

ผลของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เป็นสารตัวเติมต่อสมบัติของผ้าเบรก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Recycling Dust as Filler on Properties of Brake Pad



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	ผลของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เป็นสารตัวเติมต่อสมบัติของผ้า เบรค
โดย	น.ส.กนกวรรณ ชนะดีสกร
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ 리어้อยเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิฎฐิระนันท์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ 리어้อยเจริญ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

กนกวรรณ ชนะตัสกร : ผลของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เป็นสารตัวเติมต่อสมบัติของผ้าเบรก. ( Effects of Recycling Dust as Filler on Properties of Brake Pad) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการนำเศษฝุ่นกลับมาใช้เป็นสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และประสิทธิภาพของผ้าเบรก ผลการวิเคราะห์ลักษณะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ พบว่าเศษฝุ่นมีรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอน โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 71 ไมครอน ชนิดและปริมาณธาตุที่พบในเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดใยเหล็กดำ (LSD) เศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดทองแดงดำ (LCD) และเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดไร้ทองแดง (NCD) มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นปริมาณโลหะ (ทองแดงและใยเหล็ก) พบว่าปริมาณโลหะที่พบในเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดใยเหล็กดำมีค่าสูงสุดที่ 5.15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณโลหะที่สูงกว่าเศษฝุ่นชนิดอื่นทำให้ค่าความหนาแน่นหลังเคาะของเศษฝุ่นชนิด LSD มีค่าสูงสุด จากนั้นจึงวิเคราะห์ห้อธิพผลของชนิดเศษฝุ่นต่อสมบัติของผ้าเบรก ใช้เศษฝุ่นชนิด LSD LCD NCD และเศษฝุ่นผสม ใส่เข้าไปแทนที่วัตถุดิบอื่นยกเว้นฟีนอลิกเรซิน ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่ใส่เศษฝุ่น ผลงานวิจัยพบว่า ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นทุกชนิดให้สมบัติใกล้เคียงกันกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น โดยเศษฝุ่นจะทำให้เกิดความถ่วงจำเพาะ ความเป็นรูพรุน ความแข็งและความยืดหยุ่นของผ้าเบรกเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำให้ผ้าเบรกมีระดับความเสียดทานสูงขึ้น ส่งผลให้เบรกได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการจัดเก็บและสร้างความยืดหยุ่นในกระบวนการ การใช้เศษฝุ่นผสมจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม จากนั้นจึงวิเคราะห์ห้อธิพผลของปริมาณเศษฝุ่นที่ใส่ในผ้าเบรก (5% 10% 15% 20% และ 25% โดยน้ำหนัก) ต่อสมบัติของผ้าเบรก เปรียบเทียบกับผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่ใส่เศษฝุ่น ผลงานวิจัยพบว่า ค่าความแข็ง สภาพการอัดตัวและความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่การเพิ่มปริมาณเศษฝุ่นทำให้ผ้าเบรกมีความถ่วงจำเพาะลดลง และความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีค่าอัตราการสึกสูงสุดที่  $1.85 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{N.m}$  ในขณะที่ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นปริมาณ 5%-20% มีค่าอัตราการสึกใกล้เคียงกันในช่วง  $1.65 \times 10^{-7} - 1.66 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{N.m}$  โดยผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 20% มีเสถียรภาพของความเสียดทานสูงสุดและมีค่าใกล้เคียงกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 20% สามารถลดต้นทุนได้สูงสุด คิดเป็นมูลค่ากว่า 2,400,000 บาท ต่อปี โดยผลิตภัณฑ์ยังคงประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่ฝุ่น

สาขาวิชา      ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์      ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา    2561      ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6072157423 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Brake pad, Friction material, Recycle, dust

Kanokwan Chanadusakorn : Effects of Recycling Dust as Filler on Properties of Brake Pad. Advisor: Assoc. Prof. Prasert Reubroycharoen, Ph.D.

This research is focused on the effect of recycling dust (RD) on properties and performance of disc brake pad composite. Three different types of recycling dust, low steel dust (LSD), low copper dust (LCD) and non-copper dust (NCD), were characterized by sieve analysis, X-ray fluorescent (XRF) and scanning electron microscopy (SEM). The results found that the particle size distribution of recycling dust with board size range is smaller than 71 microns with irregular in shape. The presence of elements in different recycling dust is almost the same except metal composition including copper and steel fibers which LSD gives the highest amount around 5.15 wt.%. Then, the influence of the various type of recycling dust (LSD, LCD, NCD, and mixed-RD) was investigated by increasing 10 wt.% of recycling dust on commercial brake pad formulation. The results of increasing 10 wt.% of recycling dust show that the properties and performance of brake pad, specific gravity, porosity, hardness, modulus, a coefficient of friction, and specific wear rate, gradually change with slightly increased in coefficient of friction and wear rate compared with the commercial brake pad. Therefore, every type of recycling dust can be reused as new raw material but for the convenient way of recycling waste management, the use of mixed-RD is recommended. After that, the influence of the amount of recycling dust, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% by weight, was investigated. The results show that hardness, compressibility, and modulus are barely changed while the specific gravity decreases. The sample with 25% of recycling dust has the highest level of wear rate around  $1.85 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{N.m}$  while others have a range of  $1.65 \times 10^{-7}$  -  $1.66 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{N.m}$ . Moreover, the sample with 20% of recycling dust has the highest friction stability and can reduce the cost of raw material around 2.4 million baht per years.

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

Academic Year: 2018 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาชี้แนะ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณ ชีระนันท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ ผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมา โดยตลอด ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

กราบขอบพระคุณ ดร.บรรพต หอบั่นลือกิจ ที่ปรึกษาสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และการช่วยเหลือในทุกด้าน อันเป็นประโยชน์ในการ ดำเนินโครงการ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.) โครงการย่อยที่ 1/2560 โครงการ “ยกระดับความสามารถของอุตสาหกรรมขนาดกลางด้านงานวิจัย พัฒนาและอุตสาหกรรม (Research development and industrialization capability of medium enterprise)” ภายใต้บันทึก ข้อตกลงความร่วมมือ โครงการ “ยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม” ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ และสนับสนุนทุนการศึกษาจนจบหลักสูตร

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณา แก้วลอบ ผู้จัดการฝ่ายพัฒนาวัสดุผ้าเบรก คุณณัฐวิทย์ แซ่ฉิน ผู้ช่วย ผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ คุณเอกนัย กาญจนวราภรณ์และพนักงานบริษัท คอมแพ็ค อินเทอร์เน็ต (1994) จำกัดทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูล จนทำให้ วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท คอมแพ็ค อินเทอร์เน็ต (1994) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการผลิตผ้า เบรกและเครื่องมือทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในงานวิจัย จนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี คุณค่าและประโยชน์ อันพึงมีจากการศึกษาวิจัยชั้นนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน วิชาความรู้ และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และเป็นกำลังใจสำคัญ ที่ทำให้การศึกษาระดับนี้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

กนกวรรณ ชนะตัสกร

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่1 บทนำ.....	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ระบบเบรกรถยนต์ (Automotive brake system).....	8
2.2 ผ้าเบรก (Brake pads).....	8
2.2.1 ความเป็นมาของผ้าเบรก (History and development of brake pads).....	8
2.2.2 ลักษณะที่พึงประสงค์ของผ้าเบรก (Requirements of brake pad).....	9
2.2.3 ส่วนประกอบของผ้าเบรก (Components of brake pad).....	10
2.2.4 ประเภทของผ้าเบรก (Types of brake pad).....	11
2.2.5 วัสดุเสียดทาน (Friction materials).....	15
2.3 องค์ประกอบของวัสดุเสียดทาน (Friction material components).....	15

2.3.1 เส้นใยเสริมแรง (Reinforcements).....	15
i. เส้นใยอะรามิด (Aramid fibers).....	15
ii. ไยเหล็ก (Steel fibers).....	16
2.3.2 สารยึดติด (Binders) .....	17
i. ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin).....	17
2.3.3 ผงขัด (Abrasives).....	19
i. ความแข็งของผงขัด (Abrasive hardness).....	19
ii. กลไกการสึกแบบขัดขีด (Abrasive wear mechanism) .....	20
iii. แบบจำลองการสึกของผ้าเบรก (Abrasive wear models of brake pad).....	20
2.3.4 สารหล่อลื่น (Lubricants).....	22
2.3.5 สารตัวเติมและสารอเนกประสงค์ (Fillers and functionalizers) .....	22
i. สารตัวเติม (Fillers) .....	23
ii. สารอเนกประสงค์ (Functionalizers).....	23
2.4 เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust).....	24
2.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก (Manufacturing process).....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews).....	25
บทที่3 วิธีดำเนินการวิจัยและการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	28
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย .....	28
3.2 แผนผังการวิจัย .....	29
3.3 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	30
3.3.1 เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	30
3.3.2 วัสดุดิบและสารเคมีอื่น .....	31
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	32
3.5 อัตราส่วนการผสมผ้าเบรก .....	33



3.5.1 อัตราส่วนการผสมเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	33
3.5.2 อัตราส่วนการผสมเมื่อเปลี่ยนปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	34
3.6 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน .....	34
3.6.1 กระบวนการผสมวัตถุดิบ .....	34
3.6.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น .....	35
3.6.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน .....	35
3.6.4 กระบวนการบ่ม .....	36
3.6.5 กระบวนการขัดตกแต่ง .....	36
3.7 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน .....	36
3.7.1 การทดสอบความแข็ง .....	36
3.7.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและความเป็นรูพรุน .....	37
3.7.3 การทดสอบสภาพอัดตัวได้ .....	38
3.7.4 การทดสอบไดนามิกมอดุลัส .....	39
3.7.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายและอัตราการสึก .....	40
3.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust characterization).....	41
3.8.1 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	41
3.8.2 การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเขย่าผ่านตะแกรง ..	42
3.8.3 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ .....	43
3.8.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นหลังเคาะ .....	43
บทที่4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	44
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	44
4.1.1 ชนิดและปริมาณธาตุของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Compositions of recycling dust) .....	44
4.1.2 ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Density) .....	45

4.1.3 ปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Ash content).....	46
4.1.4 การกระจายของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Particle size distribution)...	48
4.1.5 รูปร่างของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Particle shape) .....	49
4.2 การวิเคราะห์ชนิดของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust type analysis).....	50
4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ .....	50
4.2.2 ความเป็นรูพรุน.....	51
4.2.3 ความแข็ง.....	52
4.2.4 ไดนามิกมอดุลัส.....	53
4.2.5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน .....	54
4.2.6 อัตราการสึก .....	57
4.2.7 สรุปรูปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังจากใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้.....	59
4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	60
4.3.1 ลักษณะผิวหน้าผ้าเบรก .....	60
4.3.2 ความหนาของชิ้นงานหลังกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน .....	63
4.3.3 ความถ่วงจำเพาะ .....	64
4.3.4 ความเป็นรูพรุน.....	65
4.3.5 ความแข็ง.....	67
4.3.6 ไดนามิกมอดุลัส.....	67
4.3.7 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน .....	68
4.3.8 อัตราการสึก .....	70
4.3.9 ลักษณะการสึกของผ้าเบรก .....	72
4.3.10 สรุปรูปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังจากใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	75
4.4 การประเมินราคาต้นทุนของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	76
บทที่5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	77

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.1.1 ลักษณะของเศษฝุ่น.....	77
5.1.2 ชนิดที่เหมาะสมของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้.....	77
5.1.3 ปริมาณของเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	78
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	97



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 มูลค่าสินค้าในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ .....	5
ตารางที่ 2.1 สมบัติของส่วนประกอบผ้าเบรก.....	10
ตารางที่ 2.2 ลักษณะเด่นและสัดส่วนองค์ประกอบของผ้าเบรกแต่ละประเภท .....	11
ตารางที่ 2.3 ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบประเภทสารหล่อลื่นและโลหะในผ้าเบรก .....	12
ตารางที่ 2.4 สูตรโดยทั่วไปของผ้าเบรกใยเหล็กดำ .....	13
ตารางที่ 2.5 สูตรโดยทั่วไปของผ้าเบรกทองแดงดำ .....	14
ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบและหน้าที่ขององค์ประกอบในวัสดุเสียดทาน .....	15
ตารางที่ 2.7 สมบัติทั่วไปของสารตัวเติม.....	23
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ในการทดลอง .....	30
ตารางที่ 3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุเสียดทาน .....	31
ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	32
ตารางที่ 3.4 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ .....	33
ตารางที่ 3.5 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม.....	33
ตารางที่ 3.6 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเศษฝุ่น.....	34
ตารางที่ 4.1 ชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ .....	45
ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของวัตถุประสงค์ที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก .....	46
ตารางที่ 4.3 ปริมาณเถ้าของวัตถุประสงค์ที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก.....	47
ตารางที่ 4.4 การกระจายของขนาดอนุภาคของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้.....	48
ตารางที่ 4.5 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์.....	59
ตารางที่ 4.6 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม .....	59
ตารางที่ 4.7 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ปริมาณต่าง ๆ .....	75

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบดิสก์เบรกรถยนต์.....	8
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของผ้าเบรก.....	10
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์พาราอะรามิดเพื่อใช้ผลิตเส้นใยอะรามิด.....	16
รูปที่ 2.4 (ก) การเกิดขนของเส้นใย (ข) อนุภาคเกาะบนเส้นใย.....	16
รูปที่ 2.5 เส้นใยเหล็ก .....	16
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาการเกิดฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน.....	17
รูปที่ 2.7 โครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาการเชื่อมโยงระหว่างโนโวแลคกับเฮกซะมีน.....	18
รูปที่ 2.8 ภาพจากกล้อง SEM (ก) Zircron sand (ข) Zircron flour.....	19
รูปที่ 2.9 กลไกการสึกแบบขูดขีด .....	20
รูปที่ 2.10 พื้นผิวปฐมภูมิและพื้นผิวทุติยภูมิ ที่เกิดจากชั้นบริเวณผิวผ้าเบรก.....	21
รูปที่ 2.11 กลไกการเกิด การเจริญและการสลายของผิวสัมผัสหน้าผ้าเบรก.....	21
รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกแบบชั้นของแกรไฟต์.....	22
รูปที่ 2.13 รูปร่างแกรไฟต์ (ก) แผ่นแกรไฟต์ (ข) อนุภาคแกรไฟต์แบบอสัณฐาน .....	22
รูปที่ 2.14 (ก) ลักษณะล้อยเจียรเพชร และ (ข) ลักษณะเศษฝุ่นที่น่ากลับมาใช้ .....	24
รูปที่ 2.15 กระบวนการผลิตผ้าเบรก .....	25
รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องผสมวัตถุดิบและลักษณะภายในเครื่อง และ (ข) วัตถุดิบหลังการผสม .....	34
รูปที่ 3.2 (ก) การอัดขึ้นรูปเย็น และ (ข) ชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปเย็น .....	35
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปเย็นเข้ากับแผ่นเหล็ก .....	35
รูปที่ 3.4 (ก) ตู้อบผ้าเบรก และ (ข) ชิ้นงานหลังการบ่ม.....	36
รูปที่ 3.5 (ก) เครื่องขัดตกแต่งผ้าเบรก และ (ข) ผ้าเบรกหลังขัดตกแต่ง.....	36
รูปที่ 3.6 (ก) เครื่องทดสอบความแข็ง และ (ข) ตำแหน่งการวัดค่าความแข็ง.....	37

รูปที่ 3.7 (ก) อุปกรณ์ทดสอบความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน (ข) ชิ้นงานขณะทดสอบ .....	38
รูปที่ 3.8 (ก) เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ และ (ข) ชิ้นงานบนแท่นทดสอบ .....	39
รูปที่ 3.9 (ก) เครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัส และ (ข) การวางชิ้นงานทดสอบ .....	40
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบความเร็วคงที่.....	41
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
รูปที่ 3.12 เครื่องเย้าตะแกรงแบบสั่น.....	42
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้แต่ละชนิด .....	46
รูปที่ 4.2 ปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้แต่ละชนิด.....	47
รูปที่ 4.3 การกระจายของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้.....	48
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	49
รูปที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	51
รูปที่ 4.6 ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด.....	52
รูปที่ 4.7 ความแข็งของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	53
รูปที่ 4.8 ไดนามิกมอดุลัสของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	54
รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อุณหภูมิขาขึ้นของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	56
รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อุณหภูมิต่ำของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	56
รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยและเสถียรภาพความเสียหายของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด .....	57
รูปที่ 4.12 อัตราการสึกโดยมวลรวมของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด.....	58
รูปที่ 4.14 (ก) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) ของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP).....	61
รูปที่ 4.15 (ก) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) ของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25%.....	62
รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นบอลล์และความหนาของผ้าเบรกที่ใส่ปริมาณเศษฝุ่นต่างกัน .....	63
รูปที่ 4.17 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน.....	64
รูปที่ 4.18 ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน.....	65

รูปที่ 4.19 ภาพอิเล็กทรอนิกส์ (SEI) ของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP) .....	66
รูปที่ 4.20 ภาพอิเล็กทรอนิกส์ (SEI) ของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% (25RD).....	66
รูปที่ 4.21 ความแข็งของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.22 ไดนามิกของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน.....	68
รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิขาขึ้นของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นปริมาณต่างกัน ....	69
รูปที่ 4.24 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิลงของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นปริมาณต่างกัน .....	70
รูปที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยความเสียดทานและเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรก .....	70
รูปที่ 4.26 อัตราการสึกโดยมวลรวมของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน .....	71
รูปที่ 4.27 อัตราการสึกโดยมวลของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน.....	72
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายพื้นผิวผ้าเบรกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน .....	73
รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของอนุภาคบนผิวหน้าผ้าเบรก.....	74
รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนของผ้าเบรกใส่เศษฝุ่นปริมาณต่าง ๆ.....	76

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศไทยเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเศรษฐกิจจากประเทศเกษตรกรรมไปสู่ประเทศอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องดังตาราง 1.1 ส่งผลให้เกิดการสะสมของปริมาณของเสียอุตสาหกรรมหรือกากอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเติบโตของเศรษฐกิจ กากอุตสาหกรรมเป็นมลพิษชนิดหนึ่งหากขาดการวางแผนและการกำหนดมาตรการการจัดการกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอนามัยของประชาชนได้ในที่สุด

เนื่องจากความหลากหลายของอุตสาหกรรม การจัดการและการกำจัดกากอุตสาหกรรมทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตราย จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนตามลักษณะเฉพาะตัวของอุตสาหกรรมนั้น ๆ ดังนั้นแต่ละโรงงานจึงมีการสร้างกลยุทธ์ในการจัดการของเสียที่แตกต่างกัน หนึ่งในนั้นเป็นวิธีการพัฒนาเทคโนโลยีควบคู่ไปกับการจัดการกากอุตสาหกรรมโดยการนำกากของเสียกลับมาใช้ใหม่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต

ตารางที่ 1.1 มูลค่าสินค้าในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ (หน่วยล้านดอลลาร์สหรัฐ)

อุตสาหกรรมยานยนต์	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561
รถยนต์นั่ง	6,263	5,677	6,620	6,519	9,547	11,719	10,890	11,185
รถกระบะและรถบรรทุก	5,361	10,520	10,590	10,346	8,275	6,548	7,320	7,929
รถจักรยานยนต์	821	1,117	1,399	1,153	1,184	1,204	1,489	1,473
ยานพาหนะอื่น ๆ	351	415	457	509	530	439	476	825
ชิ้นส่วนยานยนต์	10,460	11,622	12,513	13,092	12,868	13,542	15,383	16,974
รวม	23,254	29,350	31,578	31,618	32,403	33,452	35,558	38,386

ที่มา: กรมศุลกากร (ประมวลผลโดยธนาคารแห่งประเทศไทย)

อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่สำคัญและมีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการใช้รถยนต์ในประเทศ โดยบริษัท คอมแพ็ค อินเตอร์เนชั่นแนล (1994) จำกัด เป็นบริษัทผลิตผ้าเบรกรายใหญ่ของประเทศไทย มีการผลิตแผ่นดิสก์เบรกจำนวนกว่า 6,000,000 ชิ้นต่อปี โดยมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีจากในประเทศและนำเข้าปีละประมาณ 400,000 ตัน และมีปริมาณกากอุตสาหกรรมจากกระบวนการผลิตสูงถึงร้อยละ 3 โดยส่วนหนึ่งเป็นเศษฝุ่นที่เกิดจาก



กระบวนการตัดตกแต่ง ซึ่งเป็นกระบวนการปรับแต่งความหนาของแผ่นดิสก์เบรกให้เป็นไปตามมาตรฐานการผลิตและช่วยปรับแต่งบริเวณผิวหน้าของผ้าเบรกให้มีความราบเรียบที่สม่ำเสมอ โดยในแต่ละปีมีเศษฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการถึงปีละ 130 ตัน โดยของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปกำจัดทิ้งผ่านการเผาทำลายและการฝังกลบ ซึ่งไม่ก่อมูลค่าเพิ่มแต่อย่างใด

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้ร่วมมือกับผู้ประกอบการเพื่อจัดการของเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพอย่างยั่งยืน โดยการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust) เป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งในกระบวนการผลิตผ้าเบรก นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เพื่อสร้างมาตรฐานการตรวจรับก่อนกระบวนการนำกลับมาใช้ นอกจากนี้จะช่วยเรื่องการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตให้ได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้
- 1.2.2 ศึกษาและกำหนดคุณภาพของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เป็นสารตัวเติมผ้าเบรก
- 1.2.3 ศึกษาและวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมเศษฝุ่นเป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์และจำแนกประเภทของเศษฝุ่น เพื่อหาองค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้จากกระบวนการตัดตกแต่งหน้าผ้าเบรก โดยวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ด้วยเทคนิคการเขย่าผ่านตะแกรง วิเคราะห์รูปร่างและองค์ประกอบของธาตุที่พบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ร่วมกับเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength dispersion x-ray fluorescence หรือ WDXRF) วิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density) และความหนาแน่นหลังเคาะ (Tapped density) ของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ รวมถึงวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นแต่ละชนิด
- 1.3.2 วิเคราะห์หาชนิดของเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ ต่อสมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรก โดยผสมเศษฝุ่นชนิดต่าง ๆ กับวัตถุดิบอื่นในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความพรุน (Porosity) ไดนามิกโมดูลัส (Dynamic modulus) รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพผ้าเบรก ทั้งค่าความเสียดทาน (Coefficient of friction) และอัตราการสึก (Wear rate) โดยการนำกลับมาใช้ นี้จะต้องไม่ลดทอนประสิทธิภาพเดิมของผ้าเบรก

1.3.3 วิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตแผ่นดิสก์เบรก โดยใช้เศษฝุ่นตามลักษณะที่กำหนดมาข้างต้นผสมเศษฝุ่นเข้ากับวัตถุดิบอื่น ๆ ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และประสิทธิภาพของผ้าเบรก การนำเศษฝุ่นกลับมาใช้นี้จะต้องไม่ลดทอนประสิทธิภาพเดิมของผ้าเบรก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ลดการนำเข้าวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตผ้าเบรกและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากอุตสาหกรรมจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ รวมทั้งกำหนดลักษณะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เพื่อสร้างมาตรฐานและคุณภาพในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

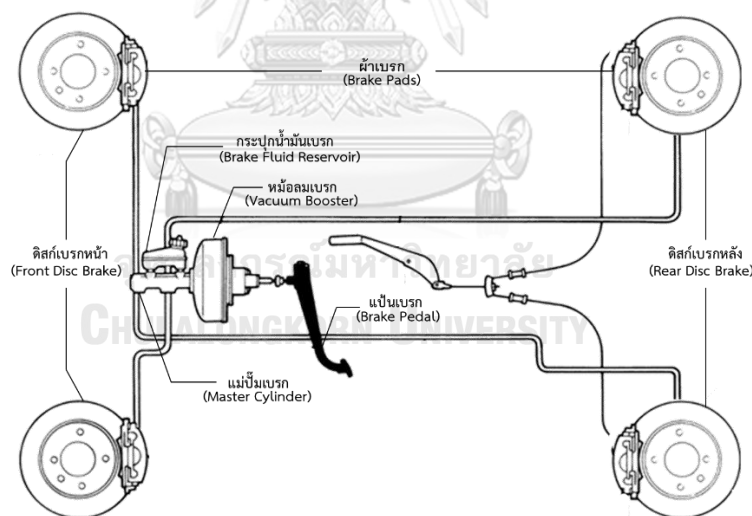


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบเบรกรถยนต์ (Automotive brake system)

ระบบเบรกทำหน้าที่ชะลอหรือหยุดความเร็วของยานพาหนะ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานความร้อน [1] โดยพลังงานความร้อนนี้เกิดจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างจานเบรก (Rotor) กับผ้าเบรก จากนั้นจะถูกถ่ายโอนผ่านการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเบรกซึ่งอาศัยการทำงานประสานกันของอุปกรณ์ 3 ส่วน คือ จานเบรก ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) และผ้าเบรก โดยใช้หลักการการถ่ายเทแรงเหยียบแป้นเบรก (Brake pedal) ไปที่ตัวอุปกรณ์หยุดล้อผ่านระบบไฮดรอลิก โดยแรงเหยียบจานแป้นเบรกจะถูกเพิ่มความดันผ่านหม้อลมเบรก จากนั้นจึงส่งไปที่แม่ปั๊มน้ำมันเบรกเพื่อดันน้ำมันเบรกไปตามท่อน้ำมันเบรกจนถึงตัวเบรก จากนั้นลูกปั๊มน้ำมันเบรก (Caliper) จะดันผ้าเบรกไปด้านการหมุนของจานเบรก เพื่อสร้างความเสียดทานในการชะลอหรือหยุดความเร็วของยานพาหนะ ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบดิสก์เบรกรถยนต์

#### 2.2 ผ้าเบรก (Brake pads)

##### 2.2.1 ความเป็นมาของผ้าเบรก (History and development of brake pads)

อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกสำหรับรถยนต์มักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมยานยนต์และข้อปฏิบัติที่เข้มงวดขึ้นทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงความต้องการที่แตกต่างกันของผู้บริโภคทั้งด้านราคาและคุณภาพ เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตและพัฒนาผ้า

เบรก อุตสาหกรรมผ้าเบรกยุคแรกเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งพาการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศโดยเฉพาะแร่ใยหิน (Asbestos) ซึ่งเป็นวัตถุดิบประเภทเส้นใยธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตผ้าเบรก เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพง แต่พบว่าแร่ใยหินเป็นสารอันตรายก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ [2] จึงมีการคิดค้นและงัดใช้ในหลายประเทศเป็นเวลาต่อมา โดยสนับสนุนให้ใช้วัสดุทดแทนแร่ใยหิน เช่น เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) หลังจากนั้นจึงมีการใช้เส้นใยเหล็กหรือผงเหล็กเป็นวัตถุดิบหลักแทนแร่ใยหิน บางชนิดผสมแกรไฟต์ (Graphite) หรือคาร์บอน (Carbon) เพื่อเพิ่มความฝืดและลดปัญหาเรื่องเสียง เนื่องจากผ้าเบรกที่ประกอบด้วยใยเหล็กมักเกิดปัญหาเรื่องเสียงและเขม่าดำ ดังนั้นความนิยมในผ้าเบรกชนิดนี้จึงลดลงในเวลาต่อมา โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นที่มีปริมาณการใช้ต่ำกว่าร้อยละ 10 แต่ผ้าเบรกชนิดนี้ยังคงเป็นที่นิยมในทวีปยุโรป [3] ปัจจุบันจึงมีการใช้เส้นใยสังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์อื่น ๆ ทดแทน เช่น เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผ้าเบรกประเภทไร้ใยหิน (NAO) นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมของโลหะอ่อน อาทิเช่น ทองแดง หรือทองเหลืองเพื่อช่วยสร้างความฝืด ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ทั่วโลก โดยรถยนต์ใหม่กว่าร้อยละ 90 ใช้ผ้าเบรกชนิดนี้ แต่ในปัจจุบันพบว่าการใช้ทองแดงก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกาจึงเริ่มเข้มงวดเรื่องการใช้ทองแดงเป็นส่วนประกอบในการผลิตผ้าเบรก โดยมีข้อกำหนดในปี 2010 เกี่ยวกับการลดปริมาณการใช้ทองแดงให้ใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักภายในปี 2021 และลดเหลือต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักภายในปี 2025 [4]

### 2.2.2 ลักษณะที่พึงประสงค์ของผ้าเบรก (Requirements of brake pad)

การพิจารณาความต้องการของผู้บริโภคต่อสมบัติของผ้าเบรกนั้น ผู้บริโภคมักคำนึงถึงความปลอดภัย ความรู้สึกในการเหยียบเบรก (Pedal feel) สมรรถภาพด้านเสียงรบกวน การสั่นสะเทือนและความกระด้าง (Noise-vibration-harshness หรือ NVH) รวมถึงการดูแลรักษาหลังการใช้งาน โดยผ้าเบรกที่ดีมักมีสมบัติดังนี้ [5-8]

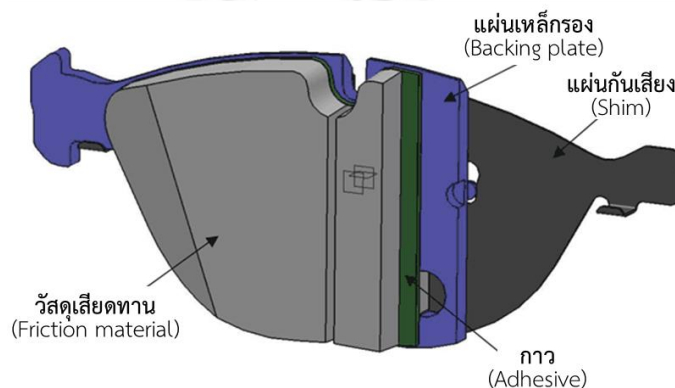
- มีเสถียรภาพของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเบรก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงจะช่วยลดระยะการเบรก ช่วยให้ยานพาหนะหยุด หรือชะลอตัวได้เร็วขึ้น
- ทนต่อความร้อน ผ้าเบรกควรมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และระบายความร้อนต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี
- มีความแข็ง (Hardness) สูง ทนต่อแรงอัด และแรงเฉือนที่ช่วงอุณหภูมิกว้าง
- ไม่เกิดการเบรกจมหรือเบรกเฟด (Brake fade) เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง (เบรกเฟด เป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงอย่างฉับพลัน หรือเป็นการเสียความสามารถขณะเบรก

เมื่ออุณหภูมิในการใช้งานสูงขึ้น โดยสาเหตุมีหลายอย่าง เช่น การเกิดแก๊สแทรกระหว่างผ้าเบรกกับจาน หรือเกิดจากวัสดุผ้าเบรกที่ไม่ทนความร้อน เป็นต้น)

- ทนทานต่อการสึก (High wear resistance) โดยผ้าเบรกที่ดีต้องมีอัตราการสึกของผ้าเบรกด้า และอัตราการสึกของจานต่ำ ไม่สร้างรอยให้แก่จานเบรก
- ไม่เกิดเสียงขณะเบรก

### 2.2.3 ส่วนประกอบของผ้าเบรก (Components of brake pad)

โดยทั่วไปแล้วแผ่นดิสก์เบรกมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละองค์ประกอบทำหน้าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของผ้าเบรก [4]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของส่วนประกอบผ้าเบรก [4]

ส่วนประกอบ	หน้าที่
วัสดุเสียดทาน	เพิ่มความเสียดทานในการหยุดหรือชะลอการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ บริเวณผิวสัมผัสโดยตรง ระหว่างผ้าเบรกและจานเบรก
กาว	เสริมความแข็งแรงในแนวเฉือน (Shear strength) ระหว่างวัสดุเสียดทานและแผ่นเหล็กทรง
แผ่นเหล็กทรง	ช่วยกระจายแรงให้สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งเป็นแรงที่เกิดจากการกระทำของลูกสูบต่อวัสดุเสียดทาน และจากการกระทำของจานเบรกต่อวัสดุเสียดทาน
แผ่นกันเสียง	ป้องกันการส่งผ่านของการสั่นสะเทือนจากการเบรกสู่ระบบเบรก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดเสียงขณะการใช้งาน

## 2.2.4 ประเภทของผ้าเบรก (Types of brake pad)

ผ้าเบรกเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ยึดติดกันด้วยสารยึดติด (Binder) และองค์ประกอบหลักอื่น ๆ เช่น สารตัวเติม (Fillers) เส้นใย (Fibers) และสารปรับแต่งความเสียดทาน (Friction modifier; abrasive, lubricant) โดยจะมีอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งจะเน้นสมรรถนะด้านความเสียดทานและอัตราการสึก (Friction and wear performance) เป็นหลักสำคัญ [9] การแบ่งประเภทของผ้าเบรกกังไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่ชัด โดยมักจะแบ่งตามสัดส่วนของเนื้อโลหะและสารเสริมแรง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเด่นและสัดส่วนองค์ประกอบของผ้าเบรกแต่ละประเภท [4]

ประเภทของผ้าเบรก	สัดส่วนวัตถุดิบ	คุณลักษณะเด่น
<b>1. ผ้าเบรกไร้ใยหิน (Non-asbestos organic; NAO)</b> - ปริมาณทองแดง เหล็ก ทองแดงอัลลอยและเหล็กอัลลอย น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก - ประกอบไปด้วยกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ผงซัด สารหล่อลื่น ใยแร่ (Mineral fiber) และเส้นใยเสริมแรง		- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ในช่วงกลางถึงสูงประมาณ 0.33-0.40 - อัตราการสึกน้อยในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส - อัตราการสึกสูงและมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นเมื่อใช้งานบรรทุกหนัก (Heavy duty)
1.1 ผ้าเบรกไร้เหล็ก (Non-steel)	- ปริมาณใยเหล็กต่ำกว่าร้อยละ 5	
1.2 ผ้าเบรกไร้ทองแดง (Non-copper)	- ปริมาณทองแดงต่ำกว่าร้อยละ 5	- อัตราการเกิดเสียงต่ำ
<b>2. ผ้าเบรกโลหะต่ำ (Low-metallic)</b> - ปริมาณเหล็ก ทองแดงประมาณร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก - ประกอบไปด้วยใยเหล็ก ผงเหล็ก (Iron powder) ผงซัดและสารหล่อลื่นชนิดต่าง ๆ รวมถึงสารกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก		- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ในช่วงกลางถึงสูงประมาณ 0.35-0.38 - ความรู้สึกเหยียบเบรกอยู่ในเกณฑ์ดี - การเกิดเฟดต่ำเมื่อใช้งานที่ความเร็วสูง - อัตราการสึกผ้าเบรกและจานเบรกสูง
2.1 ผ้าเบรกใยเหล็กต่ำ (Low steel)	- ปริมาณใยเหล็กต่ำกว่าร้อยละ 20	- อายุการใช้งานต่ำ - การเกิดเสียงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
2.2 ผ้าเบรกทองแดงต่ำ (Low copper)	- ปริมาณโลหะต่ำกว่าร้อยละ 20	
<b>3. ผ้าเบรกกึ่งโลหะ (Semi-metallic)</b> - ปริมาณใยเหล็กมากกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก		- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ในสูงประมาณ 0.40 - สมบัติด้านเสียงรบกวน การสั่นและความกระด้างด้อยกว่าผ้าเบรก NAO

