

การพัฒนากระบวนการจัดตกแต่งเพื่อการปรับปรุงความเป็นรสนาของผิวผ้าเบรก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GRINDING PROCESS DEVELOPMENT FOR BRAKE PAD SURFACE FLATNESS  
IMPROVEMENT



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	การพัฒนากระบวนการตัดตกแต่งเพื่อการปรับปรุงความ เป็นระนาบของผิวผ้าเบรก
โดย	น.ส.ศวิตา ฉายสกุล
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

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



# # 6072183723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Brake pad manufacturing process, Grinding process, Surface flatness,  
Full factorial design of experiment

Savita Chaysakul : GRINDING PROCESS DEVELOPMENT FOR BRAKE PAD  
SURFACE FLATNESS IMPROVEMENT. Advisor: Assoc. Prof. Thiti  
Bovornratanaraks, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. TONPHONG KAEWKONGKA,  
Ph.D.

The objective of this research is to study the effects of input parameters, i.e. depth of cut, surface area and feed rate, on surface flatness of non-asbestos organic brake pad after grinding with man-operated grinding machine. Full factorial design was chosen as the design of experiment method with 3 factors and 3 levels including surface area of 2602, 5948 and 7568 mm<sup>2</sup>, depth of cut 0.5, 1 and 1.5 mm and feed rate at 9.5, 11.5 and 15.5 rpm. Flatness values were measured using a dial gauge. Main plot effects and interaction plot were established to analyze the results. The results showed that all parameters except depth of cut and feed rate interaction had significant effects on the output response. Meanwhile, the change in surface area gave the biggest impact on surface flatness. Effect of material hardness on surface flatness was also studied, however, the variation of friction material hardness at the level of 60, 90 and 100 HRR were not significantly affected in accordance with 95 percent of significant level. Apart from statistical analysis, the surface characteristics of the brake pad with each grinding condition were plotted using MATLAB surface plot. The graphical results showed the relevant results agreed with the statistical ones.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในด้านแนวทางในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ภายนอกมหาวิทยาลัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สละเวลาและให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) สำหรับทุนสนับสนุนการศึกษาและวิจัยภายใต้โครงการย่อยที่ 1/2560 โครงการยกระดับความสามารถของอุตสาหกรรมขนาดกลางด้านงานวิจัยพัฒนาและอุตสาหกรรม (Research Development and Industrialization capability of Medium enterprise) ภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือ โครงการยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม

ขอขอบพระคุณ คุณนันทวุฒิ แซ่ฉิน และคุณเอกนัย กาญจนวราภรณ์ จากฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท คอมแพ็ค อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล (1994) จำกัด ที่คอยสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย ร่วมทั้งให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยจนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆทุกคนที่คอยมอบความรัก ความห่วงใย และกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา

ศวีตา ฉายสกุล

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ผ้าเบรกและกระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	4
2.1.1 ผ้าเบรก (Disc brake pad).....	4
2.1.2 ประเภทของสูตรผ้าเบรก.....	5
2.1.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	6
2.2 กระบวนการขัดตกแต่ง.....	7
2.2.1 กลไกการขัดตกแต่ง.....	7
2.2.2 เครื่องจักรขัดตกแต่งผิวหน้า.....	9

2.2.3	ใบขัดตกรต่าง (Grinding wheel).....	10
2.2.4	แรงในกระบวนการขัดตกรต่าง.....	12
2.2.5	ตัวแปรในกระบวนการขัดตกรต่าง .....	13
2.3	Geometric Dimensioning and Tolerance (GD & T).....	14
2.3.1	มิติ (Dimension) .....	14
2.3.2	ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อน (Tolerance).....	14
2.3.3	ลักษณะทางเรขาคณิต (Geometric attribute).....	15
2.4	ความเป็นระนาบ (Flatness) และความลาดเอียง (Flatness deviation).....	16
2.4.1	นิยาม .....	16
2.4.2	การกำหนดขอบเขตความลาดเอียง (Flatness tolerance zone) .....	16
2.4.3	เครื่องมือในการวัดความลาดเอียง .....	16
2.4.4	การกำหนดจุดในการวัดความลาดเอียง.....	17
2.5	การออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ (DOE) .....	17
2.6	การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ .....	19
2.6.1	2 <sup>k</sup> full factorial design.....	19
2.6.2	3 <sup>k</sup> full factorial design.....	20
2.7	สถิติในการวิเคราะห์ (Statistical analysis) .....	22
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	26
3.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก.....	26
3.1.1	วัตถุดิบสำหรับการผลิตผ้าเบรก.....	26
3.1.3	การอัดขึ้นรูปเย็น (Preforming process) .....	27
3.1.5	การอบ (Baking process).....	28
3.2	การตรวจสอบสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานทดสอบ.....	28



3.2.1 การทดสอบความแข็ง .....	28
3.2.2 ความถ่วงจำเพาะ .....	29
3.2.3 ความเป็นรูพรุน .....	30
3.3 การตัดตกแต่งชิ้นงาน .....	30
3.4 การวัดความลาดเอียง .....	31
3.5 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายในเครื่องจักรตัดตกแต่ง .....	33
3.6 การออกแบบการทดลอง (DOE) .....	33
3.6.1 การออกแบบการทดลองการตัดตกแต่งในสูตรผ้าเบรก 1 สูตร .....	33
3.6.2 การออกแบบการทดลองการตัดตกแต่งในสูตรผ้าเบรกหลายสูตร .....	35
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis) .....	36
3.8 การวิเคราะห์พื้นผิวความลาดเอียงทางกราฟิก (Graphical analysis) .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	38
4.1 ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายในเครื่องจักรตัดตกแต่ง .....	38
4.2 การวิเคราะห์ผลของความลึกในการตัด พื้นผิว และความเร็วในการป้อนชิ้นงานต่อความลาดเอียงของผิวชิ้นงาน .....	39
4.2.2 การวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	41
4.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม .....	43
4.2.4 การหาเงื่อนไขการตัดตกแต่งที่เหมาะสม .....	45
4.3 การวิเคราะห์ผลของความแข็งของวัสดุเบรกต่อความลาดเอียงของผิวชิ้นงาน .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	57
5.2 อภิปรายผลการวิจัย .....	58
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย .....	59
5.4 ข้อเสนอแนะ .....	59

บรรณานุกรม .....	61
ภาคผนวก .....	63
ภาคผนวก ก แบบฟอร์มบันทึกค่าความสูงพื้นผิวของผ้าเบรก .....	64
ภาคผนวก ข บันทึกผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	68
ภาคผนวก ค กราฟแสดงลักษณะผิวผ้าเบรกที่สร้างจากโปรแกรม MATLAB.....	73
ประวัติผู้เขียน .....	101



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะและสารหล่อลื่นในผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะ สูตรเหล็กปริมาณต่ำ สูตรโลหะปริมาณต่ำ และสูตรเซรามิก .....	6
ตารางที่ 2 สัญลักษณ์แสดงค่าระดับของการออกแบบการทดลองแบบ $2^k$ (เมื่อ $k=2$ ).....	20
ตารางที่ 3 รูปแบบการทดลองที่เกิดขึ้น 27 รูปแบบจากการออกแบบการทดลองแบบ $3^k$ (เมื่อ $k=3$ ) .....	21
ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA ของการออกแบบการทดลอง 1 ตัวแปร.....	23
ตารางที่ 5 ส่วนผสมเคมีสำหรับผ้าเบรกในแต่ละสูตร .....	26
ตารางที่ 6 ตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดตกแต่งและระดับของตัวแปร .....	34
ตารางที่ 7 การแจกแจงการทดลองทั้งหมด 27 แบบ .....	34
ตารางที่ 8 ตัวแปรต้นและระดับของตัวแปร .....	35
ตารางที่ 9 การทดลองปัจจัยของความแข็งของเคมีต่อความลาดเอียง .....	36
ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของหลุมใส่ชิ้นงาน 4 หลุม.....	38
ตารางที่ 11 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 27 รูปแบบ .....	40
ตารางที่ 12 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรเชิงเส้นและตัวแปรร่วม.....	41
ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งชิ้นงานเปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน .....	54

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ข้อมูลการสู่มตรวจวัดความลาดเอียงของชิ้นงานผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการตัดตกแต่งด้วยเครื่องตัดแบบแมนวลเท่านั้น เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2561 .....	1
รูปที่ 2 วิธีการวัดความลาดเอียงตามที่กำหนดในมาตรฐาน RAYLOC.....	2
รูปที่ 3 อุปกรณ์และกลไกการเบรก .....	4
รูปที่ 4 แผนผังกระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	7
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติกและแบบพลาสติกบนผิววัสดุอันเนื่องมาจากวัสดุขัดถู.....	8
รูปที่ 6 เครื่องตัดตกแต่งผิวหน้าแบบต่างๆ [8].....	9
รูปที่ 7 ความแข็งของวัสดุที่ใช้เป็นอนุภาคขัดถู.....	11
รูปที่ 8 แรงที่เกิดในการตัดตกแต่ง.....	12
รูปที่ 9 ตัวแปรอินพุทและเอาต์พุทของกระบวนการตัดตกแต่ง.....	14
รูปที่ 10 ซีดจำกัดความคลาดเคลื่อน 3 แบบ.....	15
รูปที่ 11 การกำหนดขอบเขตความลาดเอียง [10].....	16
รูปที่ 12 การวางพิกัดการวัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11].....	17
รูปที่ 13 การวางพิกัดการวัดแบบเชิงขั้ว [11].....	17
รูปที่ 14 ระบบของกระบวนการ.....	18
รูปที่ 15 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ $2^2$ .....	19
รูปที่ 16 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ $3^2$ .....	21
รูปที่ 17 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ $3^3$ .....	22
รูปที่ 18 เคมีผสมหลังจากผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง.....	27
รูปที่ 19 ชิ้นงานผ้าเบรกหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็น.....	27
รูปที่ 20 ชิ้นงานผ้าเบรกหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน.....	28

รูปที่ 21 การทดสอบความแข็งของผ้าเบรกตามมาตรฐาน JIS D4421 .....	29
รูปที่ 22 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งบนผิวหน้าผ้าเบรก .....	29
รูปที่ 23 การขัดตกแต่งชิ้นงานด้วยเครื่องขัดตกแต่ง .....	31
รูปที่ 24 ชิ้นงานหลังการขัดตกแต่ง .....	31
รูปที่ 25 การใช้ไดอัลเกจวัดความลาดเอียงของผิวผ้าเบรก.....	32
รูปที่ 26 การกำหนดจุดการวัดค่าความลาดเอียงบนผิวผ้าเบรก.....	32
รูปที่ 27 หลุมใส่ชิ้นงานของเครื่องขัดตกแต่ง.....	33
รูปที่ 28 แผนภาพช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของความลาดเอียงเปรียบเทียบในแต่ละหลุมใส่ชิ้นงาน .....	39
รูปที่ 29 แผนภูมิพาเรโตแสดงระดับผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่อค่าความลาดเอียง...42	
รูปที่ 30 กราฟผลกระทบหลักของตัวแปรอิสระต่อความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรก .....	43
รูปที่ 31 กราฟผลกระทบร่วมของตัวแปรอิสระต่อความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรก .....	45
รูปที่ 32 เงื่อนไขการขัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 2602 ตารางมิลลิเมตร.....	46
รูปที่ 33 เงื่อนไขการขัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร.....	47
รูปที่ 34 เงื่อนไขการขัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร.....	48
รูปที่ 35 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 2602 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน .....	49
รูปที่ 36 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน .....	50
รูปที่ 37 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน .....	51
รูปที่ 38 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียงเมื่อความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วในการป้อน 11.5 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด.....	52
รูปที่ 39 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความเร็วการป้อน 11.5 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงระดับความลึกการตัด .....	53

รูปที่ 40 แผนภูมิพาเรโตแสดงระดับการส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของความแข็งแกร่งงาน  
เปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน.....55



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

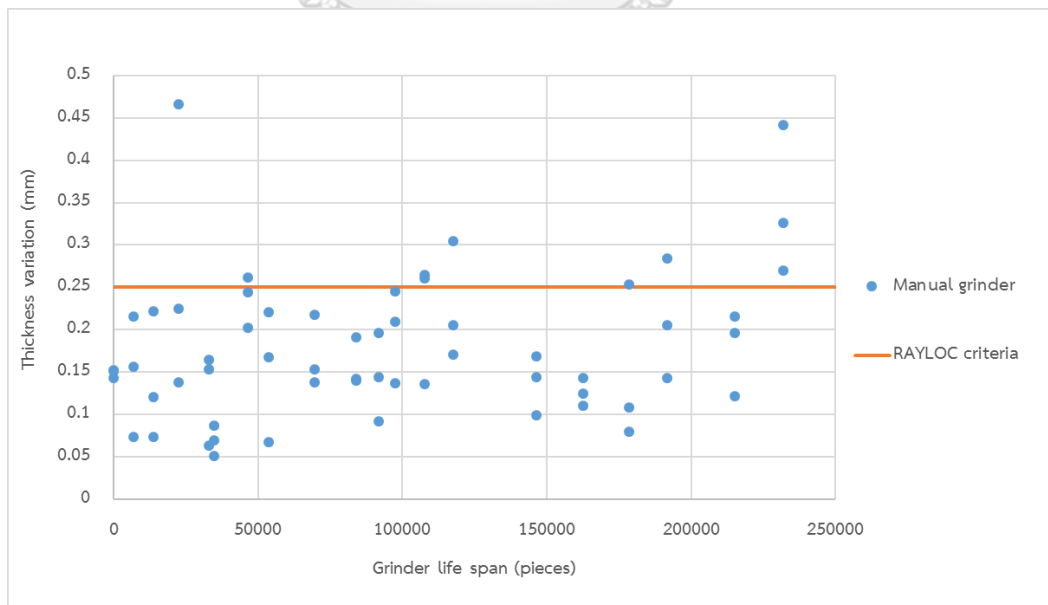
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการขัดตกแต่ง (Grinding process) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในการผลิตผ้าเบรก โดยเป็นกระบวนการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าผ้าเบรกโดยใช้วัสดุขัดที่มีความแข็งสูงกว่า (Slide) กับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าจนเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic deformation) บนผิวหน้าชิ้นงาน ทำให้ผิวหน้าของผ้าเบรกให้มีความเรียบ ปรับระนาบให้ขนาน รวมทั้งปรับความหนาของผ้าเบรกให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

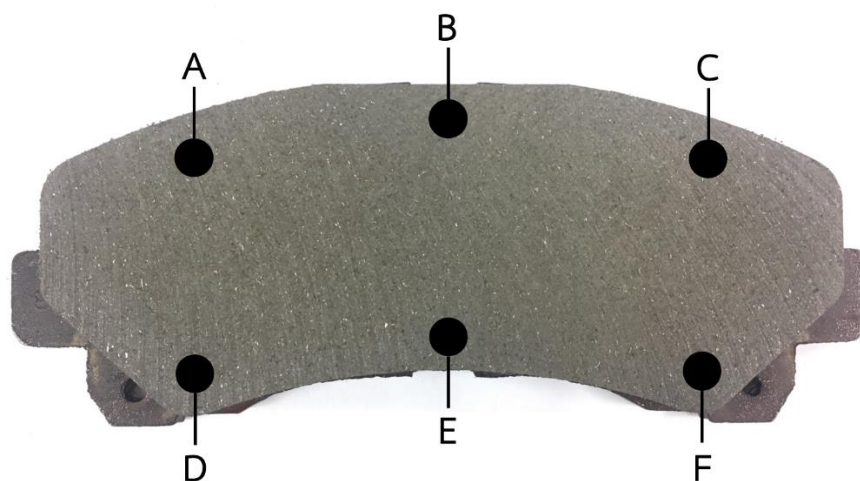
บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายผ้าเบรกมีนโยบายการขยายตลาดผ้าเบรกไปยังต่างประเทศ โดยทางบริษัทผู้ค้าได้กำหนดเงื่อนไขการนำเข้าผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ประเด็นหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดลงในมาตรฐานคือเรื่องความลาดเอียงของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการขัดตกแต่ง โดยมีการกำหนดให้ความแตกต่างของความหนาของชิ้นงานจำนวน 6 จุด ต้องมีผลต่างไม่เกิน 0.010 นิ้ว สำหรับชิ้นงานผ้าเบรกลาย 5 นิ้ว [1] จากการสุ่มตรวจสอบชิ้นงานภายในกระบวนการผลิตพบว่า มีชิ้นงานที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 16.6 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อมูลการสุ่มตรวจวัดความลาดเอียงของชิ้นงานผ้าเบรกหลังผ่านกระบวนการขัดตกแต่งด้วย

เครื่องขัดแบบแมนวลเท่านั้น เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2561

ในอุตสาหกรรมผ้าเบรกมีการผลิตผ้าเบรกหลากหลายชนิด ทำให้เกิดความหลากหลายของสูตรเคมี รวมทั้งขนาดชิ้นงาน ปัญหาที่พบคือเงื่อนไขการปรับตั้งเครื่องจักรขัดตกแต่งในปัจจุบันอาจมีความไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีสมบัติแตกต่างกันจึงทำให้มีชิ้นงานที่มีความลาดเอียงเกิดขึ้น [2] ชิ้นงานหลังการขัดตกแต่งมีคุณภาพผิวหน้าตามที่กำหนด การเลือกเงื่อนไขการขัดตกแต่งชิ้นงานให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานที่นำมาฝนจึงมีความสำคัญ เพราะปัจจัยต่างๆของเครื่องจักรและวัสดุที่นำมาขัดล้วนส่งผลต่อลักษณะของผิวชิ้นงานหลังการขัดตกแต่ง [3, 4] ความลาดเอียงของชิ้นงานจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องแก้ไขในตลาดปัจจุบัน เพราะสามารถส่งผลกระทบต่อบริษัทได้ทันที



รูปที่ 2 วิธีการวัดความลาดเอียงตามที่กำหนดในมาตรฐาน RAYLOC

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการขัดตกแต่งเพื่อลดความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรกรถยนต์ โดยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยจากเครื่องขัดและชิ้นงาน ได้แก่ อายุใบขัด ความลึกในการตัด พื้นที่ผิวหน้าชิ้นงาน ความแข็ง และความเร็วการป้อนชิ้นงานต่อความลาดเอียง พร้อมทั้งหาเงื่อนไขการปรับปรุงความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานด้วยการปรับความเร็วการป้อนชิ้นงานให้เหมาะสมกับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน โดยใช้มาตรฐานการวัดความลาดเอียง RAYLOC ของชิ้นงานเป็นตัวชี้วัด (รูปที่ 2)



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานและตัวแปรจากเครื่องขัด ตกแต่งต่อคุณภาพความเป็นระนาบของผิวหน้าชิ้นงานหลังการขัด และเพื่อศึกษาการลดความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานโดยการปรับความเร็วการป้อนชิ้นงานให้เหมาะสมกับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาความสัมพันธ์ของอายุใบขัด ความแตกต่างของหลุมใส่ชิ้นงาน ความหนาในการตัดชิ้นงาน ความแข็งของวัสดุ พื้นที่ผิวหน้าผ้าเบรก และความเร็วในการป้อน ต่อความเป็นระนาบของผิวหน้าชิ้นงานหลังการขัด โดยทำการทดลองในเครื่องขัดตกแต่งแบบใบขัดมอเตอร์เดี่ยว (Single-motor vertical spindle grinding machine) ซึ่งเป็นเครื่องขัดแบบใช้คนปรับตั้งเครื่องจักร (Manual) และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ เพื่อหาเงื่อนไขการปรับความเร็วการป้อนชิ้นงานที่สามารถลดความลาดเอียงของชิ้นงานผ้าเบรก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

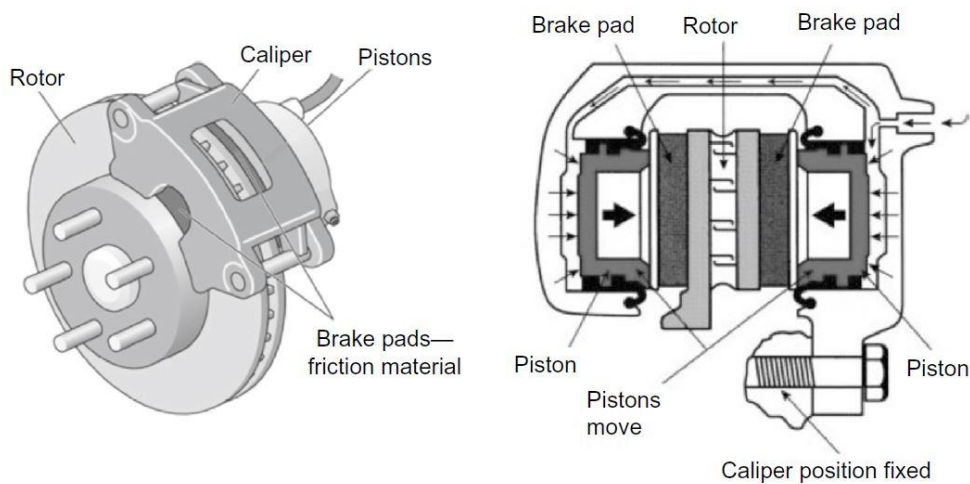
ได้องค์ความรู้เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานและตัวแปรจากเครื่องขัดตกแต่งกับความเป็นระนาบ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมการขัด รวมทั้งได้เงื่อนไขการปรับความเร็วเครื่องจักรที่เหมาะสมต่อขนาดของชิ้นงานผ้าเบรก และได้ชิ้นงานที่มีความเป็นระนาบได้ตามมาตรฐาน

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ผ้าเบรกและกระบวนการผลิตผ้าเบรก

#### 2.1.1 ผ้าเบรก (Disc brake pad)

ผ้าเบรกเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบเบรกช่วยในการชะลอความเร็วยานพาหนะให้ช้าลงหรือจนกระทั่งหยุด โดยมีทำงานร่วมกับอุปกรณ์การเบรก ได้แก่ จานเบรก คาลิเปอร์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการประกบผ้าเบรกให้หนีบกับจานเบรก และลูกสูบเบรกช่วยส่งแรงในการเบรก เมื่อมีการเหยียบเบรก ลูกสูบจะมีการดันคาลิเปอร์ทำให้หน้าผ้าเบรกทั้งสองชิ้นประกบเข้ากับจานเบรกที่หมุนอยู่ทำให้เกิดการหน่วงความเร็วการหมุนของจานเบรกทำให้หมุนได้ช้าลงหรือหยุดหมุน ส่งผลให้ยานพาหนะชะลอความเร็วหรือหยุด การเบรกทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานจากพลังงานจลน์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากขณะเบรกมีแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสระหว่างหน้าผ้าเบรกและจานเบรก อุปกรณ์ในระบบเบรกและกลไกการเบรกแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์และกลไกการเบรก

(จากหนังสือ Handbook of Friction Materials and their Applications ของ R. C. Dante)

ผ้าเบรกประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นเนื้อวัสดุเบรก (friction material) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างแรงเสียดทานในการเบรก และส่วนที่เป็นแผ่นเหล็ก (backing plate) ทำหน้าที่รองวัสดุเบรกและยึดติดกับคาลิเปอร์ในการติดตั้งระบบเบรก โดยรายละเอียดเกี่ยวกับเนื้อวัสดุเบรกจะมีการอธิบายในข้อ 2.1.2

### 2.1.2 ประเภทของสูตรผ้าเบรก [5]

เนื้อวัสดุเบรกประกอบด้วยสารหลายชนิด ได้แก่ สารยึดติด (Binder) ทำหน้าที่ประสานส่วนผสมให้เข้ากัน สารหล่อลื่น (Lubricant) สารขัดถู (Abrasive) ผงโลหะ (Metals) ซึ่งช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานให้แก่เนื้อวัสดุเบรก เส้นใย (Fiber) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เนื้อวัสดุเคมี และเพิ่มความทนทานต่ออุณหภูมิ และสารยืดหยุ่น (Elastomer) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในเนื้อผ้าเบรก ลดการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือน ประเภทของสูตรผ้าเบรกสามารถจัดจำแนกตามปริมาณโลหะในเนื้อวัสดุเคมีได้ 4 สูตร ดังนี้

#### (ก) สูตรกึ่งโลหะ (Semi-metallic formulas)

ผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะมีองค์ประกอบของโลหะมากกว่าร้อยละ 50 โดยมวล โดยมีเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ในปริมาณอย่างน้อยร้อยละ 30 โดยมวล เนื่องจากผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะมีเส้นใยโลหะในปริมาณมาก ทำให้ผ้าเบรกชนิดนี้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงเป็นพิเศษ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขณะเบรกอยู่ที่ประมาณ 0.4 และมีความทนทานต่ออุณหภูมิ เหมาะกับการใช้งานในรถสมรรถภาพสูงมาก เช่น รถแข่ง

#### (ข) สูตรเหล็กปริมาณต่ำ (Low steel formulas)

เนื่องจากผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะมีปริมาณโลหะสูงทำให้เกิดเสียงดังขณะเบรก จึงมีการพัฒนาสูตรผ้าเบรกที่ลดปริมาณโลหะลงเพื่อลดการเกิดเสียง และทำให้การเบรกนุ่มนวลขึ้น เหมาะสมกับการใช้งานในกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้รถยนต์โดยสารมากขึ้น โดยผ้าเบรกสูตรเหล็กปริมาณต่ำจะมีปริมาณเส้นใยเหล็กต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยมวล ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขณะเบรกอยู่ที่ประมาณ 0.35-0.38

#### (ค) สูตรโลหะปริมาณต่ำ (Low metal formulas)

ผ้าเบรกสูตรโลหะปริมาณต่ำมีความคล้ายคลึงกับผ้าเบรกสูตรเหล็กปริมาณต่ำ โดยผ้าเบรกชนิดนี้มีองค์ประกอบของโลหะทั้งหมด (ผงโลหะชนิดต่างๆ รวมถึงเส้นใยเหล็ก) น้อยกว่าร้อยละ 20 โดยมวล

#### (ง) สูตรเซรามิก (Ceramic formula) หรือ สูตรไร้ใยหินออร์แกนิก (Non-Asbestos Organic : NAO)

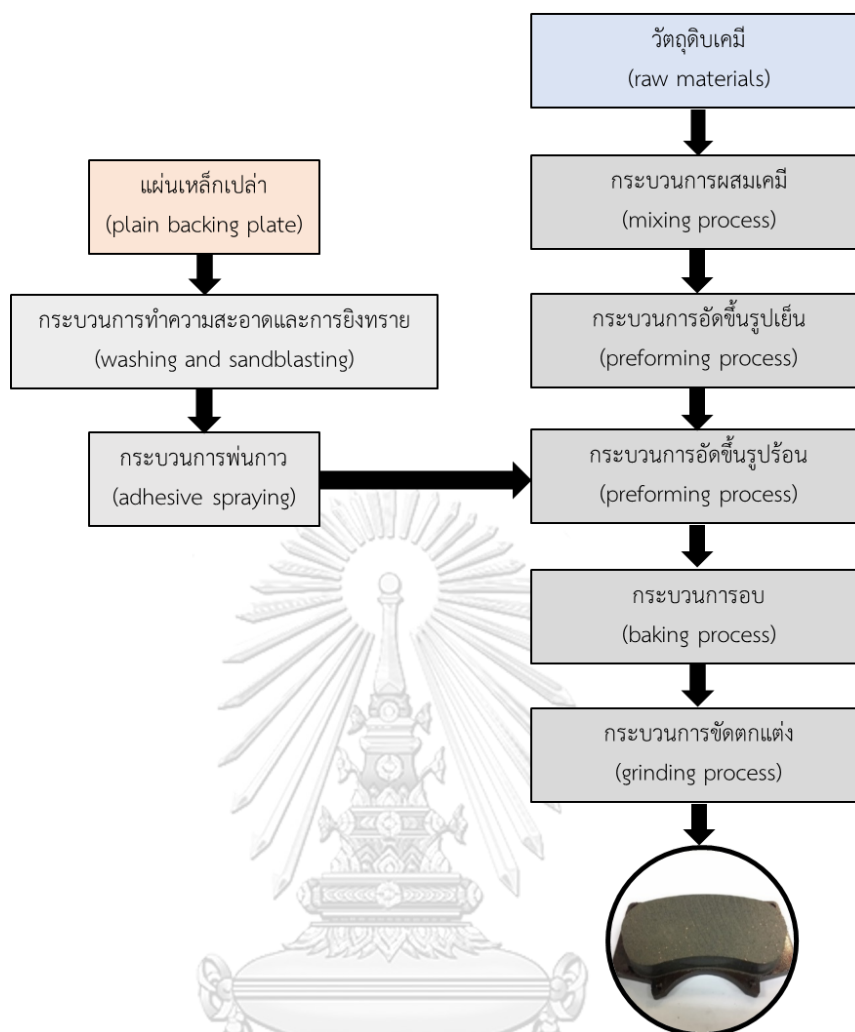
ผ้าเบรกสูตรเซรามิกจะไม่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กหรือผงเหล็ก โลหะในผ้าเบรกสูตรนี้ มักจะใช้ทองแดงช่วยในการระบายความร้อนขณะเบรก แต่ปัจจุบันเริ่มมีการรณรงค์ไม่ให้ใช้ทองแดงเป็นวัสดุเบรกเนื่องจากปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อม เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา [6] จึงมีการนำโลหะชนิดอื่นมาเป็นส่วนผสม เช่น ทองเหลือง สังกะสี ดีบุก และสารประเภทเส้นใยที่ใช้ในสูตรนี้จะใช้เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือใช้เส้นใยเซรามิก (Ceramic fiber) แทนการใช้เส้นใยเหล็ก โดยปริมาณโลหะและสารหล่อลื่นในผ้าเบรกทั้งสี่สูตรแสดงได้ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะและสารหล่อลื่นในผ้าเบรกสูตรกึ่งโลหะ สูตรเหล็กปริมาณต่ำ สูตรโลหะปริมาณต่ำ และสูตรเซรามิก

