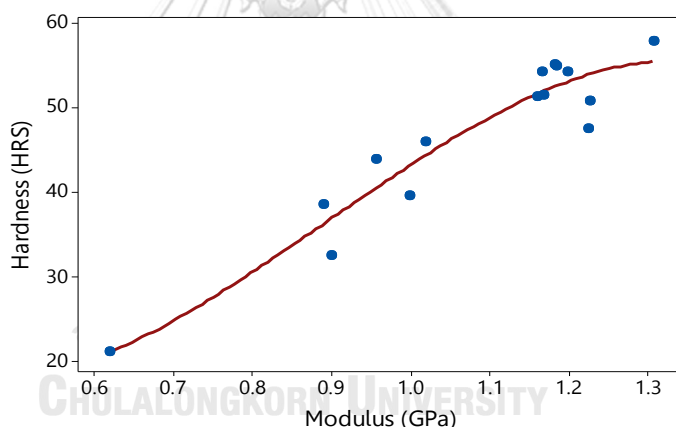
ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอัดตัวได้และมอดุลัส

S	R-sq	R-sq (adj)
0.20	84.6%	80.4%

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความแข็งของผ้าเบรก

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อผ้าเบรกมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีผลเป็นไปตามงานวิจัยของ R.J. Canali และ A. Tamagna [49] และพบว่ามอดุลัสและความแข็งมีความสัมพันธ์กัน 91.0 % และสามารถยืนยันผลของความสัมพันธได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า 88.6 % ที่มีระดับสูงและใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากสมการที่ 4.6 อยู่ 3.39 %

$$\text{Hardness} = 56.8 - 196.8 \text{ Modulus} + 292.3 \text{ Modulus}^2 - 109.0 \text{ Modulus}^3 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความแข็ง

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธระหว่างมอดุลัสและความแข็ง

S	R-sq	R-sq (adj)
3.39	91.0%	88.6%

#### 4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก

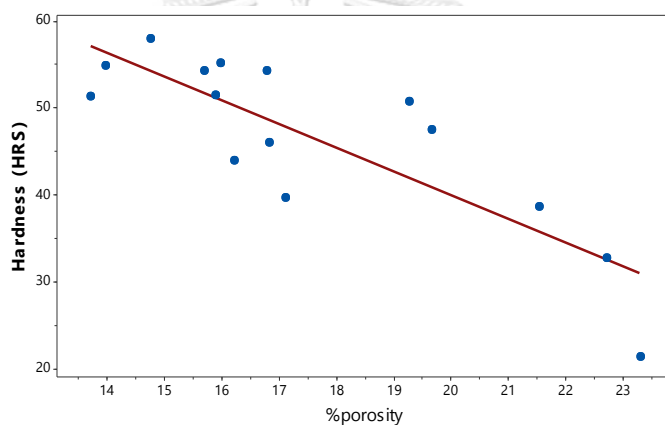
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่าความแข็งและความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกมีความสัมพันธ์และส่งผลต่อกันดังแสดงรูปที่ 4.12 โดยผ้าเบรกที่มีปริมาณรูพรุนมากจะเป็นผลให้ผ้าเบรคนั้นมีความแข็งน้อยลง เนื่องจากมีปริมาณช่องว่างภายในเนื้อวัสดุมาก ซึ่งผลที่ได้ก็เป็นไปตามแนวโน้มในงานวิจัยของ Y.C.

Kim และคณะ และ I. Mutlu และคณะ [34, 50] เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสใจ (ตารางที่ 4.13) พบว่าความแข็งและความเป็นรูพรุนมีความสัมพันธ์กัน 68.67 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การตัดสใจแบบปรับค่า (66.26 %) แสดงให้เห็นว่าสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน และสามารถทำนายค่าความแข็งจากความเป็นรูพรุนได้จากสมการที่ 4.7 โดยมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ 5.82 %

$$\text{Hardness (HRS)} = 94.39 - 2.724 \% \text{porosity} \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การตัดสใจของความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูพรุน

S	R-sq	R-sq (adj)
5.82	68.67%	66.26%



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความเป็นรูพรุน

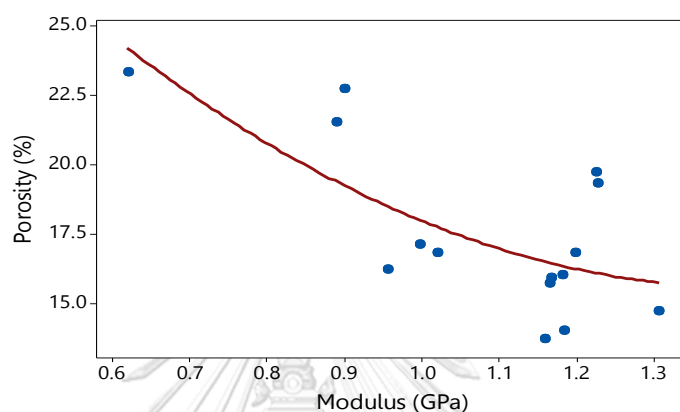
#### 4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่ามอดุลัสและความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกมีความสัมพันธ์และส่งผลต่อกันดังแสดงรูปที่ 4.13 โดยผ้าเบรกที่มีปริมาณรูพรุนมากจะเป็นผลให้ผ้าเบรกรุนนั้นมีค่ามอดุลัสน้อยลง เนื่องจากมีปริมาณช่องว่างภายในเนื้อวัสดุมาก ซึ่งผลที่ได้ก็เป็นไปตามแนวโน้มในงานวิจัยของ J. Kováčik ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูพรุนของวัสดุ [51] เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสใจพบว่ามอดุลัสและความเป็นรูพรุนมีความสัมพันธ์กัน 51.4 % และมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การตัดสใจแบบปรับค่า (43.3 %) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นรูพรุนที่ได้จากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากสมการที่ 4.8 อยู่ 2.30 % ถึงแม้ผลของสัมประสิทธิ์การตัดสใจในตารางที่ 4.14 จะไม่ได้มีค่าสูงเทียบเท่ากับความสัมพันธ์ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ แต่ก็ยังสามารถใช้อธิบายแนวโน้มของความสัมพันธ์ได้ แต่อาจไม่เหมาะสมที่จะนำสมการที่ 4.8 มาใช้ทำนายผลของสมบัติทั้งสอง

$$\text{Porosity} = 42.50 - 37.74 \text{ Modulus} + 13.21 \text{ Modulus}^2 \quad (4.8)$$

ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูพรุน

S	R-sq	R-sq (adj)
2.30	51.4%	43.3%



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความเป็นรูพรุน

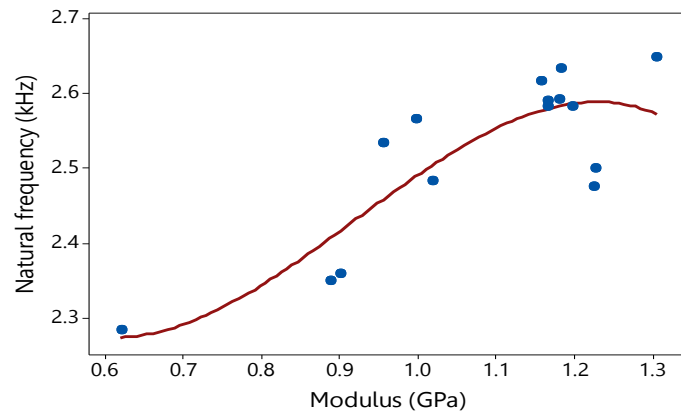
#### 4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่ามอดุลัสส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก โดยเมื่อผ้าเบรกมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกมีแนวโน้มมากขึ้น สมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน 71.6 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 63.8 % ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากสมการที่ 4.9 อยู่ 0.07 % เป็นการพิสูจน์ได้ว่ามอดุลัสและความถี่ธรรมชาติส่งผลต่อกันจริง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.15

$$\text{Natural frequency} = 3.836 - 6.113 \text{ Modulus} + 7.473 \text{ Modulus}^2 - 2.705 \text{ Modulus}^3 \quad (4.9)$$

ตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความถี่ธรรมชาติ (โหมดที่ 1)

S	R-sq	R-sq (adj)
0.07	71.6%	63.8%

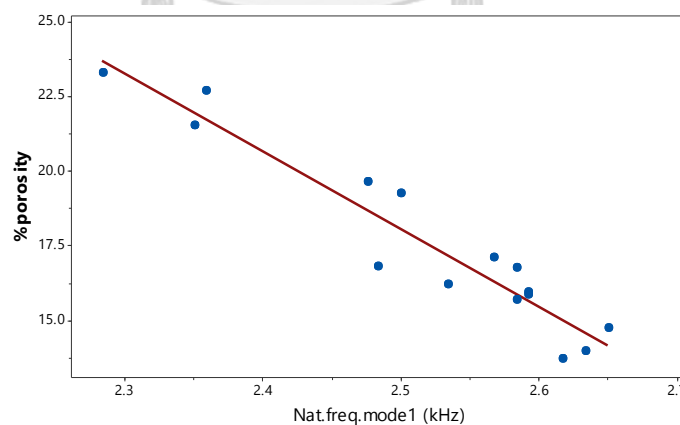


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและความถี่ธรรมชาติ (โหมดที่ 1)

#### 4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่าความเป็นรูพรุนส่งผลโดยตรงต่อความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก สมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน 91.25 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่าที่ใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 90.57 % เป็นการพิสูจน์ได้ว่าความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติส่งผลต่อกัน จริง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.16 โดยทั้งความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติสามารถทำนายได้จากสมการที่ 4.10 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) 0.94 %

$$\% \text{porosity} = 83.29 - 26.09 \text{ Nat.freq.mode1 (kHz)} \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติ (โหมดที่ 1)

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติ

S	R-sq	R-sq (adj)
0.94	91.25%	90.57%

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาภาวะการอัดขึ้นรูปอ่อนที่เหมาะสมเพื่ออัดขึ้นรูปผ้าเบรกที่มีแนวโน้มในการเกิดเสียงที่ต่ำ ซึ่งการสั่นและเสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรกเป็นผลจากการที่ผ้าเบรกถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นหากมีการสั่นที่ความถี่ตอบสนอง (ความถี่ธรรมชาติ) ใกล้เคียงหรือตรงกับความถี่ตอบสนองของจานเบรก จะทำให้เกิดเสียงขึ้นในช่วงความถี่นั้น [52] สมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรกทั้งสภาพอัดตัวได้ มอดุลัส ความแข็ง และความเป็นรูปพูน ต่างส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติและเกิดการเกิดเสียงทั้งสิ้น [9, 37, 38, 49] ดังนั้นหากผ้าเบรกมีสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมจะสามารถลดแนวโน้มในการเกิดเสียงขณะเบรกได้

จากผลความสัมพันธ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าทุกสมบัติมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติ ความถี่ธรรมชาติมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสภาพอัดตัวได้และความเป็นรูปพูนมีค่าลดลง และความแข็งและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความถี่ที่สูงหรือต่ำไม่ได้แสดงถึงระดับความดังของเสียงที่เกิดขึ้น แต่แสดงถึงโทนเสียงที่เกิดขึ้นว่าเป็นเสียงสูง (ความถี่สูง) หรือเสียงต่ำ (ความถี่ต่ำ) โดยสมบัติมอดุลัสและความเป็นรูปพูนมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติโดยตรง แต่ผลของความเป็นรูปพูนสามารถใช้ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติได้แม่นยำมากกว่าผลของมอดุลัส (พิจารณาจากค่า  $R^2$ ) ในขณะที่สมบัติของสภาพอัดตัวได้ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติโดยตรงแต่มีความสัมพันธ์ผ่านสมบัติมอดุลัส และสมบัติความแข็งมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติผ่านสมบัติมอดุลัสและความเป็นรูปพูน เมื่อพิจารณาสมการการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของวัสดุในสมการด้านล่างนี้ (สมการที่ 4.11)

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $f_n$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)  $k$  คือ ความแข็งแกร่งของวัตถุ และ  $m$  คือ มวลของวัตถุ (กรัม) จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความแข็งแกร่งและมวลของวัสดุส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติ ( $f_n$ ) [53] นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกรยังขึ้นกับรูปร่าง ขนาด และวัสดุของผ้าเบรกอีกด้วย [54] และเมื่อพิจารณาจากของฮุกที่กล่าวไว้ว่าเมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุทั้งแรงดึงหรือแรงกด วัตถุนั้นจะมีระยะยืดหรือระยะยุบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่กระทำต่อวัตถุนั้น และเมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุมากเกินกว่าค่าขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น วัตถุนั้นจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีก ดังแสดงในสมการที่ 4.12 [55]

$$F = k(\Delta l) \quad (4.12)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับวัตถุ (นิวตัน) และ  $\Delta l$  คือ ระยะการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ (เมตร) ซึ่งแรงที่กระทำตั้งฉากกับวัตถุสามารถแทนได้ด้วย  $PA$  ( $F=PA$ ) เมื่อ  $P$  คือ ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร) และ  $A$  คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ (ตารางเมตร) ทำให้ได้สมการของความดันดังต่อไปนี้ (สมการที่ 4.13)

$$P = \frac{k(\Delta l)}{A} \quad (4.13)$$

จากนั้นทำการพิจารณาที่สมการมอดุลัสยืดหยุ่น หรือมอดุลัสของยัง (สมการที่ 4.14)

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta l/l_0} = \frac{P}{\Delta l/l_0} \quad (4.14)$$

เมื่อ E คือ ค่ามอดุลัส (GPa) และ  $l_0$  คือ ความหนาเริ่มต้นของวัตถุ (เมตร) จากนั้นนำค่า P จากสมการที่ 4.13 มาแทนค่าในสมการที่ 4.14 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับค่าความแข็งแรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ (สมการที่ 4.15)

$$k = \frac{EA}{l_0} \quad (4.15)$$

และเมื่อนำค่าความแข็งแรงจากสมการที่ 4.15 ไปแทนในสมการที่ 4.11 ทำให้ได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและมอดุลัส ดังแสดงในสมการที่ 4.16

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EA}{ml_0}} \quad (4.16)$$

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามอดุลัสส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติของวัตถุ และจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่าความเป็นรูปพูนส่งผลต่อมอดุลัส นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูปพูนและความถี่ธรรมชาติที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นรูปพูนสามารถใช้ทำนายผลของความถี่ธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นแบบจำลองความเป็นรูปพูนจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีค่าความเป็นรูปพูนที่ทำให้ผ้าเบรกมีค่าความถี่ธรรมชาติที่ไม่ตรงหรือสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของจานเบรก เพื่อลดโอกาสการเกิดเสียง

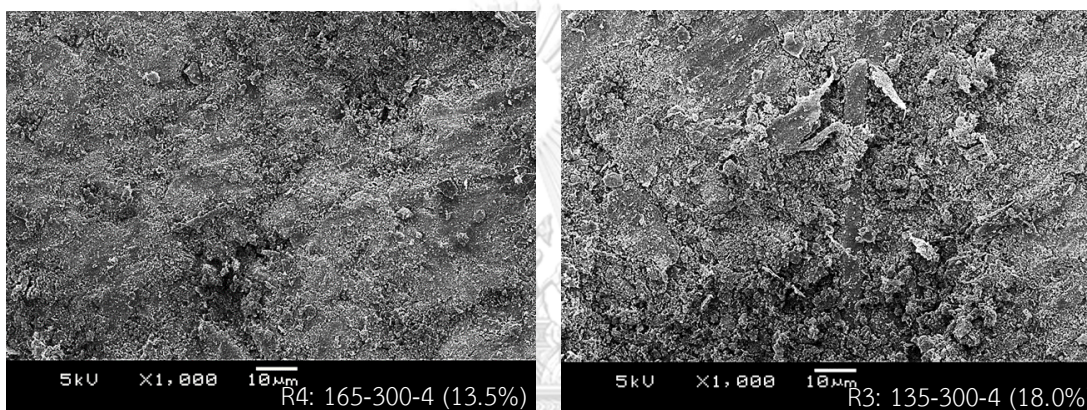
#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 พบว่าความเป็นรูปพูนเป็นสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์แบบจำลองของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ดังนั้นจึงนำผ้าเบรกที่มีความเป็นรูปพูนแตกต่างกันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนทั้ง อุณหภูมิ แรงดัน และเวลา ในการอัด มาผ่านการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาผลความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรก



#### 4.4.1 ผลของอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในภาวะที่ 4 (รูปที่ 4.16 (ก)) และภาวะที่ 3 (รูปที่ 4.16 (ข)) จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกจากภาวะที่ 4 (ความเป็นรูพรุน 13.5 %) มีลักษณะการอัดตัวกันแน่นกว่าผ้าเบรกจากภาวะที่ 3 (ความเป็นรูพรุน 18.0 %) ที่ความเป็นรูพรุนที่มากกว่า เนื่องจากภาวะที่ 4 มีการใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปร้อนที่ 165 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าภาวะที่ 3 ที่ใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปร้อน 135 องศาเซลเซียส เป็นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ยึดเกาะกันได้แน่นขึ้นและมีความเป็นรูพรุนลดลงนั้นเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ในข้อที่ 4.2.4



(ก)

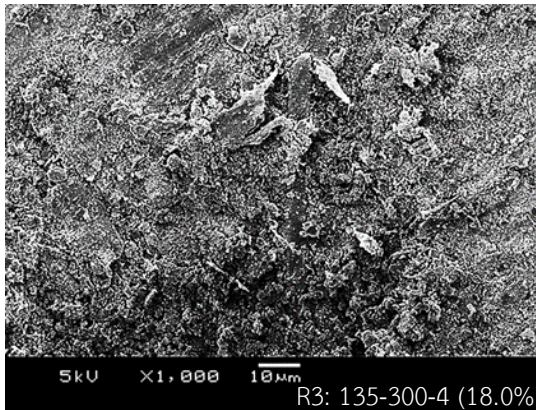
(ข)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 4 (165 °C) และ (ข) ภาวะที่ 3 (135 °C)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4.2 ผลของแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรก

จากผลการวิเคราะห์ผลของแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนต่อความเป็นรูพรุนในข้อที่ 4.2.4 ที่แสดงให้เห็นว่าแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกับปริมาณความเป็นรูพรุน สามารถวิเคราะห์เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงนั้นได้จากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่ถูกอัดขึ้นรูปร้อนในภาวะที่ 3 และ 1 (รูปที่ 4.17 (ก) และ (ข)) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวผ้าเบรกจากภาวะที่ 1 ที่ใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนน้อยกว่า (100 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) มีลักษณะการอัดตัวกันแน่นน้อยกว่าผ้าเบรกจากภาวะที่ 3 (300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) เนื่องจากแรงดันที่น้อยลงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในเนื้อวัสดุผ้าเบรก เป็นผลให้ความเป็นรูพรุนสูงขึ้น



(ก)



(ข)

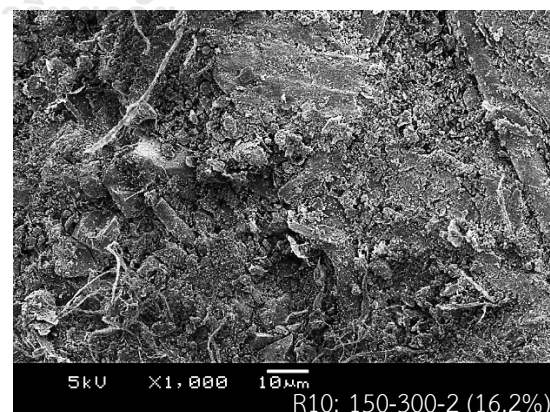
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีแรงดันในการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 3 (300 กก./ตร.ซม.) และ (ข) ภาวะที่ 1 (100 กก./ตร.ซม.)

#### 4.4.3 ผลของเวลาอัดขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรก

โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยเวลาการอัดต่างกันในภาวะที่ 12 และภาวะที่ 10 แสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าภาวะ 12 (รูปที่ 4.18 (ก)) ผ้าเบรกมีลักษณะของการอัดตัวกันที่แน่นกว่าอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบต่าง ๆ มีความสามารถในยึดเกาะกันได้มากกว่าผ้าเบรกจากภาวะที่ 10 (รูปที่ 4.18 (ข)) เนื่องจากมีการใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปร้อนนานกว่า ทำให้เรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลและสามารถยึดสารในแต่ละองค์ประกอบเข้าไว้ด้วยกันได้มาและแน่นขึ้นส่งผลให้ความเป็นรูพรุนน้อยลง ดังผลการวิเคราะห์ในข้อที่ 4.2.4



(ก)



(ข)

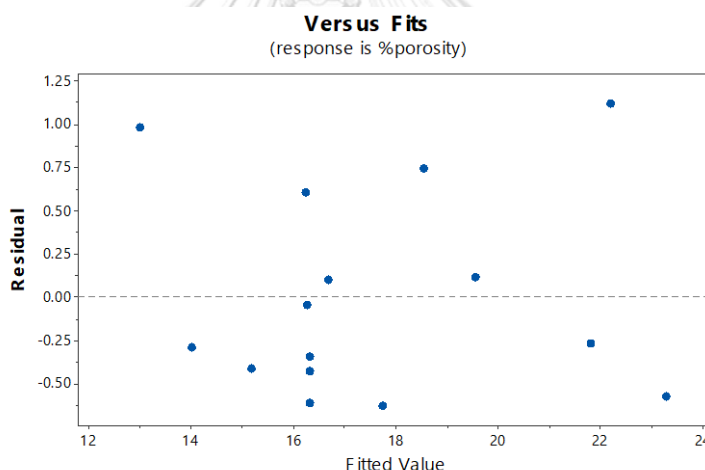
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของผ้าเบรกที่มีเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อนต่างกัน: (ก) ภาวะที่ 12 (6 นาที) และ (ข) ภาวะที่ 10 (2 นาที)

#### 4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

หลังจากเลือกแบบจำลองของความเป็นรูพรุนแล้ว ก่อนที่จะสรุปผลการวิเคราะห์และนำแบบจำลองไปใช้จำเป็นจะต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อน โดยเป็นการตรวจสอบว่าสมมติฐานของแบบจำลองที่สรุปจากค่า P-value นั้นมีความน่าเชื่อถือและเป็นจริงหรือไม่ ซึ่งสามารถทำได้โดยทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพ ความเป็นอิสระ และการแจกแจงปกติของข้อมูลส่วนตกค้าง (residual) จากผลตอบ ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึงความต่างหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความเป็นรูพรุนที่ได้จากการทดสอบและค่าความเป็นรูพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลอง

##### 4.5.1 การตรวจสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของข้อมูลส่วนตกค้าง

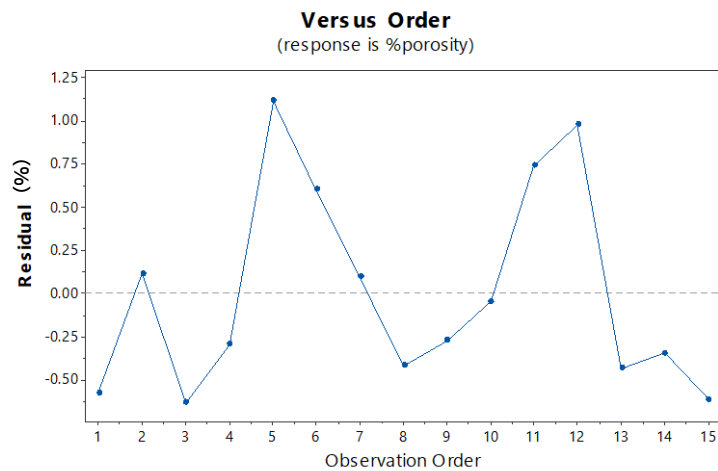
ความมีเสถียรภาพของข้อมูลส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบสมมติฐานโดยวิเคราะห์จากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง จากรูปที่ 4.19 พบว่าข้อมูลส่วนตกค้างของแบบจำลองมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นแนวโน้มและไม่มีทิศทางที่แน่นอน ทำให้สรุปได้ว่ามีเสถียรภาพของข้อมูล [29, 48] และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความเป็นรูพรุนนั้นเป็นไปตามสมมติฐานที่สรุปไว้ในหัวข้อ 4.2.4