จากตารางข้างต้นผ้าเบรกสามารถจัดประเภทได้ดังนี้ ผ้าเบรกประเภทกึ่งโลหะประกอบด้วยโลหะประมาณร้อยละ 50-70 โดยมีสัดส่วนของใยเหล็กในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 30 ผ้าเบรกประเภทไร้ใยเหล็ก ซึ่งไม่มีใยเหล็กเป็นองค์ประกอบ แต่จะประกอบไปด้วยโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous metal) น้อยกว่าร้อยละ 20 ผ้าเบรกประเภทใยเหล็กต่ำ โดยมีปริมาณของใยเหล็กน้อยกว่าร้อยละ 20 และผ้าเบรกประเภททองแดงต่ำ ซึ่งมีปริมาณโลหะและใยเหล็กในสัดส่วนที่น้อยกว่าร้อยละ 20 [10]

ตารางที่ 2.3 ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบประเภทสารหล่อลื่นและโลหะในผ้าเบรกชนิดต่าง ๆ [10]

องค์ประกอบ	ผ้าเบรกกึ่งโลหะ	ผ้าเบรกใยเหล็กต่ำ	ผ้าเบรกทองแดงต่ำ	ผ้าเบรกไร้ใยหิน
<i>Lubricant</i>				
Fine graphite	4-10	2-8	4-10	4-9
Coarse graphite	5-10	0-7	4-8	2-5
<i>Sulfide</i>				
Sn/Sb sulfides	2-7	2-5	2-5	2-5
Cu sulfide	2-10	2-5	2-5	2-5
Another sulfide	2-5	0-4	0-4	0-4
<i>Ferrous metal</i>				
Steel fibers	20-35	10-18	5-10	0
Iron powder	2-7	2-5	1-2	0
<i>Nonferrous metal</i>				
Copper	2-10	6-15	0-6	10-16
Copper alloys	2-10	5-10	0-5	5-10
Zinc/Sn	0-4	0-4	0-2	0-4

ตารางที่ 2.4 สูตรโดยทั่วไปของผ้าเบรกใยเหล็กต่ำ [10]

วัตถุดิบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)
<b>Binder</b>	
Novolac with high flow (45-60 mm)	5
Novolac with short flow (10-20 mm)	2
<b>Fibers</b>	
Aramid fibers	2
Cellulose fibers	1.6
<b>Dampers and organic compounds</b>	
NBR	3
<b>Abrasives</b>	
Silicon carbide	0.4
Zircon silicate	10
<b>Lubricants</b>	
Fine graphite (<45 $\mu\text{m}$ )	2
Coarse graphite	10
<b>Sulfides</b>	
SnS	3
ZnS	9
<b>Nonferrous metals</b>	
Bronze powder	3
Brass chips	2
Copper powder	5
<b>Ferrous metals</b>	
Steel fiber	10
Sponge iron	2
<b>Fillers</b>	
Barite $\text{BaSO}_4$	15
Calcite $\text{CaCO}_3$	10
Fluorite $\text{CaF}_2$	5



ตารางที่ 2.5 สูตรโดยทั่วไปของผ้าเบรกทองแดงต่ำ [10]

วัตถุดิบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)
<b>Binder</b>	
Novolac with high flow (45-60 mm)	12
Novolac with short flow (10-20 mm)	3
<b>Fibers</b>	
Aramid fibers	2
Ceramic fibers	2
<b>Dampers and organic compounds</b>	
NBR	3
Black friction powder	2
<b>Abrasives</b>	
Zircon oxide ( $ZrO_2$ )	3
Silicon carbide (<15 $\mu m$ )	1
Magnesium oxide ( $MgO$ )	8
Potassium titanate (hexa-octatitanates)	10
<b>Lubricants</b>	
Fine graphite	2
Coarse graphite	8
<b>Sulfides</b>	
SnS, SnS <sub>2</sub> or WS	4
ZnS	5
<b>Nonferrous metals</b>	
Copper fiber	7
Brass chips	4
<b>Fillers</b>	
Fluorite CaF <sub>2</sub>	16
Petroleum coke	8

## 2.2.5 วัสดุเสียดทาน (Friction materials)

วัสดุเสียดทานหรือเนื้อผ้าเบรกเป็นวัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต (Composite material) ที่มีองค์ประกอบซับซ้อน มีลักษณะเป็นของผสมที่มีอนุภาคขนาดหลากหลายเกาะอยู่บนเส้นใยถูกยึดติดเป็นชั้นเดียวกันด้วยสารยึดติด ซึ่งองค์ประกอบของผ้าเบรกอาจมีตั้งแต่ 10-30 ชนิด [11] แต่ละองค์ประกอบทำหน้าที่เฉพาะ โดยบางชนิดอาจมีหน้าที่มากกว่าหนึ่งอย่าง ผ้าเบรกมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบและหน้าที่ขององค์ประกอบในวัสดุเสียดทาน [4]

องค์ประกอบ	หน้าที่
เส้นใยเสริมแรง (Reinforcements)	เสริมความแข็งแรง ลดอัตราการสึก
สารยึดติด (Binders)	ตัวประสานวัสดุติดในเนื้อผ้าเบรกเข้าด้วยกัน
ผงขัด (Abrasives)	เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และทำความสะอาดผิวสัมผัสระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกจากสนิมและเศษผ้าเบรกที่สึก (wear debris) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน
สารหล่อลื่น (Lubricants)	ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคงที่ และควบคุมการเกิดฟิล์มบริเวณผิวหน้าผ้าเบรก (friction film)
สารตัวเติมและสารอเนกประสงค์ (Fillers and functionalizers)	เพิ่มเนื้อวัสดุ เพิ่มหรือลดค่าการถ่ายโอนความร้อน ลดการเกิดเสียง และป้องกันการสึกกร่อน (corrosion protection)

## 2.3 องค์ประกอบของวัสดุเสียดทาน (Friction material components)

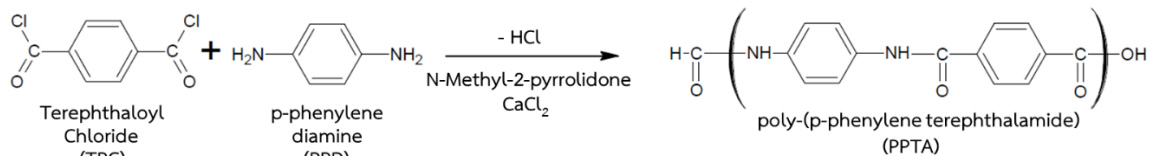
### 2.3.1 เส้นใยเสริมแรง (Reinforcements)

เส้นใยเป็นปัจจัยหนึ่งที่สร้างความแข็งแรงให้กับผ้าเบรก ทำให้การขึ้นรูปวัสดุเสียดทานง่ายขึ้น มีความคงตัวก่อนจะมีการอบแห้งที่จะมีการอัดด้วยความร้อน เส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยอินทรีย์ และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเช่น แร่ใยหิน เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) เส้นใยทองแดง (Copper fiber) เป็นต้น

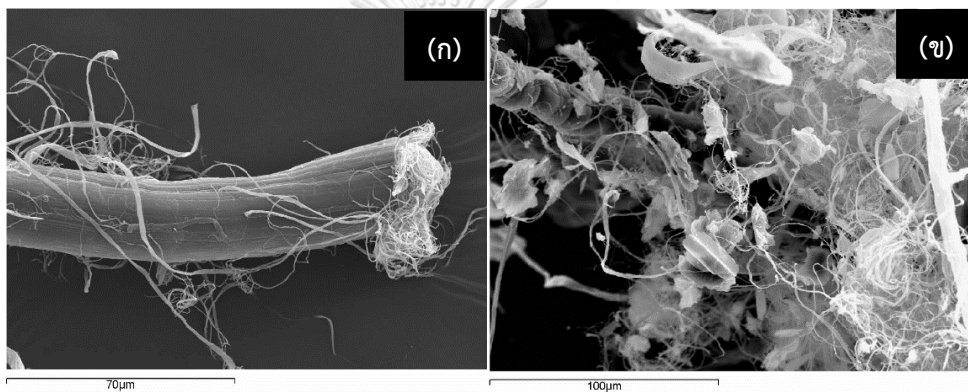
#### i. เส้นใยอะรามิด (Aramid fibers)

เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยอินทรีย์สังเคราะห์ เป็นพอลิเอไมด์ชนิดหนึ่ง มีวงแหวนเบนซีนอยู่ในสายโซ่โมเลกุลหลักพอลิเอไมด์ (Aromatic polyamide) ดังแสดงในรูป 2.3 ปัจจุบันแบ่งเส้นใยอะรามิดออกเป็น 2 ประเภท คือ เมตาอะรามิด (Meta-aramid) และเส้นใยพาราอะรามิด (Para-aramid) เส้นใยอะรามิดจะถูกนำมาใช้ในรูปแบบเนื้อเยื่อ (Pulp) เมื่อผ่านกระบวนการผสมจะเกิดขนของเส้นใยที่เรียกว่า การไฟบริลเล-

ชั้น (Fibrillation) ซึ่งเป็นเส้นใยบาง ๆ แยกแยกออกมาจากเส้นใยหลักดังรูป 2.4 เส้นใยเหล่านี้เป็นที่ยึดเกาะแก่อนุภาคต่าง ๆ ในผ้าเบรก เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยที่มีสมรรถนะสูง มีความโดดเด่นในเรื่องความแข็งแรง ความต้านทานต่อความร้อนและการสึก มีน้ำหนักน้อยกว่าเหล็กถึง 5 เท่า [12] โดยทั่วไปจะใส่ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก [10]



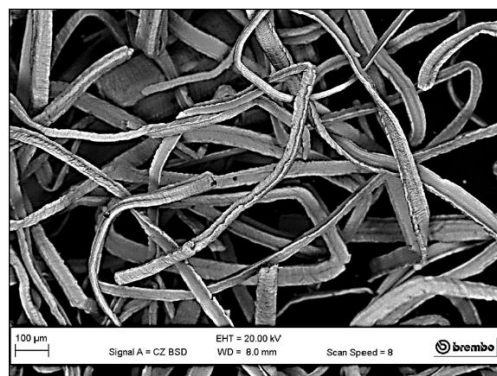
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์พาราอะรามิดเพื่อใช้ผลิตเส้นใยอะรามิด [4]



รูปที่ 2.4 (ก) การเกิดขนของเส้นใย (ข) อนุภาคเกาะบนเส้นใย [9]

## ii. ใยเหล็ก (Steel fibers)

ใยเหล็กมักจะถูกใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกรถยนต์ เพื่อให้ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง ลดการเกิดเฟด และลดอัตราการสึกของผ้าเบรก ใยเหล็กมีหลายเกรดและหลายรูปร่าง เช่น เส้นใย (Fibers) เส้นใยสั้น (Wools หรือ wires) แต่ที่นิยมกันจะเป็นลักษณะเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นใยเหล็ก [4]

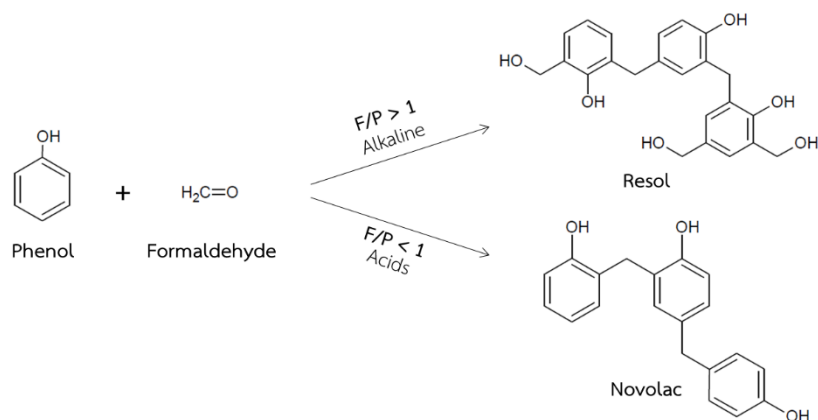
### 2.3.2 สารยึดติด (Binders)

สารยึดติดมีหน้าที่ประสานองค์ประกอบต่าง ๆ ในผ้าเบรกเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วจะใสในสัดส่วนประมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก สารยึดติดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกเป็นสารยึดติดสังเคราะห์กลุ่มฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เนื่องจากมีสมบัติด้านการต้านทานความร้อนที่ดี มีความแข็งแรงสูงและขึ้นรูปได้ง่าย ฟีนอลิกเรซินแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือเรซินชนิดบริสุทธิ์ (Pure resin) และเรซินชนิดดัดแปร (Modified resin) ซึ่งฟีนอลิกเรซินชนิดดัดแปรจะมีสมบัติเด่นที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเสถียรภาพ การสั่นและความกระด้างของผ้าเบรก (NVH)

#### i. ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

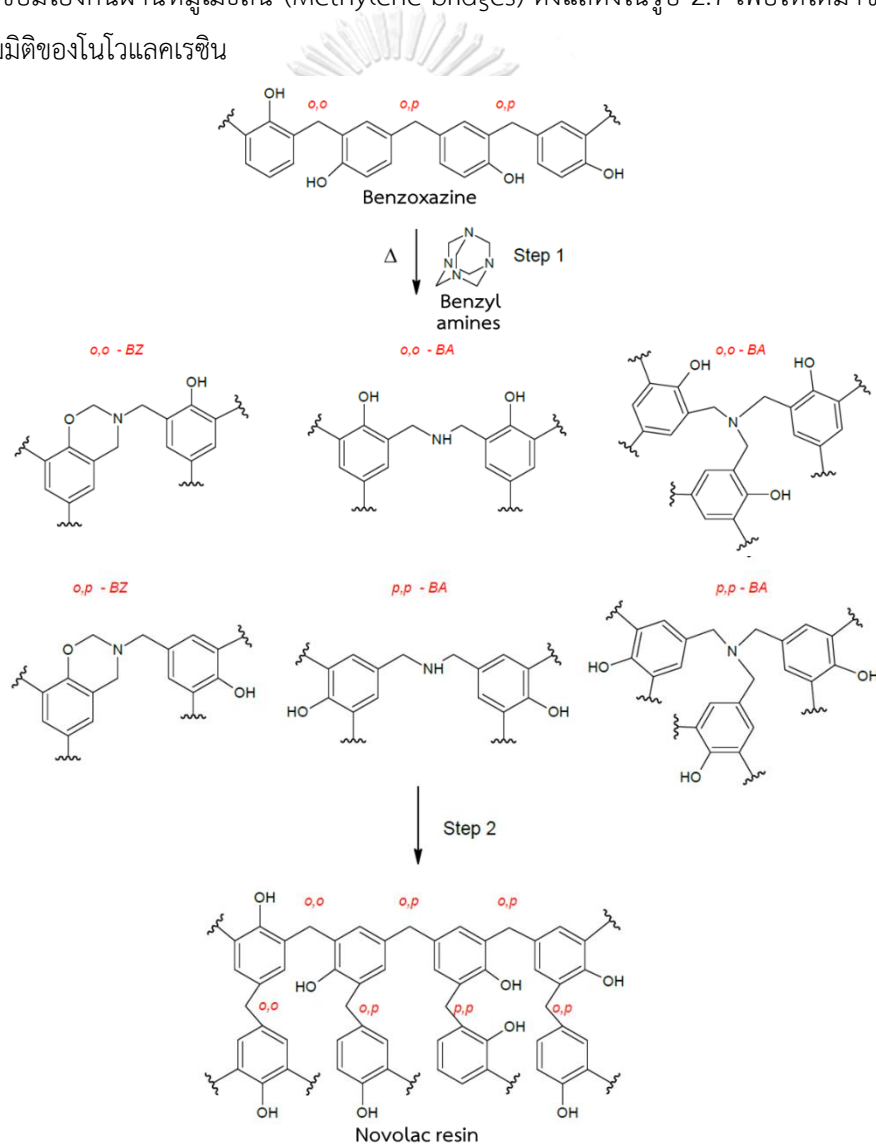
ฟีนอลิกเรซินได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล (Phenol) กับฟอรัลมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ในภาวะกรด [10] โมเลกุลของฟีนอลและฟอรัลมาลดีไฮด์เข้าจับตัวกันได้โมเลกุลที่เป็นสายยาวดั่งรูป 2.6 ฟีนอลิกเรซินที่ได้เรียกว่า ฟีนอลฟอรัลมาลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของสัดส่วนของปริมาณสารตั้งต้นทั้งสองชนิดที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตามกลไกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ถ้าใช้ฟอรัลมาลดีไฮด์ในปริมาณมากกว่าฟีนอลจะได้พรีพอลิเมอร์ประเภทเรโซล (Resol) หากใช้ฟีนอลมากกว่าฟอรัลมาลดีไฮด์จะได้พรีพอลิเมอร์ประเภทโนโวแลค (Novolac) พรีพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ จะต้องเติมสารเชื่อมโยง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ เพื่อสร้างความแข็งแรง ดังนั้นฟีนอลฟอรัลมาลดีไฮด์เรซิน จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นเรซินแบบสองขั้นตอน [3]

ฟีนอลฟอรัลมาลดีไฮด์เรซินเป็นโมเลกุลเส้น (Linear) ที่ไม่ยาวมากนัก สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง จะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละโมเลกุลของฟีนอลกับฟอรัลมาลดีไฮด์เรซิน กลายเป็นโครงสร้างร่างแหขนาดใหญ่ จึงมีความแข็งแรง มีสมบัติทางกลและทนอุณหภูมิได้สูง



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดฟีนอลฟอรัลมาลดีไฮด์เรซิน [4]

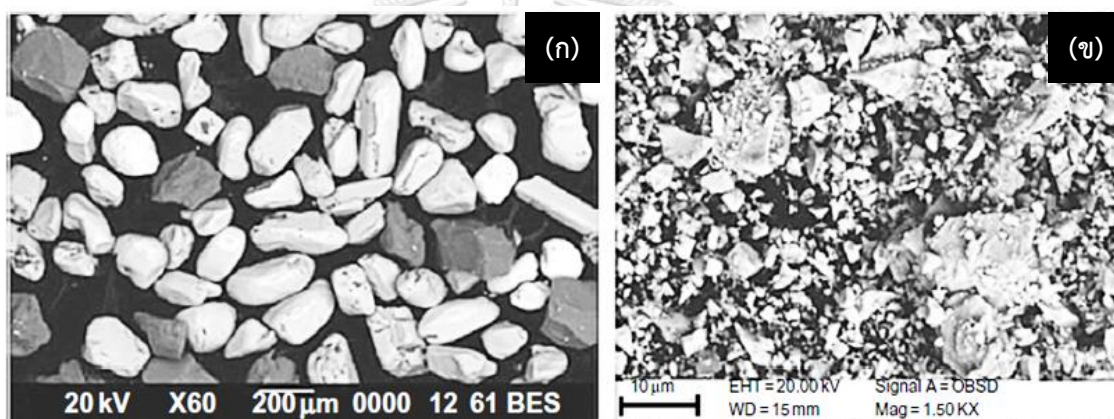
สารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) ที่ใช้ร่วมกับฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินสำหรับวัสดุเสียดทาน คือ เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า เฮกซะมีน (Hexamine) ซึ่งได้จากการควบแน่นของแอมโมเนีย (Ammonia) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) อย่างไรก็ตามเฮกซะมีนไม่ค่อยเสถียรภายใต้ความร้อน จึงอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากมีน้ำอยู่ในระบบ การสลายตัวของเฮกซะมีนนี้สามารถสังเกตได้ง่ายจากกลิ่นแอมโมเนียเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดร้อน ดังนั้นการที่มีแอมโมเนียหลุดออกมาจึงทำให้มีความจำเป็นต้องลดความดันระหว่างกระบวนการอัดร้อน เพื่อไม่ให้แอมโมเนียถูกกักขังเป็นโพรงอากาศในวัสดุเสียดทาน การเชื่อมโยงสายโซ่ในกระบวนการอัดร้อนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมโยงกันผ่านหมู่เมธิลีน (Methylene bridges) ดังแสดงในรูป 2.7 เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างร่างแหสามมิติของโนโวแลคเรซิน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างร่างแหที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโนโวแลคกับเฮกซะมีน [13]

### 2.3.3 ผงขัด (Abrasives)

ผงขัดเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นในวัสดุเสียดทาน มีการนำความร้อนที่ดี หน้าที่หลักของผงขัดมิใช่เป็นการขัดผิวหน้าผ้าเบรก แต่มีหน้าที่ในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าของผ้าเบรกและจานเบรก รวมถึงการเพิ่มความทนทานต่อการสึกให้แกผ้าเบรก [14] นอกจากนี้ยังช่วยขจัดสารสะสมของเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) ซึ่งเป็นฟิล์มจากการเสียดทาน (Friction film) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวโลหะที่สัมผัสกับวัสดุเสียดทาน [10] โดยความแข็ง (Hardness) ลักษณะของรูปร่าง และขนาดก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านอัตราการสึกของวัสดุเสียดทาน ซึ่งผงขัดที่มีลักษณะผิวเรียบและมีอนุภาคขนาดเล็กจะให้ค่าอัตราการสึกที่ต่ำ ลักษณะของผงขัดในรูปร่างต่าง ๆ ดังรูป 2.8



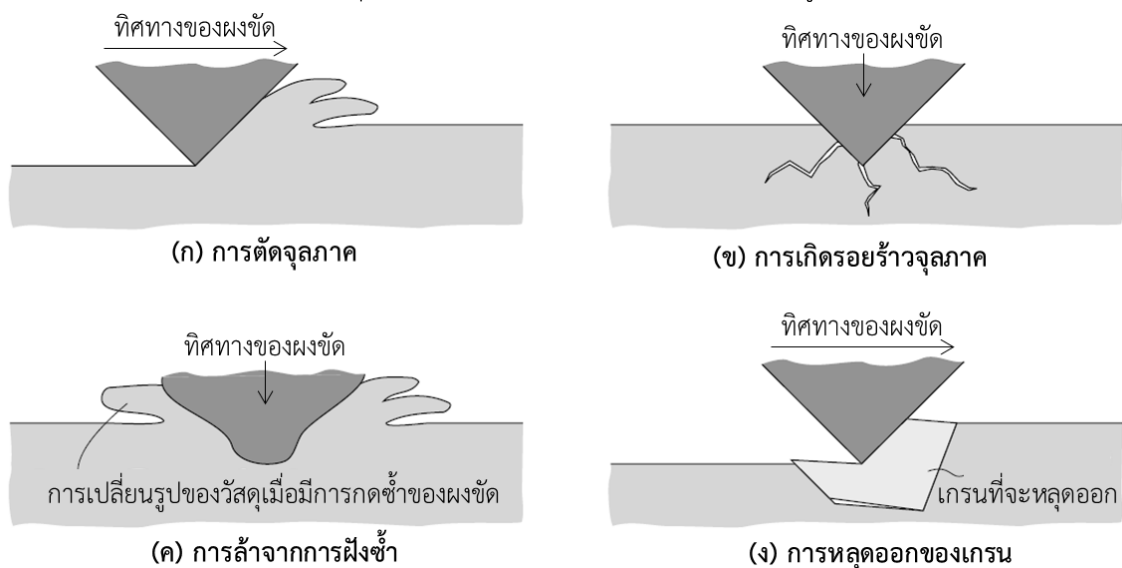
รูปที่ 2.8 ภาพจากกล้อง SEM (ก) Zircron sand (รูปร่างกลม) (ข) Zircron flour (รูปร่างเหลี่ยม) [4]

#### i. ความแข็งของผงขัด (Abrasive hardness)

ระดับความแข็งของผงขัดสามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณสัดส่วนความแข็ง (Hardness ratio) ระหว่างความแข็งของผงขัด (Hardness of abrasive;  $H_a$ ) ต่อความแข็งของผิววัสดุ (Hardness of material surface;  $H_s$ ) [10] ซึ่งในการศึกษาความแข็งของผงขัดในวัสดุเสียดทานจานเบรก (Grey cast iron) มีค่าความแข็งของโมส (Mohs hardness) ประมาณ 5.5 จากการวิเคราะห์ความแข็งของผงขัดสามารถแบ่งความแข็งได้เป็น 3 ระดับ คือ ผงขัดชนิดแข็งมาก (Hard-abrasive) จะมีค่าความแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 7.0 เช่น อะลูมินา (Alumina) โดยทั่วไปมักจะใส่ในปริมาณน้อยประมาณร้อยละ 0.2-2.0 โดยน้ำหนัก ผงขัดชนิดแข็งปานกลาง (Mild-abrasive) มีค่าความแข็งระหว่าง 5.0-7.0 เช่น เซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium silicate) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) โดยใส่ในปริมาณสูงกว่าชนิดข้างต้น และ ผงขัดชนิดแข็งน้อย (Soft-abrasive) ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่า 5.0 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารตัวเติม [15]

## ii. กลไกการสึกแบบขูดขีด (Abrasive wear mechanism)

การสึกของวัสดุเกิดจากการจิกหรือกัดของวัสดุที่มีลักษณะหยาบและแข็งลงบนเนื้อวัสดุอ่อน ทำให้เนื้อวัสดุหลุดหายไปจากการขีดข่วน ผ่านการตัดจุลภาค (Microcutting) เป็นกลไกหลัก นอกจากนี้ยังมีกลไกรองที่ทำให้เกิดการสึก คือการเกิดรอยร้าวจุลภาค (Microfracture) การล้าจากการฝังซ้ำ (Fatigue by repeated ploughing) และการหลุดออกของเกรน (Grain pull-out) [16] ดังรูปที่ 2.9

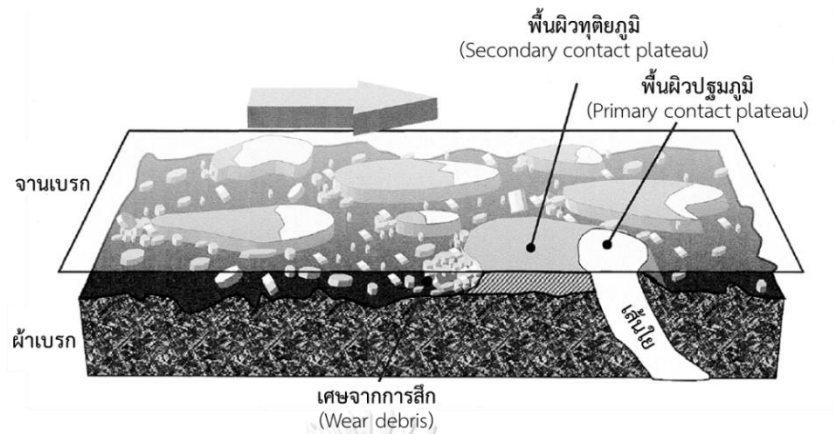


รูปที่ 2.9 กลไกการสึกแบบขูดขีด (ก) การตัดจุลภาค (ข) การเกิดรอยร้าวจุลภาค  
(ค) การล้าจากการฝังซ้ำ (ง) การหลุดออกของเกรน [16]

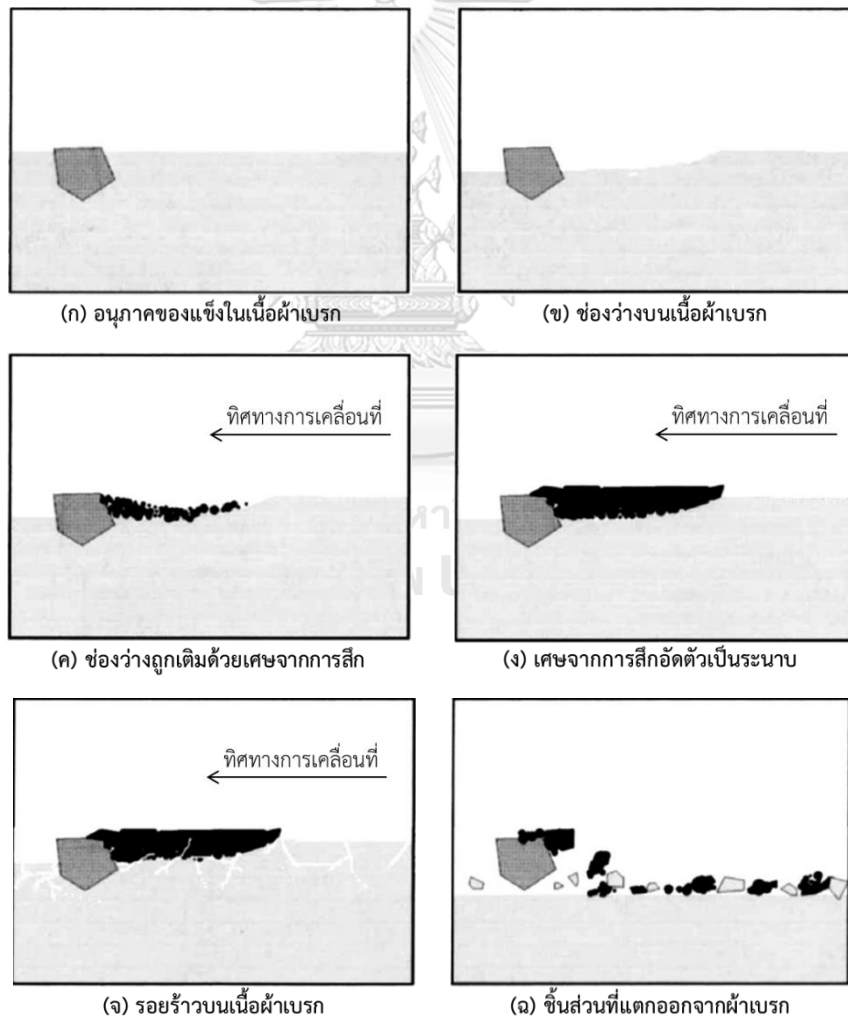
## iii. แบบจำลองการสึกของผ้าเบรก (Abrasive wear models of brake pad)

เมื่อผ้าเบรกเสียดสีกับจานเบรกซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์หนึ่ง จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กหรือเรียกว่าเศษจากการสึก (Wear debris) หลุดออกจากผิวหน้าผ้าเบรก ก่อตัวเป็นพื้นผิวซับซ้อนบนหน้าผ้าเบรกมีลักษณะดังรูป 2.10 การเกิดผิวสัมผัส (Contact plateaus หรือ third body) นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือผิวสัมผัสปฐมภูมิ (Primary contact plateaus) และผิวสัมผัสทุติยภูมิ (Secondary contact plateaus) [17] ซึ่งกลไกการเกิดผิวสัมผัสจะเริ่มขึ้นจากการเสียดสีระหว่างผ้าเบรกและจานเบรก [18] โดยเส้นใยหรือผงขัดจะทำหน้าที่เป็นผิวสัมผัสปฐมภูมิ เมื่อเสียดสีจะเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างผิวสัมผัสปฐมภูมิ ทำให้เศษวัสดุจากการสึกตกลงไปทับถมในแมทริกซ์ก่อตัวเป็นผิวสัมผัสทุติยภูมิ ซึ่งการเกิดผิวสัมผัสเหล่านี้จะไปรบกวนเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรก [19] ซึ่งมีกลไกการเกิด การเจริญและการสลายของผิวสัมผัสหน้าผ้าเบรก (Generation, growth and degradation of contact surface) แสดงดังรูปที่ 2.11





รูปที่ 2.10 พื้นผิวปฐมภูมิ (สีเทา) และพื้นผิวทุติยภูมิ (สีขาว) ที่เกิดจากชั้นบริเวณผิวผ้าเบรก [20]

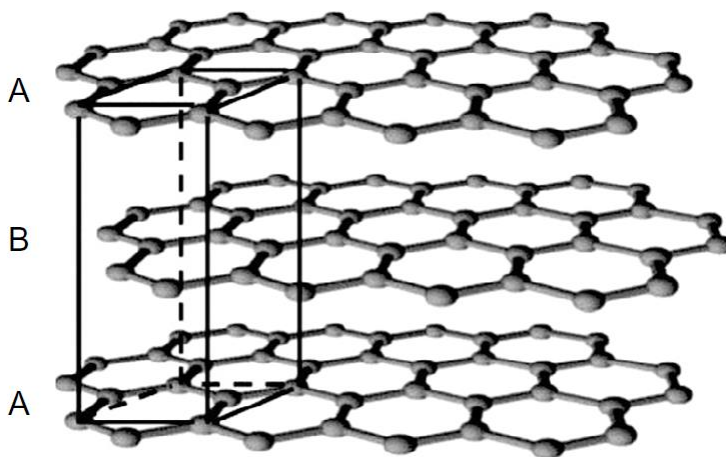


รูปที่ 2.11 กลไกการเกิด การเจริญ และการสลายของผิวสัมผัสหน้าผ้าเบรก [18]

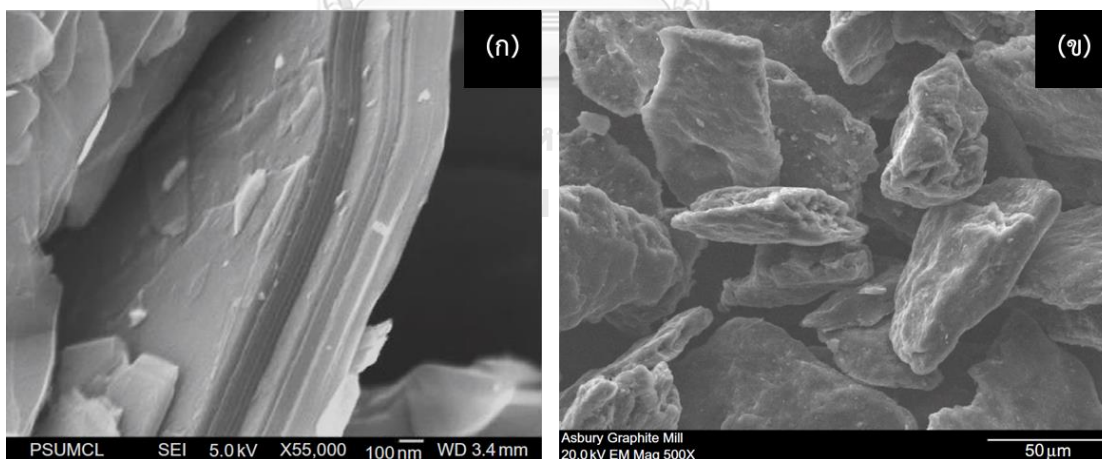


### 2.3.4 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่นทำหน้าที่ช่วยหล่อลื่น หรือลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสวัสดุเสียดทานกับจานเบรก ซึ่งจะทำให้การสึกของผิวโลหะลดลง อาจมีการใช้สารหล่อลื่นหลายชนิด เพื่อให้สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง สารหล่อลื่นที่ใช้ในวัสดุเสียดทานเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกแบบชั้น ดังรูปที่ 2.12 มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำ ทำให้สามารถลื่นสไลด์ระหว่างชั้นได้ง่าย ตัวอย่างสารหล่อลื่น เช่น พิโตรเลียมโค้ก (Petroleum coke) และแกรไฟต์ (Graphite) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก-ข)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกแบบชั้นของแกรไฟต์ [10]



รูปที่ 2.13 รูปร่างแกรไฟต์ (ก) แผ่นแกรไฟต์ (ข) อนุภาคแกรไฟต์แบบอสัณฐาน [10]

### 2.3.5 สารตัวเติมและสารอเนกประสงค์ (Fillers and functionalizers)

องค์ประกอบของวัสดุเสียดทานที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่ 2.3.1 ถึง 2.3.4 ไม่ว่าจะเป็นเส้นใย เสริมแรง สารยึดติด ผงขัดหรือสารหล่อลื่นล้วนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทั้งสิ้น โดยองค์ประกอบเหล่านี้จัดเป็นสารปรับแต่งความเสียดทาน (Friction modifiers) อย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตามยังมี

อีกองค์ประกอบหนึ่งที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน นั่นคือ สารตัวเติม ซึ่งเป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี (Thermal stability) ราคาถูก ใส่เพื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยรวมของเนื้อผ้าเบรค และช่วยลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสารตัวเติมเหล่านี้จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพด้านความเสียดทานของผ้าเบรค [4] นอกจากนี้ยังมีสารอเนกประสงค์ ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีหน้าที่พิเศษอื่น ๆ เช่น สารซับเสียง (Noise suppressors) สารแต่งสี (Colorants) หรือสารยับยั้งการเกิดสนิม (Corrosion inhibitors) เป็นต้น

### i. สารตัวเติม (Fillers)

สมบัติที่สำคัญของสารตัวเติม คือ การมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ไม่ละลายน้ำและไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมเพื่อจะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมควรมีค่าความแข็งของโมสอยู่ระหว่าง 3.0 ถึง 4.5 โดยวัสดุที่เหล่านี้นักจะมาจากแหล่งแร่ธาตุ (Mineral sources) [21] ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งแร่ธาตุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผ้าเบรค คือ แร่ธาตุกลุ่มแบไรต์ (Barite) และแคลไซต์ (Calcite) เนื่องจากมีราคาถูก โดยแบไรต์จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากกว่า เนื่องจากมีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีสูง (High chemical and thermal resistance) [22]

ตารางที่ 2.7 สมบัติทั่วไปของสารตัวเติม [23, 24]

Crystal Group	Formula	Crystal System	Mineral name	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Mohs hardness
Calcite	MgCO <sub>3</sub>	Trig.	Magnesite	3.010	3.5-4.5
	CaCO <sub>3</sub>		Calcite	2.711	3.0
	NaNO <sub>3</sub>		Nitratine	2.261	1.5-2.0
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Trig.	Dolomite	2.868	3.5-4.0
	CaFe(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Ankerite	3.293	2.5-4.0
Aragonite	CaCO <sub>3</sub>	Orth.	Aragonite	2.930	3.5-4.0
	BaCO <sub>3</sub>		Witherite	4.314	3.0-3.5
	KNO <sub>3</sub>		Niter	2.079	2.0
Barite	SrSO <sub>4</sub>	Orth.	Celestine	3.961	3.0-3.5
	PbSO <sub>4</sub>		Anglesite	6.321	2.5-3.0
	BaSO <sub>4</sub>		Barite	4.467	3.0-3.5
Gypsum	CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	Monoc.	Gypsum	2.313	2.0

### ii. สารอเนกประสงค์ (Functionalizers)

สารซับเสียงโดยทั่วไปแล้วนิยมใช้สารพอลิเมอร์ประเภทที่มีความยืดหยุ่น (Elastomer) และมีรูพรุน (Porous) สูง เนื่องจากปัญหาหลักที่พบในระบบเบรคมักจะข้องเกี่ยวกับสมรรถภาพด้านเสียงรบกวน การสั่นสะเทือนและความกระด้าง ดังนั้นจึงมีการนำอนุภาคยาง (Rubber particles) มาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการ

ผลิตผ้าเบรก ซึ่งมีสมบัติเด่นคือมีสภาพอัดตัวได้สูง มีความยืดหยุ่นดี และช่วยดูดซับการสั่นสะเทือนจากระบบเบรก [25]

สารแต่งสีนำมาใช้เพื่อแยกความแตกต่างด้วยตาเปล่าระหว่างเนื้อผ้าเบรก และอันเดอร์เลเยอร์ (Under layer) ซึ่งเป็นชั้นวัสดุที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกับแผ่นเหล็กและช่วยซับเสียงที่เกิดขึ้นขณะเบรก

## 2.4 เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust)

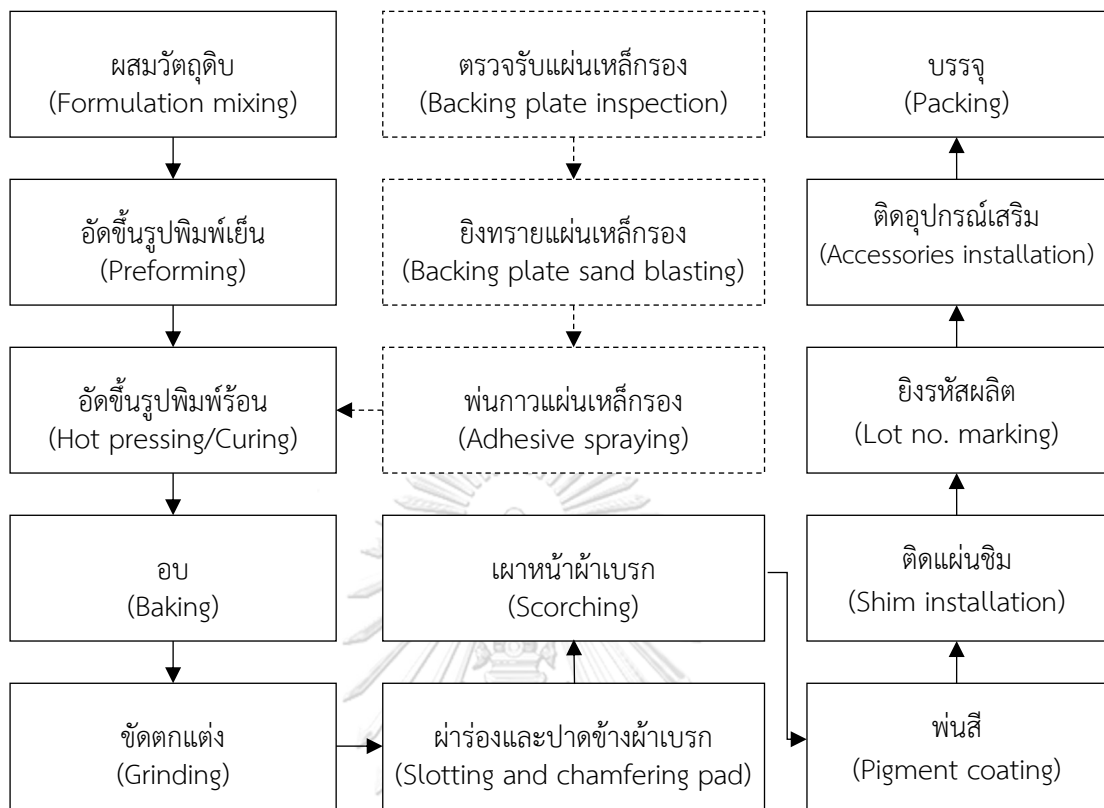
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By product) จากกระบวนการตัดตกแต่งบริเวณผิวหน้าผ้าเบรก กระบวนการผ่าร่อง และกระบวนการปาดข้างผ้าเบรกด้วยล้อเจียรเพชร (Diamond grinding wheel) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) ซึ่งเป็นวงล้อที่ประกอบไปด้วยเพชรและตัวประสาน ในการตัดตกแต่งหน้าผ้าเบรกชิ้นงานจะใช้ล้อเจียรเพชรเม็ดหยาบและล้อเจียรเพชรเม็ดละเอียดซึ่งมีขนาดอยู่ที่ D40 และ D30 ตามลำดับ ทำให้ได้เศษฝุ่นที่มีความหลากหลายทั้งรูปร่างและขนาด โดยเศษฝุ่นมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข)



รูปที่ 2.14 (ก) ลักษณะล้อเจียรเพชร และ (ข) ลักษณะเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

## 2.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก (Manufacturing process)

กระบวนการผลิตผ้าเบรกของโรงงานแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะผลิตชิ้นงานตามมาตรฐานการผลิตของโรงงาน โดยใช้ 5 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการผสมวัตถุดิบ กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน กระบวนการอบ และกระบวนการตัดตกแต่ง



รูปที่ 2.15 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

Carmine และคณะ [26] ศึกษาเรื่องการผลิตวัสดุเชิงประกอบโดยใช้เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้จากกระบวนการผลิตแผ่นดิสก์เบรก ซึ่งได้มาจากกระบวนการขัดตกแต่ง โดยการผสมโพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester resin) เข้ากับเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ด้วยปริมาณของเศษฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 50 60 และ 70 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการใส่เศษฝุ่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของทุกตัวอย่างในช่วง 20 วินาทีแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับจานทดสอบ จากนั้นค่าความเสียดทานจะค่อนข้างคงที่ โดยค่าความเสียดทานของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เศษฝุ่นจาก 30% 40% 50% และ 60% โดยที่ปริมาณ 50%-60% จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.3 แต่เมื่อใส่เศษฝุ่นเพิ่มเข้าไปเป็นอัตราส่วนร้อยละ 70 พบว่าชิ้นงานใหม่ขณะทดสอบ เมื่อตรวจสอบค่าความเสียดทานลดลงเหลือ 0.25 เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าอัตราการสึก พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษฝุ่นค่าอัตราการสึกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Stapathy [27] และ Malhotra และคณะ [28] ศึกษาเรื่องการนำกากของเสียจากการเผาไหม้ถ่านหิน ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) มาใช้แทนสารตัวเติม เพื่อเพิ่มเนื้อในผ้าเบรกในอัตราส่วนแตกต่างกัน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By-product) จากกระบวนการเผา

ไหม้ถ่านหิน พบว่าเมื่อใส่เข้าไปในปริมาณร้อยละ 0-20 โดยปริมาตร ค่าความแข็งแรง (Strength) ของผ้าเบรกลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไปเป็นร้อยละ 30 โดยปริมาตร พบว่าอนุภาคของถ่านลวและถ่านกันเตามีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรง และความยืดหยุ่นให้แก่ผ้าเบรก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มค่าความเสียดทาน โดยทำหน้าที่เป็นผงขัดในผ้าเบรก เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ พบสารประกอบของ  $Al_2O_3$   $Cr_2O_3$  และ SiC ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่พบได้ทั่วไปในวัสดุคิเบระประเภทผงขัด แต่พบว่าเมื่อใส่เข้าไปในปริมาณ 30% มีโอกาสเกิดการเฟด ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมในการใช้กับผ้าเบรก จะต้องใส่ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร

Ruzaidi และคณะ [29] ศึกษาเรื่องผลกระทบของขนาดอนุภาคตะกรันปาล์ม (Palm slag) ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมต่ออัตราการสึกของผ้าเบรก พบว่าอนุภาคของตะกรันปาล์มที่มีขนาดใหญ่จะช่วยเพิ่มความหนาแน่น ความแข็ง และความยืดหยุ่นของผ้าเบรก เมื่อทดสอบอัตราการสึก พบว่ายิ่งอนุภาคของตะกรันปาล์มมีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้อัตราการสึกของผ้าเบรกลดลง

Rouge และคณะ [30] พบว่าความเป็นรูพรุนของชิ้นงานเกี่ยวข้องกับการส่งผ่านความร้อน (Heat transmission) และยังเกี่ยวข้องกับการเกิดเสียงระหว่างการใช้งานของผ้าเบรก โดยความเป็นรูพรุนนี้จะช่วยในเรื่องของการระบายแก๊สออกจากชิ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดเฟด (Fade) ระหว่างการใช้งานอีกด้วย โดยยิ่งมีรูพรุนมากจะทำให้การระบายความร้อนช้าลง แต่จะมีส่วนช่วยในการลดเสียงให้แก่ชิ้นงาน

Ibrahim และคณะ [31] ศึกษาเรื่องผลกระทบของความเป็นรูพรุนต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นยางรถยนต์ (Waste tire dust) จากการทดสอบค่าความเสียดทาน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างน้อย ซึ่งหมายความว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นยางรถยนต์ยังสามารถคงเสถียรภาพความเสียดทานได้ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานลดลงอย่างกระทันหัน เมื่ออุณหภูมิบริเวณผิวหน้าผ้าเบรกสูงถึง 300 องศาเซลเซียส แต่ค่าความเสียดทานก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าอัตราการสึกของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เศษฝุ่นยางรถยนต์เข้าไปเป็นองค์ประกอบหนึ่งของผ้าเบรก โดยการทดลองนี้ไม่พบความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างค่าความเสียดทานและอัตราการสึกเมื่อใส่เศษฝุ่นยางรถยนต์ไปร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเสียดทานของชิ้นงานมีค่าสูงสุดที่ 0.44 แต่ค่าอัตราการสึกของชิ้นงานก็มีค่าสูงสุดเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชิ้นงานอื่น ๆ ค่าความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) และค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเติมเศษฝุ่นยางรถยนต์ในผ้าเบรก

รัตนมาลากุล [3] ศึกษาเรื่องการประยุกต์ผงยางนาโนในการผลิตเบรกรถยนต์ โดยใช้ผงยางไนไตรล์ บิวตะไดอิน (Nitrile butadiene rubber หรือ NBR) อนุภาคขนาดนาโนไปริมาณต่าง ๆ ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของผ้าเบรกรถยนต์เปรียบเทียบกับการใช้ยาง NBR ขนาดอนุภาคไมโคร ผลการทดลองพบว่าผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโนมีสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งและทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น ส่วนการทนต่อแรงกระแทก ระดับความพูน ระดับความเสียดทานดีขึ้นเล็กน้อย เมื่อทดสอบอัตราการสึกพบว่าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน มีอัตราการสึกที่เร็วกว่าเนื่องจากชิ้นงานนิ่มกว่าผ้าเบรกที่ใส่ผงยางอนุภาคไมโคร โดยพบว่าการ

ใส่ผงยางนาโนในปริมาณ 2.0% ให้ค่าความเสียดทานสูงสุดที่อุณหภูมิสูง และมีค่าอัตราการสึกและปริมาณการสึกต่ำสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้อีก 2.2% ซึ่งถูกกว่าการใช้ผงยาง NBR ไมโคร



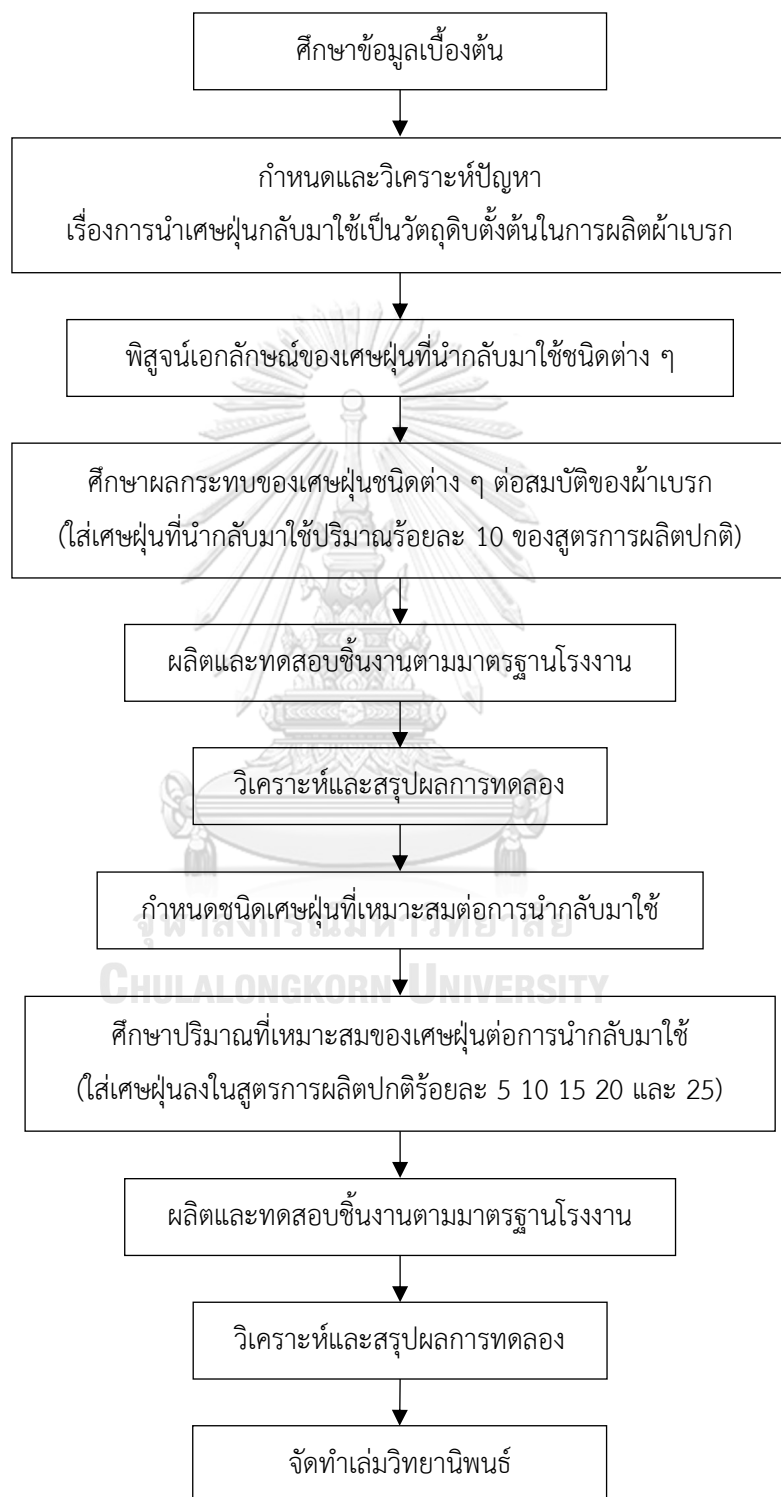
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัยและการพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทฤษฎี และศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม
2. วิเคราะห์แผนการผลิต และศึกษาความแตกต่างของเศษฝุ่นแต่ละช่วงเวลา
3. เตรียมเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ และวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้สำหรับการทดลอง
4. ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของเศษฝุ่นทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดใยเหล็กต่ำ (Low steel dust หรือ LSD) เศษฝุ่นจากผ้าเบรกทองแดงต่ำ (Low copper dust หรือ LCD) และเศษฝุ่นจากผ้าเบรกไร้ทองแดง (Non-copper dust หรือ NCD) โดยวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเขย่าผ่านตะแกรง วิเคราะห์รูปร่างและองค์ประกอบของธาตุที่พบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบกระจายความยาวคลื่น (WDXRF) และศึกษาปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นแต่ละชนิด
5. ศึกษาความแตกต่างของชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ต่อสมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรก โดยผสมเศษฝุ่นชนิดต่าง ๆ กับวัตถุดิบชนิดอื่นในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
6. ผลิตชิ้นงานตามมาตรฐานกระบวนการผลิตของโรงงาน
7. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของตัวอย่างชิ้นงาน โดยการวัดค่าความแข็ง ค่าสภาพอัดตัวได้ ค่าไดนามิกมอดูลัส ค่าความถ่วงจำเพาะ และความเป็นรูพรุน
8. ทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงาน โดยวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก
9. วิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อ 7 และ 8 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผ้าเบรกที่ไม่มีใส่เศษฝุ่น โดยการนำกลับมาใช้นี้จะต้องไม่ลดทอนประสิทธิภาพเดิมของผ้าเบรก
10. กำหนดชนิดของเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้
11. ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมเศษฝุ่นเป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก โดยใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เข้าไปแทนที่วัตถุดิบอื่นในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ผลิตชิ้นงาน ทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผลการทดลองตามข้อ 6-9
12. สรุปผลการทดลอง และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

## 3.2 แผนผังการวิจัย





### 3.3 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

เนื่องจากผู้บริโภคมักมีความต้องการแตกต่างกัน ผู้ผลิตผ้าเบรกจึงต้องมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านั้น ซึ่งในปัจจุบันโรงงานได้ผลิตผ้าเบรกทั้งสิ้น 3 ประเภท คือ ผ้าเบรกประเภทใยเหล็กดำ ผ้าเบรกประเภททองแดงดำ และผ้าเบรกประเภทไร้ทองแดง โดยผ้าเบรกทุกชนิดจะต้องผ่านเครื่องขัดตกแต่งหน้าผ้าเบรกเพื่อจะได้เป็นผ้าเบรกที่มีผิวเรียบ ซึ่งกระบวนการนี้จะสร้างเศษฝุ่นขึ้น เศษฝุ่นเหล่านี้จะถูกดูดไปเก็บรวมกันที่ไซโลดักฝุ่น โดยเศษฝุ่นจะมีสัดส่วนของผ้าเบรกแต่ละประเภทแตกต่างกันตามช่วงเวลา ซึ่งเกิดจากความต้องการของตลาด ณ ขณะนั้น พบว่าในปี 2560 บริษัทผลิตผ้าเบรกใยเหล็กดำสูงถึงร้อยละ 80 ต่อการผลิตผ้าเบรกประเภททองแดงดำร้อยละ 20 ดังนั้นเศษฝุ่นที่ได้จากกระบวนการขัดตกแต่งจึงแปรเปลี่ยนตามแผนการผลิต โดยจะได้เศษฝุ่นผสมที่มีอัตราส่วนของเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดใยเหล็กดำ (LSD) ต่อเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดทองแดงดำ (LCD) เท่ากับ 80:20 ต่อมาในปี 2561 อัตราการผลิตผ้าเบรกแต่ละชนิดได้เปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการของผู้บริโภคในปีนั้น พบว่ามีการผลิตผ้าเบรกประเภทใยเหล็กดำ ผ้าเบรกประเภททองแดงดำ และผ้าเบรกประเภทไร้ทองแดง ในอัตราส่วน 40:20:40 จากนั้นในปี 2562 อัตราการผลิตยังคงเปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการของผู้บริโภค พบว่ามีการผลิตผ้าเบรกประเภทใยเหล็กดำ ผ้าเบรกประเภททองแดงดำ และผ้าเบรกประเภทไร้ทองแดง ในอัตราส่วน 10:30:60 และมีการคาดการณ์ในอนาคตต่อความต้องการของตลาด ว่าจะมีความต้องการในผ้าเบรกประเภทไร้ทองแดง (NCD) สูงขึ้น เนื่องจากปัจจุบันในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มมีข้อกำหนดในการขายผ้าเบรกที่มีส่วนประกอบของทองแดงซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ จึงมีการบัญญัติกฎหมายเกี่ยวข้องกับผ้าเบรกที่จะนำมาขาย จะต้องมีส่วนผสมของทองแดงต่ำกว่าร้อยละ 5 ในปี 2021 และลดปริมาณทองแดงเหลือเกือบร้อยละ 0 ภายในปี 2025 [32] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เศษฝุ่นที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตมีอัตราส่วนที่เปลี่ยนไป โดยจะได้ LCD:NCD เท่ากับ 20:80 ดังนั้นในการทดลองวิเคราะห์หาชนิดของเศษฝุ่นที่เหมาะสมแก่การนำกลับมาใช้ จะต้องเตรียมเศษฝุ่นทั้งสิ้น 7 ชนิดด้วยกัน โดยแบ่งเศษฝุ่นออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เศษฝุ่นจากผ้าเบรกประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ (LSD LCD NCD) และเศษฝุ่นจากผ้าเบรกประเภทเศษฝุ่นผสม (M1 M2 M3 M4) ดังตารางที่ 3.1 โดย M1 คืออัตราส่วนของเศษฝุ่นผสมที่พบในปี 2560 M2 คืออัตราส่วนของเศษฝุ่นผสมที่พบในปี 2561 M3 คืออัตราส่วนของเศษฝุ่นผสมที่พบในปี 2562 และ M4 คืออัตราส่วนของเศษฝุ่นผสมที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ในการทดลอง

ประเภทของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้	LSD	LCD	NCD	M1	M2	M3	M4
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	100	-	-	80	40	10	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	-	100	-	20	20	30	20
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดไร้ทองแดง	-	-	100	-	40	60	80

### 3.3.2 วัตถุดิบและสารเคมีอื่น

ตารางที่ 3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตวัสดุเสียดทาน

ชื่อภาษาไทย	ชื่อภาษาอังกฤษ	สูตรโมเลกุล
เส้นใยอะรามิด	Aramid fibers/aramid pulp	$C_{14}H_{14}N_2O_4$
เส้นใยเหล็ก	Steel fiber	Fe
ร็อกวูล (ฉนวนหินภูเขาไฟ)	Rock wool	-
ฟีนอลิกเรซิน	Phenolic resin	$(C_6H_6O.CHO)_n$
แอนติโมนีไตรออกไซด์	Antimony trioxide	$Sb_2S_3$
แกรไฟต์ธรรมชาติ	Natural graphite	C
แกรไฟต์สังเคราะห์	Synthetic graphite	C
ปิโตรเลียมโค้ก	Petroleum coke	C
แคลไซต์อะลูมินา	Calcined alumina	$Al_2O_3$
ฝุ่นจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	Cashew nut shell dust	-
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	Zirconium silicate	$H_4O_4Si.Zr$
แบเรียมซัลเฟต	Barium sulphate	$BaSO_4$
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	Calcium hydroxide	$Ca(OH)_2$
แคลเซียมคาร์บอเนต	Calcium carbonate	$CaCO_3$
คาร์บอนแบลค	Carbon black	C
โพแทสเซียมเฮกซะทิตาเนต	Potassium hexatitanate	$K_2Ti_6O_{13}$
ไอเอิร์นออกไซด์	Iron oxide	$Fe_3O_4$
ทองแดง	Copper	Cu
ผงยาง	Rubber particles	-

### 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิตและรุ่น
ตู้อบสารเคมี (Oven)	BINDER รุ่น ED 53
ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)	Mitutoyo รุ่น 406-250-30
เครื่องชั่งดิจิทัล (Digital balance) ทศนิยมสองตำแหน่ง	T-scale รุ่น QHW-6R+
เครื่องผสมวัสดุดิบ (Ploughshare Mixer)	LODIGE รุ่น M20S
เตาเผาให้ความร้อน (Furnace)	Carbolite รุ่น BWF12-13-301
เครื่องวิเคราะห์ความชื้น (Moisture analyzer)	METTER TOLEDO รุ่น HC103
เครื่องเขย่าตะแกรงแบบสั่น (Vibratory sieve shaker)	FRITSCH รุ่น ANALYSETTE 3
เครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness)	Mitutoyo รุ่น HR-500
เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ (Compressibility machine)	Link Engineer รุ่น 1620-H
เครื่องทดสอบค่าไดนามิกมอดุลัสแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic velocity machine)	iETEK รุ่น 800 100 30 RT
เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผ้าเบรกแบบความเร็วคงที่ (Constant speed friction lining tester)	TOKYO PLANT รุ่น HP-SA-LC
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM)	JEOL รุ่น JSM-IT300
เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength dispersion x-ray fluorescence หรือ WDXRF)	BRUKER รุ่น S8 Tiger

### 3.5 อัตราส่วนการผสมผ้าเบรก

#### 3.5.1 อัตราส่วนการผสมเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

ตารางที่ 3.4 และ 3.5 แสดงอัตราส่วนการผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเศษฝุ่นที่แตกต่างกันต่อสมบัติ และประสิทธิภาพของผ้าเบรก โดยการใส่เศษฝุ่นเข้าไปแทนที่วัตถุดิบอื่น ๆ ในปริมาณร้อยละ 10 แต่ยังคงสัดส่วนของสารยึดติด (ฟีนอลิกเรซิน) ไว้ในปริมาณเท่าเดิม กล่าวคือลดวัตถุดิบอื่นลงไปอย่างละ 10% โดยน้ำหนัก และเพิ่มเศษฝุ่นเข้าไปแทนที่ ซึ่งการทดลองนี้สามารถแบ่งผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นออกเป็น 2 ประเภท คือ ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ (100LS 100LC และ 100NC) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) เปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นซึ่งเป็นสูตรการผลิตเชิงพาณิชย์ (Commercial brake pad หรือ CBP)

ตารางที่ 3.4 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	CBP	100LS	100LC	100NC
สารตัวเติม	51.60	46.44	46.44	46.44
สารปรับแต่งความเสียดทาน	27.90	25.11	25.11	25.11
เส้นใย	15.00	13.50	13.50	13.50
สารยึดติด	5.50	5.50	5.50	5.50
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	-	9.45	-	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	-	-	9.45	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดไรท์ทองแดง	-	-	-	9.45

ตารางที่ 3.5 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	80LS20LC	40LS20LC	10LS30LC	20LC80NC
สารตัวเติม	46.44	46.44	46.44	46.44
สารปรับแต่งความเสียดทาน	25.11	25.11	25.11	25.11
เส้นใย	13.50	13.50	13.50	13.50
สารยึดติด	5.50	5.50	5.50	5.50
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	7.56	3.78	0.95	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	1.89	1.89	2.84	1.89
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดไรท์ทองแดง	-	3.78	5.67	7.56

### 3.5.2 อัตราส่วนการผสมเมื่อเปลี่ยนปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

ตารางที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนการผสมวัสดุที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก เพื่อทดสอบความแตกต่างของสมบัติ และประสิทธิภาพของผ้าเบรก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ โดยการใส่เศษฝุ่นเข้าไปแทนที่วัสดุอื่น ๆ ในปริมาณ 5% 10% 15% 20% และ 25% โดยน้ำหนัก แต่ยังคงอัตราส่วนของสารยึดติด (ฟีนอลิกเรซิน) ไว้ในปริมาณเท่าเดิม เปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นซึ่งเป็นสูตรการผลิตเชิงพาณิชย์ (Commercial brake pad หรือ CBP)

ตารางที่ 3.6 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเศษฝุ่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัสดุ	CBP	5RD	10RD	15RD	20RD	25RD
สารตัวเติม	51.60	49.02	46.44	43.86	41.28	38.70
สารปรับแต่งความเสียดทาน	27.90	26.51	25.11	23.72	22.32	20.93
เส้นใย	15.00	14.25	13.50	12.75	12.00	11.25
สารยึดติด	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้	-	4.72	9.45	14.17	18.90	23.62

### 3.6 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

#### 3.6.1 กระบวนการผสมวัสดุ

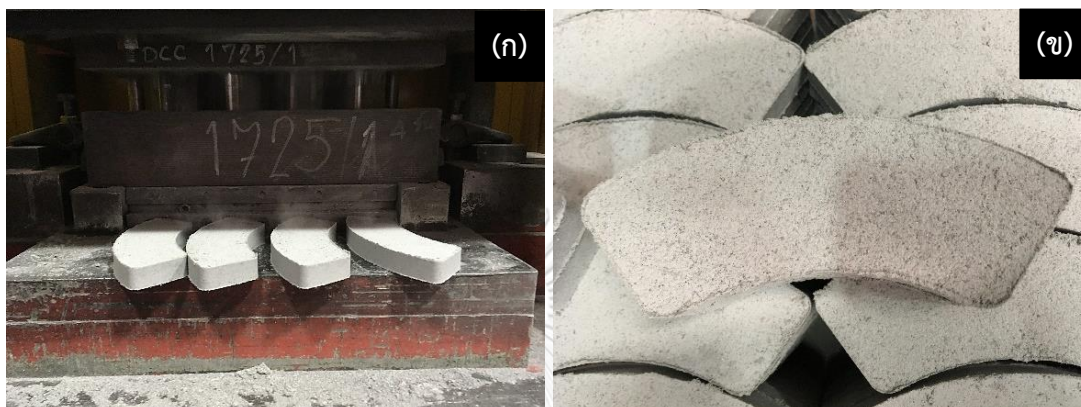
การผสมวัสดุแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะนำองค์ประกอบประเภทเส้นใย สารตัวเติม และสารยึดเกาะ ผสมลงในโม่ผสมวัสดุขนาด 20 ลิตร โดยใช้ความเร็วใบตีที่ (Chopper blade) 6,000 รอบต่อวินาทีและความเร็วใบกวนที่ (Shovel blade) 130 รอบต่อวินาที ผสมเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นส่วนถัดไปจึงเติมสารประเภทสารปรับแต่งความเสียดทาน และเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ผสมอีกครั้งโดยใช้ความเร็วใบตีที่ 3,000 รอบต่อวินาที และความเร็วใบกวนที่ 100 รอบต่อวินาที ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องผสมวัสดุและลักษณะภายในเครื่อง และ (ข) วัสดุบดหลังการผสม

### 3.6.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น

นำวัตถุดิบหลังการผสมที่แล้วเสร็จจากกระบวนการผสมเคมีใส่ลงในแม่พิมพ์ เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้แรงดันการอัดที่ 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.2 (ก) การอัดขึ้นรูปเย็น และ (ข) ชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปเย็น

### 3.6.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

นำชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปเย็นมาบรรจุใส่แม่พิมพ์เพื่อติดชิ้นงานเข้ากับแผ่นเหล็ก โดยให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยแรงอัดที่ 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเริ่มจากการอัดขึ้นงานเป็นระยะเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงกดชิ้นงานเป็นเวลา 3 วินาทีและปล่อยชิ้นงานเป็นเวลา 5 วินาที จำนวน 10 รอบ จากนั้นจึงอัดแซ่ชิ้นงานต่ออีก 200 วินาที ดังรูป 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

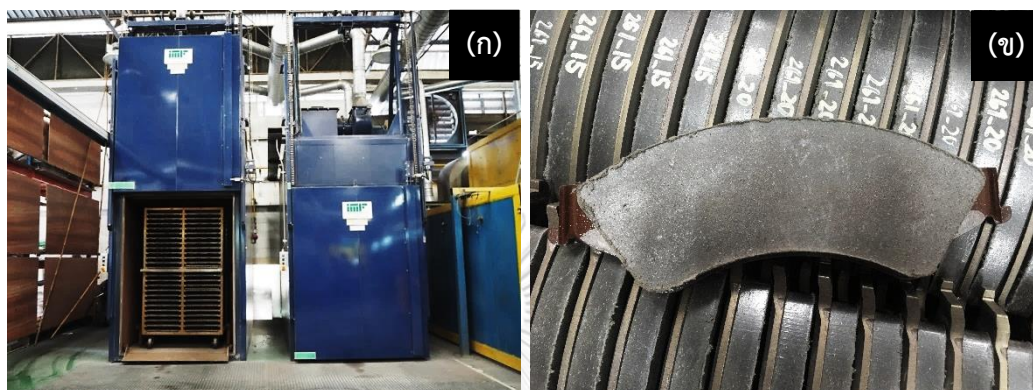


รูปที่ 3.3 (ก) ประกอบชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปเย็นเข้ากับแผ่นเหล็ก และ (ข) ชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปร้อน



### 3.6.4 กระบวนการบ่ม

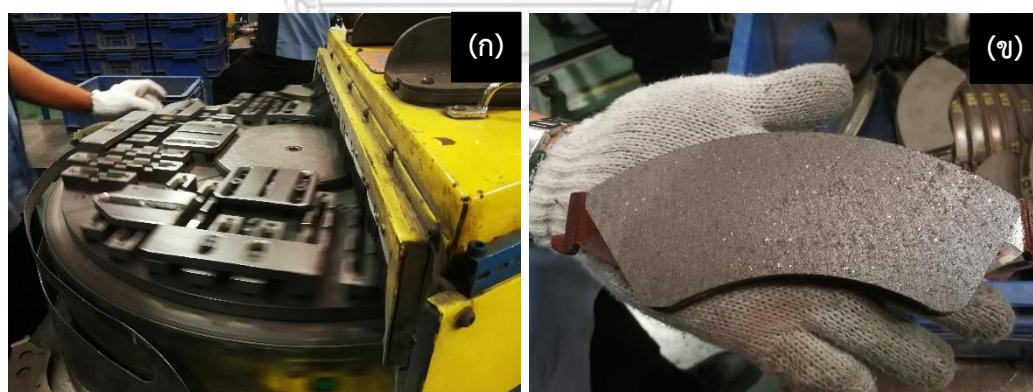
นำชิ้นงานหลังกระบวนการขึ้นรูปร้อนมาอบในตู้อบ ดังแสดงในรูป 3.4 ด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที



รูปที่ 3.4 (ก) ตู้อบผ้าเบรค และ (ข) ชิ้นงานหลังการบ่ม

### 3.6.5 กระบวนการขัดตกแต่ง

นำชิ้นงานมาขัดตกแต่งให้เรียบ โดยใช้ความเร็วการหมุนที่ 1,000 รอบต่อนาที ดังรูป 3.5 (ก) จากนั้นจะได้ชิ้นงานที่มีผิวหน้าเรียบดังรูป 3.5 (ข)



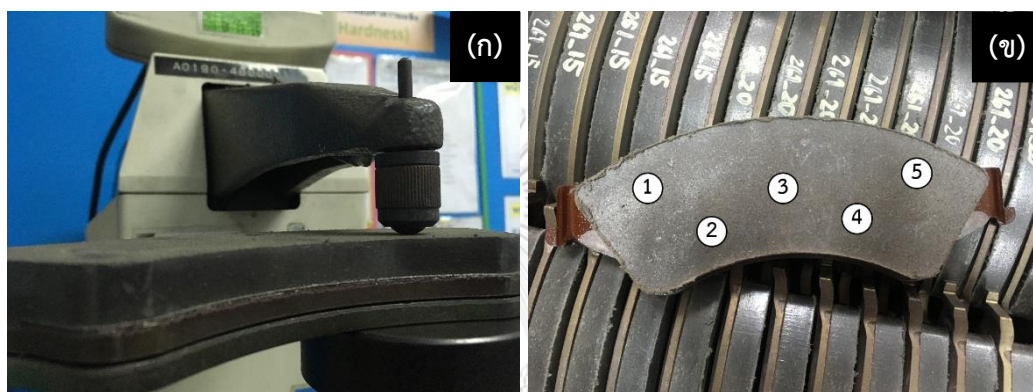
รูปที่ 3.5 (ก) เครื่องขัดตกแต่งผ้าเบรค และ (ข) ผ้าเบรคหลังขัดตกแต่ง

## 3.7 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

### 3.7.1 การทดสอบความแข็ง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง เก็บชิ้นงานทดสอบไว้ในโถแก้วดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป หรือนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นให้

ชิ้นงานเย็นตัวลงในโถแก้วดูตความชื้น ณ อุณหภูมิห้อง วิธีการทดสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลอาร์ (HRR scale) ทำได้โดยวางชิ้นงานลงบนแท่นทดสอบ กดชิ้นงานทดสอบด้วยหัวกดลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ให้ภาระแก่หัวกดตามมาตรฐาน JIS D 4421 กดชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ตำแหน่ง โดยมีระยะห่างแต่ละจุดเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ทั้งนี้ บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ และหัวกดจะต้องสะอาด ปราศจากรอยขีดข่วน



รูปที่ 3.6 (ก) เครื่องทดสอบความแข็ง และ (ข) ตำแหน่งการวัดค่าความแข็ง

### 3.7.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและความเป็นรูปพรุน

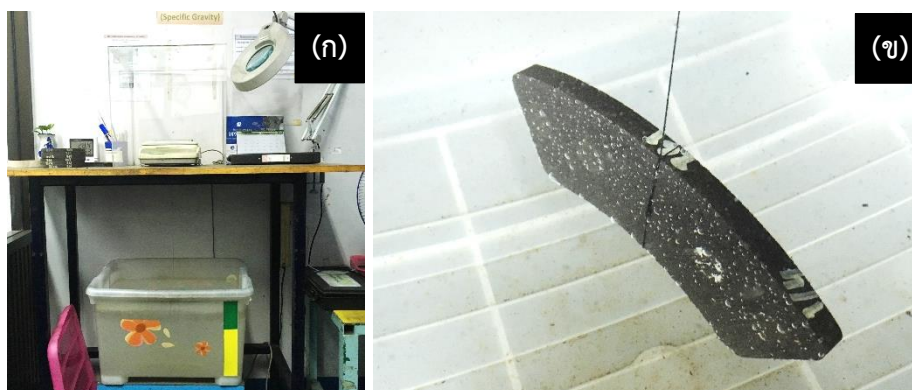
การเตรียมชิ้นงานมาทดสอบความถ่วงจำเพาะ เก็บชิ้นงานทดสอบไว้ในโถแก้วดูตความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป หรือนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในโถแก้วดูตความชื้น ณ อุณหภูมิห้อง

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ นำชิ้นงานทดสอบซึ่งบนเครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียดทศนิยมสองตำแหน่ง บันทึกค่า จากนั้นมัดชิ้นงานเข้ากับเชือกหรือลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งผูกติดอยู่กับเครื่องชั่งดิจิทัล ถ่วงชิ้นงานลงในอ่างน้ำที่บรรจุน้ำสะอาด ดังรูปที่ 3.7 แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอ่านค่าน้ำหนักชิ้นงานที่ถ่วงอยู่ในน้ำ นำน้ำหนักของชิ้นงานในอากาศ และชั่งในน้ำมาคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะทดลอง (Experimental specific gravity) ดังสมการ 3.1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม JIS D 4417

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

โดย	S.G.	คือ ความถ่วงจำเพาะทดลอง
	$m_1$	คือ น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ (กรัม)
	$m_2$	คือ น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)





รูปที่ 3.7 (ก) อุปกรณ์ทดสอบความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน (ข) ชิ้นงานขณะทดสอบ

ความเป็นรูพรุน (Porosity) หรือปริมาณช่องว่าง (void content) ของชิ้นงาน สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.2 ตามมาตรฐาน ASTM D2734 โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง (สมการที่ 3.1) และความถ่วงจำเพาะทฤษฎี (สมการที่ 3.3) [33]

$$\% \text{Porosity} = \frac{\text{S. G. Theory} - \text{S. G. experiment}}{\text{S. G. Theory}} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะทฤษฎี (Theoretical specific gravity หรือ  $\text{S. G.}_{\text{Theory}}$ ) ของชิ้นงาน คำนวณมาจากสมการ 3.3 [33] ดังต่อไปนี้

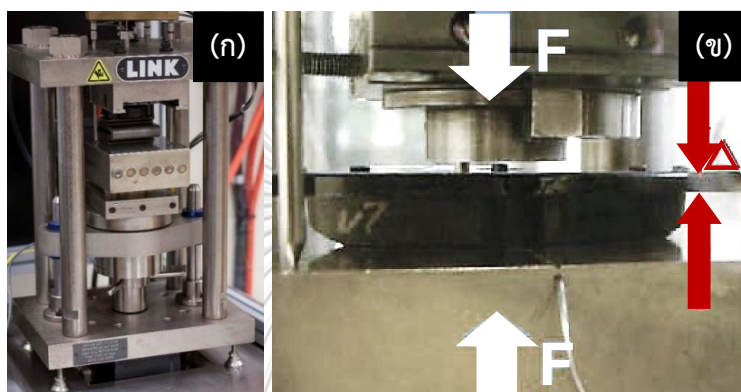
$$\text{S. G. Theory} = \frac{100}{\frac{W_f}{\text{S. G.}_f} + \frac{W_{fm}}{\text{S. G.}_{fm}} + \frac{W_r}{\text{S. G.}_r} + \frac{W_b}{\text{S. G.}_b} + \frac{W_{rd}}{\text{S. G.}_{rd}}} \quad (3.3)$$

โดย  $W_f$   $W_{fm}$   $W_r$   $W_b$   $W_{rd}$  คือ เศษส่วนโดยน้ำหนัก (Weight fraction) ของสารตัวเติม สารปรับแต่งความเสียดทาน เส้นใย สารยึดติด และเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้  $\text{S. G.}_f$   $\text{S. G.}_{fm}$   $\text{S. G.}_r$   $\text{S. G.}_b$   $\text{S. G.}_{rd}$  คือ ความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติม สารปรับแต่งความเสียดทาน เส้นใย สารยึดติด และเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ตามลำดับ [33]

### 3.7.3 การทดสอบสภาพอัดตัวได้

การเตรียมชิ้นงานมาทดสอบ โดยการเก็บชิ้นงานทดสอบไว้ในโถแก้วดูความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป หรือนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในโถแก้วดูความชื้น ณ อุณหภูมิห้อง

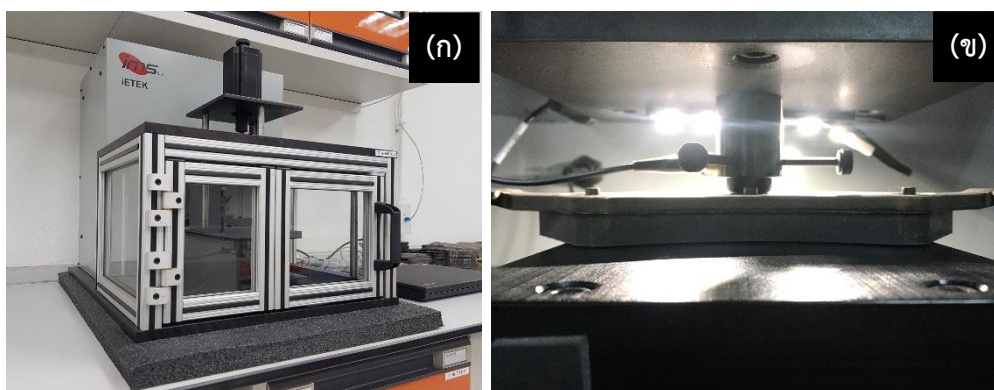
วิธีการทดสอบสภาพอัดตัวได้ ณ อุณหภูมิห้อง วัดความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ กดผ้าเบรกทั้งชิ้นด้วยลูกสูบ 2 หัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41.2 มิลลิเมตร วางชิ้นงานลงบนแท่นทดสอบ ดังรูปที่ 3.8 (ข) และเริ่มกดชิ้นงานด้วยแรง 5 บาร์ จากนั้นจึงเพิ่มแรงกดเป็น 160 บาร์ ซึ่งจะทำให้แรงและคายแรง (Cyclic of load and unload) ทั้งสิ้น 3 คาบ แสดงผลการยุบตัวของชิ้นงานในแนวแกนตั้งเป็นหน่วยไมครอน ซึ่งการทดสอบนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน ISO 6310



รูปที่ 3.8 (ก) เครื่องทดสอบสภาพอัดตัวได้ และ (ข) ชิ้นงานบนแท่นทดสอบ [34]

#### 3.7.4 การทดสอบไดนามิกมอดุลัส

การเตรียมชิ้นงานมาทดสอบ เก็บชิ้นงานทดสอบไว้ในโถแก้วดูดความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป หรือนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในโถแก้วดูดความชื้น ณ อุณหภูมิห้อง วิธีการทดสอบไดนามิกมอดุลัส ด้วยเครื่อง iETEK ดังรูป 3.9 (ก) โดยใช้ซอฟต์แวร์ ETEK 3000 เวอร์ชัน 1.2.0.0 วัดความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ จากนั้นวางผ้าเบรกลงบนแท่นทดสอบ ดังรูปที่ 3.9 (ข) ให้ภาระแก่หัวกดผ้าเบรกดด้วยแรง 100 นิวตัน พร้อมกับให้ความถี่ที่ 125 เมกกะเฮิร์ต ณ อุณหภูมิห้อง วัดค่าไดนามิกมอดุลัสจำนวน 5 ตำแหน่ง โดยบริเวณผิวหน้าผ้าเบรกดต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นหรือสิ่งสกปรกอื่น ๆ ที่จะกั้นการส่งผ่านคลื่นจากเครื่องไปยังชิ้นงาน ซึ่งอาจจะทำให้การวัดค่าไดนามิกมอดุลัสผิดพลาดได้



รูปที่ 3.9 (ก) เครื่องทดสอบไดนามิกมอดุลัส และ (ข) การวางชิ้นงานทดสอบ

### 3.7.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก

การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก นำชิ้นงานผ้าเบรกมาตัดให้ได้ขนาด 25 x 25 x 7 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้นจากตัวอย่างชิ้นเดียวกัน จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดตกแต่งให้เรียบ และได้ขนาดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 800-1,000 วางชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นลงบนเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผ้าเบรกแบบความเร็วคงที่ ในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน ดังรูป 3.10 (ก) เริ่มปรับผิวหน้าชิ้นงานให้ราบสัมผัสกับจาน โดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งบริเวณผิวหน้าชิ้นงานสัมผัสกับจานมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลง ณ อุณหภูมิห้อง วัดความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ จะได้ความหนาเริ่มต้นก่อนการทดสอบซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดความหนา 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกันของชิ้นงาน ดังแสดงในรูป 3.10 (ข)

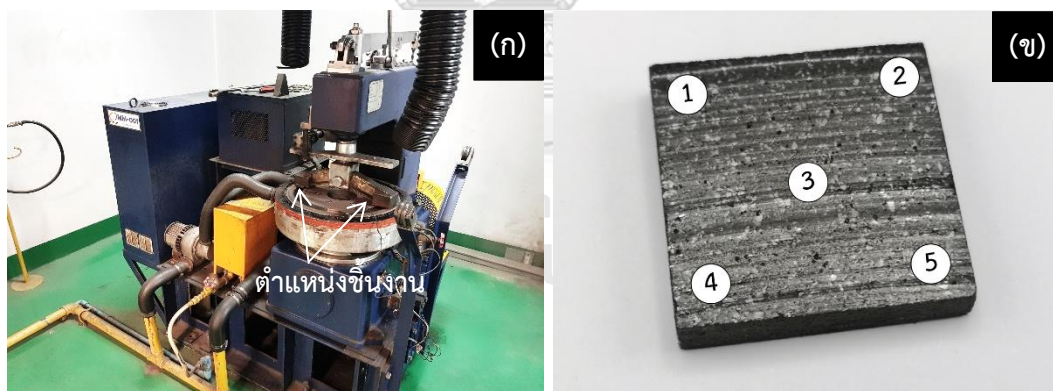
การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D4411 ส่วนแรกเป็นการทดสอบช่วงเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100 150 200 250 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส และส่วนที่สองเป็นการทดสอบช่วงลดอุณหภูมิตั้งแต่ 350 300 250 200 150 ถึง 100 องศาเซลเซียส เริ่มการทดสอบช่วงเพิ่มอุณหภูมิ โดยกำหนดให้หมุนจานทดสอบจำนวน 5,000 รอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วจานหมุน 7 เมตรต่อวินาที วัดค่าแรงเสียดทาน (Friction force) ทุกรอบการหมุนจานที่ 250 ถึง 500 รอบ เมื่อครบกำหนดรอบการหมุน ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ทำการวัดความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์เพื่อหาความหนาเฉลี่ย จากนั้นทำการทดสอบชิ้นงานเดิมโดยใช้อุณหภูมิที่ 150 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ เริ่มการทดสอบช่วงลดอุณหภูมิ โดยกำหนดให้หมุนการทดสอบจำนวน 1,500 รอบต่อหนึ่งอุณหภูมิที่ทดสอบด้วยความเร็ว 7 เมตรต่อวินาที วัดค่าแรงเสียดทานทุกรอบการหมุนของจานที่ 500 รอบ ซึ่งการทดสอบช่วงลดอุณหภูมินั้นจะไม่มี การวัดความหนาของชิ้นงานระหว่างการทดสอบ จากการทดสอบทั้งสองส่วนข้างต้นนำค่าแรงเสียดทานที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$\mu = \frac{f}{F} \quad (3.3)$$

โดย	$\mu$	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)
	$f$	คือ แรงเสียดทานเฉลี่ยของข้อมูลที่เสถียรในครึ่งหลังของช่วงอุณหภูมิ (นิวตัน)
	$F$	คือ แรงกดรวมบนชิ้นงาน หรือ แรงกดชิ้นงาน $\times$ พื้นที่ของชิ้นงาน (นิวตัน)

$$V = 1.06 \times \frac{1}{n} \times \frac{W_1 - W_2}{f_m \rho} \quad (3.4)$$

โดย	$V$	คือ อัตราการสึก (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนิวตัน.เมตร)
	$n$	คือ จำนวนรอบการหมุนงานระหว่างการทดสอบอัตราการสึก
	$W_1$	คือ มวลของชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)
	$W_2$	คือ มวลของชิ้นงานหลังทดสอบ (กรัม)
	$f_m$	คือ ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานของระยะทางรวมในการทดสอบ (นิวตัน)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบความเร็วคงที่ (ก) ตำแหน่งการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ และ (ข) ตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ

### 3.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust characterization)

#### 3.8.1 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์หาขนาดและรูปร่างของอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นำผงของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ติดบนแท่นติดชิ้นงาน (Specimen stub) โดยให้อนุภาคเรียงตัวกันอย่างอิสระ ไม่เกาะกลุ่ม นำชิ้นงานมาเคลือบทองคำด้วยเครื่องเคลือบทอง โดยใช้กระแสไฟ 18 มิลลิ

แอมป์ เป็นเวลา 180 วินาที จากนั้นวางชิ้นงานในห้องใส่ตัวอย่างระบบสุญญากาศระดับสูง (High vacuum) ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

### 3.8.2 การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเขย่าผ่านตะแกรง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ซึ่งตัวอย่างปริมาณ 90-110 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลแบบละเอียด จากนั้นนำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยเรียงตามขนาดเมช (Mesh size) ของตะแกรง จากตะแกรงหยาบไป ตะแกรงละเอียด ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM B214 ดังรูป 3.12 วิธีการทดสอบทำได้โดยวางผง ตัวอย่างลงในตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาครอบและรัดตะแกรงเข้าด้วยกัน สั่นด้วยแอมพลิจูด 0.5 มิลลิเมตร เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างค้างตะแกรงและคำนวณหาค่าร้อยละน้ำหนักร้อยละผ่านตะแกรง (%passing) ดังสมการ (3.5) (3.6) และ (3.7)

$$\text{ร้อยละน้ำหนักร้อยละผ่านตะแกรง} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างค้างแต่ละตะแกรง} / \text{น้ำหนักร้อยละทั้งหมด}) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{ร้อยละน้ำหนักร้อยละผ่านตะแกรงสะสม} = \text{ผลบวกสะสมค่าร้อยละน้ำหนักร้อยละผ่านตะแกรง} \quad (3.6)$$

$$\text{ร้อยละของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง} = 100 - \text{ร้อยละน้ำหนักร้อยละผ่านตะแกรงสะสม} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.12 เครื่องเขย่าตะแกรงแบบสั่น [36]



### 3.8.3 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

เก็บเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ไว้ในโถแก้วดูความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป เตรียมเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ (LSD) ทองแดงดำ (LCD) และไร้ทองแดง (NCD) ที่ไม่ผ่านการคัดขนาดในปริมาณอย่างละ 1 กรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง ส่งตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (STREC)

### 3.8.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นหลังเคาะ

การวิเคราะห์ความหนาแน่นหลังเคาะ (Tapped density) เป็นการวัดความหนาแน่นที่ประกอบไปด้วยเนื้อสารเท่านั้น ไม่รวมช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำได้โดยเก็บเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ไว้ในโถแก้วดูความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป จากนั้นเตรียมตัวอย่างปริมาณ 100 กรัม ใส่ลงในกระบอกตวง ทำการเคาะ จนค่าที่ได้มีปริมาตรคงที่ อ่านค่าและบันทึกผล คำนวณหาค่าความหนาแน่นหลังเคาะจากสมการที่ 3.8 ดังต่อไปนี้

$$\text{Tapped density} = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} \quad (3.8)$$

โดย Tapped density คือ ความหนาแน่นหลังเคาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 Mass คือ น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ (กรัม)  
 Volume คือ ปริมาตรที่คงที่หลังเคาะ (มิลลิลิตร)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการนำกลับมาใช้ของเศษฝุ่นจากกระบวนการขัดตกแต่งเป็นสารตัวเติมในผ้าเบรก โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ การวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ และการวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ต่อสมบัติ และประสิทธิภาพของผ้าเบรก

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

##### 4.1.1 ชนิดและปริมาณธาตุของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Compositions of recycling dust)

จากผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะรายงานผลการวิเคราะห์ในรูปแบบสารประกอบออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้งสามชนิดเป็นธาตุตัวเดียวกันกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก ออกไซด์ของแบเรียม ( $BaO$ ) พบประมาณ 19.50%-23.60% ซัลเฟอร์ ( $SO_2$ ) ประมาณ 10.70%-12.30% โดยออกไซด์ทั้งสองชนิดนี้เป็นสารประกอบที่พบในแบเรียมซัลเฟต ( $BaSO_4$ ) ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก ทำหน้าที่เป็นสารเติมเนื้อผ้าเบรก ซึ่งพบในปริมาณที่มีสัดส่วนเช่นเดียวกันกับสูตรโดยทั่วไปที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก ที่มักจะใส่ในปริมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก และยังพบออกไซด์ของเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) และทองแดง ( $CuO$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบในเส้นใยเหล็กและทองแดงที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นใยในผ้าเบรก โดยพบเหล็กออกไซด์ในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กต่ำ (LSD) 3.63% ซึ่งมากกว่าการพบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงต่ำ (LCD) และไร้ทองแดง (NCD) ซึ่งมีค่าเหล็กออกไซด์อยู่ที่ 1.83% และ 1.43% ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ที่พบในเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กต่ำ โดยมีค่าที่ 1.52% ซึ่งมากกว่าการพบในเศษฝุ่นชนิดทองแดงต่ำและไร้ทองแดงที่พบในปริมาณ 0.55% และ 0.34% โดยสอดคล้องกับปริมาณใยเหล็กและทองแดงที่ใส่ในสูตรการผลิตผ้าเบรกประเภทนั้น ๆ ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังพบสารประกอบออกไซด์อื่น ๆ เช่น ออกไซด์ของแมกนีเซียม ( $MgO$ ) โพแทสเซียม ( $K_2O$ ) โซเดียม ( $Na_2O$ ) และสังกะสี ( $ZnO$ ) ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งพบในเศษฝุ่นทั้งสามชนิดในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยทั้งสามเป็นส่วนประกอบหนึ่งของโพแทสเซียมเฮกซะดีคาเนต แคลไซด์อะลูมินาและรีอควูล ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น สารเพิ่มความเสียดทานและเส้นใย ตามลำดับ เนื่องจากเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ได้มาจากกระบวนการขัดตกแต่งหน้าผ้าเบรกด้วยล้อเจียรเพชร (Diamond grinding wheel) ดังนั้นการตรวจสอบเพื่อหาการปนเปื้อนก่อนนำกลับมาใช้จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะหากมีการปนเปื้อนจากเพชรที่มีค่าความแข็งของโมสเท่ากับ 10 อยู่ในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ อาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องเสียงขณะเบรกได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ไม่พบโครเมียมออกไซด์

(Chromium oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบที่พบได้โดยทั่วไปในเพชร [37] ด้วยเหตุนี้จึงยืนยันได้ว่าธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้งสามชนิดเป็นชนิดเดียวกันกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก โดยสิ่งปนเปื้อนจำพวกผงเพชรอาจจะมีการปนเปื้อนบ้าง แต่ในปริมาณที่น้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้

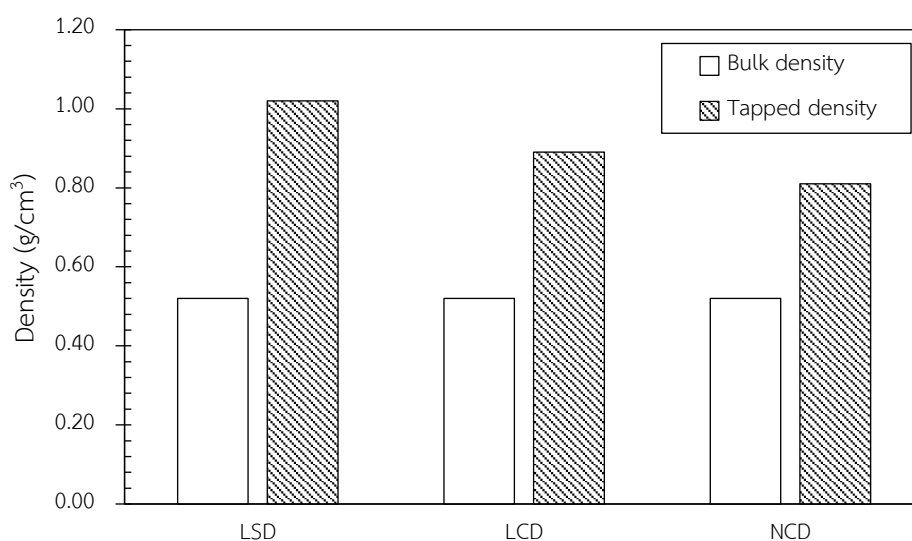
ตารางที่ 4.1 ชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

ประเภทฝุ่น	ชนิดและปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	BaO	SO <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MgO
LSD	19.50	10.70	8.42	5.86	3.12	2.07	1.64	3.63	2.55	0.97
LCD	23.60	12.30	7.76	4.59	3.67	2.40	2.23	2.88	1.83	0.89
NCD	22.50	12.00	8.29	4.83	2.97	1.46	2.25	1.85	1.43	0.83
ประเภทฝุ่น	K <sub>2</sub> O	CuO	SrO	Na <sub>2</sub> O	ZnO	HfO <sub>2</sub>	PbO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	NiO
LSD	0.71	1.52	0.46	0.45	0.11	0.12	0.03	0.03	0.04	0.00
LCD	0.79	0.55	0.55	0.43	0.12	0.07	0.03	0.03	0.03	0.00
NCD	0.55	0.34	0.53	0.43	0.18	0.05	0.05	0.04	0.04	0.01

#### 4.1.2 ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Density)

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ พบว่าเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้งสามชนิดมีค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) เท่ากันที่ 0.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ค่าความหนาแน่นหลังการเคาะ (Tapped density) แตกต่างกัน โดยเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กต่ำ (LSD) มีค่าสูงสุดที่ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงต่ำ (LCD) และชนิดไร้ทองแดง (NCD) รองลงมาตามลำดับ คือ 0.89 และ 0.81 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกรวมมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน พบว่าความหนาแน่นของทองแดงมีค่ามากที่สุดที่ 8.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของใยเหล็กมีค่ารองลงมาเท่ากับ 7.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [10] จากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุในหัวข้อ 4.1.1 พบว่าเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กต่ำมีองค์ประกอบของทองแดงและเส้นใยเหล็กในสัดส่วนรวมกันประมาณ 5.15% โดยมีปริมาณทองแดงเท่ากับ 1.52% และใยเหล็กเท่ากับ 3.63% ซึ่งมีปริมาณมากกว่าที่พบในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงต่ำและไร้ทองแดงซึ่งมีปริมาณสัดส่วนของโลหะ (ทองแดงและใยเหล็ก) เท่ากับ 3.43% (ทองแดง 0.55% ใยเหล็ก 2.88%) และ 2.14% (ทองแดง 0.34% ใยเหล็ก 1.85%) ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณสัดส่วนของโลหะส่งผลอย่างมากต่อความหนาแน่นหลังการเคาะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ หากมีปริมาณโลหะรวมมาก ความหนาแน่นหลังการเคาะของเศษฝุ่นก็จะสูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้แต่ละชนิด

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก

วัสดุ	Density (g/cm <sup>3</sup> )	วัสดุ	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Aramid fiber	1.44	Slags fiber	2.75
Steel fiber	7.30	Copper	8.96
Barium sulphate	4.50	Calcium hydroxide	2.24
Phenolic resin	1.25	Potassium hexatitanate	3.40
Antimony trisulfide	4.50	Zirconium silicate	4.80
Graphite	2.23	Rubber particle	1.00
Calcined alumina	4.00	Cashew nutshell dust	1.02

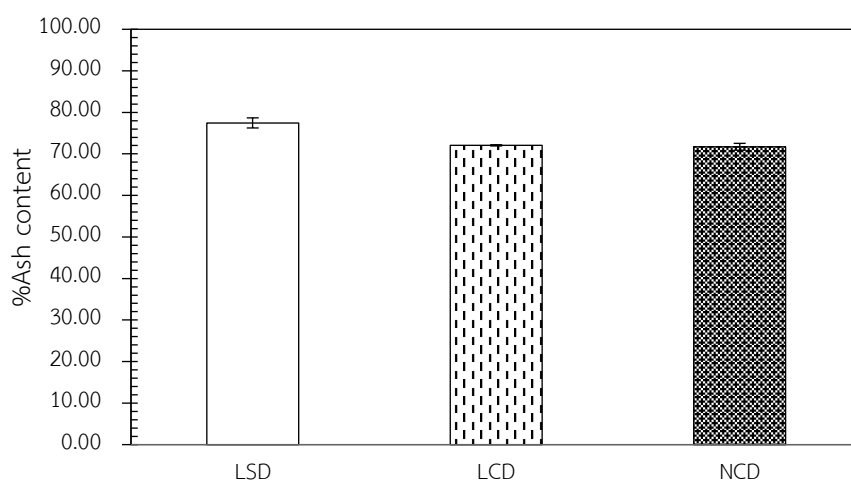
#### 4.1.3 ปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Ash content)

เมื่อนำเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ไปเผาด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 850 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กต่ำ (LSD) ชนิดทองแดงต่ำ (LCD) และชนิดไร้ทองแดง (NCD) มีค่าใกล้เคียงกันดังรูป 4.2 คือ 76.46% 72.06% และ 71.7% โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อเผาเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยอุณหภูมิสูง องค์ประกอบประเภทสารอินทรีย์จะไหม้จนหมด หากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete combustion) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide หรือ CO<sub>2</sub>) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide หรือ SO<sub>2</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide หรือ NO<sub>2</sub>) และน้ำ หากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์

(Carbon monoxide หรือ CO) และสารอื่น โดยปกติแล้วคาร์บอนจะอยู่ในรูปเขม่า ( $C_{(s)}$ ) [38] ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก เช่น ฟีนอลิกเรซิน เส้นใยอะรามิด ฝุ่นจากเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และผงยาง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารอนินทรีย์อีกบางส่วนที่ยังคงเหลือเอาไว้ เช่น แบริยมซัลเฟต เซอร์โคเนียมซิลิเกต รวมถึงแกรไฟต์และคาร์บอนแบลคซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถสลายตัวได้หมดที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง โดยปริมาณเถ้าในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกแสดงในตารางที่ 4.3 จากรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณเถ้าที่มีค่าสูง แสดงถึงองค์ประกอบในผ้าเบรกที่มีสัดส่วนของสารอินทรีย์มากกว่าสารอินทรีย์ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ในหัวข้อ 4.1.1 ที่พบว่าปริมาณรวมของโลหะในเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ ชนิดทองแดงดำ และชนิดไร้ทองแดง มีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยเช่นเดียวกันกับค่าปริมาณเถ้า

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเถ้าของวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบในผ้าเบรก

วัตถุดิบ	%Ash content	วัตถุดิบ	%Ash content
Aramid fiber	$3 \pm 1$	Slags fiber	100
Steel fiber	$99 \pm 1$	Calcium hydroxide	$80 \pm 10$
Barium sulphate	$99 \pm 1$	Calcium carbonate	$60 \pm 10$
Phenolic resin	0	Carbon black	$50 \pm 10$
Antimony trisulfide	$60 \pm 20$	Potassium hexatitanate	$98 \pm 1$
Graphite	$79 \pm 5$	Zirconium silicate	$99 \pm 1$
Petroleum coke	$80 \pm 10$	Rubber particle	$5 \pm 1$
Calcined alumina	$99 \pm 1$	Cashew nut shell dust	$3 \pm 1$



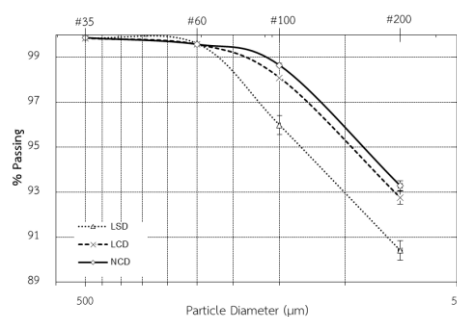
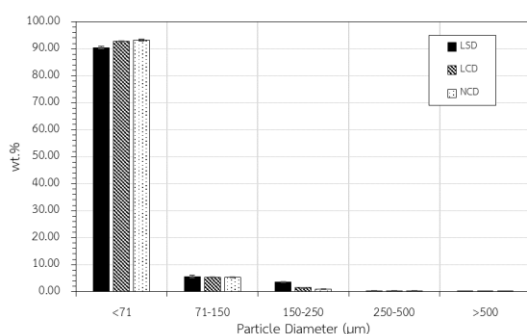
รูปที่ 4.2 ปริมาณเถ้าของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้แต่ละชนิด

#### 4.1.4 การกระจายของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Particle size distribution)

การทดลองหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ที่ได้จากการบดการขัด ตกแต่งผ้าเบรกที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดใยเหล็กดำ เศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดทองแดงดำ และเศษฝุ่นจากผ้าเบรกชนิดไร้ทองแดง มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม ไม่จับตัวเป็นก้อน เมื่อนำมาวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคโดยการสั่นร่อนผ่านตะแกรง พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 90 มีขนาดละเอียดกว่า 71 ไมครอน โดยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้สามารถแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์โดยละเอียดพบว่าการกระจายตัวของเศษฝุ่นทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันเล็กน้อยบนตะแกรงขนาด 100 ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 150-250 ไมครอน สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากหัวข้อ 4.1.1 ที่พบว่าเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำมีปริมาณของเส้นใยเหล็ก และทองแดงสูงกว่าเศษฝุ่นชนิดทองแดงดำ และไร้ทองแดง ซึ่งพบในปริมาณ 5.15% 3.43% และ 2.14% ตามลำดับ และจากหัวข้อ 4.1.2 พบว่าบนตะแกรงขนาด 100 เป็นวัตถุประเภททองแดงและเส้นใยเหล็ก ดังนั้นแสดงว่าการกระจายตัวที่ต่างกันเกิดจากปริมาณโลหะที่ต่างกันในแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.4 การกระจายของขนาดอนุภาคของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

Size no.	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณค้ำตะแกรง (wt.%)			ปริมาณผ่านตะแกรง (wt.%)		
		LSD	LCD	NCD	LSD	LCD	NCD
35	+500	0.14	0.15	0.13	99.86	99.85	99.87
60	-500+250	0.25	0.28	0.29	99.60	99.57	99.58
100	-250+150	3.62	1.48	0.93	95.98	98.09	98.64
200	-150+71	5.57	5.33	5.36	90.41	92.76	93.29
pan	-71	90.41	92.76	93.29	-	-	-