วัตถุดิบ	สูตรกึ่งโลหะ (%)	สูตรเหล็กปริมาณต่ำ (%)	สูตรโลหะปริมาณต่ำ (%)	สูตรเซรามิก (%)
<b>สารหล่อลื่น</b>				
กราไฟต์ละเอียด	4-10	2-8	4-10	4-9
กราไฟต์หยาบ	5-10	0-7	4-8	2-5
<b>เหล็ก</b>				
เส้นใยเหล็ก	20-35	10-18	5-10	0
ผงเหล็ก	2-7	2-5	1-2	0
<b>โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก</b>				
ทองแดง	2-10	6-15	0-6	10-16
ทองแดงผสม	2-10	5-10	0-5	5-10
ทองเหลือง				
สังกะสี/ดีบุก	0-4	0-4	0-2	0-4

### 2.1.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

การผลิตผ้าเบรกประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ดังรูปที่ 4 โดยวัตถุดิบเคมีทั้งหมดจะถูกปั่นและผสมด้วยความเร็วและเวลาผสมที่เหมาะสมกับปริมาณวัตถุดิบเคมี จนกระทั่งผงเคมีละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน เคมีหลังผสมจะนำมาอัดขึ้นรูปเย็นตามแบบพิมพ์กำหนด ตามด้วยการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเพื่ออัดให้เนื้อวัสดุเคมีติดกับแผ่นเหล็กผ้าเบรก และทำให้เนื้อเคมีที่เปื่อยยุ่ยแข็งตัวขึ้น จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการอบเพื่อให้เคมีภายในผ้าเบรกมีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ เพิ่มความแข็งแรงของผ้าเบรก ผ้าเบรกหลังกระบวนการอบจะถูกนำไปขัดตกแต่งเพื่อให้ได้รูปร่างผิวหน้าตามที่ออกแบบ ก่อนจะเข้าสู่การทดสอบเสริมและเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ต่อไป



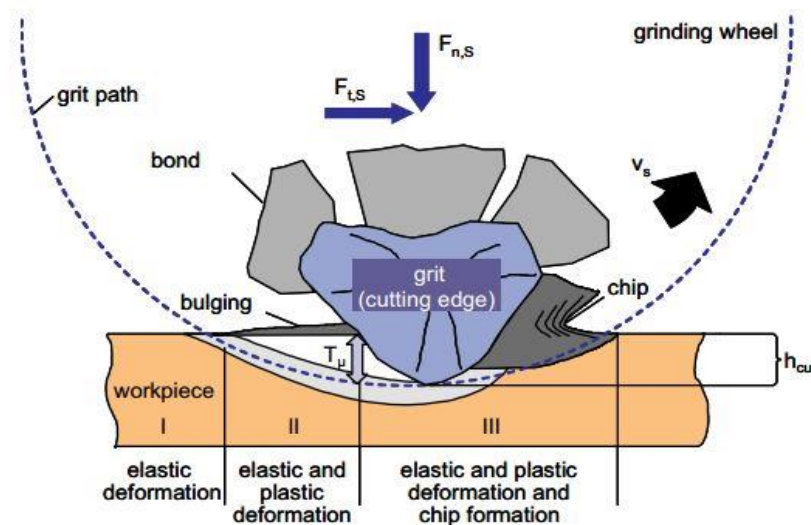
รูปที่ 4 แผนผังกระบวนการผลิตผ้าเบรก

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.2 กระบวนการขัดตกแต่ง

### 2.2.1 กลไกการขัดตกแต่ง [7]

การขัดตกแต่ง คือการทำให้ชิ้นงานผ้าเบรกเรียบโดยใช้ที่ขัดที่มีสมบัติเป็นวัสดุขัดถู คือโดยใช้ผงขัดที่มีความแข็งสูงกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าจนเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกบนผิวชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติกและแบบพลาสติกของวัสดุที่ถูกขัดถูแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติกและแบบพลาสติกบนผิววัสดุอันเนื่องมาจากวัสดุขัดถู  
(จากหนังสือ Manufacturing process 2 Grinding, Honning, Lapping ของ Fritz Klocke)

การขัดตกแต่งสามารถจำแนกตามลักษณะการขัดตกแต่งได้ดังนี้

- (ก) การขัดตกแต่งผิวหน้า (Surface grinding) เป็นการขัดเอาผิวหน้าชิ้นงานส่วนเกินออกไป ทำให้ชิ้นงานมีความหนาตามที่ออกแบบไว้ มีผิวหน้าชิ้นงานเรียบ ไม่ลาดเอียง
- (ข) การขัดตกแต่งทรงกระบอก (Cylindrical grinding) มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก เช่น ท่อหรือแท่งเหล็กกลม โดยวัสดุทรงกระบอกที่จะนำมาขัดถูจะมีการถูกบังคับให้หมุนตามแกนหมุนเมื่อทำการขัด การขัดตกแต่งทรงกระบอกสามารถแบ่งได้เป็นการขัดตกแต่งด้านในทรงกระบอก (Internal cylindrical grinding) และการขัดตกแต่งด้านนอกทรงกระบอก (External cylindrical grinding)
- (ค) การขัดตกแต่งไร้ศูนย์กลาง (Centerless grinding) การขัดตกแต่งลักษณะนี้ใช้กับการขัดตกแต่งในวัตถุทรงกระบอก แต่การหมุนของวัตถุที่นำมาฝนจะไม่ได้หมุนตามแกนหมุนที่อยู่กึ่งกลางทรงกระบอก
- (ง) การขัดตกแต่งแบบครีปฟีด (Creep feed grinding) เป็นการขัดตกแต่งที่มีการกินเนื้อวัสดุที่มากเป็นพิเศษ และใช้ความเร็วในการป้อนชิ้นงานที่ต่ำมาก การขัดตกแต่งแบบนี้เรียกอีกอย่างว่า การขัดแบบลึก (Deep grinding) โดยการขัดตกแต่งแบบป้อนคืบมักจะพบในลักษณะที่แนวลึกจะมีความลึกเมื่อเทียบกับความกว้าง เช่น การผ่าร่อง (Slot)

ในบรรดาการขัดตกแต่งทั้งสี่แบบ การขัดตกแต่งผ้าเบรกจะเป็นการขัดตกแต่งผิวหน้า ซึ่งการขัดตกแต่งผิวหน้าจะถูกกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 2.2.2

## 2.2.2 เครื่องจักรตัดตกแต่งผิวหน้า

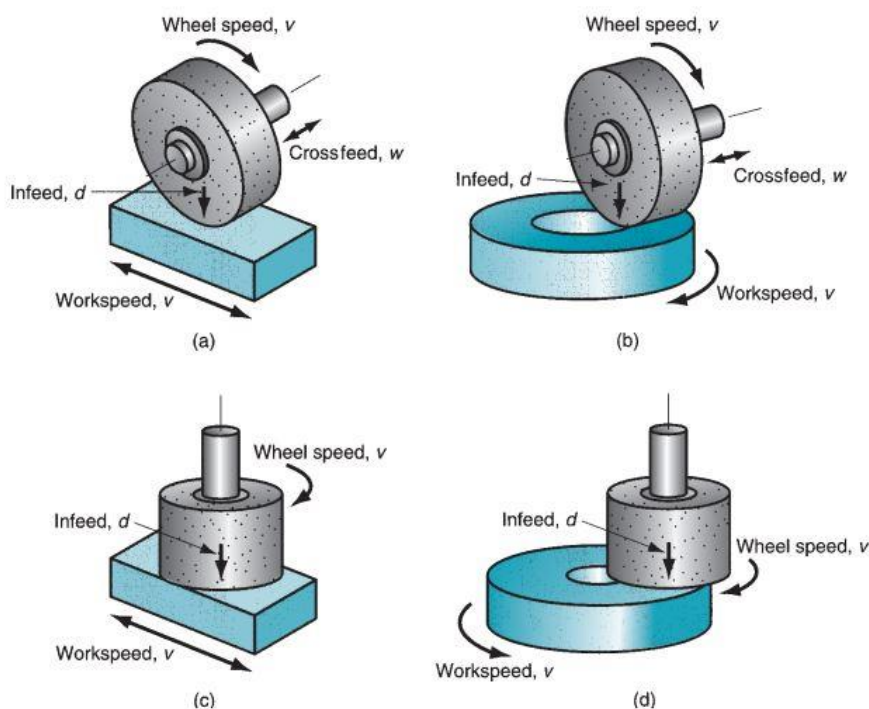
การตัดตกแต่งผิวหน้าสามารถจำแนกตามทิศทางของการป้อนชิ้นงาน และทิศการวางตัวของล้อตัดตกแต่ง ได้อีก 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 6

(ก) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวนอนและแท่นชิ้นงานเลื่อนกลับไปมา (Horizontal spindle with reciprocating worktable)

(ข) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวนอนและแท่นชิ้นงานแบบโต๊ะหมุน (Horizontal spindle with rotation worktable)

(ค) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวตั้งและแท่นชิ้นงานเลื่อนกลับไปมา (Vertical spindle with reciprocal worktable)

(ง) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวตั้งและแท่นชิ้นงานแบบโต๊ะหมุน (Vertical spindle with rotating worktable)



รูปที่ 6 เครื่องจักรตัดตกแต่งผิวหน้าแบบต่างๆ [8]

(ก) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวนอนและแท่นชิ้นงานเลื่อนกลับไปมา (ข) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวนอนและแท่นชิ้นงานแบบโต๊ะหมุน (ค) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวตั้งและแท่นชิ้นงานเลื่อนกลับไปมา และ (ง) เครื่องจักรตัดแบบแกนหมุนแนวตั้งและแท่นชิ้นงานแบบโต๊ะหมุน (จากหนังสือ Fundamental of Modern Manufacturing ของ M. P. Groover)

การขัดตบแต่งแบบ (ก) และ (ข) คือ ใช้ใบขัดแบบ Peripheral grinding wheel คือวัสดุขัดวางตัวอยู่ที่ด้านข้างล้อขัด ส่วนการขัดแบบ (ค) และ (ง) คือใช้ใบขัดที่หน้าวัสดุขัดอยู่ตรงด้านหน้าแบนของล้อ (Flat face of the wheel) โดยเครื่องจักรขัดตบแต่งผ้าเบรกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นเครื่องขัดตบแต่งประเภท (ง) เครื่องขัดแบบแกนหมุนแนวตั้งและแท่นขึ้นงานแบบโต๊ะหมุน โดยขึ้นงานผ้าเบรกจะถูกป้อนสู่ใบขัดตบแต่งผ่านโต๊ะหมุน แล้วใบขัดตบแต่งจะหมุนตามแกนแนวตั้ง ขัดปาดผิวหน้าขึ้นงาน

### 2.2.3 ใบขัดตบแต่ง (Grinding wheel)

องค์ประกอบสำคัญในใบขัดตบแต่ง ประกอบด้วย

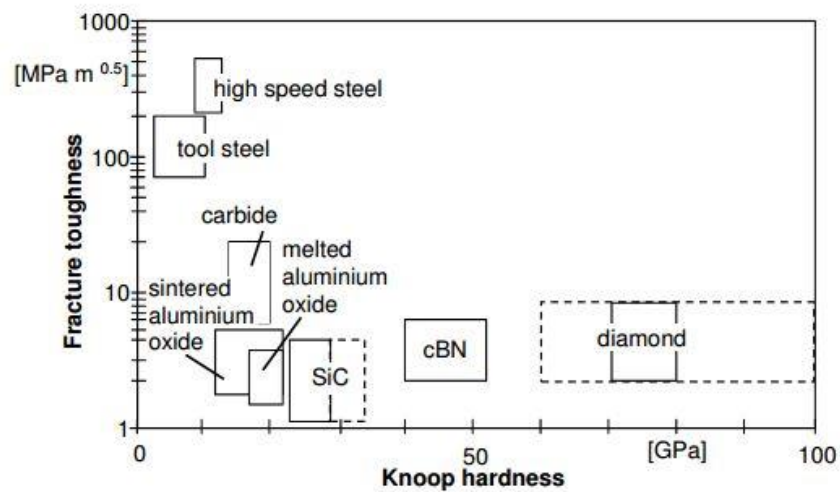
(ก) วัสดุขัดถู (Abrasive material)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุขัดถูจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง มีความทนทานต่อการสึกหรอ หรือเมื่อแตกก็สามารถเกิดคมใหม่ได้ (Friability) การเลือกวัสดุในกระบวนการขัดตบแต่งนั้นจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่จะนำมาขัด ปัจจุบันวัสดุขัดถูในกระบวนการขัดตบแต่งที่นิยมใช้มีดังนี้

- อะลูมินา หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) เป็นวัสดุขัดถูที่นิยมใช้มากที่สุดในการอุตสาหกรรมการขัดตบแต่ง มักใช้ในการขัดตบแต่งชิ้นงานโลหะที่มีแร่เหล็กเป็นส่วนประกอบ รวมถึงอัลลอย โดยผงขัดอะลูมินามีค่าความแข็ง Knoop Hardness เท่ากับ 2100 GPa
- ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นวัสดุขัดถูที่มีความแข็งกว่าอะลูมินา แต่ทนทานน้อยกว่า มักใช้ในงานขัดตบแต่งโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น อะลูมิเนียม ทองเหลือง สแตนเลส เป็นต้น โดยผงขัดซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็ง Knoop Hardness เท่ากับ 2500 GPa
- คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (cBN) เป็นวัสดุขัดถูความแข็งสูง มักใช้ในงานขัดวัสดุที่แข็งเป็นพิเศษ เช่น เหล็กกล้า หรืออัลลอยเกรดผลิตเครื่องบิน โดยผงขัดคิวบิกโบรอนไนไตรด์มีความแข็ง Knoop Hardness เท่ากับ 5000 GPa
- เพชร (Diamond) เป็นวัสดุขัดถูที่มีความแข็งมากที่สุด มีความแข็ง Knoop Hardness เท่ากับ 7000 GPa เพชรที่ใช้ในงานขัดตบแต่งนั้นอาจเป็นเพชรธรรมชาติหรือเพชรสังเคราะห์ก็ได้ มักใช้ในงานขัดตบแต่งเซรามิก แก้ว หรือหินแร่ที่มีความแข็งมาก

ในการขัดตบแต่งผ้าเบรก มักจะใช้ผงขัดซิลิคอนคาร์ไบด์ หรือใช้ผงเพชร แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของวัสดุขัดถูและความทนทานของวัสดุขัดถูแสดงได้ดังรูปที่ 7





รูปที่ 7 ความแข็งของวัสดุที่ใช้เป็นอนุภาคขัดถู

(จากหนังสือ Manufacturing process 2 Grinding, Honning, Lapping ของ F. Klocke หน้า 19)

(ข) ขนาดเม็ดขัดถู (Grain size)

ขนาดของเม็ดขัดถูที่ต่างกันส่งผลต่อลักษณะของผิวหน้าชิ้นงาน โดยเม็ดขัดถูขนาดเล็กจะทำให้ผิวหน้าเรียบกว่า และเม็ดขัดถูขนาดใหญ่จะมีอัตราการกัดเนื้อวัสดุ (Material removal rate) ที่สูงกว่า ในการเลือกขนาดของเม็ดขัดถูให้เหมาะสมกับงาน ควรใช้เม็ดขัดถูที่มีขนาดเล็กขัดกับชิ้นงานที่มีความแข็งสูง และงานที่แข็งน้อยควรใช้เม็ดขัดถูขนาดใหญ่กว่า โดยปกติแล้ว เม็ดขัดถูที่ใช้ในใบขัดตกแต่งจะมีขนาดเม็ดตั้งแต่เบอร์ 8 ถึงเบอร์ 250 โดยเบอร์ 8 คือเม็ดขัดถูแบบหยาบ

(ค) วัสดุพันธะ (Bonding material)

เป็นวัสดุที่ยึดเม็ดขัดถูเข้าด้วยกัน ซึ่งวัสดุพันธะมีหลายประเภทแตกต่างกันที่ความแข็ง ความทนทานและการทนความร้อน วัสดุพันธะที่ดีจะต้องมีความทนทาน และยึดจับเม็ดขัดถูได้ดี วัสดุพันธะที่มักใช้ในอุตสาหกรรมจำแนกประเภทได้ดังนี้

- Vitrified bond เป็นวัสดุที่ทำมาจากดินเหนียวอบและวัสดุเซรามิก ซึ่งวัสดุพันธะประเภทนี้เป็นวัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี
- Silicate bond คือโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ในการทำวัสดุพันธะ มักใช้ในงานตัดที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนสูง
- Rubber bond เป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นที่สุด ใช้ใน cut-off wheel

- Resinoid bond ประกอบด้วยเรซินซึ่งเป็นวัสดุเทอร์โมเซต นิยมใช้เรซินประเภทฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) ซึ่งมีความโดดเด่นในเรื่องความแข็งแรง มักนำไปใช้ในการฝนหยาบ (Rough grinding)
- Shellac bond เป็นวัสดุพันธะที่ค่อนข้างแข็งแรงแต่ไม่แข็งแรงมาก มักใช้ในการฝนละเอียด
- Metallic bond ประกอบด้วยโลหะ นิยมใช้ทองแดง มักใช้เป็นตัวยึดเม็ดขัดถูที่เป็นเพชรหรือคิวบิกโบรอนไนไตรด์

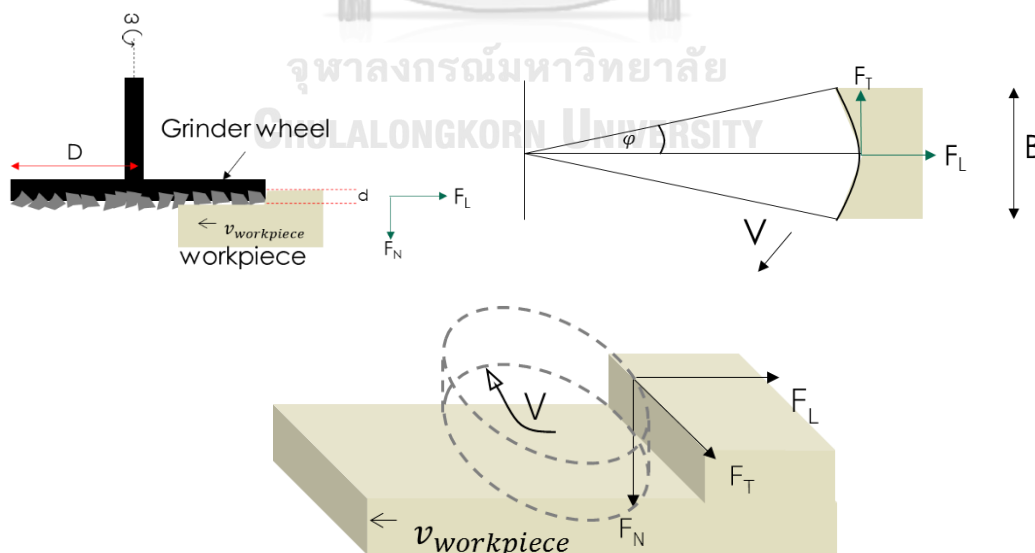
#### 2.2.4 แรงในกระบวนการขัดตกแต่ง [9]

เมื่อมีการขัดตกแต่งเกิดขึ้นจะมีแรงระหว่างใบขัดตกแต่งกับผิวหน้าชิ้นงาน โดยแรงสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 8 ดังนี้

$F_L$  คือ แรงตามแนวยาว (Longitudinal force) ซึ่งเป็นแนวทิศทางการป้อนชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน

$F_T$  คือ แรงที่เกิดตามแนวผิวสัมผัสผิววงกลม (Tangential force) ของการหมุนใบมีดฝน มีหน่วยเป็นนิวตัน

$F_z$  คือ แรงที่เกิดตามแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (Normal force) คือแนวความลึกในการขัดตกแต่งชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน



รูปที่ 8 แรงที่เกิดในการขัดตกแต่ง

โดยแรงในแต่ละแกนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ

$$F_L = f_n C_1 B \sqrt{\frac{d}{2\rho}} \quad (1)$$

$$F_T = f_t C_1 B \quad (2)$$

$$F_N = f_n C_1 B \sqrt{1 - \frac{d}{2\rho}} \quad (3)$$

โดยที่  $B$  คือ ความกว้างของชิ้นงาน (Workpiece width) มีหน่วยมิลลิเมตร (mm)

$d$  คือ ความลึกในการตัด (Depth of cut) มีหน่วยมิลลิเมตร (mm)

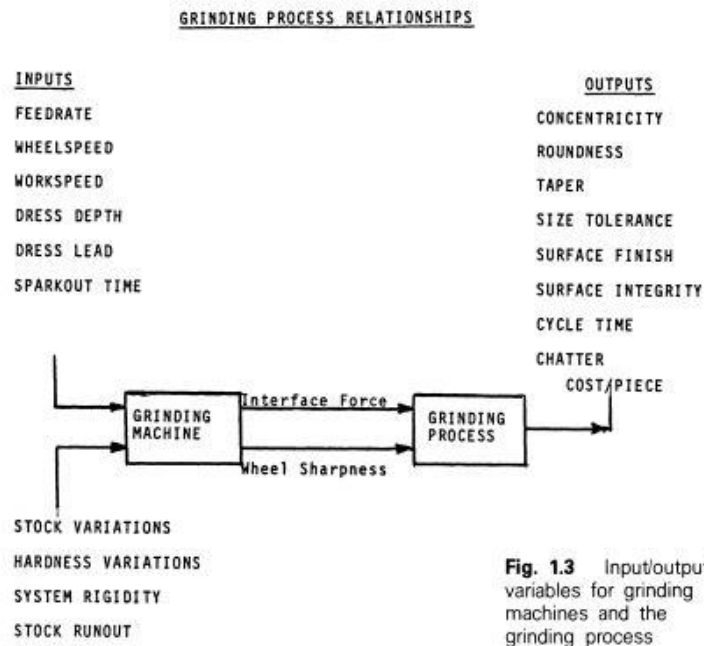
$C_1$  คือ ความหนาแน่นของเม็ดขัดถู (Linear grain density) มีหน่วยเป็นเม็ดต่อตารางมิลลิเมตร (grains/mm<sup>2</sup>)

$\rho$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดขัดถู มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )

### 2.2.5 ตัวแปรในกระบวนการขัดตกแต่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของเครื่องจักร วัสดุที่จะใช้ขัด กระบวนการขัดตกแต่ง และผลลัพธ์หลังการขัดตกแต่งสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 9 จากรูปจะเห็นได้ว่าปัจจัยด้านการปรับตั้งเครื่องจักร ประสิทธิภาพของเครื่องจักร และสมบัติของวัสดุที่นำมาขัดตกแต่งมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการขัดตกแต่ง ดังนั้น ในการที่จะทำการขัดตกแต่ง ไม่ว่าจะใช้เครื่องอัตโนมัติ หรือเครื่องจักรที่ต้องมีมนุษย์ควบคุม (Manual) การกำหนดเงื่อนไขของเครื่องขัดจะต้องสัมพันธ์กับวัสดุที่ใช้ขัด และความสามารถของเครื่องขัด

นอกจากนี้ ความสมบูรณ์ของเครื่องจักรเป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพของชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น ความคมของใบขัด (Wheel sharpness) โดย Hahn [2] กล่าวว่าความคมของใบขัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการขัด หากใบขัดมีความคมน้อยลงก็จะต้องเพิ่มแรงในการเจียนชิ้นงานจะให้มากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าได้ รวมทั้งตัวเครื่องจักรด้วย



รูปที่ 9 ตัวแปรอินพุตและเอาท์พุตของกระบวนการขัดตกแต่ง

(จากหนังสือ Handbook of Modern Grinding Technology ของ R. I. King หน้า 6)

## 2.3 Geometric Dimensioning and Tolerance (GD & T) [8]

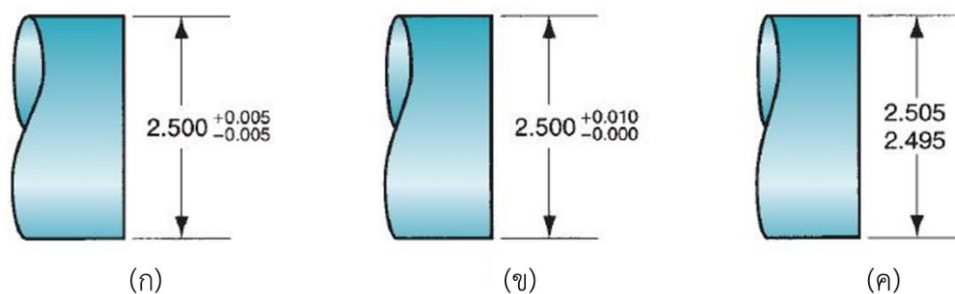
### 2.3.1 มิติ (Dimension)

มิติ คือ ปริมาณที่สามารถระบุตัวเลขได้ กำหนดขึ้นเพื่อระบุลักษณะของวัตถุ เช่น ความยาว เส้นตรง มุม โดยการบอกมิตินั้นจะระบุด้วยคุณลักษณะทางเรขาคณิต ซึ่งจะกล่าวต่อไปในข้อ 2.3.3

### 2.3.2 ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อน (Tolerance)

ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อน ใช้บอกขีดจำกัดที่สามารถยอมให้มิติมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 10 ได้แก่

- (ก) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบสองทาง (Bilateral tolerance) เป็นขีดจำกัดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของมิติเป็นไปทั้งด้านบวกและลบ มักแสดงเป็นค่าบวกลบ
- (ข) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบทางเดียว (Unilateral tolerance) เป็นขีดจำกัดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของมิติเป็นไปในด้านใดด้านหนึ่ง จะเป็นบวกหรือลบก็ได้
- (ค) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบกำหนดค่าขอบ (Limit dimension) คือการกำหนดค่าแสดงมิติต่ำสุดและสูงสุดที่ยอมรับได้ กำหนดเป็นขอบบนและขอบล่าง



รูปที่ 10 ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อน 3 แบบ

(ก) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบสองทาง (ข) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบทางเดียว (ค) ขีดจำกัดความคลาดเคลื่อนแบบกำหนดค่าขอบ

### 2.3.3 ลักษณะทางเรขาคณิต (Geometric attribute)

การบอกลักษณะสามารถเรียกได้หลากหลาย และสามารถมีได้มากกว่า 1 มิติ ขึ้นกับรูปร่าง สัณฐานของชิ้นงานแต่ละประเภท ตัวอย่างเช่น ความเป็นระนาบของผิวหน้าชิ้นงาน ความมน ความขนานระหว่างระนาบ ฯลฯ โดยค่าลักษณะทางเรขาคณิตจะต้องประกอบด้วยมิติและค่าความคลาดเคลื่อน นิยามของการบอกลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่ใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม มีดังนี้

- ความเป็นมุม (Angularity) คือการบอกสมบัติการทำมุมกันของวัตถุ เช่น องศาการทำมุมของขอบชิ้นงาน ถ้ามุมมีค่า 90 องศา เราจะเรียกความเป็นมุมนี้ว่า ความฉาก (Perpendicularity)
- ความกลม (Circularity) ใช้บอกสมบัติของวัตถุทรงกลม วงกลม รู หรือทรงกระบอก โดยวัตถุที่มีความกลมคือวัตถุที่ระยะรัศมีจากศูนย์กลางวงกลมถึงเส้นรอบวงจะต้องเท่ากันในทุกๆจุดบนเส้นรอบวง
- ความเป็นระนาบ (Flatness) คือการที่ทุกจุดบนพื้นผิวหนึ่งมีระนาบเดียวกัน
- ความขนาน (Parallelism) เป็นสมบัติเปรียบเทียบระหว่างเส้น หรือพื้นผิว 2 ชั้นขึ้นไป โดยระยะห่างของเส้นหรือพื้นผิว 2 ชั้นนั้นจะต้องเท่ากันตลอด ซึ่งเส้นเชื่อมระหว่างวัตถุทั้งสองจะต้องเป็นเส้นตั้งฉาก
- ความตรง (Straightness) คือการที่ทุกจุดบนเส้นตรง 1 เส้นไม่มีการเบนออกจากเส้นตรง