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนตกค้างและค่าความเป็นรูพรุนที่ได้จากแบบจำลอง

##### 4.5.2 การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูลส่วนตกค้าง

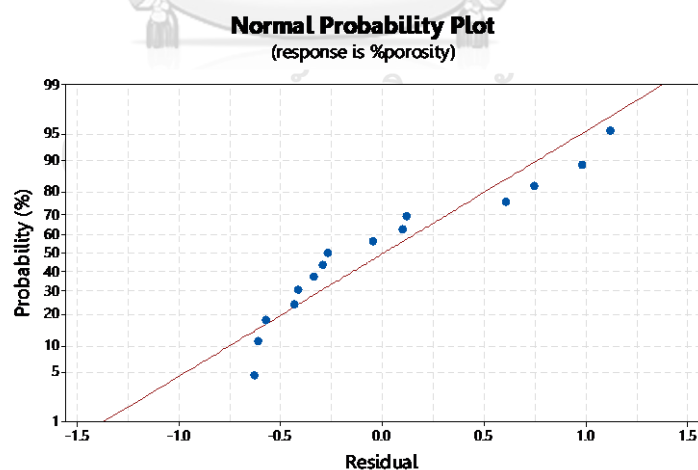
ความเป็นอิสระของข้อมูลส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่วิเคราะห์จากแนวโน้มและทิศทางของส่วนตกค้างในที่ได้จากแต่ละการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าส่วนตกค้างแต่ละข้อมูลมีความเกี่ยวข้องกันหรือไม่ จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของแต่ละการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีแนวโน้มและไม่เป็นรูปแบบหรือเป็นรอบ (pattern) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองความเป็นรูพรุนนั้นเป็นไปตามสมมติฐานที่สรุปไว้ในหัวข้อ 4.2.4 [29, 48]



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของแบบจำลองความเป็นรูพรุน

#### 4.5.3 การตรวจสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของข้อมูลส่วนตกค้าง

การแจกแจงปกติของข้อมูลส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบสมมติฐานโดยพิจารณาว่าข้อมูลส่วนตกค้างมีการแจกแจงปกติหรือไม่ หากส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ และสามารถพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองเป็นไปตามสมมติฐาน [29, 48] ซึ่งจากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลส่วนตกค้างมีการแจกแจงปกติ เนื่องจากมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองความเป็นรูพรุนนั้นเป็นไปตามสมมติฐานที่สรุปไว้ในหัวข้อ 4.2.4



รูปที่ 4.21 แนวโน้มข้อมูลส่วนตกค้างของแบบจำลองความเป็นรูพรุน

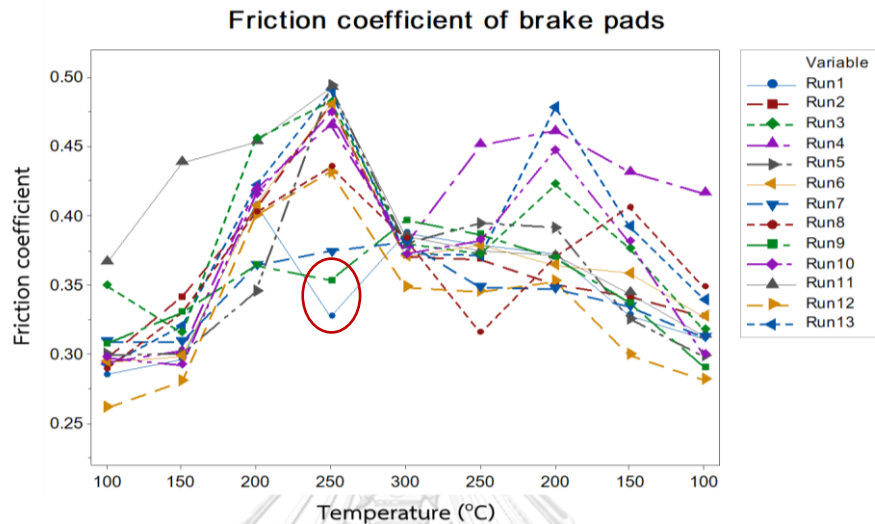
## 4.6 การหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน

### 4.6.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นรูปพรุนจากการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาผ้าเบรกให้มีแนวโน้มการสั่นและการเกิดเสียงที่ลดลงจากการปรับค่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน ดังนั้นก่อนที่จะหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมจะต้องกำหนดก่อนว่าผ้าเบรกควรมีปริมาณความเป็นรูปพรุนเท่าไรถึงจะสามารถทำให้ผ้าเบรกมีแนวโน้มการสั่นและการเกิดเสียงน้อยลงโดยที่ประสิทธิภาพการเบรกอื่น ๆ ได้แก่ อัตราการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยังคงอยู่ในเกณฑ์เดิม เมื่อนำผ้าเบรกทั้ง 15 ภาวะของกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน (ภาวะที่ 13-15 คือภาวะเดียวกัน) มาทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในแต่ละช่วงอุณหภูมิการเบรก จากรูปที่ 4.22 พบว่าผ้าเบรกทุกภาวะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน และมีช่วงการลดลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อมีอุณหภูมิการเบรก 300 องศาเซลเซียส แต่ก็พบว่าผ้าเบรกของภาวะที่ 1 และ 9 ที่มีการลดลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยหากมีการลดลงก่อนอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะจัดว่าผ้าเบรคนั้นมีคุณภาพต่ำ [56] และเป็นการแสดงให้เห็นว่าผ้าเบรกจาก 2 ภาวะนี้สามารถทนความร้อนจากการเบรกได้น้อยกว่าผ้าเบรกจากภาวะอื่น ๆ โดยในภาวะที่ 1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงจาก 0.41 ไปยัง 0.38 เนื่องจากภาวะนี้มีการอัดขึ้นรูปรีออนด้วยแรงดันต่ำ ทำให้ผ้าเบรกมีความหนาแน่นภายในเนื้อวัสดุน้อยลงจึงสามารถทนความร้อนได้น้อยกว่าผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นสูง เช่นเดียวกับภาวะที่ 9 ที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงจาก 0.35 ไปยัง 0.36 เนื่องจากมีการใช้แรงดันและเวลาในการอัดขึ้นรูปต่ำ จะเห็นว่าในภาวะที่ 9 มีสาเหตุมาจากทั้งแรงดันและเวลาในการอัด แต่มีการลดลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าภาวะที่ 1 เนื่องจากภาวะที่ใช้น้ใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปรีออนสูงกว่าเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลและการไหลของเรซินได้ดี ทำให้ผ้าเบรกมีความหนาแน่นสูงกว่าและทนความร้อนได้มากกว่า [5] ดังนั้นจากผลการทดลองจึงไม่น่าสมบัติจากผ้าเบรกที่อัดขึ้นรูปจากภาวะที่ 1 และ 9 มาทำการพิจารณาหาปริมาณความเป็นรูปพรุนที่เหมาะสม

จากนั้นทำการพิจารณาอัตราการสึกหรอของผ้าเบรกที่อุณหภูมิการเบรกตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยสูตรผ้าเบรกที่ใช้มีการกำหนดค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของอัตราการสึกหรอไว้ที่ 0.3 0.3 0.55 0.75 และ  $1.20 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร/นิวตันเมตร ที่อุณหภูมิ 100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.17 พบว่ามีเพียงผ้าเบรกที่อัดขึ้นรูปรีออนด้วยภาวะที่ 5 ที่มีอัตราการสึกหรอมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในอุณหภูมิ 100 โดยมีค่าอยู่ที่  $1.29 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร/นิวตันเมตร เนื่องจากใช้อุณหภูมิและเวลาอัดขึ้นรูปรีออนต่ำ ทำให้เรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลได้น้อยแล้วไม่สามารถยึดเกาะองค์ประกอบอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยกันได้อย่างแข็งแรง จึงเป็นผลให้ผ้าเบรกเกิดการสึกหรอขณะเบรกได้มากกว่า [5] ดังนั้นจากผลการทดลองจึงไม่น่าสมบัติจากผ้าเบรกที่อัดขึ้นรูปจากภาวะที่ 5 มาทำการพิจารณาหาปริมาณความเป็นรูปพรุนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองทั้งหมด

หลังจากทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอแล้วทำให้สามารถเลือกได้ว่าผ้าเบรกจากภาวะที่ 1 5 และ 9 จะไม่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดสมบัติของผ้าเบรกต่อไป



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 100-300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.17 อัตราการสึกหรอของผ้าเบรกที่อุณหภูมิ 100-300 องศาเซลเซียส

Run	Wear rate by mass ( $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{N.m}$ )					Total
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	
1	0.08	0.28	0.32	0.18	0.28	1.40
2	0.09	0.23	0.28	0.37	0.16	1.49
3	0.07	0.21	0.24	0.35	0.16	1.31
4	0.06	0.21	0.23	0.36	0.17	1.56
5	1.29	0.09	0.08	0.31	0.22	2.39
6	0.06	0.25	0.29	0.33	0.15	1.39
7	0.10	0.10	0.09	0.09	0.16	0.74
8	0.08	0.21	0.26	0.43	0.27	1.68
9	0.07	0.09	0.08	0.09	0.28	0.99
10	0.08	0.25	0.26	0.34	0.14	1.49
11	0.13	0.25	0.32	0.33	0.28	1.49
12	0.08	0.26	0.27	0.39	0.12	1.49
13	0.08	0.21	0.26	0.38	0.13	1.55

หมายเหตุ ค่าอัตราการสึกหรอสูงสุดที่ยอมรับได้ ได้แก่ 0.3 0.3 0.55 0.75 และ  $1.20 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร/นิวตันเมตร ที่อุณหภูมิ 100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ผ้าเบรกจากภาวะที่เหลือ (ภาวะที่ 2-4 6-8 และ 10-15) จะถูกนำมาวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ เพื่อเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติของจานเบรก หากผ้าเบรกมีการสั่นหรือตอบสนองต่อความถี่ธรรมชาติ ที่ห่างจากความถี่ของจานเบรกจะสามารถลดแนวโน้มการเกิดเสียงจากการเบรกได้ ซึ่งทำการวิเคราะห์จาก กราฟแสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกและจานเบรก (รูปที่ ข-1 ถึง ข-12) จากผลการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการสั่นที่ 1 ของจานเบรกไม่มีความถี่ตรงกับความถี่ของผ้าเบรก แต่รูปแบบ การสั่นที่ 2 ของจานเบรกมีความถี่ตรงกับรูปแบบการสั่นที่ 1 ของผ้าเบรก รูปแบบการสั่นที่ 3 ของจานเบรก มีความถี่ตรงกับรูปแบบการสั่นที่ 2 และ 3 ของผ้าเบรก และรูปแบบการสั่นที่ 4 ของจานเบรกมีความถี่ตรง กับรูปแบบการสั่นที่ 4 ของผ้าเบรก แต่เนื่องจากเสียงที่ก่อให้เกิดความรำคาญแก่มนุษย์มากที่สุด คือ เสียงที่ เกิดในช่วงความถี่ 2-5 กิโลเฮิร์ตซ์ [57] ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นรูปแบบที่ 1-3 ของผ้าเบรก ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จึงพิจารณาความถี่ที่ 3 รูปแบบการสั่นแรกเป็นหลัก และเพื่อลดโอกาสเกิดเสียงขณะใช้งาน ในแต่ ละรูปแบบการสั่นผ้าเบรก (ในแต่ละปีกของการสั่น) ควรมีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าความถี่ธรรมชาติของ จานเบรก 2.5 % เป็นต้นไปหรือหากในรูปแบบการสั่นนั้นผ้าเบรกมีค่าความถี่ธรรมชาติน้อยกว่าของจาน เบรกก็ควรมีค่าน้อยกว่า 12.5 % [58] และเมื่อวิเคราะห์จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติ ของผ้าเบรกและจานเบรก (รูปที่ ข-1 ถึง ข-12) พบว่ารูปแบบการสั่นที่ 1 ของจานเบรกไม่มีความถี่ตรงกับ ความถี่ของผ้าเบรก แต่รูปแบบการสั่นที่ 2 ของจานเบรกมีความถี่ตรงกับรูปแบบการสั่นที่ 1 ของผ้าเบรก รูปแบบการสั่นที่ 3 ของจานเบรกมีความถี่ตรงกับรูปแบบการสั่นที่ 2 ของผ้าเบรก รูปแบบการสั่นที่ 4 ของ จานเบรกตรงกับรูปแบบการสั่นที่ 3 ของผ้าเบรก จากผลความต่างของความถี่ธรรมชาติในตารางที่ 4.18 พบว่าในรูปแบบการสั่นที่ 1 ผ้าเบรกจากการทดลองที่ 4 8 และ 12 มีความถี่ธรรมชาติที่สูงกว่าจานเบรก มากกว่า 2.5 % แต่การทดลองที่ 8 และ 12 มีค่าที่ห่างมากที่สุดสองอันดับแรก จากนั้นพิจารณาที่รูปแบบการ สั่นที่ 2 พบว่าความถี่ของผ้าเบรกในทุกการทดลองมีค่าต่ำกว่าจานเบรก แต่ไม่มีการทดลองที่ผ้าเบรกมี ค่าความถี่ต่ำกว่า 12.5 % และเมื่อพิจารณาที่รูปแบบการสั่นที่ 3 พบว่าความถี่ของผ้าเบรกในทุกการทดลอง มีค่าต่ำกว่าจานเบรก และความถี่ของผ้าเบรกในทุกการทดลองมีค่าต่ำกว่า 12.5 % จากผลที่ได้กล่าวได้ว่า ผ้าเบรกจากการทดลองที่ 8 และ 12 สามารถลดโอกาสในการเกิดเสียงที่ความถี่ของการสั่นรูปแบบที่ 1 (ประมาณ 2.6 กิโลเฮิร์ตซ์) และรูปแบบที่ 3 (ประมาณ 5.0 กิโลเฮิร์ตซ์) แต่ไม่สามารถช่วยลดโอกาสในการ เกิดเสียงที่ความถี่ของการสั่นรูปแบบที่ 2 (ประมาณ 3.8 กิโลเฮิร์ตซ์) ได้ ดังนั้นจึงพิจารณาผลของปริมาณ ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกจากทั้ง 2 ภาวะ (การทดลองที่ 8 และ 12) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยง ของความเป็นรูพรุนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $14.3 \pm 0.6$  % ดังแสดงในตารางที่ 4.19 ผ้าเบรกที่มีค่าความเป็นรูพรุน ดังกล่าวเป็นผ้าเบรกที่คาดว่าจะมีโอกาสเกิดเสียงขณะใช้งานเบรกน้อยที่สุดจากผ้าเบรกทั้ง 15 การทดลอง

ตารางที่ 4.18 ผลต่างความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกและจานเบรก

Run	Freq. of rotor (kHz)			Freq. of pads (kHz)			$\Delta$ frequency (%)		
	mode2	mode3	mode4	mode1	mode2	mode3	mode1	mode2	mode3
2	2.55	4.18	5.93	2.48	3.68	4.89	-2.93	-11.79	-17.44
3	2.55	4.18	5.93	2.57	3.77	5.00	0.65	-9.59	-15.61
4	2.55	4.18	5.93	2.62	3.80	5.09	2.61	-8.99	-14.07
6	2.55	4.18	5.93	2.48	3.71	4.91	-2.62	-11.18	-17.16
8	2.55	4.18	5.93	2.65	3.87	5.18	3.91	-7.20	-12.66
10	2.55	4.18	5.93	2.53	3.72	4.95	-0.65	-10.79	-16.46
11	2.55	4.18	5.93	2.50	3.70	4.93	-1.96	-11.39	-16.88
12	2.55	4.18	5.93	2.63	3.82	5.12	3.27	-8.40	-13.51
13	2.55	4.18	5.93	2.59	3.80	5.06	1.63	-8.99	-14.63
14	2.55	4.18	5.93	2.59	3.80	5.07	1.64	-9.00	-14.49
15	2.55	4.18	5.93	2.58	3.77	5.04	1.30	-9.59	-14.91

ตารางที่ 4.19 ความเป็นรูพรุนของภาวะที่ทำให้มีโอกาสเกิดเสียงน้อยที่สุด

Run	porosity (%)					average	SD
	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5		
8	14.7	15.3	14.3	14.2	15.2	14.7	0.5
12	14.0	13.9	13.7	14.4	13.7	14.0	0.3
Average %porosity						14.3	0.6

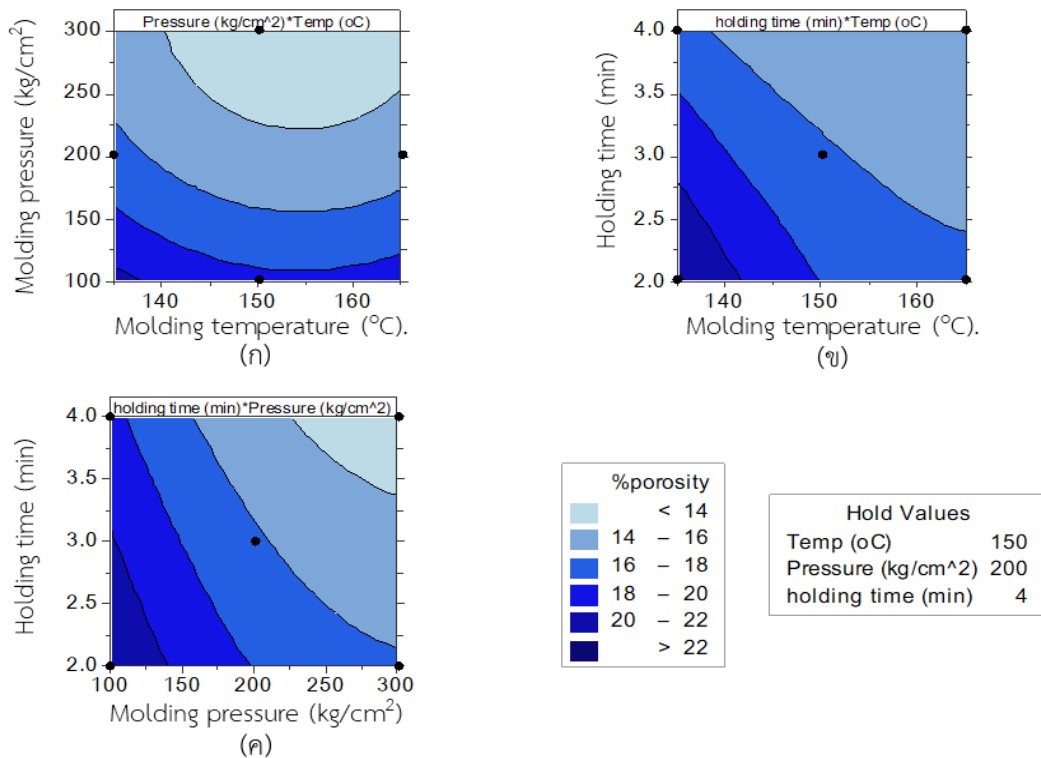
## CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 4.6.2 การวิเคราะห์แผนภาพพื้นผิวผลตอบ 2 มิติ

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงช่วงของปริมาณความเป็นรูพรุน (ผลตอบ) เมื่อทำการปรับค่าตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนทีละ 2 ตัวแปร และพบว่าหากทำการเพิ่มแรงดันไปพร้อมกับการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความเป็นรูพรุนมีแนวโน้มลดลงและจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเป็นรูพรุนมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (รูปที่ 4.23 (ก)) เมื่อทำการปรับเวลาและอุณหภูมิการอัดสเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณรูพรุนของผ้าเบรกมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.23 (ข)) และเมื่อทำการปรับแรงดันและอุณหภูมิในการอัดเพิ่มขึ้นพบว่าผ้าเบรกก็มีแนวโน้มความเป็นรูพรุนลดลงเช่นกัน (รูปที่ 4.23 (ค)) ซึ่งก็เป็นแนวโน้มเดียวกันกับการพิจารณาผลของตัวแปรเดียวในหัวข้อที่ 4.2.4



### Contour Plots of %Porosity



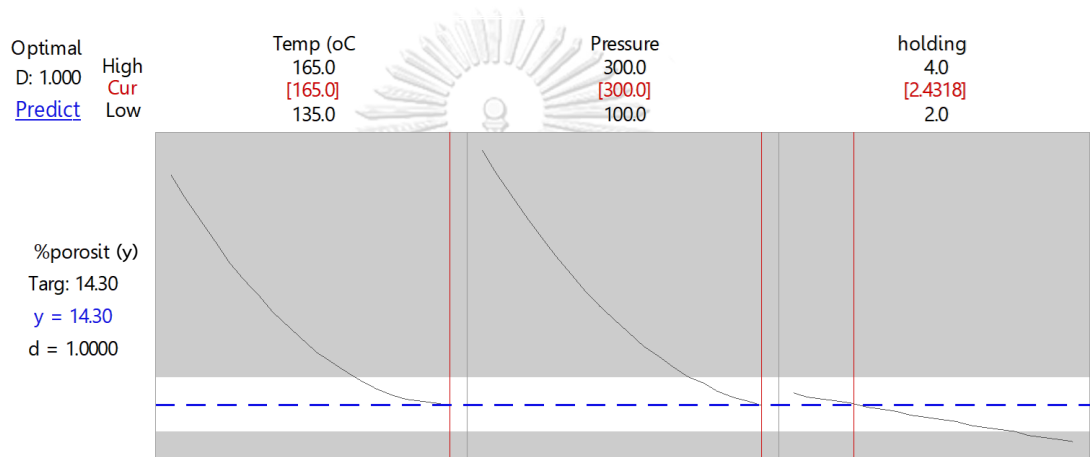
รูปที่ 4.23 แผนภาพพื้นผิวผลตอบ 2 มิติของความเป็นรูพรุน

#### 4.6.3 การกำหนดภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน

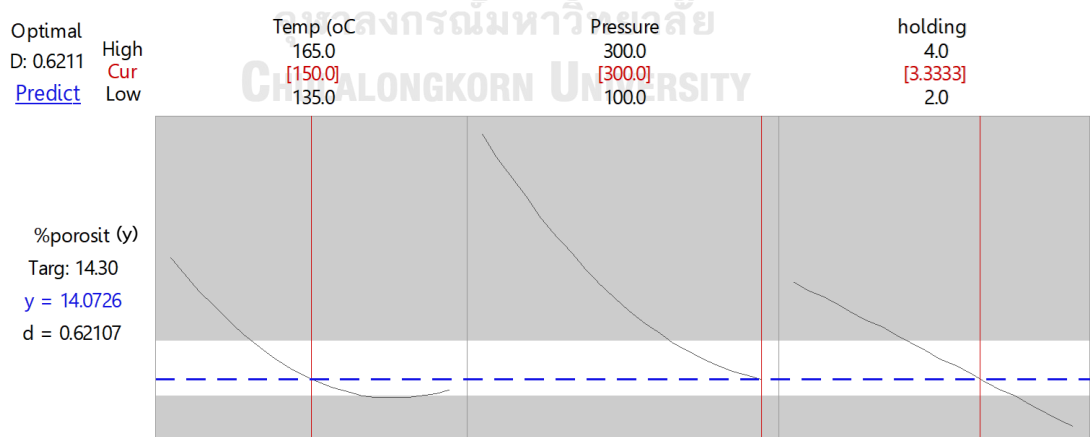
ปริมาณความเป็นรูพรุนที่กำหนดได้จากหัวข้อ 4.6.1 ถูกนำมาทำการหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน ซึ่งพบว่าภาวะที่จะอัดขึ้นรูปรีออนผ้าเบรกให้มีปริมาณรูพรุนเท่ากับ  $14.3 \pm 0.6$  % จะต้องกำหนดอุณหภูมิที่ 165 องศาเซลเซียส แรงดันที่ 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเวลาอัดที่ประมาณ 2.43 นาที (146 วินาที) ในกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน (รูปที่ 4.24)

