

การหาค่าเหมาะที่สุดของภาวะการผสมต่อสมบัติทางกายภาพและการเสียดทานของผ้าเบรก



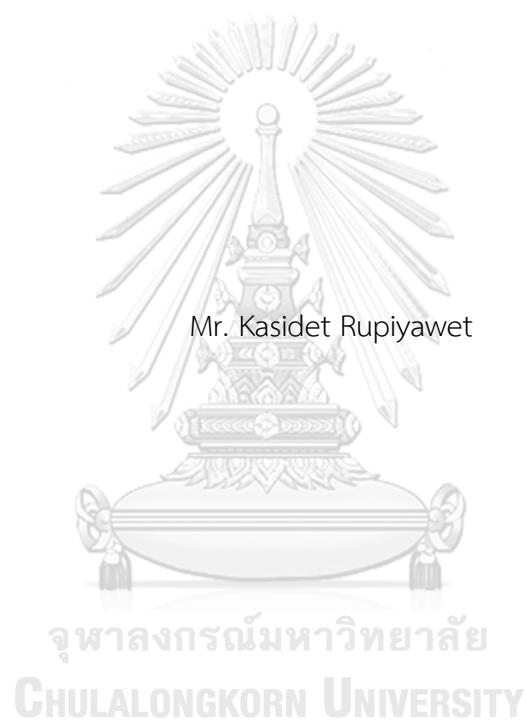
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMIZATION OF MIXING CONDITIONS ON PHYSICAL AND TRIBOLOGICAL 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	การหาค่าเหมาะที่สุดของภาวะการผสมต่อสมบัติทางกายภาพและการเสียดทานของผ้าเบรก
โดย	นายกษิต์เดช รูปิยะเวช
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ)

กชิต์เดช รูปิยะเวช : การหาค่าเหมาะที่สุดของภาวะการผสมต่อสมบัติทางกายภาพและ
การเสียดทานของผ้าเบรก. (OPTIMIZATION OF MIXING CONDITIONS ON
PHYSICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BRAKE PADS) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
ผศ. ดร.วันทนี พุกกะคุปต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.พรนภา สุจริตวรกุล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะการผสมวัสดุบรอนซ์อัดตัว แก๊ส อัตรารอบการหมุนของใบพัด
การผสม เวลา และปริมาตรของส่วนผสมที่ทำการผสมต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และ
สมบัติการเสียดทานได้แก่ ความหนาแน่นบอลลิ่งของวัสดุบรอนซ์อัดตัว ความแข็ง ปริมาณรูพรุน ความ
ถ่วงจำเพาะ โมดูลัสยืดหยุ่น สภาพอัดตัวได้ รวมทั้งอัตรากการสึกหรอและสัมประสิทธิ์การเสียดทาน
ของผ้าเบรก การทดลองนี้ผสมวัสดุบรอนซ์อัดตัวด้วยการปรับภาวะการผสม 3 ภาวะคือ อัตรารอบในการ
ผสม (ที่ 3,000 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาที) เวลาในการผสมวัสดุบรอนซ์ (ที่ 2, 4, 6 และ 8 นาที)
และปรับปริมาตรวัสดุบรอนซ์ที่ใช้ในการผสม (ที่ร้อยละ 35, 50 และ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ
เครื่องผสม) จากการทดลองพบว่า การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทั้งอัตรารอบ เวลา และปริมาตรที่
ผสมวัสดุบรอนซ์ทำให้ค่าความหนาแน่นบอลลิ่งของวัสดุบรอนซ์อัดตัวต่างกันไม่มากนัก โดยเปรียบเทียบ
แล้วเวลาในการผสมเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นบอลลิ่งของวัสดุบรอนซ์อัดตัวมากที่สุด และ
พบว่าสมบัติทางกายภาพ ทางกล และการเสียดทานของผ้าเบรก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความ
หนาแน่นบอลลิ่งของวัสดุบรอนซ์อัดตัวเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองนี้พบว่า
อัตรารอบ 4,500 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 4 นาที และปริมาตรการผสมที่ 65 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตรของเครื่องผสมเป็นภาวะการผสมที่เหมาะสม ที่อัตรารอบ 4,500 รอบต่อนาที
เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเสถียรที่สุด ในขณะที่เวลาในการผสม 4 นาที ปริมาตรใน
การผสมที่ร้อยละ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสมเนื่องจากเป็นการผสมที่ใช้เวลาน้อย
และได้ปริมาณในการผสมมากที่สุดตามลำดับ

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

6072159723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Brakes, Friction material, Mixing, Optimization, Friction

Kasidet Rupiyawet : OPTIMIZATION OF MIXING CONDITIONS ON PHYSICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BRAKE PADS. Advisor: Asst. Prof. Wantanee Buggakupta, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. PORNAPA SUJARIDWORAKUN, Ph.D.

This research investigates the effects of mixing conditions i.e. rotating speed, mixing time and volume loading on physical, mechanical and tribological properties. Bulk density values of mixture were particularly focused, along with hardness, porosity, specific gravity, elastic modulus, compressibility, wear, and friction characteristics of automotive brake materials. In the experiment, mixing raw materials with three different conditions: impeller speed (3000, 4500, and 6000 rpm), mixing duration (2, 4, 6 and 8 min) and loading based on a mixer volume (35, 50 and 65 vol%) were determined using the formulated mixture composition. The results showed that the variation of mixing conditions on the bulk density values was fairly small. The most influential factor on bulk density was mixing duration. The variation in bulk density values of mixture on physical, mechanical and tribological properties of brake pads was not very significant. Mixing speed, mixing time and volume loading of the mixture of 4500 rpm, 4 minutes and 65 vol%, respectively, were the optimum mixing condition according to the experiment. The mixing speed of 4500 rpm gave the most stable friction coefficient meanwhile the latter two provided homogeneous mixing with the shortest time and largest volume, respectively.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ และติดต่อบุคลากรจากองค์กรภายนอก รวมทั้งคณาจารย์ในหลักสูตรปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาเคมีเทคนิคในการให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และรองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

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

ขอขอบคุณบริษัท Compact International (1994) จำกัด สำหรับการเอื้อเฟื้อสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงานและการวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวรูปียะเวช ที่คอยให้การสนับสนุนในทุกด้านและคอยเป็นกำลังใจสำคัญให้กับข้าพเจ้ามาโดยตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กษิติเดช รูปียะเวช

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ผ้าเบรก.....	4
2.1.1 หน้าที่ของผ้าเบรก.....	4
2.1.2 ประเภทของผ้าเบรก.....	5
2.1.3 องค์ประกอบของผ้าเบรก.....	6
2.1.4 สมบัติที่พึงประสงค์ของผ้าเบรก.....	7
2.2 กระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	8
2.3 ทฤษฎีการผสมวัสดุดิบ.....	8

2.3.1 Froude number	8
2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการผสมผงวัตถุบ 9	9
2.3.3 ประเภทเครื่องผสมวัตถุบ	10
2.3.3.1 Paddle mixer	10
2.3.3.2 Ribbon mixer	11
2.3.3.3 V-mixer.....	12
2.3.3.4 Ploughshare mixer	14
2.4. ความหนาแน่นบัลค์.....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย.....	19
3.2 วัตถุบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.4.1 การเตรียมวัตถุบ.....	22
3.4.2 การผสมวัตถุบ.....	22
3.4.2.1 การเตรียมส่วนผสมผงวัตถุบเพื่อพิจารณาตัวแปรในการทดลองด้วยวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	22
3.4.2.2 การหาค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบหลังผสม.....	24
3.4.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็น.....	25
3.4.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์ร้อน	26
3.4.5 การอบชิ้นงานผ้าเบรก	27
3.4.6 การขัดตกแต่งผ้าเบรก	27
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก.....	28

3.4.7.1 ความถ่วงจำเพาะและความเป็นรูพรุน	28
3.4.7.2 ความแข็ง	29
3.4.7.3 โมดูลัสยืดหยุ่น	30
3.4.7.4 สภาพอัดตัวได้.....	31
3.4.8 การทดสอบประสิทธิภาพของผ้าเบรก.....	32
3.4.8.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก	32
3.4.9 โครงสร้างจุลภาค.....	33
3.4.10 การวิเคราะห์ปัจจัยการผสมวัสดุกับด้วยโปรแกรม Minitab.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 การศึกษาลักษณะองค์ประกอบของผ้าเบรก.....	37
4.2 การศึกษาปัจจัยการผสมวัสดุกับความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสม.....	37
4.2.1 การศึกษาลักษณะของวัสดุบหลังผสม	41
4.2.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก	44
4.2.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อปริมาณรูพรุนของผ้าเบรก.....	45
4.2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อความแข็งของผ้าเบรก	46
4.2.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	47
4.2.6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก	48
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นบัลค์ของผงวัสดุบหลังผสมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก	49
4.3.1 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อความหนาแน่นของผ้าเบรก..	50
4.3.2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	51
4.3.3 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อความพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก.....	52
4.3.4 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อลักษณะผิวผ้าเบรก.....	53

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของผ้าเบรก.....	58
4.4.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก.....	58
4.4.2 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรก	61
4.5 การศึกษาลักษณะการสึกของผ้าเบรก.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.1.1 การปรับเปลี่ยนภาวะผลมต่อสมบัติของวัสดุบหลังผลม	70
5.1.2 ค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผลมต่อสมบัติของผ้าเบรก	70
5.1.3 การปรับเปลี่ยนภาวะผลมต่อสมบัติของผ้าเบรก	70
5.1.4 ภาวะการผลมที่เหมาะสมที่สุด	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	76
ประวัติผู้เขียน	88

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการผสมผงวัตถุดิบ	9
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบวัตถุดิบผ้าเบรกสำหรับการทดลอง.....	22
ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา.....	23
ตารางที่ 3.3 การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมตามการออกแบบด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box- Behnken) (ดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ก).....	24
ตารางที่ 4.1 การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม	38
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมด้วย.....	39
ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นบัลค์ต่อเวลาการผสม	44
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ 0.610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	57
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	57
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกหลังการทดสอบประสิทธิภาพด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก	69

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม เก็บตัวอย่างระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561	2
รูปที่ 2.1 ระบบเบรกรถยนต์	4
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของผ้าเบรกรถยนต์	7
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรกรถยนต์	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการผสมในรูปแบบต่าง ๆ	9
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการผสมวัตถุดิบที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ	10
รูปที่ 2.6 เครื่องผสมชนิด Double shafts paddle mixer	11
รูปที่ 2.7 เครื่องผสมชนิด Ribbon mixer	12
รูปที่ 2.8 เครื่องผสมชนิด V-mixer	13
รูปที่ 2.9 เครื่องผสมชนิด Ploughshare mixer	14
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบความหนาแน่นบัลค์ (รวมรูพรุน) กับความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ	15
รูปที่ 2.11 รูปแบบการเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบหลังผสม	16
รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานทดลอง.....	20
รูปที่ 3.2 เครื่องผสมวัตถุดิบแบบ Ploughshare mixer (ก) เครื่องผสมขนาด 20 ลิตร (ข) ภายในเครื่องผสมประกอบด้วยใบพัด 2 ชนิด.....	23
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการวัดความหนาแน่นบัลค์.....	25
รูปที่ 3.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็นในแม่พิมพ์ (ก) แทนแม่พิมพ์เย็นที่ใช้ในการทดลอง (ข) ขนาดพื้นที่กันแม่พิมพ์ 75.68 ตารางเซนติเมตร	25
รูปที่ 3.5 (ก) ชิ้นงานและแม่พิมพ์สำหรับการพิมพ์ร้อน (ข) ชิ้นงานหลังการพิมพ์ร้อน	26
รูปที่ 3.6 การอบชิ้นงานในตู้อบ (ก) ชั้นวางชิ้นงานสำหรับอบ (ข) ตู้อบ.....	27
รูปที่ 3.7 เครื่องขัดตกแต่งผ้าเบรก	27

รูปที่ 3.8 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ.....	29
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการตัดเป็นชิ้นเล็กและก่อนตัดชิ้นงาน	29
รูปที่ 3.10 การวัดความแข็งของผ้าเบรก	30
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของผ้าเบรก.....	30
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	31
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	31
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก	32
รูปที่ 3.15 (ก) เครื่องทดสอบค่าความเสียดทานของผ้าเบรก (ข) ชิ้นงานสำหรับทดสอบ	33
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์	34
รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-IT300.....	34
รูปที่ 3.18 เตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบด้วยการนำมาเคลือบทอง.....	35
รูปที่ 4.1 สันฐานวิทยาของวัตถุบิที่ใช่ผสมเป็นชิ้นทดสอบผ้าเบรก.....	37
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการผสมและค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบิหลังผสม..	40
รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากภาวะการผสมต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบิหลังผสม.....	40
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอะรามิดก่อนการผสม.....	42
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยต่อการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมวัตถุบิ	43
รูปที่ 4.6 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก.....	45
รูปที่ 4.7 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก.....	46
รูปที่ 4.8 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อค่าความแข็งของผ้าเบรก.....	47
รูปที่ 4.9 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	48
รูปที่ 4.10 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก	49
รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบิหลังผสมต่อความหนาของผ้าเบรก.....	50
รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบิหลังผสมต่อความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก	51

รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อปริมาณรุกรุ่นและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก	52
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม 0.610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาวะการผสมที่ 3,000 รอบต่อนาที 6 นาที และ 65 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของเครื่องผสม)	55
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาวะการผสมที่ 4,500 รอบต่อนาที 4 นาที และ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของเครื่องผสม)	56
รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที	60
รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที	60
รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที	61
รูปที่ 4.19 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที	63
รูปที่ 4.20 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที	63
รูปที่ 4.21 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที	64
รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที	65
รูปที่ 4.23 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที	65
รูปที่ 4.24 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกหลังการทดสอบที่ผสมด้วยเวลาในการผสมที่ 4 นาที	67
รูปที่ 4.25 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกหลังการทดสอบที่ผสมด้วยเวลาในการผสมที่ 8 นาที	68

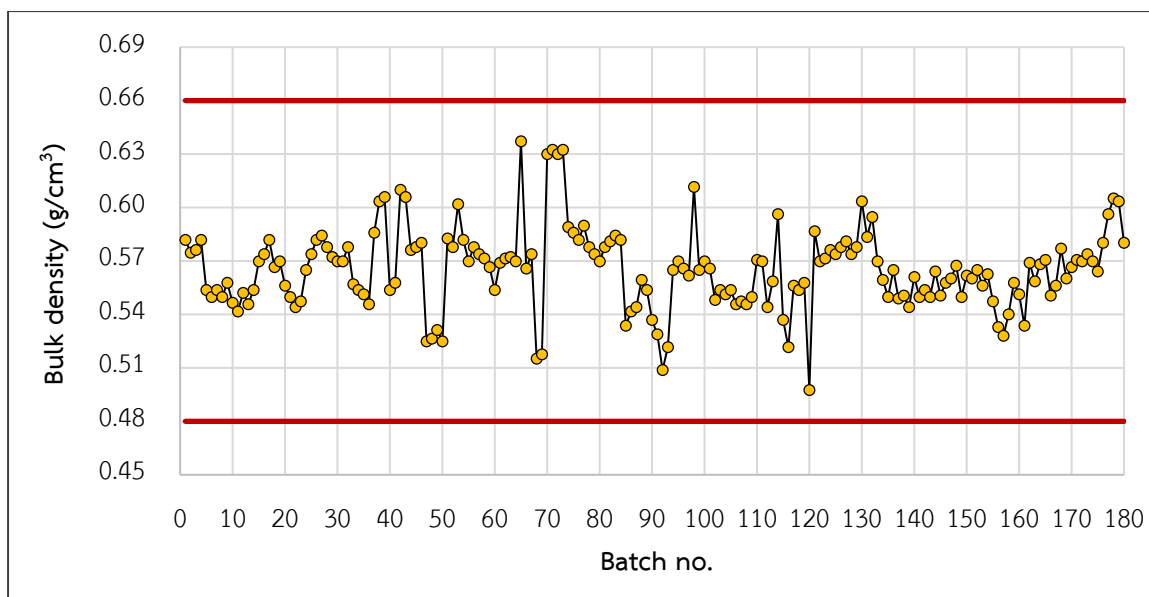
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตผ้าเบรกประกอบด้วยกระบวนการหลายขั้นตอนได้แก่ การผสม การอัดขึ้นงานพิมพ์เย็น (ขึ้นรูปขึ้นงาน) การอัดขึ้นงานพิมพ์ร้อน (อัดขึ้นงานพิมพ์เย็นติดกับเหล็ก) การอบ การขัดหน้าผ้าเบรกให้เรียบ และการตรวจสอบคุณภาพขึ้นงาน ตามลำดับ โดยปัญหาแรกที่พบคือค่าความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) ของวัตถุดิบหลังผสมมีความไม่เสถียรดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งถึงแม้ว่าจะอยู่เกณฑ์ที่โรงงานยอมรับได้ (เส้นสีแดง) แต่ยังคงไม่ทราบว่าค่าความหนาแน่นบัลค์ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนี้ส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของผ้าเบรกอย่างไรบ้าง จึงเป็นจุดเริ่มต้นถึงความสนใจในการศึกษางานวิจัยนี้ อีกทั้งยังพบว่าปัญหาขึ้นงานหลังกระบวนการอัดพิมพ์ร้อนมีความหนาเกินเกณฑ์ที่กำหนด ส่งผลต่อกระบวนการถัดไปคือทำให้ขัดหน้าผ้าเบรกส่วนเกินทิ้งออกไปเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้พบว่าความหนาแน่นในแต่ละจุดในขึ้นงานผ้าเบรกมีค่าไม่เท่ากันซึ่งอาจเป็นเหตุให้เกิดการสึกของผ้าเบรกที่ไม่เท่ากันในแต่ละจุดของขึ้นงาน หรืออาจเกิดเสียงในขณะการเบรกได้จากปัญหาดังที่กล่าวมานี้จึงเป็นที่มาในการแก้ปัญหาด้วยการแก้ที่กระบวนการผสมผงวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการต้นน้ำที่จะส่งต่อไปถึงกระบวนการถัดไปทุกกระบวนการ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานจากปัญหาที่พบในกรณีความหนาของขึ้นงานส่วนเกิน อาจมีสาเหตุมาจากค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม และสมมติฐานข้อที่สองคือจากปัญหาเรื่องความหนาแน่นในแต่ละจุดของผ้าเบรกไม่เท่ากัน อาจมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของวัตถุดิบหลังผสมที่ไม่สม่ำเสมอ หรือการกระจุกเป็นก้อนในบางจุด เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นศึกษาผลของการปรับค่าการทำงานของเครื่องผสมวัตถุดิบที่มีต่อวัตถุดิบหลังผสม และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติการเสียดทานของผ้าเบรก



รูปที่ 1.1 ค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม เก็บตัวอย่างระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของภาวะการผสมที่มีต่อความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติการเสียดทานของผ้าเบรก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 8 ชนิด คือ เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber), เส้นใยร็อกวูล (Rockwool fiber), ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) เซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium silicate) ผงขัด (Friction dust) แกรไฟต์สังเคราะห์ (Synthetic graphite) และ ทองแดง (Copper chip)

1.3.2 ปัจจัยที่ทำการศึกษาในกระบวนการผสมวัตถุดิบ คือ อัตราเร็วรอบการผสม เวลาที่ใช้ในการผสม และปริมาตรส่วนผสมวัตถุดิบ

1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการทดสอบความหนาแน่นบัลค์

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรกด้วยการทดสอบความถ่วงจำเพาะ ปริมาณรูพรุนและความแข็ง

1.3.5 ทดสอบสมบัติทางกลของผ้าเบรกด้วยการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น และสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

1.3.6 ทดสอบสมบัติการเสียดทานของผ้าเบรกด้วยการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมผงวัตถุดิบ และทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับสมบัติทางกายภาพ ทางกล และการเสียดทานของผ้าเบรกเพื่อสร้างเกณฑ์การตรวจสอบวัตถุดิบหลังผสม



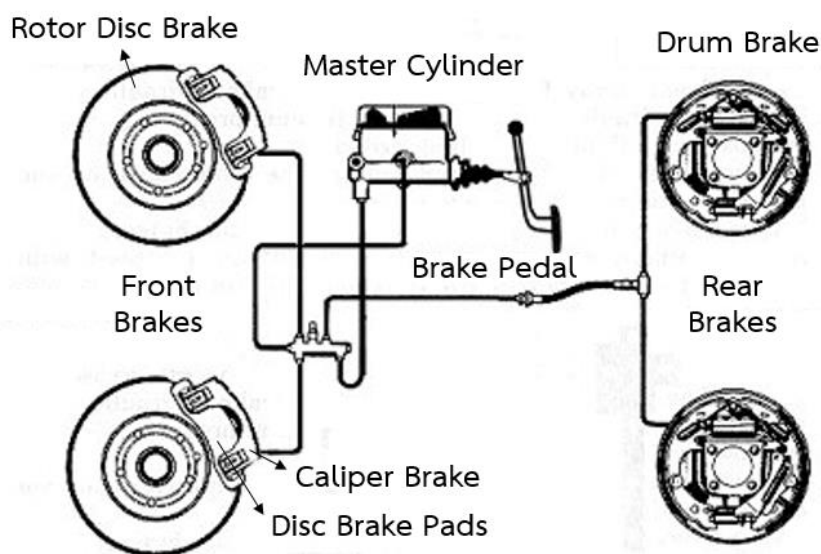
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผ้าเบรก

2.1.1 หน้าที่ของผ้าเบรก

ผ้าเบรกมีหน้าที่ในการชะลอความเร็วของรถยนต์ ขณะที่เราเหยียบเบรกลงที่แป้นเบรก แรงเหยียบนี้จะถูกส่งไปที่แม่ปั้มน้ำมันเบรก (Master Cylinder) เพื่อทำหน้าที่อัดแรงดันน้ำมันเบรกออกไปตามท่อน้ำมันเบรก ผ่านวาล์วแยกส่วนน้ำมันเบรกส่งเข้าไปในชุดคาลิปเปอร์ (Caliper) ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณคัมล้อและที่ตำแหน่งนั้นจะมีลูกปั้มน้ำมันเบรก เมื่อได้รับแรงดันมา ลูกปั้มน้ำมันเบรกดันให้ผ้าเบรก ไปเสียดทานกับชุดจานดิสก์เบรกหรือดรัมเบรก ทำให้ผ้าเบรกบีบทั้งสองด้านของจานดิสก์เบรกทำให้ล้อหยุดหมุน อาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากรถยนต์ที่มีความเร็วเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานของผ้าเบรกและจานดิสก์เบรก เพื่อทำการชะลอความเร็วลง



รูปที่ 2.1 ระบบเบรกรถยนต์ [1]

2.1.2 ประเภทของผ้าเบรก

ผ้าเบรกสามารถแบ่งออกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตได้ 5 ประเภท [2]

1. แร่ใยหิน (Asbestos) เป็นผ้าเบรกยุคเก่าที่ใช้แร่ใยหินเป็นองค์ประกอบหลัก ข้อดีคือมีความแข็งแรง ทนต่อความร้อนได้สูง และมีราคาถูก แต่ข้อเสียคือฝุ่นที่อยู่ในแร่ใยหินมีความเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจอย่างมาก ทำให้ช่วงหลังผ้าเบรกแบบ Asbestos ไม่ได้ได้รับความนิยมเท่าที่ควร

2. วัสดุอินทรีย์ที่ไม่ใช่เส้นใยหิน (Non Asbestos Organic, NAO) เป็นกลุ่มวัสดุที่เลือกใช้สังเคราะห์ที่ไม่ใช่โลหะ ลักษณะเด่นคือน้ำหนักเบา ง่ายต่อการควบคุมไม่ให้เกิดฝุ่นหรือเสียง และให้แรงเสียดทานสูง แต่จะมีข้อจำกัดที่ส่วนมากจะต้องการส่วนผสมหลายชนิด การทนอุณหภูมิการใช้งานที่สูงมาก ๆ ไม่ค่อยดี คายความร้อนได้ยาก และที่สำคัญใยสังเคราะห์ยังคงมีอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจอยู่บ้าง

3. วัสดุกึ่งโลหะ (Semi-Metallic materials) เป็นกลุ่มวัสดุที่ใช้ใยเหล็ก ลักษณะเด่นตรงมีความปลอดภัยสูงมากต่อระบบทางเดินหายใจ และมีความสามารถในการทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี คายความร้อนได้ดีถึงแม้จะทนความร้อนได้น้อยกว่าแบบ Metallic แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมไม่ให้เกิดเสียงดังและเขม่าดำเวลาเบรกได้

4. ผงโลหะ (Fully Metallic หรือ Metallic materials) เป็นกลุ่มวัสดุที่ใช้ผงเหล็กละเอียดมาขึ้นรูป ซึ่งผงเหล็กที่ใช้จะเป็นผงเหล็กพิเศษโดยจะมีสมบัติของแรงเสียดทานอยู่ในตัว ข้อดีคือมีประสิทธิภาพสูง ทนทานต่อความร้อนหรืออุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี เหมาะกับสภาพการเบรกแล้วหยุดในทันทีทันใด แต่ข้อเสียคือ ผ้าเบรกแบบนี้มันทำให้จานเบรกสึกง่าย และมีเขม่าดำและเสียงดังเวลาเบรก

5. วัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เป็นผ้าเบรกที่ใช้กลุ่มวัสดุที่อยู่นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไปแล้วโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ที่มีคุณลักษณะพิเศษต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ใช้ นอกจากนี้ผ้าเบรกสามารถแบ่งได้ตามเกรดดังนี้

- เกรดมาตรฐาน (Standard, S) ใช้กับรถยนต์ทั่วไป ส่วนผสมของเนื้อผ้าเบรคนั้นสร้างความฝืดได้ง่าย สามารถลดความเร็วได้ทันทีไม่ต้องมีการการอุ่นผ้าเบรก ทำงานได้ดีเฉพาะช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลาง สาเหตุที่รถยนต์ทั่วไปถูกกำหนดให้ใช้ผ้าเบรกเกรดนี้ เพราะส่วนใหญ่มีการใช้ความเร็วไม่สูงนัก ซึ่งนับว่าเพียงพอในระดับหนึ่ง

- เกรดกลาง (Medium-Metal, M) ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของโลหะอ่อน หรือวัสดุที่สามารถสร้างแรงเสียดทานเมื่อมีความร้อนสูงได้ดี มีความแข็งปานกลาง สามารถรองรับการเบรกในช่วงความเร็วปานกลางถึงสูงได้ดี ทนทานต่อความร้อนสะสมในการเบรกสูงชันกว่าเกรดผ้าเบรกเกรด

มาตรฐาน แต่ยังคงประสิทธิภาพการใช้งานช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลางได้ดี ไม่ต้องอุ่นผ้าเบรก แต่มีราคาสูงกว่าผ้าเบรกเกรดมาตรฐาน

- เกรดกึ่งแข่งขัน (Racing, R) เป็นผ้าเบรกเกรดพิเศษ เนื้อของผ้าเบรกมักจะมีการผสมของผงเนื้อโลหะไว้มาก การใช้งานในเมืองด้วยความเร็วต่ำจึงต้องมีการอุ่นผ้าเบรกให้ร้อนก่อน ซึ่งถูกผลิตเพื่อรองรับรถยนต์สมรรถนะสูงหรือรถแข่ง เหมาะกับการใช้ความเร็วสูง หรือมีความร้อนสะสมที่ผ้าเบรกจากการเบรกถี่ ๆ และรุนแรงจึงไม่ค่อยเหมาะกับรถยนต์ที่ใช้งานทั่วไป

2.1.3 องค์ประกอบของผ้าเบรก

วัสดุเสียดทาน (Friction material) เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของผ้าเบรกดังแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบไปด้วยผงวัตถุ 15-18 ชนิด โดยสามารถจำแนกได้ตามหน้าที่การทำงานออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