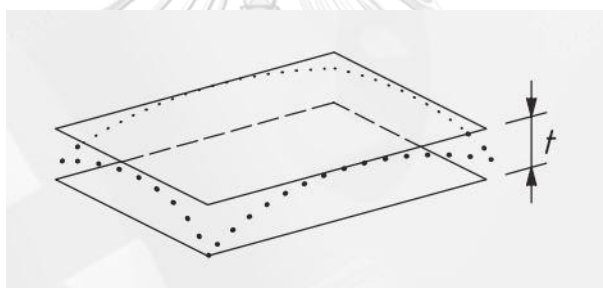
## 2.4 ความเป็นระนาบ (Flatness) และความลาดเอียง (Flatness deviation)

### 2.4.1 นิยาม

ความเป็นระนาบ เป็นลักษณะทางเรขาคณิตชนิดหนึ่ง que แสดงถึงความมีระนาบเดียวกันของจุดบนพื้นผิว โดยชิ้นงาน que มีความเป็นระนาบแบบสมบูรณ์นั้น ทุกจุดบนพื้นผิวจะต้องวางตัวอยู่ในระนาบเดียวกัน หากมีจุดบนพื้นผิวใดที่อยู่ต่างระนาบกัน แสดงว่าพื้นผิวนั้นเกิดความลาดเอียง (Flatness deviation ขึ้น)

### 2.4.2 การกำหนดขอบเขตความลาดเอียง (Flatness tolerance zone) [10]

ขอบเขตของความลาดเอียงจะถูกกำหนดด้วยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ que มีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ  $t$  โดยการกำหนดขอบเขตการวัดความลาดเอียงที่เหมาะสมนั้น ระยะห่างระหว่างระนาบที่กำหนดขึ้นจะต้องมีค่า  $t$  น้อยที่สุด ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การกำหนดขอบเขตความลาดเอียง [10]

### 2.4.3 เครื่องมือในการวัดความลาดเอียง

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความลาดเอียงจะใช้เครื่องมือวัดความแบบเปรียบเทียบ (Comparative instrument) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวัดมิติของวัตถุชิ้นหนึ่งเทียบกับวัตถุอ้างอิงอีกชิ้นหนึ่ง ซึ่งเครื่องมือวัดแบบเปรียบเทียบมักจะแสดงค่าออกมาเป็นความเบี่ยงเบน (Magnitude of deviation) และทิศทางการเบี่ยงเบนจากวัตถุอ้างอิง

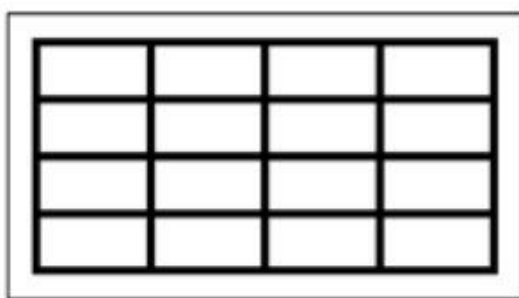
เครื่องมือวัดแบบเปรียบเทียบที่พบมากที่สุด คือ ไดอัลเกจ (Dial gauge) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเชิงกลชนิดหนึ่ง (Mechanical gauge) โดยหัววัดของเครื่องมือจะมีการสัมผัสกับพื้นผิว เมื่อเลื่อนปลายหัววัดไปตามผิววัตถุที่มีความเอียง พื้นวัตถุที่มีความเอียงจะทำให้ความยาวหัววัดเปลี่ยน เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะตามเชิงเส้น (Linear movement) แสดงออกมาเป็นระดับที่เปลี่ยนไปเทียบกับระดับอ้างอิง โดยอาจจะสูงขึ้น (มีการเปลี่ยนแปลงทางบวก) หรือต่ำลง (มีการเปลี่ยนแปลงทางลบ) จากระดับอ้างอิง

#### 2.4.4 การกำหนดจุดในการวัดความลาดเอียง

การกำหนดจุดในการเก็บข้อมูล (Extraction strategies) ในการวัดความลาดเอียงของพื้นผิวชิ้นงานนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ตัวแทนข้อมูลที่เหมาะสม ใน ISO/TS 12781-2 [11] ได้ระบุวิธีการกำหนดจุดในการวัดตามลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน ดังนี้

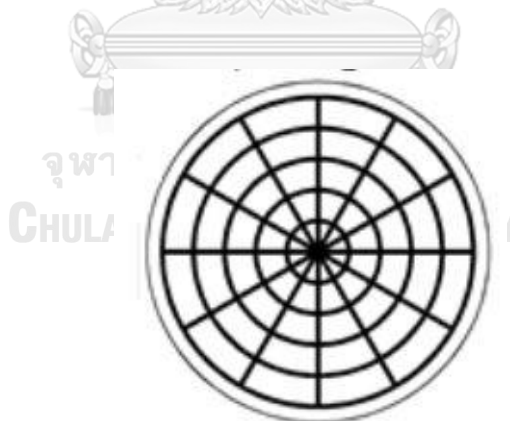
- พิกัดตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular grid)

เป็นการกำหนดจุดการวัดให้มีการเรียงตัวลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหมาะสำหรับการวัดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การวางพิกัดการวัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11]

- พิกัดเชิงขั้ว (Polar grid) มักใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะกลม ดังรูปที่ 13

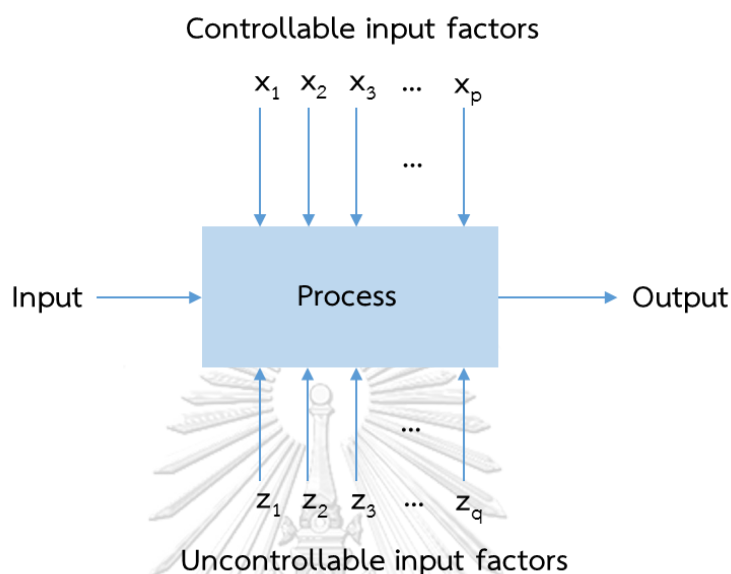


รูปที่ 13 การวางพิกัดการวัดแบบเชิงขั้ว [11]

#### 2.5 การออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ (DOE)

กระบวนการ คือกิจกรรมที่เปลี่ยนวัตถุดิบ หรืออินพุท (input) ของกระบวนการให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์หรือเอาต์พุท (output) ของกระบวนการ โดยมีปัจจัยภายในกระบวนการมาช่วยกำหนดการเปลี่ยนแปลง เช่น คน เครื่องจักร วิธีการ สิ่งแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งปัจจัยภายใน

กระบวนการสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (controllable factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrollable factor) แผนภาพแสดงกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ระบบของกระบวนการ

เพื่อที่จะพัฒนากระบวนการให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดเสถียรภาพของกระบวนการ (Robustness) จำเป็นที่จะต้องมามีเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบกระบวนการ โดยเครื่องมือที่ใช้ก็คือ การออกแบบการทดลอง (Design of experiment : DOE) โดยเครื่องมือดังกล่าวจะใช้หลักสถิติช่วยในการออกแบบการทดลองเพื่อหาคำตอบเชิงกระบวนการ นำไปสู่ความสามารถในระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ และสามารถระบุค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต้นที่จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของกระบวนการตามที่ต้องการ

ปัจจุบันมีวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อการพัฒนากระบวนการได้หลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการออกแบบกระบวนการทดลองคือวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design of experiment) [12] ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design of experiment) และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design of experiment) โดยในที่นี้จะเน้นไปที่การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.6



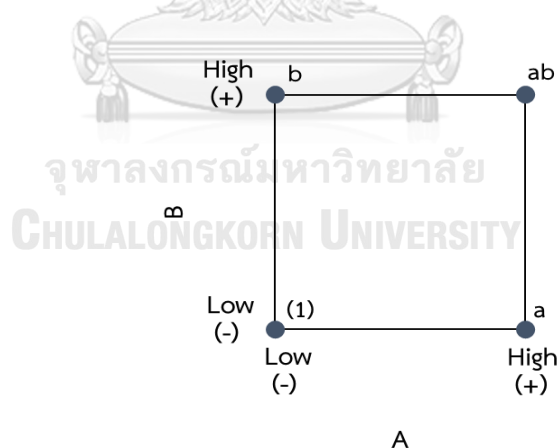
## 2.6 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเป็นการทดลองหลายปัจจัย (Multi-factor experiment) พร้อมกันในการทดลองเดียวกัน โดยรูปแบบการทดลองที่เกิดขึ้นรูปแบบการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้ซึ่งเกิดจากการรวมกันแบบแฟคทอเรียลของทุกระดับและทุกตัวแปร เช่น ถ้าในการทดลองมีตัวแปรต้น 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรจะมีระดับของตัวแปร 2 ระดับ ดังนั้น จำนวนการทดลองที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เป็นไปได้ก็คือ  $2^3$  หรือ 8 การทดลอง หรือ 8 ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination)

### 2.6.1 $2^k$ full factorial design

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีจำนวนตัวแปรต้น  $k$  ตัวแปร แต่ละตัวแปรจะมีระดับของตัวแปร 2 ระดับ จะมีรูปแบบที่เกิดขึ้นทั้งหมด  $2^k$  รูปแบบ เรียกว่า การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$

รูปแบบที่เป็นพื้นฐานที่สุดของการออกแบบแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  คือแบบ  $2^2$  ซึ่งรูปแบบนี้มีจำนวนตัวแปรเพียง 2 ตัวแปร แทนด้วย A และ B แต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ คือระดับต่ำ (Low) แทนด้วย “-” และระดับสูง (High) แทนด้วย “+” รูปทางเรขาคณิตของรูปแบบ  $2^2$  จะแสดงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่แต่ละรูปแบบจะอยู่ตรงมุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ  $2^2$

Montgomery [13] ได้ระบุสัญลักษณ์แทนค่าระดับในแต่ละรูปแบบเป็นพยัญชนะภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหรือตัวเลข 2 อักขระ แทนค่าระดับของตัวแปร A และ B ตามลำดับ ถ้าเป็นพยัญชนะ เช่น a, b หรือ ab หมายความว่าตัวแปรนั้นในรูปแบบการรันนั้นมีค่าระดับเป็นระดับสูง และถ้าเป็นตัวเลข 1 แปลว่าระดับของตัวแปรนั้นเป็นระดับต่ำ เช่น รันที่มีรูปแบบ a คือ รูปแบบนั้นมี

ค่าระดับของตัวแปร A ที่ระดับสูง และค่าระดับของตัวแปร B เป็นระดับต่ำ รูปแบบ b คือมีค่าระดับของตัวแปร A ที่ระดับต่ำ และค่าระดับของตัวแปร B เป็นระดับสูง รันที่แสดงค่า 1 แปลว่าค่าระดับของตัวแปร A และ B อยู่ที่ระดับต่ำทั้งคู่ และรันที่แสดงค่า ab แปลว่าค่าระดับของตัวแปร A และ B อยู่ที่ระดับสูงทั้งคู่ โดยตารางแสดงสัญลักษณ์แทนค่าระดับและผลจากการคูณกันของระดับแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์แสดงค่าระดับของการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  (เมื่อ  $k=2$ )

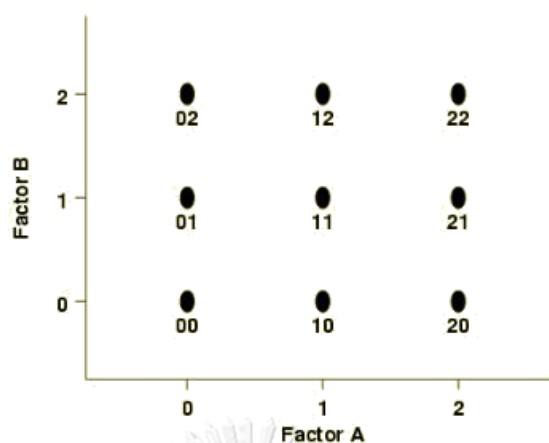
Run		Factorial Effect			
		I	A	B	AB
1	(1)	+	-	-	+
2	a	+	+	-	-
3	b	+	-	+	-
4	ab	+	+	+	+

### 2.6.2 $3^k$ full factorial design

การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ  $3^k$  เมื่อ  $k$  เป็นจำนวนตัวแปร เป็นการออกแบบที่แต่ละตัวแปร มีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ซึ่งระดับของตัวแปรจะเรียกเป็นระดับต่ำ กลาง และสูง ซึ่งแทนระดับต่ำ กลางและสูงด้วย 0 1 และ 2 ตามลำดับ

(ก)  $3^2$  design

การออกแบบแฟคทอเรียล 3 ระดับที่ง่ายที่สุด คือมีตัวแปร 2 ตัว แต่ละตัวมี 3 ระดับ รวมแล้วมี 9 ทริทเมนต์คอมบิเนชัน ซึ่งแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังรูปที่ 16 แต่ละรูปแบบเขียนแทนด้วยตัวเลขแสดงระดับของตัวแปร A และ B ตามลำดับ เช่น '20' หมายถึงรูปแบบที่ค่าของตัวแปร A มีระดับสูง และค่าของตัวแปร B มีระดับต่ำ



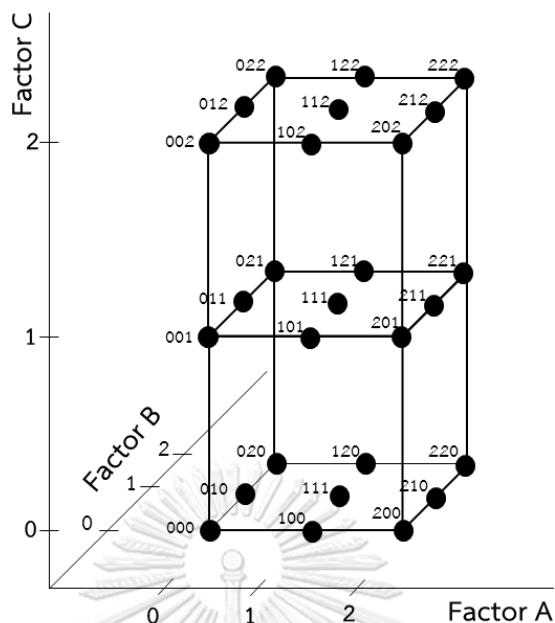
รูปที่ 16 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ  $3^2$

(ข)  $3^3$  design [14]

การออกแบบการทดลองแบบนี้ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 3 ระดับ จำนวนทรีทเมนต์คอมบินเนชันที่เกิดขึ้นคือ 27 รูปแบบ โดยการออกแบบแบบ  $3^3$  รูปแบบแสดงดังตารางที่ 3 และรูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังรูปที่ 17

ตารางที่ 3 รูปแบบการทดลองที่เกิดขึ้น 27 รูปแบบจากการออกแบบการทดลองแบบ  $3^k$  (เมื่อ  $k=3$ )

Factor B	Factor C	Factor A		
		0	1	2
0	0	000	100	200
0	1	001	101	201
0	2	002	102	202
1	0	010	110	210
1	1	011	111	211
1	2	012	112	212
2	0	020	120	220
2	1	021	121	221
2	2	022	122	222



รูปที่ 17 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบการทดลองแบบ  $3^3$

## 2.7 สถิติในการวิเคราะห์ (Statistical analysis)

ในการวิเคราะห์ทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประชากรตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป โดยเป็นการทดสอบเพื่อเลือกว่าจะเชื่อถือสมมติฐานทางสถิติอันใด โดยสมมติฐานทางสถิติมีอยู่ด้วยกัน 2 ทาง ได้แก่สมมติฐานที่เป็นกลาง (Null hypothesis :  $H_0$ ) ซึ่งเป็นสมมติฐานทางสถิติที่ระบุว่าตัวแปรต้นในแต่ละกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน และสมมติฐานที่ไม่เป็นกลาง (Alternative hypothesis :  $H_1$ ) ซึ่งเป็นสมมติฐานทางสถิติที่ระบุว่าตัวแปรต้นในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบ่งวิเคราะห์ได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

- การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม : พิจารณาความแปรปรวนที่เกิดจากความแตกต่างของวิธีปฏิบัติที่ถูกใช้ในการออกแบบ
- การวิเคราะห์ความแปรปรวนภายในกลุ่ม : พิจารณาความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ อธิบายในรูปแบบความคลาดเคลื่อน (Error) โดยความแปรปรวนภายในกลุ่มเรียกว่า ความคลาดเคลื่อน (Error of sum square)

ค่าที่แสดงความแปรปรวนทั้งแบบระหว่างกลุ่มและภายในกลุ่มจะแสดงออกมาเป็นผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน (Sum of square : SS) ซึ่งผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของทุก

ประชากร (Total sum of square :  $SS_T$ ) จะเป็นผลรวมระหว่างผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรในแต่ละกลุ่ม ( $SS_{Factor}$ ) และผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของความคลาดเคลื่อน ( $SS_{Error}$  หรือ  $SS_E$ ) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4 และคำนวณได้ดังสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$SS_T = SS_{Factor} + SS_E \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (5)$$

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการออกแบบการทดลองสำหรับการทดลอง 1 ตัวแปร a ระดับ และจำนวนซ้ำในการทดลองคือ n และการคำนวณค่าทางสถิติในตารางสามารถเขียนได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA ของการออกแบบการทดลอง 1 ตัวแปร

Source of variation	Sum of squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value
Between factor levels	$SS_{Factor}$	$a - 1$	$MS_{Factor} = \frac{SS_{Factor}}{DF_{Factor}}$	$F_0 = \frac{MS_{Factor}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$a(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{DF_E}$	
Total	$SS_T$	$an - 1$	$MS_T = \frac{SS_T}{DF_T}$	

โดยค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean square : MS) คืออัตราส่วนของค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนต่อค่าองศาอิสระ (Degree of freedom) ของตัวแปร ในงานศึกษานี้จะเน้นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบสามตัวแปร (A B และ C) ซึ่งความแปรปรวนระหว่างกลุ่มจะคำนวณได้จากค่าความแปรปรวนของตัวแปรหลัก (Main factors) คือตัวแปร A, B และ C และตัวแปรที่ส่งผลกระทบร่วม (Interaction factors) ได้แก่ ตัวแปร 2 ตัวที่ส่งผลกระทบร่วม (Two-factors interaction) คือ AB, AC และ BC และตัวแปร 3 ตัวที่ส่งผลกระทบร่วม (Three-factors interaction) คือ ABC ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มแสดงได้ดังสมการที่ 6

$$SS_{Factor} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (6)$$

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Sheth และ P.M. George [15] ได้เสนองานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในกระบวนการต่อความลาดเอียงและความขรุขระชิ้นงานวาล์วโลหะ WCB หลังผ่านกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยได้ทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อหาสมการความสัมพันธ์สำหรับตัวแปรเครื่องจักร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกในการตัดต่อความลาดเอียงและความขรุขระ และวัดความลาดเอียงของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดสามมิติ (CMM) โดยกำหนดจุดวัดแบบพิกัดตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular grid) ขนาด 35 มิลลิเมตร x 35 มิลลิเมตร ระยะห่างแต่ละจุดวัด 5 มิลลิเมตร เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความลาดเอียงมากที่สุดคือความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัด ส่วนความลึกในการตัดนั้นมีอิทธิพลต่อค่าความลาดเอียงน้อยที่สุด และเมื่อวิเคราะห์

Sutar และ Archarya [4] ได้ทำการขัดเหล็กสเปเซอร์ร่องล้อรถบรรทุกโดยใช้ Vertical spindle surface grinder และศึกษาผลของความเร็วของใบขัด (Cutting speed) ความเร็วการป้อน (Feed) และความหนาในการตัด (Depth of cut) ต่อคุณภาพของชิ้นงานในด้านความลาดเอียง (Flatness) พบว่า ทั้งสามตัวแปรล้วนมีผลต่อความลาดเอียงของชิ้นงาน โดยเมื่อเพิ่มความเร็วมอเตอร์ใบขัด เพิ่มความเร็วในการป้อนชิ้นงาน และลดความหนาในการตัด ชิ้นงานจะมีความลาดเอียงมากขึ้น

Saravanakumar และคณะ [3] ได้ทดลองขัดเหล็กทรงสี่เหลี่ยมขนาด 50 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร x 6 มิลลิเมตร และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วใบขัด ความเร็วการป้อนชิ้นงาน และความหนาในการตัด ต่อความขรุขระของผิวหน้าชิ้นงาน (Roughness :  $R_a$ ) โดยใช้โปรไฟล์มิเตอร์ (Profilometer) เป็นเครื่องมือวัดความขรุขระของผิวหน้าชิ้นงาน พบว่าทั้งสามปัจจัยล้วนมีผลต่อคุณภาพความเรียบของผิวหน้าชิ้นงาน โดยความหนาในการตัดชิ้นงานส่งผลต่อคุณภาพของผิวหน้าชิ้นงานมากที่สุด ยิ่งความหนาในการตัดชิ้นงานมาก ชิ้นงานจะมีแนวโน้มนขรุขระมากขึ้น และเมื่อนำปัจจัยตัวแปรต้นมาศึกษาความสัมพันธ์ด้วย Interaction graph (A x B) พบว่าปัจจัยระหว่างความเร็วการป้อนชิ้นงานกับความหนาในการตัด ส่งผลต่อลักษณะของผิวหน้าชิ้นงานมากกว่าปัจจัยตัวแปรต้นคู่อื่น ทั้งนี้ งานวิจัยได้ระบุเงื่อนไขการปรับตั้งความเร็วการป้อนของเครื่องขัด ความเร็วใบขัด และความหนาในการตัด ที่จะทำให้ได้ผิวหน้าชิ้นงานที่มีความขรุขระน้อยที่สุดด้วย นั่นคือความเร็วใบขัดควรมีค่ามาก ในขณะที่ความเร็วการป้อนชิ้นงานเข้าสู่เครื่องขัดควรมีความเร็วต่ำ และควรตัดชิ้นงานด้วยความหนาที่ไม่มาก

Atzeni และ Luliano [16] ได้ศึกษาการขัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่ทำจากโลหะผง (Powder metallurgy) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานขณะเบรกที่คงตัวแม้อยู่ในสภาวะ

อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส โดยเครื่องขัดตบแต่งที่ใช้เป็นเครื่องจักร ABA tangential grinding machine ซึ่งใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน (Computer Numerical Control : CNC) Atzeni และคณะได้ทดลองเปลี่ยนค่าความเร็วการหมุนของใบขัดดังนี้ ; 15 18 22.7 27.9 และ 34 เมตรต่อวินาที พร้อมทั้งวัดค่าความขรุขระของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรก พบว่าการเพิ่มค่าความเร็วการป้อน ทำให้ชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น นอกจากนี้ได้มีการวัดค่าความลาดเอียง พบว่าความลาดเอียงสูงสุดอยู่ที่ 0.02 มิลลิเมตร

Hekman และ Liang (1998) [17] ศึกษาผลของความลึกในการขัดชิ้นงาน (Depth of cut) ต่อการพัฒนาความเป็นระนาบของผิวชิ้นงาน โดยใช้เครื่องจักร CNC ขัดผิวข้างของท่อนเหล็กทรงกระบอก พบว่า ความลึกในการขัดชิ้นงานส่งผลต่อความเป็นระนาบของผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ขัดผิวข้างออกด้วยความลึกค่าน้อย จะมีความเป็นระนาบมากที่สุด

Periyasami และคณะ [18] ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการขัดตบแต่งต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานในการขัดตบแต่งแผ่นเหล็ก AISI 1080 โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ ความลึกในการตัดชิ้นงาน ความเร็วการป้อน และออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวคือความเร็วในการป้อน ส่วนความลึกในการตัดส่งผลกระทบต่อความขรุขระน้อยมาก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก

##### 3.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตผ้าเบรก

ส่วนผสมเคมีที่เตรียมในการทดลองมี 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 5 มีความแตกต่างกันดังนี้

สูตร A คือสูตรเคมีที่มีความแข็งในสเกล HRR เท่ากับ 90

สูตร B คือสูตรเคมีที่มีความแข็งในสเกล HRR เท่ากับ 100

สูตร C คือสูตรเคมีที่มีความแข็งในสเกล HRR เท่ากับ 60

ทั้งสามสูตรวัดความแข็งด้วยหัวกดเหล็กทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 ส่วนผสมเคมีสำหรับผ้าเบรกในแต่ละสูตร

สารเคมี	ร้อยละของปริมาตรที่ใช้		
	สูตร A	สูตร B	สูตร C
สารขัดถู (Abrasive)	5.74	10.70	10.70
สารยึดติด (Binder)	12.12	5.50	5.50
สารยืดหยุ่น (Elastomer)	4.77	2.70	2.70
สารเติมแต่ง (Filler)	49.40	50.10	53.60
สารหล่อลื่น (Lubricant)	22.94	17.50	21.00
เส้นใย (Fiber)	5.03	9.00	2.00
ผงโลหะ (Metal)	0.00	4.50	4.50

##### 3.1.2 การผสมเคมี (Mixing process)

นำวัตถุดิบเคมีมาผสมในเครื่องผสมเคมีโดยใส่วัตถุดิบประเภทเส้นใยและสารตัวเติมลงในหม้อผสม ใช้ความเร็วใบตี 6000 รอบต่อนาทีและความเร็วใบกวน 130 รอบต่อนาที นาน 4 นาที จากนั้นเติมสารเคมีที่เหลือลงไปแล้วผสมอีกครั้งด้วยความเร็วใบตี 3000 รอบต่อนาทีและความเร็วใบกวน 100 รอบต่อนาที นาน 4 นาที





รูปที่ 18 เคมีผสมหลังจากผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง

### 3.1.3 การอัดขึ้นรูปเยื่อ (Preforming process)

นำเคมีผสมมาอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัดตามมาตรฐานการผลิตที่อุณหภูมิตั้งที่ห้อง ขึ้นงานหลังอัดพิมพ์ เยื่อแสดงได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ขึ้นงานผ้าเบรกลหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์เยื่อ

### 3.1.4 การอัดขึ้นรูปร้อน (Hot molding process)

นำชิ้นผ้าเบรกหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นมาอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนโดยใช้เงื่อนไขการอัดพิมพ์ร้อนตามมาตรฐานการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ชิ้นงานผ้าเบรกหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

### 3.1.5 การอบ (Baking process)

ผ้าเบรกหลังอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนจะถูกนำมาอบในเตาอบอุณหภูมิ 110 °C นาน 30 นาที และเพิ่มเป็นอุณหภูมิ 200 °C นาน 120 นาที

## 3.2 การตรวจสอบสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานทดสอบ

### 3.2.1 การทดสอบความแข็ง

นำผ้าเบรกหลังจากการอบมาทดสอบหาค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งด้วยสเกล ร็อกเวลล์ (Rockwell) แบบ HRR ตามมาตรฐาน JIS D4421 ซึ่งใช้หัวกดเหล็กทรงกลม (Steel ball) เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร แรงกดมาตรฐาน (Standard load) 98.07 นิวตัน และแรงกดทดสอบ (Test load) 588.4 นิวตัน กดวัดความแข็งบนผิวหน้าผ้าเบรกชิ้นละ 5 ตำแหน่ง ตำแหน่งการวัดความแข็งแสดงได้ดังรูปที่ 22



รูปที่ 21 การทดสอบความแข็งของผ้าเบรกตามมาตรฐาน JIS D4421



รูปที่ 22 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งบนผิวหน้าผ้าเบรก

### 3.2.2 ความถ่วงจำเพาะ

นำผ้าเบรกหลังจากกระบวนการอบที่ไม่ได้ติดแผ่นเหล็กทำการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity : S.G.) ในน้ำตามมาตรฐาน JIS D4417 โดยชั่งน้ำหนักผ้าเบรกในอากาศ จากนั้นนำผ้าเบรกชิ้นเดิมมาชั่งน้ำหนักในน้ำโดยถ่วงชิ้นงานลงในอ่างน้ำ นำน้ำหนักผ้าเบรกในอากาศและในน้ำมาคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะตามสมการ (7)

$$S.G. = \frac{m_{air}}{m_{water} - m_{air}} \quad (7)$$

โดย  $m_{air}$  คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ  
 $m_{water}$  คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ

### 3.2.3 ความเป็นรูพรุน

นำผ้าเบรกหลังจากกระบวนการอบที่ไม่ได้ติดแผ่นเหล็กทำการคำนวณความเป็นรูพรุนตามมาตรฐาน JIS D4418 โดยนำชิ้นผ้าเบรกที่ไม่ได้ติดแผ่นเหล็กมาชั่งน้ำหนักในอากาศ ( $m_{air}$ ) พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาตรของชิ้นผ้าเบรก ( $V$ ) เพื่อนำไปคำนวณความถ่วงจำเพาะที่แท้จริง ( $S_B$ ) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (8)

$$S_B = \left( \frac{m_{air}}{V} \right) \times \rho_{water} \quad (8)$$

โดยที่  $\rho_{water}$  คือความหนาแน่นของน้ำ มีค่า 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความเป็นรูพรุนสามารถคำนวณได้ดังสมการ (9)

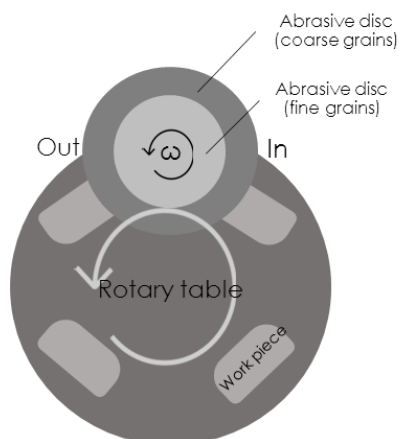
$$\%Porosity = \left( 1 - \frac{S_A}{S_T} \right) \times 100 \quad (9)$$

โดยที่  $S_A$  คือ ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) คำนวณได้จากสมการ (7)

$S_B$  คือ ความถ่วงจำเพาะที่แท้จริง (True specific gravity)

### 3.3 การขัดตกแต่งชิ้นงาน

ชิ้นงานหลังการอบจะนำมาเข้าเครื่องขัดตกแต่งโดยมีการเดินเครื่องเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 23 โดยในการขัดตกแต่งจะใช้ความเร็วมอเตอร์ใบฝนคกงที่ 3000 รอบต่อนาที ก่อนทำการขัดจะมีการปรับความเร็วการป้อนชิ้นงาน ปรับระดับความสูงของใบฝนเพื่อกำหนดความหนาที่จะเฉือนชิ้นงานออก และปรับขนาดเหล็กยึดชิ้นงานผ้าเบรกให้พอดีกับชิ้นงานที่จะนำเข้าเครื่องขัด จากนั้นนำชิ้นงานใส่ในหลุมใส่ชิ้นงาน ปล่อยให้ชิ้นงานให้ผ่านใบขัดเพียง 1 ครั้งแล้วหยิบชิ้นงานหลังขัดออกมาจากหลุมชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้วมีลักษณะแสดงดังในรูปที่ 24



รูปที่ 23 การขัดตกแต่งชิ้นงานด้วยเครื่องขัดตกแต่ง



รูปที่ 24 ชิ้นงานหลังการขัดตกแต่ง

### 3.4 การวัดความลาดเอียง

การวัดความลาดเอียงจะใช้เครื่องวัดความเป็นระนาบแบบดิจิตอล (Digital dial gauge) วัดความลาดเอียงของผิวผ้าเบรกดังรูปที่ 25 โดยวางผ้าเบรบบนแท่นแม่เหล็กเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความลาดเอียงอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของแผ่นเหล็กติดผ้าเบรก ก่อนที่จะวางแท่นแม่เหล็กบนแท่นหินแกรนิตยี่ห้อ Mitutoyo ที่มีระนาบตามมาตรฐาน ASME B89.3.7-2013

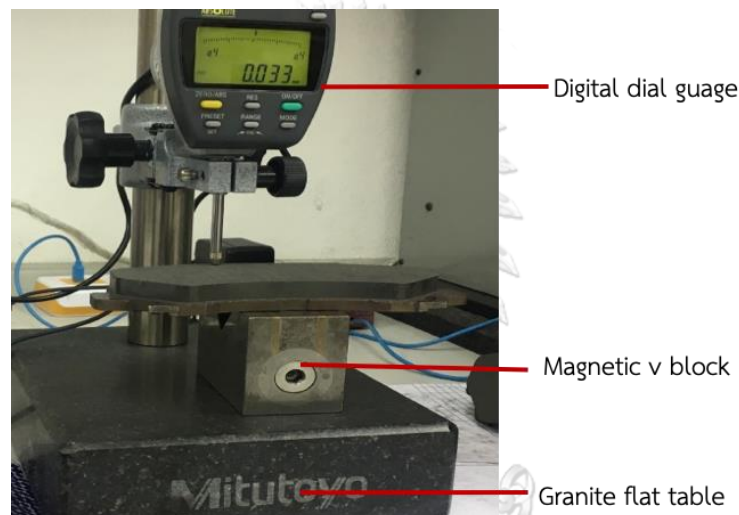
จำนวนจุดในการวัดความลาดเอียงของผ้าเบรกที่มีพื้นที่ผิว 2602, 5948 และ 7568 ตารางมิลลิเมตร คือ 81, 185 และ 238 จุดตามลำดับ โดยวางจุดวัดความลาดเอียงกระจายทั่วผิวหน้าผ้า

เบรกด้วยระยะห่างระหว่างจุด 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 26 ค่าความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงาน คำนวณจากความแตกต่างของจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของชิ้นงานดังสมการ (10)

$$flatness = \max(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n) - \min(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n) \quad (10)$$

โดย  $n$  คือ จำนวนจุดวัดบนผิวเบรก

และ  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$  คือ จุดวัดความลาดเอียงจุดที่ 1, 2, 3, ... ,  $n$  ตามลำดับ



รูปที่ 25 การใช้ไดอัลเกจวัดความลาดเอียงของผิวผ้าเบรก

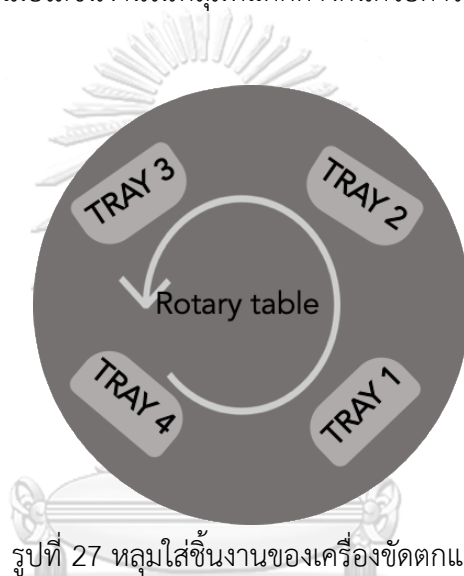
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 26 การกำหนดจุดการวัดค่าความลาดเอียงบนผิวผ้าเบรก

### 3.5 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายในเครื่องจักรตัดตกแต่ง

เครื่องจักรตัดตกแต่งมีจำนวนหลุมใส่ชิ้นงานจำนวน 4 หลุมแสดงได้ดังรูปที่ 27 การทดลองนี้จะเป็นการทดสอบความแตกต่างของหลุมใส่ชิ้นงานต่อลักษณะความลาดเอียงของผิวชิ้นงานหลังตัดตกแต่ง โดยจะนำชิ้นงานผ้าเบรกทดสอบนำไปทำการตัดตกแต่งชิ้นงานด้วยการใส่ชิ้นงานต่างหลุม แต่ละหลุมใช้จำนวนชิ้นงาน 11 ชิ้น โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ ในกระบวนการตัดตกแต่ง ได้แก่ ขนาดผ้าเบรก ชนิดของเนื้อวัสดุเคมี ช่วงเวลาในการตัดตกแต่ง ความเร็วการป้อน ความลึกในการตัดตกแต่ง จากนั้นทำการวัดความลาดเอียงของชิ้นงานตามวิธีในข้อ 3.4 และวิเคราะห์ความแตกต่างของความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานเมื่อใส่ชิ้นงานในหลุมที่ต่างกันอย่างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน



รูปที่ 27 หลุมใส่ชิ้นงานของเครื่องจักรตัดตกแต่ง

### 3.6 การออกแบบการทดลอง (DOE)

#### 3.6.1 การออกแบบการทดลองการตัดตกแต่งในสูตรผ้าเบรก 1 สูตร

ในการทดลองขั้นตอนนี้เป็นการทดลองในผ้าเบรกสูตรเดียวกัน ซึ่งเป็นผ้าเบรกไร้ใยหินสูตร A ที่มีความแข็งของผ้าเบรก 90 HRR การออกแบบตารางการทดลองจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสมระดับ (Multilevel factorial design) ซึ่งแต่ละตัวแปรต้นมีระดับของตัวแปรที่ไม่เท่ากัน คือ พื้นที่ผิวผ้าเบรก (Surface size) 3 ระดับ ความลึกในการตัดหน้าผ้าเบรกทั้ง 1 ครั้ง (Depth of cut) 3 ระดับและความเร็วการป้อน (Feed rate) 3 ระดับ โดยระดับของตัวแปรต้นในการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดตกแต่งและระดับของตัวแปร

ตัวแปรต้น	จำนวนระดับ	ค่า
S : พื้นที่ผิวผ้าเบรก (mm <sup>2</sup> )	3	2602, 5948, 7568
D : ความลึกในการขัดหน้าผ้าเบรกที่ 1 ครั้ง (mm)	5	0.5, 1, 1.5
F : ความเร็วการป้อน (rpm)	3	9.5, 11.5, 15.5

เมื่อคำนวณรูปแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) จะได้จำนวนรูปแบบ  $3^3 = 27$  แบบ และในแต่ละแบบจะทำการทดลองด้วยจำนวนซ้ำ (replication) 3 ซ้ำ ตารางแจกแจงการทดลองต่อ 1 ซ้ำแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การแจกแจงการทดลองทั้งหมด 27 แบบ

การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกในการตัด (mm)	ความเร็วการป้อน (rpm)
1	2602	0.5	9.5
2	2602	0.5	11.5
3	2602	0.5	15.5
4	2602	1	9.5
5	2602	1	11.5
6	2602	1	15.5
7	2602	1.5	9.5
8	2602	1.5	11.5
9	2602	1.5	15.5
10	5948	0.5	9.5
11	5948	0.5	11.5
12	5948	0.5	15.5
13	5948	1	9.5
14	5948	1	11.5
15	5948	1	15.5
16	5948	1.5	9.5
17	5948	1.5	11.5
18	5948	1.5	15.5
19	7568	0.5	9.5



ตารางที่ 7 (ต่อ) การแจกแจงการทดลองทั้งหมด 27 แบบ

การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกในการตัด (mm)	ความเร็วการป้อน (rpm)
20	7568	0.5	11.5
21	7568	0.5	15.5
22	7568	1	9.5
23	7568	1	11.5
24	7568	1	15.5
25	7568	1.5	9.5
26	7568	1.5	11.5
27	7568	1.5	15.5

### 3.6.2 การออกแบบการทดลองการขัดตบแต่งในสูตรผ้าเบรกหลายสูตร

ในการทดลองขั้นตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของความแตกต่างของความแข็งสูตรต่อความลาดเอียงของผ้าเบรกหลังการขัดตบแต่ง และศึกษาการขัดตบแต่งผ้าเบรกต่างสูตรด้วยความเร็วการป้อนที่แตกต่างกัน โดยตัวแปรที่จะทดลองและระดับของตัวแปรแสดงได้ดังตารางที่ 8 ในการทดลองนี้จะใช้ชิ้นงานเพียง 1 ขนาดคือชิ้นงานพื้นที่ 5948 ตารางมิลลิเมตร จากการออกแบบการทดลองสามารถแจกแจงการทดลองแบบแฟกทอเรียลได้ 9 รูปแบบดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ตัวแปรต้นและระดับของตัวแปร

ตัวแปรต้น	จำนวนระดับ	ค่า
ความแข็งของผ้าเบรก (HRR)	3	60, 90, 100
ความลึกในการขัดหน้าผ้าเบรกทั้ง 1 ครั้ง (mm)	2	0.5, 1.5
พื้นที่ผิวผ้าเบรก (mm <sup>2</sup> )	1	5948
ความเร็วการป้อน (rpm)	3	9.5, 11.5, 15.5

ตารางที่ 9 การทดลองปัจจัยของความแข็งของเคมีต่อความลาดเอียง

การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกการตัด (mm <sup>2</sup> )	ความแข็งเคมี (HRR)	ความเร็วการ ป้อน (rpm)
1	5948	0.5	60	9.5
2	5948	0.5	60	11.5
3	5948	0.5	60	15.5
4	5948	0.5	90	9.5
5	5948	0.5	90	11.5
6	5948	0.5	90	15.5
7	5948	0.5	100	9.5
8	5948	0.5	100	11.5
9	5948	0.5	100	15.5
10	5948	1.5	60	9.5
11	5948	1.5	60	11.5
12	5948	1.5	60	15.5
13	5948	1.5	90	9.5
14	5948	1.5	90	11.5
15	5948	1.5	90	15.5
16	5948	1.5	100	9.5
17	5948	1.5	100	11.5
18	5948	1.5	100	15.5

### 3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)

จากการออกแบบการทดลองในข้อ 3.6.1 และ 3.6.2 จะมีการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบจากการกำหนดค่าตัวแปรต้นและทั้งแบบเชิงเส้น แบบสองมิติและสามมิติ

### 3.8 การวิเคราะห์พื้นผิวความลาดเอียงทางกราฟิก (Graphical analysis)

ลักษณะผิวหน้าชิ้นงานจากการวัดความลาดเอียงในข้อ 3.4 จะนำมาสร้างแผนภาพแสดงพื้นผิวด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อให้เห็นลักษณะความลาดเอียงที่เกิดขึ้นเมื่อทำการขัดตกแต่งผ้าเบรกด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้ฟังก์ชัน “surf (x,y,H)” ในการสร้างพื้นผิว เมื่อ (x,y,H) คือพิกัดในแต่ละจุดการวัดพื้นผิวของผ้าเบรก



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองตามทีที่ออกแบบไปแล้วข้างต้นในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย การเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตอบสนองหรือความลาดเอียงของผิวหน้าผ้าเบรก ซึ่งตัวแปรอิสระประกอบด้วย ความลึกในการตัด พื้นผิว ความเร็วในการป้อนชิ้นงาน และความแข็งของเนื้อเคมี ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การทดลอง ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์การส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองของตัวแปรอิสระด้วยวิธีทางสถิติ การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรอิสระที่ช่วยให้ความลาดเอียงของผิวหน้าผ้าเบรกเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของกระบวนการรวมทั้งการวิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวด้วยการวิเคราะห์แบบกราฟิก

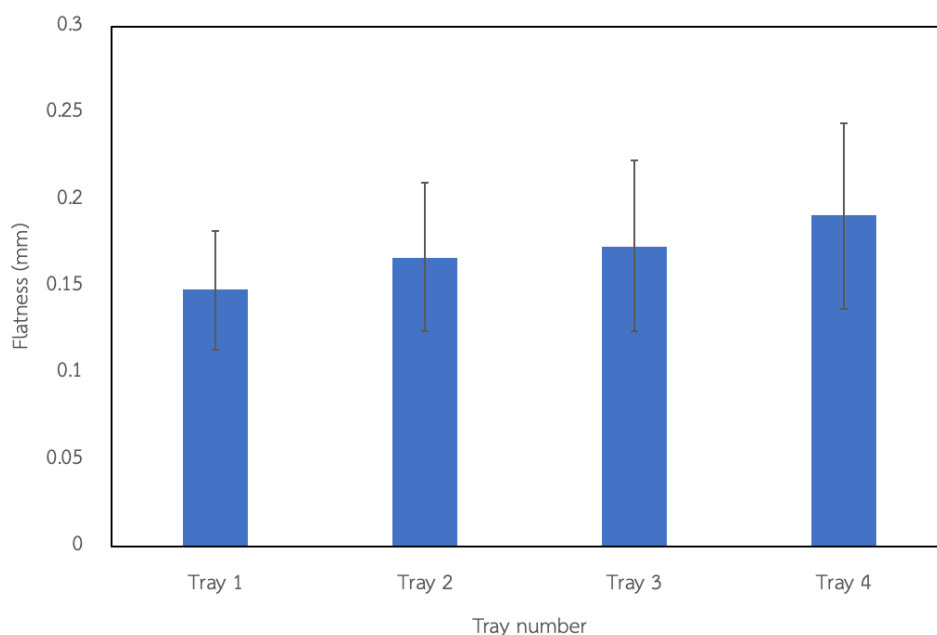
#### 4.1 ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายในเครื่องจักรขัดตกแต่ง

ปัจจัยที่สันนิษฐานว่าอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองขัดตกแต่งชิ้นงาน คือ ความแตกต่างของหลุมใส่ชิ้นงานของเครื่องจักรขัดตกแต่ง จากการทดลองขัดตกแต่งผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละหลุมใส่ชิ้นงาน 4 หลุมเพื่อตรวจสอบความแตกต่างของหลุมใส่ชิ้นงาน โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆในกระบวนการขัดตกแต่ง ได้แก่ ชนิดและขนาดผ้าเบรก สูตรเคมีผลิต ช่วงเวลาในการขัดตกแต่ง ความเร็วการป้อน ความลึกในการขัดตกแต่ง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Single factor ANOVA) ของหลุมใส่ชิ้นงานด้วยระดับนัยสำคัญ  $\alpha=0.05$  ได้ค่า P-Value = 0.184 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หมายความว่าหลุมใส่ชิ้นงานทั้ง 4 ไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha=0.05$  ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของหลุมใส่ชิ้นงาน 4 หลุม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	0.01053	0.003511	1.69	0.184
Error	40	0.08291	0.002073		
Total	43	0.09344			

แนวโน้มของค่าความลาดเอียงในแต่ละหลุมใส่ชิ้นงานแสดงได้ดังแผนภาพช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย (Interval plot) ในรูปที่ 28 พบว่าหลุมใส่ชิ้นงานที่ให้ความลาดเอียงสูงสุดคือหลุมที่ 4 ซึ่งมีค่าความลาดเอียงเฉลี่ยที่  $0.19 \pm 0.05$  มิลลิเมตร และหลุมใส่ชิ้นงานที่ให้ความลาดเอียงต่ำที่สุดคือหลุมที่ 1 ซึ่งมีค่าความลาดเอียงเฉลี่ยที่  $0.15 \pm 0.03$  มิลลิเมตร โดยที่พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดลองเป็น 2602 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 28 แผนภาพช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของค่าความลาดเอียงเปรียบเทียบในแต่ละหลุมใส่ชิ้นงาน

## 4.2 การวิเคราะห์ผลของความลึกในการตัด พื้นที่ผิว และความเร็วในการป้อนชิ้นงานต่อความลาดเอียงของผิวชิ้นงาน

### 4.2.1 ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองการขัดตกแต่งในสูตรผ้าเบรก 1 สูตรโดยใช้วิธีการออกแบบแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยจำนวนรูปแบบการทดลอง  $3^3$  หรือ 27 รูปแบบ ผลการทดลองแสดงค่าความลาดเอียงเมื่อเปลี่ยนความลึกในการตัด ความเร็วในการป้อน ในชิ้นงานแต่ละขนาดแสดงได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 27 รูปแบบ

StdOrder	RunOrder	Surface size (mm <sup>2</sup> )	Depth of cut (mm)	Feed rate (rpm)	Flatness (mm)
1	1	2602	0.5	9.5	0.065±0.012
2	2	2602	0.5	11.5	0.159±0.154
3	3	2602	0.5	15.5	0.186±0.099
4	4	2602	1	9.5	0.131±0.099
5	5	2602	1	11.5	0.306±0.093
6	6	2602	1	15.5	0.191±0.077
7	7	2602	1.5	9.5	0.101±0.047
8	8	2602	1.5	11.5	0.222±0.154
9	9	2602	1.5	15.5	0.128±0.117
10	10	5948	0.5	9.5	0.239±0.005
11	11	5948	0.5	11.5	0.197±0.075
12	12	5948	0.5	15.5	0.229±0.008
13	13	5948	1	9.5	0.249±0.024
14	14	5948	1	11.5	0.228±0.027
15	15	5948	1	15.5	0.222±0.010
16	16	5948	1.5	9.5	0.214±0.024
17	17	5948	1.5	11.5	0.207±0.006
18	18	5948	1.5	15.5	0.228±0.016
19	19	7568	0.5	9.5	0.462±0.068
20	20	7568	0.5	11.5	0.465±0.083
21	21	7568	0.5	15.5	0.515±0.049
22	22	7568	1	9.5	0.375±0.122
23	23	7568	1	11.5	0.447±0.046
24	24	7568	1	15.5	0.333±0.027

ตารางที่ 11 (ต่อ) ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 27 รูปแบบ

StdOrder	RunOrder	Surface size (mm <sup>2</sup> )	Depth of cut (mm)	Feed rate (rpm)	Flatness (mm)
25	25	7568	1.5	9.5	0.333±0.010
26	26	7568	1.5	11.5	0.344±0.084
27	27	7568	1.5	15.5	0.379±0.026

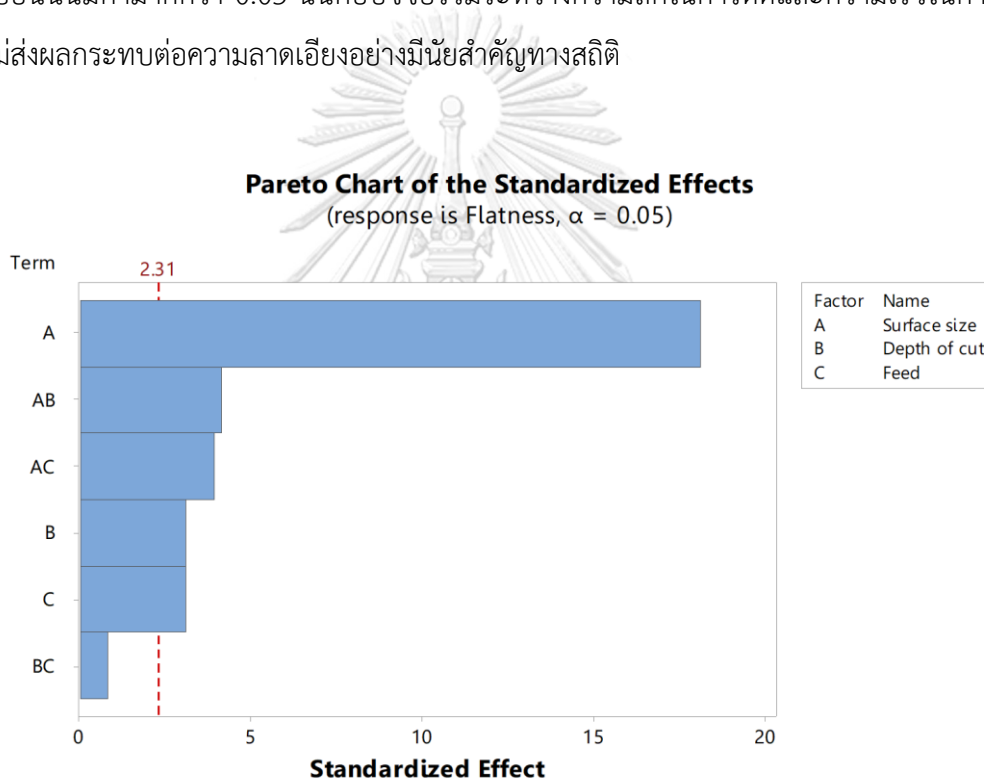
#### 4.2.2 การวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ คือวิธีการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนในการตรวจสอบ ค่าทางสถิติในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้แก่ องศาอิสระ ค่าผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน ค่ากำลังสองเฉลี่ย ค่าสถิติ F และ ค่าสถิติ P ที่ได้จากการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียลแสดงได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรเชิงเส้นและตัวแปรร่วม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	0.362806	0.020156	31.56	0.000
Linear	6	0.311028	0.051838	81.16	0.000
Surface size	2	0.292060	0.146030	228.64	0.000
Depth of cut	2	0.009565	0.004782	7.49	0.015
Feed	2	0.009404	0.004702	7.36	0.015
2-Way Interactions	12	0.051778	0.004315	6.76	0.006
Surface size*Depth of cut	4	0.025625	0.006406	10.03	0.003
Surface size*Feed	4	0.023408	0.005852	9.16	0.004
Depth of cut*Feed	4	0.002745	0.000686	1.07	0.429
Error	8	0.005109	0.000639		
Total	26	0.367916			

เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานด้วยค่าสถิติ P จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่  $\alpha=0.05$  โดยตั้งสมมติฐานว่า ถ้าค่าสถิติ P(ตัวแปร) < P(0.05) ให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และยอมรับสมมติฐานอื่นที่ระบุว่าตัวแปรอิสระส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรหลักหรือตัวแปรเชิงเส้น ได้แก่ พื้นที่หน้าตัด ความลึกในการตัด และความเร็วในการป้อน รวมถึงปัจจัยร่วม ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความลึกในการตัด และปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการป้อน ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ค่าสถิติ P ของปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อนนั้นมีค่ามากกว่า 0.05 นั่นคือปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 29 แผนภูมิพาร์โตแสดงระดับผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่อค่าความลาดเอียง

การวิเคราะห์ระดับการส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงจากแต่ละปัจจัยในกระบวนการสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิพาร์โตดังรูปที่ 29 พบว่า ปัจจัยหลักทั้งสามปัจจัย ได้แก่ พื้นที่หน้าตัด (A) ความลึกในการตัด (B) และความเร็วในการป้อน (C) รวมถึงปัจจัยร่วม ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความลึกในการตัด (AB) และปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการป้อน (AC) ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียง โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของ

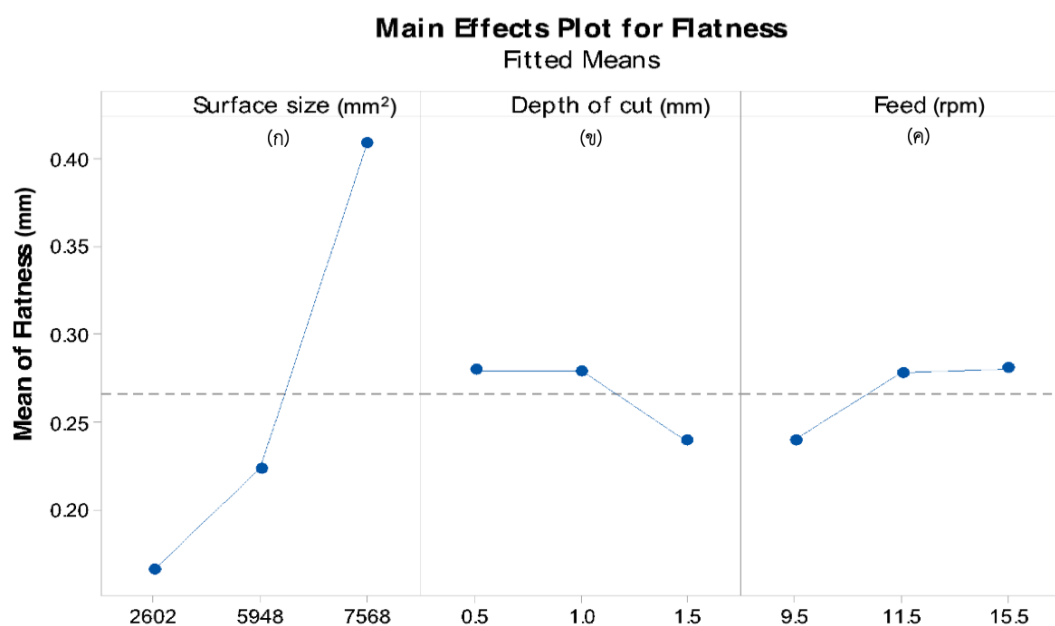


ผิวหน้าชิ้นงานมากที่สุดคือพื้นที่ผิวหน้าชิ้นงาน (A) ซึ่งปัจจัยนี้ส่งผลให้ปัจจัยร่วมของตัวแปรอื่นและตัวแปรความลาดเอียงมีผลกระทบต่อความลาดเอียงด้วย ปัจจัยร่วมที่ส่งผลกระทบรวมมากที่สุดคือปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความลึกในการตัด ส่วนปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบต่อความลาดเอียงคือปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน (BC) ซึ่งมีค่าผลกระทบต่ำกว่าค่าการกระจาย  $t=2.31$  ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha=0.05$

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม

ลักษณะของผลกระทบต่อความลาดเอียงจากตัวแปรอิสระ ได้แก่ พื้นที่ผิวหน้าชิ้นงาน ความลึกการตัด และความเร็วการป้อน จะสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟผลกระทบหลักและกราฟผลกระทบร่วม

(ก) กราฟผลกระทบหลัก



รูปที่ 30 กราฟผลกระทบหลักของตัวแปรอิสระต่อความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรก

ลักษณะการส่งผลกระทบโดยตรงต่อความลาดเอียงของตัวแปรในกระบวนการขัดตกแต่ง แสดงได้ดังกราฟผลกระทบหลักในรูปที่ 30 จะเห็นว่าขนาดพื้นที่ผิวหน้าผ้าเบรกมีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกับความลาดเอียงของชิ้นงาน โดยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความลาดเอียงสูงขึ้น และพื้นที่ผิวหน้าชิ้นงานเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความลาดเอียงมากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับผลจากแผนภูมิพารेटโตในรูปที่ 29 ส่วนปัจจัยความลึกในการตัดและ

ความเร็วในการป้อนชิ้นงานก็มีความสัมพันธ์กับความลาดเอียง โดยความลึกในการตัดมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความลาดเอียง คือเมื่อเพิ่มความลึกในการตัด ความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ลดลง โดยที่ความลึกในการตัด 1.5 ให้ความลาดเอียงเฉลี่ยต่ำที่สุด ส่วนความเร็วในการป้อนชิ้นงานมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความลาดเอียง โดยความเร็วการป้อนชิ้นงานเข้าสู่ใบขัดตกแต่งที่สูงขึ้นจะให้ความลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความลาดเอียงเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุดเมื่อความเร็วในการป้อนชิ้นงานมีค่า 15.5 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองวิเคราะห์ได้ว่า ความลึกในการตัดมีความสัมพันธ์ระหว่างกับความเร็วการป้อนของชิ้นงาน เมื่อความลึกในการตัดชิ้นงานต่อ 1 ครั้งมากขึ้น จะทำให้เกิดการหน่วงความเร็วขณะขึ้น ทำให้เวลาที่ชิ้นงานที่ผ่านออกจากใบขัดนั้นมากขึ้น นั่นคือชิ้นงานที่มีการหน่วงความเร็วมีโอกาสที่จะได้รับการขัดซ้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความลาดเอียงของชิ้นงานน้อยลง

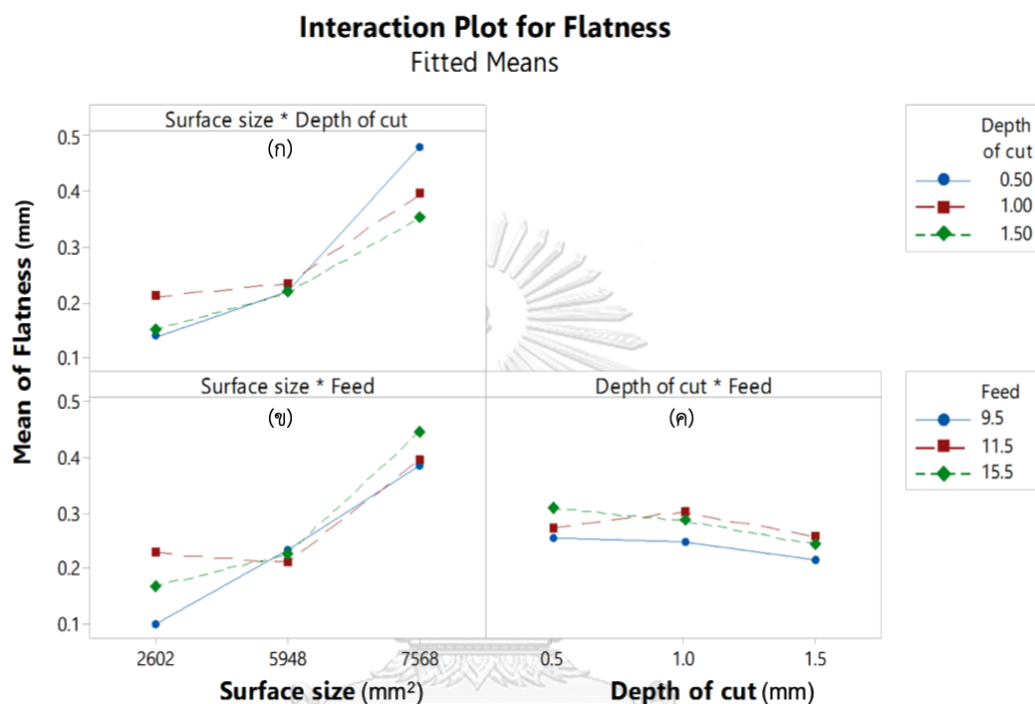
#### (ข) กราฟผลกระทบรวม

กราฟผลกระทบรวมเป็นกราฟที่ใช้วิเคราะห์การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรหลักสองตัวแปร และใช้สังเกตผลของปฏิสัมพันธ์ต่อตัวแปรตอบสนอง โดยลักษณะการส่งผลกระทบรวมต่อความลาดเอียงของปัจจัยร่วม ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความลึกในการตัด ( $\text{Surface size} \times \text{Depth of cut}$ ) ปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความเร็วในการป้อน ( $\text{Surface size} \times \text{Feed rate}$ ) และ ปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดกับความเร็วการป้อน ( $\text{Depth of cut} \times \text{Feed rate}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 31

จากกราฟแสดงผลกระทบรวมระหว่างพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานและความลึกในการตัด (รูปที่ 31 ก) พบว่าเป็นปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันเนื่องจากกราฟค่าเฉลี่ยของความลาดเอียงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานและความลึกในการตัดนั้นมีการตัดกัน เนื่องจากปัจจัยของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความลาดเอียงมาก ทำให้เมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัด ค่าความลาดเอียงมีค่าสูงขึ้นในทุกๆระดับของความลึกในการตัด

ปฏิสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานและความเร็วในการป้อนแสดงได้ในรูปที่ 31 ข ขึ้นพบว่าพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานและความเร็วในการป้อนเป็นปัจจัยที่ปฏิสัมพันธ์กันเนื่องจากกราฟค่าเฉลี่ยของความลาดเอียงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานและความเร็วการป้อนมีการตัดกัน เช่นเดียวกับกรณีในรูปที่ 31 ก ซึ่งในทุกๆระดับของความเร็วกการป้อน ค่าความลาดเอียงจะเพิ่มขึ้นสูงเมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความลาดเอียงมากที่สุด

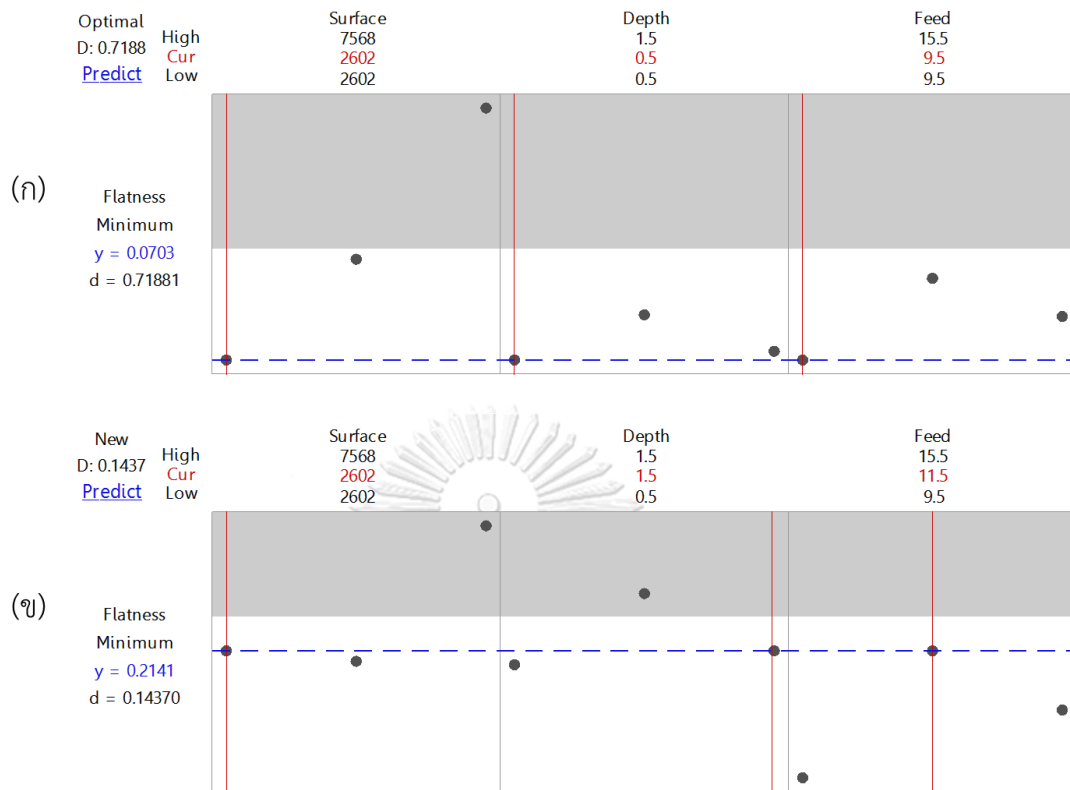
เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อนดังในรูปที่ 31ค พบว่าสองปัจจัยนี้ไม่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน สังเกตได้จากการไม่ตัดกันของกราฟค่าเฉลี่ยของความลาดเอียงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อน



รูปที่ 31 กราฟผลกระทบร่วมของตัวแปรอิสระต่อความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรก

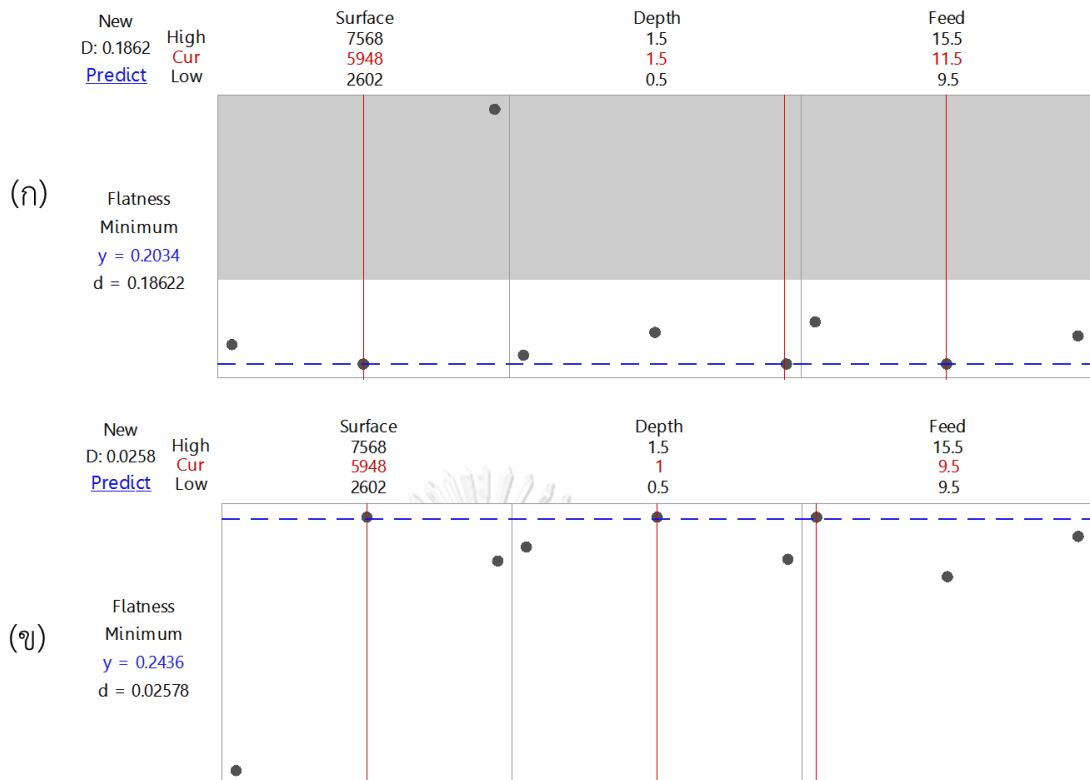
#### 4.2.4 การหาเงื่อนไขการตัดตกแต่งที่เหมาะสม

หลักการที่จะใช้ในการหาเงื่อนไขการตัดตกแต่งผ้าเบรกที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ชิ้นงานผ้าเบรกมีความลาดเอียงน้อยที่สุดจะใช้หลักการ optimization โดยพิจารณาว่าสำหรับเครื่องตัดตกแต่งที่ใช้ในการทดลองนี้ ควรเลือกชิ้นงานผ้าเบรกที่มีพื้นที่ผิวหน้าขนาดเท่าไร ความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อนชิ้นงานควรเป็นอย่างไรจึงจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความลาดเอียงน้อยที่สุดซึ่งเงื่อนไขการตัดตกแต่งที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการกำหนดขอบเขตค่าความลาดเอียงที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ คือ 0.25 มิลลิเมตร และความลาดเอียงเป้าหมายที่ต่ำที่สุดคือ 0 มิลลิเมตร หรือไม่มี ความลาดเอียง ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ข้อมูลหลังจากการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียลซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นข้อมูลไม่ต่อเนื่อง ซึ่งค่าความลาดเอียงที่เกิดขึ้นจะเท่ากับจำนวนระดับของตัวแปรต้น คือ 3 ค่า ต่อหนึ่งตัวแปร



รูปที่ 32 เงื่อนไขการตัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 2602 ตารางมิลลิเมตร  
 (ก) เงื่อนไขที่ทำให้ได้ความลาดเอียงต่ำที่สุด (ข) เงื่อนไขที่ทำให้ได้ความลาดเอียงสูงที่สุดที่ยอมรับได้

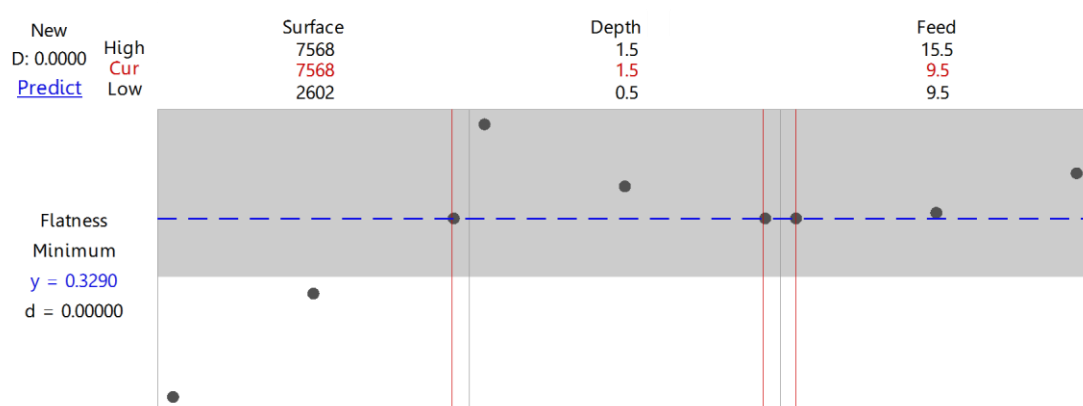
สำหรับเงื่อนไขการตัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกขนาด 2602 ตารางมิลลิเมตรแสดงได้ดังรูปที่ 32 พบว่าเงื่อนไขที่จะทำให้ได้ค่าความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานน้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อน 9.5 รอบต่อนาที โดยความลาดเอียงที่เกิดขึ้นมีค่า 0.0703 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 32ก และเมื่อกำหนดค่าความลาดเอียงที่สูงที่สุดที่ยอมรับได้ คือ 0.25 มิลลิเมตร เงื่อนไขการตัดตกแต่งที่จะทำให้ค่าความลาดเอียงมีค่ามากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อความลึกในการตัดมีค่า 1.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อนชิ้นงานมีค่า 11.5 รอบต่อนาที โดยค่าความลาดเอียงมีค่า 0.2141 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 32ข



รูปที่ 33 เงื่อนไขการขัดตบแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร  
 (ก) เงื่อนไขที่ทำให้ได้ความลาดเอียงต่ำที่สุด (ข) เงื่อนไขที่ทำให้ได้ความลาดเอียงสูงที่สุดที่ยอมรับได้

เงื่อนไขการขัดตบแต่งชิ้นงานผ้าเบรกขนาด 5948 ตารางมิลลิเมตรแสดงได้ดังรูปที่ 33 พบว่าเงื่อนไขที่จะทำให้ได้ค่าความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานน้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ความลึกในการตัด 1.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อน 11.5 รอบต่อนาที โดยความลาดเอียงที่เกิดขึ้นมีค่า 0.2034 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 33ก และเมื่อกำหนดค่าความลาดเอียงที่สูงที่สุดที่ยอมรับได้ คือ 0.25 มิลลิเมตร เงื่อนไขการขัดตบแต่งที่จะทำให้ค่าความลาดเอียงมีค่ามากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อความลึกในการตัดมีค่า 1 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อนชิ้นงานมีค่า 9.5 รอบต่อนาที โดยค่าความลาดเอียงมีค่า 0.2436 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 33ข

สำหรับผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร พบว่าไม่มีเงื่อนไขความลึกในการตัด และความเร็วในการป้อนใดที่ทำให้ค่าความลาดเอียงมีค่าไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตรซึ่งเป็นความลาดเอียงที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ ค่าความลาดเอียงที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้มีค่า 0.3290 มิลลิเมตรซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความลึกในการตัดมีค่า 1.5 มิลลิเมตรหรืออยู่ในระดับความลึกในการตัดที่สูงที่สุด และความเร็วในการป้อนมีค่า 9.5 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นความเร็วระดับต่ำที่สุด โดยเงื่อนไขการขัดตบแต่งแสดงได้ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 เงื่อนไขการตัดตกแต่งชิ้นงานผ้าเบรกที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร

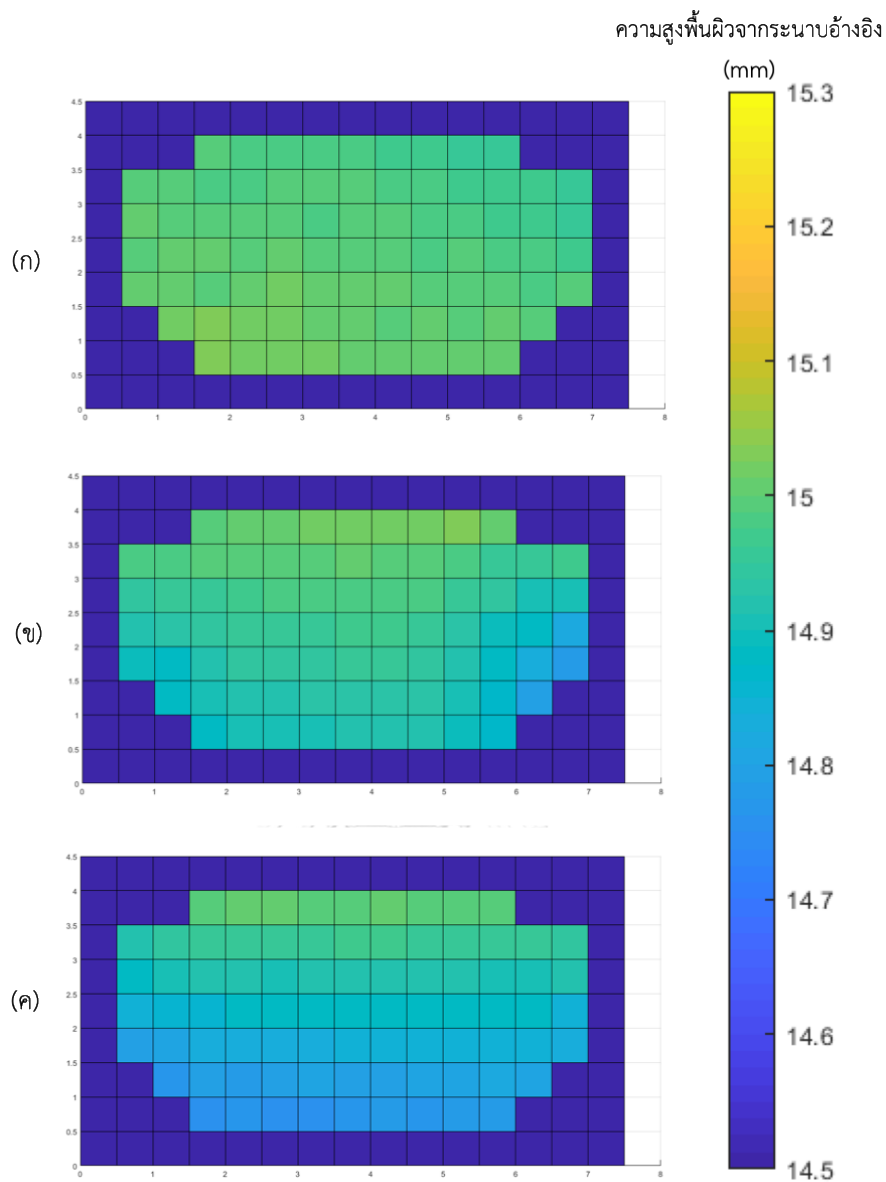
เมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการตัดตกแต่งทั้งหมดพบว่าเงื่อนไขที่จะทำให้ได้ค่าความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานผ้าเบรกลดน้อยที่สุดนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเล็กที่สุด นั่นคือที่ขนาด 2602 ตารางมิลลิเมตร ความลึกในการตัดมีค่าน้อยที่สุดคือ 0.5 มิลลิเมตร และความเร็วการป้อนชิ้นงานมีค่าต่ำที่สุดคือ 9.5 รอบต่อนาที ค่าความลาดเอียงต่ำที่สุดคือ 0.0703 มิลลิเมตร

#### 4.2.8 การวิเคราะห์ทางกราฟิก

ข้อมูลความลาดเอียงของชิ้นงานที่บันทึกเป็นค่าความสูงจากระดับอ้างอิง จะถูกนำมาสร้างเป็นกราฟแสดงลักษณะพื้นผิว โดยใช้ฟังก์ชันการร่างพื้นผิว “surf (x,y,z)” ของโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB ในการสร้างรูปจำลองพื้นผิวสองมิติ แล้วนำรูปจำลองสองมิติของชิ้นงานผ้าเบรกที่ถูกตัดตกแต่งด้วยเงื่อนไขที่ต่างกันนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อศึกษาว่าการปรับระดับปัจจัยในกระบวนการตัดตกแต่งส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวหน้าของชิ้นงานอย่างไร โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับดังนี้

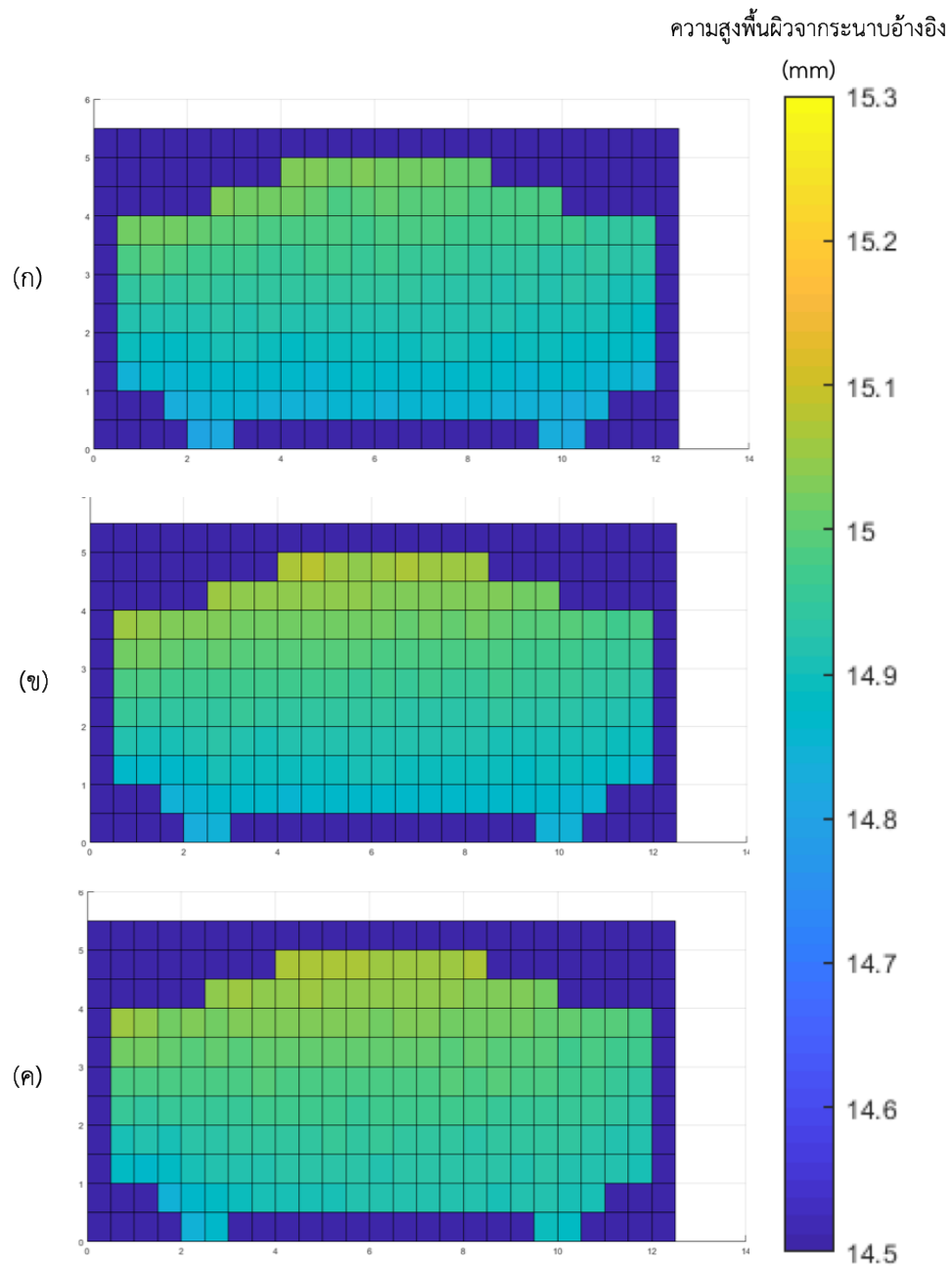
(ก) ลักษณะพื้นผิวเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการป้อน

ผลการเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียงเมื่อเปลี่ยนความเร็วในการป้อนของชิ้นงานขนาด 2602 ตารางมิลลิเมตรแสดงได้ดังรูปที่ 35 พบว่าเมื่อความเร็วในการป้อนชิ้นงานสูงขึ้น ผิวหน้าชิ้นงานจะมีความลาดเอียงมากขึ้น สังเกตได้จากความแตกต่างของระดับสี โดยชิ้นงานที่ใช้ความเร็วการป้อนสูงจะเห็นความแตกต่างของระดับสีที่ชัดเจนกว่าชิ้นงานที่ใช้ความเร็วในการป้อนต่ำกว่า



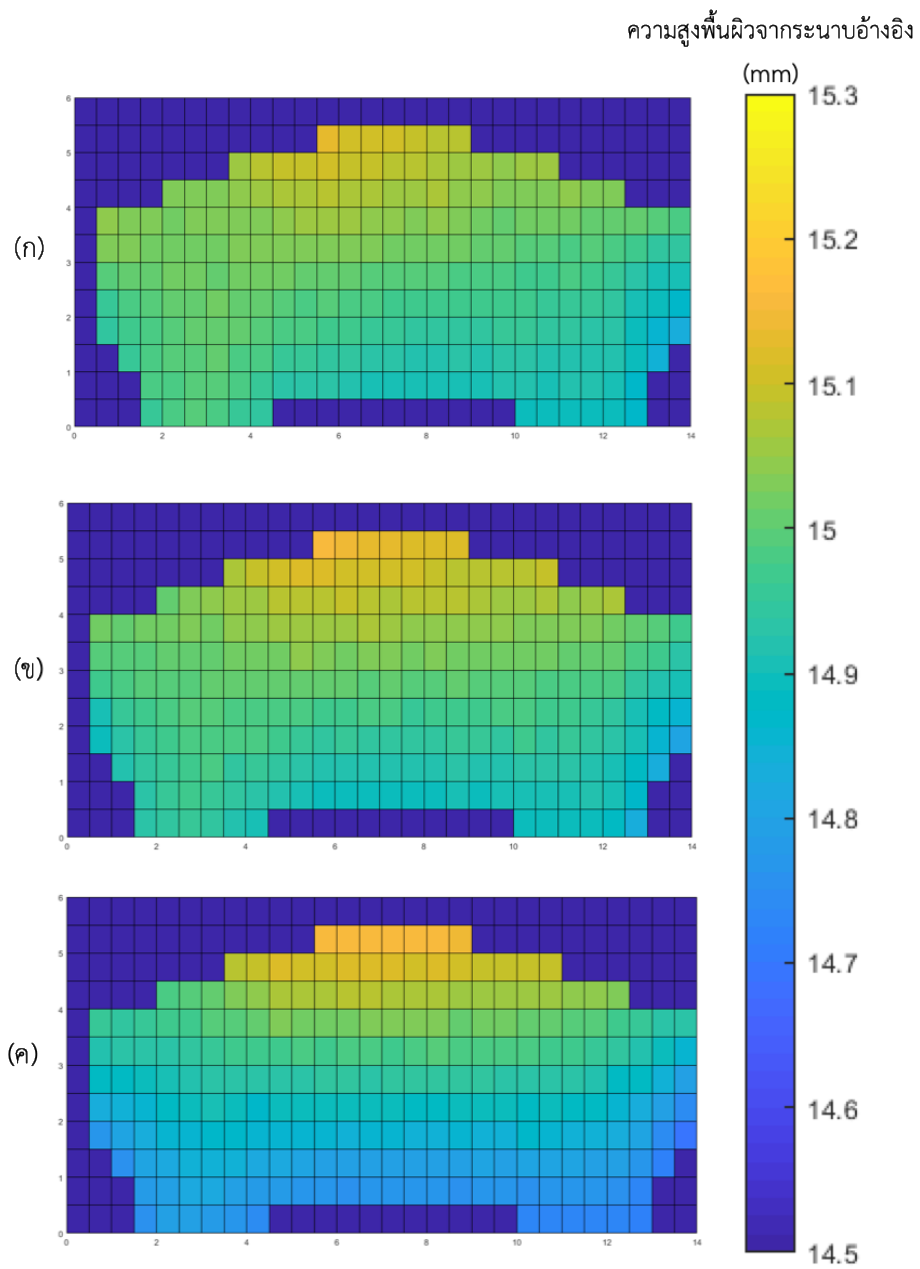
รูปที่ 35 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 2602 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน  
(ก) 9.5 รอบต่อนาที (ข) 11.5 รอบต่อนาที (ค) 15.5 รอบต่อนาที