ในปัจจุบันทางบริษัทมีการกำหนดภาวะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดัน 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และใช้เวลาอัด 3.33 นาที (200 วินาที) ซึ่งภาวะในปัจจุบันก็สามารถผลิตผ้าเบรกที่มีความเป็นรูพรุนในช่วงที่กำหนดอยู่แล้ว (14.07 %) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าภาวะอัดขึ้นรูปรีออนในปัจจุบันไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงก็ได้ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาและกำลังการผลิตของภาวะการอัดขึ้นรูปรีออนเดิมกับภาวะอัดขึ้นรูปรีออนใหม่ในตารางที่ 4.20 และ 4.21 แสดงเห็นว่าภาวะการอัดขึ้นรูปรีออนใหม่ใช้เวลาในการอัดที่น้อยกว่า 54 วินาที/แม่พิมพ์ โดยใน 1 วัน พนักงานทำงานทั้งหมด 8 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 28,800 วินาที และใน 1 แม่พิมพ์ สามารถอัดขึ้นรูปผ้าเบรกได้ 4 ชิ้น ดังนั้นเวลาการอัดที่ลดลงจึงทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้วันละ 21 แม่พิมพ์ หรือผลิตได้เพิ่มขึ้นวันละ 84 ชิ้น และเมื่อนำมาคำนวณเป็นกำลังการผลิตต่อเดือน (พิจารณาการทำงาน 26 วันต่อเดือน) พบว่าภาวะการอัดขึ้นรูป

ร่อนใหม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ 546 แม่มพิมพ์/เดือน หรือคิดเป็น 2,184 ชิ้น/เดือน แต่ทั้งนี้ก่อนจะนำภาวะใหม่ไปใช้งาน จำเป็นต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ก่อนว่าใช้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้เวลาอัดลดลงนั้นส่งผลต่อต้นทุนการผลิตมากน้อยเพียงใด เช่น การใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิ เป็นต้น ระยะเวลาในการปรับอุณหภูมิขึ้นหรือลงเมื่อแผนการผลิตมีการเปลี่ยนสูตรผ้าเบรกระหว่างวัน (ปัจจุบันทุกสูตรผ้าเบรกรใช้อุณหภูมิการอัดที่ 150 องศาเซลเซียส) ซึ่งระยะเวลาการรอให้อุณหภูมิเพิ่มหรือลดนั้นต้องใช้เวลาและอาจกระทบต่อกำลังการผลิตได้เช่นกัน จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสุดท้ายแล้วนอกจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Quality) ยังต้องพิจารณาถึงต้นทุนการผลิต (Cost) และระยะเวลาในการผลิต (Delivery) เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าและผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากที่สุด



รูปที่ 4.24 ภาวะในกระบวนการอัดขึ้นรูปร่อนที่เหมาะสม



รูปที่ 4.25 ภาวะกระบวนการอัดขึ้นรูปร่อนปัจจุบันของโรงงาน

ตารางที่ 4.20 การเปรียบเทียบเวลาการอัดขึ้นรูปรีออนระหว่างภาวะเดิมและภาวะใหม่

Conditions	Time/mold (sec)			
	Breathing cycle	Holding time	Manpower operation	Total time
Old	42	200	60	302
New	42	146	60	248
New-Old	-	54	-	54

ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตที่ผลิตได้ระหว่างภาวะเดิมและภาวะใหม่

Conditions	Production capacity			
	No. of molds/day	No. of pads/day	No. of molds/month	No. of pads/month
Old	95	380	2,470	9,880
New	105	420	3,016	12,064
New-Old	10	40	546	2,184

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาอัด ต่อสมบัติทางกายภาพ (ความเป็นรูพรุน) และเชิงกล (สภาพอัดตัวได้ มอดุลัส และความแข็ง) โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อศึกษาความเหมาะสมของสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นผลตอบในแบบจำลอง ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ รวมถึงการสันด้วยความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก ซึ่งส่งผลต่อการเกิดเสียงจากการเบรกโดยตรง และทำการวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่สามารถลดโอกาสการเกิดเสียงของผ้าเบรกได้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการออกแบบการทดลอง อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซินซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดติดในผ้าเบรก โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพินอลิเกรซินด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ และพบว่าช่วงอุณหภูมิ 135-165 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่พินอลิเกรซินเริ่มเกิดปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยามากที่สุดตามลำดับ ดังนั้นช่วงอุณหภูมินี้จึงถูกกำหนดเป็นอุณหภูมิที่ใช้ทดลองอัดขึ้นรูปร้อน ผ้าเบรกถูกนำไปอัดขึ้นรูปตามการออกแบบการทดลองบล็อกซ์แบบแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย และทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อสร้างแบบจำลองและศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความเป็นรูพรุน และสมบัติเชิงกล ได้แก่ สภาพอัดตัวได้ มอดุลัส และความแข็ง พบว่าปัจจัย (ตัวแปร) ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพอัดตัวได้มากที่สุด คือ เวลาอัด อุณหภูมิ และแรงดัน ตามลำดับ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นรูพรุนมากที่สุด คือ แรงดัน อุณหภูมิ และเวลาอัดตามลำดับ ในขณะที่มอดุลัสและความแข็งได้รับผลกระทบจากปัจจัยเหมือนกันเพียง 2 ปัจจัย ได้แก่ เวลาอัดและอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อนส่งผลให้สภาพอัดตัวได้และความเป็นรูพรุนลดลง ในขณะที่ทำให้มอดุลัสและความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มแรงดันนั้นส่งผลให้ความเป็นรูพรุนลดลง แต่ทำให้สภาพอัดตัวได้ มอดุลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความอัดแน่นระหว่างสารต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลและความสามารถในการไหลของเรซินที่แตกต่างกันในแต่ละภาวะการอัดขึ้นรูปร้อน และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า (adjusted  $R^2$ ) พบว่าความเป็นรูพรุนมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นผลตอบในแบบจำลองมากที่สุด

เนื่องจากความถี่ธรรมชาติเป็นค่าที่บ่งบอกว่าเมื่อผ้าเบรกถูกกระตุ้นจนเกิดการสั่นแล้วจะทำให้เกิดเสียงและการสั่นขึ้นที่ความถี่เท่าไรบ้าง หรือกล่าวได้ว่าความถี่ธรรมชาติเป็นสมบัติที่ส่งผลต่อการเกิดเสียงโดยตรง

ดังนั้นจึงนำความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกร่วมทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ และพบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติสภาพอัดตัวได้และมอดุลัส มอดุลัสและความแข็ง มอดุลัสและความเป็นรูพรุน ความแข็งและความเป็นรูพรุน มอดุลัสและความถี่ธรรมชาติ รวมถึงความเป็นรูพรุนและความถี่ธรรมชาติ ซึ่งพบว่ามอดุลัสและความเป็นรูพรุนที่ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติโดยตรง ดังนั้นแบบจำลองของความเป็นรูพรุนจึงมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งสมการถดถอยอันดับสองที่ได้จากแบบจำลองนั้นแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ร้อนกับความถี่ธรรมชาติของความเป็นรูพรุน ดังสมการข้างล่างนี้ (สมการที่ 5.1)

$$\begin{aligned} \%porosity = & 208.1 - 2.013 A - 0.0711 B - 12.74 C + 0.00555 A^2 \\ & + 0.000108 B^2 + 0.0740 AC \end{aligned} \quad (5.1)$$

- เมื่อ
- A คือ อุณหภูมิการอัด (องศาเซลเซียส)
  - B คือ แรงดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
  - C คือ เวลาอัด (นาที)

นอกจากนี้ผลการเปลี่ยนแปลงความเป็นรูพรุนจากการปรับภาวะถูกยืนยันด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำสูง

เพื่อที่จะหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจึงกำหนดความเป็นรูพรุนที่ทำให้ผ้าเบรกมีโอกาสที่จะเกิดเสียงจากการเบรคน้อยที่สุด โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกและจากเบรก ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกและจานเบรกที่ต่างกันมากกว่าจะมีโอกาสเกิดเสียงน้อยกว่า ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าผ้าเบรกที่มีความเป็นรูพรุนที่  $14.3 \pm 0.6$  % มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดเสียงจากการเบรคน้อยที่สุด และเมื่อนำค่าความเป็นรูพรุนนี้มาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองและได้ภาวะของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส แรงดัน 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเวลาอัด 2.43 นาที โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนเดิมของบริษัทพบว่าภาวะเดิมก็สามารถอัดขึ้นรูปแล้วได้ผ้าเบรกที่มีความเป็นรูพรุนเป็นไปตามที่กำหนดเหมือนกัน เพียงแต่ภาวะใหม่ทำให้ใช้เวลาในการผลิตลดลงและสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ 2,184 ชิ้น/เดือน แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งอาจกระทบต่อต้นทุนการผลิต และเนื่องจากปัจจุบันโรงงานใช้อุณหภูมิการผลิตเท่ากันทุกสูตรผ้าเบรก ดังนั้นระยะเวลาในการรออุณหภูมิเพิ่มหรือลดเมื่อมีการเปลี่ยนสูตรการผลิตระหว่างวันก็อาจกระทบต่อกำลังการผลิตได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์ทั้งคุณภาพ ต้นทุน และเวลาการผลิตอย่างละเอียดก่อนนำภาวะใหม่ไปใช้งานอีกครั้งหนึ่ง

## 5.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. สมการที่ได้จากแบบจำลองของทุกสมมติที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าสมบัติ หรือหาภาวะที่เหมาะสมได้กับผ้าเบรกสูตรเคมีเดียวเท่านั้น เนื่องจากแต่ละสูตรเคมีมีปริมาณและสมบัติของพินอลิกเรซินที่ต่างกัน ดังนั้นภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนย่อมต่างกันด้วย

2. อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์มีการแปรผันสูง ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดทั้งแม่พิมพ์จึงทำได้ค่อนข้างยาก

3. ค่าความเป็นรูพรุนที่เหมาะสมที่กำหนดในงานวิจัยนี้ใช้ได้กับผ้าเบรกในสูตรและรุ่นที่ทำการทดลองเท่านั้น เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของงานเบรกและผ้าเบรกแต่ละสูตร แต่ละรุ่น มีความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการจะนำความถี่ของงานเบรกและผ้าเบรกมาเปรียบเทียบกันจะต้องทำการทดสอบให้ได้ค่าความถี่ที่ถูกต้อง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังนั้นจึงควรทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันว่าผลการทดสอบและแบบจำลองที่ได้นั้นมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ๆ

2. การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาสมการทำนายและหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นหากต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการกับสมบัติต่าง ๆ อย่างชัดเจนและละเอียดมากขึ้น ควรทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design)

3. ควรนำผ้าเบรกไปทดสอบด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งเป็นเครื่องจำลองการเบรกเพื่อนำผลทดสอบประสิทธิภาพทั้งด้านการเกิดเสียง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงมาทำการวิเคราะห์และยืนยันผลเพื่อให้ผลการทดลองเกิดความแม่นยำมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] J.D. Power, Vehicle dependability study: Top 10 problems in 3-year-old vehicles, 2014. <http://www.jdpower.com/cars/articles/jd-power-studies/vehicle-dependability-study-top-10-problems-3-year-old-ve>. (Accessed 23/07/ 2018).
- [2] V.C. Agency, Cars and noise, 2018. <http://www.dft.gov.uk/vca/fcb/cars-and-noise.asp>. (Accessed 23/07/ 2018).
- [3] R. Irle, Global Plug-in Sales for the 1st Half of 2018, 2018. <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>. (Accessed 23/07/ 2018).
- [4] D. Aleksendrić, A. Senatore, Optimization of manufacturing process effects on brake friction material wear, Journal of composite materials 46 (2012).
- [5] R. Ertan, N. Yavuz, An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials, Wear 268 (2010) 1524-1532.
- [6] Y.W. Peng Cai, Tingmei Wang, Qihua Wang, Effect of resin on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials, Tribological international 87 (2015).
- [7] U.S. Hong, S.L. Jung, K.H. Cho, M.H. Cho, S.J. Kim, H. Jang, Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices, Wear 266 (2009).
- [8] A.P. Rusdja, E. Surojo, N. Muhayat, W.W. Raharjo, Effect of gas release in hot molding on flexural strength of composite friction brake, 2018.
- [9] M. Makrahy, N. Ghazaly, A. Moaaz, Effect of compressibility of brake friction materials on vibration occurrence, 11 (2017).
- [10] Wikipedia, Brake pad, 2018. [https://en.wikipedia.org/wiki/Brake\\_pad](https://en.wikipedia.org/wiki/Brake_pad). (Accessed 27/02/ 2019).
- [11] D. Aleksendrić, P. Carlone, Manufacturing of brake friction materials, Soft computing in design and manufacturing of composite material, Elsevier Ltd.2015, pp. 27-36.
- [12] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, วัสดุเสียดทาน องค์ประกอบ และหน้าที่, คอมแพคอินเตอร์เนชันแนล (1994) จำกัด, 2548.
- [13] ช่างเอก, เรื่องของผ้าเบรก, 2015. <https://www.dailynews.co.th/article/298963>. (Accessed 27/02/ 2019).
- [14] Ling, พื้นฐานเกี่ยวกับเนื้อผ้าเบรก. <https://www.taradfilter.com/brake-lining-basic/>. (Accessed 27/02/ 2019).
- [15] R.C. Dante, Organic bound materials, Handbook of Friction Materials and their

Applications, Elsevier Ltd.2016, pp. 30-42.

[16] R.C. Dante, Binder and organic materials, Handbook of Friction Materials and their Applications, Elsevier Ltd.2016, pp. 135-142.

[17] Wikipedia, Hexamethylenetetramine, 2019.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Hexamethylenetetramine>. (Accessed 25/02/ 2019).

[18] A.I. Standard, Guideline specifications for replacement brake lining assemblies and drum brake linings for power-driven vehicles and their trailers The automotive research association of India, Pune, India, 2009, pp. 1-35.

[19] ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, การวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือนเบื้องต้น.

[http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103433%20Intro%20Mech%20Vib/documents/C\\_h8\\_Introduction%20to%20vibration%20measurement%20and%20signal%20processing.pdf](http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103433%20Intro%20Mech%20Vib/documents/C_h8_Introduction%20to%20vibration%20measurement%20and%20signal%20processing.pdf).

(Accessed 27/02/2019).

[20] B. Kjær, Accelerometers, 2019. <https://www.bkvibro.com/en/products/vibration-sensors/accelerometers.html>. (Accessed 27/02/ 2019).

[21] J.M. Group, Impact Hammers, 2019.

<https://www.johnmorriscgroup.com/AU/Results?division=Industrial&tier1=Impact%20Hammers>.

(Accessed 27/02/ 2019).

[22] G.H. James, T.T. Cai, V.A. Fogt, R.L. Wilson, Extraction of Modal Parameters From Spacecraft Flight Data, 2011.

[23] J. Antony, Fundamentals of Design of Experiments, Design of Experiments for Engineers and Scientists (Second Edition), Elsevier Ltd.2014, pp. 7-17.

[24] J. Antony, A Systematic Methodology for Design of Experiments, Design of Experiments for Engineers and Scientists (Second Edition), Elsevier Ltd.2014, pp. 35-50.

[25] S.R. Montoro, S.F. Medeiros, A.M. Santos, M.B. Silva, M.L. Tebaldi, Application of 2K Experimental Design and Response Surface Methodology in the Optimization of the Molar Mass Reduction of Poly (3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate) (PHBV), in: M.B. Silva (Ed.), Design of Experiments - Applications, Intech2013, pp. 94-119.

[26] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandão, E.G.P.d. Silva, L.A. Portugal, P.S.d. Reis, A.S. Souza, W.N.L.d. Santos, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, Analytica Chimica Acta 597 (2007) 179-186.

[27] M. Mäkelä, Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review Energy Conversion and Management 151 (2017) 630-640.

[28] อภินันท์ แต่ตรรกูล, การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก: กรณีศึกษาชิ้นส่วนเครื่องบิน,



วิศวกรรมอุตสาหการ, ธรรมศาสตร์, 2553.

[29] พรรณรวิชัย โยสุข, การศึกษาความขรุขระผิวและแรงตัดร่วมกับอุณหภูมิในการตัดสำหรับกระบวนการกัดหัวบอลโดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง, วิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์, 2557.

[30] F. Rossi, V. Mirtchev, Response Surface (Optimization) Experimental Designs, Statistics for Food Scientists: Making Sense of the Numbers, Elsevier Inc.2016, pp. 125-147.

[31] Minitab, Effects plots for Analyze Response Surface Design.

<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>. (Accessed 20/03/ 2019).

[32] Minitab, Methods and formulas for the effects plots in Analyze Variability. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-variability/methods-and-formulas/effects-plots/#pareto-chart>. (Accessed 20/03/ 2019).

[33] พงระภี ศรีสวัสดิ์, การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis).

[http://www.academia.edu/10607150/SPSS\\_%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB\\_%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%96%E0%B8%94%E0%B8%96%E0%B8%AD%E0%B8%A2\\_Regression\\_Analysis\\_](http://www.academia.edu/10607150/SPSS_%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB_%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%96%E0%B8%94%E0%B8%96%E0%B8%AD%E0%B8%A2_Regression_Analysis_). (Accessed 27/02/ 2019).

[34] Y.C. Kim, M.H. Cho, S.J. Kim, H. Jung, The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials, Wear 264 (2008) 204-210.

[35] J. Abutua, S.A. Lawala, M.B. Ndalimana, R.A. Lafia-Aragab, O. Adedipea, I.A. Choudhuryc., Effects of process parameters on the properties of brake pad developed from seashell as reinforcement material using grey relational analysis, Engineering Science and Technology, an International Journal 21 (2018) 787-797.

[36] P. Cai, Y. Wang, T. Wang, Q. Wang, Effect of resin on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials, Tribological international 87 (2015).

[37] S.J. Kim, K.S. Kim, H. Jang, Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method Journal of Materials Processing Technology 136 (2003) 202-208.

[38] S.j. Lee, J.S. Jeon, J.S. Jeong, B.k. Park, S.W. Kim, S.W. Kim, S.K. Rhee, W.G. Lee, Y.s. Cho, Disc Brake Squeal vs. Disc Pad Compressibility-Caliper Stiffness Interactions: Low-Frequency Squeal and High-Frequency Squeal vs. Differential Pad Wear, SAE Technical Paper 2017-01-2528 (2017).

[39] ปิยวรรณ สุรัญชานาจิรสกุล, เทคโนโลยีวัสดุ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 1997, pp. 78-81.

- [40] มหาวิทยาลัยมหิดล, เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [41] T. Singh, A. Patnaik, R. Chauhan, P. Chauhan, Selection of brake friction materials using hybrid analytical hierarchy process and vise kriterijumska optimizacija kompromisno resenje approach, *Polymer Composites* 39 (2018) 1655-1662.
- [42] M.T. Jr, S.N.Y. Gerges, R. Jordan., Reduction of Squeal Noise from Disc Brake Systems Using Constrained Layer Damping *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 26 (2004) 340-348.
- [43] R. Steege, F. Marx, A New Approach to Material Compressibility of Brake Pads, SAE Technical Paper 2008-01-2572 (2008).
- [44] อัจฉราพร ศรีอ่อน, หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง, เทคโนโลยีวัสดุ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2016, pp. 78-80.
- [45] CAE, Scanning electron microscopes, 2019.
- [46] R.C. Dante, Effect of production parameters on the material performances, *Handbook of Friction Materials and their Applications*, Elsevier Ltd.2016, pp. 55-65.
- [47] D.N. Ramasami, G. Rejdych, T. Chancellier, T. Pasquet, Stiffness distributions of brake pad friction materials using static and dynamic measurement techniques, *Journal of Automobile Engineering* 229 (2015) 735-746.
- [48] Minitab, Interpret the key results for Analyze Factorial Design.  
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/key-results/>. (Accessed 20/03/ 2019).
- [49] R.J. Canali, A. Tamagna, Evaluation of properties of disc and pad materials and their relation with disc brake noise - An experimental investigation, SAE Technical Paper 2002-01-2604 (2002).
- [50] I. Mutlu, I. Sugözü, A. Keskin, The effects of porosity in friction performance of brake pad using waste tire dust, *Polímero* 25 (2015) 440-446.
- [51] J. Kovacik, Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials, *Journal of Materials Science Letters* 18 (1999) 1007-1010.
- [52] S. Tousi, A.M. Balvedi, Brake damper selection via model analysis and acoustical testing, *Vehicle Noise and Vibration*, Wiley2002, pp. 84-94.
- [53] ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, การสั่นสะเทือนแบบอิสระ.  
[http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103433%20Intro%20Mech%20Vib/documents/C\\_h3\\_Free%20vibration.pdf](http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103433%20Intro%20Mech%20Vib/documents/C_h3_Free%20vibration.pdf). (Accessed 27/2/2019).
- [54] HowStuffWorks.com, Resonance, 2009. <https://science.howstuffworks.com/resonance->

[info.htm](#). (Accessed 11/5/2019).

[55] OpenStaxCollege, Hooke's Law: Stress and Strain Revisited.

<https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/hooks-law-stress-and-strain-revisited/>.

(Accessed 11/5/2019).

[56] Napbrake, Friction coefficient of brake pads, 2018.

<http://www.napbrake.com/2018/02/24/friction-coefficient-brake-pads/>. (Accessed 27/02/2019).

[57] N. Collins, Is this the most unpleasant sound in the world?, 2012.

<https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/9596856/Is-this-the-most-unpleasant-sound-in-the-world.html>. (Accessed 25/03/ 2019).

[58] F. Chen, C.A. Tan, R.L. Quaglia, Disc Brake Squeal Mechanism, Analysis, Evaluation, and Reduction/Prevention, SAE International 2006.

[59] T value table, 2007. <http://www.ttable.org/>. (Accessed 20/03 /2019).