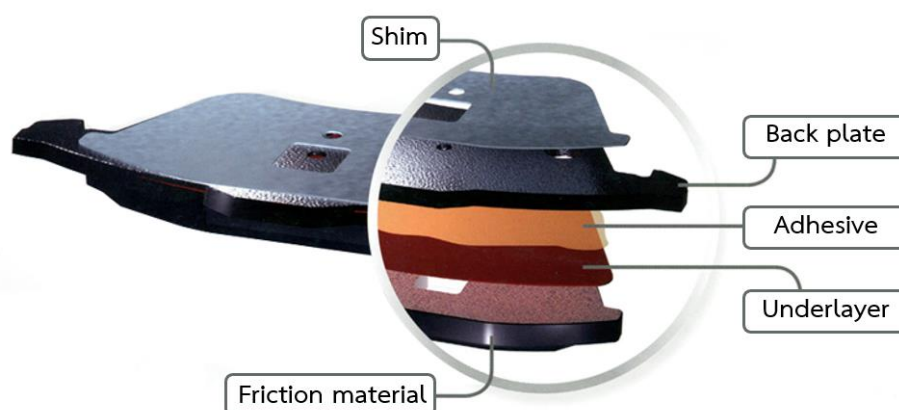
1. สารยึดติด (Binder) ทำหน้าที่ยึดทุกองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง สารยึดติดนี้มักเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ทั้งในรูปแบบที่บริสุทธิ์ หรือผ่านการดัดแปร (Modified phenolic resins) โดยส่วนใหญ่แล้วฟีนอลิกเรซินชนิดดัดแปรจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเสียดทาน การสั่น และความกระด้างของวัสดุเสียดทาน

2. เส้นใย (Fiber) ทำให้การขึ้นรูปของวัสดุเสียดทานง่ายขึ้น มีความคงตัวก่อนที่จะมีการอัดด้วยความร้อน โดยส่วนใหญ่ในการผลิตผ้าเบรกจะใช้เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นเส้นใยสังเคราะห์ประเภททนไฟและความร้อนสูง

3. ผงขัด (Abrasive) เป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความแข็งสูง ช่วยเพิ่มระดับของแรงเสียดทาน โดยเฉพาะช่วงต้นของการเหยียบเบรกให้รถหยุด นอกจากนี้ยังช่วยในการรักษาความสะอาดของพื้นผิวจานเบรกที่สัมผัสกับวัสดุเสียดทาน และควบคุมการสะสมของฟิล์มที่เกิดบนผิวโลหะ

4. สารตัวเติม (Filler) ใช้ในการควบคุมอัตราส่วนโดยรวมของวัสดุเสียดทาน ลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงความพรุน สารตัวเติมบางชนิดอาจมีหน้าที่พิเศษอีก เช่น ปรับปรุงระดับของแรงเสียดทาน สารตัวเติมนี้อาจเป็นผงโลหะ โลหะผสม เซรามิกซ์ หรือสารอินทรีย์ก็ได้

5. สารหล่อลื่น (Lubricant) ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเสียดทานและผิวโลหะ (จานเบรก) ที่สัมผัส ซึ่งจะทำให้การสึกของผิวโลหะลดลง อาจมีการใช้สารหล่อลื่นหลายชนิดเพื่อให้สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ทำให้ผ้าเบรกสามารถรองรับการใช้งานได้มากขึ้น



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของผ้าเบรกรถยนต์ [3]

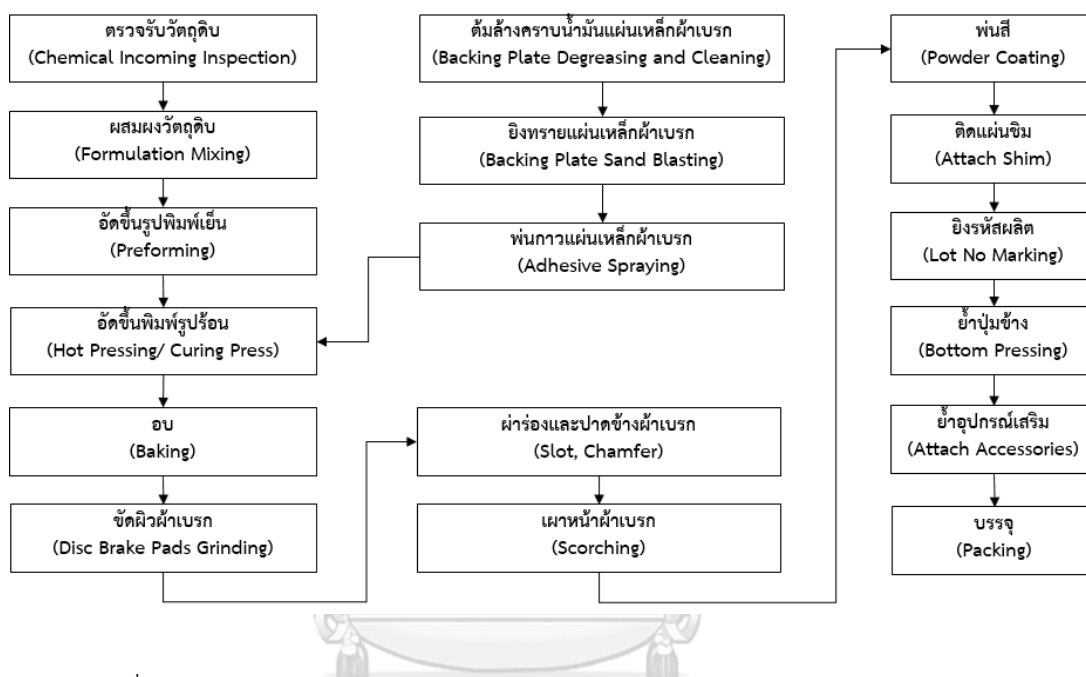
2.1.4 สมบัติที่พึงประสงค์ของผ้าเบรก

สมบัติที่ควรมีของผ้าเบรกขึ้นอยู่กับลักษณะการขับขี่ ลักษณะการใช้งาน รวมถึงประเภทของรถยนต์ที่ขับขี่ โดยสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ [4]

- กลุ่มใช้ความเร็วทั่วไปหรือรถบ้าน ใช้งานเดินทางในเมืองหรือต่างจังหวัดนาน ๆ ครั้ง ใช้งานลักษณะนี้ ใช้ผ้าเบรกเกรดมาตรฐานที่ไม่มีส่วนผสมของโลหะก็เพียงพอแล้ว ใช้งานง่ายสะดวก ไม่ต้องรออุณหภูมิที่สูงมากเบรกก็สามารถเริ่มทำงานได้ดีในช่วงต้น ๆ
- กลุ่มใช้ความเร็วสูง มักเดินทางต่างจังหวัดโดยใช้ความเร็วสูงและเดินทางบ่อย ใช้งานลักษณะนี้ ใช้ผ้าเบรกในกลุ่มผ้าเบรก Semi-metallic เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความมั่นใจ ความทนทานของการสึกของระยะผ้าเบรกได้ เนื่องจากอาจต้องใช้เบรกบ่อยครั้ง เกิดความร้อนสะสมมาก เวลาใช้งานจะทำให้ไม่เกิดการคายแก๊สของผ้าเบรกระหว่างการเหยียบเบรก แต่ช่วงเริ่มการใช้งานในตอนเบรกกังยังเย็นตัว ควรรอให้ความร้อนสะสมในผ้าเบรกสูงก่อนเพราะในช่วงเริ่มการใช้งานใหม่ ๆ ความร้อนในเบรกกังยังไม่สูงมาก ลักษณะการเบรกอาจจะมีอาการลื่นอยู่บ้าง
- กลุ่มรถบรรทุกของที่มีน้ำหนักมากหรือรถตู้ รถโดยสาร และรถกระบะที่ชนของหนัก ๆ เดินทางไกล ขึ้นเขาหรือทางลาดชันเป็นประจำ ใช้งานลักษณะนี้ใช้ผ้าเบรกในกลุ่มผ้าเบรก Semi-metallic ที่สำคัญรถในกลุ่มนี้ต้องใช้งานเบรกบ่อย เกิดความร้อนที่สะสมสูง ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ประกอบกับน้ำหนักของรถที่หนัก ขึ้นเขาลงเขาบรรทุกทุกสิ่งของต่อเนื่อง ใช้งานรถในกลุ่มนี้ต้องตรวจสอบระบบเบรกและส่วนควบทั้งระบบทุกระบบเป็นประจำ เพราะรถใช้งานหนักต่อเนื่องความสึกย่อมเกิดได้มากและเร็วกว่าการใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ

2.2 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

กระบวนการผลิตผ้าเบรกของโรงงานที่ทำการศึกษามีกระบวนการผลิตซึ่งงานมีกระบวนการหลัก 6 กระบวนการคือ ตรวจสอบวัตถุดิบ ผสมผงวัตถุดิบ อัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็น อัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์ร้อน (อัดติดเข้ากับแผ่นเหล็ก) อบ และขัดผิวผ้าเบรกให้เรียงดังแสดงในรูปที่ 2.3 กระบวนการหลังจากนี้อาทิ การผ่าร่องผ้าเบรก ปาดข้างผ้าเบรก หรือการเผาหน้าผ้าเบรกซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรกรถยนต์โรงงาน Compact International (1994)

2.3 ทฤษฎีการผสมวัตถุดิบ

2.3.1 Froude number

การผสมของแข็งหรือการผสมวัตถุดิบนั้น ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของส่วนผสมชนิดต่าง ๆ และการเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ นั้นก็เป็นผลจากรูปแบบที่แตกต่างกันของเครื่องผสมวัตถุดิบ ซึ่งชนิดของเครื่องผสมวัตถุดิบสามารถจำแนกออกเป็นประเภทได้โดยอาศัย Froude number (Fr) ดังสมการที่ 2.1 [5]

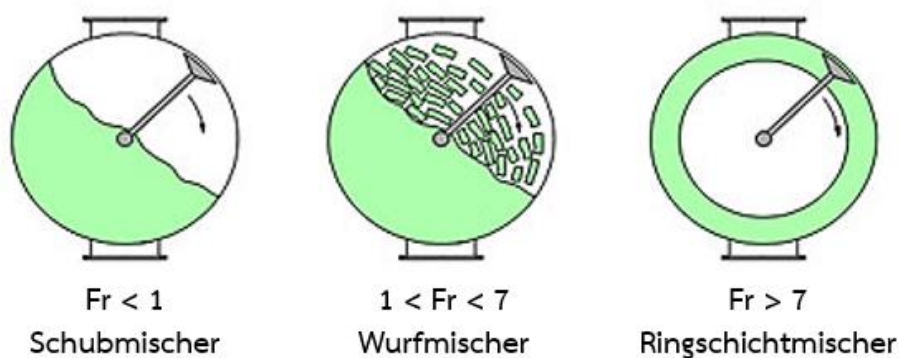
$$Fr = \frac{Rw^2}{g} \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือ รัศมีของเครื่องผสมวัตถุดิบ (m)

w คือ ความเร็วเชิงมุม (Hz หรือ s^{-1})

g คือ แรงโน้มถ่วง (m/s^2)

โดยความหมายของ Froude number คือเมื่อ $Fr < 1$ หมายความว่าแรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้มีวัตถุดิบยังคงเกาะตัวกันได้ เครื่องผสมวัตถุดิบ และในขณะเดียวกัน $Fr > 7$ หมายความว่าแรงเข้าสู่ศูนย์กลางมากกว่าแรงโน้มถ่วง ซึ่งอาจทำให้วัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องผสมแขวนลอยอยู่ติดกับผนังเครื่องผสม โดยในงานวิจัยนี้มีลักษณะการผสมแบบ Wurfmischer ($1 < Fr < 7$) ดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากใช้เครื่องผสมประเภท Ploughshare mixer



รูปที่ 2.4 ลักษณะการผสมในรูปแบบต่าง ๆ [6]

2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการผสมผงวัตถุดิบ

ปัจจัยในการผสมผงวัตถุดิบมีหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผสม อัตราเร็วรอบในการผสม รวมถึงเวลาในการผสมดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงนั้นปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเวลาในการผสมซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมปริมาณผลิตภัณฑ์ในแต่ละวัน

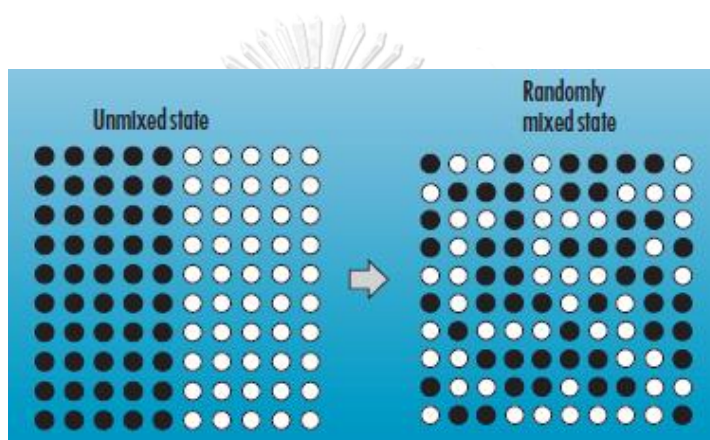
ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการผสมผงวัตถุดิบ [7]

ตัวแปร	ผลกระทบ
ปริมาณเครื่องผสม	ปริมาณเครื่องผสมมาก ทำให้ใช้เวลาในการผสมนานขึ้น และสำหรับเครื่องผสมที่ $Fr > 1$ เมื่อมีปริมาณน้อย ๆ เวลาในการผสมจะค่อนข้างคงที่
อัตราเร็วรอบในการผสม	อัตราเร็วรอบในการผสมมาก ใช้เวลาในการผสมน้อยลง
Froude number	ค่า Fr มากจะทำให้ใช้เวลาในการผสมได้น้อยลง แต่ถ้าหาก Fr มากกว่า 1 มาก ๆ อาจทำให้ผงเคมีแตกตัวได้
ขนาดของวัตถุดิบ	ยังมีขนาดอนุภาคต่างกันมาก ยิ่งทำให้ผสมได้ยาก

2.3.3 ประเภทเครื่องผสมวัตถุดิบ

การผสมคือพื้นฐานหรือกระบวนการทั่วไปที่พบได้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่ง ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมอาหาร ผงเคมี ยา พลาสติก รวมถึงอุตสาหกรรมผ้าเบรกด้วย หลักการของการผสมเบื้องต้นคือการนำวัตถุดิบอย่างน้อยสองอย่างมาผสมเข้าด้วยกัน และเมื่อผสมออกมาแล้ว ต้องมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอสำหรับวัตถุดิบทั้งสองดังรูปที่ 2.5 และสถานะโดยรวมของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมอาจมีได้ทั้งสถานะแก๊ส ของเหลว และของแข็ง

สำหรับประเภทของเครื่องผสมวัตถุดิบ สามารถจำแนกออกตามลักษณะการผสมใช้งานและลักษณะทางกายภาพของเครื่องผสมได้ทั้งหมด 4 ชนิดดังนี้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการผสมวัตถุดิบที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [8]

2.3.3.1 Paddle mixer จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องผสมประเภทนี้เป็นที่นิยมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับการผสมวัตถุดิบของแข็งในปริมาณมาก ซึ่งเครื่องผสมที่ใช้ในปัจจุบันนี้คือ Double shafts paddle mixer (Fluidized bed mixer) โดยแนวคิดหลักของเครื่องผสมนั้นคือการผสมด้วยใบพัดคู่แบบต่อเนื่อง สำหรับด้านประสิทธิภาพการผสมเครื่องผสมต้องสามารถสร้างอัตราเร็วรอบในการผสมให้มากพอที่จะยกวัตถุดิบและสร้างสถานะลอยตัวอย่างอิสระ (Fluidization zone) ได้ที่ตำแหน่งตรงกลางของเครื่องผสมซึ่งเป็นตำแหน่งที่วัตถุดิบเกิดการผสมกัน ดังรูปที่ 2.6

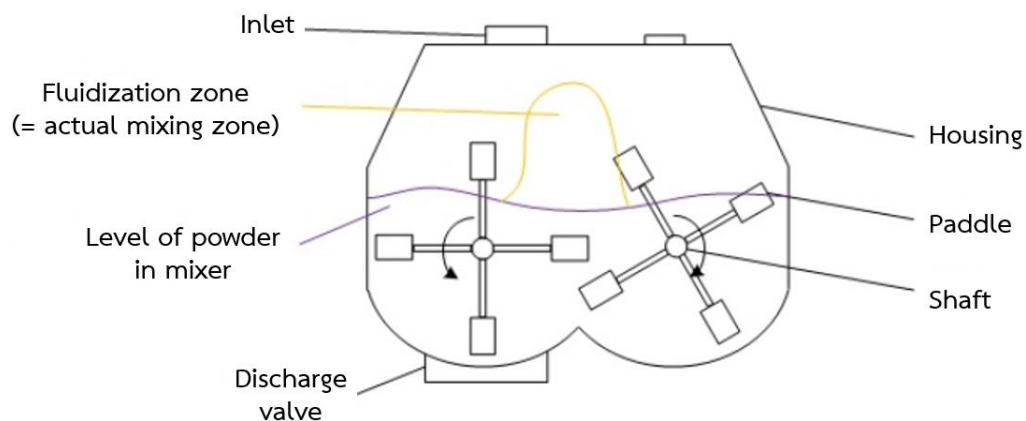
สำหรับปริมาณการใส่วัตถุดิบที่เหมาะสมขั้นต่ำคือร้อยละ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสมและใส่ได้มากที่สุดถึงร้อยละ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม

อัตราเร็วรอบการผสมที่เหมาะสมต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ Froude number (Fr) มีค่า 1 ถึง 1.1 สามารถทำให้เกิดความเฉื่อยที่มากพอสำหรับการเอาชนะแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อวัตถุดิบของแข็ง เพื่อสร้างพื้นที่การลอยตัวอย่างอิสระในระหว่างการผสม ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$Fr = 1.1 = \frac{\left(\frac{n}{60}\right)^2 \times R \times 4 \times \pi^2}{9.81} \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ ระยะจากแกนเพลผสมถึงปลายใบพัด (m)

n คือ อัตราเร็วรอบในการผสม (rpm)



รูปที่ 2.6 เครื่องผสมชนิด Double shafts paddle mixer [9]

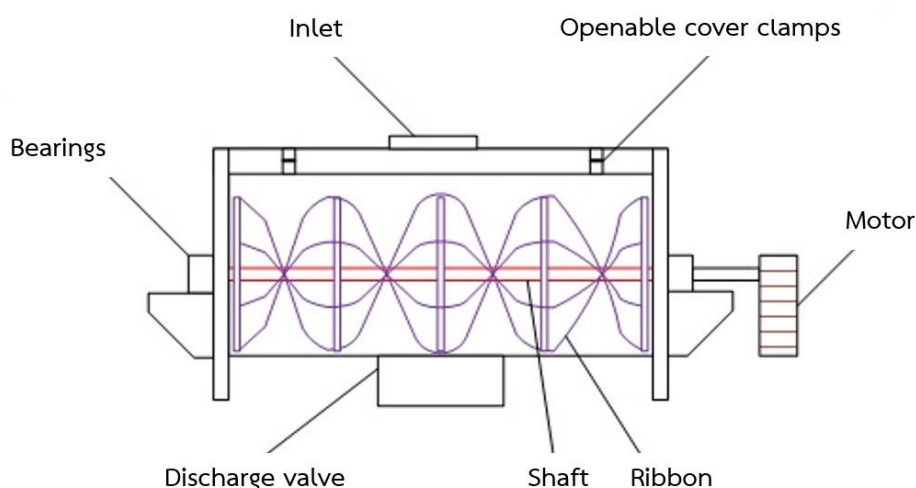
2.3.3.2 Ribbon mixer

Ribbon mixer เป็นเครื่องผสมที่โรงงานอุตสาหกรรมรู้จักกันเป็นวงกว้างสำหรับการผสมวัตถุดิบของแข็งในปริมาณมาก เป็นรูปแบบการผสมวัตถุดิบของแข็งแห้งที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ เครื่องผสมประเภทถูกใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหารและเบเกอรี่ เครื่องสำอาง พลาสติก เครื่องเทศ ส่วนผสมสำหรับเครื่องดื่ม ยาแนวซีเมนต์ ปูน กากแผล ไซ และยาสูบ หลักการสำหรับเครื่องผสมประเภทนี้คือการผสมแบบการพาวัตถุดิบ ซึ่งทิศทางในการผสมวัตถุดิบที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมมีทั้งสองทิศทางจากรูปที่ 2.7 ทิศทางแรกวัตถุดิบจะถูกพาไปทางด้านขวาของเครื่องผสมด้วยด้านนอกของใบพัด และอีกทิศทางวัตถุดิบจะถูกพาไปด้านซ้ายของเครื่องผสมด้วยด้านในของใบพัด จึงเป็นที่มาของการผสมกันของวัตถุดิบสำหรับเครื่องผสมประเภทนี้ ข้อควรระวังคือผู้ใช้งานต้องศึกษาถึงทิศทางที่พาวัตถุดิบเข้าวาล์วเครื่องผสม อาจทำให้อัตราการระบายที่ดีของวัตถุดิบหลังผสมจะไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามเครื่องผสมประเภทนี้เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไม่มี ความหนืด ประสิทธิภาพของเครื่องผสม

จะน้อยลงเมื่อทำงานร่วมกับวัตถุดิบที่มีความหนืด และถ้าวัตถุดิบมีความหนืดสูงการผสมอาจเกิดการติดขัดได้

สำหรับปริมาณการใส่วัตถุดิบที่เหมาะสม สามารถใส่ได้มากที่สุดที่ร้อยละ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม โดยต้องให้ระดับของวัตถุดิบที่ใส่ไปไม่เกินส่วนด้านบนสุดของใบพัด และไม่ควรใส่วัตถุดิบน้อยจนเกินไปเพราะเมื่อระดับวัตถุดิบต่ำกว่าใบพัดด้านใน ทำให้ไม่สามารถพาวัตถุดิบไปผสมกันได้ทั่วทั้งเครื่องผสม

อัตราเร็วรอบในการผสมที่แนะนำสำหรับเครื่องผสมประเภทนี้ในขนาดกลางที่ 500 ถึง 2,000 ลิตรคือ 50 รอบต่อนาทีหรือที่ Froude number น้อยกว่า 1 และโดยทั่วไปเวลาที่เหมาะสมสำหรับการผสมอยู่ที่ 3 ถึง 5 นาทีถ้าการผสมวัตถุดิบไม่มีความเฉพาะเจาะจง (การฉีกของเหลวระหว่างการผสม)



รูปที่ 2.7 เครื่องผสมชนิด Ribbon mixer [10]

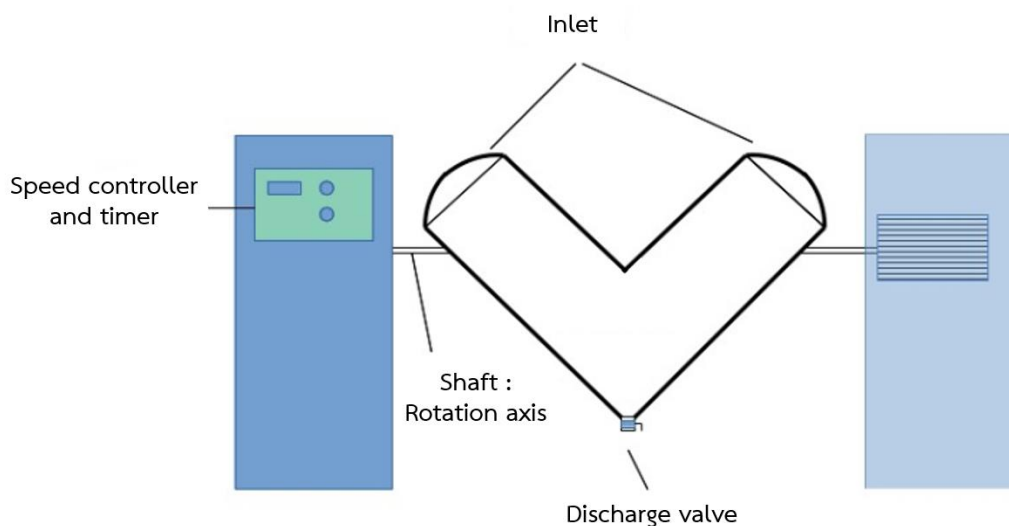
2.3.3.3 V-mixer

V-mixer (Rotary mixer, Tumble mixer) เป็นเครื่องผสมที่อุตสาหกรรมรู้จักกันแพร่หลายที่ใช้สำหรับการผสมวัตถุดิบของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือเป็นผง เครื่องผสมประเภทนี้ใช้งานและทำความสะอาดได้ง่าย จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับบริษัทขนาดเล็กหรือกลางที่อยู่ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการแปรรูปอาหาร ยา พลาสติก ผงโลหะ รวมถึงเหล็กสำหรับการก่อสร้าง V-mixer นั้นมีลักษณะเครื่องผสมเป็นรูปทรงตัว V ซึ่งมาจากการประกอบกันของทรงกระบอกที่ 75 ถึง 90 องศา ดังรูปที่ 2.8 โดยรูปทรงตัว V นี้ช่วยให้หลังจากการผสมเสร็จสามารถเก็บวัตถุดิบหลังผสมได้

ง่ายขึ้น และการที่ภายในเครื่องผสมชนิดนี้ไม่มีใบพัดทำให้การผสมวัตถุดิบทำโดยการหมุนแกนเพลลาที่เชื่อมอยู่กับถังผสมรูปตัว V เท่านั้น และเนื่องจากไม่มีใบพัดสำหรับการผสม เครื่องผสมชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการผสมวัตถุดิบที่ไม่มีความหนืด หากใช้งานร่วมกับวัตถุดิบที่มีความหนืดอาจทำให้วัตถุดิบไม่เกิดการแยกตัวกันได้ในช่วงผสม แต่เมื่อใช้วัตถุดิบที่เหมาะสมกับเครื่องผสมจะเป็นการรักษาคุณภาพวัตถุดิบที่ดีที่สุดเพราะไม่มีใบพัดมากกระทบกับตัววัตถุดิบ และอัตราการหมุนของเพลลาในการผสมก็ต่ำมากเช่นกัน

ปริมาณวัตถุดิบที่สามารถบรรจุได้อยู่ที่ร้อยละ 40 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม สำหรับเครื่องผสมประเภทนี้ช่องว่างด้านบนของเครื่องผสมนั้นมีความสำคัญค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นพื้นที่สำหรับการผสมวัตถุดิบโดยหมายความว่าเมื่อเพลลาเครื่องผสมหมุนจะทำให้วัตถุดิบลงมากองในช่องว่างที่เหลืออยู่ของเครื่องผสม และพลังงานขั้นต่ำที่ใช้สำหรับการผสมคือ 1 ถึง 3 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

อัตราเร็วรอบในการผสมที่แนะนำสำหรับเครื่องผสมประเภทนี้ในขนาดกลางที่ 500 ถึง 2,000 ลิตรคือ 10 ถึง 25 รอบต่อนาทีขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องผสมโดยยิ่งขนาดใหญ่ยิ่งหมุนช้าและค่า Froude number ต้องน้อยกว่า 1 สิ่งสำคัญคือการบรรจุวัตถุดิบลงในเครื่องผสมนั้นต้องบรรจุให้ระดับความสูงของวัตถุดิบในเครื่องผสมที่สองฝั่งของรูปตัว V สม่ำเสมอกัน และเมื่อทำการผสมวัตถุดิบที่มีหลายขนาดนั้นไม่ควรใส่วัตถุดิบที่มีขนาดเล็กไว้ด้านล่างของเครื่องผสม



รูปที่ 2.8 เครื่องผสมชนิด V-mixer [11]

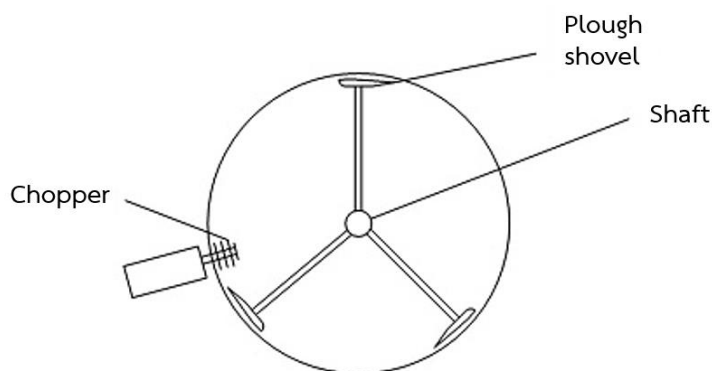
2.3.3.4 Ploughshare mixer

Ploughshare mixer ใช้หลักการการผสมทั้งการพาและการเฉือนสำหรับการผสมวัตถุดิบ เพื่อที่จะทำให้วัตถุดิบหลังผสมไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน ซึ่งต้องใช้อัตราเร็วรอบในการผสมที่สูงพอที่จะเกิดการเฉือนวัตถุดิบให้ไปกระทบกับผนังเครื่องผสมได้ ใบผสมของเครื่องผสมชนิดนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบมาเพื่อการเฉือนและทำลายการเกาะกันเป็นก้อนของวัตถุดิบที่ติดกันหรือมีความเหนียว