เมื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วต่อความลาดเอียงในชิ้นงานขนาดอื่นๆ ได้แก่ ชิ้นงานขนาด 5948 ตารางมิลลิเมตร และ 7568 ตารางมิลลิเมตร ดังในรูปที่ 36 และรูปที่ 37 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มความลาดเอียงของชิ้นงานเมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนมีแนวโน้มเหมือนกันกับชิ้นงานขนาด 2602 ตารางมิลลิเมตร คือความเร็วการป้อนชิ้นงานทำให้เกิดความลาดเอียงของชิ้นงานมากขึ้น



รูปที่ 36 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขีดตักแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน (ก) 9.5 รอบต่อนาที (ข) 11.5 รอบต่อนาที (ค) 15.5 รอบต่อนาที

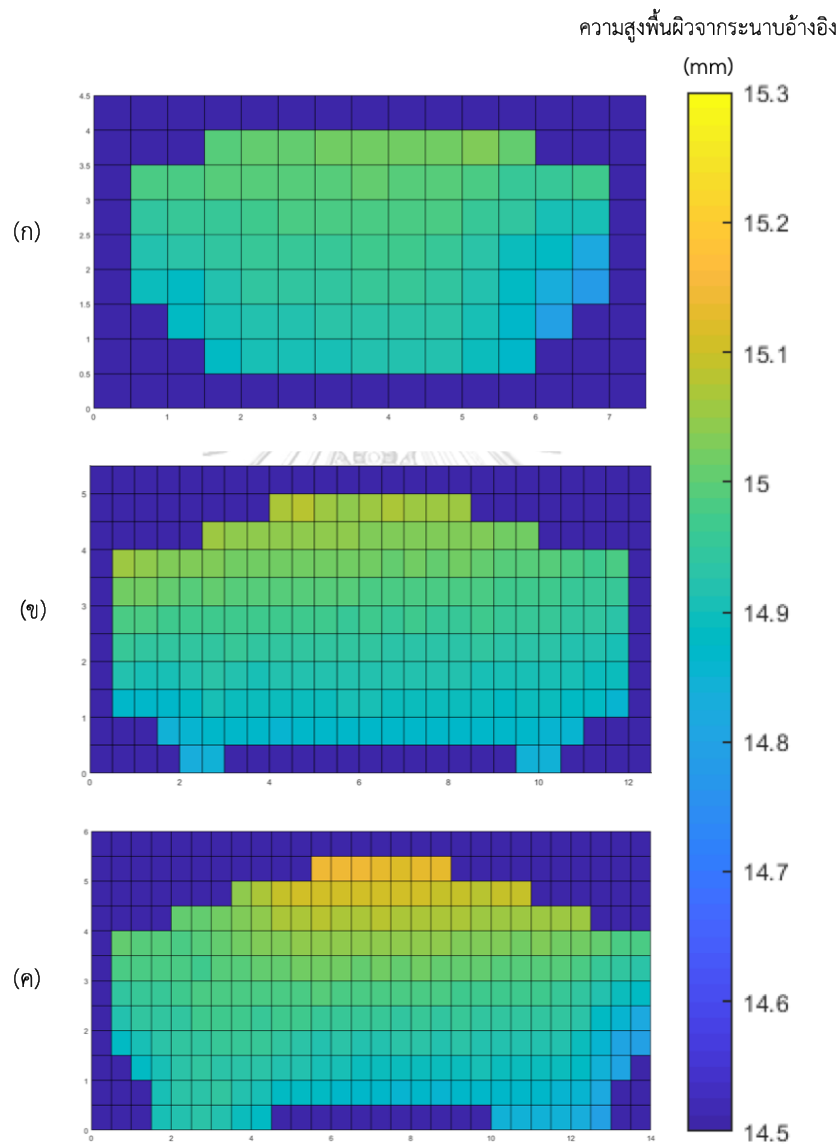




รูปที่ 37 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขีดตักแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วการป้อน (ก) 9.5 รอบต่อนาที (ข) 11.5 รอบต่อนาที (ค) 15.5 รอบต่อนาที

(ข) ลักษณะผิวหน้าชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

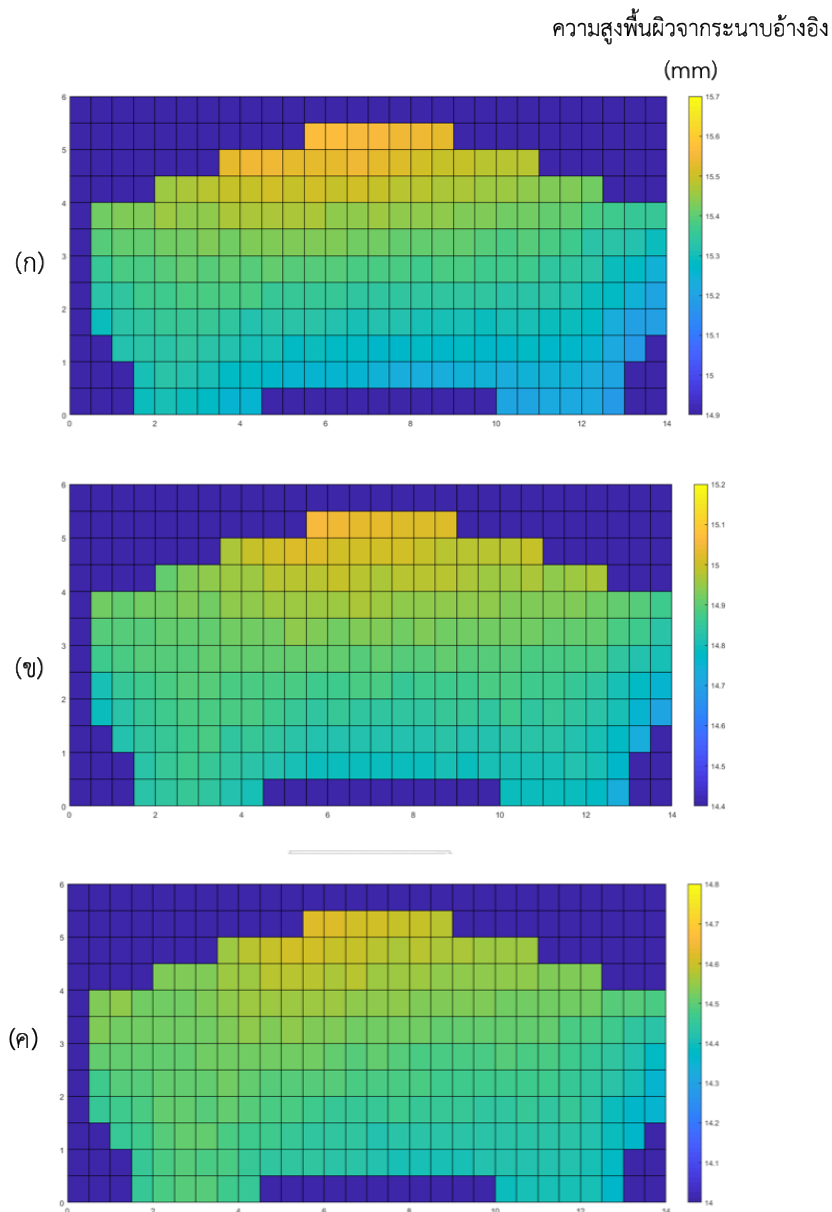
รูปจำลองผิวหน้าผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดแสดงได้ดังรูปที่ 38 พบว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้นทำให้ชิ้นงานมีโอกาสที่จะลาดเอียงมากขึ้นเมื่อเทียบในสเกลความสูงพื้นผิวเดียวกัน



รูปที่ 38 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียงเมื่อความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วในการป้อน 11.5 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด

(ก) 2602 ตารางมิลลิเมตร (ข) 5948 ตารางมิลลิเมตร (ค) 7568 ตารางมิลลิเมตร

(ค) ลักษณะผิวหน้าชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงความลึกในการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 39 การเปรียบเทียบลักษณะความลาดเอียง เมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกที่มีพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร ใช้ความเร็วการป้อน 11.5 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงระดับความลึกการตัด  
(ก) 0.5 มิลลิเมตร (ข) 1 มิลลิเมตร (ค) 1.5 มิลลิเมตร

รูปจำลองผิวหน้าผ้าเบรกเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกการตัดแสดงได้ดังรูปที่ 39 จากรูปพบว่า สำหรับชิ้นงานขนาด 7568 ตารางมิลลิเมตร ความลึกในการตัดที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5 มิลลิเมตร เป็น 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 39ข) และ 1.5 มิลลิเมตร (รูปที่ 39ค) ความลาดเอียงจะน้อยลง แต่ความ

แตกต่างที่เกิดขึ้นน้อยมากจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงให้เห็นว่าความลึกในการตัดส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ได้แก่ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

จากรูปจำลองลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานทั้งหมดสังเกตได้อีกว่า ทิศทางความลาดเอียงของชิ้นงานจะมีลักษณะเดียวกันไม่ว่าจะใช้เงื่อนไขการตกแต่งอย่างไร คือการไล่ระดับความสูงของพื้นผิวจะไล่ระดับจากสูงไปต่ำในทิศจากด้านบนของชิ้นงานไปยังด้านล่างของชิ้นงาน แต่ทั้งนี้ ระดับของความลาดเอียงจะมีความแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับค่าของตัวแปร ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ความลึกในการตัด และความเร็วในการป้อนชิ้นงาน

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลของความแข็งของวัสดุเบรกต่อความลาดเอียงของผิวชิ้นงาน

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.6.2 และทำการทดสอบวัดความลาดเอียงของผิวผ้าเบรกเมื่อขัดตกแต่งผ้าเบรกไว้โยหินที่มีความแข็งต่างกัน ได้แก่ ความแข็ง 60 HRR, 90 HRR และ 100 HRR แล้วนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อดูผลกระทบของความแข็งของผ้าเบรกเทียบกับปัจจัยอื่นในกระบวนการขัดตกแต่ง ได้แก่ ความลึกในการตัด และความเร็วในการป้อนชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงได้ดังตารางที่ 13

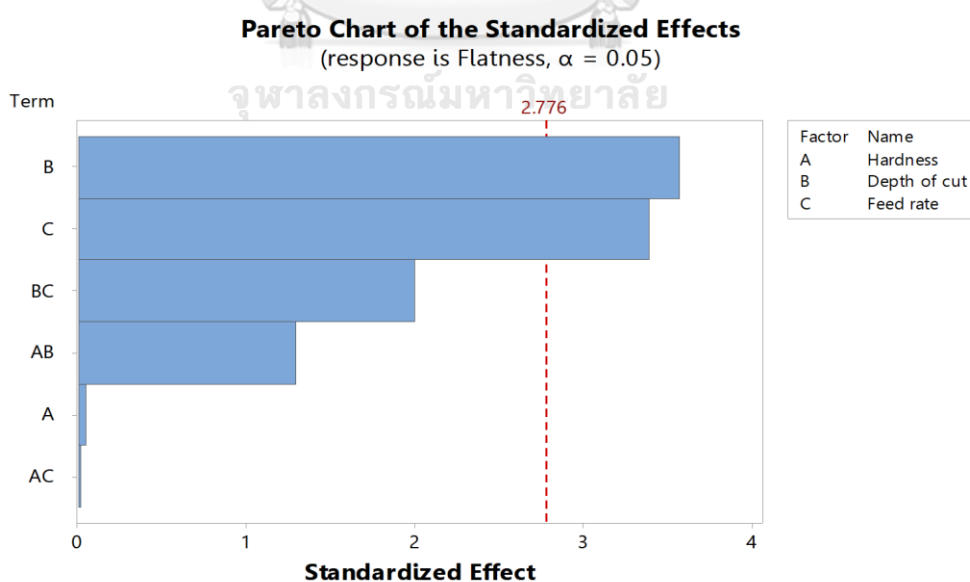
ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งชิ้นงานเปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	0.031420	0.002417	3.45	0.121
Linear	5	0.023139	0.004628	6.60	0.046
Hardness	2	0.000054	0.000027	0.04	0.963
Depth of cut	1	0.008948	0.008948	12.77	0.023
Feed rate	2	0.014137	0.007069	10.09	0.027
2-Way Interactions	8	0.008280	0.001035	1.48	0.373

ตารางที่ 13 (ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งชิ้นงานเปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hardness*Depth of cut	2	0.002634	0.001317	1.88	0.266
Hardness*Feed rate	4	0.000218	0.000054	0.08	0.985
Depth of cut*Feed rate	2	0.005429	0.002714	3.87	0.116
Error	4	0.002803	0.000701		
Total	17	0.034222			

เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานด้วยค่าสถิติ P จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่  $\alpha=0.05$  พบว่า ความแข็งของผ้าเบรกที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วในการป้อน พบว่าความลึกในการตัดและความเร็วการป้อนชิ้นงานนั้นส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 40



รูปที่ 40 แผนภูมิพาเรโตแสดงระดับการส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของความแข็งชิ้นงานเปรียบเทียบกับความลึกในการตัดและความเร็วการป้อน

ระดับการส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิพาเรโตดังรูปที่ 40 พบว่าความลึกในการตัด (B) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงมากที่สุด และความเร็วในการป้อน (C) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงมากที่สุดเป็นอันดับที่ 2 ในขณะที่ความแข็งของวัสดุเคมี (A) และปัจจัยร่วมอื่นๆ ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดกับความเร็วการป้อน (BC) ปัจจัยร่วมระหว่างความแข็งกับความลึกในการตัด (AC) และปัจจัยร่วมระหว่างความแข็งเคมีกับความเร็วในการป้อน (AB) ไม่มีผลกระทบต่อความลาดเอียง ซึ่งค่าผลกระทบต่ำกว่าค่าการกระจาย  $t=2.776$  ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha=0.05$



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตัดตกแต่ง ได้แก่ ขนาดพื้นที่หน้าตัดผ้าเบรก ความลึกในการตัด ความเร็วการป้อน และความแข็งของเนื้อเคมี ต่อ ความลาดเอียงของผิวผ้าเบรกหลังตัดตกแต่ง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อ ศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละเงื่อนไขในการตัดตกแต่งต่อความลาดเอียง และสามารถหาเงื่อนไขในการตัดตกแต่งที่เหมาะสมที่ทำให้ลดโอกาสการเกิดความลาดเอียงได้มากที่สุด ทั้งนี้ การวิเคราะห์ ลักษณะความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์จากรูปจำลองกราฟิกยังช่วยยืนยันผลการ วิเคราะห์ทางสถิติอีกด้วย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยมีตัวแปรในกระบวนการตัดตกแต่ง 3 ตัวแปร ตัวแปรละ 3 ระดับ ได้แก่ ขนาดพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานที่ขนาด 2602 5948 และ 7568 ตาราง มิลลิเมตร ความลึกในการตัดที่ 0.5 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อนชิ้นงานที่ 9.5, 11.5 และ 15.5 รอบต่อนาที รวมเงื่อนไขในการตัดตกแต่งทั้งหมด 27 เงื่อนไข โดยแต่ละเงื่อนไขมีการ เก็บข้อมูลความลาดเอียงซ้ำ 3 ครั้ง และทำการทดลองทั้งหมด 1 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์การส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงสามารถสรุปได้ว่า พื้นที่หน้าตัด ความลึกในการตัด และความเร็วการป้อน เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของผิวชิ้นงาน โดยพื้นที่หน้าตัดเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงมากที่สุด ผลการวิเคราะห์ด้วยกราฟผลกระทบหลักแสดงให้เห็นว่า ความลาดเอียงของผ้าเบรกจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของผ้าเบรกใหญ่ขึ้น ความลึกในการตัดชิ้นงานน้อยลง และความเร็วในการป้อนชิ้นงานสูง โดยรูปจำลองทางกราฟิกได้แสดงลักษณะผิวหน้าชิ้นงานไปในทิศทางสอดคล้องกับผลการทดลอง สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความลึกในการตัด และปัจจัยร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความเร็วในการป้อน เป็นปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน และแนวโน้มความลาดเอียงที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดต่อความลาดเอียง แต่ทั้งนี้ ปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการตัดและ ความเร็วในการป้อน ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียง

เมื่อวิเคราะห์เงื่อนไขในการขัดตบแต่งที่ทำให้ได้ค่าความลาดเอียงน้อยที่สุดเมื่อกำหนดขีดจำกัดบนของความลาดเอียงให้ไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร พบว่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานต้องมีขนาดเล็กที่สุด คือ 2602 ตารางมิลลิเมตร ความลึกในการตัดเป็นค่าต่ำที่สุด 0.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อนเป็นค่าต่ำที่สุด คือ 9.5 รอบต่อนาที โดยให้ค่าความลาดเอียงต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.0703 มิลลิเมตร เงื่อนไขในการขัดตบแต่งที่ให้ค่าความลาดเอียงสูงที่สุดที่ยอมรับได้คือเงื่อนไขที่ใช้พื้นที่หน้าตัด 5948 ตารางมิลลิเมตร ความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร และความเร็วในการป้อน 9.5 รอบต่อนาที โดยให้ค่าความลาดเอียงสูงที่สุดที่ 0.2436 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานขนาดพื้นที่หน้าตัด 7568 ตารางมิลลิเมตร ไม่มีเงื่อนไขใดที่ทำให้ความลาดเอียงของชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ค่าความลาดเอียงที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับพื้นที่หน้าตัดขนาด 7568 ตารางมิลลิเมตรมีค่า 0.3290 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความลึกในการตัดมีค่า 1.5 มิลลิเมตรหรืออยู่ในระดับความลึกในการตัดที่สูงที่สุด และความเร็วในการป้อนมีค่า 9.5 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นความเร็วระดับต่ำที่สุด

เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของความแข็งวัสดุเคมีต่อความลาดเอียงของผ้าเบรก โดยใช้ระดับความแข็งชิ้นงาน 3 ระดับ ได้แก่ 60 90 และ 100 HRR ความลึกในการตัด 2 ระดับ และความเร็วในการป้อน 3 ระดับ แล้ววิเคราะห์ผลกระทบด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า การเปลี่ยนแปลงความแข็งของวัสดุเคมีไม่ส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงความลึกในการตัดและความลึกในการป้อน

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากกราฟผลกระทบหลัก การลดความลาดเอียงจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วในการป้อนต่ำ และใช้ความลึกในการตัดสูง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อความลึกในการตัดชิ้นงานต่อ 1 ครั้งมากขึ้น จะทำให้เกิดการหน่วงความเร็วขณะขึ้น ทำให้เวลาที่ชิ้นงานที่ผ่านออกจากใบขัดนั้นมากขึ้น นั่นคือชิ้นงานที่มีการหน่วงความเร็วมีโอกาสที่จะได้รับการขัดซ้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความลาดเอียงของชิ้นงานน้อยลง

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความลึกในการตัด ผลกระทบร่วมระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความเร็วในการป้อน แนวโน้มความลาดเอียงที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดต่อความลาดเอียง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความลาดเอียงมาก ดังนั้น ผลกระทบจากปัจจัยร่วมจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดต่อความลาดเอียง



จากการหาเงื่อนไขการขัดตบแต่งที่ทำให้ชิ้นงานมีความลาดเอียงไม่เกินขีดจำกัดสูงสุด พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่อาจไม่สามารถตอบสนองต่อเงื่อนไขความลาดเอียงที่กำหนดได้ กล่าวได้ว่าไม่ควรใช้ชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่มาขัดตบแต่งด้วยเครื่องจักรขัดตบแต่งที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ หากต้องการให้ความลาดเอียงชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดควรมีการพิจารณาขัดตบแต่งด้วยเครื่องจักรอื่น

จากการวิเคราะห์ความลาดเอียงของผ้าเบรกที่มีความแข็งแตกต่างกัน พบว่าความแข็งของผ้าเบรกที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อความลาดเอียง อาจเป็นเพราะ ชิ้นงานทั้ง 3 ระดับความแข็ง คือ 60 90 และ 100 HRR อาจไม่ได้มีความแข็งต่างกันมาก และความแข็งชิ้นงานค่อนข้างน้อยมากเมื่อเทียบกับความแข็งของใบขัดตบแต่งที่ใช้กากเพชรที่เป็นวัสดุขัดถูจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างเมื่อขัดตบแต่งด้วยความเร็วและความลึกการป้อนเดียวกัน

### 5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

ไดอัลเกจแบบดิจิทัลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าเปรียบเทียบความลาดเอียงจากจุดอ้างอิงเท่านั้น หากต้องการวัดความหนาของผ้าเบรก แทนยึดของไดอัลเกจจะต้องบอกระดับความสูงเมื่อเลื่อนไดอัลเกจขึ้นลงได้ แต่แทนยึดไดอัลเกจที่มีอยู่ไม่สามารถระบุความสูงได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แทนวัดความสูงในการวัดความหนาของชิ้นงานแยกต่างหาก

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นวิธีการที่แม่นยำในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับตัวแปรต้นต่อตัวแปรตอบสนองเนื่องจากการรวมกันของทุกเงื่อนไขที่เป็นไปได้ในการทดลอง แต่ข้อจำกัดของวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือเป็นวิธีที่ค่อนข้างสิ้นเปลืองทรัพยากร และไม่สามารถสร้างสมการพยากรณ์โดยตรงได้ หากต้องการทราบสมการพยากรณ์ควรเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง เช่น การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน (Box-Benhken) หรือการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central composite method)

2. ไดอัลเกจอาจไม่ใช่เครื่องมือที่ดีที่สุดในการวัดความลาดเอียงของผิวหน้าชิ้นงาน หากเป็นไปได้ควรทดลองใช้เครื่องมืออื่นที่มีความแม่นยำในการวัดมากกว่า เช่น เครื่องวัดสามมิติ (Coordinate measuring machine) หรือเครื่องซีเอ็มเอ็ม (CMM) ซึ่งสามารถบันทึกโปรแกรมการวัดชิ้นงานได้ ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัด

3. แนวทางของงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษากระบวนการตัดตกแต่งด้วยเครื่อง  
ตัดตกแต่งแบบอัตโนมัติได้



## บรรณานุกรม

- [1] A. Betsill, NAPA Premium Disc Brake Pad Statement of Requirements-Engineering, in: R.D. Engineering (Ed.) 2015.
- [2] R.I. King, R.S. Hahn, Handbook of Modern Grinding Technology, Chapman and Hall 1986.
- [3] A. Saravanakumar, S. Dhanabal, E. Jayanand, P. Logeshwaran, Analysis of process parameters in surface grinding process, Material Today 5 (2018) 8131-8137.
- [4] M.A. Sutar, A.R. Acharya, Optimization of critical to quality parameters of vertical spindle surface grinder, Journal of advance engineering research and studies (2013) 61-66.
- [5] R.C. Dante, Handbook of Friction Materials and their Applications, 1st ed., Woodhead Publishing, UK, 2016.
- [6] E.P.A. (EPA), Memorandum of understanding on Copper mitigation in watersheds and waterways, in: E.P.A. (EPA) (Ed.) California, USA, 2014.
- [7] F. Klocke, Manufacturing process 2 Grinding, Honning, Lapping, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- [8] M.P. Groover, Fundamental of Modern Manufacturing, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 2010.
- [9] G. Srihari, G.K. Lal, Mechanics of vertical surface grinding, Journal of materials processing technology 44 (1994) 14-28.
- [10] ISO, Geometrical product specification (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out, 2017.
- [11] ISO, Geometrical Product Specification (GPS) - Flatness - Part 2 : Specification operator ISO/TS 12781-2, 2003.
- [12] J. Antony, Design of Experiments for Engineers and Scientists, 1st ed., Elsevier 2014.
- [13] D.C. Montgomery, Introduction to statistical quality control, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [14] NIST/SEMATECH, Electronic Handbook of Statistical Methods, 2003. <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. (Accessed 13/03 2019).