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

### ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผ้าเบรก

#### 1. สมบัติทางกายภาพ

##### 1.1 ความเป็นรูพรุน

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบความเป็นรูพรุน

Run	No.	Weight (g)		S.G.	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Avg. porosity (%)	SD Porosity (%)
		W <sub>air</sub>	W <sub>water</sub>					
1	1	170.47	92.95	2.20	2.86	23.11	22.7	0.4
1	2	170.43	93.61	2.22	2.86	22.43		
1	3	169.76	92.67	2.20	2.86	23.00		
1	4	169.53	93.26	2.22	2.86	22.28		
1	5	170.04	93.15	2.21	2.86	22.68		
2	1	169.58	95.93	2.30	2.86	19.49	19.7	0.1
2	2	170.07	96.07	2.30	2.86	19.64		
2	3	170.20	96.00	2.29	2.86	19.80		
2	4	169.69	95.91	2.30	2.86	19.58		
2	5	169.64	95.74	2.30	2.86	19.74		
3	1	170.16	98.11	2.36	2.86	17.42	17.1	0.7
3	2	169.92	98.37	2.37	2.86	16.96		
3	3	169.76	97.36	2.34	2.86	18.02		
3	4	171.10	99.17	2.38	2.86	16.83		
3	5	169.29	98.58	2.39	2.86	16.29		
4	1	168.90	100.58	2.47	2.86	13.56	13.7	0.2
4	2	169.04	100.34	2.46	2.86	13.97		
4	3	169.22	100.62	2.47	2.86	13.75		
4	4	168.05	99.93	2.47	2.86	13.74		
4	5	169.46	100.96	2.47	2.86	13.50		
5	1	169.42	94.55	2.26	2.86	20.88	23.3	2.9
5	2	169.60	94.10	2.25	2.86	21.46		
5	3	169.83	87.23	2.06	2.86	28.11		
5	4	168.90	92.97	2.22	2.86	22.22		
5	5	169.05	91.50	2.18	2.86	23.78		

Run	No.	Weight (g)		S.G.	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Avg. porosity (%)	SD porosity(%)
		W <sub>air</sub>	W <sub>water</sub>					
6	1	169.96	98.37	2.37	2.86	16.99	16.8	0.4
6	2	170.34	98.90	2.38	2.86	16.63		
6	3	168.78	97.32	2.36	2.86	17.42		
6	4	168.86	98.12	2.39	2.86	16.54		
6	5	169.55	98.55	2.39	2.86	16.50		
7	1	169.13	98.09	2.38	2.86	16.76	16.8	0.5
7	2	169.55	97.82	2.36	2.86	17.35		
7	3	168.69	97.46	2.37	2.86	17.19		
7	4	169.47	98.59	2.39	2.86	16.40		
7	5	170.28	99.28	2.40	2.86	16.14		
8	1	169.82	100.24	2.44	2.86	14.66	14.7	0.5
8	2	169.32	99.42	2.42	2.86	15.30		
8	3	169.14	100.13	2.45	2.86	14.30		
8	4	169.33	100.31	2.45	2.86	14.22		
8	5	169.93	99.87	2.43	2.86	15.19		
9	1	169.04	93.73	2.24	2.86	21.52	21.5	0.2
9	2	169.15	93.94	2.25	2.86	21.36		
9	3	169.32	93.81	2.24	2.86	21.60		
9	4	169.45	94.07	2.25	2.86	21.40		
9	5	169.50	93.77	2.24	2.86	21.74		
10	1	169.28	98.52	2.39	2.86	16.35	16.2	0.1
10	2	169.38	98.80	2.40	2.86	16.09		
10	3	169.22	98.62	2.40	2.86	16.19		
10	4	169.68	99.00	2.40	2.86	16.06		
10	5	169.60	98.70	2.39	2.86	16.36		
11	1	168.67	95.65	2.31	2.86	19.23	19.3	0.1
11	2	169.97	96.51	2.31	2.86	19.10		
11	3	169.03	95.84	2.31	2.86	19.25		
11	4	169.15	95.89	2.31	2.86	19.27		
11	5	169.78	96.09	2.30	2.86	19.44		

Run	No.	Weight (g)		S.G.	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Avg. porosity (%)	SD porosity(%)
		W <sub>air</sub>	W <sub>water</sub>					
10	1	169.28	98.52	2.39	2.86	16.35	16.2	0.1
10	2	169.38	98.80	2.40	2.86	16.09		
10	3	169.22	98.62	2.40	2.86	16.19		
10	4	169.68	99.00	2.40	2.86	16.06		
10	5	169.60	98.70	2.39	2.86	16.36		
11	1	168.67	95.65	2.31	2.86	19.23	19.3	0.1
11	2	169.97	96.51	2.31	2.86	19.10		
11	3	169.03	95.84	2.31	2.86	19.25		
11	4	169.15	95.89	2.31	2.86	19.27		
11	5	169.78	96.09	2.30	2.86	19.44		
12	1	169.26	100.45	2.46	2.86	13.99	14.0	0.3
12	2	168.91	100.28	2.46	2.86	13.95		
12	3	169.57	100.87	2.47	2.86	13.70		
12	4	170.80	101.01	2.45	2.86	14.43		
12	5	169.62	100.88	2.47	2.86	13.72		
13	1	168.89	98.33	2.39	2.86	16.31	15.9	0.3
13	2	169.25	99.02	2.41	2.86	15.74		
13	3	169.33	99.15	2.41	2.86	15.64		
13	4	168.67	98.71	2.41	2.86	15.70		
13	5	169.29	98.86	2.40	2.86	15.96		
14	1	170.53	99.57	2.40	2.86	15.97	16.0	0.1
14	2	169.24	98.62	2.40	2.86	16.21		
14	3	168.95	98.74	2.41	2.86	15.86		
14	4	169.08	98.79	2.41	2.86	15.89		
14	5	169.74	99.20	2.41	2.86	15.86		
15	1	169.61	99.65	2.42	2.86	15.23	15.7	0.4
15	2	170.17	99.87	2.42	2.86	15.36		
15	3	169.03	98.49	2.40	2.86	16.22		
15	4	169.51	99.06	2.41	2.86	15.87		
15	5	168.63	98.63	2.41	2.86	15.77		

## 1.2 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก

Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
1	1	1	2374.85	2358.25	14.38
1	1	2	2349.65		
1	1	3	2350.25		
1	2	1	3574.87	3558.07	14.55
1	2	2	3549.67		
1	2	3	3549.67		
1	3	1	4699.89	4666.69	28.75
1	3	2	4650.09		
1	3	3	4650.09		
1	4	1	5950.32	5916.72	29.10
1	4	2	5899.92		
1	4	3	5899.92		
2	1	1	2425.25	2475.25	43.30
2	1	2	2500.25		
2	1	3	2500.25		
2	2	1	3600.07	3683.27	72.05
2	2	2	3724.87		
2	2	3	3724.87		
2	3	1	4824.70	4891.70	58.03
2	3	2	4924.90		
2	3	3	4925.50		
2	4	1	5950.32	6066.72	100.81
2	4	2	6124.92		
2	4	3	6124.92		



Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
3	1	1	2550.05	2566.65	28.75
3	1	2	2599.85		
3	1	3	2550.05		
3	2	1	3750.08	3774.88	42.96
3	2	2	3824.48		
3	2	3	3750.08		
3	3	1	4975.30	5000.10	43.48
3	3	2	5050.30		
3	3	3	4974.70		
3	4	1	6150.12	6191.52	51.88
3	4	2	6249.72		
3	4	3	6174.72		
4	1	1	2599.85	2616.65	14.55
4	1	2	2625.05		
4	1	3	2625.05		
4	2	1	3775.28	3800.28	24.90
4	2	2	3825.08		
4	2	3	3800.48		
4	3	1	5050.30	5091.70	37.91
4	3	2	5100.10		
4	3	3	5124.70		
4	4	1	6174.72	6216.52	38.23
4	4	2	6249.72		
4	4	3	6225.12		
5	1	1	2350.25	2283.45	115.70
5	1	2	2149.84		
5	1	3	2350.25		

Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
5	2	1	3525.07	3449.87	152.06
5	2	2	3274.87		
5	2	3	3549.67		
5	3	1	4624.89	4508.29	201.96
5	3	2	4275.09		
5	3	3	4624.89		
5	4	1	5850.12	5791.72	146.42
5	4	2	5625.11		
5	4	3	5899.92		
6	1	1	2449.85	2483.25	57.85
6	1	2	2550.05		
6	1	3	2449.85		
6	2	1	3625.27	3708.47	72.05
6	2	2	3750.08		
6	2	3	3750.08		
6	3	1	4774.90	4908.30	115.53
6	3	2	4974.70		
6	3	3	4975.30		
6	4	1	6000.12	6049.92	86.26
6	4	2	6149.52		
6	4	3	6000.12		
7	1	1	2575.25	2583.45	14.73
7	1	2	2600.45		
7	1	3	2574.65		
7	2	1	3825.08	3800.08	43.30
7	2	2	3825.08		
7	2	3	3750.08		

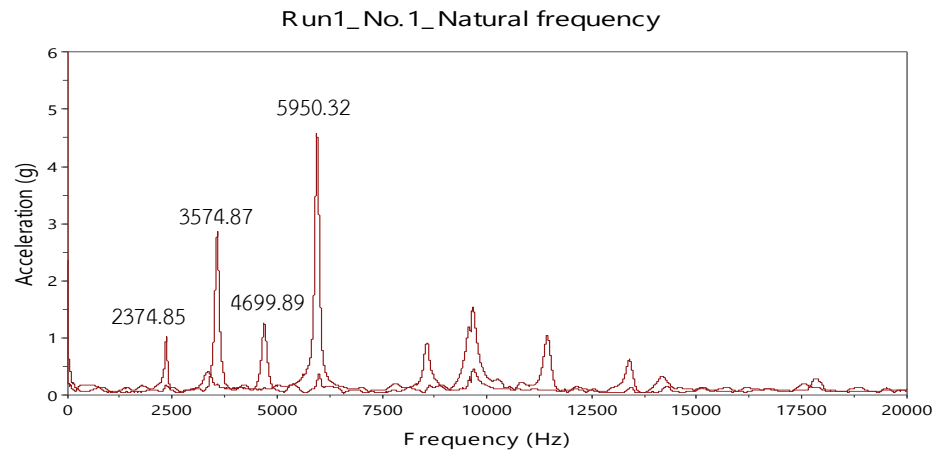
Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
7	3	1	5049.70	5058.30	38.23
7	3	2	5100.10		
7	3	3	5025.10		
7	4	1	6225.12	6225.12	49.80
7	4	2	6274.93		
7	4	3	6175.32		
8	1	1	2625.05	2649.85	24.90
8	1	2	2674.85		
8	1	3	2649.65		
8	2	1	3849.68	3874.88	25.20
8	2	2	3900.08		
8	2	3	3874.88		
8	3	1	5149.90	5175.10	25.20
8	3	2	5200.30		
8	3	3	5175.10		
8	4	1	6274.93	6308.33	38.17
8	4	2	6349.93		
8	4	3	6300.13		
9	1	1	2325.05	2350.05	24.90
9	1	2	2374.85		
9	1	3	2350.25		
9	2	1	3450.07	3508.47	52.12
9	2	2	3550.27		
9	2	3	3525.07		
9	3	1	4599.69	4641.49	38.23
9	3	2	4674.69		
9	3	3	4650.09		

Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
9	4	1	5775.12	5866.52	80.11
9	4	2	5924.52		
9	4	3	5899.92		
10	1	1	2524.85	2533.45	14.38
10	1	2	2550.05		
10	1	3	2525.45		
10	2	1	3699.67	3724.87	25.20
10	2	2	3750.08		
10	2	3	3724.87		
10	3	1	4924.90	4949.90	24.90
10	3	2	4974.70		
10	3	3	4950.10		
10	4	1	6074.52	6108.12	29.10
10	4	2	6124.92		
10	4	3	6124.92		
11	1	1	2500.25	2500.05	24.90
11	1	2	2524.85		
11	1	3	2475.05		
11	2	1	3700.27	4498.68	50.10
11	2	2	3750.08		
11	2	3	3649.87		
11	3	1	4924.90	4543.05	24.90
11	3	2	4950.10		
11	3	3	4900.30		
11	4	1	6100.32	4520.57	38.43
11	4	2	6150.12		
11	4	3	6074.52		

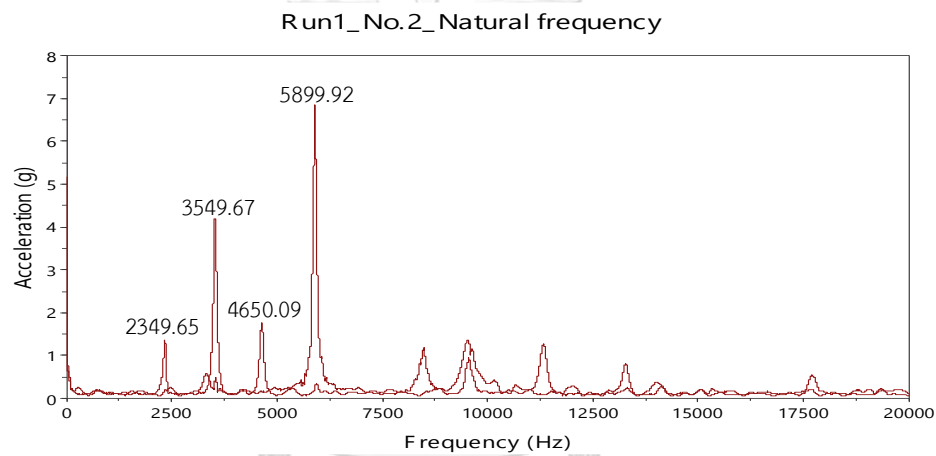
Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
12	1	1	2625.05	4421.34	14.55
12	1	2	2625.05		
12	1	3	2650.25		
12	2	1	3824.48	4540.53	0.35
12	2	2	3825.08		
12	2	3	3825.08		
12	3	1	5099.50	4591.65	25.20
12	3	2	5125.30		
12	3	3	5149.90		
12	4	1	6225.12	4550.63	14.38
12	4	2	6250.33		
12	4	3	6249.72		
13	1	1	2575.25	4409.70	28.41
13	1	2	2624.45		
13	1	3	2575.25		
13	2	1	3799.88	4574.98	24.90
13	2	2	3825.08		
13	2	3	3775.28		
13	3	1	5049.70	4652.47	14.38
13	3	2	5074.90		
13	3	3	5050.30		
13	4	1	6175.32	4607.38	57.68
13	4	2	6274.93		
13	4	3	6174.72		
14	1	1	2575.25	4407.26	14.38
14	1	2	2600.45		
14	1	3	2599.85		

Run	Mode	No.	Frequency (Hz)	Avg. frequency (Hz)	SD frequency (Hz)
14	2	1	3774.68	4666.61	25.20
14	2	2	3825.08		
14	2	3	3799.88		
14	3	1	5049.70	4811.06	29.10
14	3	2	5100.10		
14	3	3	5049.70		
14	4	1	6175.32	4759.98	37.91
14	4	2	6249.72		
14	4	3	6225.12		
15	1	1	2574.65	4395.79	14.38
15	1	2	2599.85		
15	1	3	2575.25		
15	2	1	3774.68	4999.97	0.35
15	2	2	3775.28		
15	2	3	3774.68		
15	3	1	5049.70	5612.51	14.20
15	3	2	5049.70		
15	3	3	5025.10		
15	4	1	6175.32	6183.52	14.20
15	4	2	6199.92		
15	4	3	6175.32		

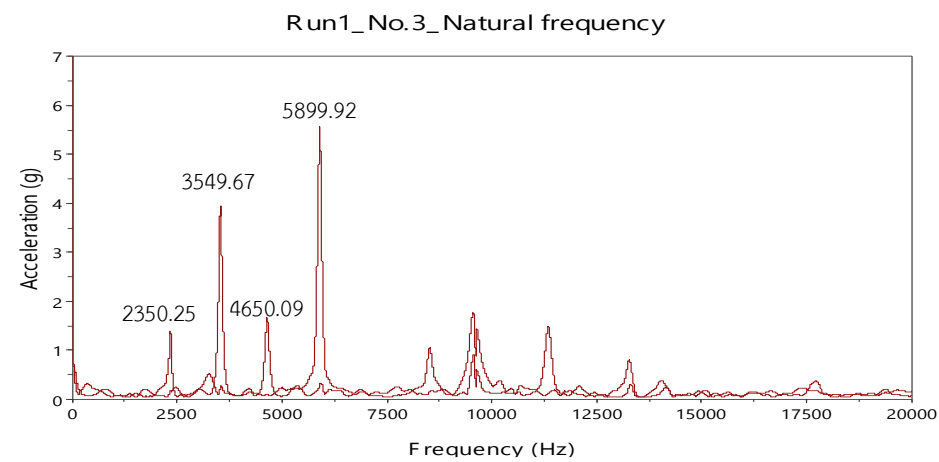
หมายเหตุ ค่าความถี่ธรรมชาติในตารางเป็นค่าที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างความถี่กับความเร่งจากการเคาะผ้าเบรก และนำค่า 4 ความถี่แรกมาทำการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ ก-1 ถึง ก-45



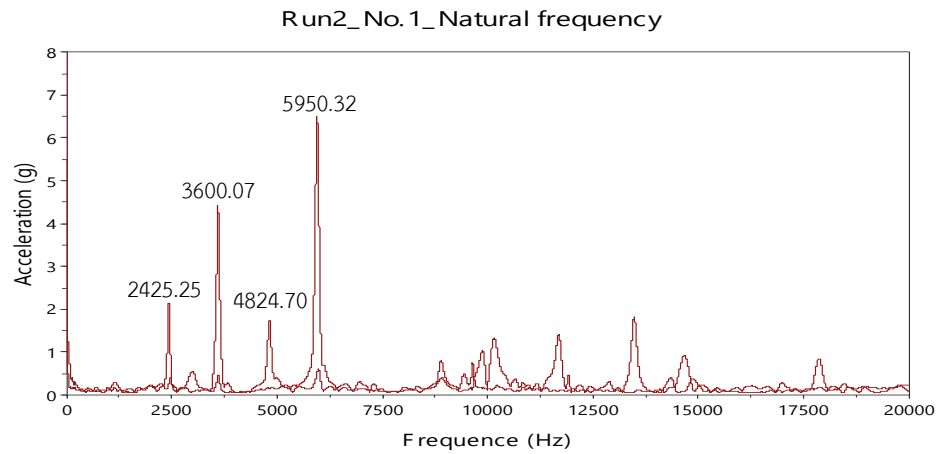
รูปที่ ก-1 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 1 (135 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 1



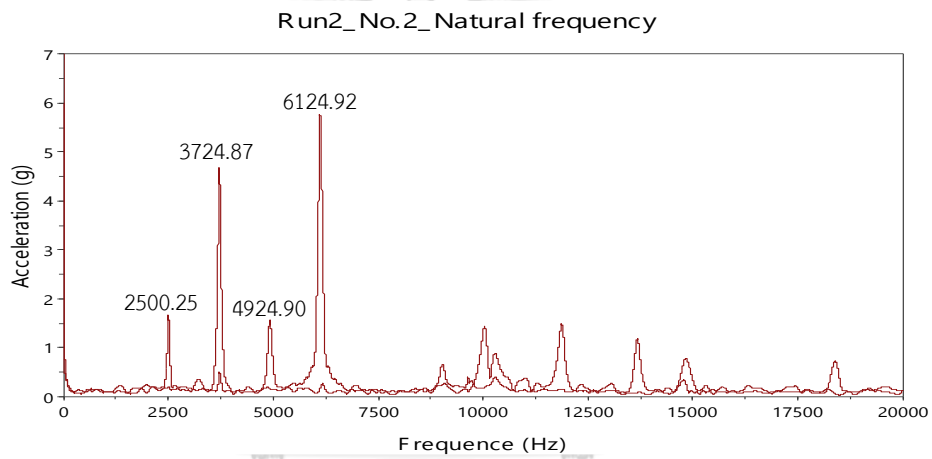
รูปที่ ก-2 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 1 (135 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 2



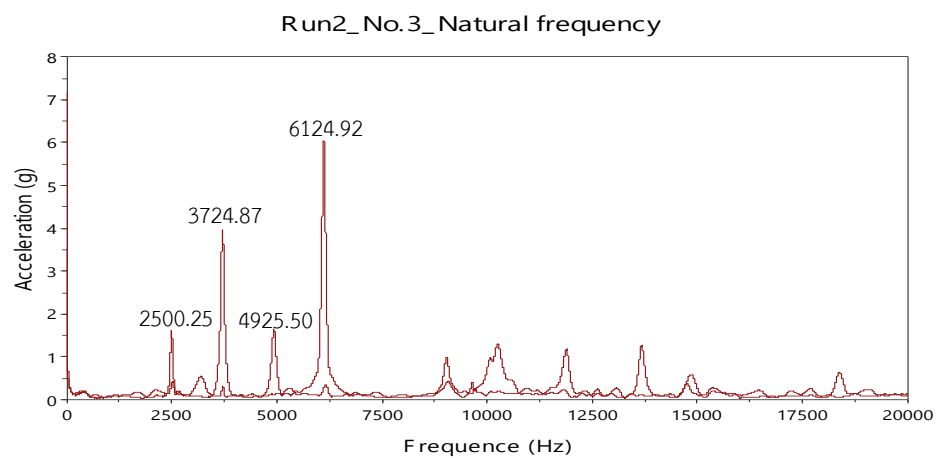
รูปที่ ก-3 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 1 (135 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 3



รูปที่ ก-4 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 2 (165 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 1

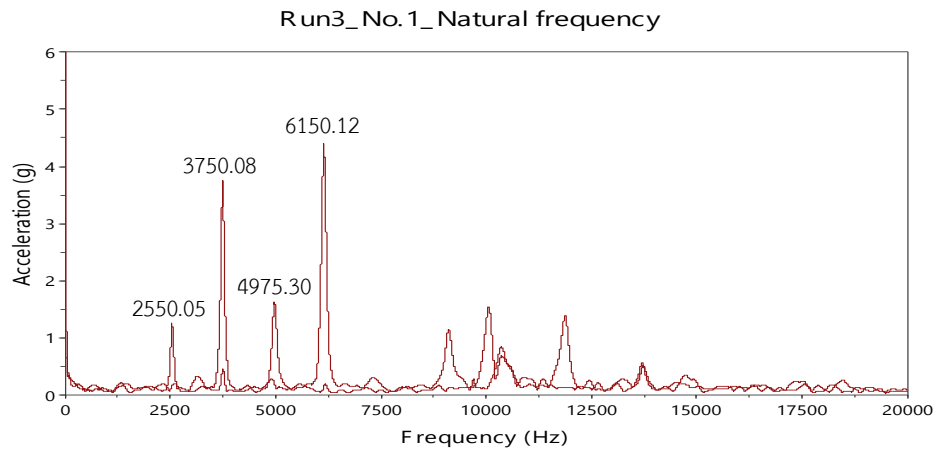


รูปที่ ก-5 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 2 (165 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 2

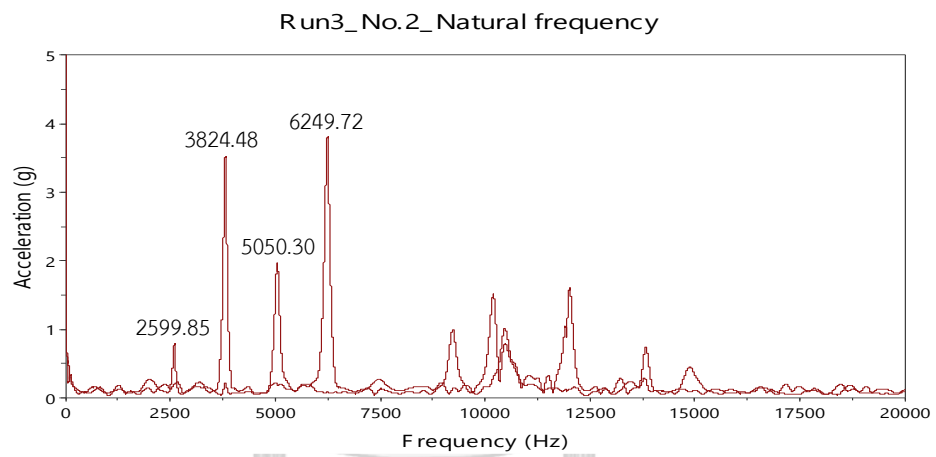


รูปที่ ก-6 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 2 (165 °C, 100 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 3