ปริมาณวัตถุดิบที่บรรจุได้สูงสุดอยู่ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม เนื่องจากต้องมีพื้นที่บางส่วนเหลือไว้สำหรับเปิดฝาทางด้วยบนของเครื่องผสมได้ตลอดเวลา โดยทั่วไปขนาดของเครื่องผสมมีตั้งแต่ 100 ถึง 30,000 ลิตร และพลังงานขั้นต่ำที่ใช้สำหรับการผสมคือ 10 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

อัตราเร็วรอบการผสมสำหรับเครื่องชนิดนี้ Froude number จะมีค่ามากกว่า 1 สำหรับที่ค่า Fr เท่ากับ 3 อัตราเร็วรอบในการผสมทั่วไปอยู่ที่ 80 ถึง 100 รอบต่อนาทีและในช่วง Fr น้อยกว่า 7 วัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องผสมจะมีลักษณะลอยตัวอย่างอิสระ และในช่วง Fr ที่มากกว่า 7 วัตถุดิบถูกเหวี่ยงติดกับผนังของเครื่องผสมเนื่องจากแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางมีผลกระทบมากกว่า และอาจทำให้วัตถุดิบแข็งเกิดการพอกตัวเป็นชั้นที่ผนังเครื่องผสม และเวลาในการผสมวัตถุดิบขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ

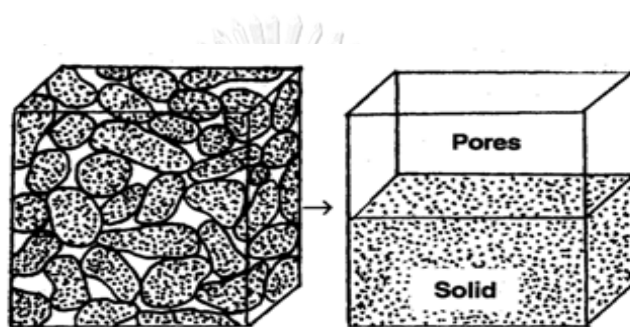
สำหรับการผสมวัตถุดิบที่มีความเหนียวมาก Ploughshare mixer สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมได้ โดยอุปกรณ์นั้นเรียกว่าตัวทำลายความเป็นก้อนของวัตถุดิบหรือใบตัด (Chopper) ดังรูปที่ 2.9 ใบพัดชนิดนี้มีอัตราเร็วรอบในการหมุนของใบพัดที่สูงมาก โดยมักจะติดตั้งบริเวณด้านข้างและค่อนข้างทางด้านใต้ของเครื่องผสม ซึ่งเครื่องผสมชนิดนี้เป็นเครื่องผสมที่ใช้ในงานวิจัย และเป็นชนิดทั่วไปสำหรับการผสมวัตถุดิบเพื่อผลิตผ้าเบรกด้วย



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมชนิด Ploughshare mixer [12]

2.4. ความหนาแน่นบัลค์

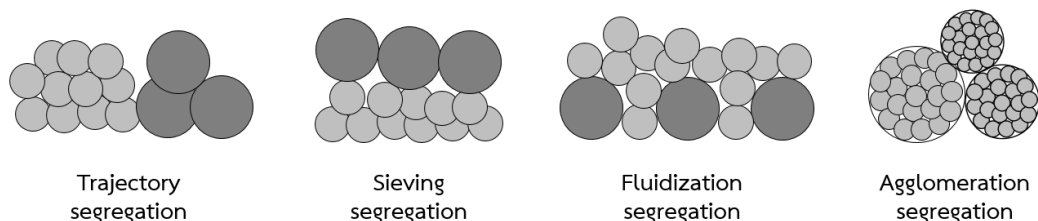
การหาค่าความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรเพื่อลดความผิดพลาด ดังรูปที่ 2.10 ควรใช้ภาชนะขนาดใหญ่พอสมควร เช่น ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปชั่ง ปาดหรือเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการหาความหนาแน่นบัลค์ ได้แก่ ความชื้น (Moisture content) ของวัตถุดิบ และระดับความสูงที่ใช้ในการเทวัตถุดิบหลังผสมลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอน ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบวัตถุดิบหลังผสมในปัจจุบันของการผลิตผ้าเบรก และสำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้วิธีการวัดความหนาแน่นบัลค์ในการตรวจสอบความฟูของวัตถุดิบหลังผสมเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบความหนาแน่นบัลค์ (รวมรูพรุน) กับความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ (ไม่รวมรูพรุน) [13]

การแบ่งความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบหลังผสมที่ใช้ขนาดของวัตถุดิบเป็นเกณฑ์หลักนั้นสามารถจำแนกประเภทของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ออกมา 4 ประเภทดังรูปที่ 2.11 ดังนี้

1. Trajectory segregation มักเกิดในการผสมที่มีการเหวี่ยงหรือมีการเคลื่อนด้วยความเร็วสูง
2. Sieving segregation เป็นลักษณะการเกิดที่เม็ดที่มีขนาดเล็กจะลอดผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดขนาดใหญ่
3. Fluidization segregation มักเกิดในการผสมที่มีการปล่อยให้วัตถุดิบตกลงมาอย่างอิสระหรือการผสมที่ใช้ลมเป็นสื่อกลาง
4. Agglomeration segregation ประเภทนี้คือสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบที่มีการผสม ถ้าวัตถุดิบมีความหนืดตั้งแต่ก่อนผสม เมื่อทำการผสมที่อัตราเร็วรอบหรือเวลาในการผสมไม่มากพออาจทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะนี้ได้ หรืออีกกรณีคือถูกผสมด้วยอัตราเร็วรอบและเวลานานจนทำให้วัตถุดิบเกิดการเกาะตัวกันเป็นก้อน



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบหลังผสม [14]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kato และ Magario [15] ศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber, Kevlar) ในส่วนผสมผ้าเบรก โดยทำการศึกษาปริมาณเส้นใยอะรามิดตั้งแต่ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลที่ได้คือการเพิ่มปริมาณเส้นใยอะรามิดมีผลให้อัตราการสึกลดลงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงอีกด้วย สาเหตุอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยทำให้มีการสร้างฟิล์มบนผิวหน้าของจานเบรกมากขึ้น จึงนำไปสู่การลดอัตราการสึกและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรก

Ozturk et al [16] ศึกษาผลของความแตกต่างกันของชนิดเรซินและความยาวเส้นใยของเส้นใยร็อกวูล (Rock wool) ที่ 150 300 และ 650 ไมโครเมตร ต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรก พบว่าการใช้เรซินชนิดฟีนอลิกเรซินที่ผสมด้วยความยาวเส้นใยร็อกวูลที่แตกต่างกัน เมื่อใช้เส้นใยร็อกวูลที่มีเส้นใยยาว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรกลดลง เนื่องจากเส้นใยที่สั้นกว่าจะหลุดร่อนออกไปก่อนในระหว่างการเบรก

Persoon et al [17] ศึกษาผลของเส้นใยอะรามิดต่างชนิดกันต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรก โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อความยาวเส้นใยของอะรามิด พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อความยาวเส้นใยของอะรามิดมีค่ามากจะส่งผลให้ชิ้นงานอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นมีความแข็งแรงมากขึ้น และส่งผลต่อเนื่องไปจนถึงทำให้สามารถลดจำนวนครั้งในการเกิดเสียงขณะเบรกด้วย

Jones et al [18] ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งหรือเม็ดข้าวในเครื่องผสม Ploughshare ขนาด 5 ลิตร โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วรอบในการผสมที่ 2 และ 4 เฮิร์ตซ์ และปริมาณเม็ดข้าวที่ใช้ในการผสม 12.5 25 37.5 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม พบว่าสามารถอธิบายได้ในสองทิศทางของการเคลื่อนที่ คือ ทิศทางแรกทิศทางที่เม็ดข้าวเข้าสู่ศูนย์กลางเครื่องผสมที่ปริมาณ 12.5 ถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม นั้นอัตราเร็วรอบในการผสมที่ 2 เฮิร์ตซ์ ทำให้เม็ดข้าวผสมกันในลักษณะเกาะกลุ่มกันอยู่ ในขณะที่อัตราเร็วรอบการผสมที่ 4

Hz ส่งผลให้เม็ดข้าวบางส่วนลอยในอากาศขณะทำการผสม สำหรับปริมาณเม็ดข้าวในเครื่องผสมที่ 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม พบว่าตำแหน่งหรือรูปร่างของใบผสมเริ่มส่งผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของเม็ดข้าวทั้งอัตราเร็วรอบผสมที่ 2 และ 4 เฮิร์ตซ์ โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่กระจายออกด้านข้างของใบผสมเมื่อกระทบใบผสมมากขึ้น และอีกหนึ่งทิศทางคือทิศทางที่เม็ดข้าวออกจากศูนย์กลางเครื่องผสมปริมาณ 12.5 ถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม นั้นอัตราเร็วรอบในการผสมที่ 2 เฮิร์ตซ์ ทำให้เม็ดข้าวบางส่วนมีทิศทางไปด้านบนและด้านล่างของเครื่องผสม ในขณะที่อัตราเร็วรอบผสมที่ 4 เฮิร์ตซ์ เม็ดข้าวเริ่มมีการลอยในอากาศและผลจากมุมของใบผสมเริ่มส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดข้าว

Chansipsri et al [19] งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อวัตถุดิบหลังผสมในกระบวนการผลิตผงซักฟอกด้วยเครื่องผสมประเภท Ploughshare วัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณวัตถุดิบหลังผสมที่ขนาดใหญ่ซึ่งทำให้ผงซักฟอกมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำและมีประสิทธิภาพการซักล้างลดลง โดยมีเป้าหมายควบคุมให้มีวัตถุดิบหลังผสมที่ขนาดใหญ่ระหว่าง 20-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อวัตถุดิบหลังผสม ได้แก่ อัตราการไหลของลิเนียร์อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (Linear alkylbenzene sulfonate: LAS) อัตราการไหลของสารเพิ่มความขาวของผงซักฟอก (NI-CBSX) อัตราเร็วรอบของใบกวน ชนิดและตำแหน่งของหัวฉีดที่เครื่องผสมวัตถุดิบ ในส่วนของการปรับอัตราเร็วรอบของใบกวนในการผสมถูกออกแบบไว้ที่ 80 85 และ 90 รอบต่อนาทีตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบใบผสมส่งผลให้มีปริมาณวัตถุดิบหลังผสมที่ขนาดใหญ่ลดน้อยลง แต่ทว่าปัจจัยที่มีผลต่อการลดปริมาณวัตถุดิบหลังผสมที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดนั้นคือการลดอัตราการไหลของ NI-CBSX จากค่าภาวะปกติ (Normal operation) 3,100 เป็น 1,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเพราะเมื่อลดปริมาณของ NI-CBSX ซึ่งเป็นของเหลวหนืด จะทำให้การผสมของวัตถุดิบดีขึ้น และได้วัตถุดิบหลังผสมที่ประสานตัวกันขนาดเล็กลง โดยสรุปแล้วพบว่าปริมาณวัตถุดิบหลังผสมที่มีขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานลดจาก 37 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คำนวณต้นทุนค่าเสียโอกาสที่ลดได้จากการลดเวลาที่หยุดผลิตเพื่อลดขนาดของวัตถุดิบหลังผสมที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 30.24 ล้านบาท/ปี

Panyoyai et al [20] ศึกษาความแตกต่างของใบผสมวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดคือ ใบผสมแบบ Single ribbon ใบผสมแบบ Double ribbon และใบผสมแบบ Ploughshare วัตถุดิบที่ทำการผสมในงานวิจัยนี้คือปุ๋ยอินทรีย์ โดยวัตถุประสงค์สำหรับการศึกษาเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพชนิดของใบผสมที่เหมาะสมในการผสมปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราเร็วรอบรอบที่แตกต่างกัน พบว่าใบผสมแบบ Single ribbon ไม่มีอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเนื่องจากใบผสมมีการสัมผัสวัตถุดิบที่ใช้ทำปุ๋ยอินทรีย์น้อยมาก ทำให้การผสมที่ได้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร สำหรับใบผสมแบบ Double ribbon มีอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมในการกวนผสมที่ 40 รอบต่อนาที โดยมีค่าความแปรปรวนที่ 9.42

เนื่องจากมีเนื้อที่ในการสัมผัสกับวัตถุขของปุ๋ยอินทรีย์มาก ส่งผลให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากันได้ดี และใบผสมแบบ Ploughshare มีอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมในการกววนผสมที่ 80 รอบต่อนาที โดยมีความแปรปรวนที่ 8.39 เนื่องจากอัตราเร็วรอบที่ใช้ในการผสมมีค่ามากทำให้วัตถุขเคลื่อนที่จากแกนกลางของใบผสม ทำให้วัตถุขเกิดการสัมผัสกับใบผสมมากขึ้น ทำให้เกิดการผสมที่เหมาะสมที่อัตราเร็วรอบที่สูง

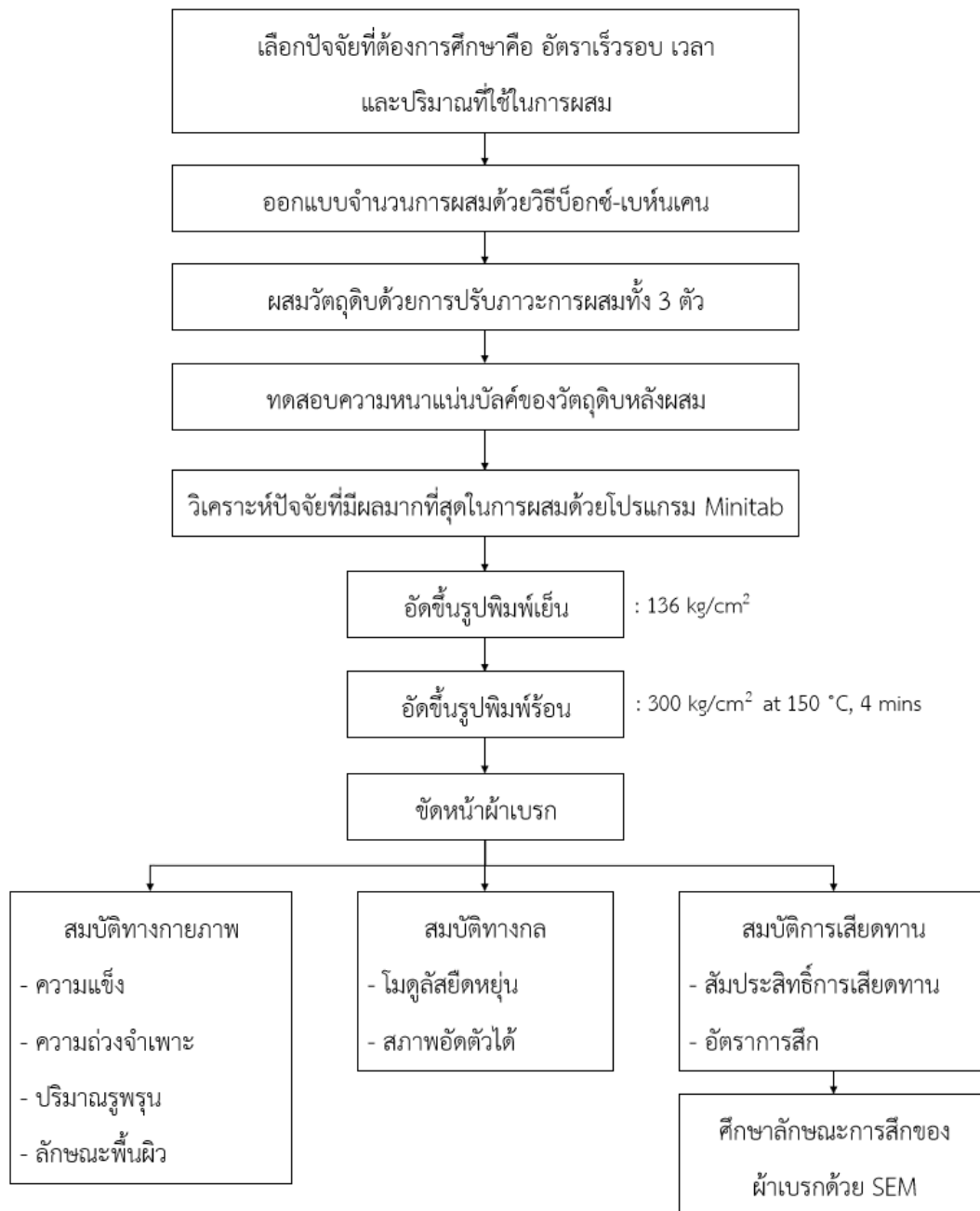
Sriwiboon et al [21] ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วรอบและเวลาในการผสมต่อสมบัติของเส้นใยอะรามิดและเส้นใยรีดด้วยเครื่องผสม Ploughshare พบว่าอัตราเร็วรอบในการปั่นสำหรับเส้นใยอะรามิดการปั่นที่ 6,000 รอบต่อนาที ทำให้ความหนาแน่นบัลค์ของเส้นใยลดลงเรื่อย ๆ ในช่วงการตี 8 นาที ในขณะที่ใช้รอบการปั่นที่ 3,000 รอบต่อนาที แม้ว่าจะใช้เวลาในการปั่นถึง 10 นาที นั้นไม่สามารถทำให้เส้นใยเปิดได้มากเท่ากับอัตราเร็วรอบการปั่นที่ 6,000 รอบต่อนาที และสำหรับเส้นใยรีดการปั่นที่ 6,000 รอบต่อนาที ทำให้ค่าความหนาแน่นบัลค์มากที่สุดได้ภายใน 1 นาทีและคงที่จนถึงนาทีที่ 4 ซึ่งหลังจาก 4 นาทีไปแล้วนั้นเส้นใยจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ในขณะที่ใช้ค่าการปั่นที่ 3,000 รอบต่อนาที สามารถทำให้ค่าความหนาแน่นบัลค์มากที่สุดได้ที่ 2 นาทีและเริ่มเกาะตัวกันหลังจาก 6 นาทีเป็นต้นไป นอกจากนี้ผลจากเวลาการผสมที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพผ้าเบรกคือ ที่เวลาการผสมวัตถุข 4 นาทีจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึก และจำนวนครั้งในการเกิดเสียงระหว่างการเบรกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เวลาในการผสมวัตถุขที่ 8 นาที ด้วยอัตราเร็วรอบใบพัดในการผสม 6,000 รอบต่อนาที

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทฤษฎี และศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติม
2. ศึกษากระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกเพื่อทราบถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องควบคุมและทราบถึงข้อจำกัดในการออกแบบการทดลอง
3. ศึกษาภาวะการผสมวัตถุดิบที่แตกต่างกันในกระบวนการผสมวัตถุดิบ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราเร็วรอบใบพัดในการตีวัตถุดิบ เวลาในการผสม และปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผสม โดยภาวะการทดลองทั้งหมดออกแบบด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design)
4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบหลังผสมที่ผ่านการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมจากข้อ 3. ด้วยการวัดความหนาแน่นบัลค์
5. วิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อการผสมวัตถุดิบ (ความหนาแน่นบัลค์)
6. นำวัตถุดิบที่เตรียมได้จากข้อ 3. มาอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็นพร้อมทั้งวัดความหนาของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์ร้อนพร้อมทั้งวัดความหนา นำวัสดุผ้าเบรกที่เตรียมได้ไปวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าสภาพอัดตัวได้ และค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือหนึ่งวัดทั้งชิ้นงาน และกรณีที่สองแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 ส่วน เพื่อวัดการกระจายตัวของวัตถุดิบหลังผสม
7. ทดสอบด้านประสิทธิภาพของผ้าเบรก ด้วยเครื่องทดสอบประสิทธิภาพ Constant Speed Friction Test (CSFT) เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกด้วยมาตรฐาน JIS D 4411 (Japanese Industrial Standards)
8. ศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าเบรกก่อนและหลังทดสอบประสิทธิภาพด้วย Scanning electron microscope (SEM)
9. สรุปผลการทดลองและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำการทดลอง

3.2 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 Kevlar บริษัท DuPont (Thailand) จำกัด
- 3.2.2 Rockwool (Lapinus fiber) บริษัท Acme International จำกัด
- 3.3.3 Phenolic resin บริษัท Thai GCI Resitop จำกัด
- 3.3.4 Barium sulfate บริษัท Sibelco Minerals (Thailand) จำกัด
- 3.3.5 Zirconium silicate บริษัท Heiwa Thai Corporation จำกัด
- 3.3.6 Friction dust บริษัท Asia Compact Industry จำกัด
- 3.3.7 Synthetic graphite บริษัท Phongporn Intertrade จำกัด
- 3.3.8 Copper chip บริษัท Phongporn Intertrade จำกัด

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) บริษัท Mitutoyo รุ่น 406-250-30
- 3.3.2 เครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง T-scale รุ่น QHW-6R+
- 3.3.3 เตาเผาให้ความร้อน (Furnace) บริษัท Carbolite รุ่น BWF12-13-301
- 3.3.4 ตู้อบสารเคมี (Oven) บริษัท Binder รุ่น ED 53
- 3.3.5 เครื่องผสมวัสดุดิบ (Ploughshare mixer) บริษัท Lodige รุ่น M20S
- 3.3.6 เครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness) บริษัท Mitutoyo รุ่น HR-500
- 3.3.7 เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ (Compressibility machine) บริษัท Link Engineer รุ่น 1620-H
- 3.3.8 เครื่องทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic velocity machine) บริษัท iETEK รุ่น 800-100-30 RT
- 3.3.9 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผ้าเบรกแบบความเร็ว (Constant speed friction lining tester) บริษัท Tokyo Plant รุ่น HP-SA-LC
- 3.3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริษัท JEOL รุ่น JSM-IT300

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เป็นสัดส่วนองค์ประกอบสำหรับการทดลองเท่านั้น โดยที่มีฐานการออกแบบมาจากผลิตภัณฑ์ของโรงงาน ซึ่งยังคงประเภทของวัตถุดิบไว้เช่นเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ของโรงงานดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบวัตถุดิบผ้าเบรกสำหรับการทดลอง

Function	Component	Vol %
Reinforcement	1. Aramid fiber	4
	2. Rockwool fiber	7
Binder	3. Phenolic resin	13
Filler	4. Barium sulfate	44.5
Abrasive	5. Zirconium silicate	5
	6. Friction dust	7
Lubricant	7. Synthetic graphite	18
Metal	8. Copper chip	1.5

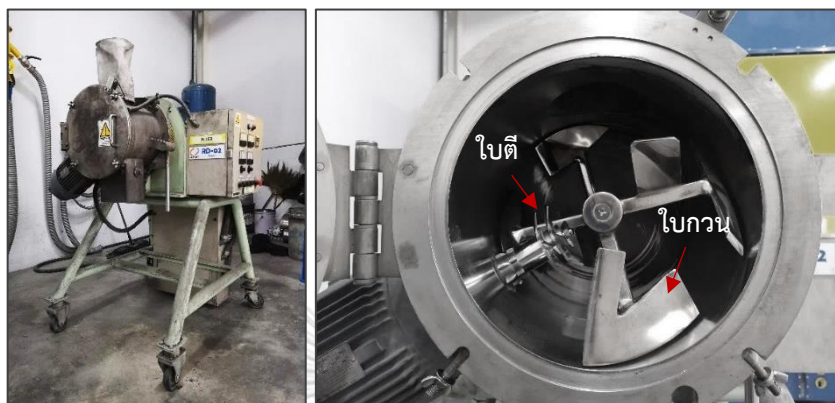
3.4.2 การผสมวัตถุดิบ

3.4.2.1 การเตรียมส่วนผสมวัตถุดิบเพื่อพิจารณาตัวแปรในการทดลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน

ปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทั้งหมด 3 ตัวแปร ตัวแปรละ 3 ระดับคือ อัตราเร็วรอบใบที่ 3,000 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาที เวลาที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบ 4 6 และ 8 นาที และปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมเทียบกับขนาดของเครื่องผสมที่ 35 50 และ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรดังตารางที่ 3.2 และควบคุมอัตราเร็วรอบใบกวนไว้ที่ 130 รอบต่อนาทีสำหรับทุกภาวะการผสมวัตถุดิบ โดยทำการผสมในเครื่องผสมวัตถุดิบแบบ Ploughshare mixer (PSM) ขนาด 20 ลิตรซึ่งมีหลักการทำงานผสมทั้งการพาและการเฉือนสำหรับการผสมวัตถุดิบ เพื่อที่จะทำให้วัตถุดิบหลังผสมไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน ดังรูปที่ 3.2

ภาวะการผสมทั้งหมดถูกออกแบบจำนวนการทดลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการออกแบบการทดลองที่ปรับระดับตัวแปร 3 ระดับดังตารางที่ 3.2 ทั้งยังเหมาะสำหรับการออกแบบที่ตัวแปรในการทดลองเป็นค่าต่ำที่สุดและมากที่สุดที่เครื่องสามารถทำงานได้ ซึ่ง

สอดคล้องกับค่าการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมที่กล่าวไว้เบื้องต้น อีกทั้งยังเป็นวิธีการออกแบบที่ให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือในจำนวนการทดลองที่น้อย [22] โดยจำนวนการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยที่ภาวะการผสมที่ 13 ถึง 15 เป็นการทดลองซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 เครื่องผสมวัตถุดิบแบบ Ploughshare mixer (ก) เครื่องผสมขนาด 20 ลิตร (ข) ภายในเครื่องผสมประกอบด้วยใบพัด 2 ชนิด

ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา

Factor	Level			Unit
	Low (-1)	Medium (0)	High (1)	
Speed	3,000	4,500	6,000	rpm
Time	4	6	8	min
Volume	35	50	65	%vol

โดยที่ Low (-1) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่ต่ำที่สุด
 Medium (0) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่ค่ากลาง
 High (1) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่สูงที่สุด

ตารางที่ 3.3 การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมตามการออกแบบด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) (ดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ก)

Run	Chopper Speed (rpm)	Time (min)	Volume (vol%)
1	3000 (-1)	4 (-1)	50 (0)
2	6000 (+1)	4 (-1)	50 (0)
3	3000 (-1)	8 (+1)	50 (0)
4	6000 (+1)	8 (+1)	50 (0)
5	3000 (-1)	6 (0)	35 (-1)
6	6000 (+1)	6 (0)	35 (-1)
7	3000 (-1)	6 (0)	65 (+1)
8	6000 (+1)	6 (0)	65 (+1)
9	4500 (0)	4 (-1)	35 (-1)
10	4500 (0)	8 (+1)	35 (-1)
11	4500 (0)	4 (-1)	65 (+1)
12	4500 (0)	8 (+1)	65 (+1)
13	4500 (0)	6 (0)	50 (0)
14	4500 (0)	6 (0)	50 (0)
15	4500 (0)	6 (0)	50 (0)

3.4.2.2 การหาค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม

สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบหลังผสมนั้น ใช้การทดสอบความหนาแน่นบัลค์เป็นตัวชี้วัดคุณภาพ โดยทำการตักวัตถุดิบหลังผสมใส่ในกระบอกตวงที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน (600 มิลลิลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นรวมหรือค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม โดยหน่วยคือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้การทดสอบทั้ง 15 ภาวะการผสม



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการวัดความหนาแน่นบล็อค

3.4.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็น

นำวัตถุดิบหลังผสมด้วยทั้ง 15 ภาวะการผสม มาอัดขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ขนาด 75.68 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 3.4 ด้วยแรงดันของลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 นิ้ว (19.81 เซนติเมตร) ที่ 1,900 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (136 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) โดยในหนึ่งแม่พิมพ์สามารถผลิตชิ้นงานพิมพ์เย็นออกมาได้ที่ละ 4 ชิ้น ที่อุณหภูมิห้อง



(ก)



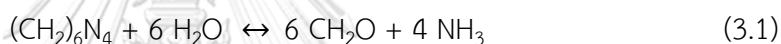
(ข)

รูปที่ 3.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์เย็นในแม่พิมพ์ (ก) แทนแม่พิมพ์เย็นที่ใช้ในการทดลอง (ข) ขนาดพื้นที่กันแม่พิมพ์ 75.68 ตารางเซนติเมตร