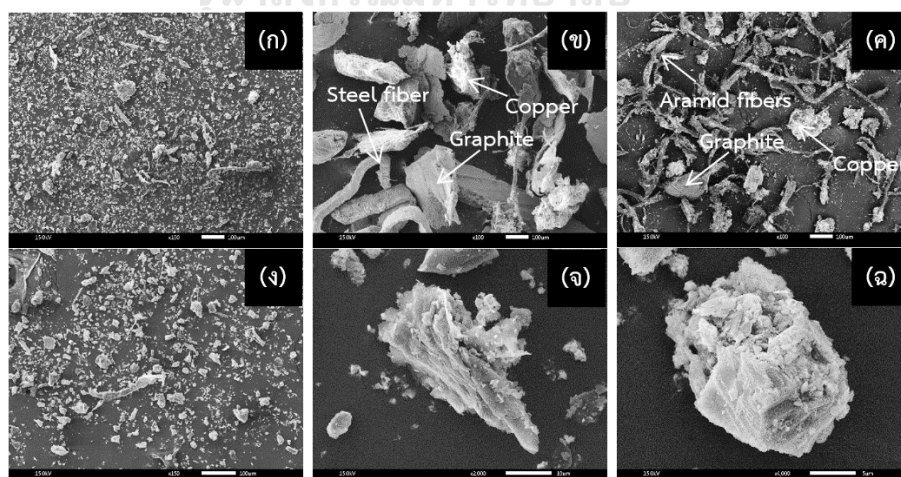


รูปที่ 4.3 (ก) การกระจายของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

และ (ข) การกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

#### 4.1.5 รูปร่างของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Particle shape)

การศึกษาลักษณะรูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รูป 4.4 (ก) แสดงเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้แบบคละขนาดที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าอนุภาคของเศษฝุ่นมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไม่สม่ำเสมอ (Irregular particles) โดยมีขนาดอนุภาคตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนถึงขนาดใหญ่กว่า 250 ไมครอน รูปที่ 4.4 (ข-ง) เป็นการพิจารณาเศษฝุ่นตามชั้นตะแกรง โดยรูปที่ 4.4 (ข) แสดงอนุภาคเศษฝุ่นบนตะแกรงเบอร์ 100 ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคแกรไฟต์ ซึ่งมีลักษณะผิวหน้าเป็นชั้น (layer) บนผิวของอนุภาคเช่นเดียวกับที่แสดงในหัวข้อที่ 2.3.4 ทองแดงจะมีลักษณะผิวมันวาวและสะท้อนแสงได้ดี และเส้นใยเหล็กมีลักษณะเป็นแท่ง รูปร่างหยักเล็กน้อยโดยมีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่แสดงในหัวข้อที่ 2.3.1 เนื่องจากอนุภาคทั้งสามนั้นเป็นวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าวัสดุชนิดอื่นในผ้าเบรก โดยทั่วไปแล้ววัสดุอื่นในผ้าเบรกจะมีขนาดเล็กกว่า 71 ไมครอน แต่แกรไฟต์และทองแดงจะมีขนาดประมาณ 250-500 ไมครอน และใยเหล็ก 100-200 ไมครอน เมื่อวัสดุเหล่านี้ผ่านกระบวนการขัดตกแต่งจะทำให้ขนาดอนุภาคลดลงเล็กน้อย จึงพบอนุภาคทั้งสามบนตะแกรงขนาด 100 รูปที่ 4.4 (ค) แสดงอนุภาคเศษฝุ่นบนตะแกรงเบอร์ 200 ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบอนุภาคของเส้นใยอะรามิด แกรไฟต์และทองแดง รูป 4.4 (ง) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเศษฝุ่นบนถาดรองที่บที่กำลังขยาย 150 เท่า พบว่าเศษฝุ่นมีมีขนาดหลากหลายตั้งแต่ขนาดที่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน และรูปที่ 4.4 (จ-ฉ) แสดงรูปร่างของอนุภาคฝุ่นที่กำลังขยาย 2,000 และ 4,000 เท่าตามลำดับ พบว่าเศษฝุ่นมีรูปร่างไม่ปกติ (Irregular shape) ซึ่งมีความยาวแต่ละด้านไม่เท่ากัน มีสาเหตุมาจากความคมและความเป็นเหลี่ยมของเพชรบนล้อเจียร ทำให้ได้เศษฝุ่นที่มีความหลากหลายทางด้านขนาดและรูปร่าง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้คละขนาด (ข) เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้บนตะแกรงเบอร์ 100 (ค) เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้บนตะแกรงเบอร์ 200 (ง) เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้บนถาดรองที่บ (จ) และ (ฉ) รูปร่างของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

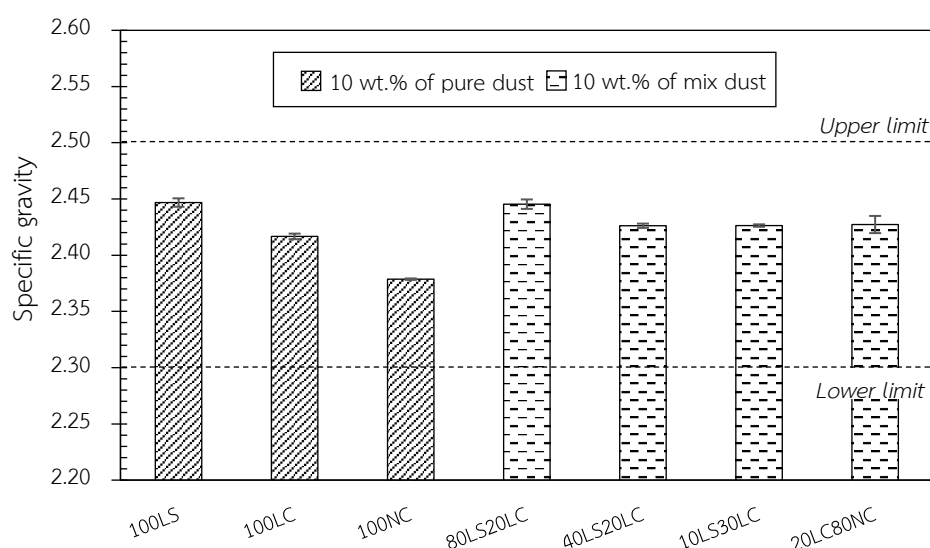
## 4.2 การวิเคราะห์ชนิดของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (Recycling dust type analysis)

จากการวิเคราะห์ลักษณะโดยทั่วไปของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ในหัวข้อ 4.1 พบว่าสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของฝุ่นมีความแตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของความหนาแน่น และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค แต่สมบัติทางเคมี (Chemical properties) ซึ่งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบและปริมาณธาตุที่พบของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้งสามชนิดมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ต่อสมบัติของผ้าเบรก โดยตั้งสมมุติฐานว่าเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้สามารถแทนที่ทุกองค์ประกอบในเนื้อผ้าเบรกได้ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ยกเว้นฟีนอลิกเรซินที่ไม่สามารถแทนที่ได้โดยยังคงสัดส่วนไว้ตามเดิมที่ปริมาณร้อยละ 5.5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากฟีนอลิกเรซินเป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถคืนสภาพได้เมื่ออัดขึ้นรูป สามารถขึ้นรูปได้เพียงครั้งเดียว แล้วสูญเสียสมบัติทางเคมีไป ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 7 ชนิด โดยใส่เข้าไปแทนที่วัตถุดิบต่าง ๆ ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แบ่งเป็นผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ 3 ตัวอย่าง คือ ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ชนิดใยเหล็กดำ (100LS) ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ชนิดทองแดงดำ (100LC) ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ชนิดไร้ทองแดง (100NC) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม 4 ตัวอย่าง คือ ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นผสมชนิดใยเหล็กดำและชนิดทองแดงดำในสัดส่วน 80:20 (80LS20LC) ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นผสมชนิดใยเหล็กดำ ชนิดทองแดงดำและชนิดไร้ทองแดงในสัดส่วน 40:20:40 (40LS20LC) ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นผสมชนิดใยเหล็กดำ ชนิดทองแดงดำและชนิดไร้ทองแดงในสัดส่วน 10:30:60 (10LS30LC) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นผสมชนิดทองแดงดำและชนิดไร้ทองแดงในสัดส่วน 20:80 (20LC80NC) เปรียบเทียบกับผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่มีมีส่วนประกอบของฝุ่น (Commercial brake pad หรือ CBP)

### 4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ

การวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดต่าง ๆ มาแทนที่วัตถุดิบชนิดอื่นที่มีใช้เรซิน ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นตามประเภทของเศษฝุ่น พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ (100LS 100LC 100NC) มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.03 ซึ่งมีมากกว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นแบบผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC 20LC80NC) ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.01 เมื่อพิจารณาผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์เป็นส่วนประกอบ พบว่าผ้าเบรก 100NC มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุดอยู่ที่ 2.38 และผ้าเบรก 100LS มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงสุดที่ 2.45 เนื่องจากการทดสอบความหนาแน่นของเศษฝุ่นในหัวข้อที่ 4.1.2 นั้นพบว่าเศษฝุ่นชนิด LSD มีค่าความหนาแน่นหลังเคาะ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรซึ่งสูงกว่าเศษฝุ่นชนิด NCD ที่มีค่าเท่ากับ 0.81 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก 100LS สูงกว่า 100NC แต่เมื่อพิจารณาผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสมนั้น ค่าความ

ถ่วงจำเพาะที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากเศษฝุ่นผสมมาจากการผสมกันของเศษฝุ่นทั้งสามชนิด คือ LSD LCD และ NCD โดยเศษฝุ่นเหล่านี้มีความแตกต่างกันทั้งด้านความหนาแน่น และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยจะเห็นได้ว่าหากใส่เศษฝุ่นชนิด LSD ในปริมาณมาก ค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกจะมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย ดังในตัวอย่าง 80LS20LC แต่ในกรณีที่ใช้ปริมาณ LSD น้อยหรือไม่ใส่เลย เช่น ผ้าเบรกชนิด 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC ค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จะมีค่าเดียวกันคือ 2.43 หากพิจารณาตามข้อกำหนดของโรงงาน พบว่าผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นบริสุทธิ์หรือเศษฝุ่นผสมยังสามารถคงค่าความถ่วงจำเพาะไว้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งอยู่ในช่วง 2.30-2.50 แต่การใช้เศษฝุ่นแบบผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) จะให้ผ้าเบรกที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสม่ำเสมอกว่าการใช้เศษฝุ่นแบบบริสุทธิ์

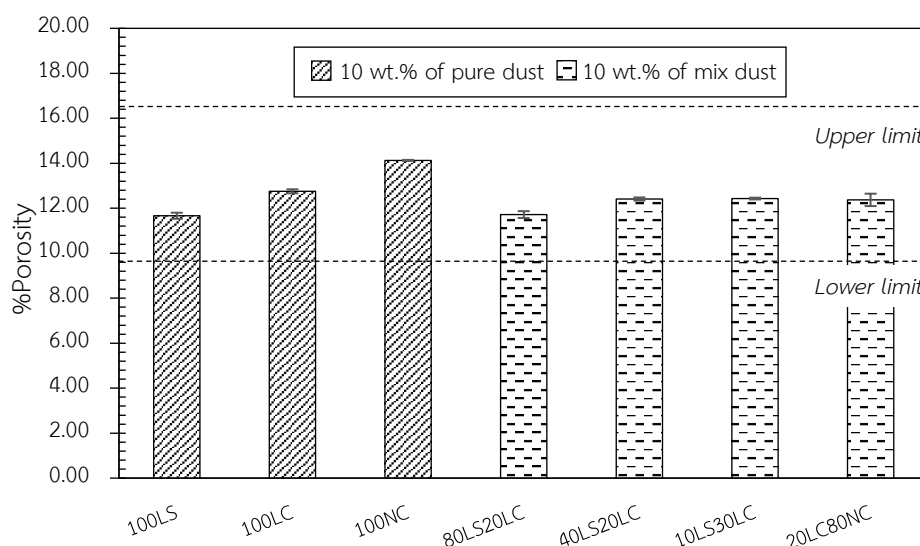


รูปที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

#### 4.2.2 ความเป็นรูพรุน

การวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนเป็นการวัดเพื่อบอกว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นในผ้าเบรกปริมาณมากน้อยเพียงใด เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้งประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์และเศษฝุ่นผสม แทนที่วัสดุเดิมในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ (100LS 100 LC 100NC) มีความแปรปรวนระหว่างตัวอย่างมากกว่า ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นแบบเศษฝุ่นผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.03 และ 0.30 ตามลำดับ โดยความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก 100LS มีค่าต่ำสุดที่ 11.67% และความเป็นรูพรุนของผ้าเบรก 100NC มีค่าสูงสุดในบรรดาผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นเป็นองค์ประกอบที่ 14.13% ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1 คือ ความแตกต่างของความหนาแน่น และการกระจายตัว

ของขนาดอนุภาคในเศษฝุ่นแต่ละชนิด โดยความเป็นรูพรุนจะแปรผกผันกับค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย 0.71%-3.59% ส่งผลให้ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกลดลงประมาณ 4.11%-20.81% หากพิจารณาตามค่ากำหนดของโรงงาน พบว่าผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเศษฝุ่นบริสุทธิ์หรือเศษฝุ่นผสมยังคงรักษาความเป็นรูพรุนไว้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือ อยู่ในช่วง 9.75%-16.97% แต่การใช้เศษฝุ่นแบบผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) จะให้ผ้าเบรกที่มีค่าความเป็นรูพรุนใกล้เคียงกันมากกว่าการใช้เศษฝุ่นแบบบริสุทธิ์ โดยจะเห็นได้ว่าหากเป็นผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นผสมที่มีปริมาณเศษฝุ่นชนิด LSD น้อยจะให้ค่าความเป็นรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกชนิด 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC มีค่าเท่ากับ 12.41% 12.43% และ 12.37% ตามลำดับ

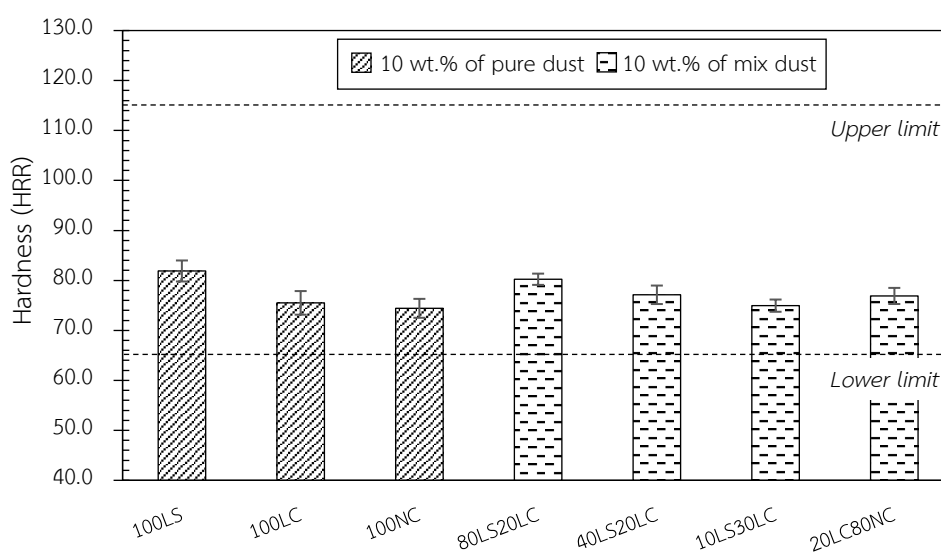


รูปที่ 4.6 ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

#### 4.2.3 ความแข็ง

การวิเคราะห์ความแข็งของผ้าเบรกแบบร็อคเวลล์ สเกลอาร์ (HRR scale) เพื่อศึกษาว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เข้าไปแทนที่วัสดุเดิมในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความแข็งเปลี่ยนแปลงไปเช่นไรเมื่อเปลี่ยนชนิดของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ (100LS 100 LC 100NC) มีความแปรปรวนระหว่างตัวอย่างมากกว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นแบบผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.30 และ 1.89 ตามลำดับ โดยผ้าเบรก 100NC มีค่าความแข็งต่ำสุดที่ 74.42 และผ้าเบรก 100LS มีค่าความแข็งสูงสุดที่ 81.89 เนื่องจากเศษฝุ่น LSD มีปริมาณโลหะมากกว่าเศษฝุ่นชนิดอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าเบรกที่ประกอบไปด้วยเศษฝุ่นชนิด LCD กับ NCD ใน

ปริมาณมาก (100LC 100NC 40LS20LC 10LS30LC 20LC80NC) จะมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันดังนี้ 75.51 74.42 77.13 74.96 และ 76.95 ตามลำดับ หากพิจารณาค่าความแข็งประกอบกับค่ากำหนดของโรงงาน (Specification) พบว่าผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็ฝุ่นบริสุทธิ์หรือฝุ่นผสมยังมีค่าความแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 65-115 HRR แต่การใช้เศษฝุ่นที่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่นชนิด LCD และ NCD ในปริมาณมาก จะช่วยลดความแตกต่างของค่าความแข็งในผ้าเบรกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแผนผลิต ทำให้ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้มีความคงที่

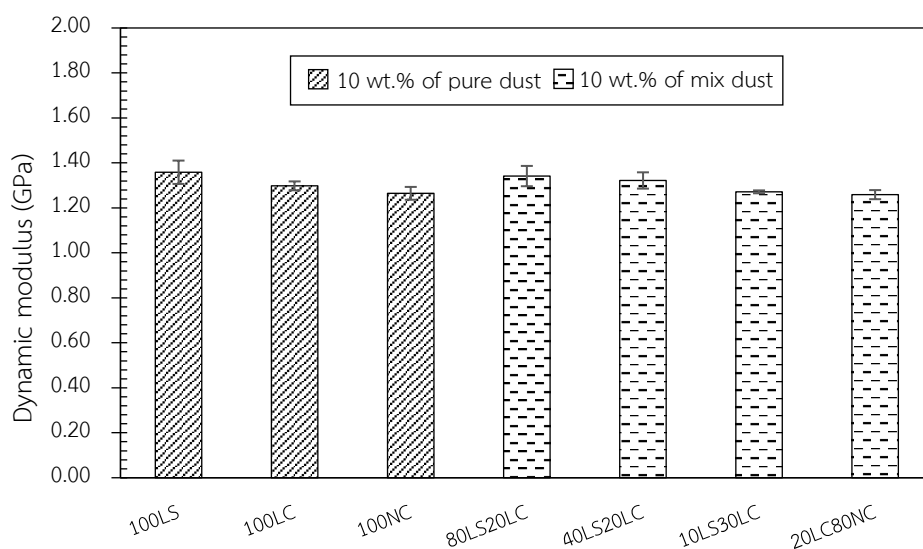


รูปที่ 4.7 ความแข็งของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

#### 4.2.4 ไดนามิกมอดุลัส

การวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสของผ้าเบรกด้วยเครื่องทดสอบค่าโมดูลัสแบบอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาความแข็งแรง (Stiffness) และความแข็ง (Hardness) ของวัสดุ [39] ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพที่ไม่ทำลายชิ้นงาน (Non-destructive measurement) จากรูปที่ 4.8 พบว่าเศษฝุ่นบริสุทธิ์มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.04 ซึ่งมีค่ามากกว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสมที่มีค่าเท่ากับ 0.03 เพียงเล็กน้อย และยังพบว่าผ้าเบรก 100LSD มีค่ามอดุลัสสูงสุดที่ 1.36 GPa และผ้าเบรก 20LC80NC มีค่ามอดุลัสต่ำสุดที่ 1.26 GPa เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) มีค่ามอดุลัสเท่ากับ 1.34 1.32 1.27 และ 1.26 GPa จากการทดลองพบว่าค่ามอดุลัสของผ้าเบรกลดลง เมื่อปริมาณของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กต่ำ (LSD) ลดลง โดยค่ามอดุลัสที่ลดลงจะส่งผลให้ผ้าเบรกสามารถกระจายแรงได้สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อมีการเหยียบเบรก ทุกพื้นที่บนผ้าเบรกจะได้รับแรงในปริมาณเท่ากัน ทำให้ผ้าเบรกแนบสัมผัสกับจานเบรกเท่ากันทั้งชิ้นงาน [40]



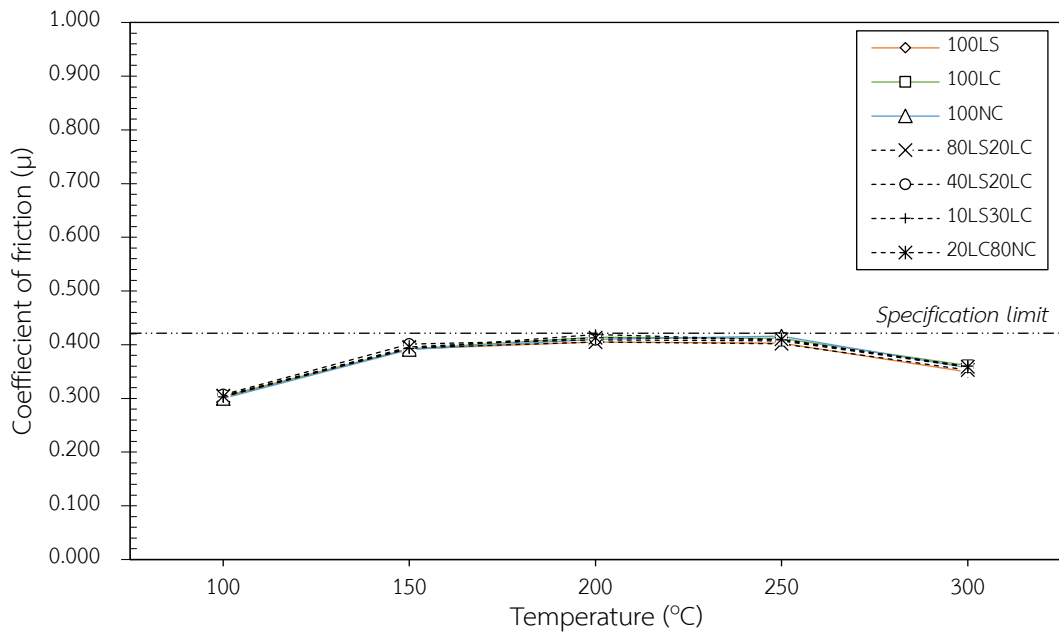


รูปที่ 4.8 ไดนามิกมอดุลัสของผ้าเบรกที่ประกอบด้วยเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

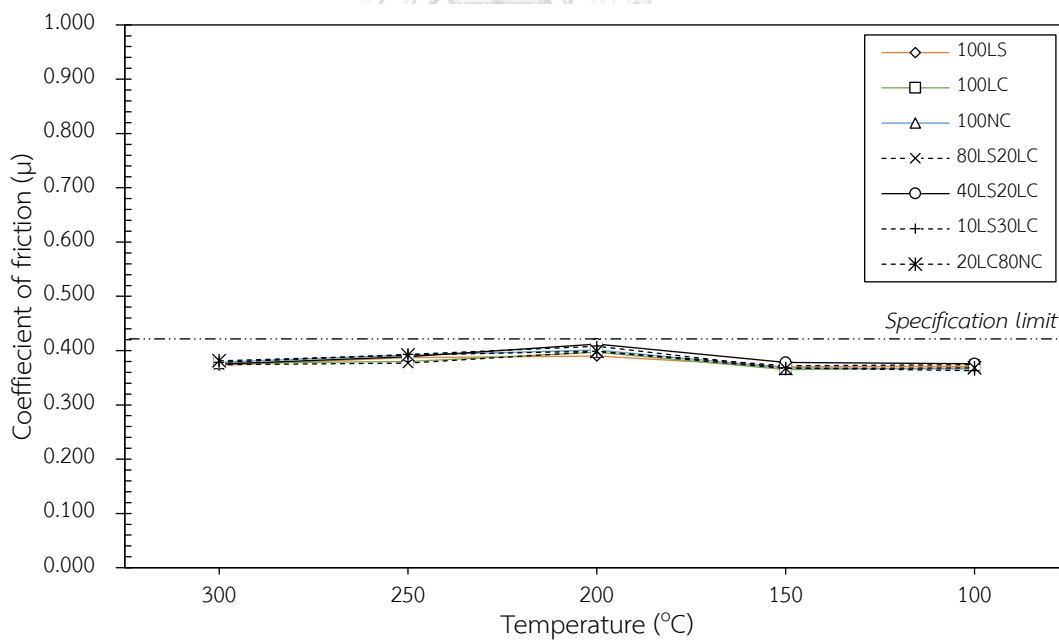
#### 4.2.5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกเพื่อพิจารณาความสามารถในการหยุด และ เสถียรภาพของความเสียดทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (100LS 100LC 100NC 80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LS80NC) มีค่าที่ 0.374 0.377 0.378 0.381 0.379 และ 0.379 จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 การทดสอบค่าความเสียดทานของผ้าเบรกจะแบ่งอุณหภูมิออกเป็นสองช่วงคือ ช่วง อุณหภูมิขาขึ้น (Heat up) เพิ่มอุณหภูมิ 100 ไปที่ 300 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิลง (Cool down) ลดอุณหภูมิจาก 300 ไปที่ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงกดคงที่ที่ 1 เมกกะปาสคาล ด้วย ความเร็วของจาน 7 เมตรต่อวินาที เมื่อเริ่มการทดสอบ ณ อุณหภูมิขาขึ้นที่ 100 องศาเซลเซียส ค่าความ เสียดทานของทุกตัวอย่างมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอุณหภูมิต่อมา โดยความเสียดทานของผ้าเบรกใส่ เศษฝุ่น (100LS 100LC 100NC 80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LS80NC) มีค่าอยู่ที่ 0.304 0.302 0.300 0.305 0.307 0.303 และ 0.304 ตามลำดับ เมื่อเริ่มการใช้งานผิวสัมผัสบริเวณหน้าผ้าเบรก ยังไม่ราบขนานไปกับผิวโลหะของจานทดสอบ ทำให้พื้นผิวสัมผัสที่ผ้าเบรกสัมผัสกับจานมีพื้นที่น้อย ดังนั้น ค่าความเสียดทานของผ้าเบรกเมื่อเริ่มใช้งาน ณ อุณหภูมิขาขึ้น 100 องศาเซลเซียสจึงมีค่าน้อยตามอย่างมี นัยสำคัญ [31] จากนั้นเมื่อผิวหน้าผ้าเบรกแนบสนิททั่วทั้งตัวอย่าง โดยราบขนานไปกับจานทดสอบ ระดับ ความเสียดทานจึงสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่อุณหภูมิขาขึ้น 150 จนถึง 200 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่า ความเสียดทานสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น ณ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าผ้าเบรก ที่ 10LS30LC มีค่าสูงสุดที่ 0.419 และความเสียดทานของผ้าเบรก 100LS และ 80LS20LC มีค่าต่ำสุดที่

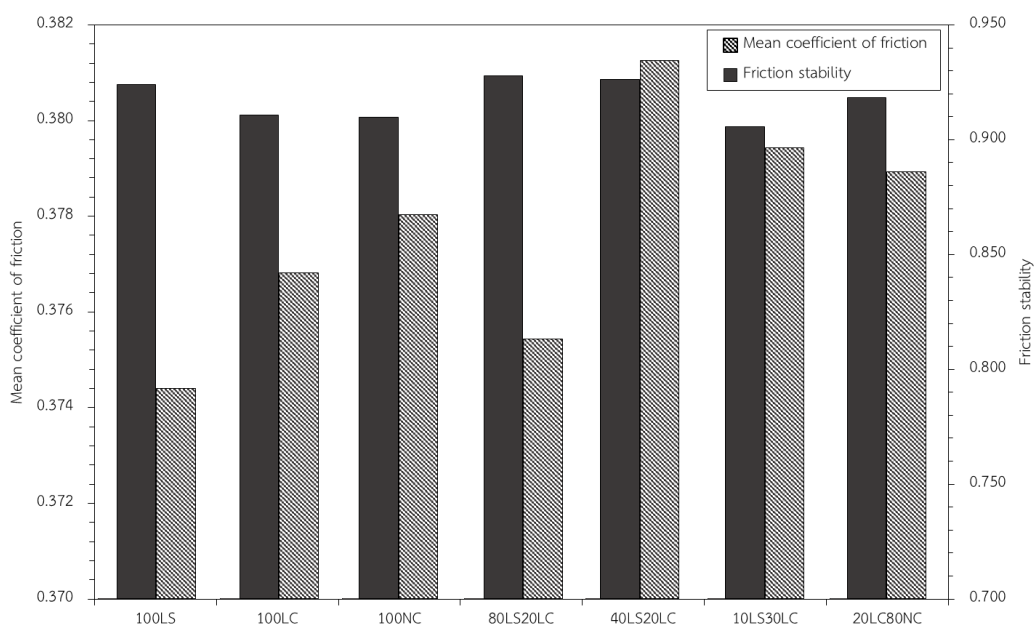
0.405 จากรูป 4.9 พบว่าระดับความเสียหายที่อุณหภูมิขาขึ้น 200-250 องศาเซลเซียสมีค่าค่อนข้างคงที่ จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเสียหายลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดเฟดจากความร้อน (Thermal fade) [41] มีสาเหตุมาจากเมื่อผ้าเบรกถูกให้อุณหภูมิจนร้อนถึง 300 องศาเซลเซียส เรซินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคายแก๊สฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde หรือ  $\text{CH}_2\text{O}$ ) และเมทานอล (Methanol หรือ  $\text{MeOH}$ ) [42] ออกมาแก๊สเหล่านี้จะเข้าไปเคลือบบริเวณผิวหน้าผ้าเบรกและแทรกระหว่างจานทดสอบและผ้าเบรกทำให้สัมผัสกันไม่ได้ ดังนั้นความเสียหายระหว่างผิวสัมผัสผ้าเบรกและจานเบรกลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อเรซินคายแก๊สออกมาจนหมดระดับความเสียหายของผ้าเบรกจะค่อย ๆ ปรับเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่ ณ อุณหภูมิขาลงจาก 300 ถึง 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แต่ระดับความเสียหายของผ้าเบรกจะไม่กลับขึ้นไปสูงเท่ากับค่าก่อนการเฟด เนื่องจากเกิดออกไซด์ของสารประกอบอื่น ๆ เคลือบอยู่ผิวหน้าผ้าเบรก ออกไซด์เหล่านี้เกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบประเภทเป็นโลหะในเนื้อผ้าเบรกได้รับความร้อนและสัมผัสกับอากาศ เกิดการเสียดสีและก่อตัวเป็นชั้นออกไซด์ (Oxide layer) ยกตัวอย่างเช่น ออกไซด์ของเหล็กหรือแมกนีไทต์ (Magnetite หรือ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) และออกไซด์ของทองแดงหรือคิวไพรต์ (Cuprite หรือ  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) [43] ชั้นออกไซด์นี้เองจะไปเคลือบผิวหน้าและทำหน้าที่ลดทอนความเสียหายเดิมของผ้าเบรก ชั้นออกไซด์นี้ช่วยส่งเสริมให้ผ้าเบรกมีเสถียรภาพความเสียหายที่ดีขึ้น [10] จากรูปที่ 4.10 แสดงเสถียรภาพความเสียหายของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นชนิดต่างๆมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (100LS 100LC 100NC 80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LS80NC) มีค่าที่ 0.924 0.910 0.090 0.929 0.905 0.917 ตามลำดับ พบว่ายิ่งค่าเสถียรภาพความเสียหายค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผ้าเบรกมีเสถียรภาพของความเสียหายต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ที่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส) ที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานได้ดี จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.1-4.2.4 พบว่าปริมาณสัดส่วนของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำ (LSD) ในเศษฝุ่นชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อนำมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายพบว่า ความแตกต่างของปริมาณเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำ (LSD) ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผ้าเบรก



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิขาขึ้นของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)



รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิลงของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

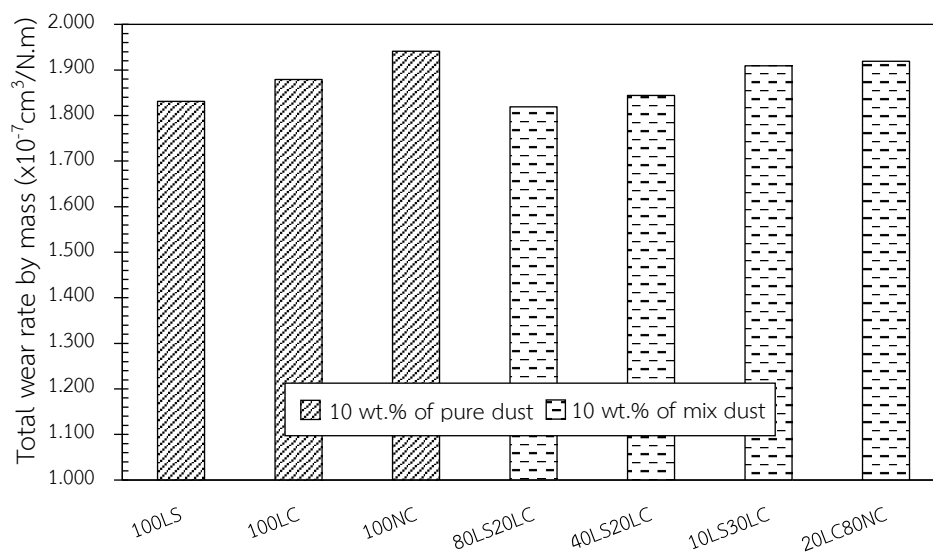


รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยและเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

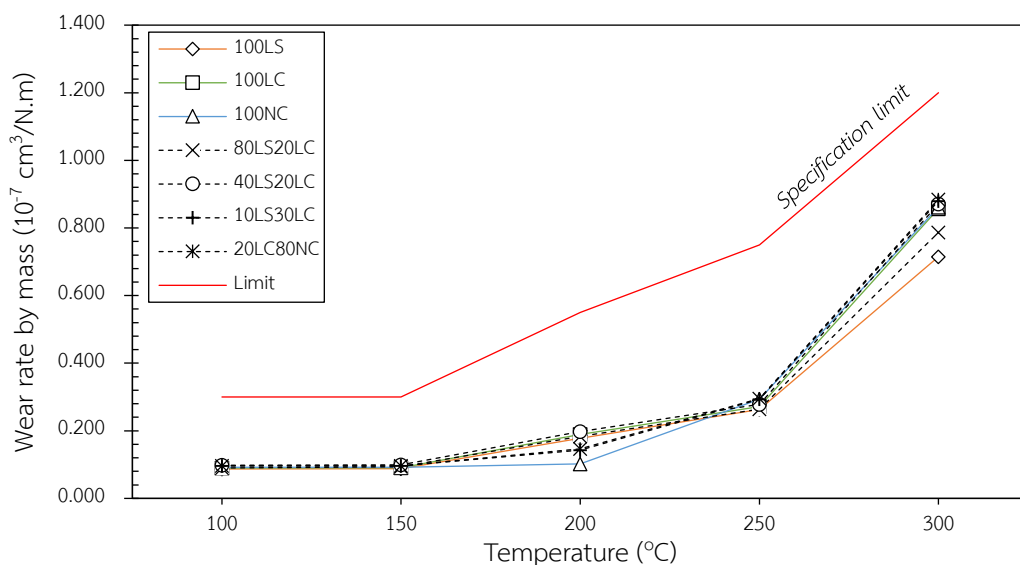
#### 4.2.6 อัตราการสึก

การทดสอบอัตราการสึกของผ้าเบรก เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าเมื่อนำผ้าเบรกไปใช้ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปผ้าเบรกเกิดการสึกไปมากเท่าไร ผลการวิเคราะห์อัตราการสึกของผ้าเบรกแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นมี (100LS 100LC 100NC 80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LS80NC) ค่าอัตราการสึกรวมโดยมวล มีค่าเท่ากับ 1.831 1.879 1.941 1.819 1.844 1.909 และ 1.919 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 การทดสอบค่าอัตราการสึกของผ้าเบรกจะบันทึกข้อมูลเฉพาะช่วงอุณหภูมิขาขึ้นเท่านั้น คืออุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส และจะบันทึกอีกครั้งเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ โดยกำหนดภาวะการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบความเสียดทานของผ้าเบรก ซึ่งใช้แรงกดคงที่ที่ 1 เมกกะปาสคาล ด้วยความเร็วของจาน 7 เมตรต่อวินาที ณ อุณหภูมิที่ 100-150 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการสึกค่อนข้างคงตัว แสดงว่ามีการสูญเสียเนื้อผ้าเบรกไปในอัตราเท่าเดิมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป 50 องศาเซลเซียส จากนั้นอัตราการสึกโดยมวลจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 150-250 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 10 เท่าของค่าอัตราการสึกที่วัดได้ ณ อุณหภูมิเริ่มต้น 100 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากการสลายตัวเมื่อโดนความร้อน (Thermal decomposition) ของเรซิน ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการเสื่อมสภาพเมื่อโดนความร้อน (Thermal degradation) ของหมู่เมทิลีน (Methylene) และฟีนอล [44] โดยทั่วไปแล้วเรซินจะมีเสื่อมสภาพเมื่อโดนความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 354 องศาเซลเซียส [44] แต่หากวัดค่าจากเรซินที่อยู่ในเนื้อผ้าเบรกที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วอุณหภูมิการเสื่อมสภาพของเรซินจะลดลงประมาณ 51 องศา