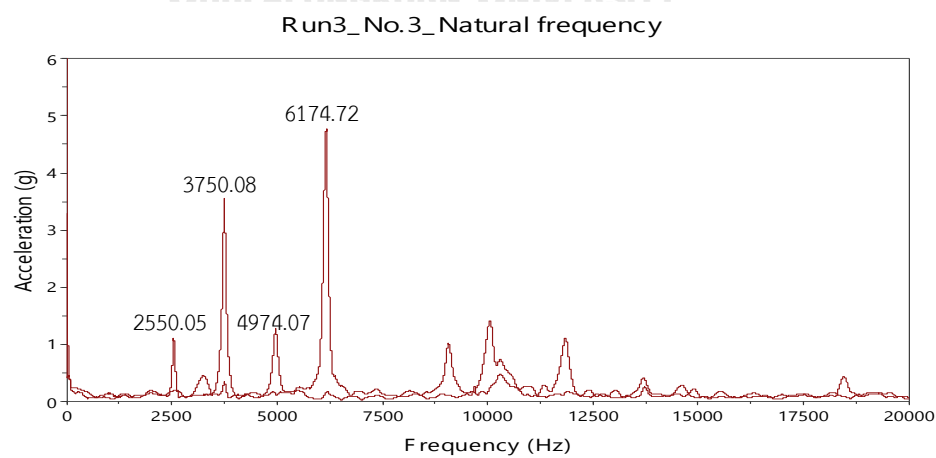




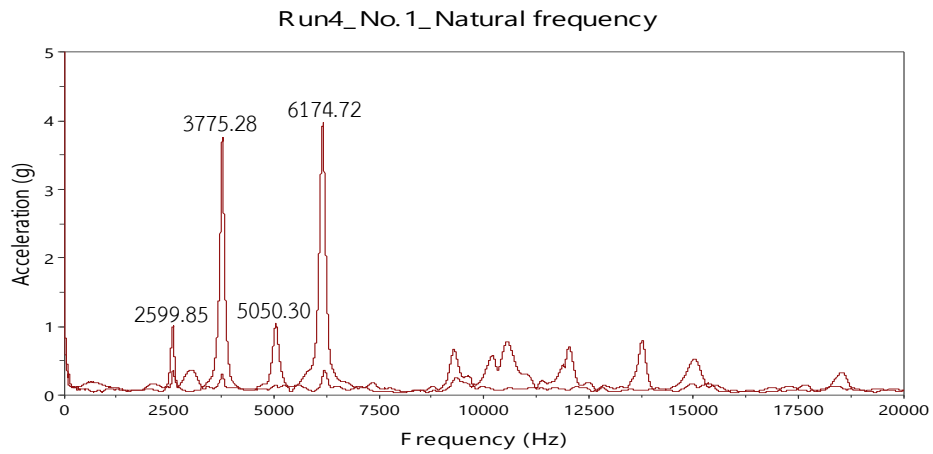
รูปที่ ก-7 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 3 (135 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 1



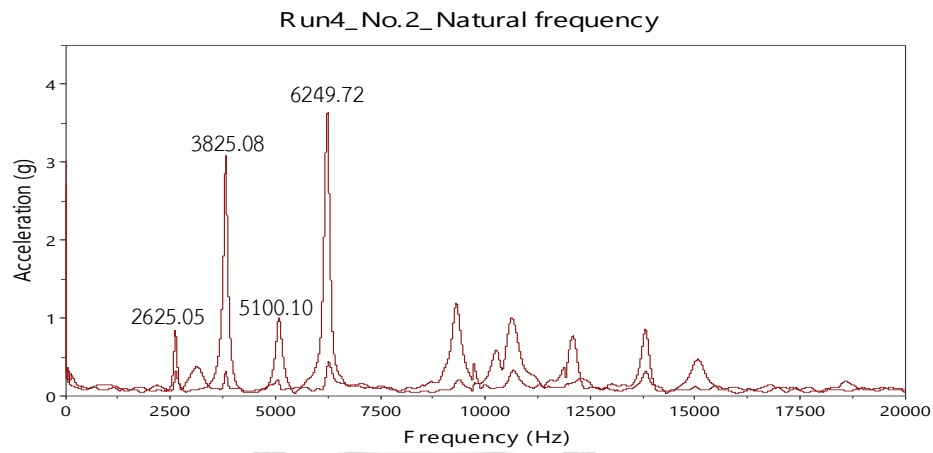
รูปที่ ก-8 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 3 (135 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 2



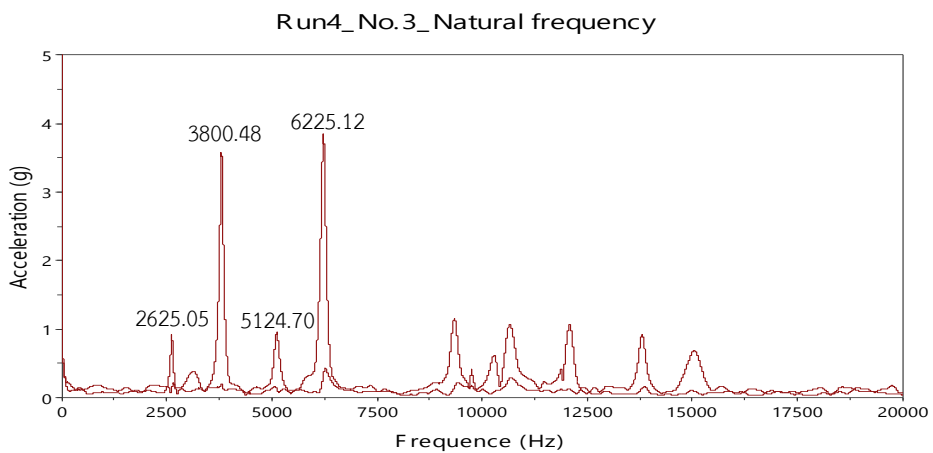
รูปที่ ก-9 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 3 (135 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 3



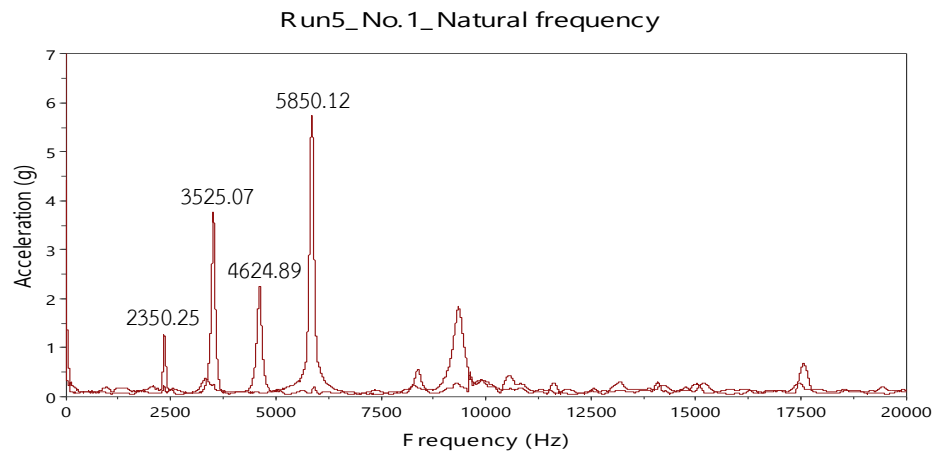
รูปที่ ก-10 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 4 (165 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 1



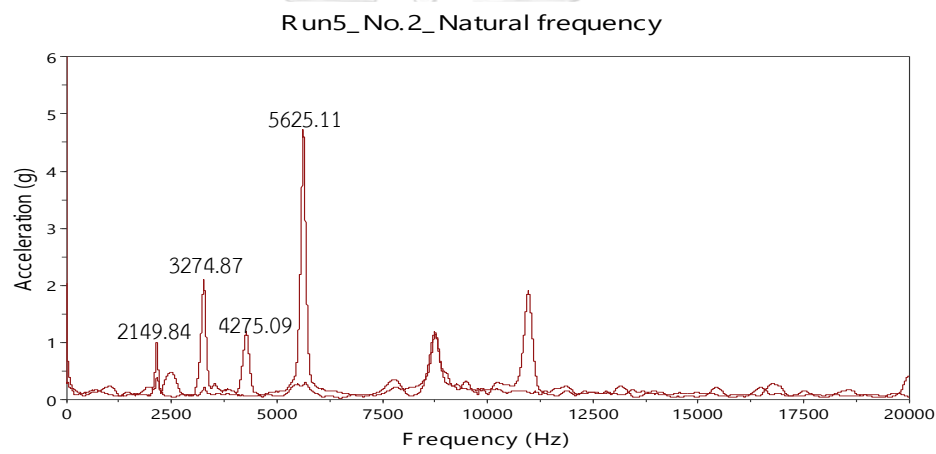
รูปที่ ก-11 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 4 (165 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 2



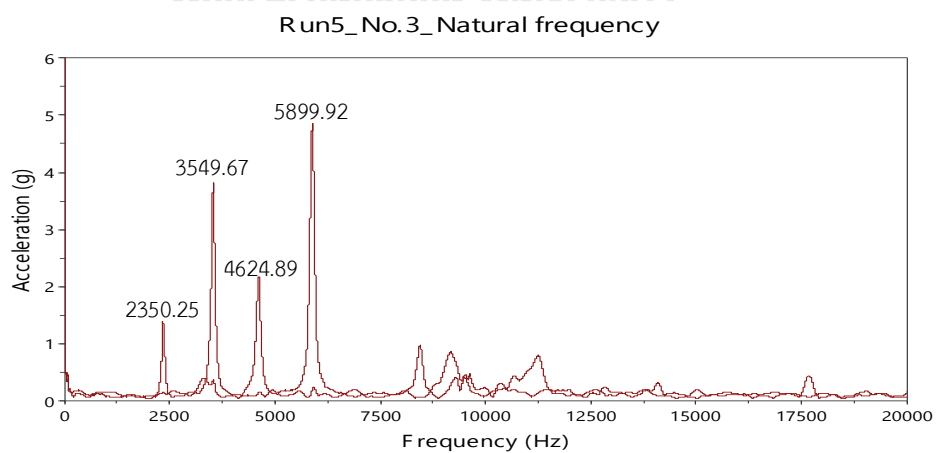
รูปที่ ก-12 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 4 (165 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 3



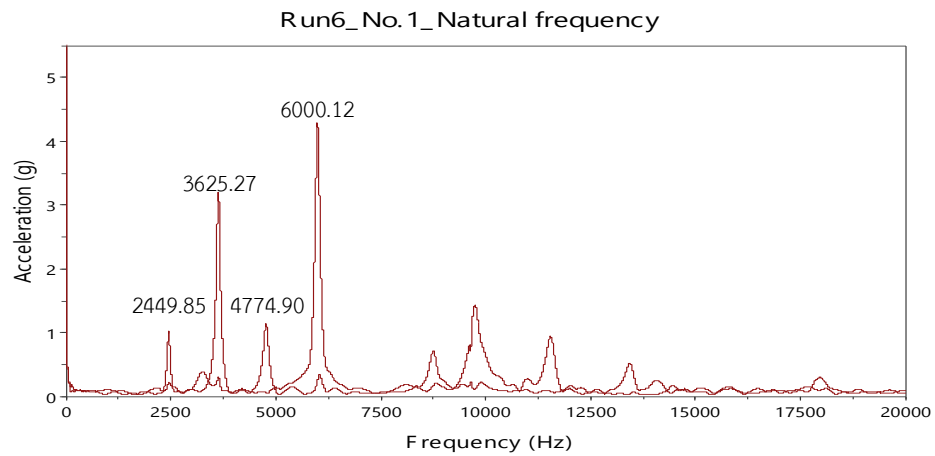
รูปที่ ก-13 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 5 ( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 1



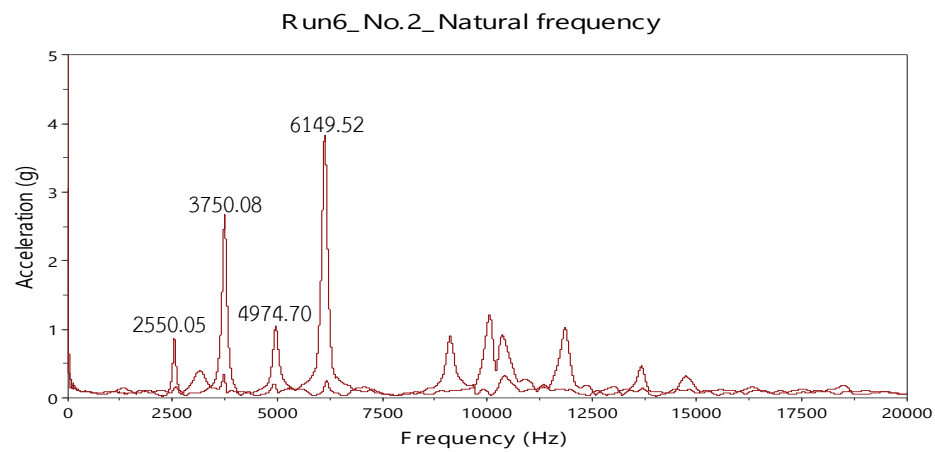
รูปที่ ก-14 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 5 ( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 2



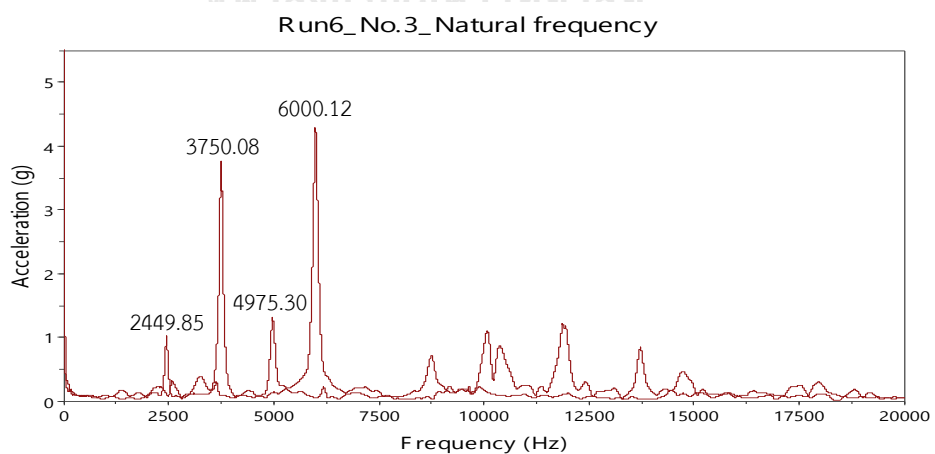
รูปที่ ก-15 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 5 ( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 3



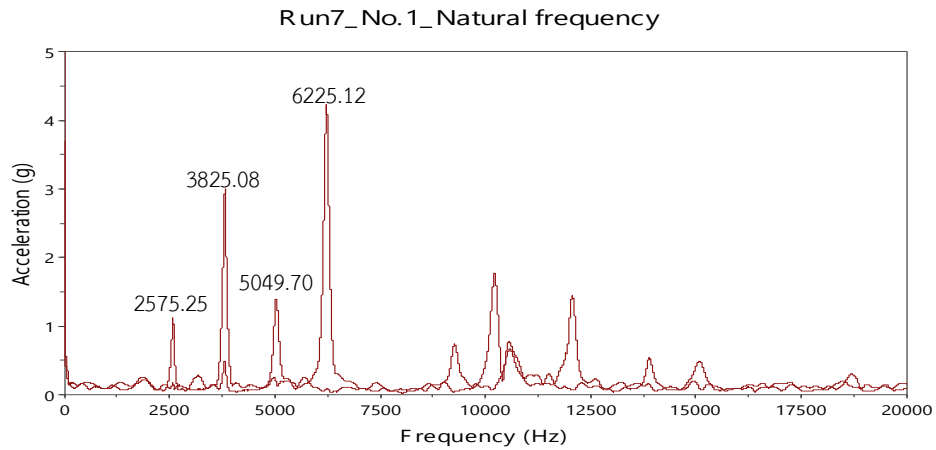
รูปที่ ก-16 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 6 ( $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 1



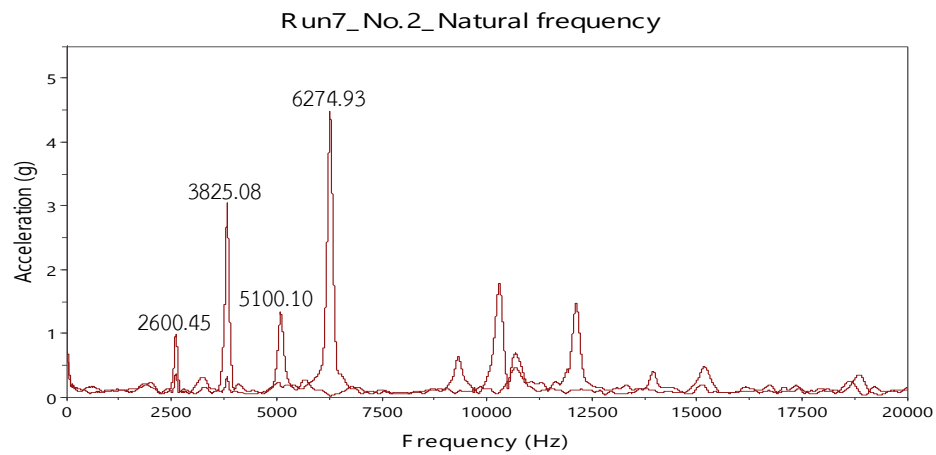
รูปที่ ก-17 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 6 ( $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 2



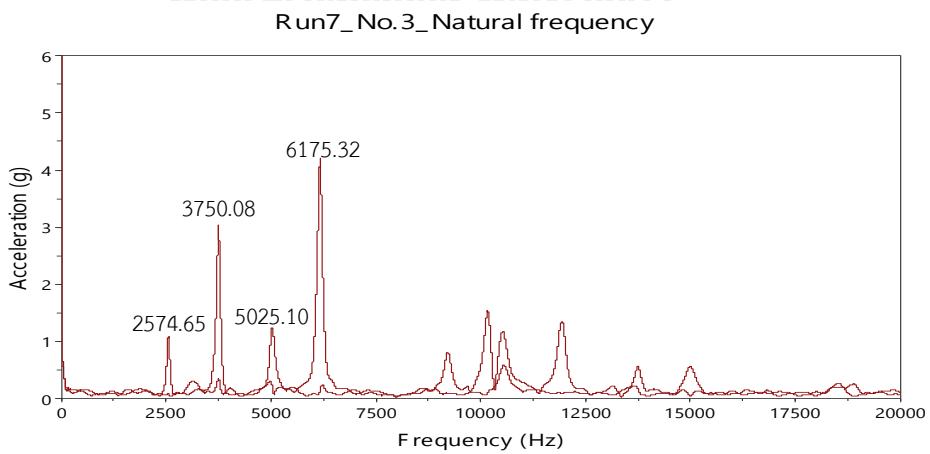
รูปที่ ก-18 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 6 ( $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 3



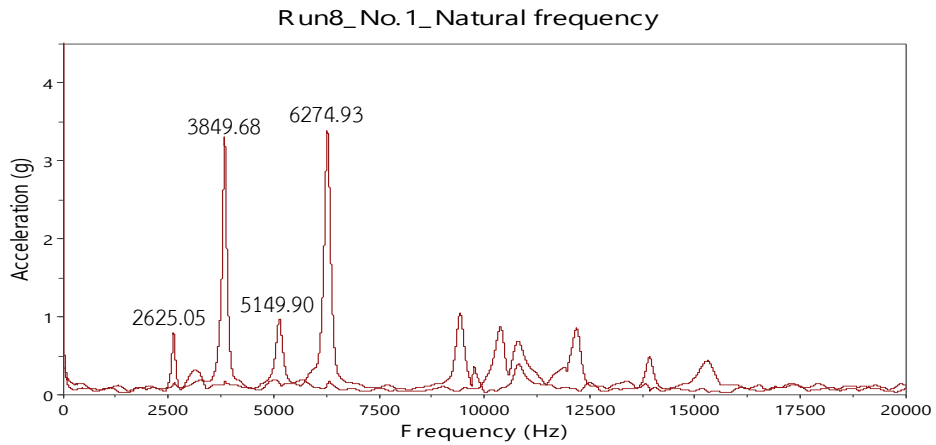
รูปที่ ก-19 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 7 (135 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 1



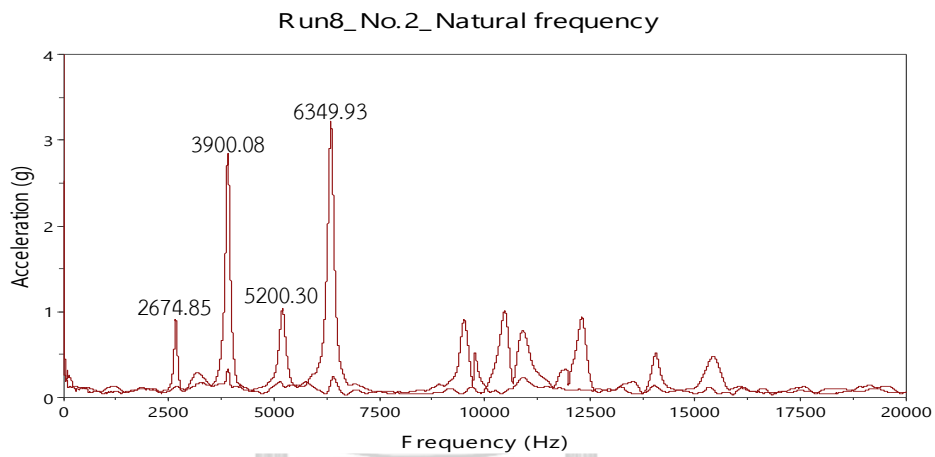
รูปที่ ก-20 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 7 (135 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 2



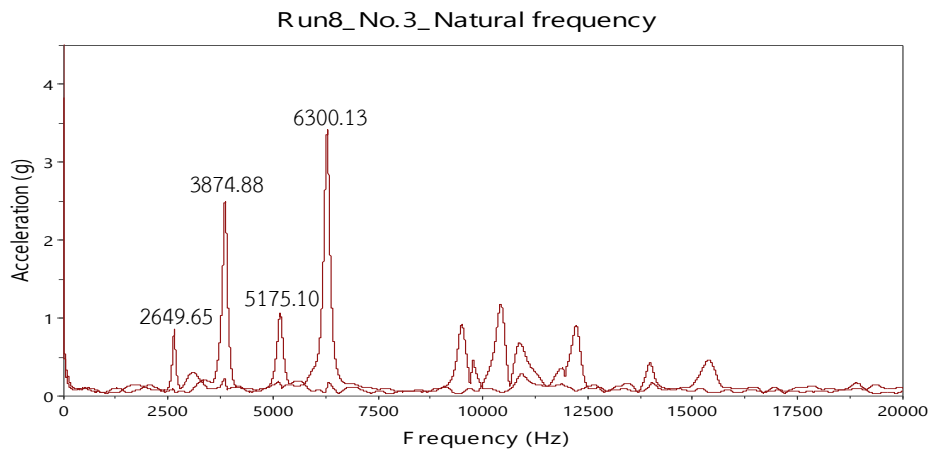
รูปที่ ก-21 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 7 (135 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 3



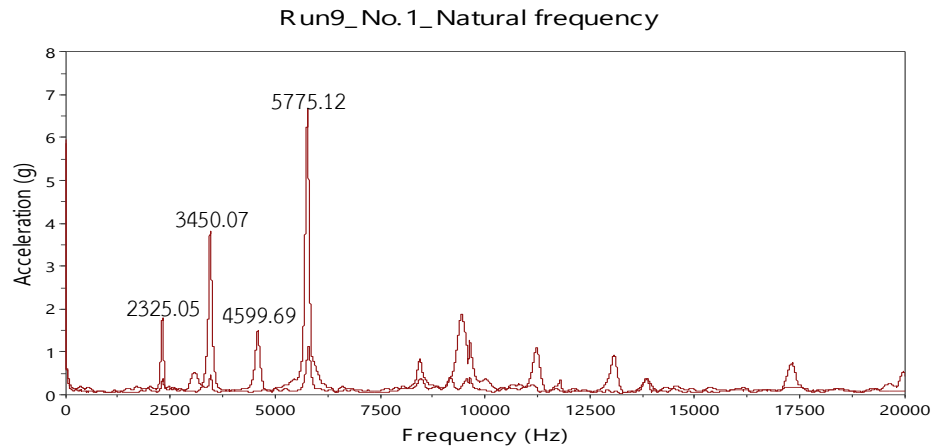
รูปที่ ก-22 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 8 (165 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 1