3.4.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานพิมพ์ร้อน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำชิ้นงานพิมพ์เย็นมาอัดติดเข้ากับแผ่นเหล็กที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.5 (ก) และความดัน 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) โดยจะแบ่งเวลาการอัดเป็นสองช่วง ช่วงแรกกดอัดขึ้นงาน 5 วินาที แล้วปล่อย 3 วินาที ทำซ้ำทั้งหมด 4 ครั้งเพื่อคายก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด และช่วงที่สองอัดขึ้นงานค้างไว้ 3 นาที 20 วินาที รวมเวลาการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนทั้งหมดประมาณ 4 นาที ชิ้นงานที่ออกมาจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 (ข)

ก๊าซแอมโมเนียดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากการที่วัตถุดิบ Phenolic resin ที่มีส่วนผสมของเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine, HMTA) อยู่ 5.6 ถึง 6.6 เปอร์เซ็นต์ได้รับความร้อน ซึ่ง HMTA ไม่เสถียรภายใต้ความร้อน ทำให้อาจเกิดปฏิกิริยาได้หากมีไอน้ำอยู่ในระบบ [23] โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยา HMTA จะสลายตัวออกเป็นฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde, CH₂O) และแอมโมเนีย (Ammonia, NH₃) ดังสมการที่ 3.1 [24]



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) ชิ้นงานและแม่พิมพ์สำหรับการพิมพ์ร้อน (ข) ชิ้นงานหลังการพิมพ์ร้อน

3.4.5 การอบชิ้นงานผ้าเบรก

นำชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์พร้อมแล้วเข้าตู้อบดังรูปที่ 3.6 โดยอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และอบต่อที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.6 การอบชิ้นงานในตู้อบ (ก) ชั้นวางชิ้นงานสำหรับอบ (ข) ตู้อบ

3.4.6 การตัดตกแต่งผ้าเบรก

การตัดตกแต่งผ้าเบรก จะเป็นการทำเพื่อให้ผิวหน้าผ้าเบรกราบเรียบพร้อมสำหรับการใช้งาน โดยภายในเครื่องตัดตกแต่งจะมีใบมีด 2 ใบทำหน้าที่ตัดผิวหน้าดังรูปที่ 3.7 โดยในการทดลองนี้ควบคุมหลุมในการใส่ชิ้นงาน นั้นคือเลือกเพียงหนึ่งหลุมสำหรับการใส่ชิ้นงานลงไปเพื่อตัดผิวหน้าผ้าเบรกทุกชิ้น เพื่อลดความเสี่ยงที่ในแต่ละหลุมของการตัดหน้าผ้าเบรรมีความไม่เท่ากัน อาจทำให้ชิ้นงานเอียงไม่เท่ากันได้



รูปที่ 3.7 เครื่องตัดตกแต่งผ้าเบรก

3.4.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก

3.4.7.1 ความถ่วงจำเพาะและความเป็นรูพรุน

หลังนำชิ้นงานผ้าเบรกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องแล้ว จึงนำผ้าเบรกมาทดสอบความถ่วงจำเพาะโดยการนำมาชั่งที่เครื่องชั่งละเอียดเพื่อวัดน้ำหนักของผ้าเบรกในอากาศ และวัดน้ำหนักของผ้าเบรกในขณะที่แช่น้ำเป็นเวลา 1 นาที ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4417 ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกดังสมการที่ 3.2 โดยชิ้นงานจะถูกทดสอบทั้งหมด 6 ชิ้นในแต่ละภาวะการผสม

$$d = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.2)$$

โดย d = ค่าความถ่วงจำเพาะ

m_1 = น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

m_2 = น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกสามารถคำนวณได้จากค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกตามมาตรฐาน ASTM D2734 ด้วยหลักการการแทนที่ของน้ำ ดังสมการที่ 3.3

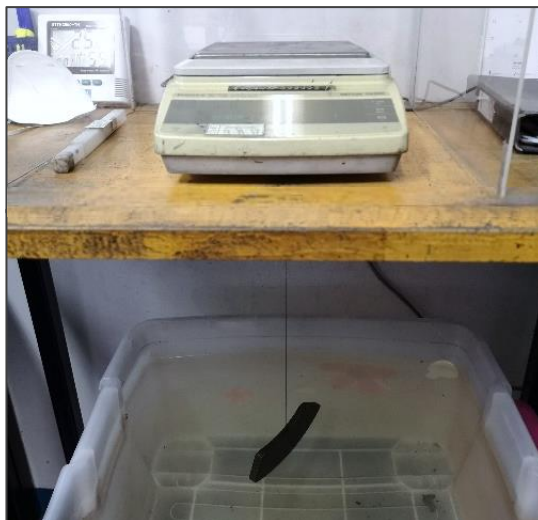
$$\text{Void content} = 100 - \left(\frac{d_{ex}}{d_{th}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

โดย Void content = ปริมาตรรูพรุนของผ้าเบรก (%)

d_{ex} = ความถ่วงจำเพาะผ้าเบรกจากการทดลองดังสมการที่ 3.2

d_{th} = ความถ่วงจำเพาะผ้าเบรกจากการคำนวณความถ่วงจำเพาะของวัสดุดิบทุกตัวที่

อยู่ในผ้าเบรก



รูปที่ 3.8 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

การกระจายตัวของวัตถุดิบหลังผสมใช้วิธีการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละชั้น เช่นเดียวกันกับการหาค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกทั้งชิ้นงาน ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4417 โดยที่ขนาดของชิ้นผ้าเบรกหลังตัดแล้วต้องมีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการตัดเป็นชิ้นเล็กและก่อนตัดชิ้นงาน

3.4.7.2 ความแข็ง

หลังนำชิ้นงานผ้าเบรกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องแล้ว จึงนำผ้าเบรกมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Rockwell hardness (Mitutoyo รุ่น HR-500) ดังแสดงในรูปที่

3.10 ในสเกล S (HRS) โดยที่หัวกดคือลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.70 มิลลิเมตร และกดด้วยแรง 980.7 นิวตัน ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4421 และสำหรับการทดสอบความแข็งของผ้าเบรคนี้ทดสอบทั้งหมด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงานและทำซ้ำ 6 ชิ้นงานต่อหนึ่งภาวะการผสมดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การวัดความแข็งของผ้าเบรก

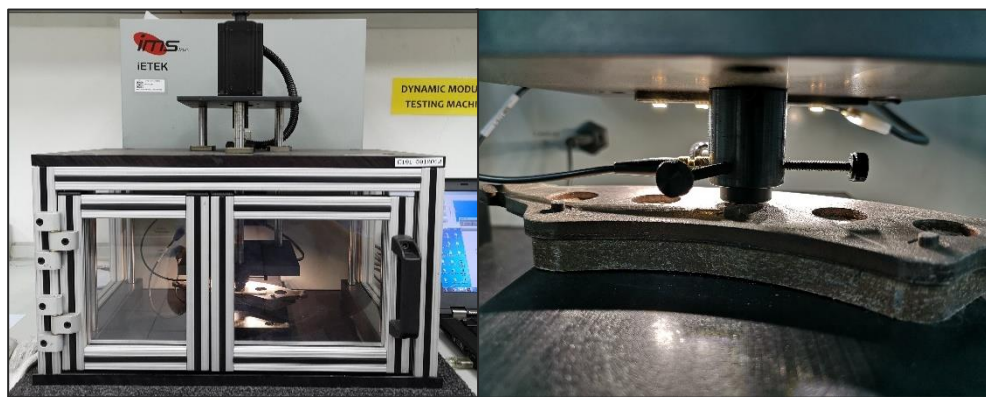


รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของผ้าเบรก

3.4.7.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นการทดสอบเพื่อดูว่าเมื่อวัสดุมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมาก วัสดุก็สามารถทนทานต่อแรงกระทำได้มาก และเสียรูปร่างเดิมได้ยากกว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อย การทดสอบนี้อาศัยเพียงข้อมูลความหนาของแผ่นเหล็ก และความหนาของผ้าเบรก (ไม่รวมความหนาเหล็ก) โดย

ควบคุมแรงกดชิ้นงานในแต่ละจุดไว้ที่ 100 นิวตัน ตามมาตรฐานการใช้งานของเครื่องทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบอัลตราโซนิก iETEK (รุ่น 800-100-30 RT) ดังรูปที่ 3.12 และทำการทดสอบทั้งหมด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงานผ้าเบรก และทำซ้ำ 6 ชิ้นงานต่อหนึ่งภาวะการผสมดังแสดงในรูปที่ 3.13



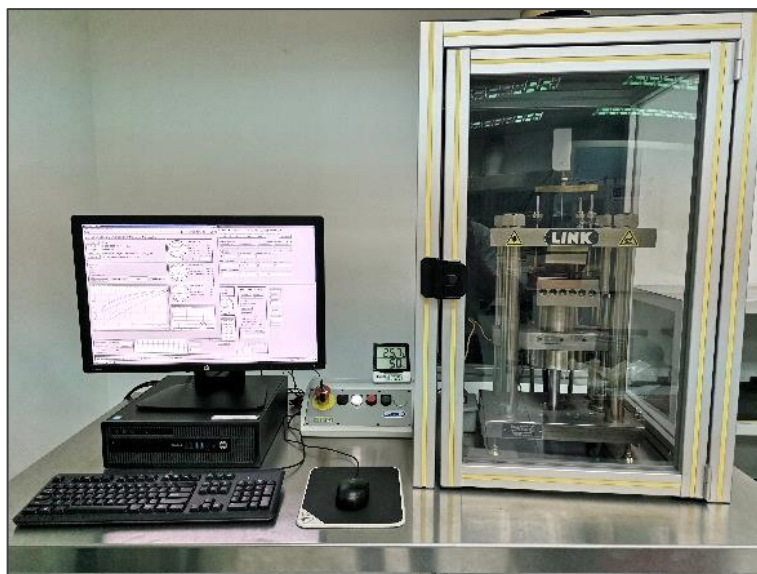
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก

3.4.7.4 สภาพอัดตัวได้

สภาพอัดตัวได้เป็นการกดอัดผ้าเบรกทั้งชิ้นงานด้วยลูกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41.2 มิลลิเมตร ด้วยแรงอัด 160 บาร์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดสอบคือขนาดพื้นที่ผิวของผ้าเบรก และความหนาของผ้าเบรก ผลการทดสอบจะแสดงออกมาในรูปของความหนาที่ลดลงไปในหน่วยไมครอน โดยยึดค่าการยุบตัวลงไปของผ้าเบรกจากการกดอัดของลูกสูบครั้งที่สาม (มีการกดอัดลูกสูบทั้งหมด 3 ครั้ง) ตามมาตรฐานการทดสอบสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก (ISO 6310:2009) และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

3.4.8 การทดสอบประสิทธิภาพของผ้าเบรก

3.4.8.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก

เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 25 มิลลิเมตร x 25 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร การทดสอบหนึ่งครั้งสามารถใส่ได้ 2 จากผ้าเบรกชิ้นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.15 ก่อนเริ่มทำการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก จะทำการปรับสภาพผิวของชิ้นงาน โดยการนำชิ้นงานมาทดสอบที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสเพื่อให้ผิวชิ้นงานสัมผัสกับจานมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ทดสอบโดยการกดชิ้นงานด้วยแรง 1 เมกะพาสคาล บนจานที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 7 เมตรต่อวินาที โดยช่วงแรก (ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ) จานหมุนทั้งหมด 5,000 รอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียสตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4411 (Class 3) วัดค่าแรงเสียดทานและความหนาของชิ้นงานทุกรอบการหมุนที่ 250 ถึง 500 รอบและช่วงที่สองของการทดสอบ (ช่วงลดอุณหภูมิ) จานหมุนทั้งหมด 1,500 รอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 100 องศาเซลเซียสวัดค่าแรงเสียดทานทุกรอบการหมุนที่ 500 รอบ ซึ่งข้อมูลที่เก็บได้จากที่กล่าวไปข้างต้นนั้นสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกได้จากสมการที่ 3.4 และ 3.5 [25] ตามลำดับ

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

โดย μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

- f คือ แรงเสียดทานเฉลี่ยของข้อมูลที่เสถียรในครึ่งหลังของช่วงอุณหภูมิ (นิวตัน)
 F คือ แรงกดรวมบนชิ้นงาน (นิวตัน)

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

- โดย V คือ อัตราการสึก (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวตันเมตร)
 n คือ จำนวนรอบการหมุน (รอบ)
 W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ (กรัม)
 f_m คือ ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานของระยะทางรวมในการทดสอบ (นิวตัน)
 ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน ($\times 10^{-3}$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)



จุ (ก) าลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ข)

รูปที่ 3.15 (ก) เครื่องทดสอบค่าความเสียดทานของผ้าเบรก (ข) ชิ้นงานสำหรับทดสอบ

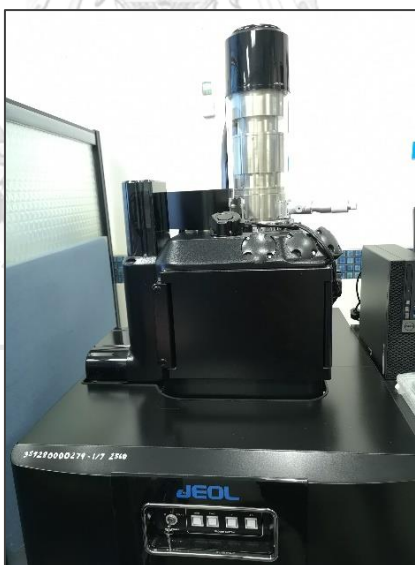
3.4.9 โครงสร้างจุลภาค

ศึกษาวัสดุโดยใช้การกวาดลำแสงอิเล็กตรอนบนผิววัสดุตั้งรูปที่ 3.16 แล้วนำสัญญาณที่ได้ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) และสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electrons) ไปสร้างเป็นภาพ ภาพที่ได้จากกล้องเป็นภาพที่กำลังขยายสูง และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร และมีลักษณะเหมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งในส่วนของการศึกษาวัตถุบหลังผสม ผิวของชิ้นงานผ้าเบรกก่อนทดสอบประสิทธิภาพ และหลังทดสอบประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) เป็นการวิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่าง ตั้งแต่ธาตุ B โบรอน ถึง U ยูเรเนียม วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ และสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิวตัวอย่างที่ศึกษาได้ โดยแสดงผลในรูปแบบของพื้นที่ของธาตุที่ต้องการศึกษา (Elemental mapping) และก่อนที่จะทำการทดสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 3.17 ต้องทำการเตรียมชิ้นงานโดยการนำมาเคลือบทองดังรูปที่ 3.18 เพื่อให้พื้นผิวมีสมบัตินำไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-IT300



รูปที่ 3.18 เตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบด้วยการนำมาเคลือบทอง

3.4.10 การวิเคราะห์ปัจจัยการผสมวัสดุด้วยโปรแกรม Minitab

โปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปหรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลทางสถิติ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้เป็นตัวช่วยในการบอกว่าปัจจัยการผสมวัสดุใด (อัตราเร็วรอบ เวลา และปริมาณ) ส่งผลต่อวัสดุบหลังผสมมากที่สุด จากข้อ 3.4.3 ที่ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุบหลังผสม (ความหนาแน่นบัลค์) ซึ่งเป็นผลจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทั้งหมด 15 ภาวะการผสมด้วยวิธีออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ค่าที่ทดสอบนี้จะถูกนำมาเข้าโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดในการผสมวัสดุบส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์สมการการถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระ (X) โดยถ้าตัวแปรอิสระมีเพียงตัวแปรเดียว จะเรียกการวิเคราะห์นี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) แต่ถ้าตัวแปรอิสระมีตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะเรียกการวิเคราะห์นี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ในการวิเคราะห์การถดถอย รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระสามารถแบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และกรณีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง สำหรับโปรแกรม Minitab จะแสดงค่าของการตัดสินใจดังนี้ [26]

1) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (The Standard error of estimate, S) ถ้า S มีค่าน้อยหรือใกล้ศูนย์แสดงว่าค่า Y จะอยู่ใกล้เส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณนี้มีความเหมาะสมมาก และในกรณีเดียวกัน ถ้า S มีค่ามากแสดงว่า ค่า Y จะอยู่ใกล้เส้นถดถอยน้อย ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณนี้มีความเหมาะสมน้อย

2) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2 : R-Sq) เป็นตัวบอกให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) จะเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) มากน้อยเพียงใด หรือ สมการที่หาได้นั้นจะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดีและเหมาะสมเพียงใด ถ้า R^2 มีค่าสูง (เข้าใกล้ 1) แสดงว่าตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการถดถอยนั้นสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระในสมการถดถอยที่หาได้นั้นมีความสัมพันธ์มากจนเชื่อได้ว่าสมการถดถอยที่หาได้นั้นมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เป็นจริง แต่ถ้า R^2 มีค่าต่ำ (เข้าใกล้ 0) แสดงว่าตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการถดถอยนั้นไม่สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระในสมการถดถอยที่หาได้นั้นมีความสัมพันธ์น้อย

3) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเชิงซ้อน (R^2 adjusted: R-Sq(adj)) เป็นการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าสมการถดถอยจะทำให้ค่า R^2 มากขึ้นทั้งที่ตัวแปรอิสระ X ที่เพิ่มเข้าไปใหม่อาจไม่มีความสัมพันธ์กับ Y เลยก็ได้ จึงมีการปรับค่า R^2 ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น และช่วยให้ทำนายค่า Y มีความผิดพลาดน้อยลง

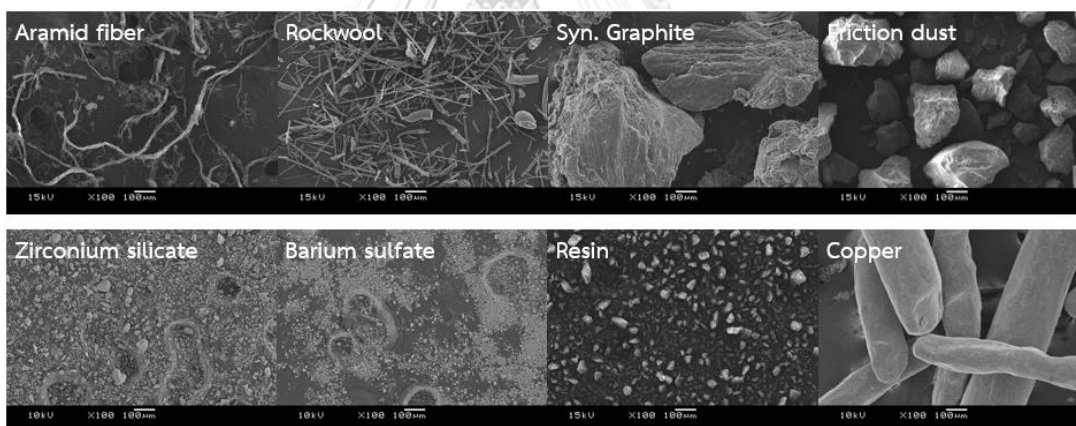


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาลักษณะองค์ประกอบของผ้าเบรก

ศึกษาองค์ประกอบของผ้าเบรกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า ลักษณะองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เติมลงในผ้าเบรกแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเส้นใย Aramid เป็นมัดเส้นใย เส้นใย Rockwool มีลักษณะเป็นแท่งตรง สารหล่อลื่น Synthetic graphite มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดในส่วนผสมที่ 500 ไมครอน ผงขัด Friction dust มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอันดับรองลงมาที่ 250 ไมครอน ผงขัด Zirconium silicate สารตัวเติม Barium sulfate และ สารยึดติด Resin ผงวัสดุดิบทั้งสามตัวมีลักษณะเป็นวัสดุเม็ดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันที่ 44 ไมครอน ลำดับสุดท้ายโลหะ Copper มีความยาวของชิ้นวัสดุที่ยาวที่สุดในส่วนผสมผ้าเบรกที่ 3 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมครอน ทั้งยังมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้ชัดเจนที่สุด



รูปที่ 4.1 สัมฐานวิทยาของวัตถุดิบที่ใช้ผสมเป็นชิ้นทดสอบผ้าเบรก

4.2 การศึกษาปัจจัยการผสมวัตถุดิบต่อความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม

ผลจากการศึกษาการปรับเปลี่ยนภาวะการผสม โดยการปรับตัวแปรด้านอัตราเร็วรอบในการผสม เวลาที่ใช้ในการผสม และปริมาตรวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมต่อความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมทั้ง 15 ภาวะการผสมตามวิธีการออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคน ดังตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นบัลค์ที่ได้ถูกวัด 5 ซ้ำต่อ 1 ภาวะการผสม

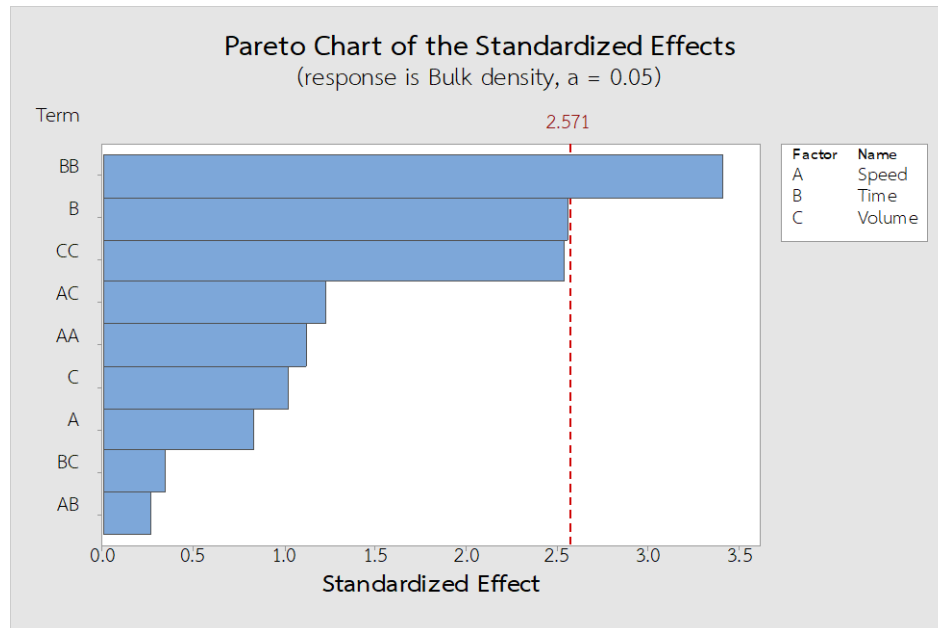
ตารางที่ 4.1 การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบดหลังผสม

Conditions	Speed, A (rpm)	Time, B (min)	Volume, C (vol%)	Bulk density (g/cm ³)
1	3000 (-1)	4 (-1)	50 (0)	0.639 ± 0.008
2	6000 (+1)	4 (-1)	50 (0)	0.630 ± 0.003
3	3000 (-1)	8 (+1)	50 (0)	0.633 ± 0.004
4	6000 (+1)	8 (+1)	50 (0)	0.627 ± 0.007
5	3000 (-1)	6 (0)	35 (-1)	0.619 ± 0.007
6	6000 (+1)	6 (0)	35 (-1)	0.612 ± 0.004
7	3000 (-1)	6 (0)	65 (+1)	0.610 ± 0.010
8	6000 (+1)	6 (0)	65 (+1)	0.618 ± 0.007
9	4500 (0)	4 (-1)	35 (-1)	0.640 ± 0.004
10	4500 (0)	8 (+1)	35 (-1)	0.622 ± 0.004
11	4500 (0)	4 (-1)	65 (+1)	0.632 ± 0.009
12	4500 (0)	8 (+1)	65 (+1)	0.618 ± 0.005
13	4500 (0)	6 (0)	50 (0)	0.621 ± 0.005
14	4500 (0)	6 (0)	50 (0)	0.630 ± 0.008
15	4500 (0)	6 (0)	50 (0)	0.625 ± 0.003

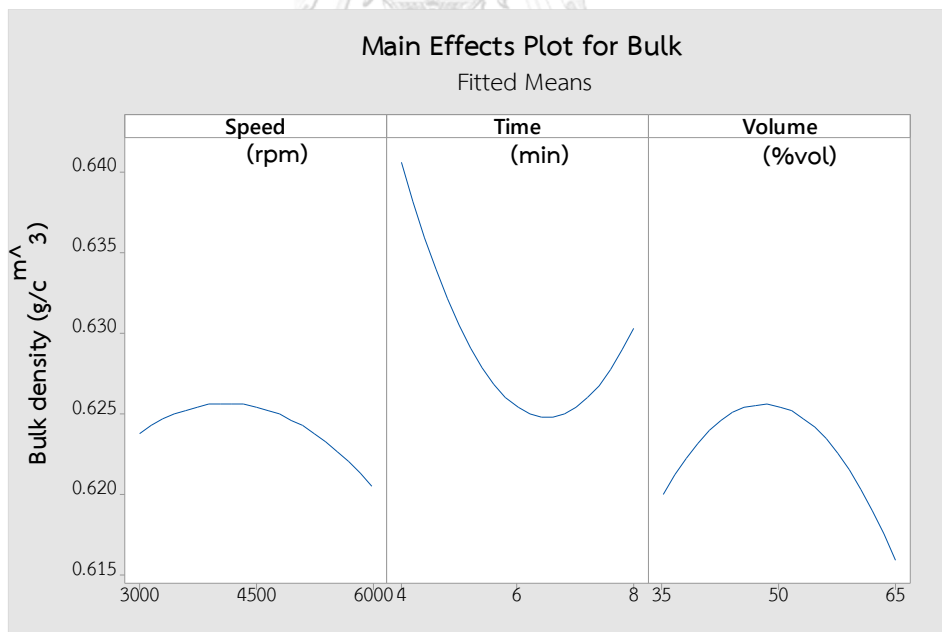
โดยที่ Low (-1) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่ต่ำที่สุด
 Medium (0) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่ค่ากลาง
 High (1) แทนระดับการปรับปรุงปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่สูงที่สุด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมด้วย
โปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.000988	0.000110	3.43	0.094
Linear	3	0.000265	0.000088	2.76	0.152
Speed (A)	1	0.000022	0.000022	0.68	0.446
Time (B)	1	0.000209	0.000209	6.54	0.051
Volume (C)	1	0.000034	0.000034	1.05	0.353
Square	3	0.000669	0.000223	6.97	0.031
Speed*Speed (AA)	1	0.000040	0.000040	1.25	0.315
Time*Time (BB)	1	0.000372	0.000372	11.62	0.019
Volume*Volume (CC)	1	0.000206	0.000206	6.43	0.052
2-Way Interaction	3	0.000054	0.000018	0.56	0.663
Speed*Time (AB)	1	0.000002	0.000002	0.07	0.802
Speed*Volume (AC)	1	0.000048	0.000048	1.50	0.276
Time*Volume (BC)	1	0.000004	0.000004	0.12	0.743
Error	5	0.000160	0.000032		
Lack-of-Fit	3	0.000123	0.000041	2.21	0.327
Pure Error	2	0.000037	0.000019		
Total	14	0.001148			



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการผสมและค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม



รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากภาวะการผสมต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม

จากตารางที่ 4.2 ค่าที่ใช้ในการตัดสินใจคือ P-Value โดยเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณผ่านตาราง F-distribution ดังรูปที่ 3.20 โดยอาศัยค่า F-Value DF_{model} และ DF_{error} ซึ่งรายละเอียดการคำนวณได้ถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.11 ความสำคัญของค่า P-Value คือเมื่อมีค่ามากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรต้นไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ และในกรณีเดียวกันเมื่อมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ [27] ซึ่งจากตารางพบว่าตัวแปร Time*Time (BB) ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมอย่างมีนัยสำคัญ