เซลเซียส ซึ่งจะมีค่าเสื่อมสภาพเมื่อโดนความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 303 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อทดสอบการใช้งานของผ้าเบรกที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [44] เนื่องจากเป็นผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic effect) ของฟีนอลิกเรซินต่ออนุภาคโลหะ เช่น ทองแดง และใยเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพเมื่อโดนความร้อนของฟีนอลิกเรซิน [44] ผ้าเบรกจึงมีค่าอัตราการสึกที่สูงกว่าอุณหภูมิอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการสึกโดยมวลของผ้าเบรกที่มีปริมาณของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กต่ำ (100LS 80LC20LC) มากจะให้ค่าอัตราการสึกโดยมวลต่ำกว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นชนิดอื่น ๆ โดยผ้าเบรก 100LS มีค่าอัตราการสึกโดยมวลต่ำสุดที่ 0.715



รูปที่ 4.12 อัตราการสึกโดยมวลรวมของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)



รูปที่ 4.13 อัตราการสึกโดยมวลของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นแต่ละชนิด (10 wt.%)

#### 4.2.7 สรุปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังจากใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

สมบัติทางกายภาพ ทางกลและประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นชนิดต่าง ๆ ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับค่ากำหนดของโรงงาน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 สรุปผลได้ว่า ความแตกต่างของชนิดเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ส่งผลต่อสมบัติของผ้าเบรกเล็กน้อย โดยพบว่า หากมีปริมาณของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กต่ำมาก จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง ความเป็นรูพรุนต่ำ ค่าความแข็งสูง ค่าไดนามิกมอดุลัสสูง แต่ปริมาณของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กต่ำ (LSD) ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดของเศษฝุ่น ส่งผลต่อสมบัติของผ้าเบรกเพียงเล็กน้อย และยังอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นด้วยกัน พบว่าเมื่อใส่เศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสมจะให้สมบัติของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกันมากกว่าการใส่เศษฝุ่นชนิดบริสุทธิ์ ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการจัดการเศษฝุ่นในการกลับมาใช้ของโรงงานได้

ตารางที่ 4.5 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์

สมบัติผ้าเบรก	Specification	ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์		
		100LS	100LC	100NC
Specific gravity	2.30-2.50	2.45±0.00	2.42±0.00	2.38±0.00
Porosity (%)	9.75-16.97	11.66±0.14	12.75±0.09	14.13±0.02
Hardness (HRR)	65-115	81.89±2.10	75.51±2.36	74.42 ±1.89
Young's modulus (GPa)	-	1.36±0.05	1.30±0.02	1.26±0.03
Average coefficient	0.34-0.50	0.374	0.377	0.378
Friction Stability	≤1	0.924	0.910	0.909
Total wear rate (x10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /N.m)	-	1.831	1.879	1.941

ตารางที่ 4.6 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม

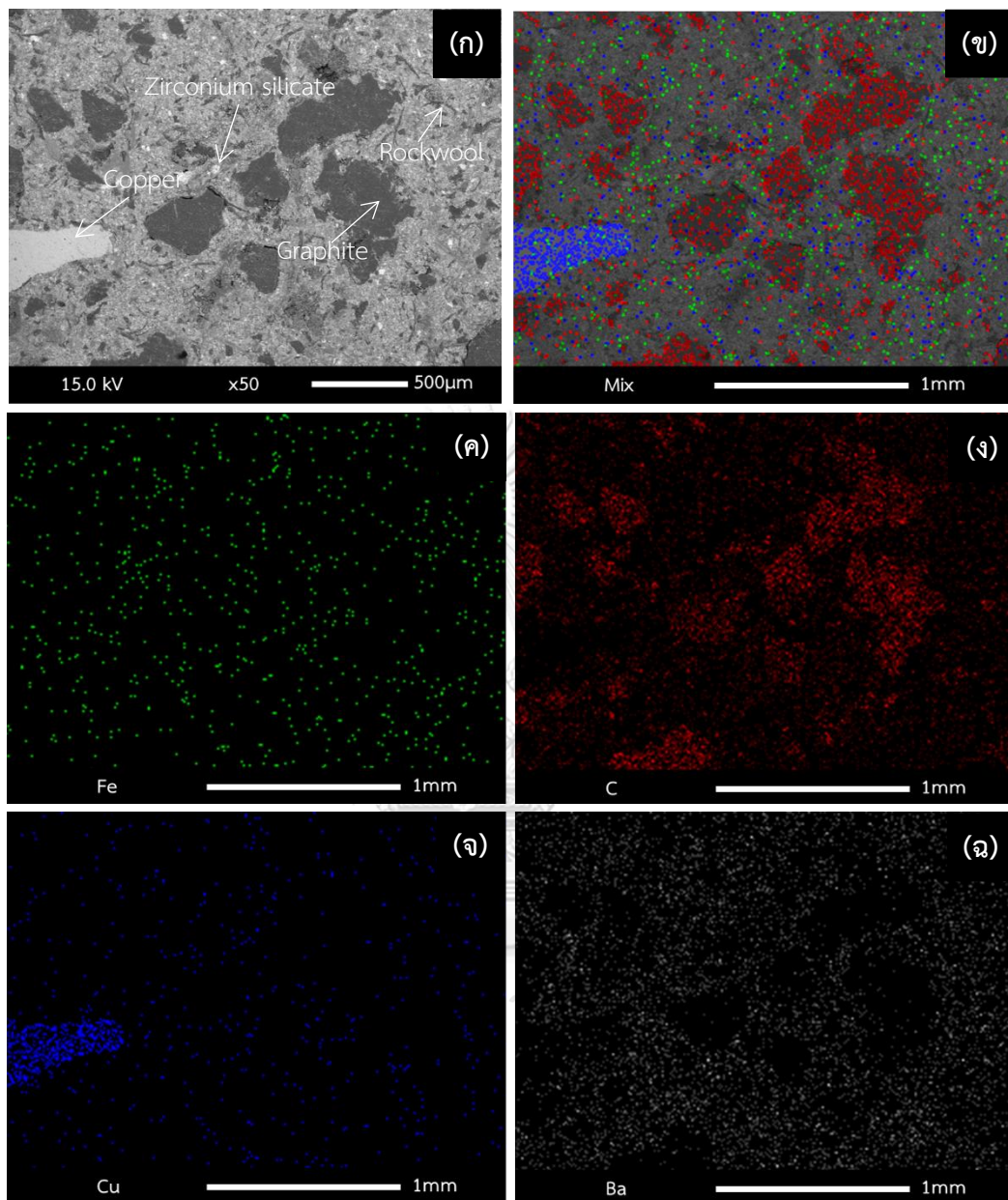
สมบัติผ้าเบรก	ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม			
	80LS20LC	40LS20LC	10LS30LC	20LC80NC
Specific gravity	2.45±0.00	2.43±0.00	2.43±0.00	2.43±0.00
Porosity (%)	11.72±0.15	12.41±0.07	12.43±0.04	12.37±0.28
Hardness (HRR)	80.23±1.13	77.13±1.85	74.96±1.23	76.89±1.61
Young's modulus (GPa)	1.34±0.05	1.32±0.04	1.27±0.01	1.26±0.02
Average coefficient	0.375	0.381	0.379	0.379
Friction Stability	0.927	0.925	0.905	0.917
Total wear rate (x10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /N.m)	1.819	1.844	1.909	1.919

### 4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าเศษฝุ่นที่เหมาะสมแก่การนำกลับมาใช้ ควรเป็นเศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสมซึ่งเป็นชนิดใดก็ได้ (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC หรือ 20LC80NC) เนื่องจากเมื่อนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแผ่นดิสก์เบรกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเสถียรภาพด้านคุณภาพมากกว่า นอกจากนี้ยังง่ายต่อการจัดเก็บและการควบคุมกระบวนการ ดังนั้นเมื่อได้ชนิดของเศษฝุ่นที่เหมาะสมแก่การนำกลับมาใช้แล้ว การทดลองในหัวข้อนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติผ้าเบรก เมื่อใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เข้าไปแทนที่วัตถุดิบเดิมยกเว้นฟีนอลิกเรซิน ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยจะใช้เศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสม 10LS30LC ซึ่งตรงกับสัดส่วนการผลิตปัจจุบันของโรงงาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้

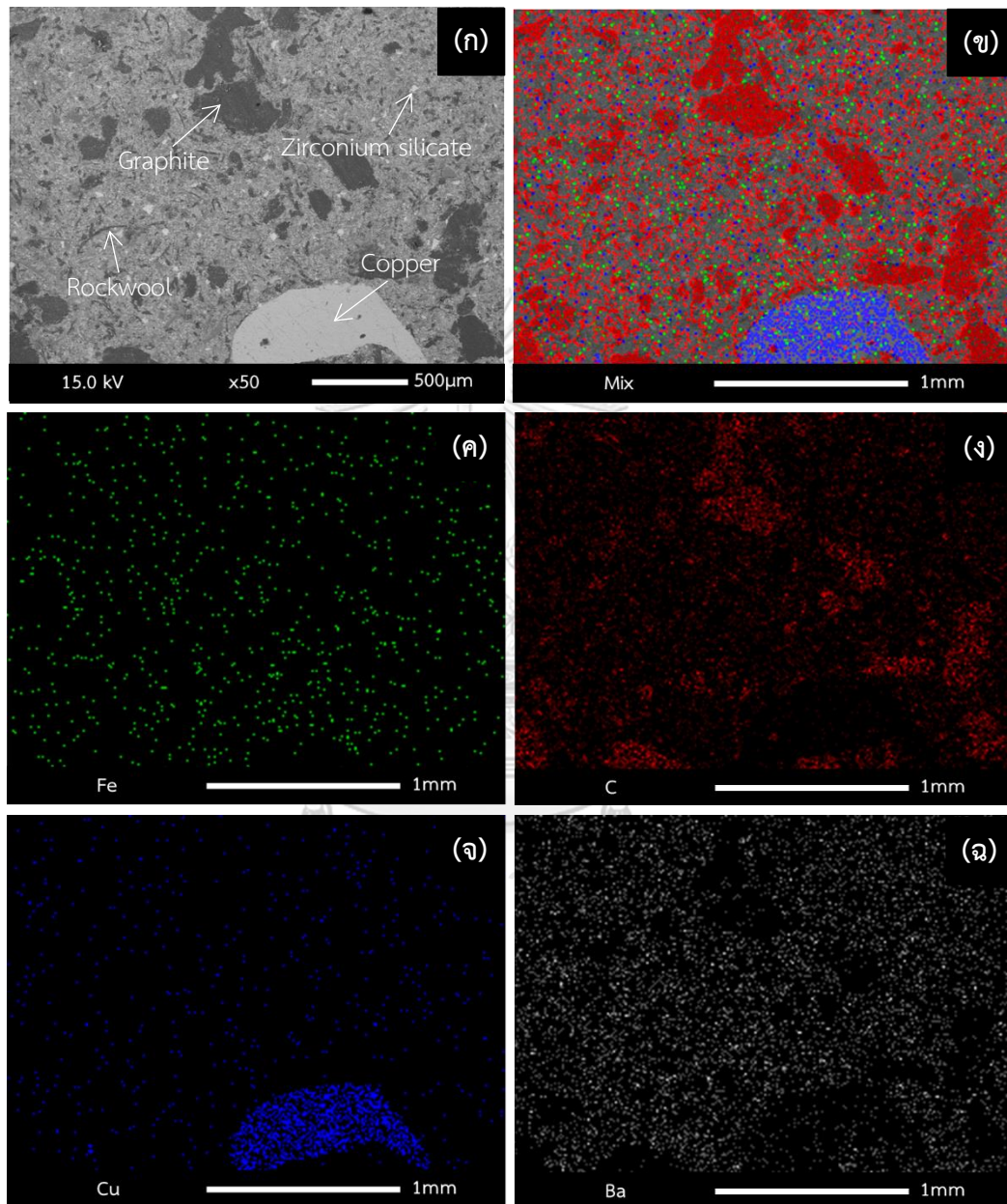
#### 4.3.1 ลักษณะผิวหน้าผ้าเบรก

การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่น โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% โดยน้ำหนัก (25RD) เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างค่าความเป็นรูพรุนที่สูงสุด (14.39%) และต่ำสุด (8.00%) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 (ก) และรูปที่ 4.15 (ก) เป็นการวิเคราะห์บนผิวหน้าผ้าเบรกด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเทคนิคภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Backscattered electron image หรือ SEI) ผลการวิเคราะห์ พบอนุภาคของแกรไฟต์ รีโอคูลู ทองแดงและเซอร์โคเนียมซิลิเกตบนผิวหน้าผ้าเบรกทั้งสองตัวอย่าง โดยสามารถสังเกตความแตกต่างได้จากสีที่ปรากฏ บริเวณพื้นผิวที่สว่างแสดงถึงบริเวณที่มีธาตุเลขอะตอมสูง ซึ่งพบว่าเซอร์โคเนียมมีเลขอะตอมสูงที่สุดเท่ากับ 40 จึงมีสีสว่างที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าผิวหน้าของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP) มีปริมาณช่องว่างมากกว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (25RD) สังเกตได้จากบริเวณผิวหน้าของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น จะพบตำแหน่งของสีดำรอบ ๆ อนุภาคแกรไฟต์มากกว่าที่พบในผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% จากรูปที่ 4.14 (ข-ฉ) และ 4.15 (ข-ฉ) แสดงการกระจายของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างผลลัพธ์จะออกมาในลักษณะจุดสีต่าง ๆ ที่มีขนาดของจุดสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคที่ตรวจพบ ผลการวิเคราะห์พบว่าการกระจายของอนุภาคคาร์บอนในผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง ซึ่งพบมากกว่าการกระจายตัวบนผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น เนื่องจากคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักในแกรไฟต์ โดยปกติแล้วแกรไฟต์ที่ใช้งานเป็นวัตถุดิบจะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 250-500 ไมครอน แต่เมื่อผ่านกระบวนการขัดตกแต่งอนุภาคส่วนหนึ่งจะมีขนาดเล็กลง โดยจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 71 ไมครอน ถึงขนาดไม่เกิน 250 ไมครอน ดังนั้นเมื่ออนุภาคเล็กลงจึงมีการกระจายได้ดีกว่าผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น



รูปที่ 4.14 (ก) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) ของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP)  
 (ข) การกระจายของธาตุนบนพื้นผิวผ้าเบรก (ค) การกระจายของธาตุเหล็ก (Fe) (ง) การกระจายของตัวธาตุ  
 คาร์บอน (C) (จ) การกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) (ฉ) การกระจายตัวของธาตุแบเรียม (Ba)

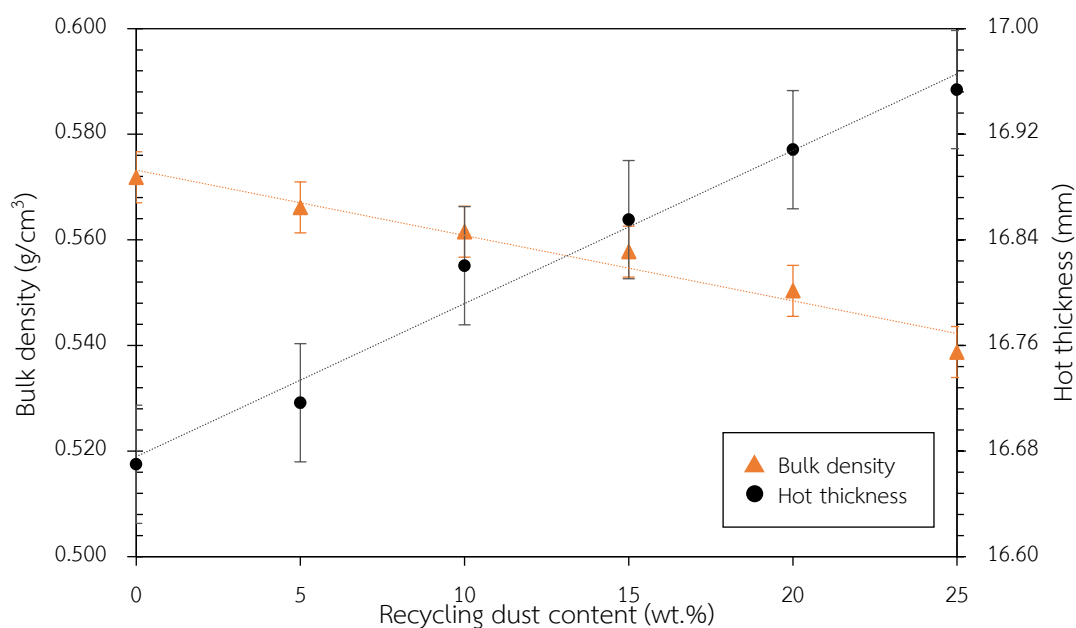




รูปที่ 4.15 (ก) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) ของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25%  
 (ข) การกระจายของธาตุนบนพื้นผิวผ้าเบรก (ค) การกระจายของธาตุเหล็ก (Fe) (ง) การกระจายของตัวธาตุคาร์บอน (C) (จ) การกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) (ฉ) การกระจายตัวของธาตุแบเรียม (Ba)

#### 4.3.2 ความหนาของชิ้นงานหลังกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

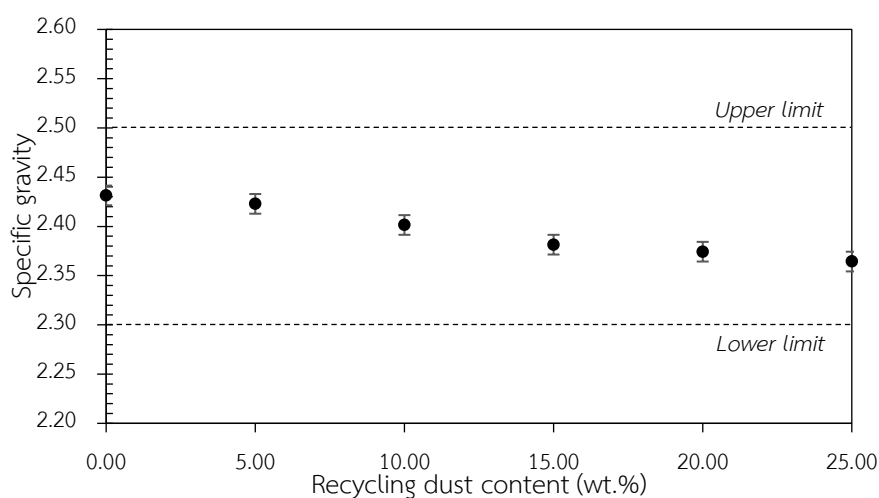
การวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานหลังกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP หรือผ้าเบรกที่มีเศษฝุ่น 0%) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่าง ๆ (ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก) ผลการวิเคราะห์พบว่า การใส่เศษฝุ่นเข้าไปในผ้าเบรกทำให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นประมาณ 0.28%-1.07% เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นซึ่งมีความหนาหลังการอัดขึ้นรูปร้อนประมาณ 16.67 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นพบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีความหนาของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปร้อนสูงสุดที่ 16.95 มิลลิเมตร และของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 5% มีความหนาต่ำสุดที่ 16.72 จากรูปที่ 4.16 พบว่าการเพิ่มปริมาณเศษฝุ่นในผ้าเบรก ทำให้ค่าความหนาของชิ้นงานหลังกระบวนการอัดพิมพ์ร้อนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ มีสาเหตุมาจากในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นจะมีตัวแปรคงที่ คือ น้ำหนักของวัตถุดิบเคมีที่ผสมแล้ว (Mixture) ขนาดของหลุม (Cavitation size) และความดันการอัด (Pressing pressure) ดังนั้นการที่ความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเกิดจากวัตถุดิบเคมีที่ผสมแล้วมีความหนาแน่นบัลค์ต่ำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าความหนาแน่นบัลค์ที่แตกต่างกันของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น จากรูปที่ 4.16 พบว่าความหนาแน่นบัลค์แปรผกผันกับความหนาของชิ้นงาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อวัตถุดิบเคมีที่ผสมแล้วมีค่าความหนาแน่นบัลค์ต่ำ ความหนาของชิ้นงานจะสูง ในทางตรงกันข้ามหากค่าความหนาแน่นบัลค์ของเคมีผสมสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปร้อนลดลง โดยการเพิ่มขึ้นของความหนาจะส่งผลต่อเวลาในการขัดตกแต่งหน้าผ้าเบรกเล็กน้อย



รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นบัลค์ของวัตถุดิบหลังผสมและความหนาของผ้าเบรกที่ใส่ปริมาณเศษฝุ่นต่างกัน

### 4.3.3 ความถ่วงจำเพาะ

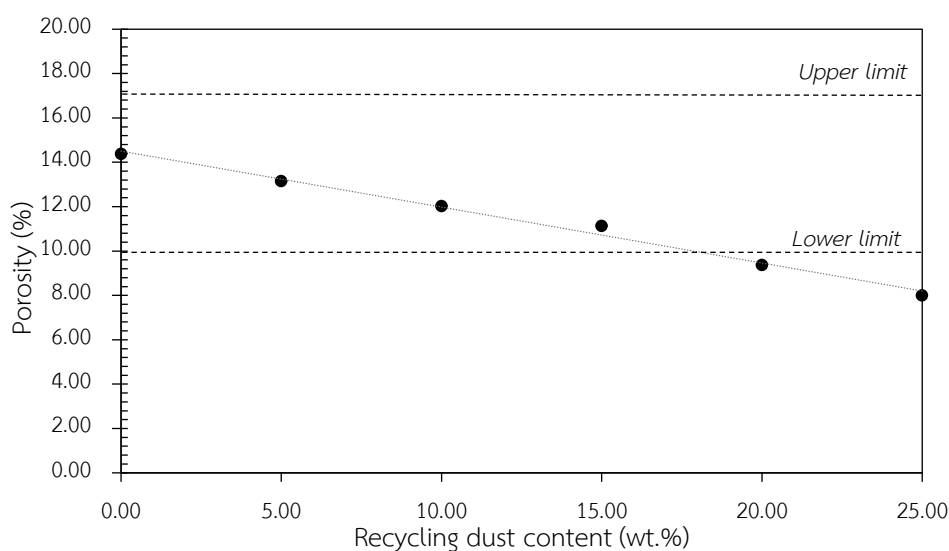
การวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิด 10LS30LC ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก (5RD 10RD 15RD 20RD และ 25RD) โดยใส่เศษฝุ่นเข้าไปแทนที่วัสดุชนิดอื่น ยกเว้นฟีนอลิกเรซินที่ยังคงสัดส่วนไว้เท่าเดิมที่ 5.50% เปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP) จากหัวข้อที่ 4.3.2 พบว่าเมื่อกำหนดให้ปริมาณของวัสดุเดิมมีหลังการผสมและปริมาณขนาดแม่พิมพ์ในกระบวนการพิมพ์เย็นมีค่าคงที่ แต่ความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนไป แสดงว่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน จากรูปที่ 4.17 พบว่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่มีการแทนที่ด้วยเศษฝุ่นปริมาณต่าง ๆ มีค่าต่ำกว่าผ้าเบรก CBP ประมาณ 0.35%-2.76% โดยผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นมีความถ่วงจำเพาะสูงสุดที่ 2.43 ในขณะที่ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 2.36 ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากกระบวนการตัดตกแต่งหน้าผ้าเบรกด้วยล้อเจียรเพชร ซึ่งจะทำให้วัสดุที่เป็นองค์ประกอบเดิมของผ้าเบรกมีขนาดลดลง และหลุดออกในลักษณะฝุ่นผง เช่น แกรไฟต์ที่ปกติแล้วเมื่อใช้งานเป็นวัสดุจะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 250-500 ไมครอน แต่เมื่อผ่านกระบวนการตัดตกแต่งอนุภาคส่วนหนึ่งจะมีขนาดเล็กลง เกิดความหลากหลายของขนาดและรูปร่างมากขึ้น โดยจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 71 ไมครอน ถึงขนาดไม่เกิน 250 ไมครอน อีกตัวอย่างหนึ่ง คือเส้นใยอะรามิด โดยปกติแล้วเส้นใยจะมีความยาวประมาณ 5.82 มิลลิเมตร [9] แต่เมื่อผ่านกระบวนการตัดตกแต่ง ความยาวที่ของเส้นใยที่วัดได้จะมีขนาดไม่เกิน 500 ไมครอน จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเศษฝุ่นมีความหลากหลายทั้งด้านขนาดและรูปร่าง ทำให้ความหนาแน่นบัลค์ของเศษฝุ่นจึงมีค่าค่อนข้างต่ำที่ 0.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเศษฝุ่นในผ้าเบรกโดยการลดปริมาณวัสดุชนิดอื่นลงจะส่งผลต่อความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานทำให้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาตามค่ากำหนดของโรงงาน พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่าง ๆ ตั้งแต่ 5%-25% โดยน้ำหนักยังสามารถคงค่าความถ่วงจำเพาะไว้ได้ตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด ซึ่งอยู่ในช่วง 2.30-2.50



รูปที่ 4.17 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน

#### 4.3.4 ความเป็นรูพรุน

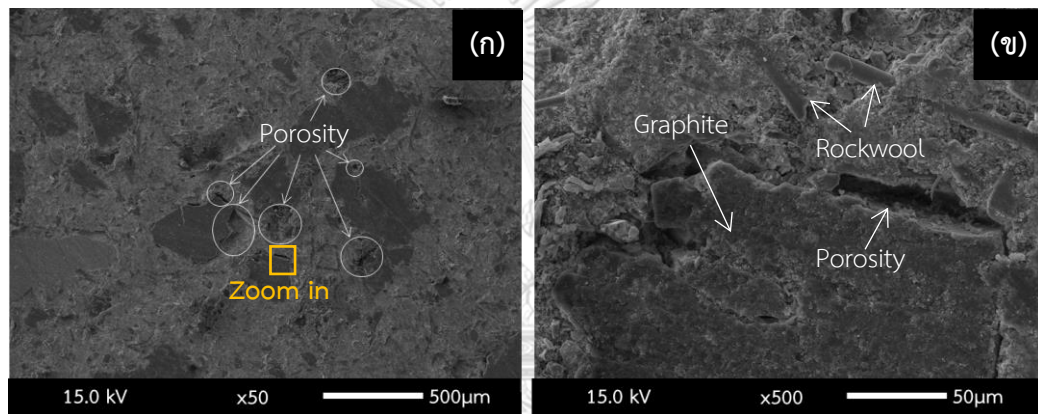
การวิเคราะห์ความเป็นรูพรุน เป็นการวัดเพื่อบอกปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อผ้าเบรก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ (CBP) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกมีปริมาณลดลงจากผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นประมาณ 8.53%-44.36% โดยที่ความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณร้อยละ 25 มีค่าความเป็นรูพรุนต่ำที่สุด และผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นมีค่าความเป็นรูพรุนสูงสุด ซึ่งค่าความเป็นรูพรุนที่ได้มาจากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.2 พบว่าความเป็นรูพรุนมีปัจจัยหลักมาจาก 2 ตัวแปร คือ ความถ่วงจำเพาะปรากฏ และความถ่วงจำเพาะทฤษฎีของชิ้นงานซึ่งเป็นความถ่วงจำเพาะทฤษฎีมาจากการคำนวณ (ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของวัตถุดิบที่ใส่ในผ้าเบรก) พบว่าตัวแปรทั้งสองไม่คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสูตรการผลิต ทั้งนี้ปัจจุบันโรงงานให้ความถ่วงจำเพาะของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้เท่ากับ 2.10 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเป็นรูพรุน พบว่าการใส่เศษฝุ่นเข้าไปเป็นวัตถุดิบในผ้าเบรกส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานลดลง



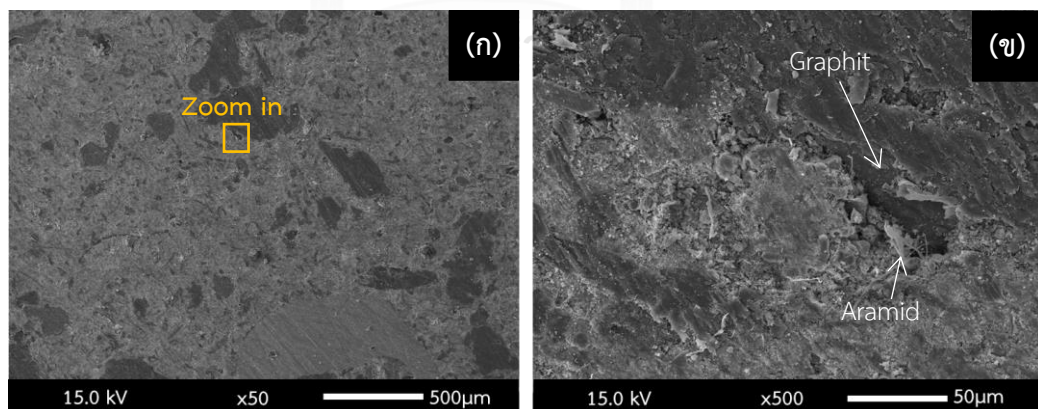
รูปที่ 4.18 ความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน

จากการทดสอบความถ่วงจำเพาะในหัวข้อที่ 4.3.1 พบว่าผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP) และผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% (25RD) มีปริมาณความเป็นรูพรุนเท่ากับ 14.39% และ 8.53% ตามลำดับ นำผ้าเบรกทั้งสองมาศึกษาลักษณะพื้นผิว ด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จาก

รูปที่ 4.19 (ก) และ 4.20 (ก) แสดงภาพถ่ายอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image หรือ SEI) ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า ผลการวิเคราะห์พบว่า รูพรุน (Porosity) บนผิวหน้าผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น มีลักษณะเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ สีดำเข้มเป็นร่องลึกอยู่บริเวณรอบ ๆ อนุภาคขนาดใหญ่ เช่น แกรไฟต์ หรือ ทองแดง เป็นต้น ซึ่งแตกต่างกับผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% เมื่อสังเกตบริเวณรอบอนุภาคแกรไฟต์ พบปริมาณพื้นผิวสีดำเข้มเล็กมาก จากนั้นทำการขยายภาพเป็นกำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ข) พบว่าผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นมีช่องว่างรอบ ๆ อนุภาคแกรไฟต์ที่เห็นได้ชัดเจน เป็นหลุมลึก ในทางตรงกันข้ามเมื่อสังเกตช่องว่างของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% บริเวณรอบ ๆ แกรไฟต์ พบว่าช่องว่างมีลักษณะตื้น ถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคเม็ดละเอียดอัดตัวแน่นเต็มช่องว่าง ดังรูปที่ 4.20 (ข)



รูปที่ 4.19 ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SEI) ของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (CBP)

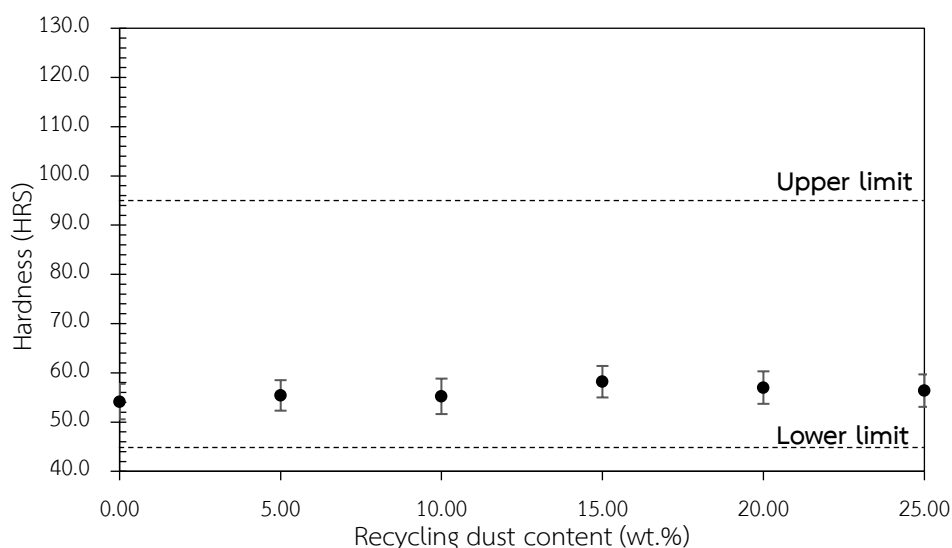


รูปที่ 4.20 ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SEI) ของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% (25RD)



#### 4.3.5 ความแข็ง

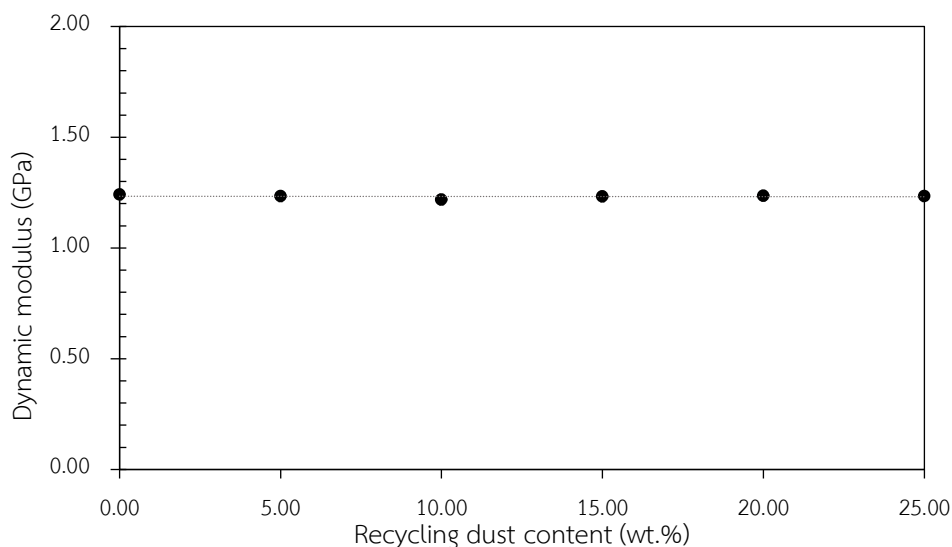
การวิเคราะห์ความแข็งของผ้าเบรกแบบบรอกเวลล์ สเกลเอส (HRS scale) เพื่อศึกษาความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใส่เศษฝุ่นเข้าไปแทนที่ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก) เปรียบเทียบกับผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าความแข็งของผ้าเบรกมีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน เนื่องจากการใส่เศษฝุ่นเข้าไปแทนที่วัสดุอื่นเป็นการแทนที่ด้วยวัสดุชนิดเดิมจึงมีสมบัติทางกายภาพเช่นเดิมทำให้ ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อใส่เศษฝุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป หากพิจารณาค่าความแข็งร่วมกับค่ากำหนดของโรงงาน พบว่าผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่นในปริมาณต่าง ๆ ตั้งแต่ 5%-25% โดยน้ำหนักยังมีค่าความแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 45-95 HRS