- [15] S. Sheth, P.M. George, Experimental investigation and prediction of flatness and surface roughness during face milling operation of WCB material, *Procedia Technology* 23 (2016) 344-351.
- [16] E. Atzeni, L. Luliano, Experimental study on grinding of a sintered friction material, *Journal of Material Processing Technology* 196 (2008) 184-189.
- [17] K.A. Hekman, S.Y. Liang, Flatness control in grinding by depth of cut manipulation, *Mechatronics* 8 (1998) 323-335.
- [18] S. Periyasami, M. Aravind, D. Vivek, K.S. Amirthagadeswaran, Optimization of Surface Grinding Process Parameters for Minimum Surface Roughness in AISI 1080 Using Response Surface Methodology, *Advanced Materials Research* 984-985 (2014) 118-123.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**













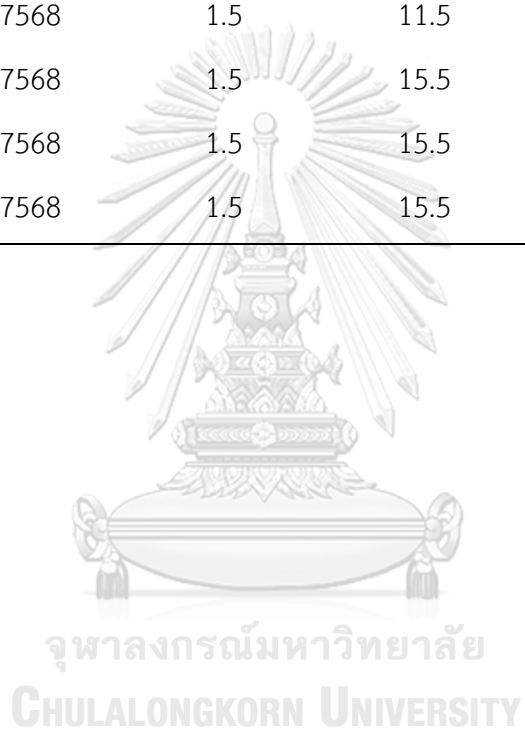
ตารางที่ ข-1 บันทึกผลการทดลองความลาดเอียงของแต่ละการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วป้อน (rpm)	ชั้นที่	ความลาดเอียง (mm)
1	2602	0.5	9.5	1	0.052
1	2602	0.5	9.5	2	0.067
1	2602	0.5	9.5	3	0.076
2	2602	0.5	11.5	1	0.065
2	2602	0.5	11.5	2	0.075
2	2602	0.5	11.5	3	0.337
3	2602	0.5	15.5	1	0.245
3	2602	0.5	15.5	2	0.241
3	2602	0.5	15.5	3	0.072
4	2602	1	9.5	1	0.072
4	2602	1	9.5	2	0.076
4	2602	1	9.5	3	0.246
5	2602	1	11.5	1	0.290
5	2602	1	11.5	2	0.253
5	2602	1	11.5	3	0.376
6	2602	1	15.5	1	0.215
6	2602	1	15.5	2	0.253
6	2602	1	15.5	3	0.104
7	2602	1.5	9.5	1	0.154
7	2602	1.5	9.5	2	0.085
7	2602	1.5	9.5	3	0.064
8	2602	1.5	11.5	1	0.050
8	2602	1.5	11.5	2	0.345
8	2602	1.5	11.5	3	0.272

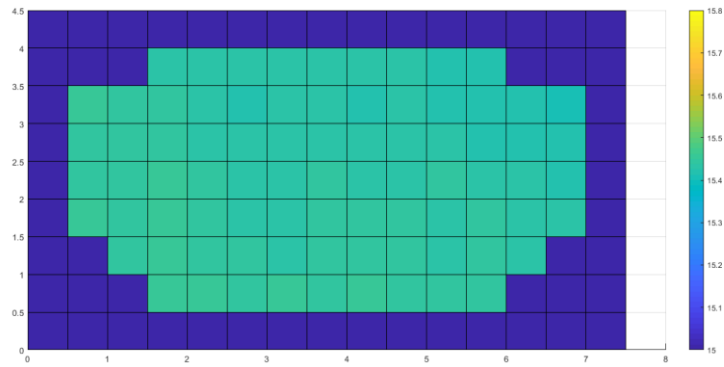
การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วป้อน (rpm)	ชั้นที่	ความลาดเอียง (mm)
9	2602	1.5	15.5	1	0.261
9	2602	1.5	15.5	2	0.043
9	2602	1.5	15.5	3	0.079
10	5948	0.5	9.5	1	0.236
10	5948	0.5	9.5	2	0.236
10	5948	0.5	9.5	3	0.244
11	5948	0.5	11.5	1	0.230
11	5948	0.5	11.5	2	0.250
11	5948	0.5	11.5	3	0.111
12	5948	0.5	15.5	1	0.230
12	5948	0.5	15.5	2	0.220
12	5948	0.5	15.5	3	0.236
13	5948	1	9.5	1	0.270
13	5948	1	9.5	2	0.223
13	5948	1	9.5	3	0.255
14	5948	1	11.5	1	0.198
14	5948	1	11.5	2	0.250
14	5948	1	11.5	3	0.236
15	5948	1	15.5	1	0.225
15	5948	1	15.5	2	0.231
15	5948	1	15.5	3	0.211
16	5948	1.5	9.5	1	0.238
16	5948	1.5	9.5	2	0.191
16	5948	1.5	9.5	3	0.213

การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วป้อน (rpm)	ชั้นที่	ความลาดเอียง (mm)
17	5948	1.5	11.5	1	0.211
17	5948	1.5	11.5	2	0.200
17	5948	1.5	11.5	3	0.211
18	5948	1.5	15.5	1	0.214
18	5948	1.5	15.5	2	0.224
18	5948	1.5	15.5	3	0.245
19	7568	0.5	9.5	1	0.427
19	7568	0.5	9.5	2	0.419
19	7568	0.5	9.5	3	0.541
20	7568	0.5	11.5	1	0.548
20	7568	0.5	11.5	2	0.382
20	7568	0.5	11.5	3	0.465
21	7568	0.5	15.5	1	0.459
21	7568	0.5	15.5	2	0.548
21	7568	0.5	15.5	3	0.538
22	7568	1	9.5	1	0.289
22	7568	1	9.5	2	0.505
22	7568	1	9.5	3	0.298
23	7568	1	11.5	1	0.427
23	7568	1	11.5	2	0.357
23	7568	1	11.5	3	0.340
24	7568	1	15.5	1	0.422
24	7568	1	15.5	2	0.444
24	7568	1	15.5	3	0.476

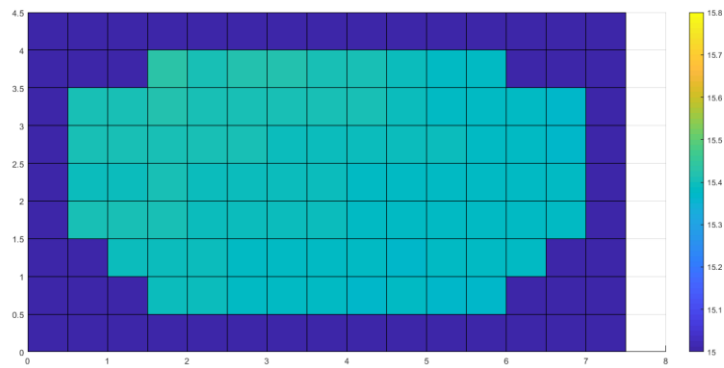
การทดลองที่	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ความลึกตัด (mm)	ความเร็วป้อน (rpm)	ชั้นที่	ความลาดเอียง (mm)
25	7568	1.5	9.5	1	0.344
25	7568	1.5	9.5	2	0.327
25	7568	1.5	9.5	3	0.327
26	7568	1.5	11.5	1	0.327
26	7568	1.5	11.5	2	0.27
26	7568	1.5	11.5	3	0.435
27	7568	1.5	15.5	1	0.409
27	7568	1.5	15.5	2	0.366
27	7568	1.5	15.5	3	0.363



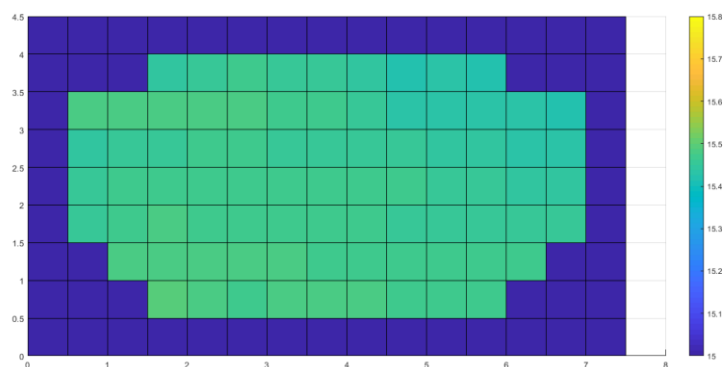
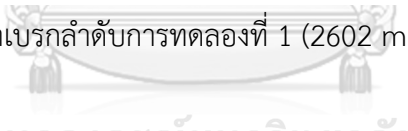




รูปที่ ค-1 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 1 (2602 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1

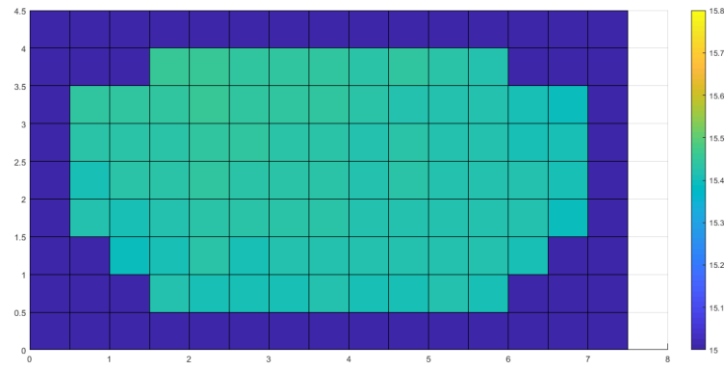


รูปที่ ค-2 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 1 (2602 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

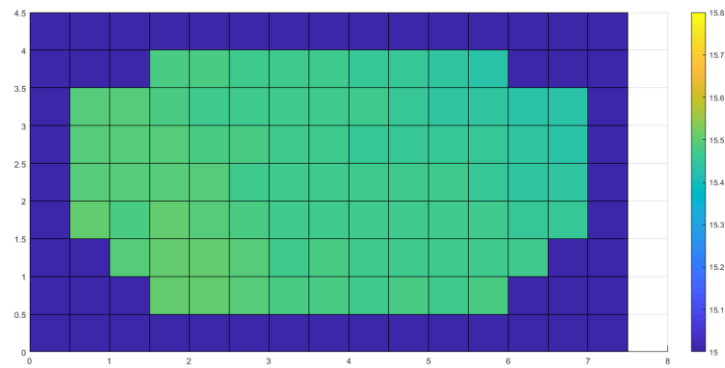


รูปที่ ค-3 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 1 (2602 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3

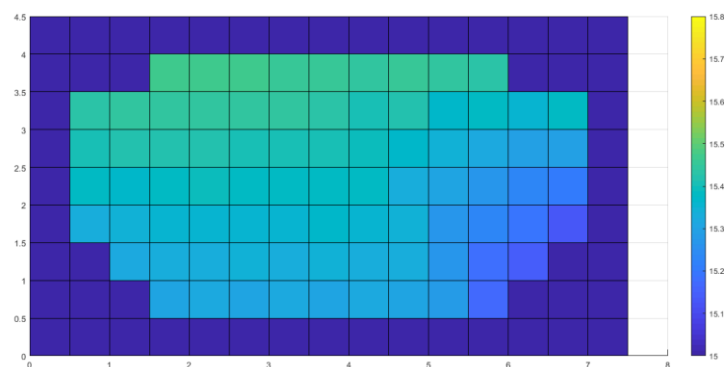
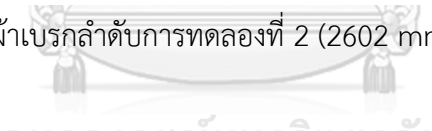




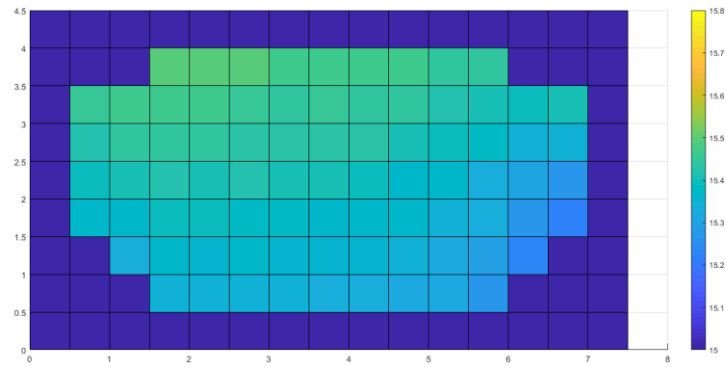
รูปที่ ค-4 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 2 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1



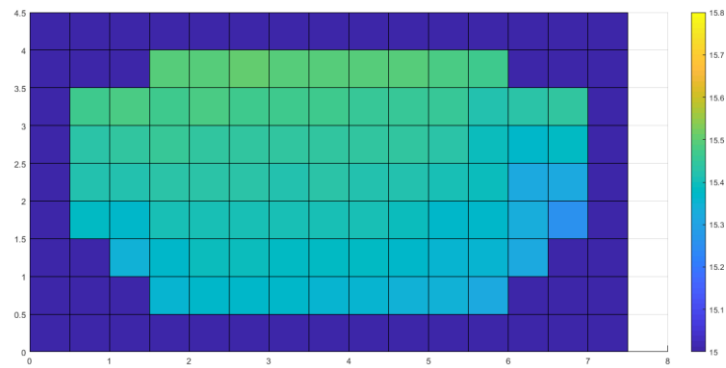
รูปที่ ค-5 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 2 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2



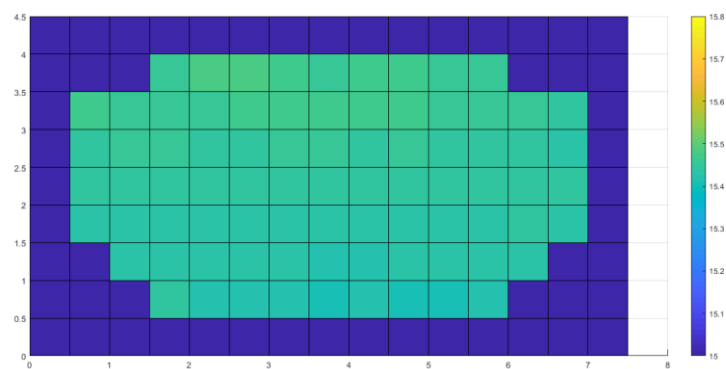
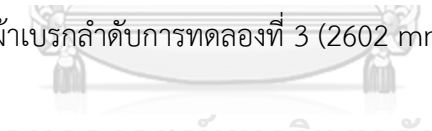
รูปที่ ค-6 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 2 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3



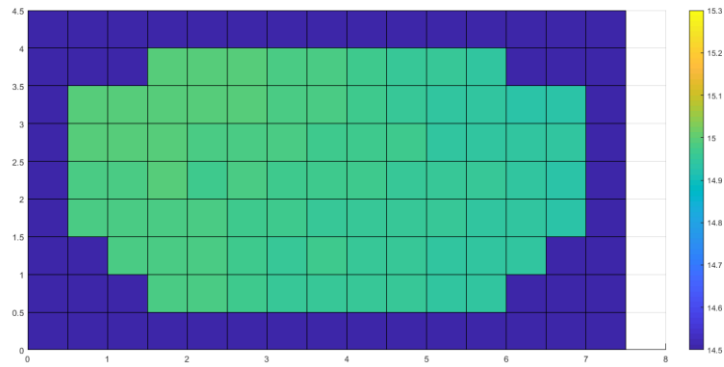
รูปที่ ค-7 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 3 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1



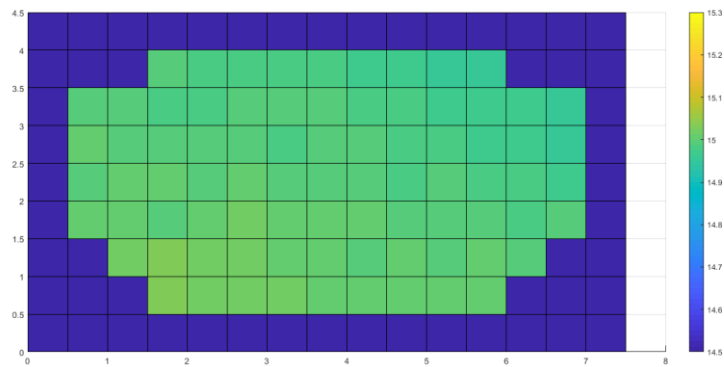
รูปที่ ค-8 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 3 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2



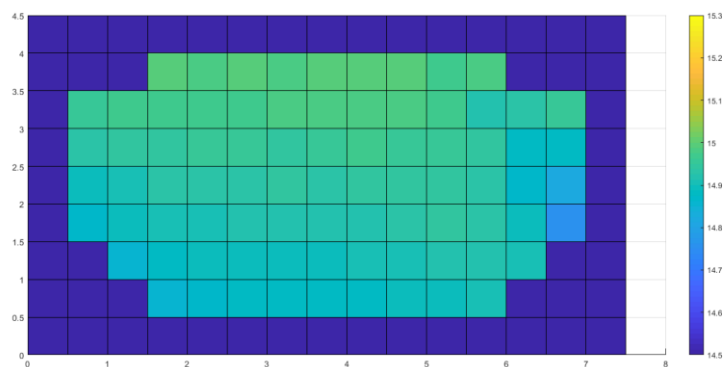
รูปที่ ค-9 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 3 ( $2602 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3



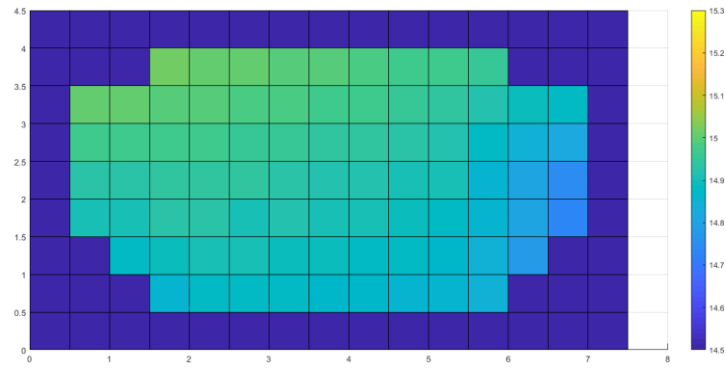
รูปที่ ค-10 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 4 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1



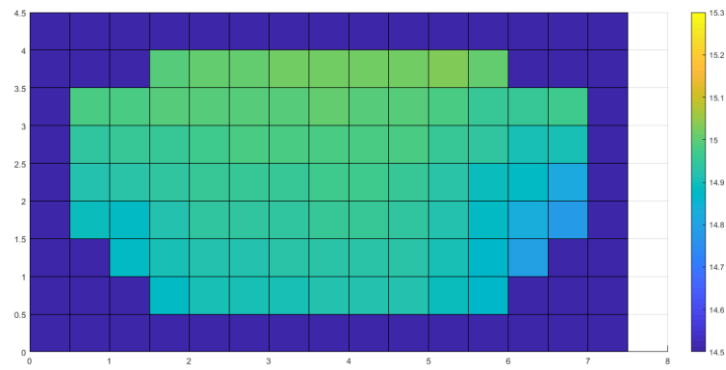
รูปที่ ค-11 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 4 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2



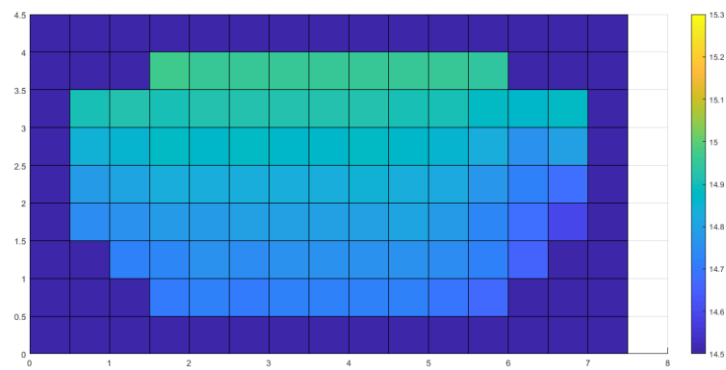
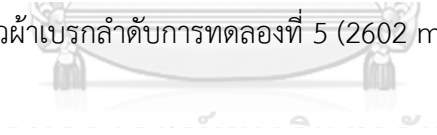
รูปที่ ค-12 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 4 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3



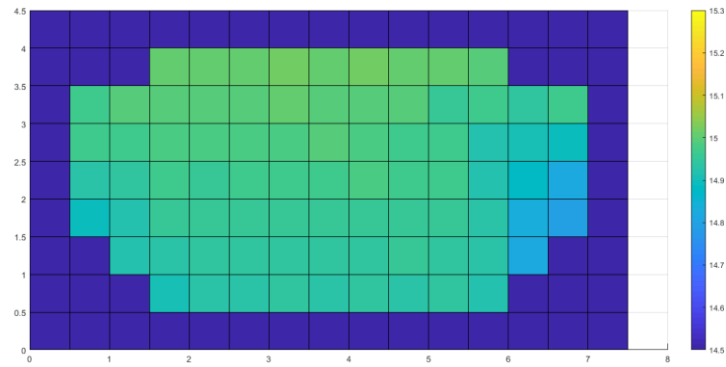
รูปที่ ค-13 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 5 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1



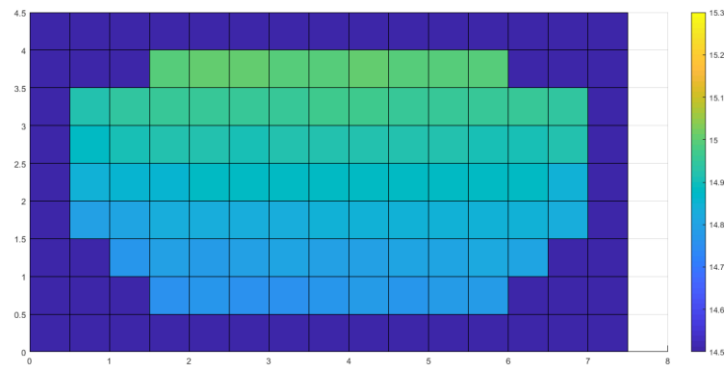
รูปที่ ค-14 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 5 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2



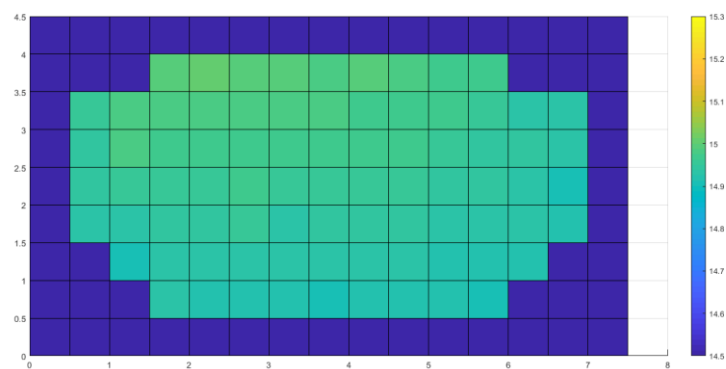
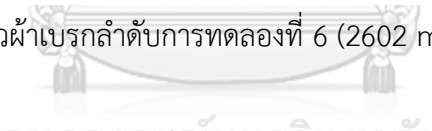
รูปที่ ค-15 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 5 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 3



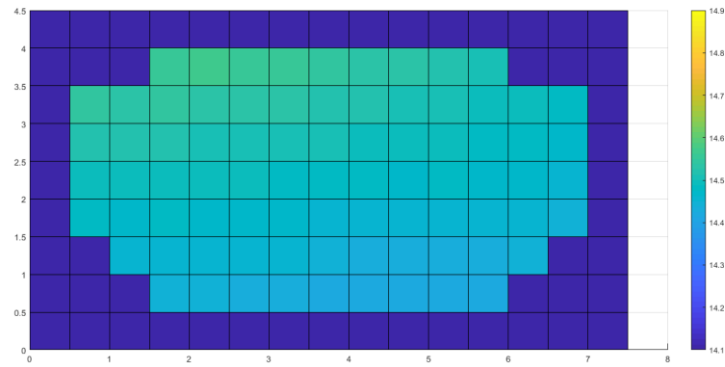
รูปที่ ค-16 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 6 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1



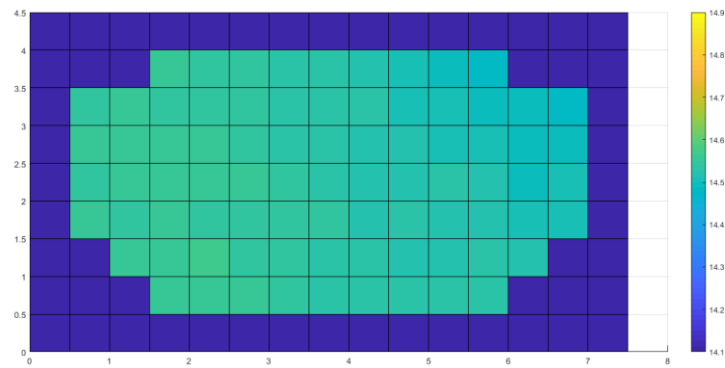
รูปที่ ค-17 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 6 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2



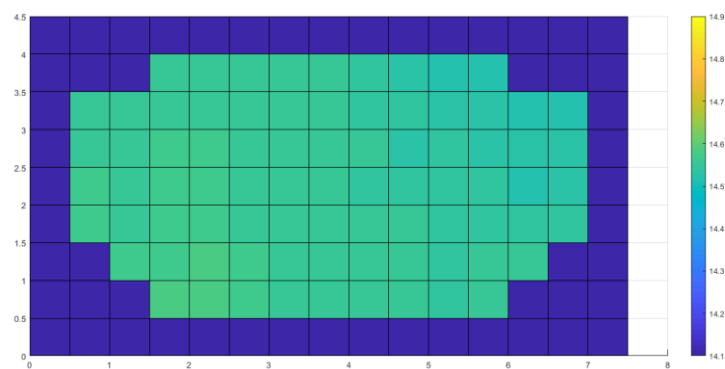
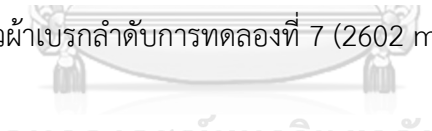
รูปที่ ค-18 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 6 ( $2602 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3



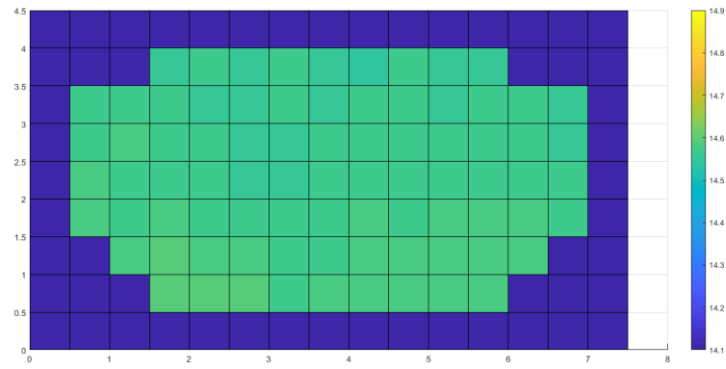
รูปที่ ค-19 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 7 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1



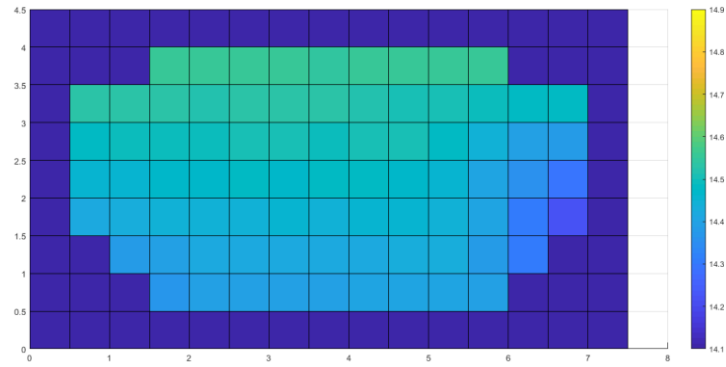
รูปที่ ค-20 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 7 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2



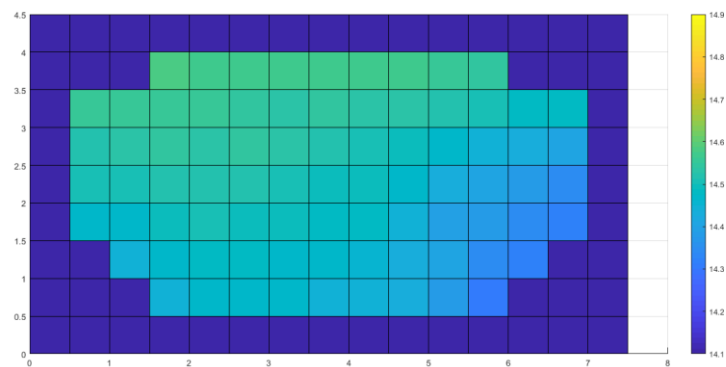
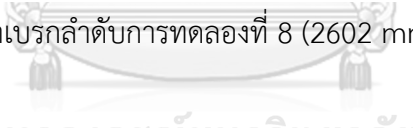
รูปที่ ค-21 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 7 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3



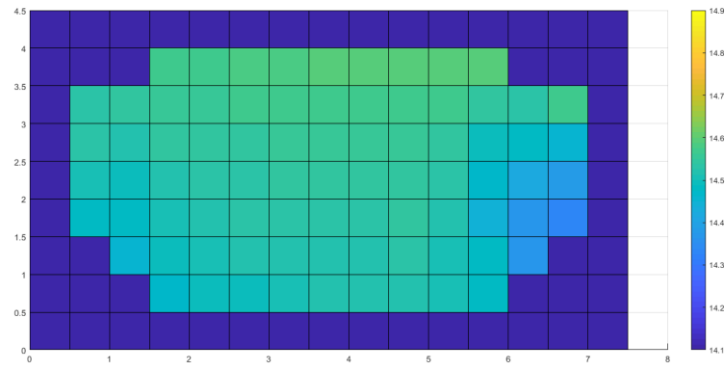
รูปที่ ค-22 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 8 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1



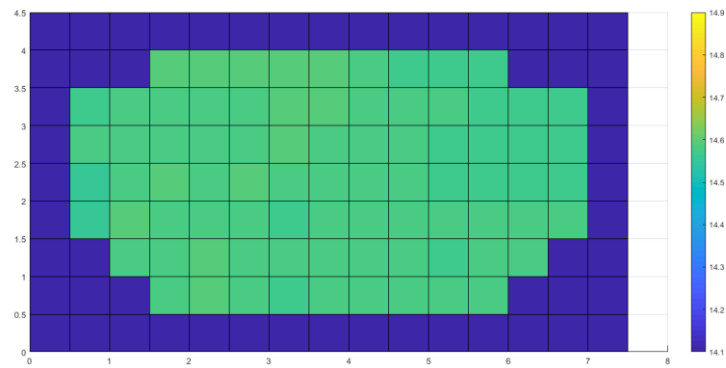
รูปที่ ค-23 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 8 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2



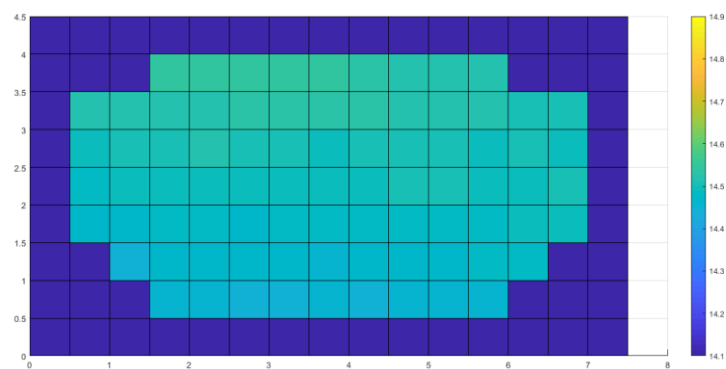
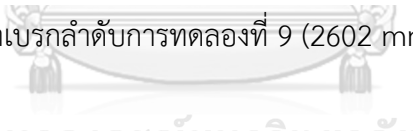
รูปที่ ค-24 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 8 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 3