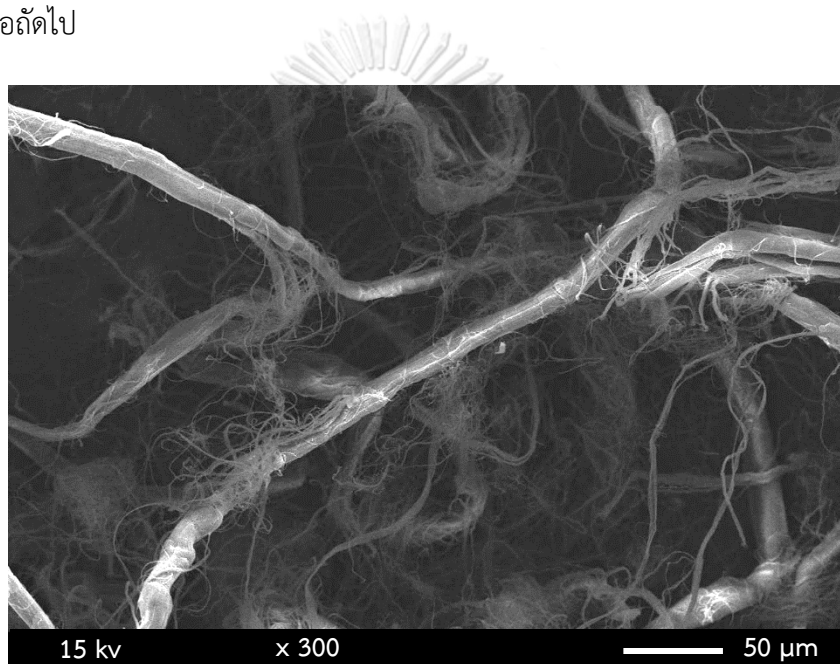
จากรูปที่ 4.2 เป็นการขยายความจากตารางที่ 4.2 โดยแสดงให้เห็นว่าตัวแปร BB ผ่านเส้น Standardized Effect ที่ 2.571 (ค่าจากตาราง T-distribution ดังภาคผนวก ข) หมายความว่าตัวแปร BB ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมอย่างมีนัยสำคัญ และความหมายของตัวแปร BB คือการส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมในความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง กล่าวคือเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมที่ 4 นาทีถึง 6 นาทีมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ลดลงจาก 0.640 เหลือ 0.625 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการผสมที่ 6 นาทีถึง 8 นาทีมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นบัลค์เพิ่มขึ้นจาก 0.625 เป็น 0.630 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามตัวแปรคือ อัตราเร็วรอบ เวลา และปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผสม สามารถพิจารณาได้โดยภาพรวมคือการเปลี่ยนแปลงค่าแกน Y (ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม) สำหรับตัวแปรใดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด หมายความว่าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมมากที่สุดเช่นกัน

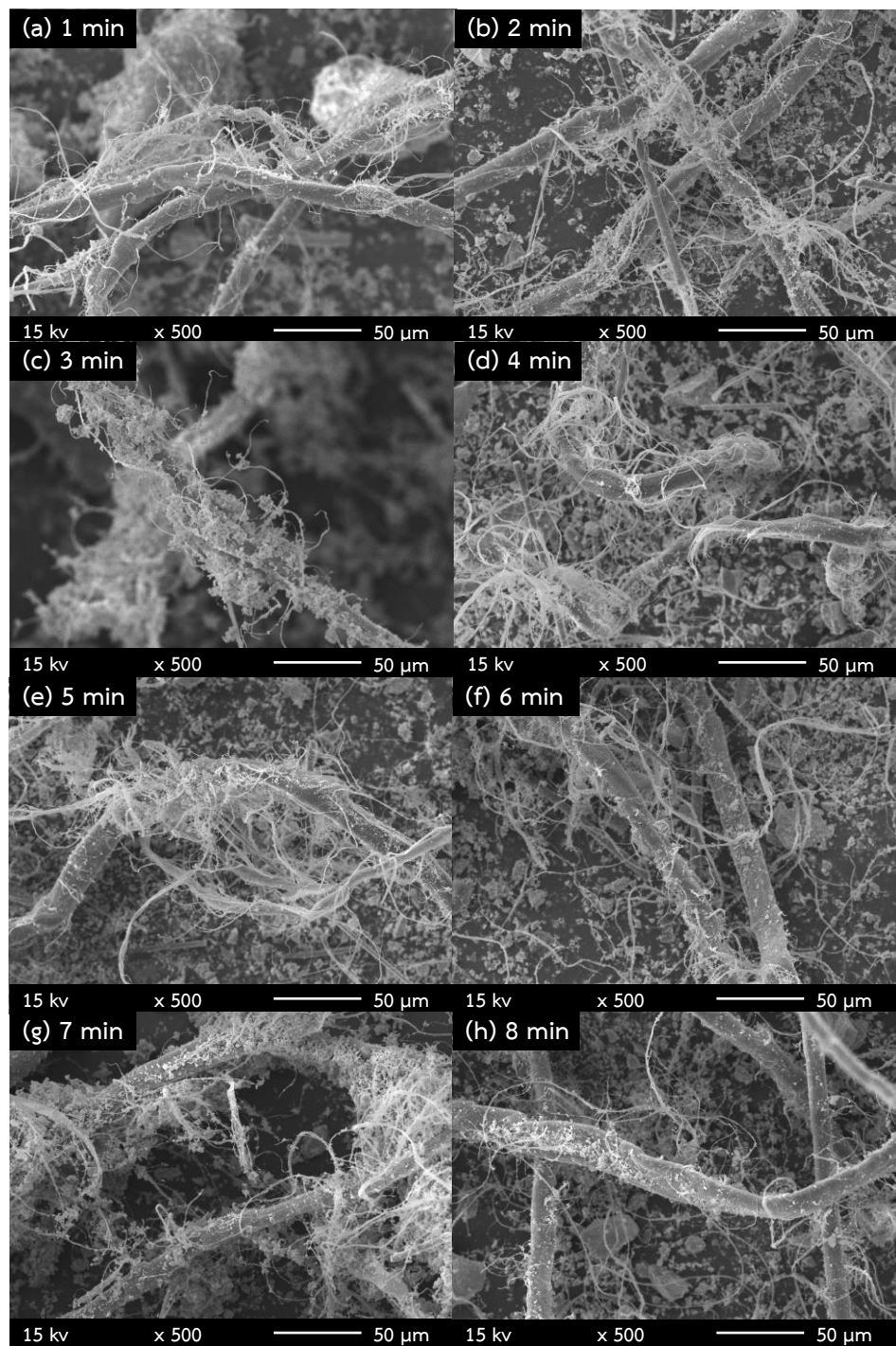
4.2.1 การศึกษาลักษณะของวัตถุดิบหลังผสม

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยในการผสมที่ส่งผลต่อวัตถุดิบหลังผสมพบว่าปัจจัยด้านเวลา เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อวัตถุดิบหลังผสมมากที่สุด โดยวัตถุดิบที่ได้รับผลกระทบจากการผสมมากที่สุดคือเส้นใยอะรามิดดังรูปที่ 4.4 และสำหรับรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงผลของปัจจัยผ่านการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยรูป a ถึง h แสดงการผสมตั้งแต่นาทีที่ 1 ถึง 8 ตามลำดับ โดยใช้อัตราเร็วรอบการผสมที่ 6,000 รอบต่อนาที และปริมาณวัตถุดิบที่ใช้คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม ซึ่งการใช้เวลาในการผสมวัตถุดิบที่ 1 ถึง 3 นาทีพบว่าเส้นใยเริ่มมีการแตกตัว โดยที่นาทีที่ 4 เป็นต้นไปพบว่าลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่ตรวจสอบได้นั้นเริ่มมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเส้นใยเริ่มกระจายตัวได้ในลักษณะเดียวกัน

จากตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุบหลังผสมที่ผสมด้วยเวลาที่แตกต่างกัน โดยเห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มเวลาในการผสมค่าความหนาแน่นบัลค์ยิ่งต่ำลงแสดงถึงความฟูของวัตถุบหลังผสมที่มากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นบัลค์กับลักษณะทางกายภาพของวัตถุบหลังผสมในรูปที่ 4.5 พบว่าการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัตถุบหลังผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของเส้นใยได้คล้ายคลึงกันตั้งแต่วันที่ 4 นาที่ขึ้นไป ในขณะที่ค่าความหนาแน่นบัลค์ลดลงเรื่อย ๆ อาจหมายความว่าการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัตถุบหลังผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเพียงวิธีการตรวจสอบเบื้องต้นเท่านั้น โดยทำการศึกษาถึงความต่างทางสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรกร่วมด้วยในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอะรามิดก่อนการผสม



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยต่อการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมวัสดุดิบ

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นบัลค์ต่อเวลาการผสม

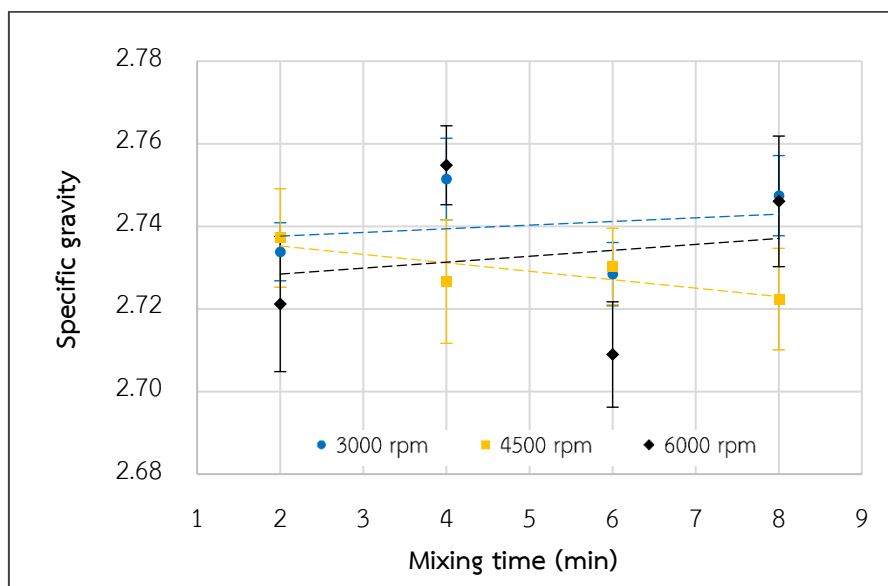
Time (min)	1	2	3	4	5	6	7	8
Bulk density (g/cm ³)	0.633 ± 0.005	0.613 ± 0.004	0.610 ± 0.000	0.603 ± 0.003	0.600 ± 0.004	0.591 ± 0.003	0.595 ± 0.003	0.588 ± 0.004

4.2.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมนี้ทำในภาวะการผสมที่ควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ในเครื่องผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม โดยจากรูปที่ 4.6 สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 และ 6,000 รอบต่อนาทีให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือการเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก ในขณะที่การเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบสำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 4,500 รอบต่อนาทีส่งผลในค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกลดลง ซึ่งถึงแม้ว่าการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทั้งตัวแปรด้านอัตราเร็วรอบ และเวลาในการผสมจะมีทั้งไม่ส่งผลและส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก แต่โดยตามมาตรฐาน JIS D 4417 ช่วงการยอมรับได้ของค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกคือแตกต่างกันไม่เกิน 0.10 ซึ่งในกรณีนี้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกคือ 2.755 และ 2.709 ตามลำดับจากภาคผนวก ค ซึ่งทั้งสองให้ผลต่างกันที่ 0.05 เท่านั้น เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าปัจจัยการผสมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก โดยทั่วไปแล้วความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบแต่ละตัว ปริมาณการใช้วัตถุดิบแต่ละตัว และปริมาณรูพรุนในผ้าเบรกที่อัดขึ้นรูป [28] โดยการทดลองนี้ได้ควบคุมความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบแต่ละตัวและปริมาณการใช้วัตถุดิบแต่ละตัวไว้แล้ว

สาเหตุที่การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทั้งในด้านปัจจัยอัตราเร็วรอบการผสมและเวลาในการผสมวัตถุดิบไม่ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกอย่างมีนัยสำคัญนั้น อาจมีสาเหตุมาจากการที่การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมนั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมได้น้อย จึงทำให้ในขั้นตอนถัดมาสำหรับการผลิตผ้าเบรก การขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงจึงเป็นปัจจัยที่สูงส่งผลกระทบต่อผ้าเบรกมากกว่าค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม หรือเรียกอีกนัยหนึ่งได้ว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปนั้น ส่งผลกระทบต่อมากกว่าการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมที่กระบวนการผสม

วัตถุดิบ และสำหรับการกระจายตัวของวัตถุดิบหลังผสมที่พิจารณาจากค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละชั้นเล็ก ๆ ในผ้าเบรคนั้นให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

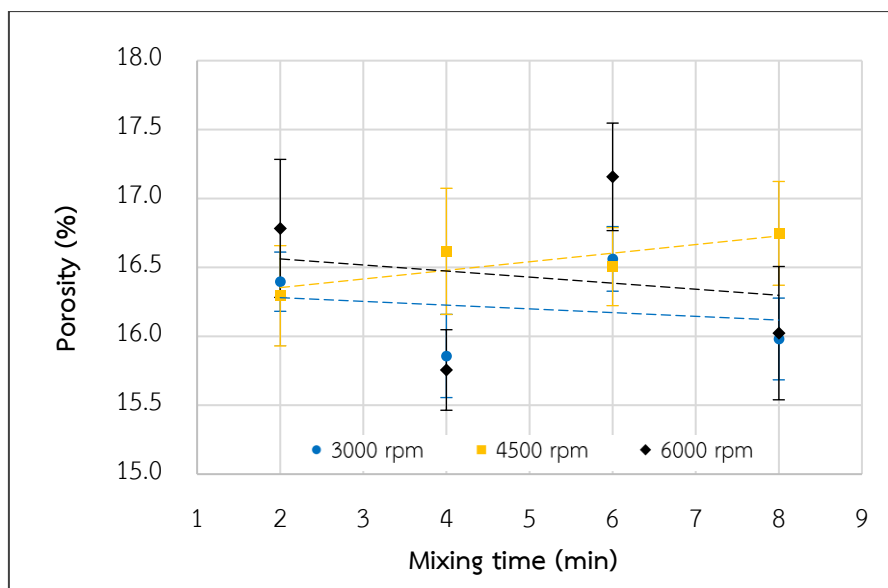


รูปที่ 4.6 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก

4.2.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อปริมาณรูพรุนของผ้าเบรก

เช่นเดียวกับการศึกษาในกรณีของปัจจัยการผสมต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก เนื่องมาจากการศึกษาปริมาณรูพรุนนั้นคำนวณมาจากผลของค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก ผลที่เกิดขึ้นจึงเป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยที่เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกต่ำหมายความว่าปริมาณรูพรุนของผ้าเบรคนั้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งสำหรับความแตกต่างของปริมาณรูพรุนในแต่ละภาวะการผสมของผ้าเบรกดังที่แสดงไว้นั้น จากการศึกษาของ Razo et al [29] ความแตกต่างของความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกเพียง 1.5 เปอร์เซ็นต์ไม่ส่งผลให้สมบัติในด้านอื่น ๆ ของผ้าเบรกแตกต่างกัน กล่าวคือถือได้เป็นผ้าเบรกที่มีสมบัติเดียวกัน ในลักษณะเดียวกันนั้นจากการศึกษาของ Mutlu et al [30] พบว่าเมื่อปริมาณรูพรุนของผ้าเบรกมากขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์ (เปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่มีรูพรุน 6 และ 18 เปอร์เซ็นต์) ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรกเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผ้าเบรกมีปริมาณรูพรุนมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์อาจช่วยลดการเกิดเสียงขณะเบรกได้

สำหรับความแตกต่างของปริมาณรูพรุนที่น้อยมากดังที่กล่าวไปแล้วนั้น อาจส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญได้ ซึ่งมีการทำการศึกษาอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.1



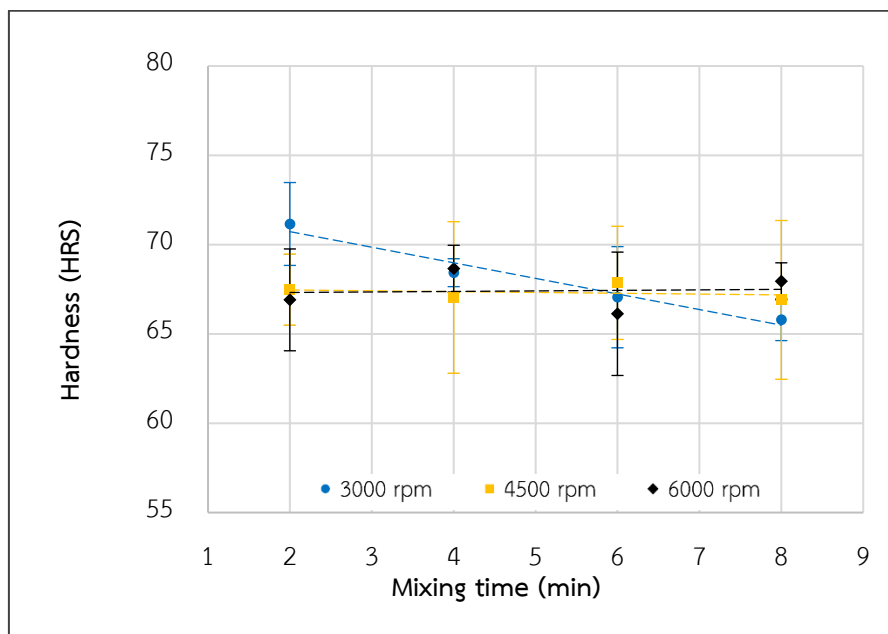
รูปที่ 4.7 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก

4.2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อความแข็งของผ้าเบรก

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมนี้ทำในภาวะการผสมที่ควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ในเครื่องผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม โดยจากรูปที่ 4.8 สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือการเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของผ้าเบรก ในขณะที่การเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบสำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 รอบต่อนาทีมีผลให้ค่าความแข็งของผ้าเบรกลดลง อาจมีสาเหตุมาจากการผสมที่อัตราเร็วรอบต่ำ (3,000 รอบต่อนาที) ในช่วง 2 ถึง 4 นาทีแรกนั้นยังไม่สามารถทำให้เส้นใยกระจายตัวได้ดีพอ จึงทำให้ชิ้นงานผ้าเบรกมีความแข็งสูงกว่าการผสมด้วยอัตราเร็วรอบ 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาที ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มเวลาการผสมวัตถุดิบเป็น 6 ถึง 8 นาที ค่าความแข็งของผ้าเบรกลดลงมาจนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันกับความแข็งของผ้าเบรกที่ผสมด้วยอัตราเร็วรอบ 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาที

สรุปโดยภาพรวมนั้นการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมไม่ส่งผลต่อความแข็งของผ้าเบรกอย่างมีนัยสำคัญ เพราะการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งที่ได้นั้นยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ของการใช้งานผ้าเบรก ตามมาตรฐานของโรงงานที่ ± 25 (HRS) และเนื่องจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมนั้นไม่ได้เป็นการทำให้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าความแข็งของผ้าเบรกรันั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Adegbola et al [31] พบว่าการปรับเปลี่ยนของขนาดอนุภาคของสารเติมเต็มที่มี 250 500 และ 850 ไมครอน นั้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของผ้า

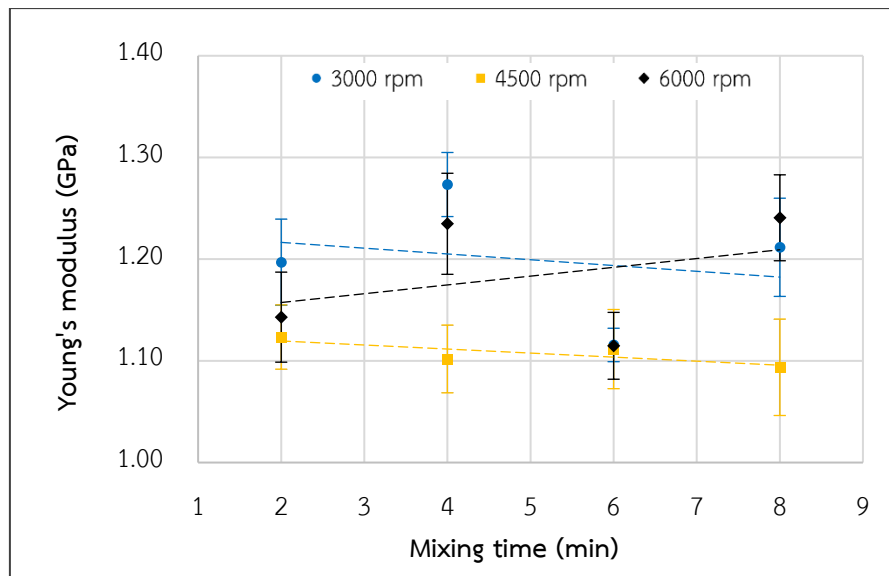
เบรกเพิ่มขึ้นตามลำดับ อาจมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่านั้นทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัส และการเชื่อมประสานที่ดีกว่าของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ผ้าเบรกมีความแข็งที่มากกว่า



รูปที่ 4.8 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อค่าความแข็งของผ้าเบรก

4.2.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก

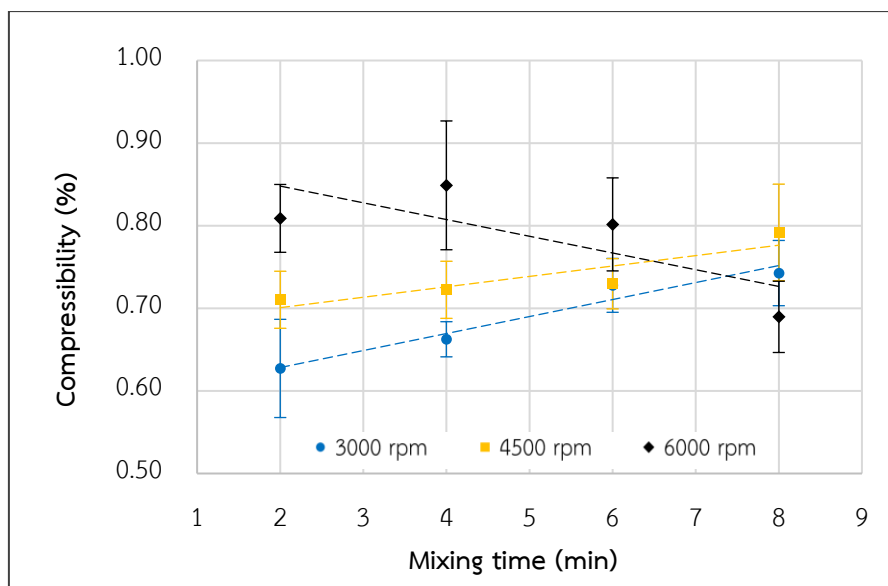
การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมนี้ทำในภาวะการผสมที่ควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ในเครื่องผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม โดยจากรูปที่ 4.9 สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีให้ผลที่คล้ายคลึงคือการเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก จากการศึกษาของ Chang et al [32] พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสยืดหยุ่นคือขนาดของอนุภาค Chang และคณะได้ศึกษาขนาดของผงยางที่ 75 และ 450 ไมครอน พบว่าที่ขนาดอนุภาคเล็กกว่าให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรกที่สูงกว่า และอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรกคือปริมาณเส้นใยจากการศึกษาของ Singh และ Patnaik [33] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอะรามิดที่ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.146 จิกะปาสคาล ซึ่งอาจเป็นเหตุผลสำหรับการทดลองการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมได้ว่า การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมส่งผลให้ความหนาแน่นบดเปลี่ยนแปลงจริง แต่เปลี่ยนแปลงในปริมาณที่น้อยซึ่งเปรียบได้กับการที่ไม่เปลี่ยนปริมาณเส้นใยอะรามิด จึงมีผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรกไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.9 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก

4.2.6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมต่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการผสมนี้ทำในภาวะการผสมที่ควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ในเครื่องผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม โดยจากรูปที่ 4.10 สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 6,000 รอบต่อนาทีให้ผลที่คล้ายคลึงคือการเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบไม่ส่งผลต่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 รอบต่อนาทีเมื่อเวลาในการผสมวัตถุดิบทำให้ความสามารถในการอัดตัวได้ของผ้าเบรกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการที่ความแข็งของผ้าเบรกลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบ และสำหรับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 4,500 รอบต่อนาทีเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบทำให้ความสามารถในการอัดตัวได้ของผ้าเบรกเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับการที่ปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมวัตถุดิบเช่นเดียวกัน โดยค่าสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกดังแสดงในรูปนั้นทั้งหมดยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือมีสภาพอัดตัวได้น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐาน AIS-061 (Automotive Industrial Standard) และ ความสำคัญของสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกคือเมื่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกมากขึ้น ส่งผลให้การสั่นขณะเบรคนั้นลดน้อยลงซึ่งอาจมีผลให้โอกาสในการเกิดเสียงระหว่างการเบรกลดลงด้วย [34]



รูปที่ 4.10 ผลจากปัจจัยด้านเวลาต่อสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมต่อสมบัติของผ้าเบรกในด้านต่าง ๆ พบว่าผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมคือค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุดิบ ซึ่งเป็นค่าการตรวจสอบของผลิตภัณฑ์หลังจากผสมเสร็จ ซึ่งสาเหตุของผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมที่น้อยต่อสมบัติทั้งทางกายภาพและทางกล อาจมีสาเหตุมาจากการผ่านกระบวนการหลายกระบวนการมากเกินไป ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบปริมาณรูพรุน การทดสอบความแข็ง การทดสอบโมลลูล์สียืดหยุ่น และการทดสอบสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก ล้วนแล้วเป็นการทดสอบที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นที่ใช้แรงอัด 136 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในพื้นที่หน้าผ้าเบรก กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่ใช้แรงอัด 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในพื้นที่หน้าผ้าเบรก ซึ่งเป็นการใช้แรงกดอัดที่สูงมากจนกระทั่งสามารถลบความแตกต่างของการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมได้

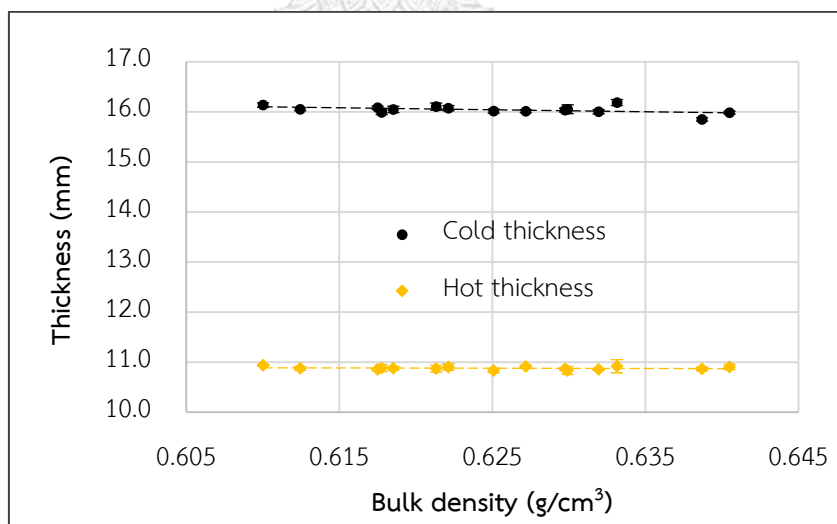
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นบัลค์ของผงวัสดุดิบหลังผสมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก

นอกจากการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรกแล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุดิบหลังผสมกับสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก ซึ่งความหนาแน่นบัลค์ที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมต่าง ๆ ดังการทดลองที่ผ่านมา

4.3.1 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อความหนาของผ้าเบรก

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับความหนาของผ้าเบรกทั้งหลังกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็น (Cold thickness) และหลังการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน (Hot thickness) พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานพิมพ์เย็นน้อยลง สาเหตุเนื่องมาจากที่ค่าความหนาแน่นบัลค์มากขึ้นลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบหลังผสมจะมีการเกาะตัวกันอยู่ปริมาณหนึ่งแล้ว เมื่อถูกแรงกดอัดจึงง่ายต่อการขึ้นรูปมากกว่าวัตถุดิบหลังผสมที่กระจายตัวได้ดี (ค่าความหนาแน่นบัลค์น้อยหรือมีความฟู) ในทางกลับกันสำหรับความหนาชิ้นงานพิมพ์ร้อน เมื่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมเพิ่มมากขึ้นนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาชิ้นงานพิมพ์ร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