รูปที่ 4.21 ความแข็งของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน

#### 4.3.6 ไตนามิกมอดุลัส

การวิเคราะห์ค่ามอดุลัสของผ้าเบรกวัดได้ด้วยเครื่องทดสอบค่าไตนามิกโมดูลัสแบบอัลตราโซนิก เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการต่อต้านต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุ โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นกับผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่าง ๆ (ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก) จากรูปที่ 4.22 พบว่าค่ามอดุลัสของตัวอย่างทั้งที่ใส่เศษฝุ่นและไม่ใส่เศษฝุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ช่วงประมาณ 1.22-1.24 GPa ค่ามอดุลัสมีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกับความแข็งของผ้าเบรกซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางกัน



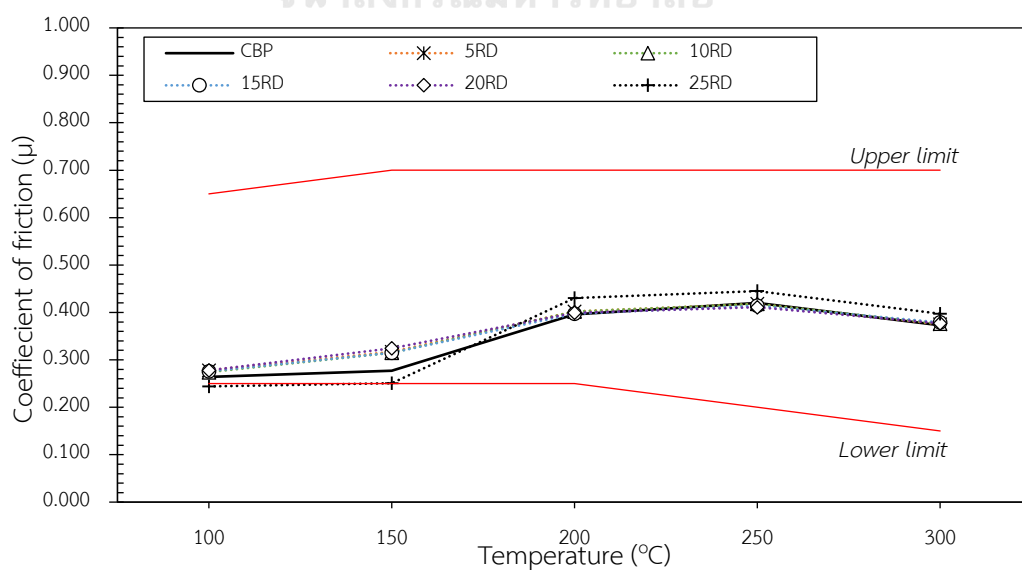
รูปที่ 4.22 โดนามิกของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน

#### 4.3.7 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกเพื่อพิจารณาความสามารถในการหยุด และ เสถียรภาพของความเสียดทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณ 5%-20% โดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยสูงกว่าผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นประมาณ 1.56%-2.07% โดยผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดย น้ำหนัก) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยที่ 0.359 0.358 0.357 และ 0.357 ตามลำดับ เทียบกับความ เสียดทานของผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.352 ในขณะที่ค่าเฉลี่ยความเสียดทานลดลงอย่าง กระทันหันเมื่อใส่เศษฝุ่นเข้าไปในปริมาณร้อยละ 25 อยู่ที่ 0.337 จากรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 การทดสอบ ค่าความเสียดทานของผ้าเบรกจะแบ่งอุณหภูมิออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิขาขึ้น (Heat up) เพิ่ม อุณหภูมิ 100 ไปที่ 300 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิลดลง (Cool down) ลดอุณหภูมิจาก 300 ไปที่ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงกดคงที่ที่ 1 เมกกะปาสคาล ด้วยความเร็วของจาน 7 เมตรต่อวินาที เมื่อเริ่ม การทดสอบ ณ อุณหภูมิขาขึ้นที่ 100 องศาเซลเซียส ค่าความเสียดทานของทุกตัวอย่างมีค่าต่ำที่สุด เมื่อ เปรียบเทียบกับช่วงอุณหภูมิต่อมา โดยค่าความเสียดทานของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) มีค่าอยู่ที่ 0.278 0.274 0.276 และ 0.278 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผ้าเบรก CBP ที่มีค่าความ เสียดทานอยู่ที่ 0.264 ยกเว้นผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% ที่มีค่าความเสียดทานเท่ากับ 0.244 ขณะเริ่มการใช้ งานผิวสัมผัสบริเวณหน้าผ้าเบรกยังไม่ราบขนานไปกับผิวโลหะของจานทดสอบ ทำให้พื้นผิวสัมผัสที่ผ้าเบรก สัมผัสกับจานมีพื้นที่น้อย ดังนั้นค่าความเสียดทานของผ้าเบรกเมื่อเริ่มใช้งาน ณ อุณหภูมิขาขึ้น 100 องศา เซลเซียสจึงมีค่าน้อยตามอย่างมีนัยสำคัญ [31] จากนั้นเมื่อผิวหน้าผ้าเบรกแนบสนิททั่วทั้งตัวอย่าง โดยราบ

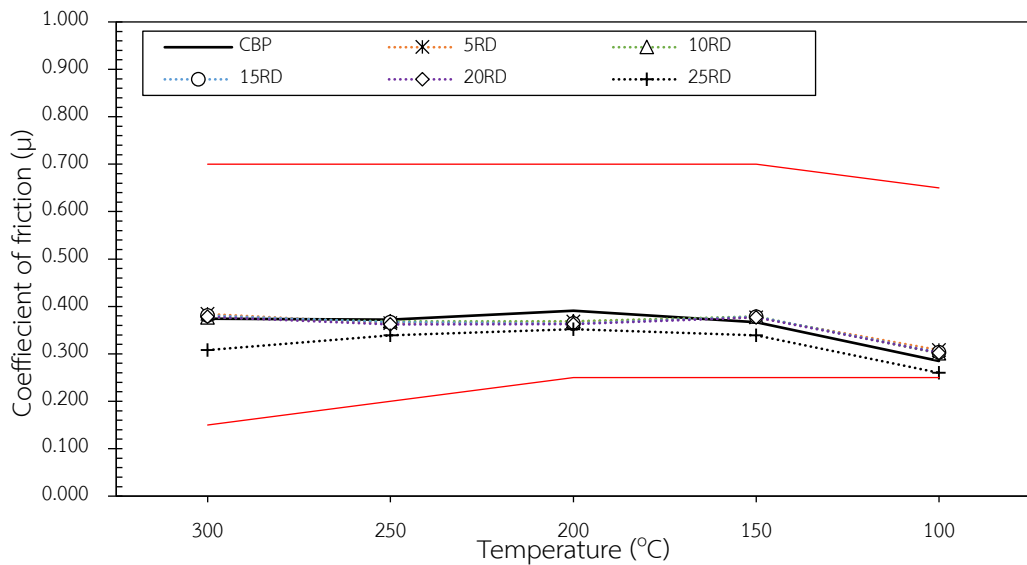
ขนานไปกับงานทดสอบ ระดับความเสียดทานจึงสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่อุณหภูมิขาขึ้น 150 จนถึง 250 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่าความเสียดทานสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นและไม่ใส่เศษฝุ่น ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นปริมาณ 5%-20% มีค่าความเสียดทานต่ำกว่าผ้าเบรก CBP เล็กน้อย (ประมาณ 0.48%-2.14%) ในขณะที่ค่าความเสียดทานของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีค่าสูงสุดที่ 0.445 และความเสียดทานของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 20% มีค่าต่ำสุดที่ 0.411 จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเสียดทานลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดเฟดจากความร้อน (Thermal fade) [41] กระบวนการคายแก๊สของเรซิน ทำให้สัมผัสระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกสัมผัสกันไม่ได้ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.5 ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความเสียดทานลดลง เมื่อเรซินคายแก๊สจนหมด ระดับความเสียดทานของผ้าเบรกจะค่อย ๆ มีค่าที่ ณ อุณหภูมิขาลงจาก 300 ถึง 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.24 แต่ระดับความเสียดทานของผ้าเบรกจะไม่กลับขึ้นไปสูงเท่ากับค่าก่อนการเฟด เนื่องจากเกิดสารประกอบออกไซด์ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.5 ทำให้ค่าความเสียดทานลดลงเล็กน้อย จากรูปที่ 4.25 พบว่าเสถียรภาพของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีค่าต่ำสุดที่ 0.756 ซึ่งความเสถียรภาพนี้มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเสียดทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปขณะเบรก ส่งผลต่อความรู้สึกการเหยียบเบรกของผู้ใช้งาน แต่พบว่าเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) และไม่ใส่เศษฝุ่นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (5RD 10RD 15RD และ 20RD) มีค่าที่ 0.859 0.856 0.863 และ 0.869 ตามลำดับ และค่าเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรก CBP คือ 0.838 พบว่ายิ่งค่าเสถียรภาพความเสียดทานค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผ้าเบรกมีเสถียรภาพของความเสียดทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ที่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส) ที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานได้ดี

### จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

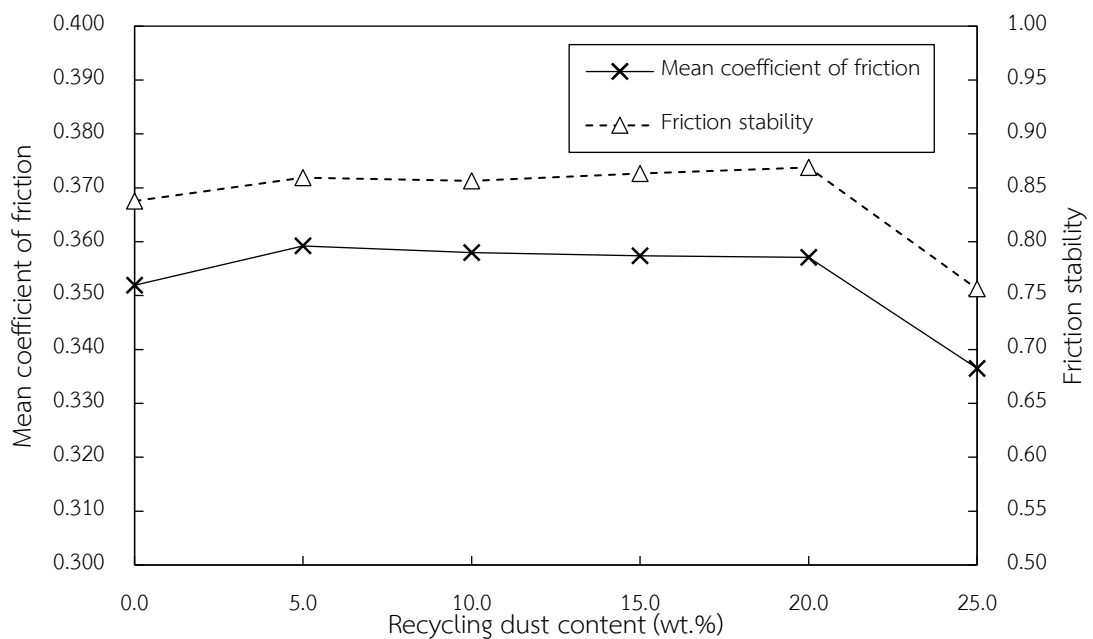


รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิขาขึ้นของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นปริมาณต่างกัน





รูปที่ 4.24 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิขาลงของผ้าเบรกที่ผสมเศษฝุ่นปริมาณต่างกัน

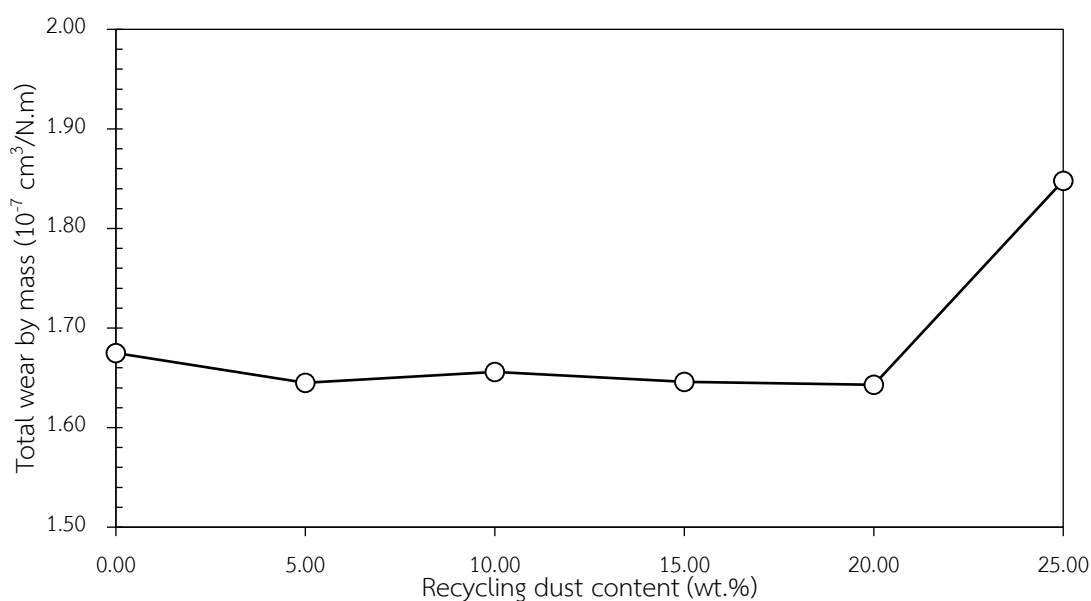


รูปที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยความเสียดทานและเสถียรภาพความเสียดทานของผ้าเบรก

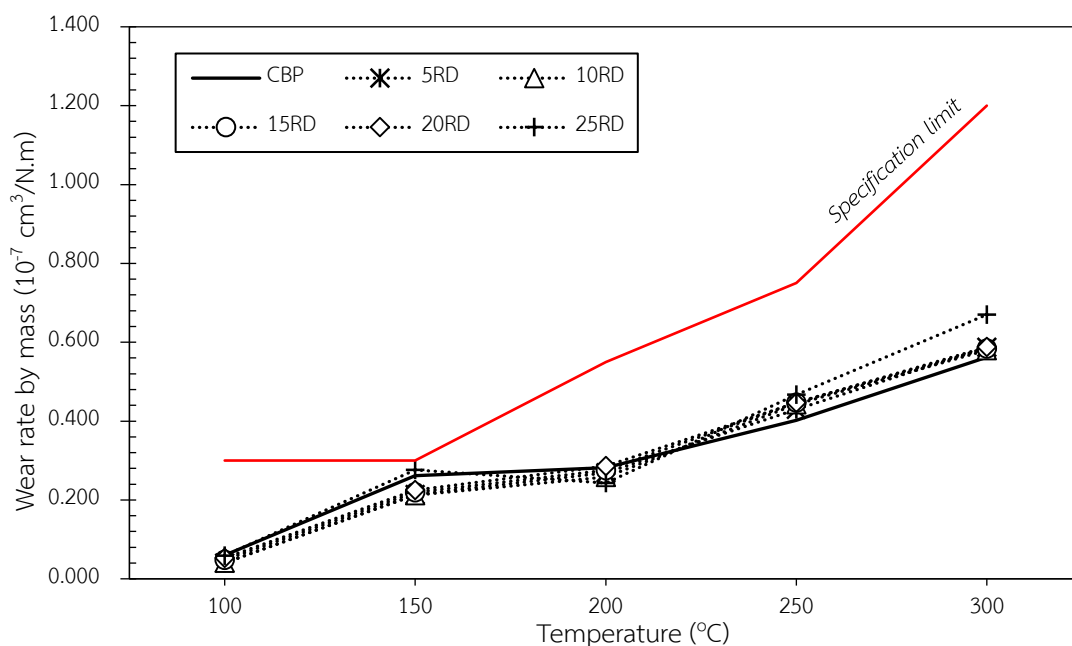
#### 4.3.8 อัตราการสึก

การทดสอบอัตราการสึกของผ้าเบรก เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าเมื่อนำผ้าเบรกไปใช้ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ผ้าเบรกเกิดการสึกไปมากเท่าไร ผลการวิเคราะห์อัตราการสึกของผ้าเบรกแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (ร้อยละ 5 10 15 และ 20) มีอัตราการสึกรวมโดยมวลต่ำกว่าผ้าเบรก

CBP เล็กน้อยประมาณ 1.13-1.91% โดยมีค่าอัตราการสึกกรวมโดยมวลของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น (5RD 10RD 15RD และ 20RD) มีค่าเท่ากับ 1.645 1.656 1.646 และ 1.643 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเบรก CBP ที่มีค่าอัตราการสึกกรวมโดยมวลเท่ากับ 1.675 ในขณะที่อัตราการสึกโดยรวมของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% มีค่าอัตราการสึกกรวมโดยมวลสูงที่สุดที่ 1.848 จากรูปที่ 4.27 การทดสอบค่าอัตราการสึกของผ้าเบรกจะบันทึกข้อมูลเฉพาะช่วงอุณหภูมิขาขึ้นเท่านั้น คืออุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส และจะบันทึกอีกครั้งเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ โดยกำหนดภาวะการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบความเสียดทานของผ้าเบรก ซึ่งใช้แรงกดคงที่ที่ 1 เมกกะปาสคาล ด้วยความเร็วของจาน 7 เมตรต่อวินาที โดยพบว่าอัตราการสึกโดยมวลจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 100-300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามกลไกการสลายตัวของสารที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.6



รูปที่ 4.26 อัตราการสึกโดยมวลรวมของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน



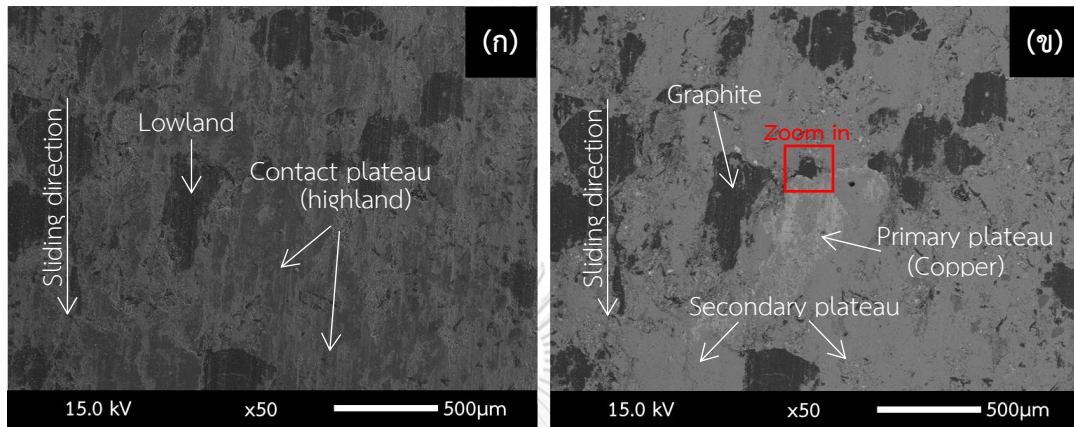
รูปที่ 4.27 อัตราการสึกโดยมวลของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณต่างกัน

#### 4.3.9 ลักษณะการสึกของผ้าเบรก

หลังจากทดสอบค่าความเสียดทานและอัตราการสึกของผ้าเบรก ด้วยเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผ้าเบรกแบบความเร็วคงที่ (Constant speed friction testing machine) นำชิ้นงานมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า ดังรูปที่ 4.28 จากรูปที่ 4.28 (ก) แสดงภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image หรือ SEI) ของตัวอย่างชิ้นงานหลังการทดสอบ พบว่าผ้าเบรกมีพื้นผิวขรุขระหลังการทดสอบ และมีลายเส้นแนวยาวขนานไปกับผิวหน้าผ้าเบรก แสดงถึงการเสียดสีระหว่างผ้าเบรกกับจานทดสอบ บริเวณสีเทามีลักษณะเป็นเนินสูง แสดงถึงความไม่เรียบของพื้นผิว เกิดขึ้นเมื่อผ้าเบรกเสียดสีกับจานทดสอบ เนื้อผ้าเบรกจะสึกและกลายเป็นผงขนาดเล็ก เมื่อโดนความร้อนและความดันที่เกิดขึ้นขณะเบรก จะก่อตัวเป็นเนินสัมผัส (Contact plateau) ใหม่บนหน้าผ้าเบรก [45] ในขณะที่บริเวณสีเทาเข้มแสดงพื้นผิวที่ต่ำกว่าซึ่งถูกล้อมรอบไปด้วยเนินสัมผัส บริเวณนี้เป็นที่อยู่ของแกรไฟต์ซึ่งเป็นสารหล่อลื่น ดังนั้นเศษจากการสึก (Wear debris) จึงไม่สามารถก่อตัวขึ้นบนพื้นผิวนี้ได้

รูปที่ 4.28 (ข) แสดงภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image หรือ BEI) ซึ่งจะช่วยให้ระบุวัสดุที่มีเลขอะตอมต่างกัน พบว่าบริเวณสีขาวแสดงถึงพื้นผิวที่มีธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าบริเวณอื่น นั่นคือ ทองแดง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นผิวสัมผัสปฐมภูมิ (Primary plateau) [20] เนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุที่แข็งกว่าบริเวณโดยรอบ เมื่อเกิดการเสียดสีบริเวณนี้จึงมีอัตราการสึกน้อยกว่าบริเวณโดยรอบ กลายเป็นแท่งสูงขึ้นมาจากพื้นผิวคอยดักเศษจากการสึก จนเศษจากการสึกเหล่านี้สะสมและก่อตัวอยู่หลัง

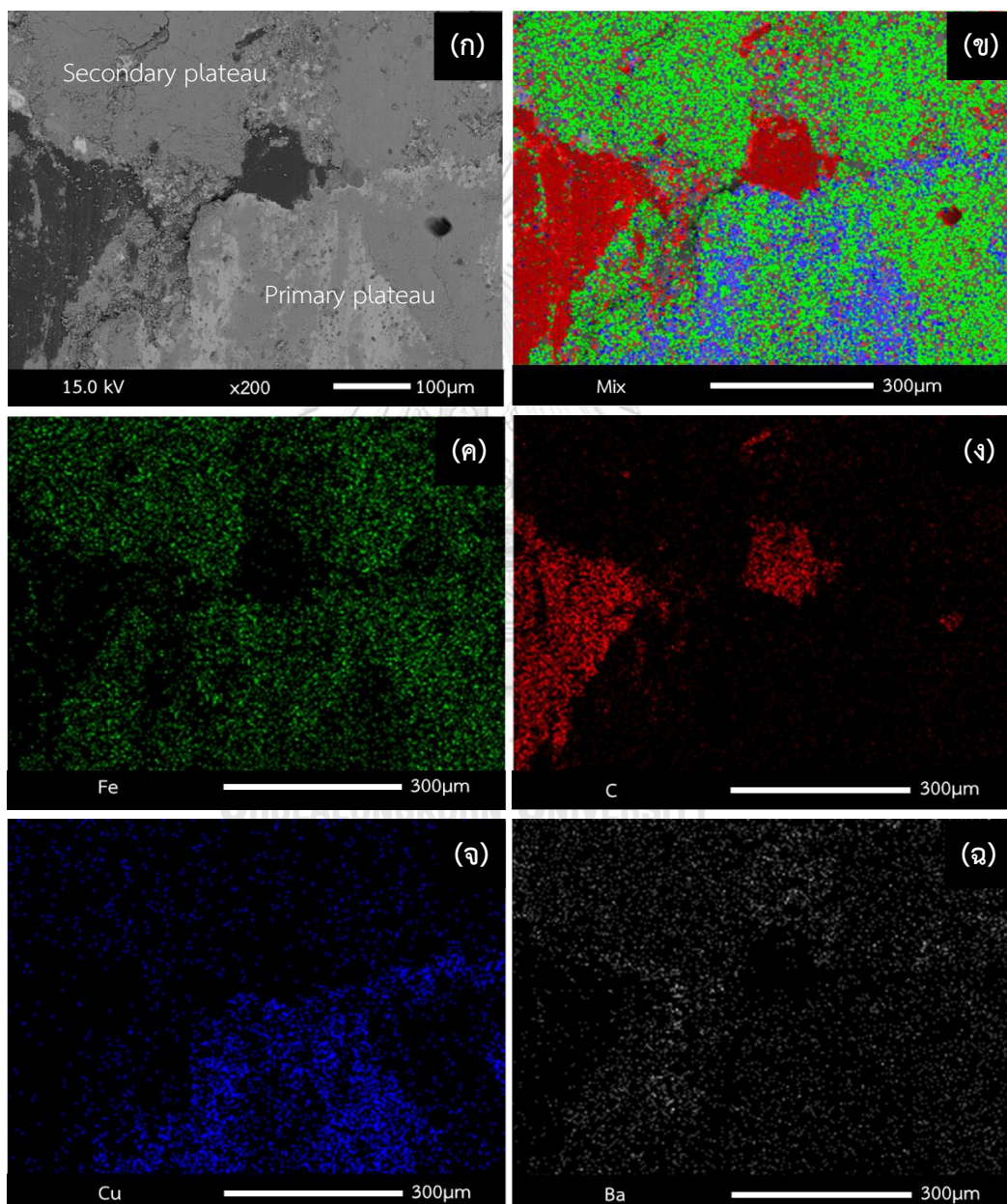
ผิวสัมผัสปฐมภูมิเกิดเป็นพื้นผิวทุติยภูมิ (Secondary plateau) ช่วยเพิ่มผิวสัมผัสและเพิ่มความเสียดทานให้แก่ผ้าเบรก ดังแสดงรูปที่ 4.28 (ข)



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายพื้นผิวผ้าเบรกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ก) ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SEI) และ (ข) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI)

รูปที่ 4.29 เป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณผิวหน้าผ้าเบรกที่กำลังขยาย 200 เท่า ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectrometer) และแสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในพื้นที่ที่กำหนด (X-ray mapping) บนพื้นผิวชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์พบว่า มีการกระจายตัวของธาตุเหล็ก (Fe) เคลือบอยู่บนผิวหน้าผ้าเบรก ซึ่งคาดว่า เป็นไอเอิร์นออกไซด์ (Iron oxide) จากงานเบรก เนื่องจากงานเบรก (gray cast iron) มีคาร์บอนและเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก [46] และผ้าเบรกที่นำมาวิเคราะห์นี้มีส่วนประกอบของใยเหล็ก ด้วยเหตุนี้เมื่อผ้าเบรกเสียดสีกับงานเบรก อนุภาคที่แข็ง (Hard particle) บนเนื้อผ้าเบรกจำพวกสารขัดถูจะติดกับงานทดสอบ เกิดการสึกของงานเป็นร่องลึก เมื่อพื้นผิวได้รับความร้อนและสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้สารประกอบไอเอิร์นออกไซด์ ซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับแมกนีไทต์ (Magnetite หรือ  $Fe_3O_4$ ) [47] วางตัวเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ เหนืองานทดสอบ ดังนั้นเมื่อวัสดุเสียดสีกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนพื้นผิวระหว่างวัสดุเสียดทานสู่งานเบรก และจากงานเบรกสู่วัสดุเสียดทาน [48] จึงพบธาตุเหล็กบนผิวผ้าเบรกดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ข, ค) จากรูปที่ 4.29 (ง) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอน พบว่าบริเวณนี้ไม่มีการเคลือบของชั้นออกไซด์ (Oxide layer) หรือชั้นฟิล์ม เนื่องจากเป็นที่อยู่ของอนุภาคแกรไฟต์ ซึ่งเป็นอนุภาคที่นิ่มและมีพื้นผิวลื่น ทำให้ไม่มีวัสดุอื่นมาเกาะติด จากรูปที่ 4.29 (จ) แสดงการกระจายตัวของทองแดง พบว่ามีธาตุทองแดงกระจุกตัวอย่างหนาแน่นอยู่บริเวณหนึ่งแสดงถึงการปรากฏของทองแดงในเนื้อผ้าเบรก และพบธาตุทองแดงกระจายอย่างกว้างขวางทั่วทั้งผิวหน้า โดยทั่วไปแล้วโลหะมีลักษณะเด่น คือ ความสามารถในการเปลี่ยนรูป (Transform) และส่งผ่าน (Transfer) แต่ในกรณีผ้าเบรกจากไม่เกิดการส่งผ่านโดยตรง เนื่องจากความเค้นเฉือน (Shear

stress) และการยึดเกาะ (Adhesion) ของโลหะในเนื้อผ้าเบรก แต่จะเกิดการเปลี่ยนรูปทางเคมีได้เป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของผิวหน้าผ้าเบรก [10] และเมื่อถูกเสียดสีจะหลุดออกเป็นเศษจากผ้าเบรก (Wear debris) กระจายไปทั่วหน้าผ้าเบรกก่อตัวเป็นชั้นผิวสัมผัส (Contact plateau) ต่อไป



รูปที่ 4.29 (ก) ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) (ข) การกระจายของธาตุบนพื้นผิวผ้าเบรก  
 (ค) การกระจายของธาตุเหล็ก (Fe) (ง) การกระจายของตัวธาตุดำคาร์บอน (C)  
 (จ) การกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) (ฉ) การกระจายตัวของธาตุแบเรียม (Ba)

#### 4.3.10 สรุปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังจากใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนปริมาณการใส่เศษฝุ่นในผ้าเบรกในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 เปรียบเทียบกับผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่ใส่เศษฝุ่น (Commercial brake pad หรือ CBP) แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษฝุ่น ทำให้ความหนาของชิ้นงานหลังกระบวนการอัดพิมพ์ร้อนสูงขึ้น ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ ส่งผลต่อค่าความแข็งและค่ามอดูลัสเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพของผ้าเบรก พบว่าผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นในปริมาณ 5%-20% มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกไถใกล้เคียงกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่ฝุ่นและมีเสถียรภาพความเสียดทานอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ในผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่น 25% นั้นทำให้ค่าความเสียดทานของผ้าเบรกลดลง และมีอัตราการสึกเร็วขึ้นซึ่งมีค่าแตกต่างกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่นค่อนข้างมาก เนื่องจากกระบวนการขัดตกแต่ง ทำให้ทองแดงที่เป็นส่วนประกอบในผ้าเบรกมีขนาดและรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป โดยปกติแล้วทองแดงจะมีลักษณะเป็นแท่ง ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวปฐมภูมิ (Primary plateau) ให้กับผ้าเบรก ขณะที่เกิดการเสียดสีระหว่างจานเบรกและผ้าเบรก ซึ่งมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความเสียดทานให้แก่ผ้าเบรก นอกจากนี้การลดลงของพื้นที่ปฐมภูมิทำให้เศษผ้าเบรก (Wear debris) ไม่มีที่ยึดเกาะ จึงไม่สามารถก่อตัวเป็นพื้นผิวทุติยภูมิ (Secondary plateau) ได้ ทำให้เนื้อผ้าเบรกหลุดออกได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของเศษฝุ่นทำให้ปริมาณทองแดงในสูตรที่ผลิตเชิงพาณิชย์ลดลง ส่งผลให้ค่าความเสียดทานลดลง และมีอัตราการสึกที่เพิ่มขึ้น

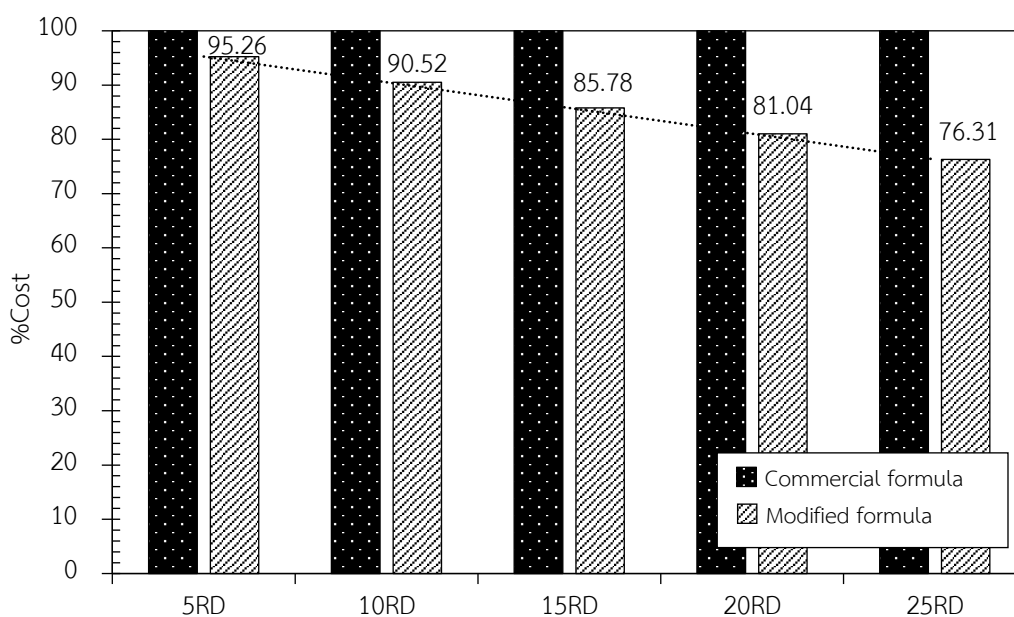
ตารางที่ 4.7 สมบัติของผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ปริมาณต่าง ๆ

สมบัติต่าง ๆ	CBP	ปริมาณเศษฝุ่นในผ้าเบรก				
		5RD	10RD	15RD	20RD	25RD
Hot Thickness (mm)	16.67±0.04	16.72±0.06	16.82±0.04	16.86±0.05	16.91±0.06	16.95±0.06
Specific gravity	2.43±0.01	2.42±0.01	2.40±0.01	2.38±0.01	2.37±0.01	2.36±0.01
Porosity (%)	14.39±0.02	13.16±0.01	12.04±0.01	11.14±0.02	9.38±0.01	8.00±0.05
Hardness (HRS)	54.16±3.60	55.41±3.10	55.22±3.60	58.20±3.20	57.00±3.30	56.385±0.05
Young's modulus (Gpa)	1.24±0.05	1.23±0.04	1.22±0.05	1.23±0.04	1.24±0.04	1.23±0.05
Average coefficient	0.352	0.359	0.358	0.357	0.357	0.337
Friction Stability	0.838	0.859	0.856	0.863	0.869	0.756
Total wear rate (x10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /N.m)	1.675	1.645	1.656	1.646	1.643	1.848