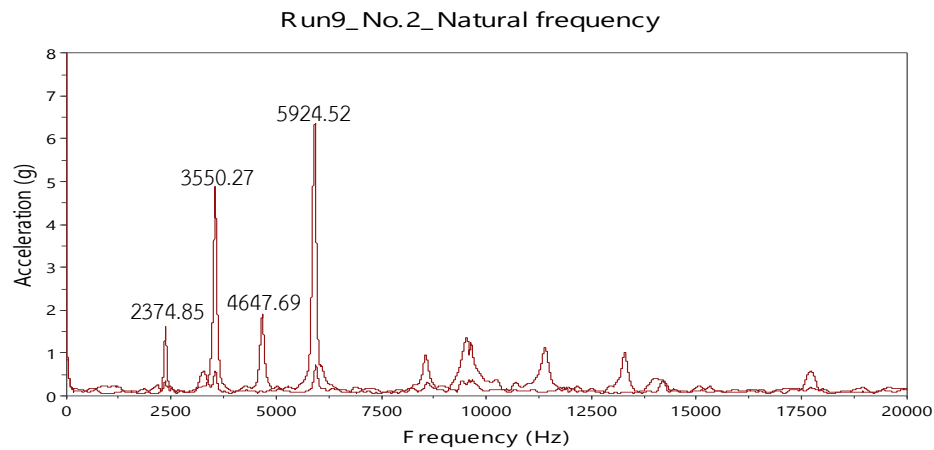
รูปที่ ก-23 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 8 (165 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 2



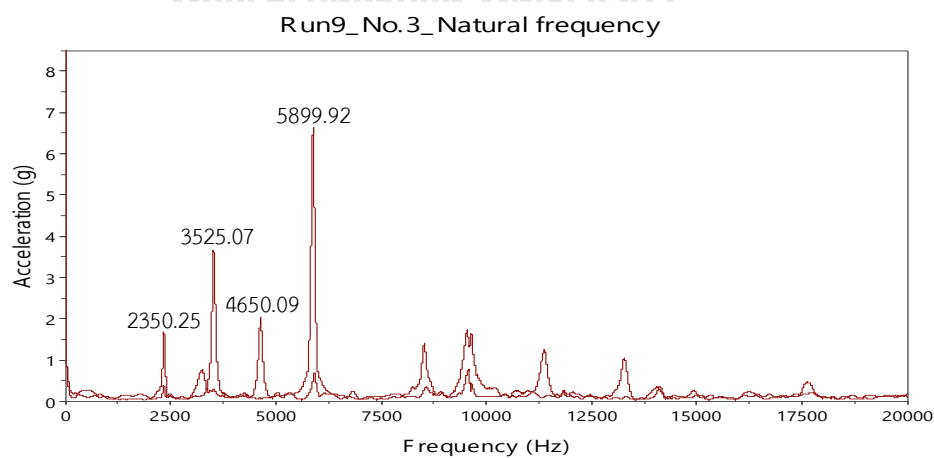
รูปที่ ก-24 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 8 (165 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 3



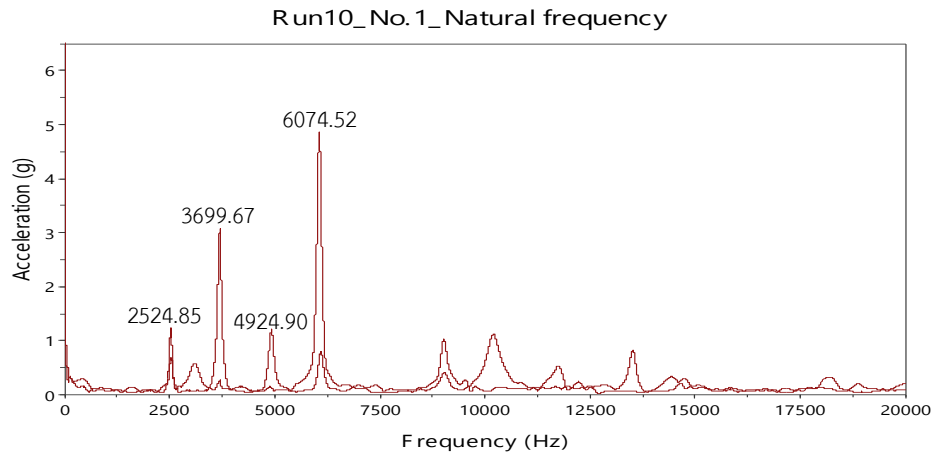
รูปที่ ก-25 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 9 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 1



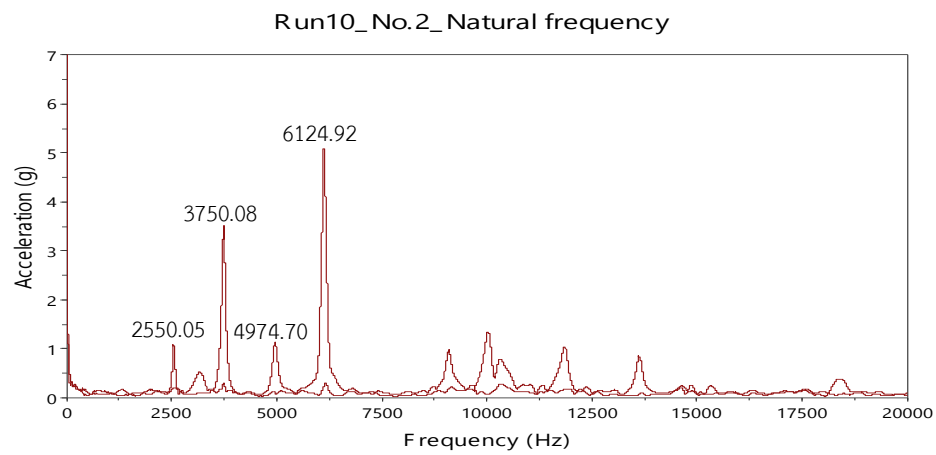
รูปที่ ก-26 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 9 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 2



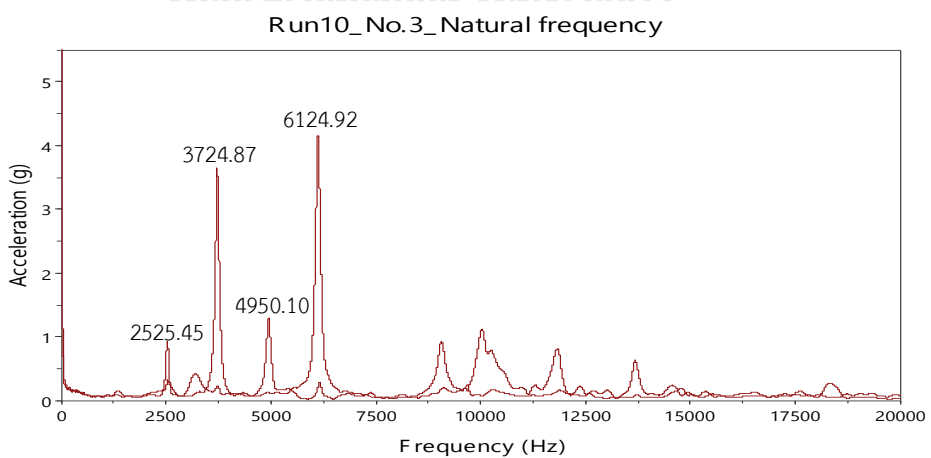
รูปที่ ก-27 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 9 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 2 min) ชั้นที่ 3



รูปที่ ก-28 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 10 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 2 min) ชั้นที่ 1

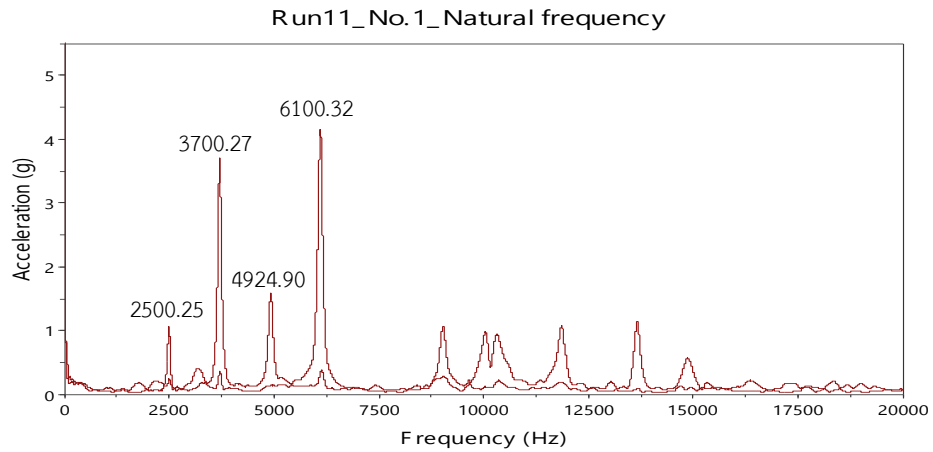


รูปที่ ก-29 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 10 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 2 min) ชั้นที่ 2

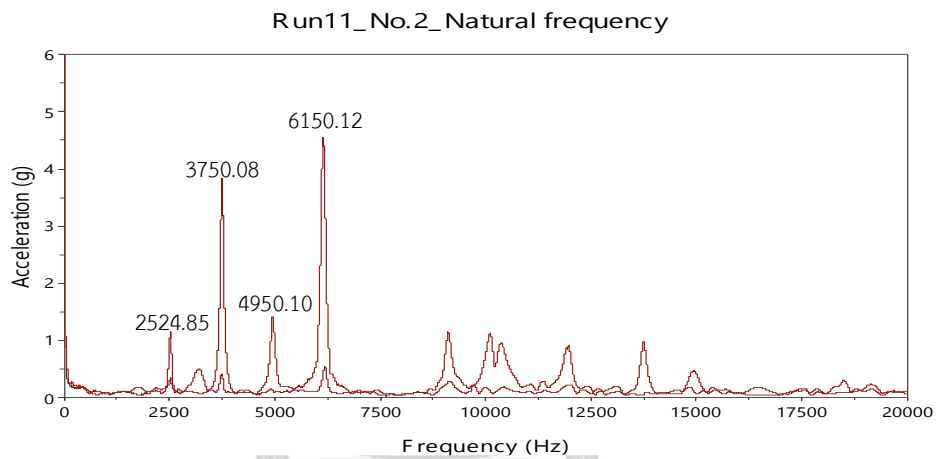


รูปที่ ก-30 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 10 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 2 min) ชั้นที่ 3

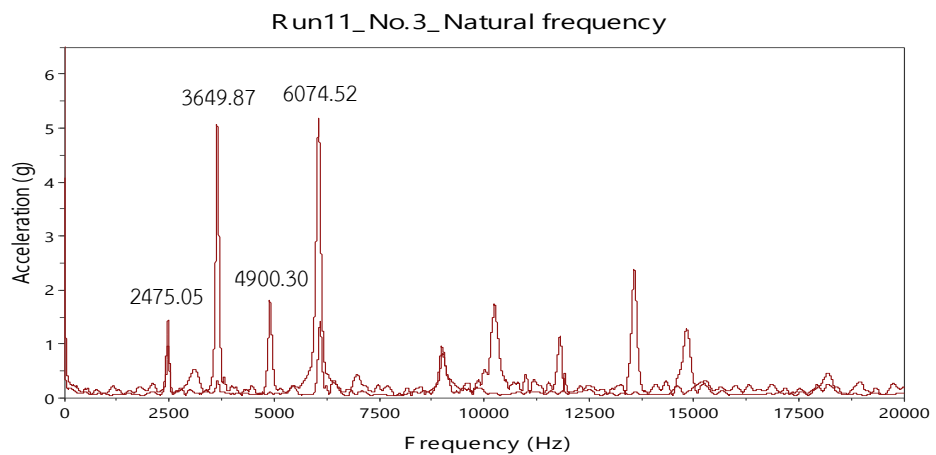




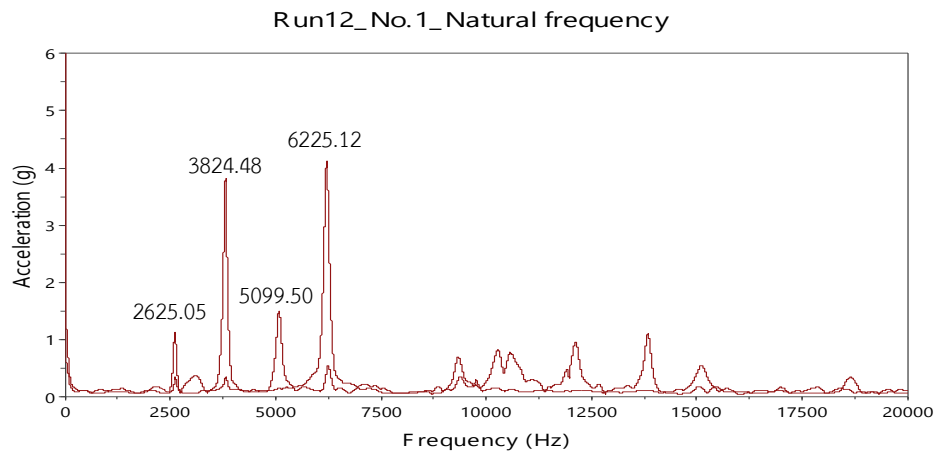
รูปที่ ก-31 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 11 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 6 min) ชั้นที่ 1



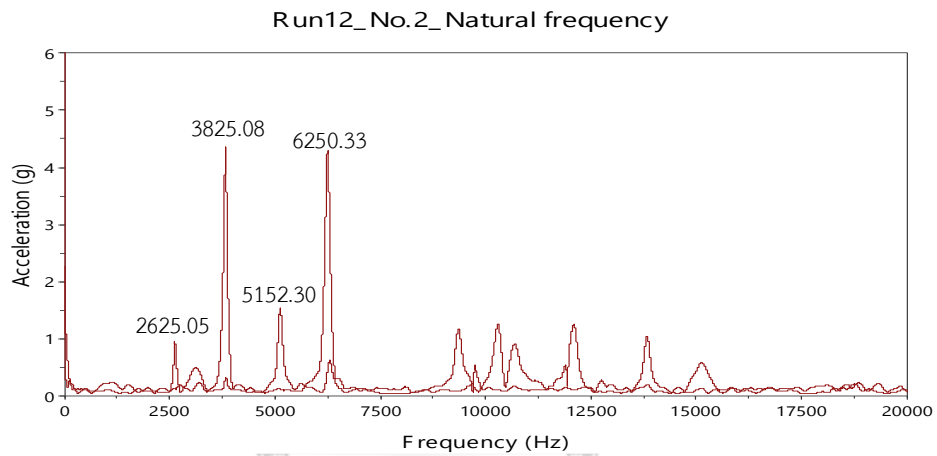
รูปที่ ก-32 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 11 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 6 min) ชั้นที่ 2



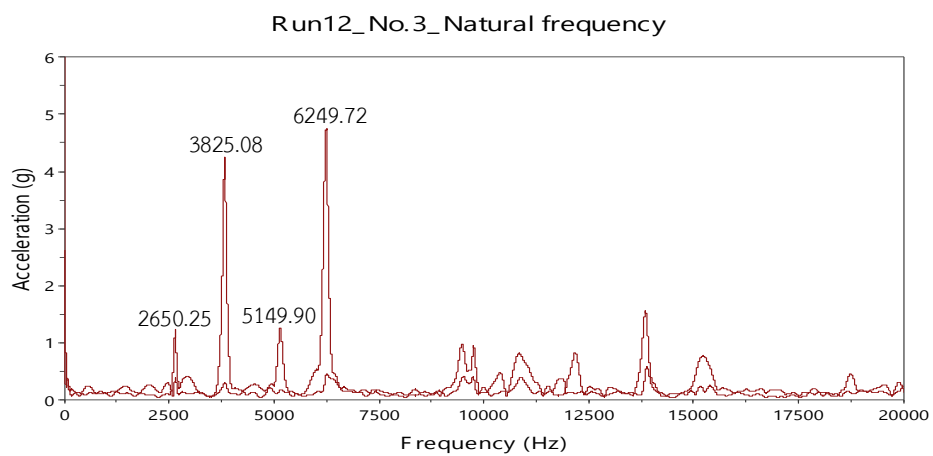
รูปที่ ก-33 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 11 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ kg/cm}^2$ , 6 min) ชั้นที่ 3



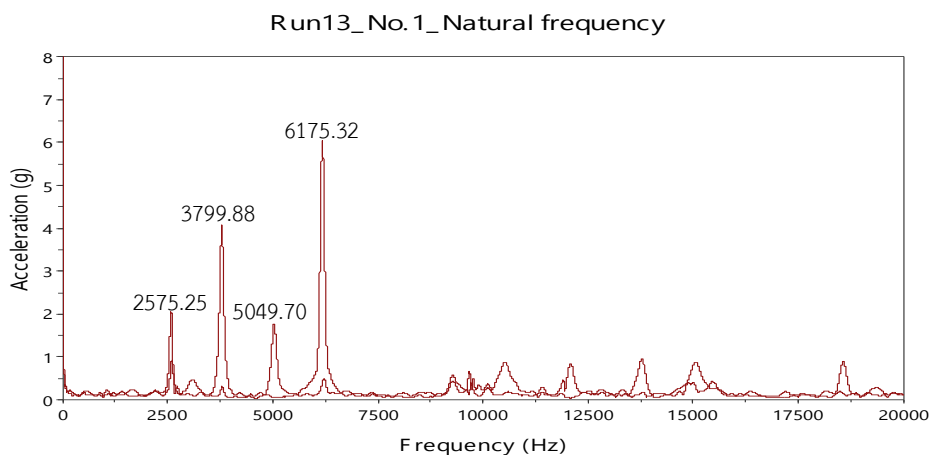
รูปที่ ก-34 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 12 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 1



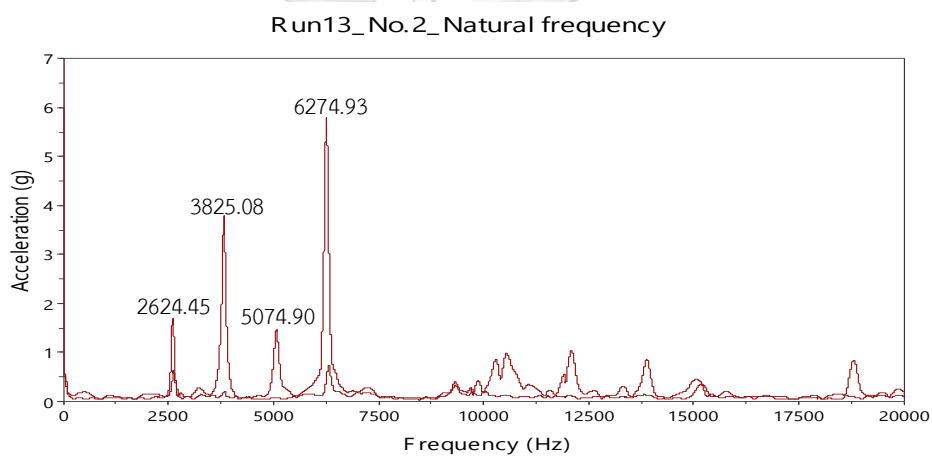
รูปที่ ก-35 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 12 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 2



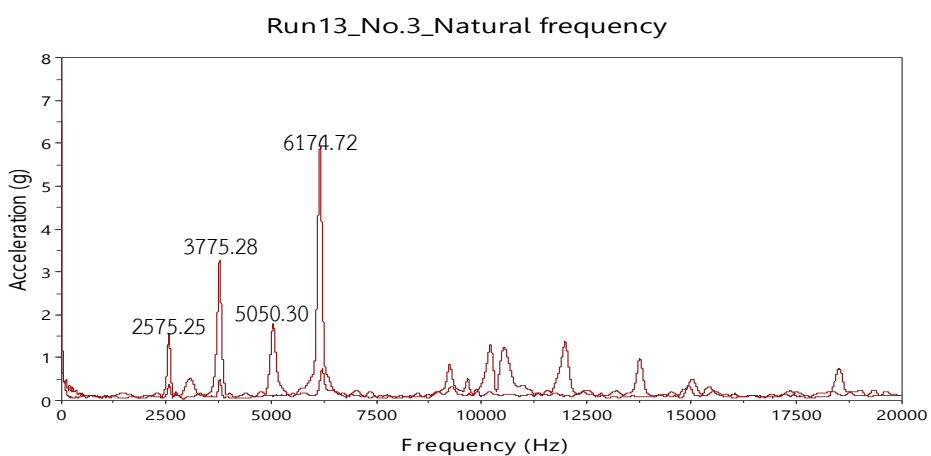
รูปที่ ก-36 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 12 (150 °C, 300 kg/cm<sup>2</sup>, 6 min) ชั้นที่ 3



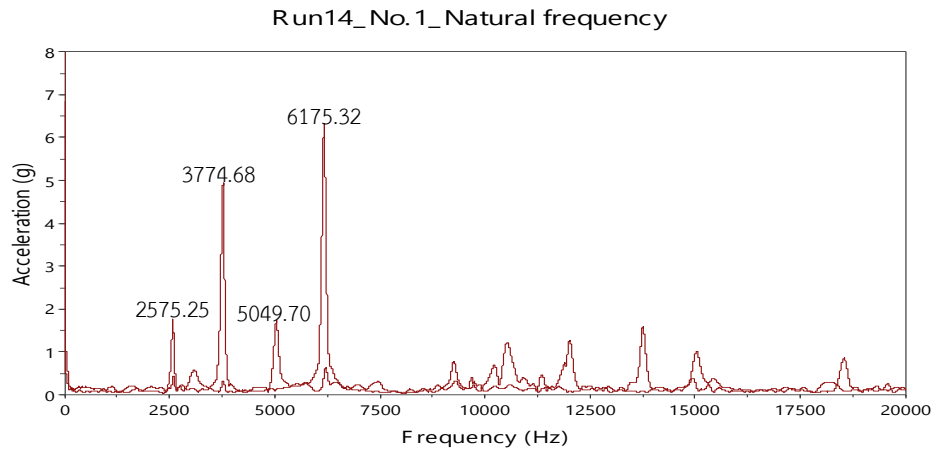
รูปที่ ก-37 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 13 (150 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 1



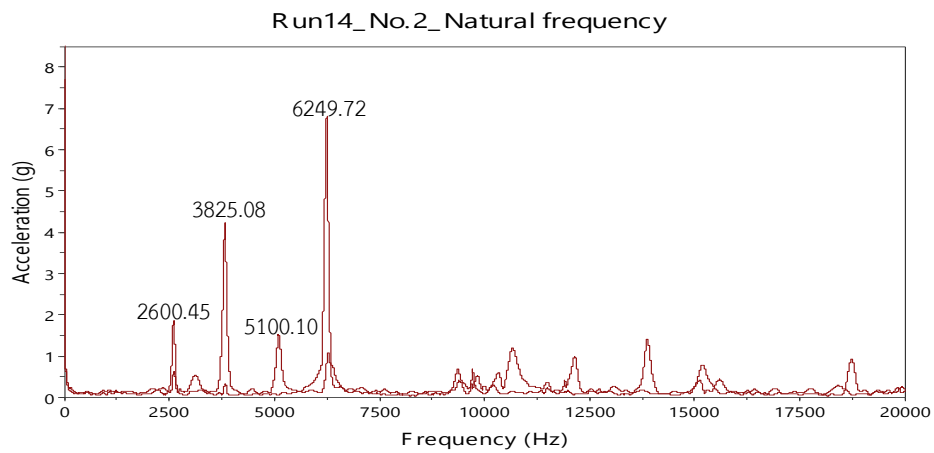
รูปที่ ก-38 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 13 (150 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 2



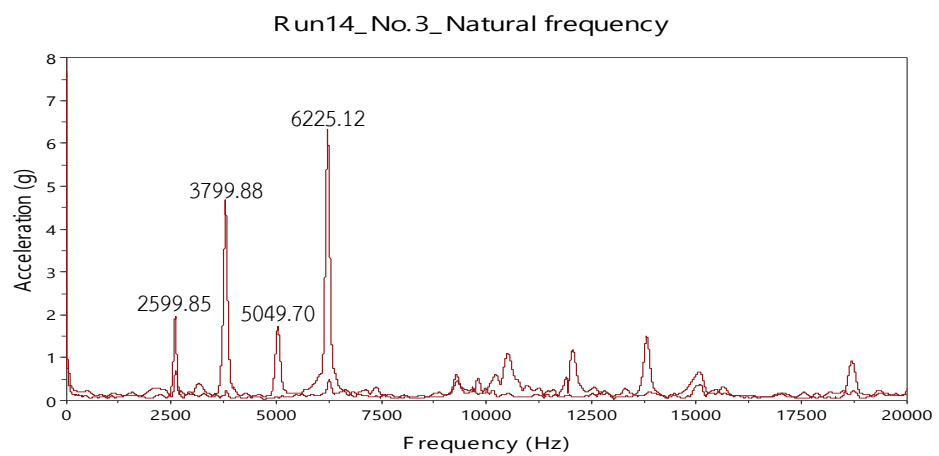
รูปที่ ก-39 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 13 (150 °C, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 4 min) ชั้นที่ 3