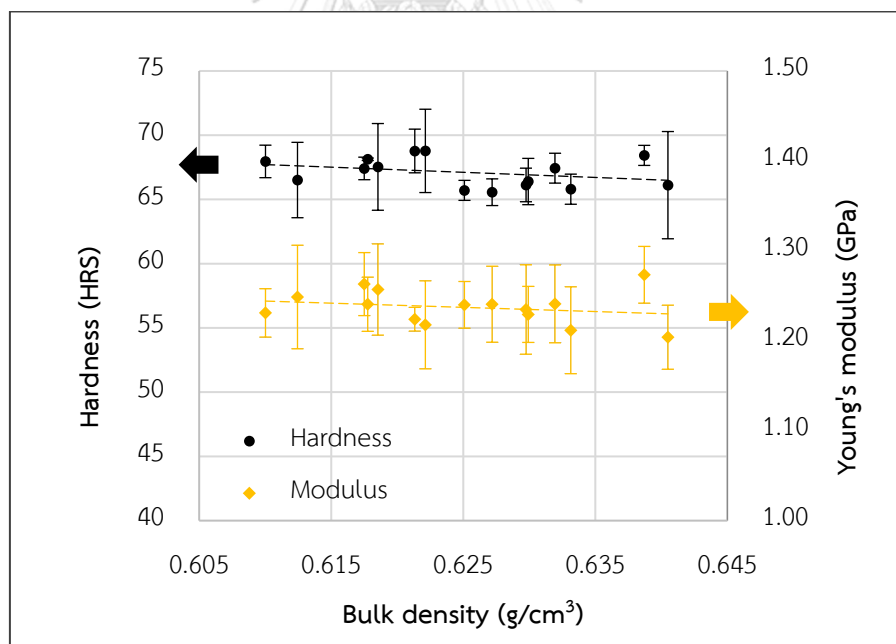
กล่าวคือหลังกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นที่มีการใช้แรงกดอัดชิ้นงานที่ 136 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในพื้นที่หน้าผ้าเบรก ค่าความหนาแน่นบัลค์มีผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงานพิมพ์เย็นเล็กน้อย (เปรียบจากความหนาที่ค่าความหนาแน่นบัลค์ต่ำสุดและสูงสุด) แต่เมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่ใช้แรงอัด 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในพื้นที่หน้าผ้าเบรก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมและความหนาของชิ้นงานพิมพ์ร้อนได้หายไป



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อความหนาของผ้าเบรก

4.3.2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก

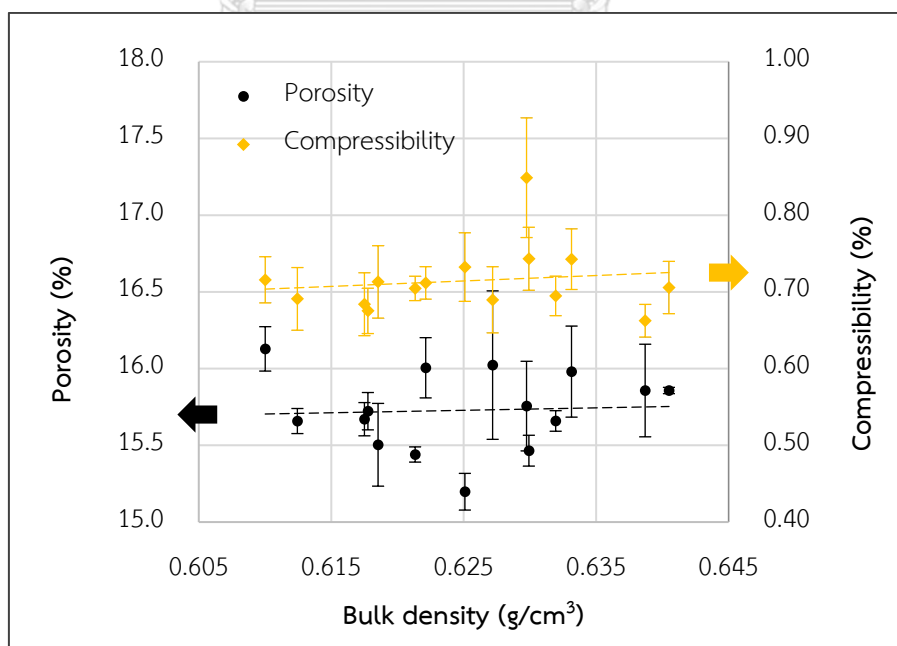
จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก ซึ่งจากกราฟสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรกอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งของผ้าเบรกที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมนั้นยังอยู่ในช่วงมาตรฐานของโรงงานที่ยอมรับได้ที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 25 (HRS) ซึ่งจากการศึกษาของ Mathur et al [35] พบว่าค่าความแข็ง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรคนั้นไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งจากการทดลองนี้ที่ไม่สัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก และจากการศึกษาของ Magnier et al [36] พบว่าในช่วงความต่างของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรกที่ 0.8 จิกะปาสคาลนั้นถือเป็นช่วงความต่างที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งจากผลโมดูลัสยืดหยุ่นที่แสดงในกราฟนั้นมีช่วงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.06 จิกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรคนั้นอยู่ในช่วงการใช้งานที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐาน



รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของผ้าเบรก

4.3.3 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อความพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมกับความพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก ซึ่งจากกราฟสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมไม่ส่งผลกระทบต่อความพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการศึกษาของ Razo et al [29] ความแตกต่างของปริมาณรูพรุนของผ้าเบรกเพียง 1.5 เปอร์เซ็นต์ไม่ส่งผลให้สมบัติในด้านอื่น ๆ ของผ้าเบรกแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้คือนอกจากค่าความหนาแน่นบัลค์ไม่สัมพันธ์กับความพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกแล้ว ปริมาณรูพรุนนั้นไม่สัมพันธ์กับสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกเช่นเดียวกันในช่วงของค่าความพรุนที่ 15.20 ถึง 16.13 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การศึกษาของ Singh และ Patnaik [33] พบว่าที่ปริมาณรูพรุนมากมีผลให้สภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกมากขึ้น โดยทำการศึกษาปริมาณเส้นใยอะรามิดที่ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ายิ่งปริมาณเส้นใยน้อยยิ่งทำให้ผ้าเบรกมีปริมาณรูพรุนมาก ซึ่งสามารถอธิบายผลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านปริมาณรูพรุนและสภาพอัดตัวของผ้าเบรกในรูปที่ 4.12 ได้ว่าเกิดจากการที่ความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมนั้นแตกต่างกันน้อยเกินไปจนอาจหมายความว่าปริมาณเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง จึงทำให้สมบัติของผ้าเบรกดังกล่าวนั้นไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุบหลังผสมต่อปริมาณรูพรุนและสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรก

จากการอภิปรายผลในหัวข้อที่ 4.3.1 ถึง 4.3.3 สามารถสรุปได้โดยรวมว่าค่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมที่เกิดจากการผสมด้วยภาวะการผสมที่แตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความเป็นรูพรุน ค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และสภาพอัดตัวได้ของผ้าเบรกในช่วงความแตกต่างของค่าความหนาแน่นบัลค์ที่ 0.610 ถึง 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สาเหตุสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ส่วนหนึ่งอาจมาจากความแตกต่างที่น้อยเกินไปของค่าความหนาแน่นบัลค์จนทำให้ไม่เห็นถึงผลกระทบต่อปัจจัยด้านอื่น ๆ ของผ้าเบรก อีกส่วนหนึ่งอาจมาจากการที่การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมนั้นไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบในผ้าเบรก จึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก และส่วนสุดท้ายอาจมาจากการที่สมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรกที่ตรวจสอบได้นั้นต้องผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็น และกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนมาก่อน จึงเป็นการทำให้มีปัจจัยภายนอกเข้ามากระทบมากกว่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม

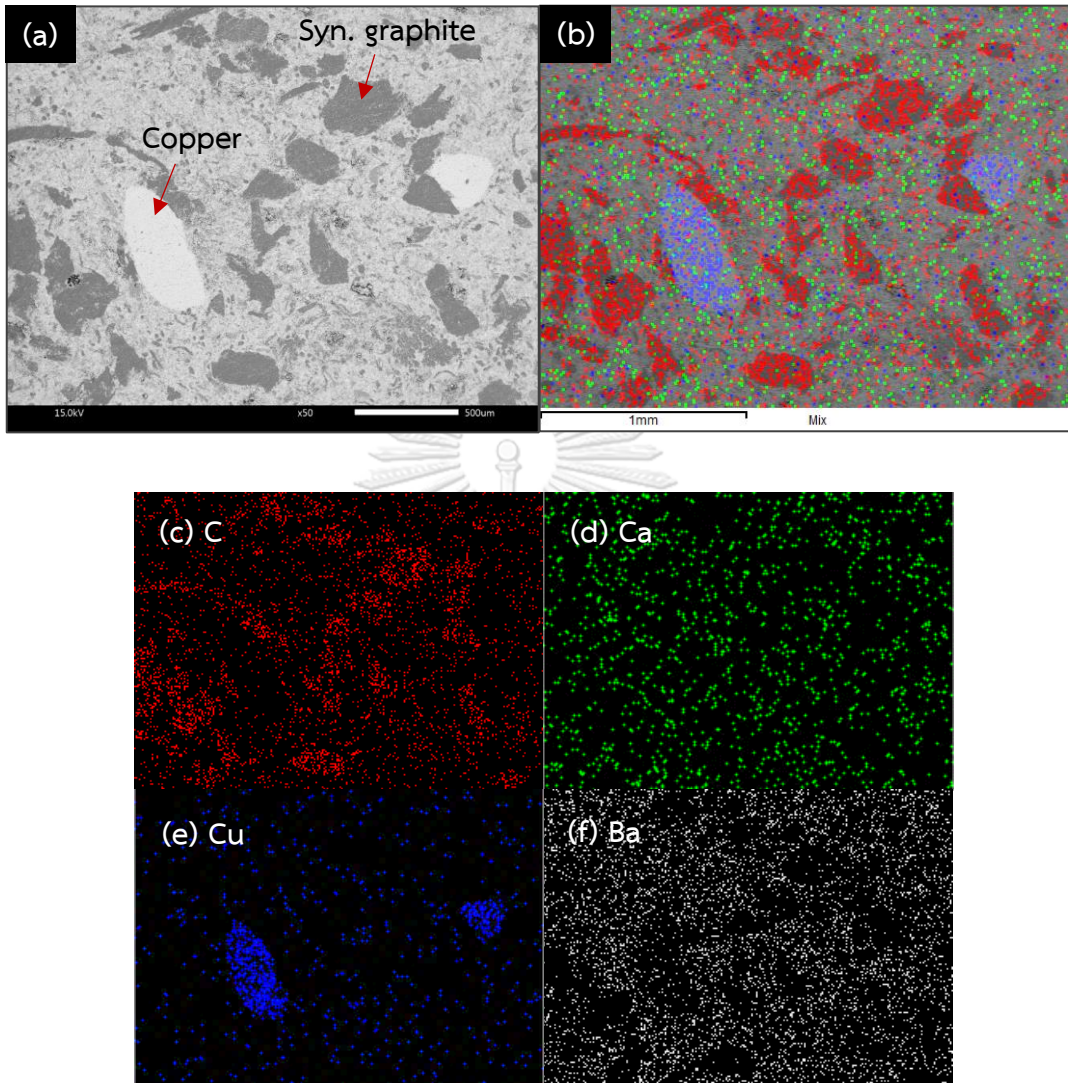
4.3.4 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อลักษณะผิวผ้าเบรก

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ที่สามารถสรุปได้แล้วว่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นบัลค์ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติในด้านต่าง ๆ ของผ้าเบรก สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการยืนยันข้อมูลว่าที่ค่าความหนาแน่นบัลค์ต่ำที่สุดและสูงที่สุดนั้นมีความแตกต่างกันหรือไม่ที่พื้นผิวของหน้าผ้าเบรก โดยจากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของผ้าเบรกที่มีค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมที่ 0.610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด และลักษณะพื้นผิวของผ้าเบรกที่มีค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมที่ 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุด โดยรูป (a) เป็นการแสดงถึงลักษณะพื้นผิวที่ผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) โดยสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับนี้จะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ซึ่งจะให้ภาพออกมามีความสว่างมากกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ซึ่งหมายความว่าในรูป 4.14 (a) และ 4.15 (a) จุดที่สว่างที่สุดนั้นคือ Cu ซึ่งเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงที่สุดในองค์ประกอบของผ้าเบรก รูป (b) เป็นการนำธาตุชนิดต่าง ๆ ในรูป (c) ถึง (f) มารวมกันเพื่อเห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ สำหรับรูป (c) ถึง (f) เป็นการเลือกศึกษาการกระจายตัวของเฉพาะธาตุที่สนใจ

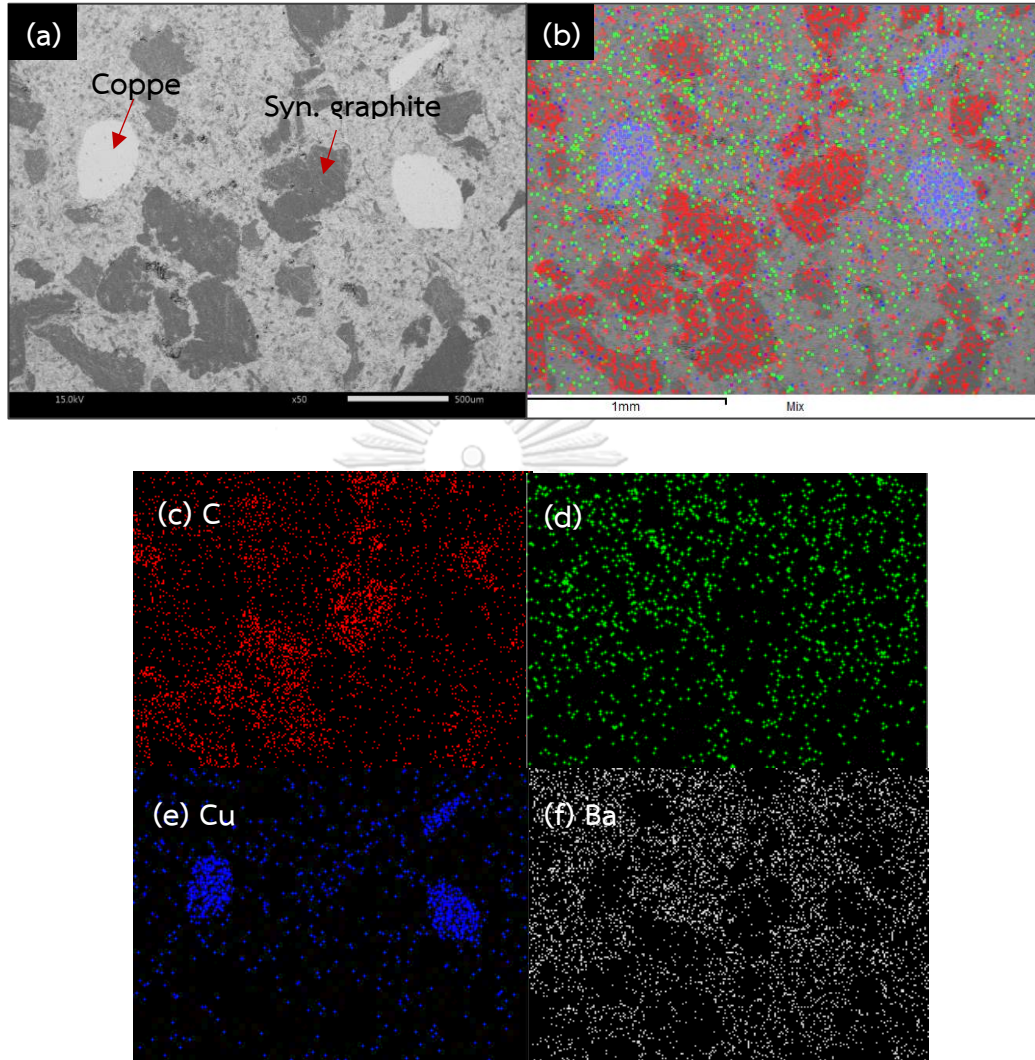
รูป (c) แทนธาตุ C ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสารหล่อลื่น Synthetic graphite โดยรูปเป็นการยืนยันรูป (a) อีกครั้งหนึ่งว่าเม็ดสีดำในรูป (a) นั้นคือ Synthetic graphite จริง รูป (d) แทนธาตุ Ca ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเส้นใย Rockwool โดยการศึกษาธาตุ Ca นั้นถือเป็นการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยซึ่งจากรูป 4.14 (d) และ 4.15 (d) แสดงถึงการกระจายที่ทั่วถึง ซึ่งหมายความว่า

ได้ว่าค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมที่ 0.610 และ 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่ส่งผลถึงความแตกต่างในด้านการกระจายตัวของเส้นใยที่ผิวของผ้าเบรก รูป (e) แทนธาตุ Cu เพื่อเป็นการยืนยันในรูป (a) อีกครั้งหนึ่งว่าธาตุที่ให้แสงสว่างมากที่สุดในรูป (a) นั้นเป็นธาตุ Cu จริง และรูป (f) แทนธาตุ Ba ซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวเติมเต็ม Barium sulfate ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบที่ใส่มากที่สุดสำหรับการผลิตผ้าเบรก

นอกจากศึกษาจากลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวของผ้าเบรกแล้ว จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการศึกษาเชิงปริมาณของธาตุที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวของทั้งรูปที่ 4.14 และ 4.15 โดยภาพรวมแล้วปริมาณธาตุในแต่ละชนิดจากผ้าเบรกสองชิ้นนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีของธาตุ Ca เห็นได้ชัดอีกเช่นกันว่าทั้งผ้าเบรกที่มาจากวัตถุดิบหลังผสมที่มีค่าความหนาแน่นบัลค์ 0.610 และ 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีปริมาณ Ca ที่ใกล้เคียงกันซึ่งอาจหมายความว่าผ้าเบรกทั้งสองชิ้นนี้มีการกระจายตัวของเส้นใยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นวิธีการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นเป็นการทดสอบในจุดที่ชี้เฉพาะมาก จากผลการทดสอบที่แสดงอยู่นั้นยังไม่สามารถเป็นคำอธิบายของผ้าเบรกทั้งชิ้นงาน แต่ก็แสดงให้เห็นได้เช่นกันว่าในจุดที่เลือกทดสอบสำหรับผ้าเบรกทั้งสองชิ้นนี้มีความคล้ายคลึงกันจริง ซึ่งมีแนวโน้มได้ว่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมเพียง 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรนั้น ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวหรือปริมาณวัตถุดิบที่ผิวหน้าผ้าเบรก



รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม 0.610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาวะการผสมที่ 3,000 รอบต่อนาที 6 นาที และ 65 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของเครื่องผสม)



รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาวะการผสมที่ 4,500 รอบต่อนาที 4 นาที และ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของเครื่องผสม)

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ 0.610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

Element	Weight %	Atomic %
C	33.59	62.65
O	17.34	24.28
Al	0.74	0.61
Si	1.40	1.12
S	3.68	2.57
Ca	0.86	0.48
Cu	7.25	2.56
Ba	35.14	5.73
Total	100	100

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นบัลค์ 0.640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

Element	Weight %	Atomic %
C	33.61	63.99
O	15.96	22.81
Al	0.00	0.00
Si	1.46	1.19
S	3.60	2.57
Ca	0.93	0.53
Cu	7.81	2.81
Ba	36.62	6.10
Total	100	100

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของผ้าเบรก

4.4.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก

ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมด้วยภาวะการผสมที่แตกต่างกันคือผสมวัสดุที่อัตราเร็วรอบ 3,000 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งในแต่ละอัตราเร็วรอบที่ใช้ผสมนั้นมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการผสมวัสดุอีกเช่นกันที่ 2 4 6 และ 8 นาทีตามลำดับ โดยที่ทุกภาวะการผสมมีการควบคุมปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นั้นพิจารณาจากการใช้งานจริง ซึ่งในการใช้งานที่ความเร็วปกติ (100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) สามารถสร้างความร้อนที่ผ้าเบรกได้ประมาณ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส [37, 38] สำหรับการทดสอบนี้จึงพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสหาเพิ่มอุณหภูมิเพื่อแสดงถึงความเสถียรในการใช้งานของผ้าเบรกดังวงกลมสีแดงที่แสดงในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18

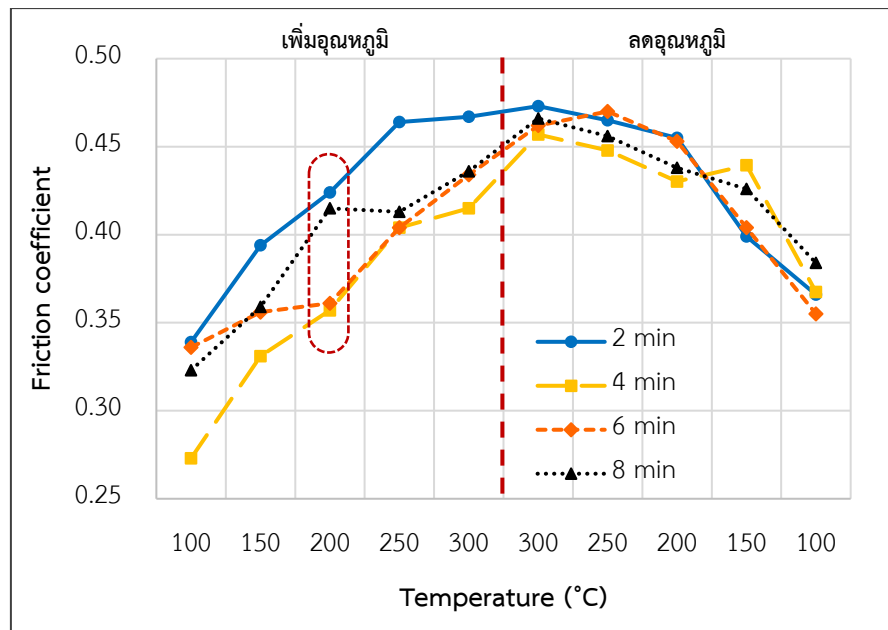
สำหรับรูปที่ 4.16 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการผสมวัสดุที่ 2 นาทีนั้นในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าการผสมด้วยเวลาการผสมวัสดุอื่น ในกรณีเดียวกันสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการผสมวัสดุที่ 8 นาที ที่ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงเป็นอันดับสอง แต่เมื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการผสมวัสดุที่ 4 และ 6 นาทีนั้นให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือช่วงการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อถึงช่วงการลดอุณหภูมิสำหรับทุกภาวะการผสมนั้นให้ผลที่คล้ายคลึงกันทั้งหมดคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดต่ำลงสัมพันธ์กับการที่อุณหภูมิลดลง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดต่ำลงตั้งแต่ 0.47 ถึง 0.35 สำหรับทุกภาวะการผสม และค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสคือ 0.10

สำหรับรูปที่ 4.17 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิที่ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียสสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกสำหรับการผสมที่ 4 และ 6 นาทีที่อยู่ในกลุ่มที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าอีกกลุ่มหนึ่งที่ผสมวัสดุที่เวลา 2 และ 8 นาที แต่หลังจากอุณหภูมิขึ้นไปถึง 250 และ 300 องศาเซลเซียสจนถึงช่วงการลดอุณหภูมิแล้วนั้น สำหรับทุกภาวะการผสมให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ไปในการทำงานเดียวกันคืออยู่ในช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.48

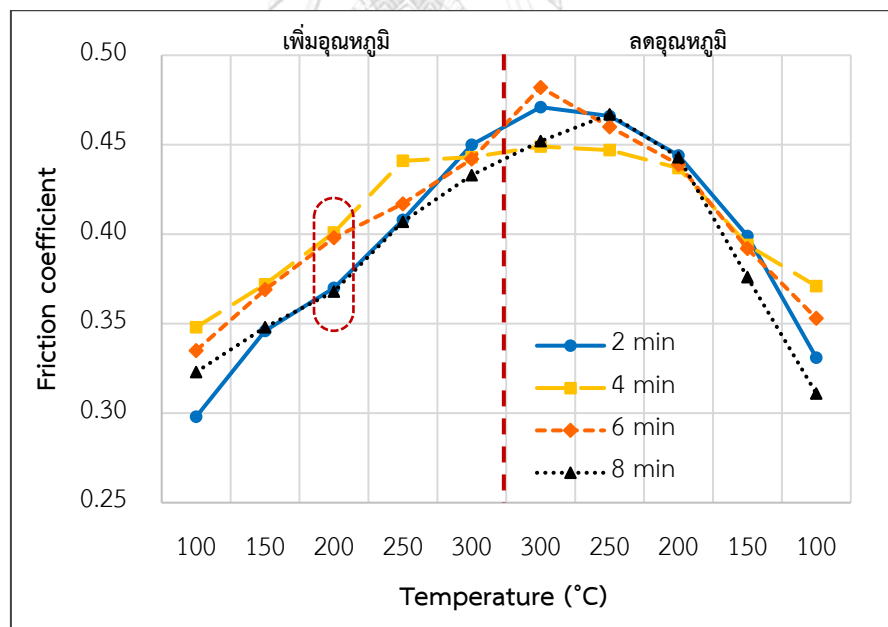
ถึง 0.31 และค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสคือ 0.08

สำหรับรูปที่ 4.18 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิที่ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียสสำหรับภาวะการผสมวัตถุดิบที่ 2 นาทีพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาในการผสมวัตถุดิบอื่นในกรณีเดียวกันในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิที่ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียสสำหรับภาวะการผสมวัตถุดิบที่ 6 นาทีพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาในการผสมวัตถุดิบอื่น แต่เมื่อถึงช่วงการทดสอบที่ลดอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ลงมาเหลือ 100 องศาเซลเซียสนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสำหรับทุกภาวะการผสมให้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงจาก 0.48 ถึง 0.37 และค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสคือ 0.12

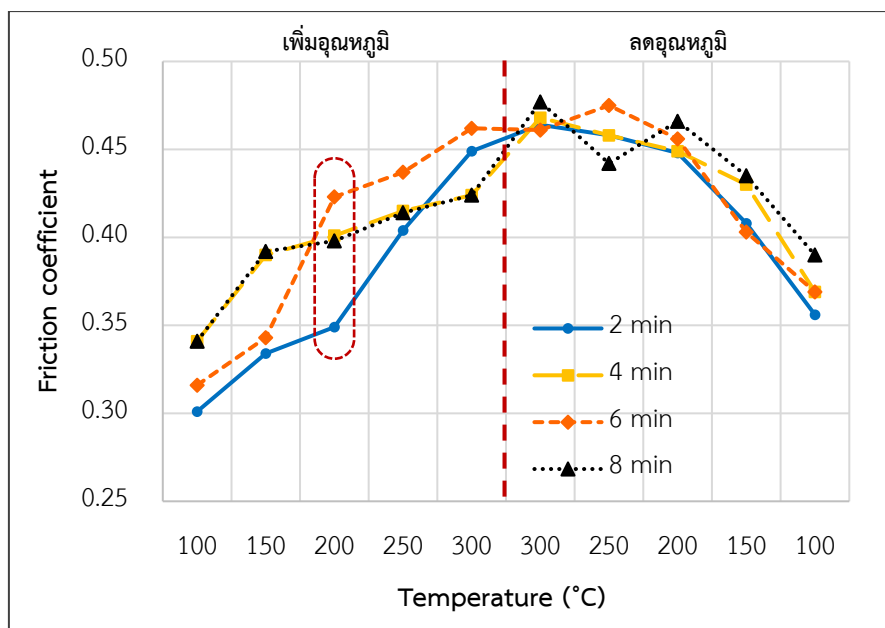
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 นั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ผสมด้วยภาวะการผสมที่แตกต่างทั้งหมดยังคงให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้จากมาตรฐาน JIS D 4411 สรุปได้โดยสังเขปว่าที่เวลาในการผสมวัตถุดิบ 2 นาทีมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแตกต่างจากการผสมวัตถุดิบด้วย 4 6 และ 8 นาที สำหรับอัตราเร็วรอบการผสมวัตถุดิบที่ 3,000 และ 6,000 รอบต่อนาที และในด้านการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วรอบในการผสมพบว่าที่อัตราเร็วรอบในการผสม 3,000 รอบต่อนาทีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบเป็น 2 4 6 และ 8 นาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ได้มีความแตกต่างกันในช่วงการทดสอบเพิ่มอุณหภูมิ สำหรับทุกช่วงเวลาในการผสมวัตถุดิบที่ปรับเปลี่ยน และสำหรับอัตราเร็วรอบในการผสมที่ 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากการผสมที่อัตราเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาทีมีความเสถียรมากกว่าทุกช่วงเวลาการผสมวัตถุดิบที่ถูกปรับ และสามารถยืนยันความเสถียรของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายได้ด้วยการพิจารณาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสพบว่าอัตราเร็วรอบการผสมที่ 4,500 รอบต่อนาทีเสถียรที่สุด รองลงมาเป็นการผสมอัตราเร็วรอบที่ 3,000 และ 6,000 รอบต่อนาทีตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปอัตราเร็วรอบในการผสมที่เหมาะสมที่สุดได้คืออัตราเร็วรอบในการผสมวัตถุดิบที่ 4,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที

4.4.2 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรก

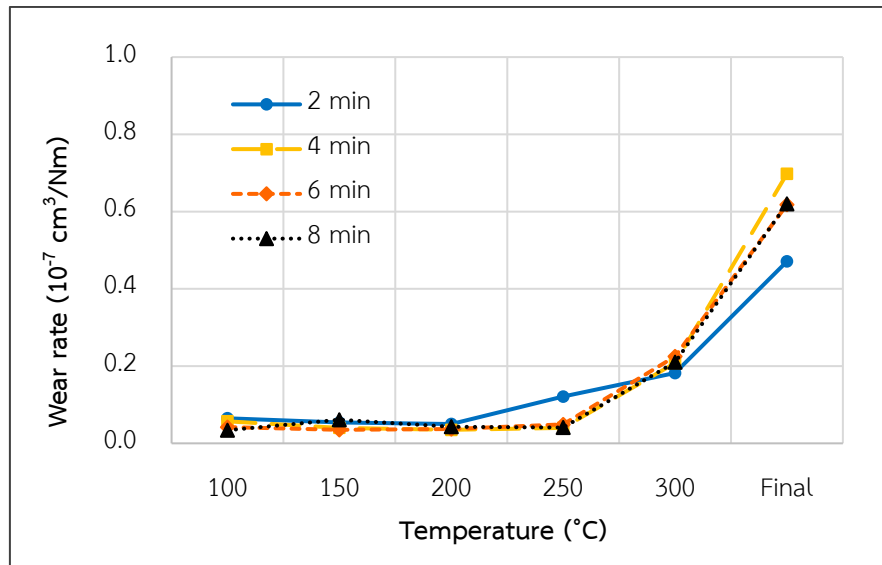
ศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกที่ผสมด้วยภาวะการผสมที่แตกต่างกันคือผสมวัตถุดิบที่อัตราเร็วรอบ 3,000 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งในแต่ละอัตราเร็วรอบที่ใช้ผสมนั้นมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบอีกเช่นกันที่ 2 4 6 และ 8 นาทีตามลำดับ โดยที่ทุกภาวะการผสมมีการควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสมดังรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกนี้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS D 4411 เช่นเดียวกันกับการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก โดยจากรูปดังกล่าวนั้นเป็นการศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกขณะที่เพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียสและศึกษาอัตราการสึกขณะที่ลดอุณหภูมิด้วยเช่นเดียวกันแต่เป็นการแสดงอัตราการสึกหลังจากที่ทำการทดสอบช่วงลดอุณหภูมิต่างแล้วตามมาตรฐาน JIS D 4411 ซึ่งจะถูกลดในรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 ในค่าของ “Final”

สำหรับรูปที่ 4.19 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียสพบว่าอัตราการสึกค่อนข้างน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียสจะพบการสึกอย่างเห็นได้ชัดสำหรับทุกช่วงเวลาที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบ จนท้ายสุดสำหรับการทดสอบเมื่อทดสอบช่วงการลดอุณหภูมิแล้วจะได้ค่าอัตราการสึกของผ้าเบรกค่าสุดท้ายออกมา และพบว่าที่เวลาในการผสมวัตถุดิบที่ 2 นาทีให้อัตราการสึกที่ต่ำที่สุด และที่เวลาในการผสมวัตถุดิบที่ 4 นาทีให้อัตราการสึกที่สูงที่สุดโดยที่ความต่างกันของทั้งสองค่าอยู่ที่

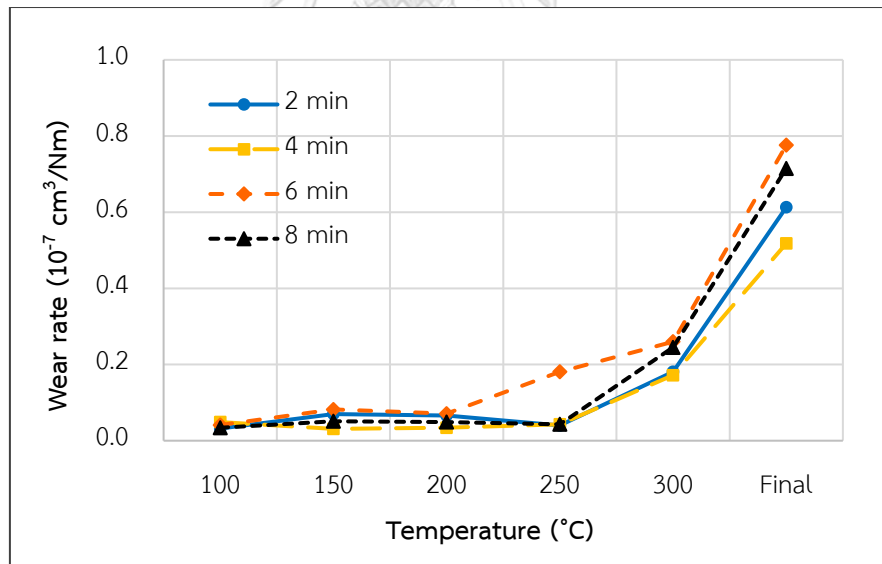
0.23×10^{-7} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวัตน์เมตร ซึ่งถือได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากจนเรียกได้ว่าไม่แตกต่างกันตามมาตรฐาน JIS D 4411

สำหรับรูปที่ 4.20 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที ให้พฤติกรรมการสึกเช่นเดียวกันกับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 รอบต่อนาที และพบว่าที่เวลาในการผสมวัสดุที่ 4 นาทีให้อัตราการสึกที่ต่ำที่สุด และที่เวลาในการผสมวัสดุที่ 6 นาทีให้อัตราการสึกที่สูงที่สุดโดยที่ความต่างกันของทั้งสองค่าอยู่ที่ 0.26×10^{-7} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวัตน์เมตร และสำหรับรูปที่ 4.21 การศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที ให้พฤติกรรมการสึกเช่นเดียวกันกับอัตราเร็วรอบการผสมที่ 3,000 และ 4,500 รอบต่อนาที และพบว่าที่เวลาในการผสมวัสดุที่ 8 นาทีให้อัตราการสึกที่ต่ำที่สุด และที่เวลาในการผสมวัสดุที่ 2 นาทีให้อัตราการสึกที่สูงที่สุดโดยที่ความต่างกันของทั้งสองค่าอยู่ที่ 0.19×10^{-7} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวัตน์เมตร ซึ่งทั้งการผสมด้วยอัตราเร็วรอบ 4,500 และ 6,000 รอบต่อนาทีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมนั้น ผลของอัตราการสึกไม่มีความแตกต่างกันตามมาตรฐาน JIS D 4411 เช่นเดียวกับอัตราการสึกจากการผสมด้วยอัตราเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที

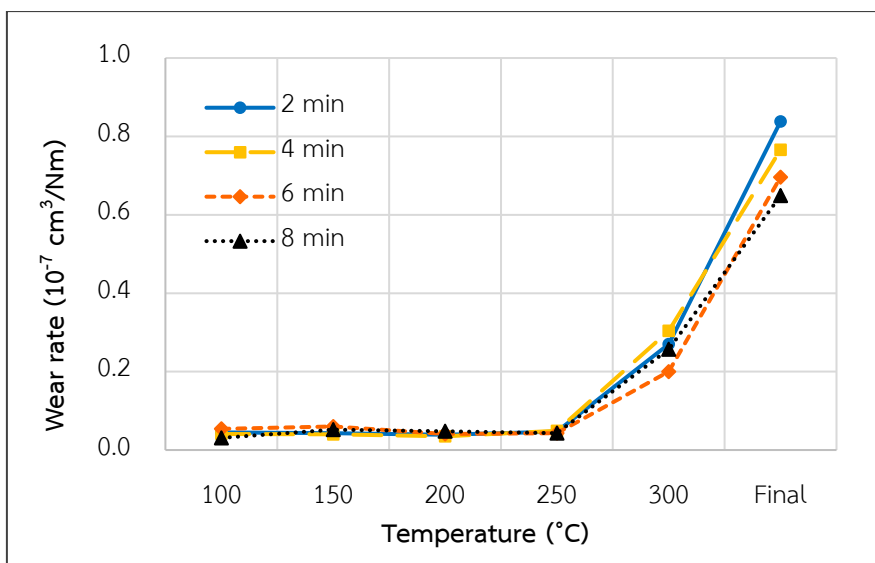
และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกจากทั้งสามอัตราเร็วรอบที่ใช้ในการผสมพบว่าค่าการสึกที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดต่างกันอยู่ 0.37×10^{-7} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวัตน์เมตรซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างกันเช่นเดิม



รูปที่ 4.19 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 3,000 รอบต่อนาที



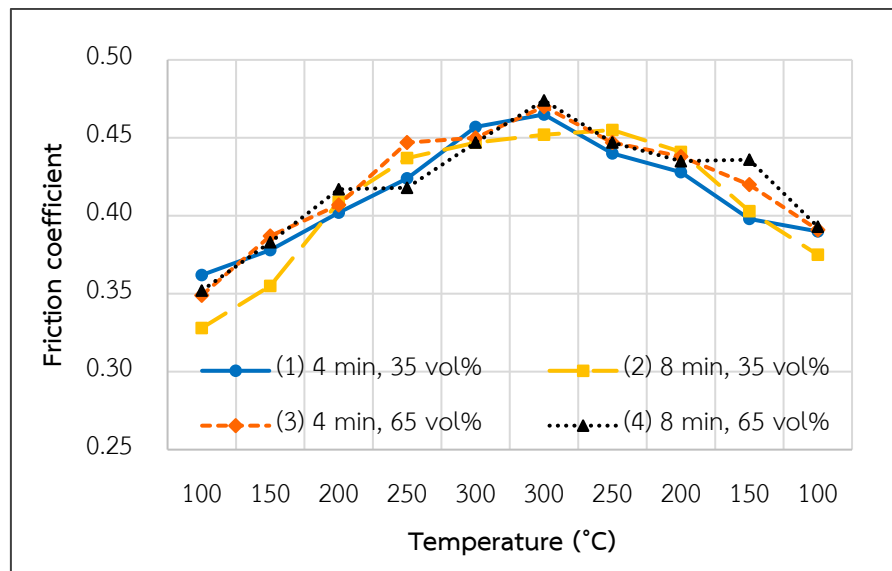
รูปที่ 4.20 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที



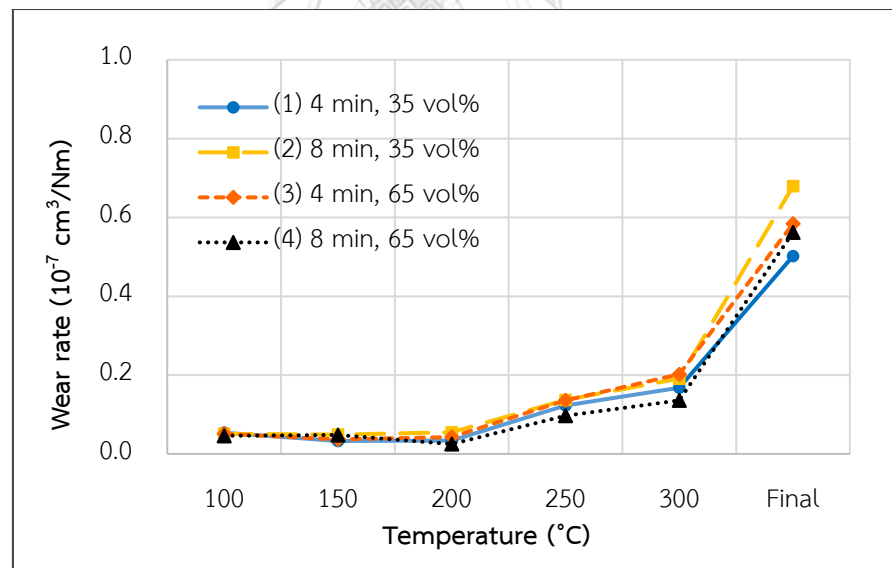
รูปที่ 4.21 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 6,000 รอบต่อนาที

จากผลการทดสอบทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรกตั้งรูปที่ 4.16 ถึง 4.21 จึงสามารถสรุปได้ว่าในด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ดีที่สุดคือภาวะการผสมวัสดุที่ 4,500 รอบต่อนาที และสำหรับด้านอัตราการสึกของผ้าเบรคนั้นทุกภาวะการผสมให้ผลที่คล้ายคลึงกันจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการศึกษาหาภาวะการผสมที่เหมาะสมที่สุดตั้งรูปที่ 4.22 และ 4.23 ซึ่งเป็นการศึกษาในภาวะการผสมที่อัตราเร็วรอบในการผสม 4,500 รอบต่อนาทีเท่านั้น โดยปัจจัยที่ทำให้การปรับเปลี่ยนคือเวลาในการผสมวัสดุที่ 4 และ 8 นาที และปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 35 และ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นพบว่าทั้งการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมวัสดุและปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมนั้นไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรกเลย

ดังนั้นภาวะการผสมวัสดุที่เหมาะสมที่สุดคือการผสมด้วยอัตราเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการผสมวัสดุที่ 4 นาทีและปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมที่ร้อยละ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเครื่องผสม ซึ่งเลือกโดยวิธีที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เร็วและปริมาณมากที่สุด



รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที



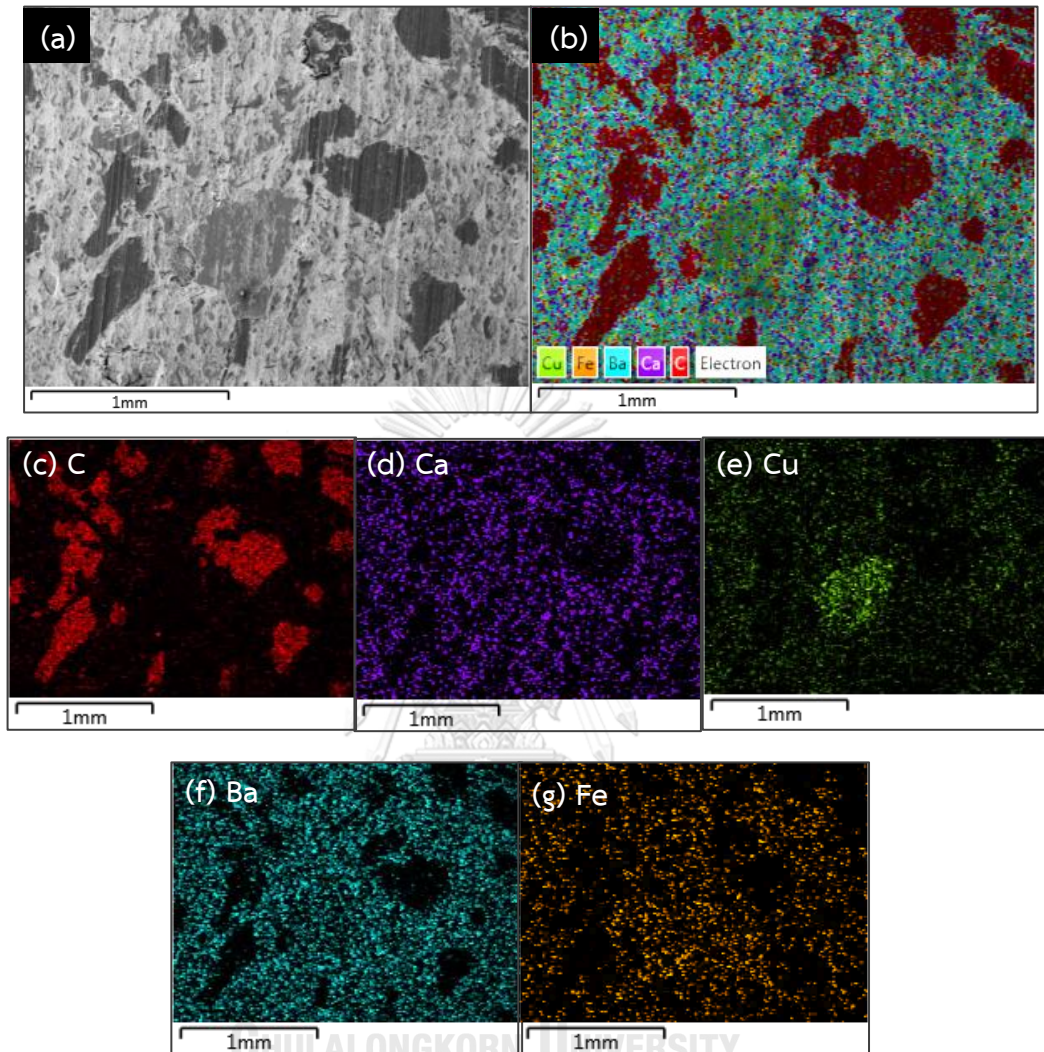
รูปที่ 4.23 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที

4.5 การศึกษาลักษณะการสึกของผ้าเบรก

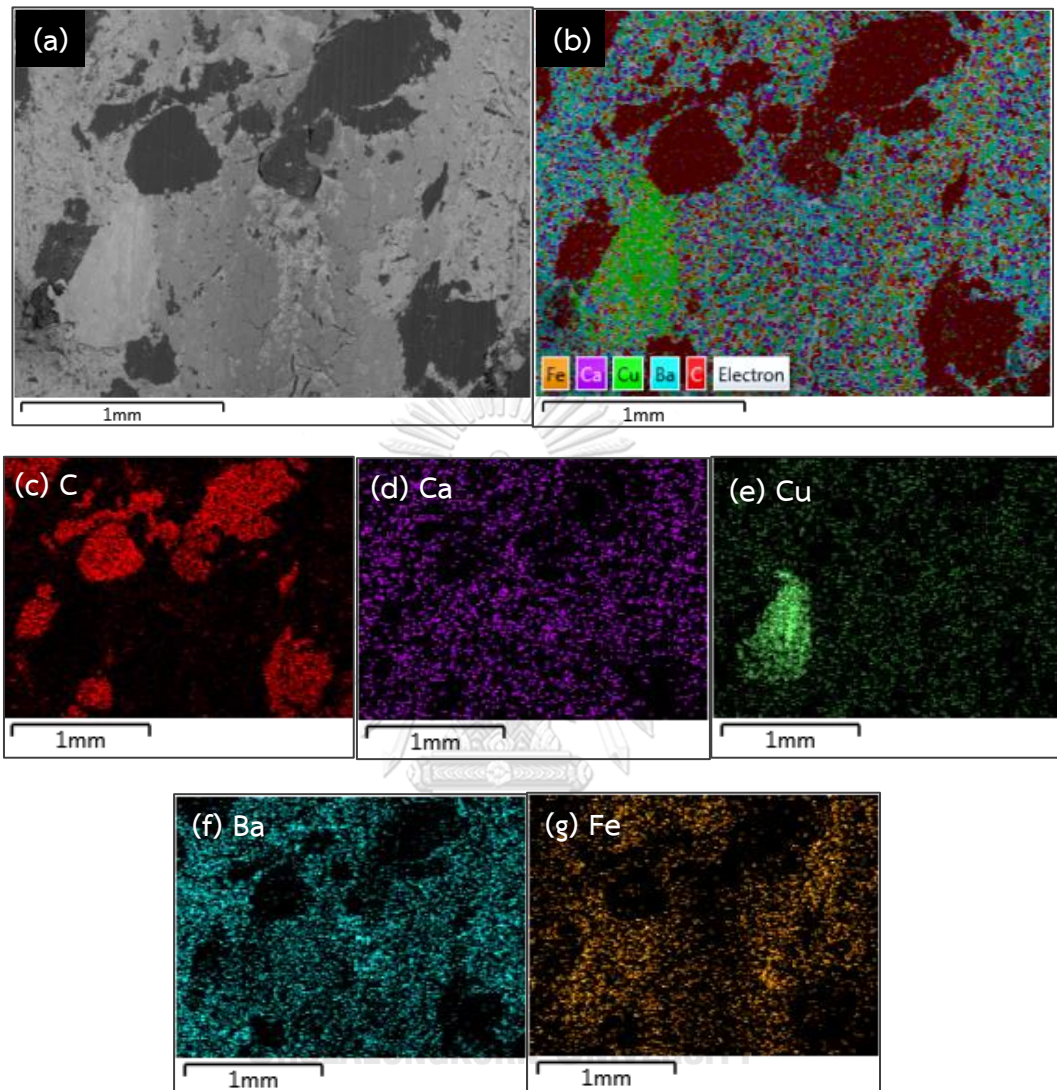
หลังจากทำการทดสอบประสิทธิภาพผ้าเบรกในหัวข้อที่ 4.4 แล้ว นำชิ้นงานหลังทดสอบประสิทธิภาพนั้นมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การ

กระจายตัวรวมถึงปริมาณธาตุที่ผิวหน้าผ้าเบรกโดยใช้เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.3.4 โดยจากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการสึกของ ชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่เกิดจากการผสมด้วยเวลาที่แตกต่างกันที่ 4 และ 8 นาทีตามลำดับ โดยควบคุม อัตราเร็วรอบและปริมาณที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบไว้ที่ 6,000 รอบต่อนาทีและร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของเครื่องผสม

ลักษณะทางกายภาพของผ้าเบรกหลังการทดสอบจากทั้งสองรูปนั้น สามารถอธิบายโดยรวม ได้ว่าผ้าเบรกที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีชั้นของฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการเบรกกองสะสมอยู่ที่หน้าผ้าเบรก เป็นชั้นอีกชั้นหนึ่ง (Second plateau) โดยชั้นฝุ่นที่เกิดขึ้นนี้สามารถช่วยทำหน้าที่ในการสร้างความ เสียดทานให้กับผ้าเบรก และสิ่งที่สังเกตได้คือชั้นฝุ่นที่เกิดขึ้นนี้มักจะไม่มีเกิดในบริเวณที่มี Synthetic graphite อาจมีสาเหตุมาจากเป็นวัตถุดิบที่มีความหล่อลื่นสูง และในส่วนของกระจายตัวของ วัตถุดิบสำหรับรูป c, d, e และ f ในรูปที่ 4.24 และ 4.25 นั้นมีลักษณะการกระจายตัวที่ทั่วทั้งหน้าผ้า เบรกเช่นเดียวกับการตรวจสอบการกระจายตัวในรูปที่ 4.14 และ 4.15 สิ่งที่แตกต่างกันจากชิ้นงานก่อน ทดสอบประสิทธิภาพคือการที่มีเหล็ก (Fe) ดังรูป g ในรูปที่ 4.24 และ 4.25 เป็นการแสดงถึงการ สัมผัสกันที่งานทดสอบ ซึ่งชิ้นงานทั้งสองที่เกิดจากการผสมวัตถุดิบที่ 4 และ 8 นาทีนั้นให้ปริมาณ เหล็กหรือธาตุ Fe ที่พบบนชิ้นงานหลังทดสอบในปริมาณใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.6 ดังนั้นอาจ สามารถสรุปได้ว่า การผสมด้วยเวลาในการผสมวัตถุดิบที่ต่างกันที่ 4 และ 8 นาทีด้วยอัตราเร็วรอบ และปริมาณที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบไว้ที่ 6,000 รอบต่อนาทีและร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ของเครื่องผสม ไม่ส่งผลต่อลักษณะการสึกของหน้าผ้าเบรก



รูปที่ 4.24 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกหลังการทดสอบที่ผสมด้วยเวลาในการผสมที่ 4 นาที



รูปที่ 4.25 ลักษณะพื้นผิวผ้าเบรกหลังการทดสอบที่ผสมด้วยเวลาในการผสมที่ 8 นาที

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบที่ผิวหน้าผ้าเบรกหลังการทดสอบประสิทธิภาพด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก

Element	Atomic %	
	4 min	8 min
C	61.03	67.69
O	22.60	18.59
Na	0.00	2.59
Mg	0.00	0.17
Al	0.67	0.28
Si	1.73	0.87
S	3.01	2.41
Cl	0.00	0.61
K	0.00	0.19
Ca	0.62	0.33
Fe	2.47	2.24
Cu	2.46	1.02
Ba	5.40	3.01
Total:	100	100

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมวัตถุดิบ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสม และสมบัติด้านต่าง ๆ ของผ้าเบรก งานวิจัยยังครอบคลุมถึงการหาภาวะที่เหมาะสมในการผสมวัตถุดิบ พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยการผสมที่ส่งผลกระทบต่อวัตถุดิบหลังผสม ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การปรับเปลี่ยนภาวะผสมต่อสมบัติของวัตถุดิบหลังผสม

สมบัติของวัตถุดิบหลังผสมที่ศึกษาคือค่าความหนาแน่นบัลค์ โดยพบว่าสำหรับการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมทุกภาวะแล้วมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงแค่ 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อวัตถุดิบหลังผสมมากที่สุดคือเวลาที่ใช้ในการผสม เมื่อเวลาในการผสมวัตถุดิบน้อยค่าความหนาแน่นบัลค์จะสูงและเมื่อเวลาในการผสมวัตถุดิบมากค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมจะน้อย

5.1.2 ค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมต่อสมบัติของผ้าเบรก

เนื่องจากความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงแค่ 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จึงทำให้สมบัติทางกายภาพ ทางกล และประสิทธิภาพของผ้าเบรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมกับความหนาแน่นหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นที่อัดด้วยแรงดัน 136 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรนั้นมีความสัมพันธ์กันเล็กน้อยคือยิ่งค่าความหนาแน่นบัลค์มากความหนาแน่นหลังอัดพิมพ์ยิ่งน้อย แต่เมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่อัดด้วยแรงดัน 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์ต่อความหนาแน่นพิมพ์ร้อน ความถ่วงจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ความแข็ง โมดูลัสยืดหยุ่น สภาพอัดตัวได้ รวมถึงประสิทธิภาพของผ้าเบรคนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน

5.1.3 การปรับเปลี่ยนภาวะผสมต่อสมบัติของผ้าเบรก

ส่วนที่หนึ่งสำหรับสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก เช่น ความหนา ความถ่วงจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ความแข็ง โมดูลัสยืดหยุ่นและสภาพอัดตัวได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการปรับเปลี่ยนภาวะการผสมวัตถุดิบอยู่ที่ 0.23

มิลลิเมตร, 0.05, 1.5 เปอร์เซ็นต์, 5 (HRS), 0.16 จิกะปาสคาลและ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ส่วนที่สองสำหรับประสิทธิภาพของผ้าเบรก เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก การผสมวัสดุกับด้วยอัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกมีความเสถียรมากที่สุด และสำหรับอัตราการสึกพบว่า การปรับเปลี่ยนภาวะการผสมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.4 ภาวะการผสมที่เหมาะสมที่สุด

การเลือกภาวะการผสมวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผ้าเบรก เลือกโดยพิจารณาที่ประสิทธิภาพของผ้าเบรกเป็นหลัก โดยพบว่าที่การผสมวัสดุด้วยอัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกมีความเสถียรมากที่สุด สำหรับเวลาและปริมาณการผสมวัสดุนั้นพบว่าไม่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก ดังนั้นจึงเลือกจากปัจจัยที่ทำให้เวลาในการผลิตที่น้อยและได้ปริมาณมากที่สุดคือภาวะการผสมที่อัตราเร็วรอบการผสม 4,500 รอบต่อนาที เวลาในการผสมที่ 4 นาที และปริมาตรที่ใช้ในการผสมวัสดุร้อยละ 65 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องผสม

เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะการผสมวัสดุเดิมของโรงงานที่มีการแบ่งรอบการผสมวัสดุออกเป็นสองรอบ รอบที่หนึ่งปั่นด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 4 นาทีและรอบที่สอง 3,000 รอบต่อนาทีอีก 4 นาที รวมเป็น 8 นาทีต่อการผสมหนึ่งครั้งทั้งยังปัจจุบันปริมาตรที่ใช้ในการผสมวัสดุอยู่ที่ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องผสม สามารถสรุปได้ว่าภาวะการผสมที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดเวลาในการผลิต และเพิ่มปริมาตรวัสดุหลังผสมได้ในเวลาเดียวกันสำหรับสูตรวัสดุที่ออกแบบสำหรับการทดลองนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาความแตกต่างของวัสดุที่นำมาผสมต่างลือตกันเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความหนาแน่นบิลค์ของวัสดุหลังผสม

5.2.2 ศึกษาความแปรผันของวัสดุแต่ละลือตด้วยภาวะการผสมที่ได้จากการทดลอง

5.2.3 ศึกษาขั้นตอนการจัดเก็บวัสดุหลังผสมต่อค่าความหนาแน่นบิลค์ของวัสดุหลังผสม

5.2.4 ศึกษาการใช้งานกล้องจุลทรรศน์ UV เพื่อนำมาตรวจการกระจายตัวของเส้นใยอะรามิด

5.2.5 ศึกษาการทดสอบผ้าเบรกด้วยเครื่อง Inertia Dynamometer เพื่อยืนยันผลด้านประสิทธิภาพของผ้าเบรก

บรรณานุกรม

- [1] CarTrade, Brake Systems in Cars, 2018.
<https://www.cartrade.com/blog/2011/auto-guides/brake-systems-in-cars-17.html>.
(Accessed 10 March 2019).
- [2] Masterusedcar, เรื่องของผ้าเบรกที่ควรรู้, 2561.
<https://www.masterusedcar.com/th/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1/%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9C%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B9%80%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89-130/>. (Accessed 10 March 2019).
- [3] Breck, Products/Brake pads, 2018. <https://breck.pl/en/products/brake-pads>.
(Accessed 10 March 2019).
- [4] Carvariety, Brake pads selection, 2016. <http://carvariety.com/how-to-choose-brake-pads/>. (Accessed 10 March 2019).
- [5] R. Weinelotter, H. Gericke, Mixing of Solids, Springer, Dordrecht, 2000.
- [6] G.L.M. GMBH, Horizontal mixing, 2019. <https://www.loedige.de/en/global-content/applications/mixing>. (Accessed 12 March 2019).
- [7] Engineering resources for powder processing industries, Powder Mixing Introduction. <https://www.powderprocess.net/Mixing.html>. (Accessed 20 March 2019).
- [8] Vortex Mixing Technology, Mixing. <https://www.incmachine.com/mixing-solution/process/mixing/>. (Accessed 10 March 2019).
- [9] Powderprocess, Powder Dry Mixing - Double Shaft Paddle Mixers.
https://www.powderprocess.net/Equipments%20html/Paddle_mixer.html.
(Accessed 24 March 2019).
- [10] Powderprocess, Powder Dry Mixing - Ribbon blender.
https://www.powderprocess.net/Equipments%20html/Ribbon_blender.html.
(Accessed 24 March 2019).