#### 4.4 การประเมินราคาต้นทุนของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

การศึกษาเพื่อหาการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วย โดยการใส่เศษฝุ่นเข้าไปในผ้าเบรก แทนที่วัสดุอื่นยกเว้นฟีนอลิกเรซิน ในปริมาณที่ต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก (5RD 10RD 15R 20RD และ 25RD) จากผลการวิเคราะห์สมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นใน ปริมาณต่างกันเทียบกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น พบว่าการใส่เศษฝุ่นในปริมาณตั้งแต่ 0%-20% ส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงสมบัติและประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่การใส่เศษฝุ่นเข้าไปในผ้าเบรกใน ปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก ทำให้ผ้าเบรกอัตราการสึกที่เร็วขึ้นกว่าเดิมถึง 10.33% ดังนั้นพบว่า การนำเศษฝุ่น มาใช้ให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์มากที่สุด คือ การใส่เข้าไปเป็นส่วนประกอบหนึ่งของผ้าเบรกในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 19.01% ต่อหนึ่งหน่วยการผลิต ซึ่งคิดเป็นมูลค่า ประมาณ 2,393,861.02 บาทต่อปี นอกจากนี้จะช่วยลดต้นทุนในการนำเข้าวัสดุแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่าย ด้านการขนส่งและการกำจัดทิ้งอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันมีมูลค่าสูงถึงปีละประมาณ 1,500,000 บาท



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนของผ้าเบรกใส่เศษฝุ่นปริมาณต่าง ๆ

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ลักษณะของเศษฝุ่น

เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ทั้ง 3 ชนิดมีขนาดอนุภาคหลากหลายโดยส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 90 เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 71 ไมครอนและมีรูปร่างไม่แน่นอน ความหนาแน่นหลังเคาะของเศษฝุ่นทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำ (LSD) เศษฝุ่นชนิดทองแดงดำ (LCD) และเศษฝุ่นชนิดไร้ทองแดง (NCD) มีความหนาแน่นหลังเคาะสูงสุดที่ 1.02 0.89 และ 0.81 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ชนิดธาตุที่พบในเศษฝุ่นทั้ง 3 ชนิดมีองค์ประกอบเดียวกัน แต่มีปริมาณของโลหะที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำ เศษฝุ่นชนิดทองแดงดำ และเศษฝุ่นชนิดไร้ทองแดง มีค่าปริมาณโลหะเท่ากับ 5.15% 3.43% และ 2.14% ตามลำดับ

##### 5.1.2 ชนิดที่เหมาะสมของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

การเลือกชนิดที่เหมาะสมของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลของสมบัติผ้าเบรกเมื่อทดสอบด้วยวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความเป็นรูพรุน ความแข็งแรง ไตนามิกมอดุลัส ค่าความเสียดทาน และอัตราการสึก การใช้เศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสม (80LS20LC 40LS20LC 10LS30LC และ 20LC80NC) มาใส่ในผ้าเบรกจะให้สมบัติผ้าเบรกที่ใกล้เคียงกัน และมีความแตกต่างระหว่างข้อมูลต่ำ นอกจากนี้ยังพิจารณาจากความสะดวกในการจัดการนำเศษฝุ่นกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากปัจจุบันโรงงานมีการผลิตผ้าเบรกหลากหลายชนิด เมื่อผ่านกระบวนการขัดตกแต่งจะทำให้ได้เศษฝุ่นที่มีความปะปนกันซึ่งนั่นก็คือ เศษฝุ่นชนิดเศษฝุ่นผสม ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการลงทุนในการคัดแยกเศษฝุ่นเพิ่มเติม

##### 5.1.3 ปริมาณของเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้

การเลือกปริมาณเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลของสมบัติผ้าเบรกเมื่อทดสอบด้วยวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความเป็นรูพรุน ความแข็งแรง ไตนามิกมอดุลัส ค่าความเสียดทาน และอัตราการสึก เปรียบเทียบกับสมบัติของผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ที่ไม่ใส่เศษฝุ่น นอกจากนี้ยังพิจารณาจากปัจจัยเรื่องต้นทุนการผลิตอีกด้วย โดยปริมาณของเศษฝุ่นที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ คือ ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาณนี้ยังคงค่าสมบัติต่าง ๆ ของผ้าเบรกไว้ในค่าที่ใกล้เคียงกับผ้าเบรกที่ไม่ใส่เศษฝุ่น และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 19.01% ต่อหนึ่งหน่วยการผลิต



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเศษฝุ่นที่นำมาใช้เมื่อได้รับความร้อน
2. ศึกษาปริมาณของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกเรื่องเสียง
3. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก



## บรรณานุกรม

- [1] A. Day, Braking of road vehicles, 2014.
- [2] ท. เขียวกิจจำรง, ผลกระทบการกำหนดมาตรฐานการใช้แร่ใยหินที่มีต่ออุตสาหกรรมผลิตผ้าเบรกในประเทศไทย, คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2006.
- [3] อ. รัตน์มาลากุล, การประยุกต์ใช้ผงยางนาโนในการผลิตผ้าเบรกรถยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2007.
- [4] A. Bonfanti, Low-impact friction material for brake pads, department of industrial engineering, University of Trento, Trento (Italy), 2016, p. 214.
- [5] S.K. Sinha, S.K. Biswas, Friction and wear behaviour of continuous fibre as cast Kevlar-phenolic resin composite, Journal of Materials Science 27(11) (1992) 3085-3091.
- [6] R.T. Spurr, Fillers in friction materials, Wear 22(3) (1972) 367-372.
- [7] Y. Jimbo, T. Mibe, K. Akiyama, H. Matsui, M. Yoshida, A. Ozawa, Development of high thermal conductivity cast iron for brake disk rotors, SAE International, 1990.
- [8] M.H. Choa, S.J. Kima, R.H. Baschb, J.W. Fashb, H. Jang, Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure, Tribology International 36(7) (2003) 537-545.
- [9] M.R. Sloan, Eco-efficient friction materials, Engineering, University of Exeter, 2008, p. 212.
- [10] R.C. Dante, Handbook of friction materials and their applications, 2016.
- [11] H. Metzler, The brake rotor - friction partner of brake linings, SAE International, 1990.
- [12] R.W. Rice, Grain size and porosity dependence of ceramic fracture energy and toughness at 22 °C, Journal of Materials Science 31(8) (1996) 1969-1983.
- [13] T. Takeichi, N. Furukawa, Epoxy resins and phenol-formaldehyde resins, 2012.
- [14] D. H.Buckley, The use of analytical surface tools in the fundamental study of

- wear, *Wear* 46(1) (1978) 19-53.
- [15] Cox, R. L., Engineered tribological composite: the art of friction materials development, SAE International 2012.
- [16] G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, Engineering tribology, 4th ed. 2013.
- [17] P.C. Verma, R. Ciudin, A. Bonfanti, P. Aswath, G. Straffelini, S. Gialanella, Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material, *Wear* 346-347(15) (2016) 56-65.
- [18] W. Österle, M. Griepentrog, T. Gross, I. Urban, Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes, *Wear* 251(1-12) (2001) 1469-1476.
- [19] J. Wahlstrom, A study of airborne wear particles from automotive disc brakes, department of machine design, Royal Institute of Technology, 2011, p. 37.
- [20] M. Eriksson, S. Jacobson, Tribological surfaces of organic brake pads, *Tribology International* 33 (2000) 817-827.
- [21] P.J. Bryant, P.L. Gutshall, L.H. Taylor, A study of mechanisms of graphite friction and wear, *Wear* 7(1) (1964) 118-126.
- [22] C. Monnin, D. Cividini, The saturation state of the world's ocean with respect to (Ba,Sr)SO<sub>4</sub> solid solutions, 2006.
- [23] J.R. Smyth, D.L. Bish, Crystal structures and cation sites in the rock-forming minerals, Allen & Unwin 1988.
- [24] W.A. Deer, FRS, R.A. Howie, J. Zussman, An introduction to the rock-forming minerals, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland 2013.
- [25] G. Nicholson, Facts about friction: A friction material manual almost all you need to know about manufacturing, Gedoran 1995.
- [26] C. Lucignano, F. Quadrini, V. Tagliaferri, Production of tribological composites by recycling Dust of friction products, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 27(18) (2008) 1975-1982.

- [27] B.K. Satapathy, Performance evaluation of non-asbestos fibre reinforced organic friction materials, Industrial Tribology, Machine Dynamic and Maintenance Engineering Center, Indian Institute of Technology, Delhi, 2002.
- [28] V.M. Malhotra, P.S. Valimbe, M.A. Wright, Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites, Fuel 81(2) (2002) 235-244.
- [29] C. Ruzaidi, H. Kamarudin, S.B. Jamaludin, M.M.A.B. Abdullah, R. Razak, Effect of palm slag filler size on the mechanical and wear properties of brake pad composites, 2013.
- [30] N. Rouge, C. Dubois, C. Vermillet, A. Chambaudet, Characterization of the open porosity of brake pads. I. development of 2-D porosity image analysis techniques, 1995.
- [31] I. Mutlu, I. Sugoza, A. Keskin, The effects of porosity in friction performance of brake pad using waste tire dust, Polimeros 25(5) (2015) 440-446.
- [32] B.A. Lee, New Regulations for Brake Pads Sold in California, in: D.o.t.s.c. California environmental protection agency (Ed.) 2016, p. 2.
- [33] T. Singh, A. Patnaik, R. Chauhan, P. Chauhan, Selection of brake friction materials using hybrid analytical hierarchy process and vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje approach, 2016.
- [34] E. Wegmann, A. Stenkamp, A. Dohle, Relation between Compressibility and Viscoelastic Material Properties of a Brake Pad, SAE International, 2009.
- [35] JSM-IT300 InTouchScope™ Scanning Electron Microscope.  
<https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-IT300.html>.
- [36] Vibratory sieve shaker analysette 3 pro. <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/sieving/vibratory-sieve-shakers/details/product/analysette-3-pro/>.
- [37] H. Sitepu, M.G. Kopylova, D.H. Quirt, J.N. Cutler, T.G. Kotzer, Synchrotron micro-X-ray fluorescence analysis of natural diamonds: first steps in identification of

- mineral inclusion insitu, *American Mineralogist* 95 (2005) 1740-1747.
- [38] C.R. Noller, *Chemistry of organic compounds*, 2nd ed., W. B. Saunders Company 1958.
- [39] F. Uzun, A. Bilge, *Application of Ultrasonic Waves in Measurement of Hardness of Welded Carbon Steels*, 2015.
- [40] Y. S. Lee, P. C. Brooks, D. Barton, D. A. Crolla, *A predictive tool to evaluate disc brake squeal propensity. Part 3: Parametric design studies*, 2003.
- [41] A.E. Anderson, *Friction and wear of automotive brakes*, 2nd ed. 1992.
- [42] J. Bouajila, G. Raffin, S. Alamercury, H. Waton, C. Sangar, M.F. Grenier-Loustalot, Phenolic resins (IV). thermal degradation of crosslinked resins in controlled atmospheres, *Polymers and Polymer Composites* 11(5) (2003) 345-357.
- [43] P. Filip, Z. Weiss, D. Rafaja, On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake application, *Wear* 252 (2002) 189-198.
- [44] C. Menapace, M. Leonardi, M. Secchi, A. Bonfanti, S. Gialanella, G. Straffelini, Thermal behavior of phenolic resin for brake pad manufacturing, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 10973 (2019).
- [45] P. Daniel Neis, N.F. Ferreira, J. Sukumaran, P. de baets, M. Ando, L. Tedesco Matozo, D. Masotti, Characterization of surface morphology and its correlation with friction performance of brake pads, 2015.
- [46] E. Cueva, A. Sinatora, W. Guesser, A. Tschitschin, *Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors*, 2003.
- [47] A. Lashin, O. Schneeweiss, M. Svoboda, *Kinetics of Oxidation of Fe-6Si*, 2008.
- [48] J. Kukutschová, V. Roubíček, K. Malachová, Z. Pavlíčková, R. Holuša, J. Kubačková, V. Mička, D. MacCrimmon, P. Filip, *Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact*, *Wear* 267(5-8) (2009) 807-817.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ภาคผนวก ก

#### การคำนวณสูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

กำหนดให้

1. สูตรผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้มาจากการดัดแปลงจากสูตรการผลิตผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ (CBP)
2. ปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ใส่ในสูตรดัดแปลงมีปริมาณเท่าเดิมกับสูตรการผลิตผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ (CBP)

#### ตัวอย่างการคำนวณ

การดัดแปลงสูตรการผลิตผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ เมื่อใส่เศษฝุ่นบริสุทธิ์ที่นำกลับมาใช้ในปริมาณร้อยละ 10

- สารตัวเติม	$0.9 \times 51.60$	= 44.60
- สารปรับแต่งความเสียดทาน	$0.9 \times 27.90$	= 25.11
- เส้นใย	$0.9 \times 15.00$	= 13.50
- เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้	$0.1 \times (51.60+27.90+15.00)$	= 9.45

โดย เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้จะเข้าไปแทนที่ทุกองค์ประกอบยกเว้น ฟีนอลิกเรซิน ที่มีปริมาณเท่าเดิมที่ 5.50%

ตารางที่ ก1 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นบริสุทธิ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	CBP	100LS	100LC	100NC
สารตัวเติม	51.60	46.44	46.44	46.44
สารปรับแต่งความเสียดทาน	27.90	25.11	25.11	25.11
เส้นใย	15.00	13.50	13.50	13.50
สารยึดติด	5.50	5.50	5.50	5.50
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	-	9.45	-	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	-	-	9.45	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดไร้ทองแดง	-	-	-	9.45

#### ตัวอย่างการคำนวณ

การดัดแปลงสูตรการผลิตผ้าเบรก CBP เมื่อใส่เศษฝุ่นผสม 80LS20LC ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

- สารตัวเติม	$0.9 \times 51.60$	= 44.60
- สารปรับแต่งความเสียดทาน	$0.9 \times 27.90$	= 25.11
- เส้นใย	$0.9 \times 15.00$	= 13.50
- เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	$0.8 \times (0.1 \times (51.60+27.90+15.00))$	= 7.56
- เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	$0.2 \times (0.1 \times (51.60+27.90+15.00))$	= 1.89

โดย เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้จะเข้าไปแทนที่ทุกองค์ประกอบยกเว้น ฟีนอลิกเรซิน ที่มีปริมาณเท่าเดิมที่ 5.50%



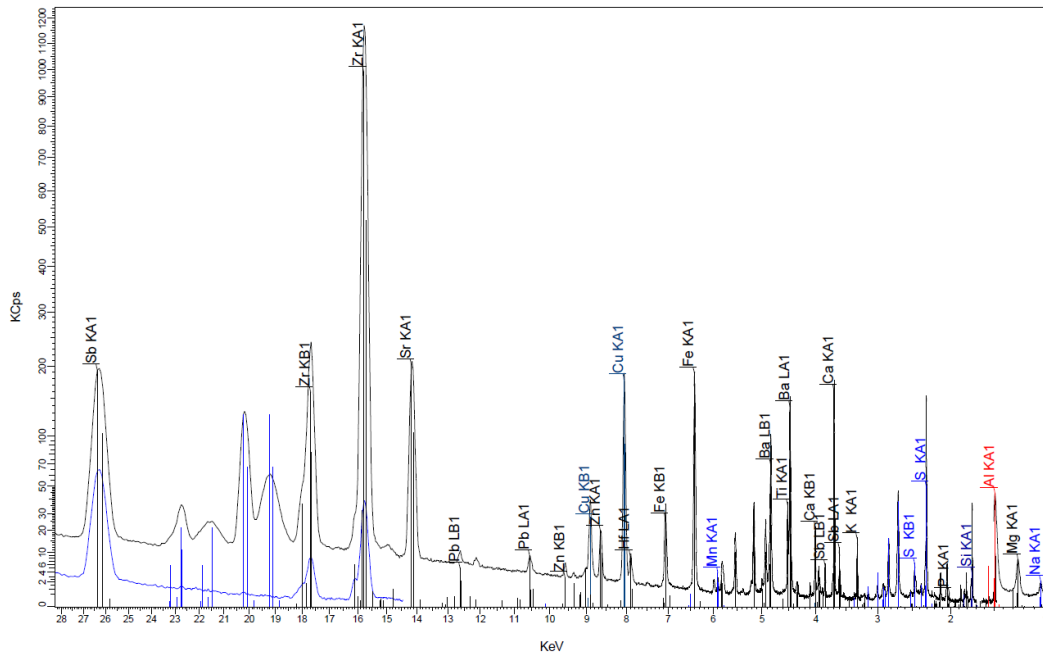
ตารางที่ ก2 สูตรการผลิตผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดฝุ่นประเภทเศษฝุ่นผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	80LS20LC	40LS20LC	10LS30LC	20LC80NC
สารตัวเติม	46.44	46.44	46.44	46.44
สารปรับแต่งความเสียดทาน	25.11	25.11	25.11	25.11
เส้นใย	13.50	13.50	13.50	13.50
สารยึดติด	5.50	5.50	5.50	5.50
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ	7.56	3.78	0.95	-
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดทองแดงดำ	1.89	1.89	2.84	1.89
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดไร้ทองแดง	-	3.78	5.67	7.56

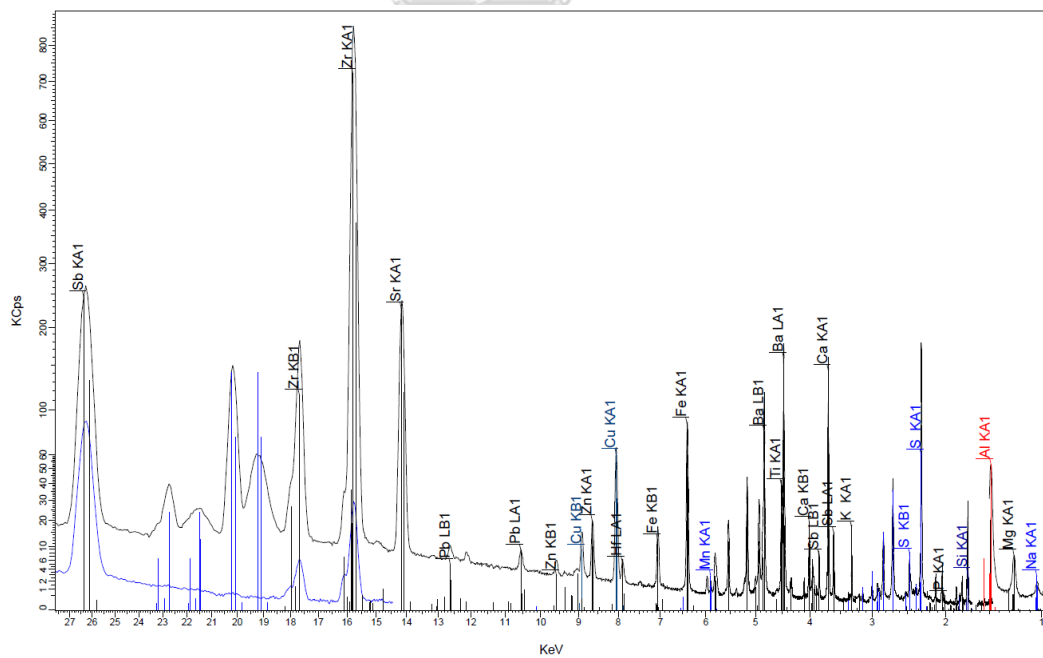


## ภาคผนวก ข

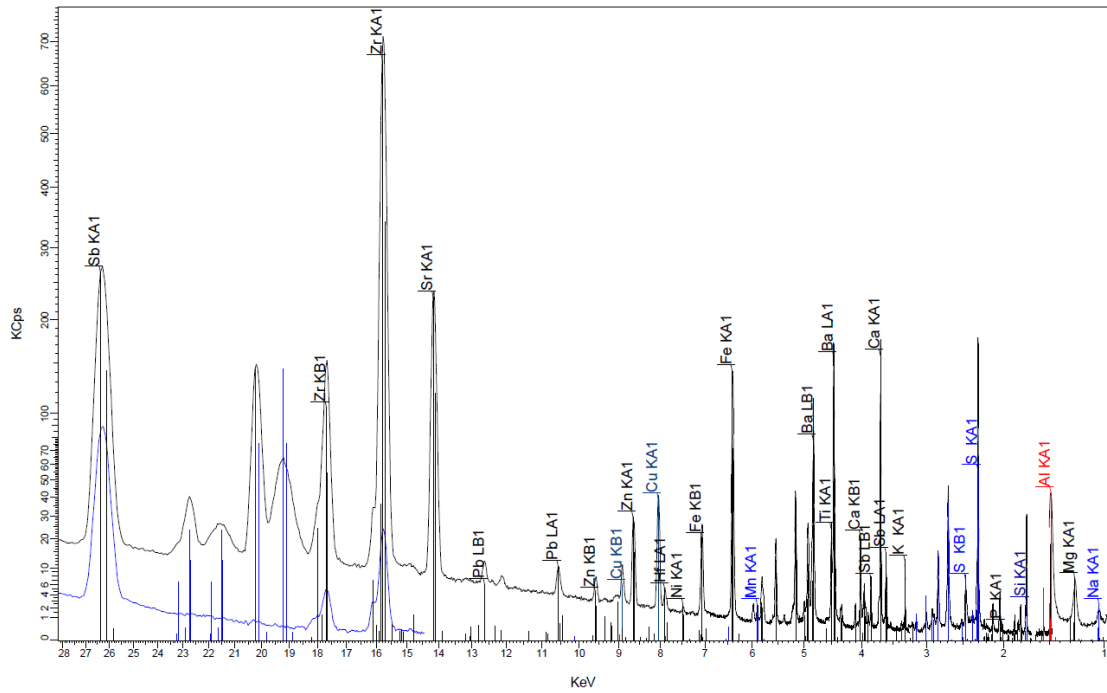
การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ XRF ของเศษแผ่นชนิดใยเหล็กดำ (LSD)



รูปที่ ข2 ผลการวิเคราะห์ XRF ของเศษแผ่นชนิดทองแดงดำ (LCD)



รูปที่ ข3 ผลการวิเคราะห์ XRF ของเศษฝุ่นชนิดไร้ทองแดง (NCD)



### ภาคผนวก ค

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเขย่าแบบตะแกรง

**การคำนวณร้อยละผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ**

1. การหาร้อยละของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด (%Recycling dust retained)

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{มวลของตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ} \times 100}{\text{มวลของตัวอย่างทั้งหมด}}$$

2. การหาร้อยละของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด (%Recycling dust passing)

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ผ่านตะแกรงชั้นบนสุด} = 100 - \text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ค้างบนตะแกรงชั้นบนสุด}$$

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ผ่านตะแกรงชั้นถัดมา} = \text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ผ่านตะแกรงชั้นก่อนหน้า} - \text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ค้างตะแกรงชั้นนั้น}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ค้างบนตะแกรงขนาด 100: } (0.24 \times 100/99.70) = 3.55\%$$

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ผ่านตะแกรงขนาด 25} : 100 - 0.13 = 99.87\%$$

$$\text{ร้อยละของเศษฝุ่นที่ผ่านตะแกรงขนาด 100} : 99.63 - 3.55 = 96.08\%$$

ตารางที่ ค1 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดใยเหล็กดำ LSD1

ขนาดตะแกรง	ขนาดอนุภาค	ปริมาณค้างตะแกรง (กรัม)	%ค้างตะแกรง	%ผ่านตะแกรง
25	+500	0.13	0.13	99.87
60	-500+250	0.24	0.24	99.63
100	-250+150	3.54	3.55	96.08
200	-150+71	5.34	5.36	90.72
ถาดรองที่บ	-71	90.45	90.72	-
	รวม	99.70	100.00	-

## ข้อมูลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ ค2 การกระจายตัวของเศษฝุ่นชนิดใยเหล็กดำ (LSD)

ASTM B214		%Passing					Average $\pm$ SD
Sieve no.	Diameter (um)	LSD1	LSD2	LSD3	LSD4	LSD5	
35	500	99.87	99.85	99.89	99.84	99.83	99.87 $\pm$ 0.000
60	250	99.63	99.63	99.60	99.53	99.62	99.58 $\pm$ 0.001
100	150	96.08	95.97	96.28	96.40	95.18	98.64 $\pm$ 0.001
200	71	90.72	90.29	90.79	90.65	89.61	93.29 $\pm$ 0.003
Pan	<71	0	0	0	0	0	-

ตารางที่ ค3 การกระจายตัวของเศษฝุ่นชนิดทองแดงดำ (LCD)

ASTM B214		%Passing					Average $\pm$ SD
Sieve no.	Diameter (um)	LCD1	LCD2	LCD3	LCD4	LCD5	
35	500	99.84	99.83	99.87	99.84	99.85	99.84 $\pm$ 0.014
60	250	99.57	99.51	99.59	99.58	99.61	99.58 $\pm$ 0.001
100	150	98.22	97.97	98.12	98.08	98.08	98.64 $\pm$ 0.001
200	71	93.09	92.78	92.83	92.38	92.73	93.29 $\pm$ 0.003
Pan	<71	0	0	0	0	0	-

ตารางที่ ค4 การกระจายตัวของเศษฝุ่นชนิดไร้ทองแดง (NCD)

ASTM B214		%Passing					Average $\pm$ SD
Sieve no.	Diameter (um)	NCD1	NCD2	NCD3	NCD4	NCD5	
35	500	99.83	99.89	99.90	99.87	99.84	99.87 $\pm$ 0.000
60	250	99.46	99.61	99.65	99.63	99.54	99.58 $\pm$ 0.001
100	150	98.50	98.71	98.73	98.70	98.58	98.64 $\pm$ 0.001
200	71	92.77	93.45	93.61	93.47	93.13	93.29 $\pm$ 0.003
Pan	<71	0	0	0	0	0	-

### ภาคผนวก ง

การคำนวณการประเมินราคาต้นทุนของผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

กำหนดให้

1. ผ้าเบรกรุ่นที่ใช้ในการทดลอง คือ ผ้าเบรกที่ใช้ในรถ FORD RANGER 4X4
2. สูตรของผ้าเบรกที่ใช้ในการศึกษา มีการผลิตในปริมาณ 126,288 กิโลกรัมต่อปี
3. การคำนวณราคาต่อหน่วย ให้ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกเท่ากับ 1 กิโลกรัม

#### ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณราคาวัตถุดิบของสูตรการผลิตผ้าเบรกเชิงพาณิชย์

ราคาต่อหน่วย = ปริมาณวัตถุดิบ x ร้อยละของวัตถุดิบแต่ละชนิด x ราคาวัตถุดิบต่อหน่วย

- สารตัวเติม	$1 \times 0.5160 \times 50.47$	=	26.04	บาทต่อกิโลกรัม
- สารปรับแต่งความเสียดทาน	$1 \times 0.2511 \times 112.19$	=	31.30	บาทต่อกิโลกรัม
- เส้นใย	$1 \times 0.1350 \times 255.87$	=	38.38	บาทต่อกิโลกรัม
- สารยึดติด	$1 \times 0.0550 \times 73.00$	=	4.02	บาทต่อกิโลกรัม

ดังนั้น ราคาวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ  $26.04 + 31.30 + 38.38 + 4.02 = 99.74$  บาทต่อกิโลกรัม

2. การคำนวณราคาวัตถุดิบของสูตรผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

- สารตัวเติม	$1 \times 0.4128 \times 50.47$	=	20.83	บาทต่อกิโลกรัม
- สารปรับแต่งความเสียดทาน	$1 \times 0.2332 \times 112.19$	=	25.04	บาทต่อกิโลกรัม
- เส้นใย	$1 \times 0.1200 \times 255.87$	=	30.70	บาทต่อกิโลกรัม
- สารยึดติด	$1 \times 0.0550 \times 73.00$	=	4.02	บาทต่อกิโลกรัม
- สารยึดติด	$1 \times 0.1890 \times 1.00$	=	0.19	บาทต่อกิโลกรัม

ดังนั้น ราคาวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ  $20.83 + 25.04 + 30.70 + 4.02 + 0.19 = 80.78$  บาทต่อกิโลกรัม

3. การคำนวณราคาต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงต่อปี เปรียบเทียบกับราคาวัตถุดิบของสูตรผ้าเบรก CBP

ราคาต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงต่อหน่วย = ต้นทุนวัตถุดิบของผ้าเบรก CBP - ต้นทุนวัตถุดิบผ้าเบรกที่ใส่ฝุ่น

ราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่ลดลงต่อปี = ราคาต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงต่อหน่วย x ปริมาณที่ผลิตต่อปี

- ราคาต้นทุนของวัตถุดิบเมื่อใส่เศษฝุ่นร้อยละ 20  $99.74 - 95.00 = 4.74$  บาทต่อกิโลกรัม
- ราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่ลดลงต่อปีเมื่อใส่เศษฝุ่นร้อยละ 20  $4.74 \times 126,288 = 2,393,861.02$  บาท

ตารางที่ ง1 ราคาวัตถุดิบต่อหน่วยของการผลิตแผ่นดิสก์เบรก 1 กิโลกรัม

วัตถุดิบ	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	ราคาต่อหน่วย					
		CBP	5RD	10RD	15RD	20RD	25RD
สารตัวเติม	50.47	26.04	24.74	23.44	22.14	20.83	19.53
สารปรับแต่งความเสียดทาน	112.19	31.30	29.74	28.17	26.61	25.04	23.48
เส้นใย	255.87	38.38	36.46	34.54	32.62	30.07	28.97
สารยึดติด	73.00	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้	1.00	-	0.05	0.09	0.14	0.19	0.24
ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)		99.74	95.00	90.26	85.52	80.78	76.04

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

ตารางที่ ง2 ราคาวัตถุดิบที่ลดลงต่อปี (ปริมาณการผลิตปีละ 126,288 กิโลกรัม)

ตัวอย่าง	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	ราคาที่ลดลงต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	%ลดลง	ราคาที่ลดลงต่อปี (บาทต่อกิโลกรัม)
CBP	99.74	-	-	-
5RD	95.00	4.74	4.75%	598,465.26
10RD	90.26	9.48	9.50%	1,196,930.51
15RD	85.52	14.22	14.25%	1,795,395.77
20RD	80.78	18.96	19.01%	2,393,861.02
25RD	76.04	19.01	23.76%	2,992,326.28

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

## ภาคผนวก จ

## ความถ่วงจำเพาะและความเป็นรูปพรุนของผ้าเบรก

## จ1. การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรก

$$\text{ความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ} - \text{น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ}}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี} = \frac{100}{\frac{\text{เศษส่วนโดยน้ำหนัก1}}{\text{ความถ่วงจำเพาะ1}} + \frac{\text{เศษส่วนโดยน้ำหนัก2}}{\text{ความถ่วงจำเพาะ2}} + \dots}$$

## จ2. การคำนวณค่าความเป็นรูปพรุนของผ้าเบรก

$$\text{ค่าความเป็นรูปพรุนของชิ้นงาน} = \frac{(\text{ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี} - \text{ความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง}) \times 100}{\text{ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี}}$$

กำหนดให้

ตารางที่ จ1 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใส่ในผ้าเบรก

ส่วนประกอบในผ้าเบรก	ค่าความถ่วงจำเพาะ
สารเติมเต็ม	2.80
สารปรับแต่งความเสียดทาน	3.14
เส้นใย	4.30
สารยึดติด	1.25
เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้	2.10

## ตัวอย่างการคำนวณ

1. ผ้าเบรกเชิงพาณิชย์ (Commercial brake pad หรือ ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้)

$$\begin{aligned} 1.1 \text{ ความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง} \\ &= 188.78 / (188.78 - 110.94) \\ &= 2.43 \end{aligned}$$



1.2 ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี

$$= 100 / ((51.60/2.80) + (27.90/3.14) + (15.00/4.30) + (5.50/1.25))$$

$$= 2.84$$

1.3 ความเป็นรูปพรุนของชิ้นงาน

$$= ((2.84 - 2.41) \times 100) / 2.84$$

$$= 14.46\%$$

2. ผ้าเบรกที่ใส่เศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.1 ความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง

$$= 187.84 / (187.84 - 108.06)$$

$$= 2.37$$

2.2 ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี

$$= 100 / ((41.28/2.80) + (22.32/3.14) + (12.00/4.30) + (5.50/1.25) + (18.90/2.10))$$

$$= 2.63$$

2.3 ความเป็นรูปพรุนของชิ้นงาน

$$= ((2.63 - 2.37) \times 100) / 2.63$$

$$= 9.84\%$$

### ข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะและค่าเป็นรูปพรุน

ตารางที่ จ2 น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ (กรัม)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ (กรัม)						
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
CBP	188.20	190.14	188.49	188.78	190.19	189.30	189.95
5RD	189.61	188.79	189.04	186.92	192.48	191.15	189.38
10RD	187.88	189.65	190.03	189.13	189.79	189.47	188.19
15RD	185.73	187.11	187.85	187.70	189.36	187.75	187.31
20RD	183.94	187.33	187.43	185.64	187.84	186.02	185.97
25RD	189.94	187.33	187.43	185.64	187.84	186.02	185.97

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

ตารางที่ จ3 น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)						
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
CBP	110.11	112.30	111.09	110.94	112.71	111.56	111.14
5RD	110.91	111.18	111.25	109.22	113.82	112.32	110.75
10RD	108.99	110.83	111.14	110.24	110.98	110.70	109.59
15RD	107.27	108.76	109.39	108.75	110.60	109.16	107.70
20RD	105.60	108.98	108.88	107.12	108.60	107.78	107.73
25RD	105.60	108.98	108.88	107.12	109.60	107.78	107.73

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

ตารางที่ จ4 ค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเศษฝุ่นที่นำกลับมาใช้

ตัวอย่าง	ค่าความถ่วงจำเพาะ							เฉลี่ย
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	
CBP	2.41	2.44	2.44	2.43	2.45	2.44	2.41	2.43
5RD	2.41	2.43	2.43	2.41	2.45	2.42	2.41	2.42
10RD	2.38	2.41	2.41	2.40	2.41	2.41	2.39	2.40
15RD	2.37	2.39	2.39	2.38	2.40	2.39	2.35	2.38
20RD	2.35	2.39	2.39	2.36	2.37	2.38	2.38	2.37
25RD	2.25	2.39	2.39	2.36	2.40	2.38	2.38	2.36

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

ตารางที่ จ5 ค่าความถ่วงจำเพาะและความเป็นรุกรุนของผ้าเบรก

ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะทฤษฎี	ความถ่วงจำเพาะจากการทดลอง	%ค่าความเป็นรุกรุน
CBP	2.84	2.43	14.46%
5RD	2.78	2.42	13.09%
10RD	2.73	2.40	12.11%
15RD	2.68	2.38	11.15%
20RD	2.63	2.37	9.84%
25RD	2.58	2.36	8.55%

\*\*หมายเหตุ CBP คือ สูตรผ้าเบรกที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (ผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนประกอบของเศษฝุ่น)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กนกวรรณ ชนะต์สกร
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดสงขลา ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	16 หมู่ 6 ถนนกาญจนวนิช-ทุ่งไต้มน ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
ผลงานตีพิมพ์	<p>K. Chanadusakorn, K. Kaewlob and P. Reubroycharoen “Effect of Recycling Dust as Filler on Properties of Brake Pad”, in session Industrial Chemistry and Innovation: Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, February 7th, 2019, BITEC, Bangna, Bangkok, Thailand.</p> <p>K. Chanadusakorn, K. Kaewlob and P. Reubroycharoen “Effect of Recycling Dust as Filler on Properties of Brake Pad”, in session Industrial Chemistry and Innovation: Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, Key Engineering Materials (In press).</p> <p>K. Chanadusakorn, K. Kaewlob and P. Reubroycharoen “Effects of Recycling Dust Composition on Performance of Brake Pad”, in session Smart and Advanced Materials: The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology” (PPC &amp; PETROMAT Symposium 2019), May 30th, 2019, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.</p>