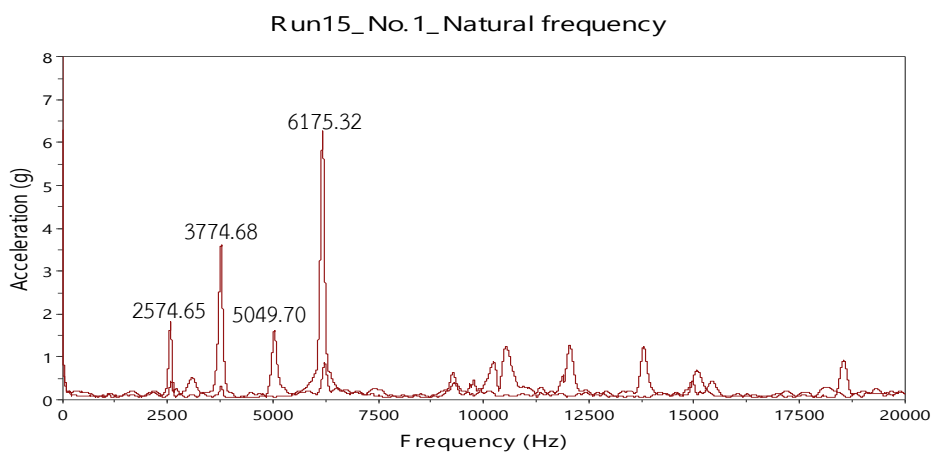
รูปที่ ก-40 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 14 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 1



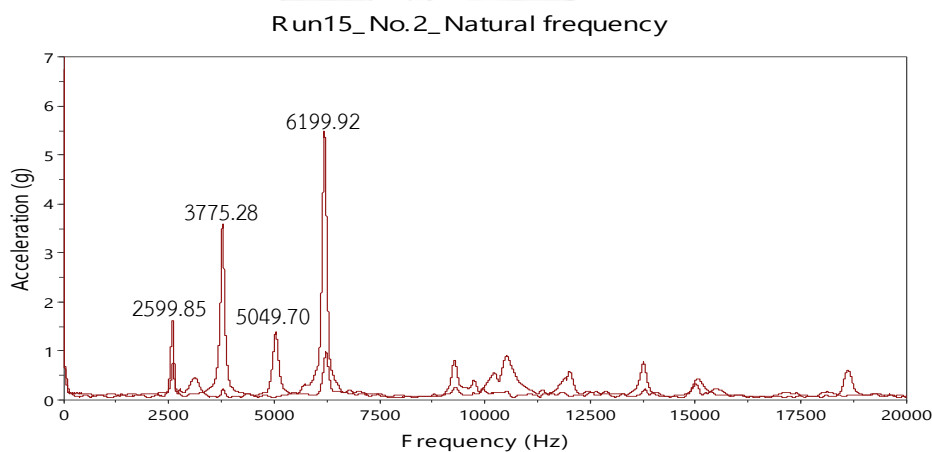
รูปที่ ก-41 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 14 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 2



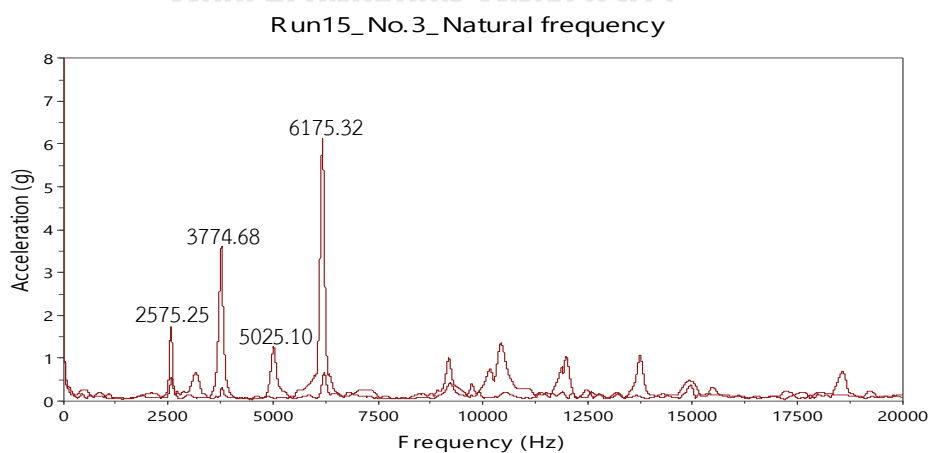
รูปที่ ก-42 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 14 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 3



รูปที่ ก-43 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 15 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 1



รูปที่ ก-44 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 15 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 2



รูปที่ ก-45 ความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรกการทดลองที่ 15 ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ kg/cm}^2$ , 4 min) ชั้นที่ 3

## 2. สมบัติเชิงกล

### 2.1 สภาพอัดตัวได้

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบสภาพอัดตัวได้

Run	No.	Pad thickness (mm)	Compressibility ( $\mu\text{m}$ )	Compressibility (%)	Avg. compressibility (%)	SD
1	1/2	11.90	171.80	1.44	1.37	0.07
1	1/4	11.90	154.20	1.30		
1	2/1	11.90	169.90	1.43		
1	2/3	11.87	158.50	1.34		
1	3/2	11.90	172.30	1.45		
1	3/3	11.91	161.00	1.35		
1	3/4	11.91	155.80	1.31		
2	1/2	11.87	110.90	0.93	0.87	0.04
2	1/4	11.89	105.40	0.89		
2	2/1	11.92	101.80	0.85		
2	2/3	11.90	101.50	0.85		
2	3/2	11.91	104.60	0.88		
2	3/3	11.91	103.50	0.87		
2	3/4	11.91	94.70	0.80		
3	1/2	11.91	195.80	1.64	1.61	0.08
3	1/4	11.92	184.70	1.55		
3	2/1	11.96	187.50	1.57		
3	2/3	11.93	179.50	1.50		
3	3/2	11.94	203.60	1.70		
3	3/3	11.94	203.20	1.70		
3	3/4	11.94	189.10	1.58		
4	1/2	11.93	185.20	1.55	1.40	0.09
4	1/4	11.94	164.20	1.37		
4	2/1	11.94	169.00	1.42		
4	2/3	11.94	163.60	1.37		
4	3/2	11.94	167.70	1.40		
4	3/3	11.94	168.00	1.41		
4	3/4	11.94	149.50	1.25		

Run	No.	Pad thickness (mm)	Compressibility ( $\mu\text{m}$ )	Compressibility (%)	Avg. compressibility (%)	SD
5	1/2	11.92	318.70	2.67	2.66	0.36
5	1/4	11.92	269.00	2.26		
5	2/1	11.92	268.10	2.25		
5	2/3	11.97	360.70	3.01		
5	3/2	11.93	357.40	2.99		
5	3/3	11.88	282.80	2.38		
5	3/4	11.99	362.40	3.02		
6	1/2	11.91	223.50	1.88	1.55	0.15
6	1/4	11.92	182.70	1.53		
6	2/1	11.93	181.50	1.52		
6	2/3	11.93	179.70	1.51		
6	3/2	11.92	189.50	1.59		
6	3/3	11.93	172.30	1.44		
6	3/4	11.93	168.30	1.41		
7	1/2	11.92	132.90	1.11	1.09	0.04
7	1/4	11.93	132.30	1.11		
7	2/1	11.95	129.50	1.08		
7	2/3	11.87	130.20	1.10		
7	3/2	11.92	135.60	1.14		
7	3/3	11.93	124.00	1.04		
7	3/4	11.93	125.00	1.05		
8	1/2	11.93	132.40	1.11	1.04	0.05
8	1/4	11.93	118.60	0.99		
8	2/1	11.93	128.10	1.07		
8	2/3	11.92	127.80	1.07		
8	3/2	11.93	125.20	1.05		
8	3/3	11.93	120.80	1.01		
8	3/4	11.93	114.50	0.96		

Run	No.	Pad thickness (mm)	Compressibility ( $\mu\text{m}$ )	Compressibility (%)	Avg. compressibility (%)	SD
9	1/2	11.87	189.60	1.60	1.45	0.12
9	1/4	11.90	172.60	1.45		
9	2/1	11.90	174.30	1.46		
9	2/3	11.90	166.80	1.40		
9	3/2	11.89	190.70	1.60		
9	3/3	11.90	158.80	1.33		
9	3/4	11.91	155.90	1.31		
10	1/2	11.92	227.70	1.91	1.89	0.08
10	1/4	11.93	242.70	2.04		
10	2/1	11.93	220.90	1.85		
10	2/3	11.94	217.00	1.82		
10	3/2	11.92	231.30	1.94		
10	3/3	11.91	217.60	1.83		
10	3/4	11.93	220.40	1.85		
11	1/2	11.90	102.90	0.86	0.86	0.01
11	1/4	11.90	101.30	0.85		
11	2/1	11.91	101.40	0.85		
11	2/3	11.91	100.00	0.84		
11	3/2	11.90	102.40	0.86		
11	3/3	11.89	101.90	0.86		
11	3/4	11.91	105.20	0.88		
12	1/2	11.93	168.20	1.41	1.26	0.12
12	1/4	11.92	154.30	1.29		
12	2/1	11.92	163.40	1.37		
12	2/3	11.92	153.40	1.29		
12	3/2	11.93	145.10	1.22		
12	3/3	11.91	131.60	1.10		
12	3/4	11.93	132.40	1.11		



Run	No.	Pad thickness (mm)	Compressibility ( $\mu\text{m}$ )	Compressibility (%)	Avg. compressibility (%)	SD
13	1/2	11.94	148.20	1.24	1.22	0.05
13	1/4	11.92	147.10	1.23		
13	2/1	11.93	152.20	1.28		
13	2/3	11.92	136.50	1.14		
13	3/2	11.92	143.20	1.20		
13	3/3	11.92	139.10	1.17		
13	3/4	10.46	130.30	1.25		
14	1/2	11.92	135.00	1.13	1.14	0.04
14	1/4	11.94	130.80	1.10		
14	2/1	11.93	143.40	1.20		
14	2/3	11.93	135.90	1.14		
14	3/2	11.91	139.10	1.17		
14	3/3	11.92	130.80	1.10		
14	3/4	11.93	132.90	1.11		
15	1/2	11.89	137.90	1.16	1.20	0.08
15	1/4	11.91	131.80	1.11		
15	2/1	11.89	140.40	1.18		
15	2/3	11.90	136.40	1.15		
15	3/2	11.92	158.40	1.33		
15	3/3	11.92	146.80	1.23		
15	3/4	11.92	150.40	1.26		

## 2.2 มอดูลัส

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบมอดูลัส

Run	No.	Modulus(GPa)							Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.			
1	1	0.93	0.87	0.90	0.91	0.87	0.90	0.90	0.02	
1	2	0.95	0.90	0.98	0.92	0.92	0.93			
1	3	0.89	0.89	0.91	0.89	0.85	0.89			
1	4	0.92	0.87	0.94	0.91	0.92	0.91			
1	5	0.89	0.90	0.89	0.86	0.84	0.87			
1	6	0.92	0.87	0.90	0.91	0.86	0.89			
1	7	0.92	0.88	0.91	0.93	0.89	0.91			
2	1	1.21	1.15	1.25	1.16	1.12	1.18	1.22	0.03	
2	2	1.20	1.20	1.26	1.32	1.19	1.23			
2	3	1.26	1.18	1.29	1.26	1.26	1.25			
2	4	1.31	1.07	1.23	1.28	1.17	1.21			
2	5	1.27	1.22	1.24	1.22	1.13	1.22			
2	6	1.35	1.19	1.27	1.23	1.17	1.24			
2	7	1.29	1.21	1.27	1.27	1.16	1.24			
3	1	1.00	0.97	0.99	0.97	1.00	0.99	1.00	0.03	
3	2	1.04	1.01	1.05	1.01	1.04	1.03			
3	3	1.04	1.03	0.99	1.02	0.97	1.01			
3	4	0.98	1.01	1.05	1.01	1.07	1.02			
3	5	0.96	1.00	1.02	0.99	0.99	0.99			
3	6	0.94	0.90	0.93	0.97	1.00	0.95			
3	7	1.03	0.95	1.00	0.98	1.01	0.99			
4	1	1.13	0.98	1.07	1.10	1.14	1.09	1.16	0.04	
4	2	1.21	1.12	1.14	1.19	1.13	1.16			
4	3	1.24	1.20	1.14	1.10	1.07	1.15			
4	4	1.25	1.22	1.20	1.14	1.11	1.18			
4	5	1.18	1.20	1.21	1.10	1.18	1.17			
4	6	1.12	1.10	1.17	1.18	1.16	1.15			
4	7	1.22	1.17	1.21	1.24	1.20	1.21			

Run	No.	Modulus(GPa)						Avg.	Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5				
5	1	0.68	0.73	0.72	0.69	0.73	0.71	0.62	0.14	
5	2	0.81	0.76	0.74	0.81	0.77	0.78			
5	3	0.52	0.49	0.67	0.53	0.56	0.55			
5	4	0.65	0.60	0.46	0.53	0.20	0.49			
5	5	0.55	0.47	0.44	0.21	0.37	0.41			
5	6	0.71	0.70	0.64	0.66	0.62	0.67			
5	7	0.79	0.82	0.69	0.71	0.69	0.74			
6	1	0.83	0.92	0.94	0.90	0.97	0.91	1.02	0.06	
6	2	1.01	0.97	1.00	0.99	1.00	1.00			
6	3	1.10	1.10	1.05	1.01	1.02	1.06			
6	4	1.07	1.06	1.05	1.07	1.10	1.07			
6	5	0.96	1.01	0.95	1.01	0.94	0.97			
6	6	1.02	1.04	1.11	1.07	1.12	1.07			
6	7	1.04	0.99	1.07	1.11	1.06	1.05			
7	1	1.19	1.22	1.25	1.14	1.20	1.20	1.20	0.02	
7	2	1.17	1.15	1.21	1.20	1.16	1.18			
7	3	1.30	1.28	1.23	1.19	1.12	1.22			
7	4	1.17	1.18	1.25	1.18	1.29	1.21			
7	5	1.15	1.22	1.21	1.13	1.18	1.18			
7	6	1.13	1.23	1.24	1.12	1.19	1.18			
7	7	1.22	1.12	1.19	1.26	1.21	1.20			
8	1	1.24	1.22	1.30	1.37	1.30	1.29	1.31	0.03	
8	2	1.35	1.21	1.29	1.36	1.30	1.30			
8	3	1.40	1.25	1.26	1.28	1.20	1.28			
8	4	1.34	1.12	1.25	1.41	1.29	1.28			
8	5	1.24	1.32	1.39	1.22	1.32	1.30			
8	6	1.27	1.31	1.39	1.33	1.36	1.34			
8	7	1.31	1.32	1.40	1.35	1.41	1.36			

Run	No.	Modulus(GPa)							Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.			
9	1	0.90	0.87	0.89	0.86	0.84	0.87	0.89	0.03	
9	2	0.94	0.87	0.88	0.98	0.90	0.91			
9	3	0.91	0.84	0.89	0.90	0.85	0.88			
9	4	0.92	0.85	0.90	0.97	0.93	0.92			
9	5	0.89	0.85	0.82	0.81	0.75	0.82			
9	6	0.99	0.89	0.90	0.91	0.90	0.91			
9	7	0.96	0.87	0.89	0.95	0.86	0.91			
10	1	1.07	0.98	0.93	0.98	0.92	0.97	0.96	0.03	
10	2	0.94	0.87	0.92	0.90	0.93	0.91			
10	3	1.01	0.93	0.96	0.99	0.94	0.96			
10	4	1.01	0.96	1.00	1.04	0.99	1.00			
10	5	0.96	0.97	0.91	0.88	0.88	0.92			
10	6	0.92	1.01	0.98	0.90	1.02	0.97			
10	7	0.98	0.97	0.97	0.92	0.94	0.96			
11	1	1.28	1.21	1.27	1.27	1.11	1.23	1.23	0.02	
11	2	1.28	1.11	1.21	1.30	1.19	1.22			
11	3	1.30	1.18	1.29	1.26	1.21	1.25			
11	4	1.29	1.16	1.31	1.28	1.25	1.26			
11	5	1.25	1.16	1.27	1.24	1.18	1.22			
11	6	1.26	1.17	1.27	1.20	1.15	1.21			
11	7	1.21	1.16	1.27	1.22	1.17	1.21			
12	1	1.14	1.02	1.05	1.15	1.07	1.09	1.18	0.07	
12	2	1.27	1.10	1.12	1.21	1.14	1.17			
12	3	1.22	1.11	1.12	1.13	1.00	1.12			
12	4	1.19	1.12	1.19	1.23	1.17	1.18			
12	5	1.31	1.22	1.21	1.14	1.15	1.21			
12	6	1.24	1.27	1.34	1.18	1.31	1.27			
12	7	1.28	1.22	1.28	1.30	1.24	1.27			

Run	No.	Modulus(GPa)						Avg.	Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5				
13	1	1.16	1.16	1.17	1.20	1.17	1.17	1.17	0.02	
13	2	1.23	1.13	1.15	1.20	1.14	1.17			
13	3	1.15	1.13	1.14	1.16	1.09	1.13			
13	4	1.24	1.20	1.19	1.19	1.18	1.20			
13	5	1.13	1.17	1.22	1.14	1.16	1.17			
13	6	1.19	1.22	1.20	1.12	1.21	1.19			
13	7	1.16	1.10	1.17	1.14	1.12	1.14			
14	1	1.22	1.14	1.19	1.20	1.11	1.17	1.18	0.02	
14	2	1.26	1.13	1.16	1.24	1.16	1.19			
14	3	1.17	1.14	1.15	1.16	1.13	1.15			
14	4	1.24	1.19	1.18	1.21	1.18	1.20			
14	5	1.19	1.19	1.18	1.11	1.15	1.16			
14	6	1.24	1.18	1.22	1.23	1.21	1.22			
14	7	1.21	1.16	1.13	1.21	1.16	1.18			
15	1	1.20	1.19	1.21	1.19	1.11	1.18	1.17	0.05	
15	2	1.23	1.16	1.24	1.23	1.15	1.20			
15	3	1.20	1.20	1.22	1.23	1.24	1.22			
15	4	1.19	1.17	1.22	1.23	1.22	1.21			
15	5	1.18	1.08	1.07	1.11	1.05	1.10			
15	6	1.10	1.10	1.15	1.18	1.17	1.14			
15	7	1.19	1.05	1.07	1.18	1.04	1.11			

## 2.1 ความแข็ง

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบความแข็ง

Run	No.	Hardness(HRS)							Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.			
1	1	37.3	35.9	33.9	35.1	32.9	35.0	32.6	1.8	
1	2	30.9	30.0	38.3	36.4	33.6	33.8			
1	3	30.7	33.4	31.6	32.5	30.2	31.7			
1	4	31.1	30.2	32.4	32.4	30.8	31.4			
1	5	28.9	31.4	29.6	29.0	32.6	30.3			
1	6	29.6	29.8	33.5	31.8	32.7	31.5			
1	7	32.5	35.0	36.1	32.3	36.0	34.4			
2	1	42.9	42.2	47.9	47.2	41.9	44.4	47.5	1.9	
2	2	50.4	56.7	51.1	43.1	46.7	49.6			
2	3	51.6	54.1	53.4	44.5	46.8	50.1			
2	4	49.4	56.6	51.5	46.3	32.4	47.2			
2	5	41.3	45.4	48.4	49.9	45.8	46.2			
2	6	41.5	51.4	48.1	52.2	44.7	47.6			
2	7	36.4	48.0	47.4	51.2	54.0	47.4			
3	1	34.9	34.0	37.9	34.1	32.8	34.7	39.6	3.5	
3	2	36.7	41.2	39.9	43.3	35.3	39.3			
3	3	30.7	38.7	44.1	36.9	36.9	37.5			
3	4	42.3	34.2	40.9	35.0	32.1	36.9			
3	5	45.0	42.0	44.5	36.9	47.8	43.2			
3	6	45.1	41.7	44.8	37.4	37.1	41.2			
3	7	48.7	46.7	44.0	39.9	42.2	44.3			
4	1	44.0	51.9	45.8	46.5	43.8	46.4	51.3	2.9	
4	2	48.0	50.2	54.0	50.9	45.4	49.7			
4	3	46.9	44.4	49.5	53.6	53.6	49.6			
4	4	47.1	55.8	54.3	52.3	51.1	52.1			
4	5	57.8	52.7	54.3	53.2	55.9	54.8			
4	6	59.5	60.8	46.1	46.7	50.9	52.8			
4	7	60.1	51.6	55.3	49.0	51.3	53.5			

Run	No.	Hardness(HRS)							
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.	Total avg.	SD
5	1	24.8	20.5	19.8	26.1	21.8	22.6	21.2	4.7
5	2	32.0	29.0	26.7	20.8	18.2	25.3		
5	3	26.8	28.4	29.1	24.3	27.9	27.3		
5	4	16.4	20.9	13.1	19.0	18.9	17.7		
5	5	17.3	13.6	15.5	24.9	21.8	18.6		
5	6	19.3	21.2	23.9	25.7	25.6	23.1		
5	7	9.7	9.2	18.2	18.1	14.9	14.0		
6	1	39.8	42.6	36.6	34.0	37.2	38.0	46.0	4.1
6	2	40.5	45.4	49.2	40.7	41.4	43.4		
6	3	45.2	41.9	48.0	48.8	49.1	46.6		
6	4	48.9	49.5	40.6	50.1	43.3	46.5		
6	5	48.0	51.7	53.0	42.7	49.0	48.9		
6	6	53.0	51.9	44.4	46.0	50.5	49.2		
6	7	53.1	52.2	48.2	45.6	47.8	49.4		
7	1	52.8	42.7	57.5	49.3	57.9	52.0	54.2	1.3
7	2	58.5	54.3	54.7	52.9	56.3	55.3		
7	3	56.4	54.7	59.5	53.7	50.8	55.0		
7	4	58.7	59.0	55.0	50.1	51.3	54.8		
7	5	52.2	53.9	58.1	53.5	52.2	54.0		
7	6	50.4	49.7	58.8	50.5	55.0	52.9		
7	7	56.8	55.5	55.7	53.7	54.2	55.2		
8	1	59.8	65.6	57.5	51.5	49.8	56.8	57.9	1.3
8	2	60.0	62.0	60.9	57.4	58.7	59.8		
8	3	51.3	55.5	59.7	58.5	58.2	56.6		
8	4	58.9	62.8	57.9	57.6	48.6	57.2		
8	5	59.8	55.4	58.4	53.1	60.9	57.5		
8	6	52.2	60.6	57.7	52.0	65.3	57.6		
8	7	65.4	63.3	60.1	54.3	54.7	59.6		