- [11] Powderprocess, V Blender.
https://www.powderprocess.net/Equipments%20html/V_Blender.html.
 (Accessed 24 March 2019).
- [12] Powderprocess, Powder Shear Mixers.
https://www.powderprocess.net/Equipments%20html/Shear_Mixer.html.
 (Accessed 24 March 2019).
- [13] Food Network Solution, Bulk density. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0747/bulk-density>. (Accessed 29 March 2019).
- [14] O.A. Abdulrazzaq, V. Saini, S. Bourdo, E. Dervishi, A.S. Biris, Particulate Science and Technology: An International Journal, 31 427-442.
- [15] T. Kato, A.J.T.t. Magario, The wear of aramid fiber reinforced brake pads: the role of aramid fibers, 37(3) (1994) 559-565.
- [16] B. Öztürk, S.J.T.L. Öztürk, Effects of resin type and fiber length on the mechanical and tribological properties of brake friction materials, 42(3) (2011) 339-350.
- [17] F. Persoon, D. Tegels, D.A. Santamaria Razo, B.-H. Lee, Aramid fibres improvements for a superior performance in friction applications, EuroBrake (2015).
- [18] J. Jones, D. Parker, J.J.P.t. Bridgwater, Axial mixing in a ploughshare mixer, 178(2) (2007) 73-86.
- [19] ธนาภรณ์ จานสีบสี, ปณิต โกเสนตอ, ปทุมวดี เศรษฐสิโรตม์, อัญชลีพร วาริตสวัสดี หล่อทองคำ, การลดปริมาณผงพื้นฐานที่มีขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรเข้มข้น, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สงขลา, 2554.
- [20] นำพร ปัญญาใหญ่, ภาสกร เรือนนาค, นิพนธ์ ห่วงกิจ, การทดสอบหาประสิทธิภาพของไบกวนผสมปุ๋ยอินทรีย์, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ, 2553.
- [21] M. Sriwiboon, N. Tiempan, K. Kaewlob, S.K. Rhee, Influence of Formulation and Process Modifications on Brake Friction, Wear and Squeal: Low-Copper NAOs and Importance of Disc Wear, SAE Technical Paper, 2014.
- [22] J.R. Wagner, E.M. Mount, H.F. Giles, 25 - Design of Experiments, in: J.R. Wagner, E.M. Mount, H.F. Giles (Eds.), Extrusion (Second Edition), William Andrew

Publishing, Oxford, 2014, pp. 291-308.

- [23] A. Rattanamalakul, Application of Nanorubber Particles in The Production of Automotive Brake Pads, Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2007.
- [24] A. Knop, L.A. Pilato, Phenolic Resins, Springer, Berlin Heidelberg GmbH, 1985.
- [25] Japanese Industrial Standard, Brake linings and pads for automobiles, JIS D 4411, Japanese Standards Association, Japan, 1993.
- [26] P. Chokwatwikul, Improve Discrete Semiconductor Device Assembling Process at Mounting Machine with DMAIC Method, Industrial Engineering, Thammasat University, 2009.
- [27] Minitab, Coefficients table for Fit Regression Model, 2019.
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/>. (Accessed 1 April 2019).
- [28] J.S. Reed, Principles of Ceramics Processing, 2 ed., A Wiley-Interscience, Canada, 1995.
- [29] D.A.S. Razo, J. Decrock, A. Opsommer, M. Fabr , F.J.S.I.J.o.M. Persoon, Manufacturing, Promaxon® D in NAO Non Steel Disc Pad Formulations: the Importance in the Third Body Layer and its Effect on Brake Noise, 9(1) (2016) 158-170.
- [30] I. Mutlu, I. Sug z , A.J.P. Keskin, The effects of porosity in friction performance of brake pad using waste tire dust, 25(5) (2015) 440-446.
- [31] J. Adegbola, S. Adedayo, I. Ohijeagbon, DEVELOPMENT OF COW BONE RESIN COMPOSITES AS A FRICTION MATERIAL FOR AUTOMOBILE BRAKING SYSTEMS, (2017).
- [32] Y.H. Chang, B.S. Joo, S.M. Lee, H.J.W. Jang, Size effect of tire rubber particles on tribological properties of brake friction materials, 394 (2018) 80-86.
- [33] T. Singh, A.J.A.o.C. Patnaik, M. Engineering, Performance assessment of lapinus-aramid based brake pad hybrid phenolic composites in friction braking, 15(1) (2015) 151-161.
- [34] M. Makrahy, A.M.J.I.J.o.T. Nouby Ghazaly, V. Engineering, Effect of Compressibility of Brake Friction Materials on Vibration Occurrence, 11 (2017).

- [35] R.B. Mathur, P. Thiagarajan, T.L. Dhama, Controlling the Hardness and Tribological Behaviour of Non-asbestos Brake Lining Materials for Automobiles, *Carbon Science* 5 (2004) 6-11.
- [36] V. Magnier, D. Naidoo Ramasami, J.F. Brunel, P. Dufrénoy, T. Chancelier, History effect on squeal with a mesoscopic approach to friction materials, *Tribology International* 115 (2017) 600-607.
- [37] A. Neys, In-vehicle brake system temperature model, (2012).
- [38] J.C. Glennon, Brake Failure Analysis.
<http://www.crashforensics.com/brakefailure.cfm>. (Accessed 5 April 2019).
- [39] C. Samansoranakun, Lactic Acid Production from Tapioca Starch Hydrolysate by Lactic Acid Bacteria, *Microbiology*, Silpakorn University, 2011.
- [40] Minitab, Analysis of variance table for Fit Regression Model, 2019.
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#adj-ss>. (Accessed 1 April 2019).
- [41] W. Chalermsmithchai, The Study for Element Optimization in Billet Production By Design of Experiment, *Industrial Engineering*, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2007.
- [42] D.C. Montgomery, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6 ed., Wiley, United States of America, 2014.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) รวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองประหยัดเวลา ต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วย ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตในงานวิจัยสาขาต่าง ๆ เช่น วิศวกรรมกรรมการอาหาร ชีววิทยา และในวงการอุตสาหกรรม เป็นต้น

พื้นผิวตอบสนองใช้แผนภาพ Surface plot ที่สร้างเป็นภาพ 3 มิติ ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่สนใจ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรร่วมการทดลองหลายปัจจัย ผลตอบสนองของตัวแปร (Response) ถูก Plot เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเหล่านั้น จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังกล่าวทำให้สามารถพิจารณาผลตอบสนองของ ตัวแปรและปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อม ๆ กัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้คือการวางแผนการทดลอง (Experimental design) การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้างแผนภาพ Surface plot

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เป็นวิธีการวางแผนการทดลอง ที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัย และมีการทำซ้ำที่จุดกลาง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่เลือก แต่ละปัจจัยเลือกศึกษา 3 ระดับที่ -1 0 และ $+1$ ดังรูปที่ ก1

จากนั้นทำการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้ และนำค่าเหล่านั้นวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมทางสถิติ เพื่อสร้างสมการกำลังสอง (Quadratic equation) เป็นสมการสำหรับทำนายผลตอบรับที่จะเกิดขึ้นหรือค่าการตอบสนอง (Response, Y) จะขึ้นกับตัวแปรอิสระต่าง ๆ เป็นความสัมพันธ์ที่อธิบายได้โดยสมการที่ ก1

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (ก1)$$

Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายผลตอบรับที่จะเกิดขึ้น

b_0 คือ ค่าคงที่

b_i คือ Linear effect

x_i คือ ตัวแปรอิสระ (รหัสตัวเลข)

b_{ii} คือ Squared effect

b_{ij} คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

Box-Behnken Design				
Design Summary				
Factors:	3	Replicates:	1	
Base runs:	15	Total runs:	15	
Base blocks:	1	Total blocks:	1	
Center points: 3				
Design Table				
Run	Blk	A	B	C
1	1	-1	-1	0
2	1	1	-1	0
3	1	-1	1	0
4	1	1	1	0
5	1	-1	0	-1
6	1	1	0	-1
7	1	-1	0	1
8	1	1	0	1
9	1	0	-1	-1
10	1	0	1	-1
11	1	0	-1	1
12	1	0	1	1
13	1	0	0	0
14	1	0	0	0
15	1	0	0	0

รูปที่ ก1 ตัวอย่างการวางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design ชนิด 3 ปัจจัยด้วยโปรแกรม Minitab

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการ จะนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่าง ๆ แทนลงในสมการดังกล่าว จะใช้ตัวทดสอบคือ P-value เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบค่านัยสำคัญทางสถิติของสมการที่ได้ว่าตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างน้อยสำคัญเมื่อค่า $P < 0.05$ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความแปรปรวน พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ควรมี

ค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 (0 – 100%) ตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้หรือเท่ากับ 1 (100%) ซึ่งแสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี โดยค่า R^2 (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาค่าความไม่เหมาะสมของแบบจำลองกับผลการทดลอง (Lack of fit) หากพบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติจึงสามารถสรุปได้ว่ามีความเหมาะสมที่ใช้แบบการจำลองนี้ [39]

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อบอกถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab จะแสดงค่าของการตัดสินใจดังนี้ [40, 41]

1) DF แสดงถึงจำนวนข้อมูลของเรา โดยสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

$$DF_{total} = n - 1$$

$$DF_{model} = k - 1$$

$$DF_{error} = n - k$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด และ k คือ จำนวนกลุ่ม

2) Adj SS (Adjusted sums of squares) แสดงการคำนวณผลบวกของคะแนนเบี่ยงเบนยกกำลังสอง โดยสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

2.1 Total sum of squares (SS_{total}) หาได้จากความแปรปรวนระหว่างกลุ่มรวมกับความแปรปรวนภายในกลุ่ม หรือสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก2

$$SS_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=0}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (ก2)$$

2.2 Between – groups sum of squares (SS_{model}) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลสำคัญของตัวแปรอิสระที่ศึกษา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก3

$$SS_{model} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (ก3)$$

2.3 Within – group sum of squares (SS_{error}) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงคะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมได้ภายในกลุ่ม ซึ่งเป็นผลของตัวแปรอื่น ๆ ที่ทำให้คลาดเคลื่อนไป ค่าที่คำนวณได้นี้เรียกว่าค่าความคลาดเคลื่อน ดังสมการที่ ก4

ความสำคัญของ SS_{error} คือเมื่อมีค่ามาก โดยประมาณ $1/5$ ขึ้นไปเมื่อเทียบกับ SS_{total} จะแปลได้ว่า การทดลองครั้งนี้มีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากผลกระทบจากตัวแปรภายนอกอื่น ๆ ที่ควบคุมไม่ได้ ดังนั้น Model หรือผลลัพธ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น ย่อมมีความคลาดเคลื่อนสูงจนอาจจะยอมรับไม่ได้ ผู้ทำการทดลองอาจจะต้องทำการทดลองใหม่

$$SS_{error} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=0}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (ก4)$$

3) Adj MS (Adjusted mean squares) ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง สามารถจำแนกออกได้ดังนี้

3.1 ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองระหว่างกลุ่ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก5

$$MS_{model} = \frac{SS_{model}}{k-1} \quad (ก5)$$

3.2 ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองภายในกลุ่ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก6

$$MS_{error} = \frac{SS_{error}}{n-k} \quad (ก6)$$

เมื่อ n_j = จำนวนข้อมูลในแต่ละกลุ่ม

k = จำนวนกลุ่ม

x_{ij} = ข้อมูลตัวที่ i ในกลุ่ม j

\bar{x}_j = ค่าเฉลี่ยของกลุ่ม j

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยรวม

$\sum_{j=1}^k \sum_{i=0}^{n_i} x_{ij}^2$ = ผลรวมของคะแนนแต่ละตัวยกกำลังสองทุก ๆ ค่าในทุกกลุ่ม

4) F-Value คือค่าสถิติในการทดสอบ แบ่งออกได้สองประเภทดังสมการที่ ก7 และ ก8

$$F_{model} = \frac{MS_{model}}{MS_{error}} \quad (ก7)$$

$$F_{Lack\ of\ Fit} = \frac{MS_{Lack\ of\ Fit}}{MS_{pure\ error}} \quad (ก8)$$

เมื่อค่าสถิติในการทดสอบของ Model มากกว่าค่าสถิติวิกฤต ($f_{1-\alpha, k-1, n-k}$, หาค่าได้จากรูปที่ ก2) จะปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 โดยที่สมมติฐานไร้นัยสำคัญ (Null hypothesis, H_0) จะกำหนดให้

ค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละกลุ่มมีค่าเท่ากัน และสมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis, H_1) กำหนดให้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ ที่แตกต่างกัน สามารถเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_k$$

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ เมื่อ $i \neq j$ (หรือมี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน)

5) P-Value คือค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณจากตาราง F-distribution ดังรูปที่ ก2 โดยอาศัย Numerator DF (DF_{model}) Denominator DF (DF_{error}) และค่า F-Value (F_{model})

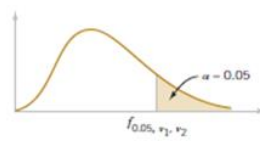


TABLE • VI Percentage Points f_{α, v_1, v_2} of the F Distribution (Continued)

f_{α, v_1, v_2}

v_2	Degrees of freedom for the numerator (v_1)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

รูปที่ ก2 F-distribution ที่ $\alpha = 0.05$ [42]

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 T-distribution สำหรับหา Standardized effect ในการวิเคราะห์ผลของ Pareto chart

ตารางที่ ข1 T-distribution [42]

TABLE • V Percentage Points $t_{\alpha, v}$ of the t Distribution

α v	.40	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	.289	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	.267	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	.260	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	.258	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	.257	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	.256	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	.256	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

ภาคผนวก ค

การปรับเปลี่ยนภาวะผสมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของผ้าเบรก

ตารางที่ ค1 ผลของการปรับเปลี่ยนภาวะการผสม 3 ระดับตามการออกแบบบ็อกซ์-เบร็ทเคน

Conditions		1	2	3	4	5	6	7	8
Speed (rpm)		3000	6000	3000	6000	3000	6000	3000	6000
Time (min)		4	4	8	8	6	6	6	6
Volume (%vol)		50	50	50	50	35	35	65	65
Bulk density (g/cm ³)	Avg	0.639	0.630	0.633	0.627	0.619	0.612	0.610	0.618
	S.D.	0.008	0.003	0.004	0.007	0.007	0.004	0.010	0.007
	C.V.	1.22	0.50	0.64	1.14	1.13	0.64	1.68	1.06
Cold Thickness (mm)	Avg	15.85	16.04	16.19	16.01	16.05	16.05	16.14	15.99
	S.D.	0.038	0.026	0.132	0.028	0.036	0.035	0.013	0.068
	C.V.	0.24	0.16	0.82	0.17	0.23	0.22	0.08	0.43
Hot Thickness (mm)	Avg	16.41	16.42	16.47	16.46	16.43	16.43	16.49	16.43
	S.D.	0.03	0.04	0.06	0.03	0.06	0.03	0.04	0.04
	C.V.	0.20	0.24	0.36	0.18	0.39	0.17	0.26	0.27
Hardness (HRS)	Avg	68	66	66	66	68	67	68	68
	S.D.	1	1	1	1	3	3	1	0
	C.V.	1.14	1.98	1.15	1.58	5.00	4.41	1.86	0.14
Specific gravity	Avg	2.75	2.75	2.75	2.75	2.76	2.76	2.74	2.76
	S.D.	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
	C.V.	0.36	0.35	0.35	0.58	0.32	0.10	0.17	0.14
Porosity (%)	Avg	15.86	15.76	15.98	16.02	15.50	15.66	16.13	15.72
	S.D.	0.30	0.29	0.30	0.48	0.27	0.08	0.14	0.12
	C.V.	1.90	1.85	1.86	3.02	1.74	0.52	0.90	0.77
Young's modulus (GPa)	Avg	1.27	1.23	1.21	1.24	1.26	1.25	1.23	1.24
	S.D.	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.03	0.03
	C.V.	2.47	4.02	3.99	3.41	4.03	4.62	2.18	2.43
Compressibility (%)	Avg	0.66	0.85	0.74	0.69	0.71	0.69	0.72	0.68
	S.D.	0.02	0.08	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03
	C.V.	3.21	9.18	5.32	6.26	6.61	5.91	4.21	4.38

โดย C.V. (Coefficient of Variation) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลชุดนั้น เพื่อแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การแปรผันของข้อมูล

ตารางที่ ค1 ผลของการปรับเปลี่ยนภาวะการผสม 3 ระดับตามการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [ต่อ]

Conditions		9	10	11	12	13	14	15
Speed (rpm)		4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
Time (min)		4	8	4	8	6	6	6
Volume (%vol)		35	35	65	65	50	50	50
Bulk density (g/cm ³)	Avg	0.640	0.622	0.632	0.618	0.621	0.630	0.625
	S.D.	0.004	0.004	0.009	0.005	0.005	0.008	0.003
	C.V.	0.59	0.69	1.40	0.78	0.74	1.20	0.44
Cold Thickness (mm)	Avg	15.98	16.07	16.00	16.08	16.11	16.05	16.02
	S.D.	0.052	0.061	0.018	0.026	0.067	0.079	0.046
	C.V.	0.33	0.38	0.12	0.16	0.41	0.50	0.29
Hot Thickness (mm)	Avg	16.45	16.45	16.40	16.40	16.42	16.38	16.38
	S.D.	0.03	0.05	0.04	0.03	0.07	0.09	0.04
	C.V.	0.18	0.32	0.26	0.21	0.43	0.54	0.24
Hardness (HRS)	Avg	66	69	67	67	69	66	66
	S.D.	4	3	1	1	2	2	1
	C.V.	6.31	4.72	1.72	1.30	2.48	2.71	1.18
Specific gravity	Avg	2.75	2.75	2.76	2.76	2.77	2.76	2.77
	S.D.	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C.V.	0.02	0.23	0.08	0.13	0.06	0.12	0.14
Porosity (%)	Avg	15.86	16.01	15.66	15.67	15.44	15.47	15.20
	S.D.	0.02	0.20	0.07	0.11	0.05	0.10	0.12
	C.V.	0.13	1.23	0.43	0.69	0.32	0.65	0.79
Young's modulus (GPa)	Avg	1.20	1.22	1.24	1.26	1.22	1.23	1.24
	S.D.	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03
	C.V.	2.96	4.02	3.49	2.77	1.08	2.54	2.09
Compressibility (%)	Avg	0.71	0.71	0.69	0.68	0.70	0.74	0.73
	S.D.	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.04
	C.V.	4.84	2.96	3.72	5.99	2.26	5.52	6.10

ตารางที่ ค2 ผลของการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมที่ 4 ระดับ

Conditions		1	2	3	4	5	6
Speed (rpm)		3000	3000	3000	3000	4500	4500
Time (min)		2	4	6	8	2	4
Volume (%vol)		50	50	50	50	50	50
Bulk density (g/cm ³)	Avg	0.662	0.639	0.634	0.633	0.644	0.625
	S.D.	0.009	0.008	0.003	0.004	0.007	0.004
	C.V.	1.33	1.22	0.50	0.64	1.13	0.66
Hot Thickness (mm)	Avg	16.48	16.41	16.53	16.47	16.52	16.57
	S.D.	0.07	0.03	0.01	0.06	0.02	0.07
	C.V.	0.42	0.20	0.08	0.36	0.15	0.40
Hardness (HRS)	Avg	71	68	67	64	67	67
	S.D.	2	1	3	1	2	4
	C.V.	3.26	1.14	4.23	1.83	2.95	6.33
Specific gravity	Avg	2.73	2.75	2.73	2.75	2.74	2.73
	S.D.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	C.V.	0.26	0.36	0.28	0.35	0.43	0.55
Porosity (%)	Avg	16.40	15.86	16.56	15.98	16.29	16.62
	S.D.	0.22	0.30	0.23	0.30	0.36	0.46
	C.V.	1.31	1.90	1.41	1.86	2.23	2.75
Young's modulus (GPa)	Avg	1.20	1.27	1.12	1.21	1.12	1.10
	S.D.	0.04	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03
	C.V.	3.54	2.47	1.47	3.99	2.81	3.03
Compressibility (%)	Avg	0.63	0.66	0.73	0.74	0.71	0.72
	S.D.	0.06	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03
	C.V.	9.48	3.21	4.48	5.32	4.86	4.79

ตารางที่ ค2 ผลของการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมที่ 4 ระดับ [ต่อ]

Conditions		7	8	9	10	11	12
Speed (rpm)		4500	4500	6000	6000	6000	6000
Time (min)		6	8	2	4	6	8
Volume (%vol)		50	50	50	50	50	50
Bulk density (g/cm ³)	Avg	0.619	0.606	0.633	0.630	0.615	0.627
	S.D.	0.004	0.006	0.004	0.003	0.005	0.007
	C.V.	0.70	1.04	0.71	0.50	0.76	1.14
Hot Thickness (mm)	Avg	16.55	16.66	16.57	16.42	16.64	16.46
	S.D.	0.08	0.06	0.04	0.04	0.08	0.03
	C.V.	0.51	0.35	0.27	0.24	0.47	0.18
Hardness (HRS)	Avg	68	67	69	66	68	66
	S.D.	3	4	3	1	3	1
	C.V.	4.67	6.64	4.15	1.98	5.08	1.58
Specific gravity	Avg	2.73	2.72	2.72	2.75	2.71	2.75
	S.D.	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
	C.V.	0.34	0.45	0.60	0.35	0.47	0.58
Porosity (%)	Avg	16.51	16.75	16.78	15.76	17.16	16.02
	S.D.	0.28	0.38	0.50	0.29	0.39	0.48
	C.V.	1.72	2.25	2.98	1.85	2.27	3.02
Young's modulus (GPa)	Avg	1.11	1.09	1.14	1.23	1.11	1.24
	S.D.	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04
	C.V.	3.50	4.34	3.87	4.02	2.95	3.41
Compressibility (%)	Avg	0.73	0.66	0.78	0.85	0.80	0.69
	S.D.	0.03	0.06	0.04	0.08	0.06	0.04
	C.V.	4.17	8.86	5.29	9.18	7.03	6.26

ภาคผนวก ง

การปรับเปลี่ยนภาวะผสมต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรก

ตารางที่ ง1 ผลของการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมที่ 4 ระดับต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

	Temp (C)	100	150	200	250	300	300	250	200	150	100
	rpm, min, vol%										
Friction Coefficient	3000, 2, 50	0.339	0.394	0.424	0.464	0.467	0.473	0.465	0.455	0.399	0.366
	3000, 4, 50	0.273	0.331	0.357	0.404	0.415	0.457	0.448	0.430	0.439	0.367
	3000, 6, 50	0.336	0.356	0.361	0.404	0.434	0.462	0.470	0.453	0.404	0.355
	3000, 8, 50	0.323	0.359	0.415	0.413	0.436	0.466	0.456	0.438	0.426	0.384
	4500, 2, 50	0.298	0.346	0.37	0.408	0.45	0.471	0.466	0.444	0.399	0.331
	4500, 4, 50	0.348	0.372	0.401	0.441	0.443	0.449	0.447	0.437	0.394	0.371
	4500, 6, 50	0.335	0.369	0.398	0.417	0.442	0.482	0.46	0.439	0.392	0.353
	4500, 8, 50	0.323	0.348	0.368	0.407	0.433	0.452	0.467	0.443	0.376	0.311
	6000, 2, 50	0.301	0.334	0.349	0.404	0.449	0.464	0.458	0.448	0.408	0.356
	6000, 4, 50	0.341	0.390	0.401	0.415	0.424	0.468	0.458	0.449	0.430	0.369
	6000, 6, 50	0.316	0.343	0.423	0.437	0.462	0.461	0.475	0.456	0.403	0.369
	6000, 8, 50	0.341	0.392	0.398	0.414	0.424	0.477	0.442	0.466	0.435	0.390

ตารางที่ ง2 ผลของการปรับเปลี่ยนเวลาในการผสมที่ 4 ระดับต่ออัตราการสึก

	Temp (C)	100	150	200	250	300	Final
	rpm, min, vol%						
Wear rate by mass ($10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	3000, 2, 50	0.065	0.054	0.050	0.121	0.182	0.471
	3000, 4, 50	0.057	0.040	0.035	0.040	0.208	0.698
	3000, 6, 50	0.042	0.035	0.037	0.049	0.225	0.618
	3000, 8, 50	0.034	0.061	0.043	0.041	0.210	0.620
	4500, 2, 50	0.032	0.070	0.066	0.040	0.181	0.613
	4500, 4, 50	0.049	0.031	0.034	0.043	0.172	0.518
	4500, 6, 50	0.041	0.082	0.071	0.181	0.260	0.776
	4500, 8, 50	0.034	0.051	0.049	0.043	0.245	0.715
	6000, 2, 50	0.045	0.043	0.039	0.047	0.270	0.838
	6000, 4, 50	0.041	0.040	0.035	0.049	0.304	0.766
	6000, 6, 50	0.054	0.060	0.041	0.043	0.200	0.696
	6000, 8, 50	0.031	0.052	0.048	0.043	0.257	0.649

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กษิติเดช รูปิยะเวช
วัน เดือน ปี เกิด	1 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	17 ม.5 ต.สนามจันทร์ อ.บ้านโพธิ์ จ.ฉะเชิงเทรา 24140
ผลงานตีพิมพ์	<p>K. Rupiawet, K. Kaewlob, P. Sujaridworakun and W. Buggakupta "Optimization of Mixing Conditions on Physical and Tribological Properties of Brake Pads", in session Industrial Chemistry and Innovation: Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, Key Engineering Materials, February 7th, at BITEC, Bangna, Bangkok, Thailand (In press).</p> <p>K. Rupiawet, K. Kaewlob, P. Sujaridworakun and W. Buggakupta "Effect of Time mixing on Physical and Mechanical Properties of Brake pads" , in session Process and System Engineering: The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology” (PPC & PETROMAT Symposium 2019), May 30th, 2019, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.</p>