Run	No.	Hardness(HRS)							
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.	Total avg.	SD
9	1	35.4	38.8	39.7	38.5	36.2	37.7	38.5	1.7
9	2	37.9	41.6	38.7	42.5	38.8	39.9		
9	3	35.7	42.0	38.6	40.0	37.1	38.7		
9	4	40.2	45.6	41.3	44.2	35.3	41.3		
9	5	29.2	36.5	36.5	38.5	39.2	36.0		
9	6	38.1	40.4	36.8	35.6	35.9	37.4		
9	7	37.5	43.6	37.8	35.3	39.4	38.7		
10	1	41.7	43.2	41.8	49.5	43.7	44.0	43.8	1.8
10	2	38.8	50.9	44.4	39.5	37.0	42.1		
10	3	43.1	46.7	43.0	38.1	40.2	42.2		
10	4	47.7	50.9	46.5	42.9	42.6	46.1		
10	5	41.7	41.5	41.2	44.9	42.0	42.3		
10	6	43.0	46.6	44.5	39.0	44.9	43.6		
10	7	48.3	47.5	42.7	50.3	42.9	46.3		
11	1	48.6	52.8	50.4	46.6	48.7	49.4	50.7	1.5
11	2	50.7	51.1	48.1	53.9	50.3	50.8		
11	3	47.9	53.5	49.0	47.4	47.9	49.1		
11	4	51.1	58.2	52.9	50.5	51.3	52.8		
11	5	52.6	53.7	53.0	54.8	50.1	52.8		
11	6	48.4	48.7	50.8	53.3	48.3	49.9		
11	7	47.0	44.9	53.7	52.7	51.1	49.9		
12	1	50.8	52.1	51.5	52.1	53.6	52.0	54.9	2.3
12	2	52.2	50.9	55.2	54.6	56.9	54.0		
12	3	52.0	51.1	55.5	54.8	48.7	52.4		
12	4	57.6	58.9	52.8	52.1	52.5	54.8		
12	5	55.6	50.1	58.7	56.1	60.5	56.2		
12	6	59.9	53.1	58.9	55.7	53.0	56.1		
12	7	60.0	59.3	61.8	53.3	58.2	58.5		



Run	No.	Hardness(HRS)							Total avg.	SD
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.			
13	1	52.3	54.7	50.1	48.6	50.9	51.3	51.4	3.7	
13	2	53.6	56.0	52.2	53.6	52.4	53.6			
13	3	48.7	49.5	47.5	47.7	48.8	48.4			
13	4	56.5	56.1	60.6	55.6	53.3	56.4			
13	5	44.7	45.7	44.5	46.6	44.9	45.3			
13	6	58.9	56.0	50.8	47.9	56.7	54.1			
13	7	49.0	47.9	52.8	49.1	55.4	50.8			
14	1	55.0	58.4	52.4	57.0	57.4	56.0	55.1	1.5	
14	2	57.0	56.3	55.5	59.6	57.8	57.2			
14	3	56.8	52.9	53.5	50.5	52.3	53.2			
14	4	53.9	57.9	54.0	55.6	55.0	55.3			
14	5	52.3	55.0	52.6	54.7	52.8	53.5			
14	6	56.8	54.5	56.7	57.1	55.5	56.1			
14	7	55.4	58.2	51.9	55.4	50.3	54.2			
15	1	54.1	51.7	50.9	55.1	53.9	53.1	54.2	1.5	
15	2	55.4	53.0	54.3	48.9	51.9	52.7			
15	3	58.9	54.0	54.2	56.7	57.9	56.3			
15	4	53.6	60.6	56.3	52.3	54.7	55.5			
15	5	55.1	54.0	53.9	55.3	57.9	55.2			
15	6	54.0	55.4	53.3	49.9	53.2	53.2			
15	7	50.5	56.1	52.9	54.5	51.9	53.2			

## ภาคผนวก ข

### ผลการทดสอบประสิทธิภาพของผ้าเบรก

#### 1. สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตารางที่ ข-1 ผลสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก

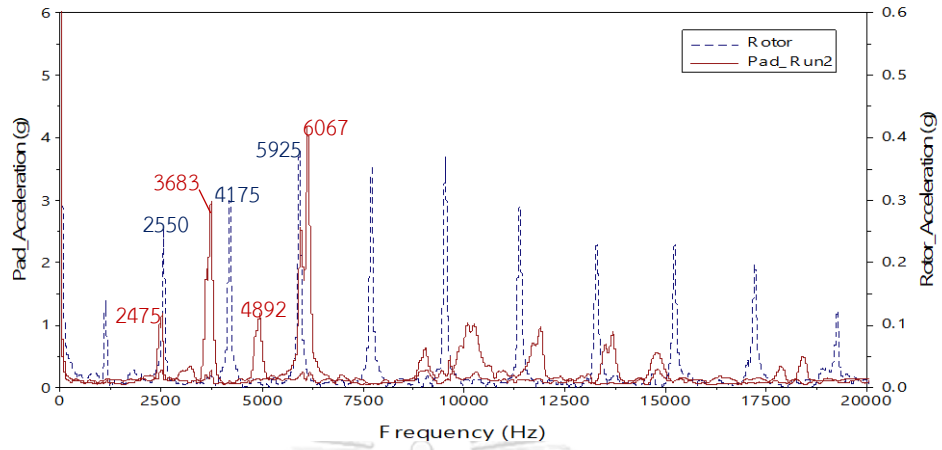
Run	Friction Coefficient ( $\mu$ )										avg.
	Testing temperature ( $^{\circ}$ C)										
	100	150	200	250	300	300	250	200	150	100	
1	0.29	0.30	0.41	0.33	0.39	0.37	0.38	0.37	0.33	0.31	0.35
2	0.30	0.34	0.40	0.48	0.37	0.36	0.37	0.35	0.34	0.33	0.36
3	0.35	0.32	0.46	0.48	0.38	0.36	0.37	0.42	0.38	0.32	0.38
4	0.29	0.30	0.42	0.47	0.38	0.38	0.45	0.46	0.43	0.42	0.40
5	0.30	0.30	0.35	0.49	0.38	0.38	0.39	0.39	0.33	0.30	0.36
6	0.29	0.30	0.41	0.48	0.37	0.38	0.38	0.36	0.36	0.33	0.37
7	0.31	0.31	0.36	0.37	0.38	0.35	0.35	0.35	0.33	0.31	0.34
8	0.29	0.33	0.40	0.44	0.38	0.32	0.32	0.37	0.41	0.35	0.36
9	0.31	0.33	0.36	0.35	0.40	0.40	0.39	0.37	0.34	0.29	0.35
10	0.30	0.29	0.42	0.47	0.37	0.36	0.38	0.45	0.38	0.30	0.37
11	0.37	0.44	0.45	0.49	0.39	0.37	0.37	0.37	0.34	0.31	0.39
12	0.26	0.28	0.40	0.43	0.35	0.32	0.35	0.35	0.30	0.28	0.33
13	0.29	0.32	0.42	0.49	0.37	0.39	0.37	0.48	0.39	0.34	0.39
14	0.29	0.32	0.42	0.49	0.37	0.39	0.37	0.48	0.39	0.34	0.39
15	0.29	0.32	0.42	0.49	0.37	0.39	0.37	0.48	0.39	0.34	0.39

## 2. อัตราการสึกหรอ

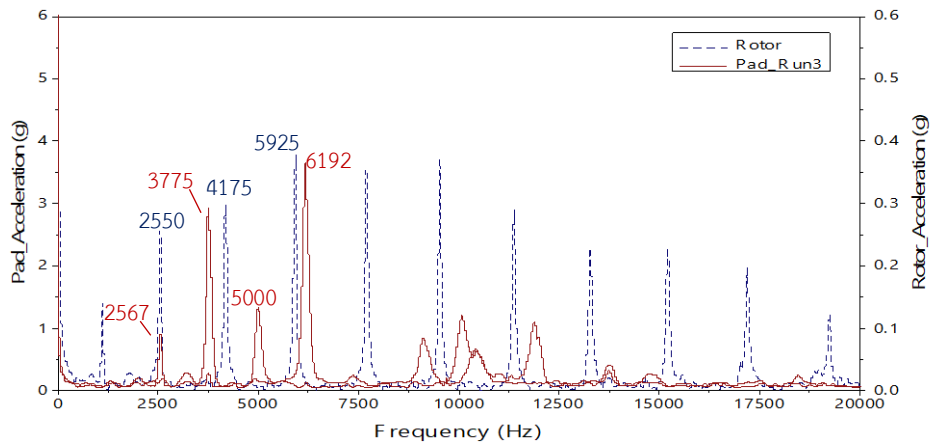
ตารางที่ ข-2 ผลอัตราการสึกหรอของผ้าเบรก

Run	Wear rate by mass ( $10^{-7}$ cm <sup>3</sup> /N.m)					
	100	150	200	250	300	Total
1	0.08	0.28	0.32	0.18	0.28	1.40
2	0.09	0.23	0.28	0.37	0.16	1.49
3	0.07	0.21	0.24	0.35	0.16	1.31
4	0.06	0.21	0.23	0.36	0.17	1.56
5	1.29	0.09	0.08	0.31	0.22	2.39
6	0.06	0.25	0.29	0.33	0.15	1.39
7	0.10	0.10	0.09	0.09	0.16	0.74
8	0.08	0.21	0.26	0.43	0.27	1.68
9	0.07	0.09	0.08	0.09	0.28	0.99
10	0.08	0.25	0.26	0.34	0.14	1.49
11	0.13	0.25	0.32	0.33	0.28	1.49
12	0.08	0.26	0.27	0.39	0.12	1.49
13	0.08	0.21	0.26	0.38	0.13	1.55
14	0.08	0.21	0.26	0.38	0.13	1.55
15	0.08	0.21	0.26	0.38	0.13	1.55

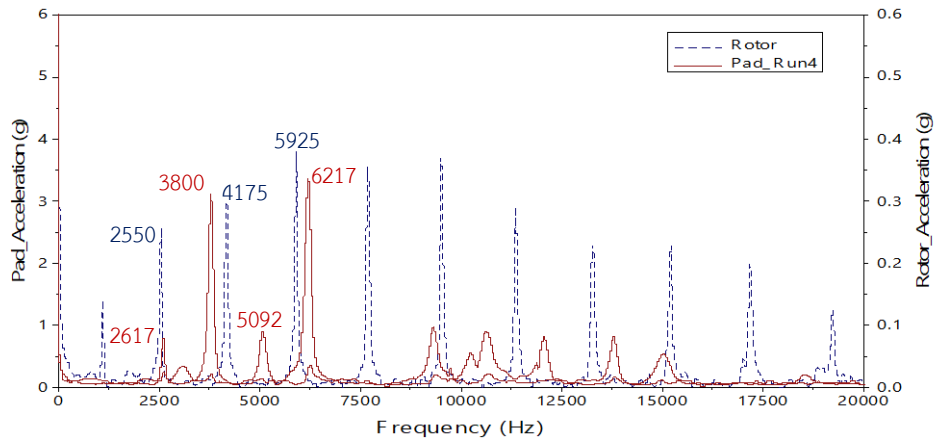
3. การสั่นและการเกิดเสียง



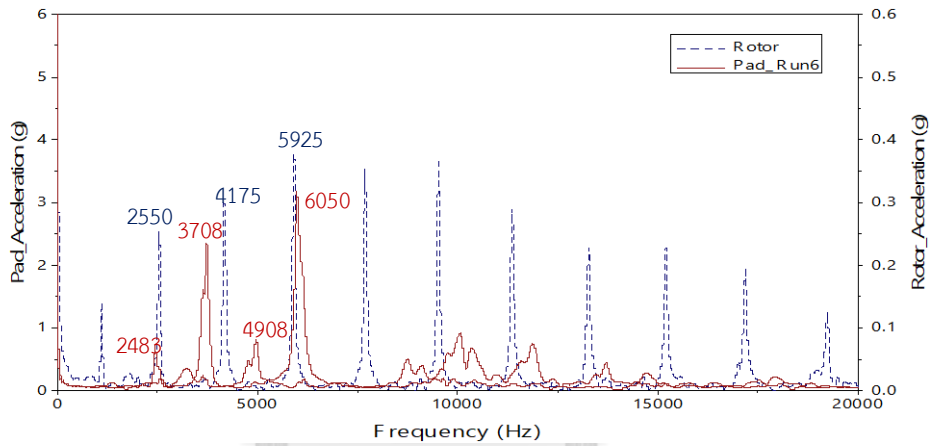
รูปที่ ข-1 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 2



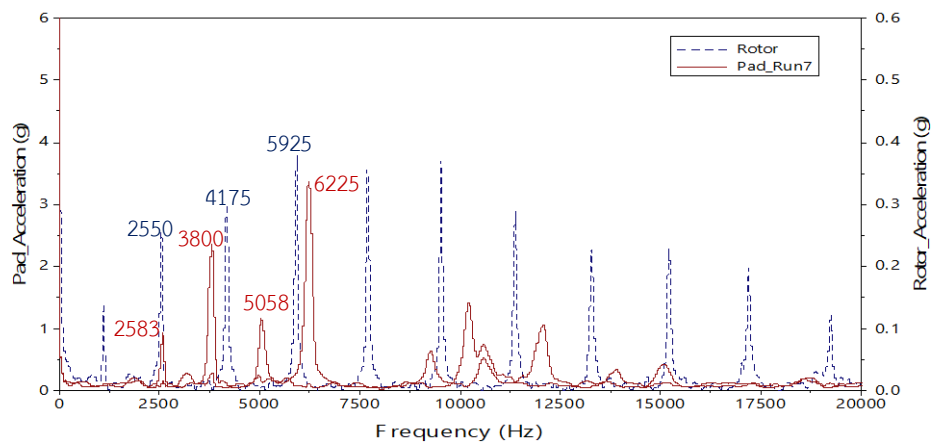
รูปที่ ข-2 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 3



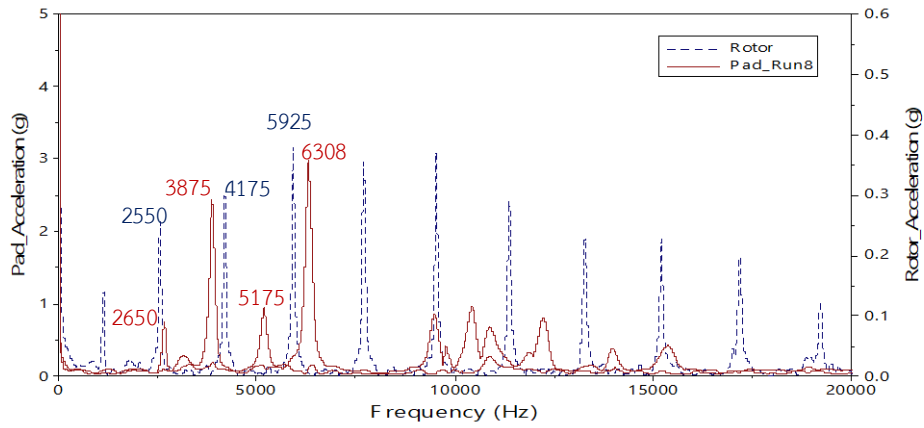
รูปที่ ข-3 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 4



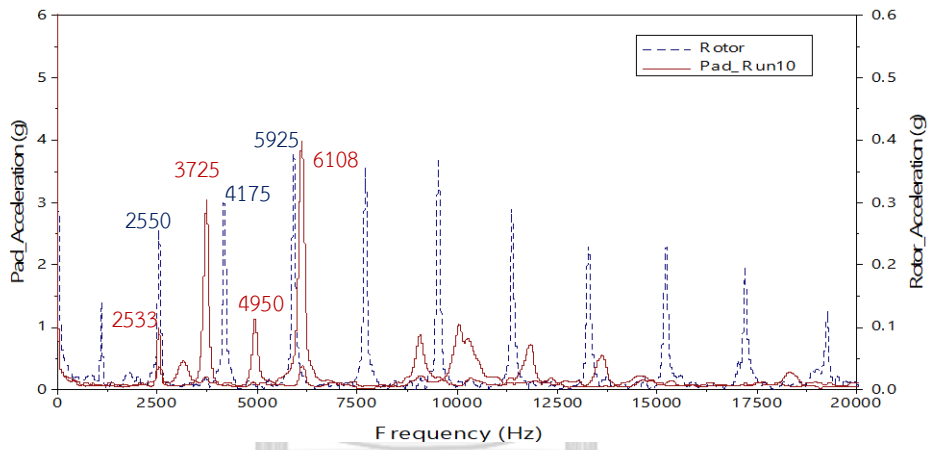
รูปที่ ข-4 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 6



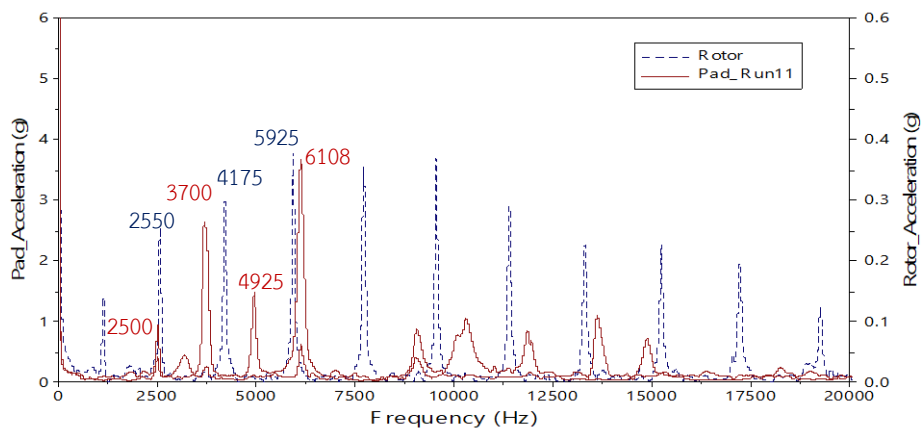
รูปที่ ข-5 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 7



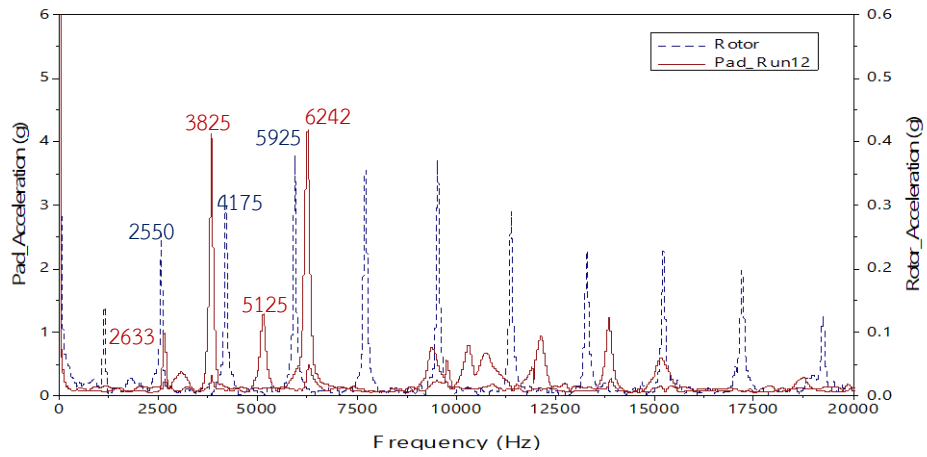
รูปที่ ข-6 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 8



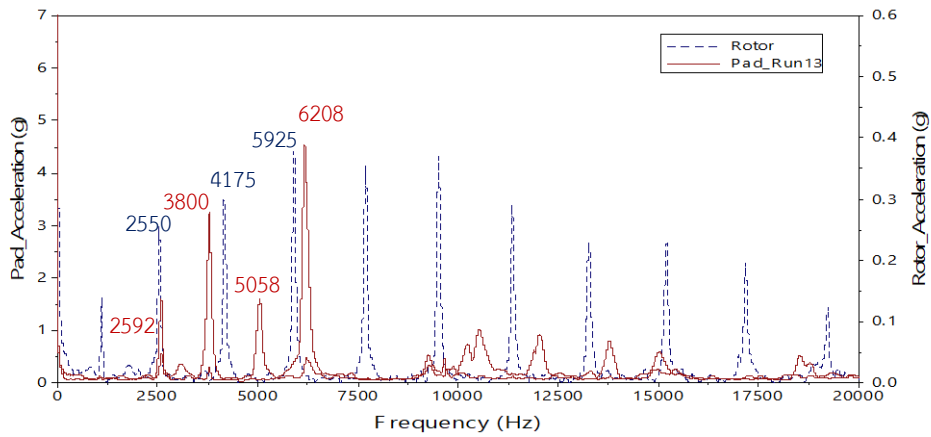
รูปที่ ข-7 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 10



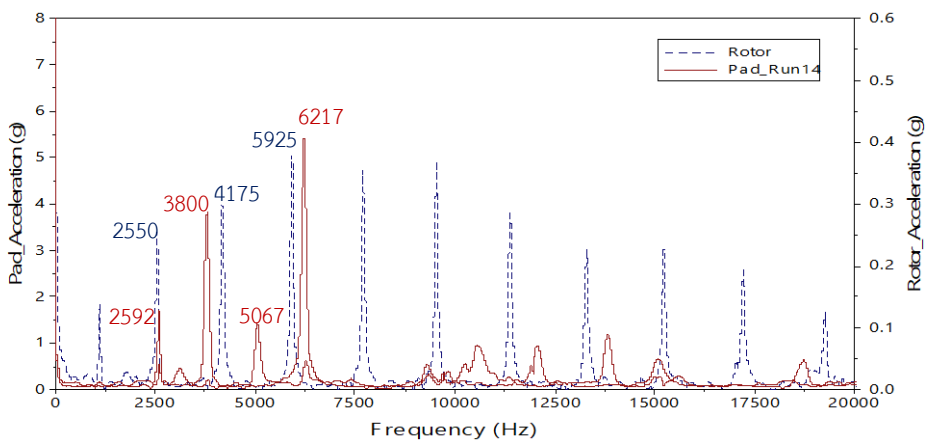
รูปที่ ข-8 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 11



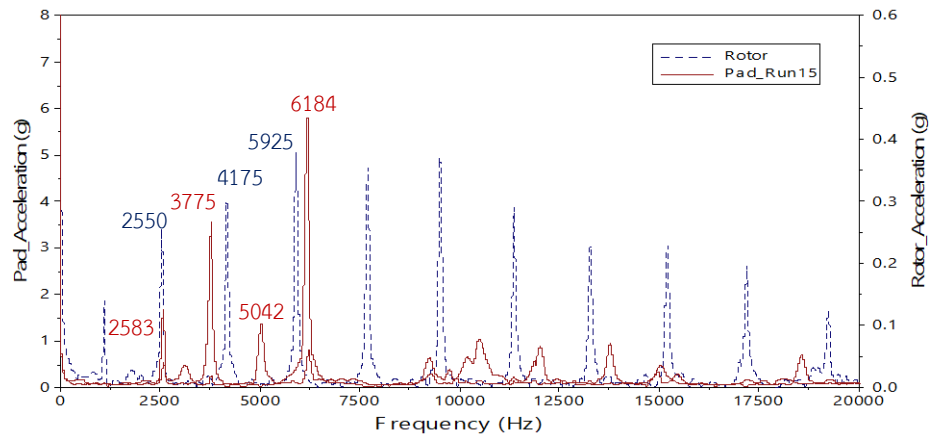
รูปที่ ข-9 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 12



รูปที่ ข-10 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 13



รูปที่ ข-11 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 14



รูปที่ ข-12 ความถี่ธรรมชาติระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกการทดลองที่ 15





ภาคผนวก ค

ตารางสถิติ T

cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
<b>Z</b>	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	<b>Confidence Level</b>										

รูปที่ ค-1 ตารางแสดงค่าสถิติ [59]

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนกร วิลไรรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	10 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดยะลา ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	10/201 ซ.คลองลำเจียก12 ถ.นวมินทร์ นวลจันทร์ บึงกุ่ม กทม. 10230
ผลงานตีพิมพ์	<p>การนำเสนอผลงานระดับนานาชาติและบทความที่ได้รับการตีพิมพ์</p> <p>T. Wilairat, N. Saechin, W. Buggakupta, and P. Sujaridworakun, "Effects of Hot Molding Parameters on Physical and Mechanical Properties of Brake Pads", Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, Bangkok, Thailand, February 7-8th, 2019. (Poster), ISSN: 1662-9795; Key Engineering Material</p> <p>T. Wilairat, N. Saechin, W. Buggakupta, and P. Sujaridworakun, "The effect of hot molding parameters on porosity of brake friction materials", The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and the 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology, Bangkok, Thailand, May 30th, 2019. (Poster)</p>