รูปที่ ค-25 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 9 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1

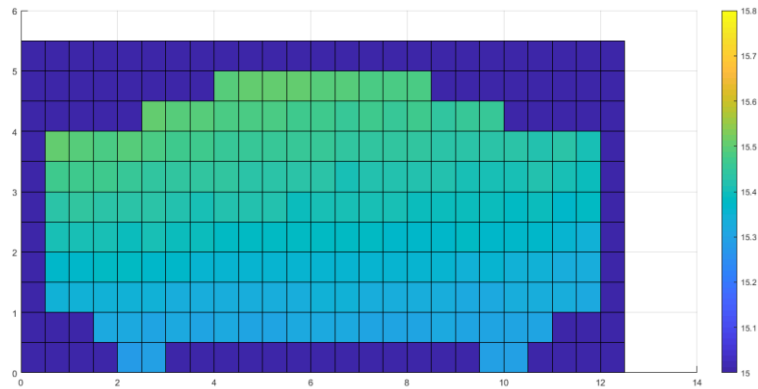


รูปที่ ค-26 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 9 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2

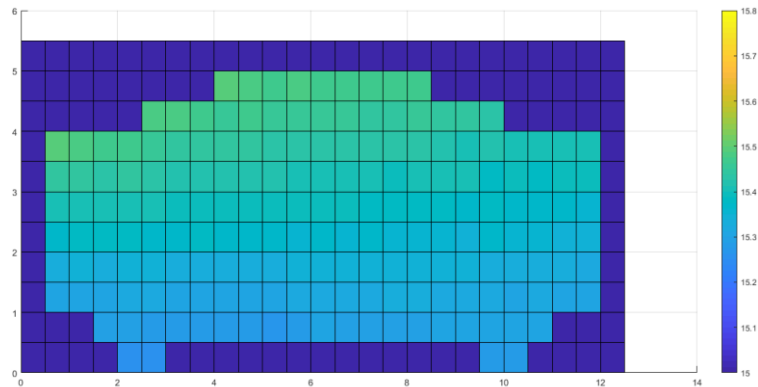


รูปที่ ค-27 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 9 (2602 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3



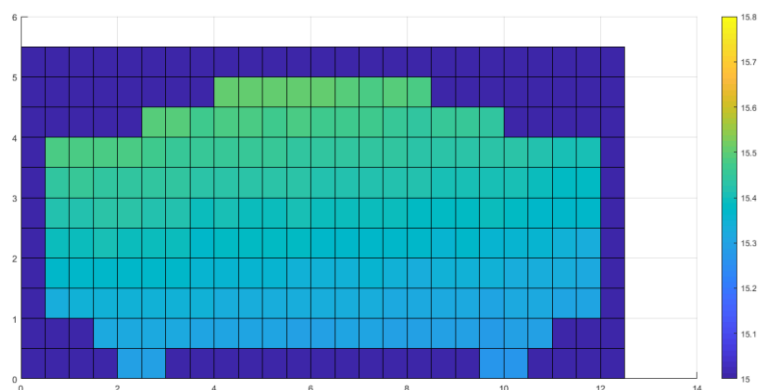


รูปที่ ค-28 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 10 (5948 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1

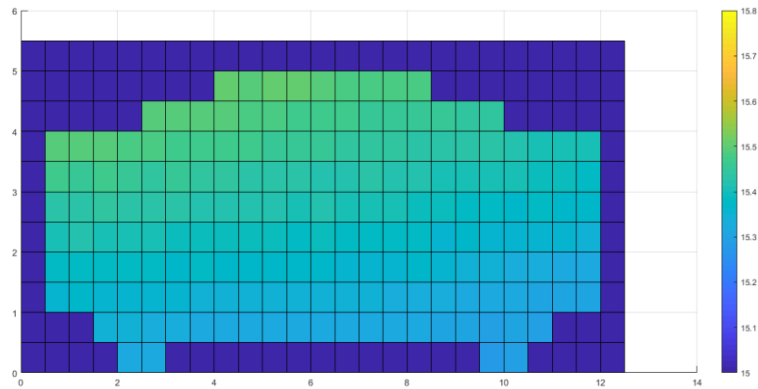


รูปที่ ค-29 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 10 (5948 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

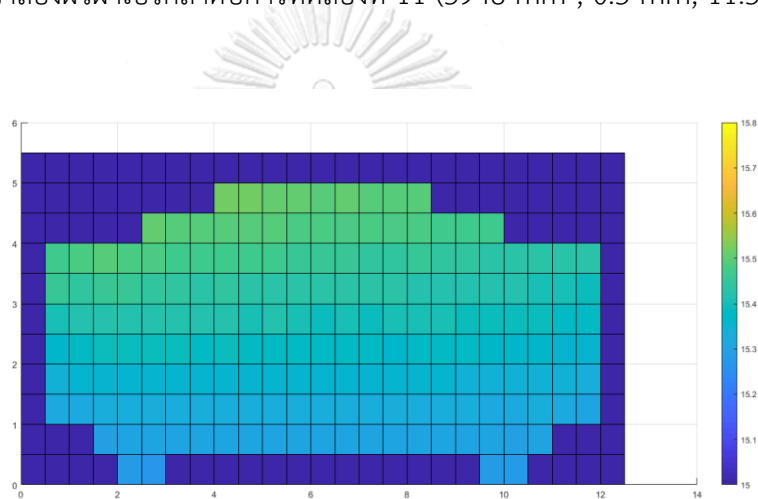
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



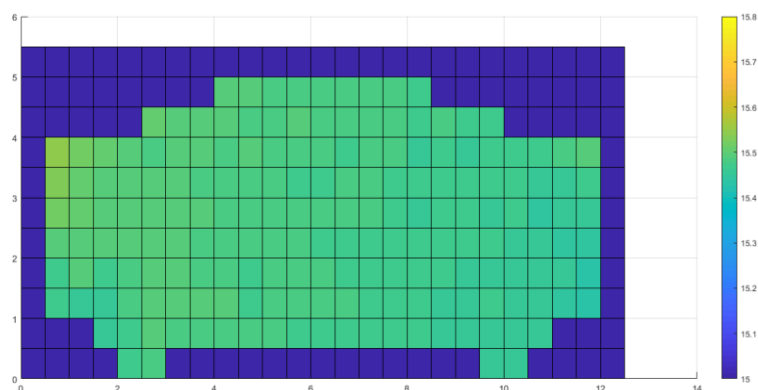
รูปที่ ค-30 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 10 (5948 mm<sup>2</sup>; 0.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3



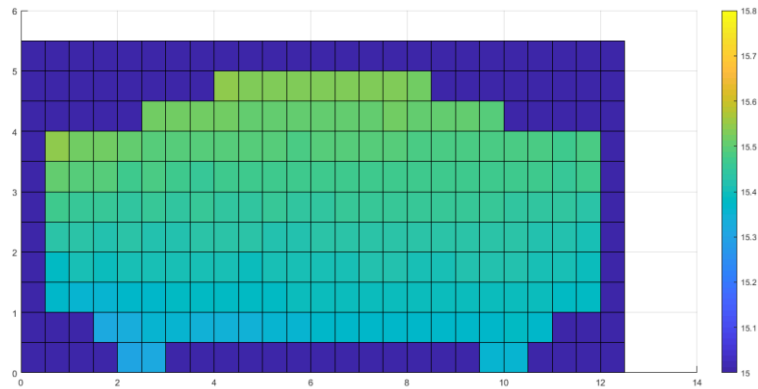
รูปที่ ค-31 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 11 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1



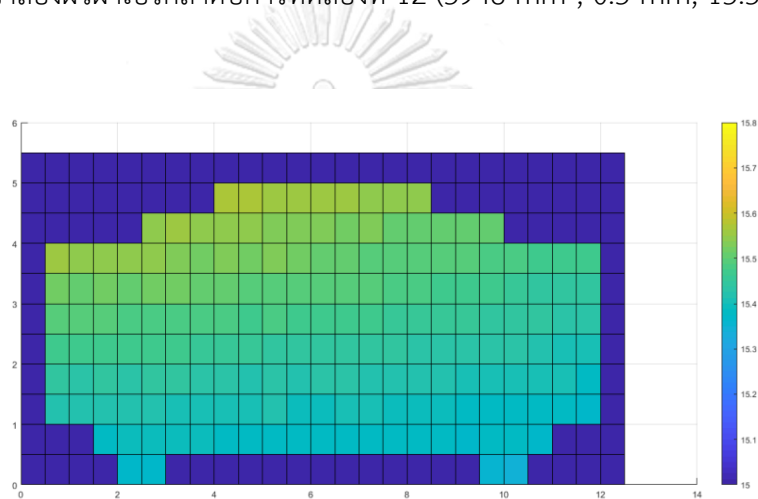
รูปที่ ค-32 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 11 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2



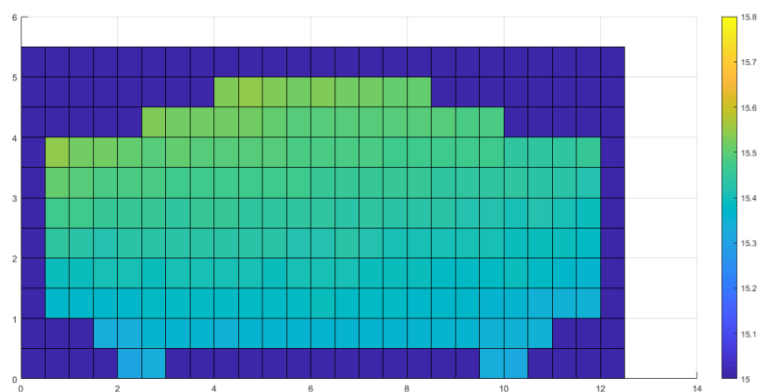
รูปที่ ค-33 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 11 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3



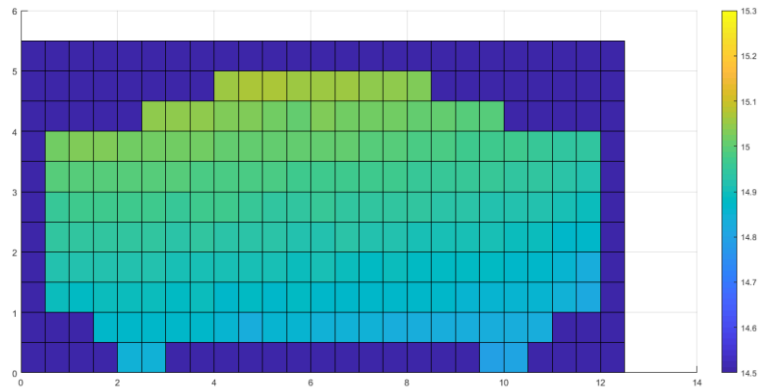
รูปที่ ค-34 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 12 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1



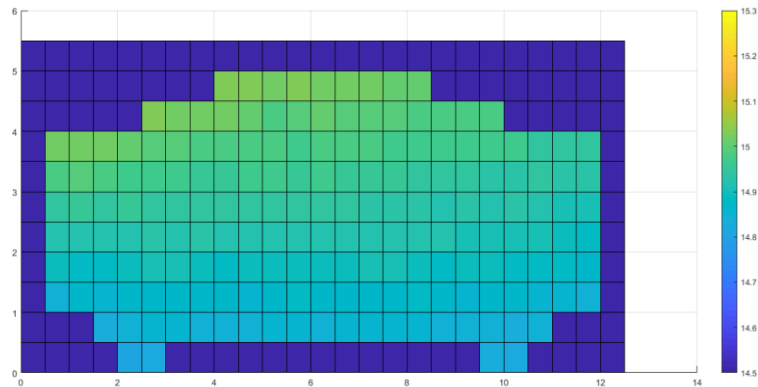
รูปที่ ค-35 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 12 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2



รูปที่ ค-36 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 12 ( $5948 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3

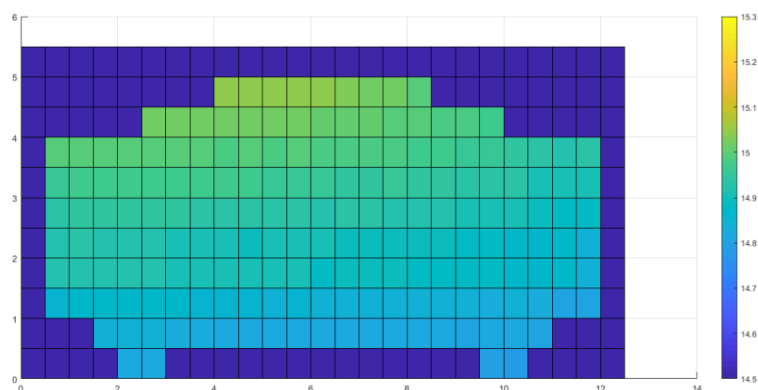


รูปที่ ค-37 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 13 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1

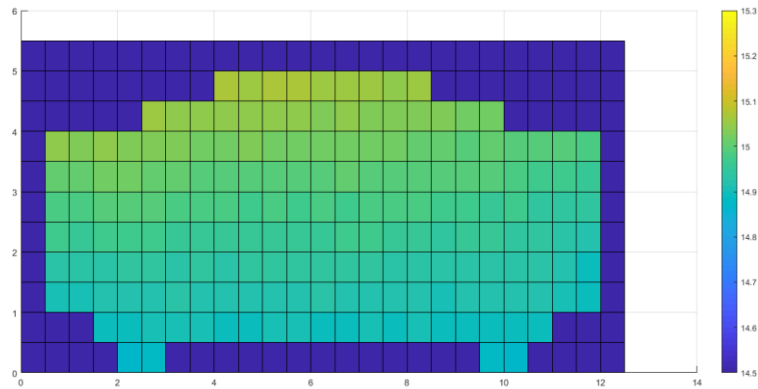


รูปที่ ค-38 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 13 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

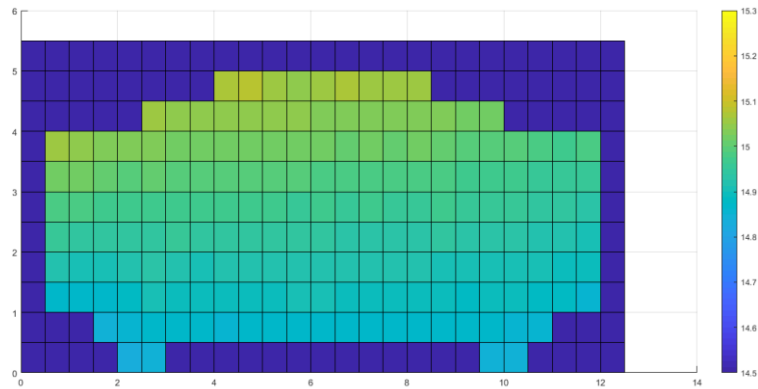
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-39 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 13 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3

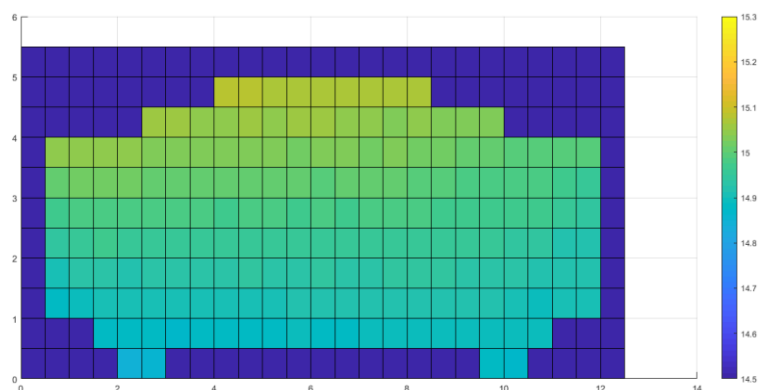


รูปที่ ค-40 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 14 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1

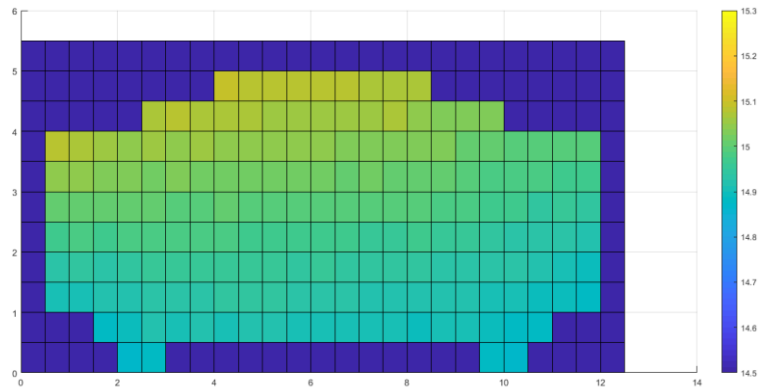


รูปที่ ค-41 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 14 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2

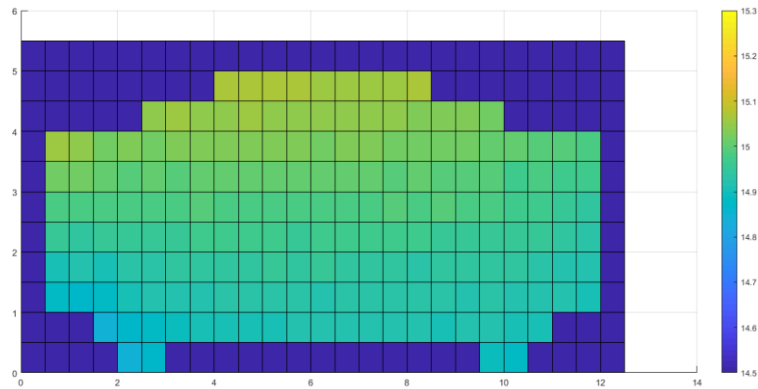
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-42 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 14 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 3

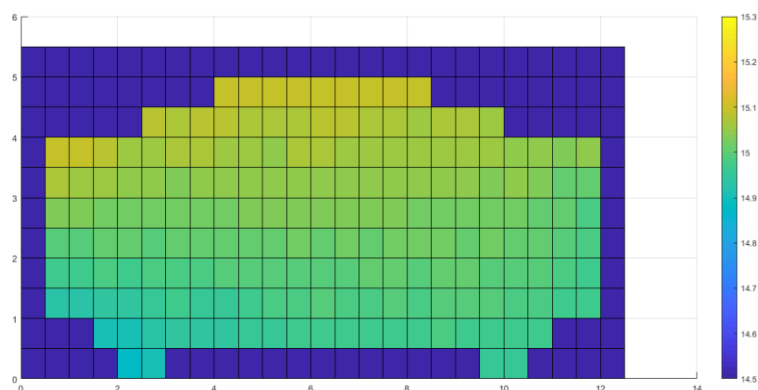


รูปที่ ค-43 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 15 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1

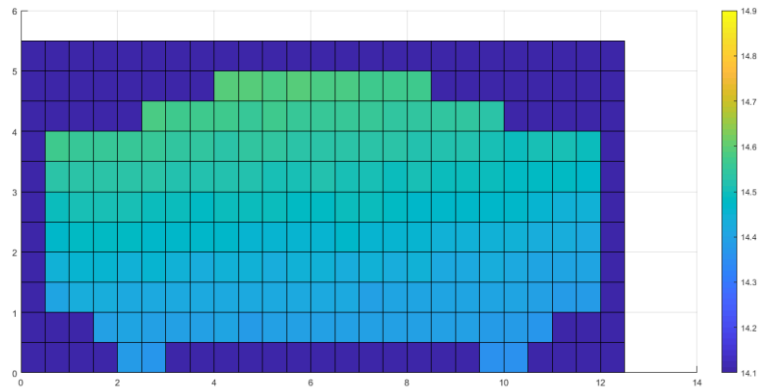


รูปที่ ค-44 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 15 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2

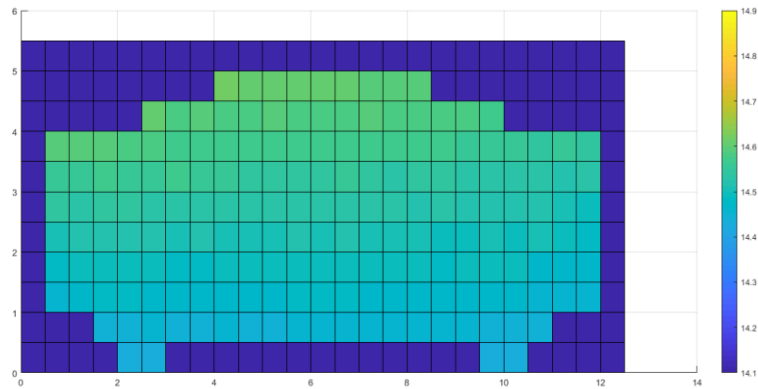
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-45 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 15 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3

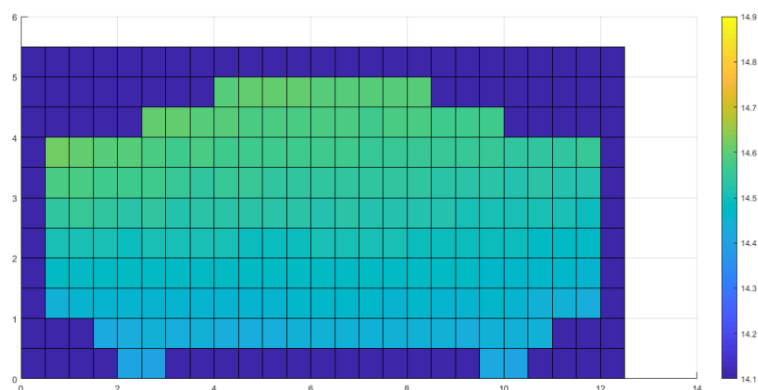


รูปที่ ค-46 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 16 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1

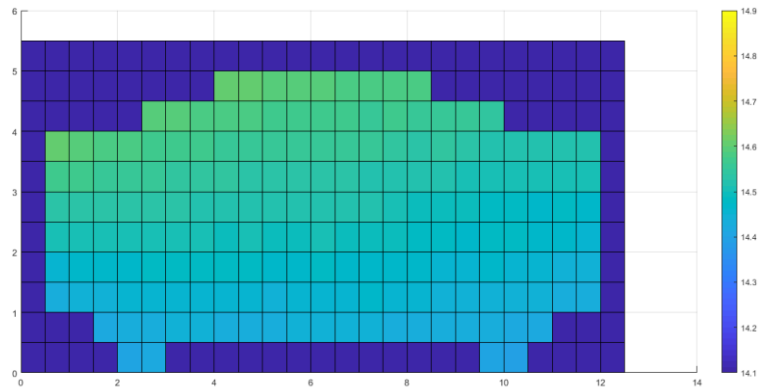


รูปที่ ค-47 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 16 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

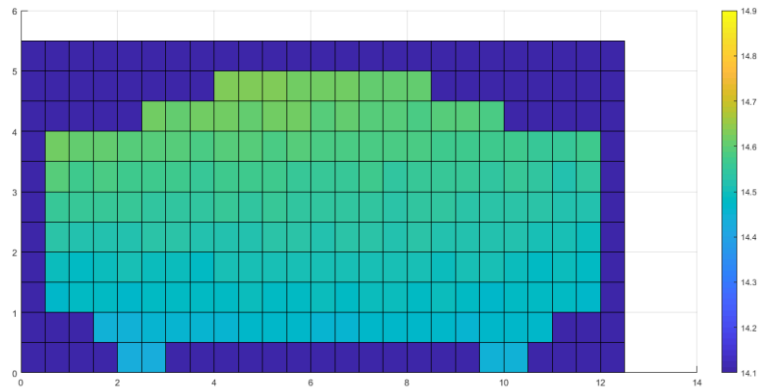
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-48 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 16 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3

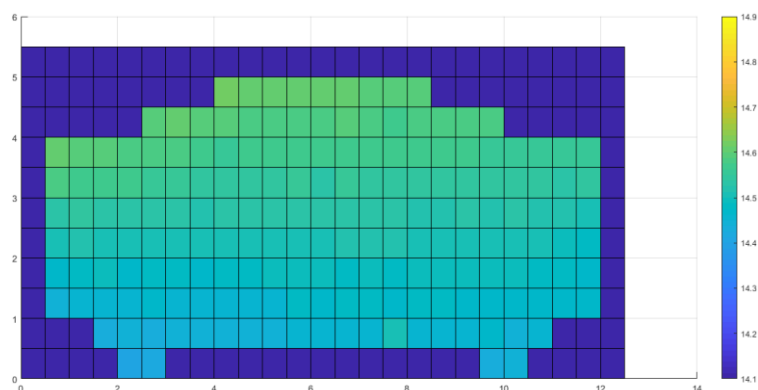


รูปที่ ค-49 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 17 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1



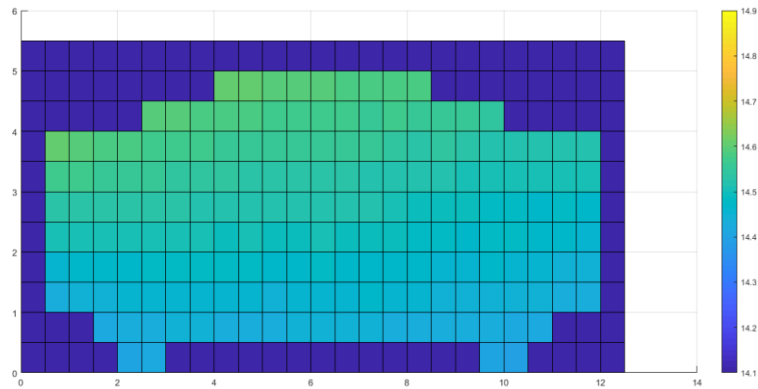
รูปที่ ค-50 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 17 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

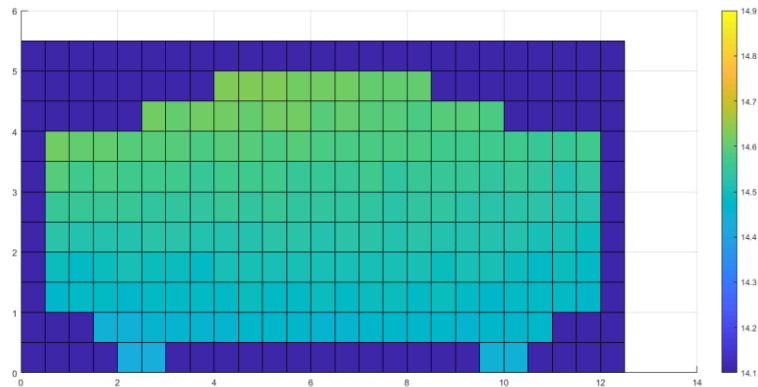


รูปที่ ค-51 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 17 (5948 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3



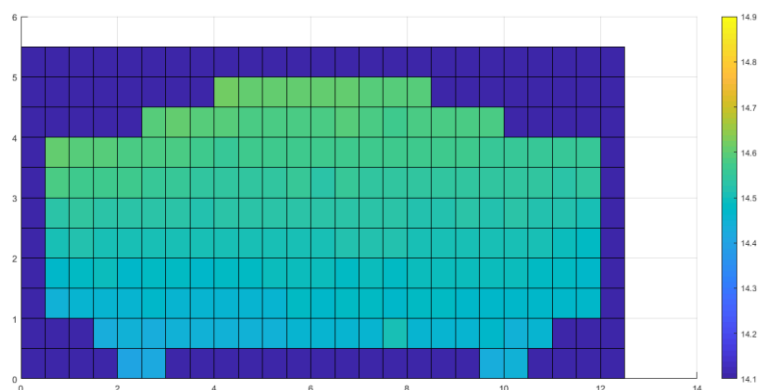


รูปที่ ค-52 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 18 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1

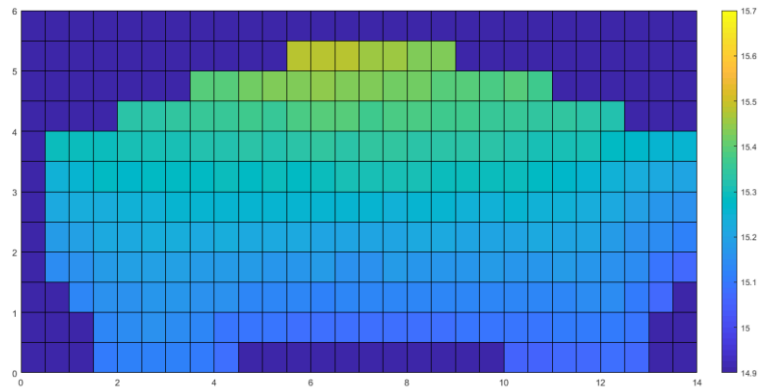


รูปที่ ค-53 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 18 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2

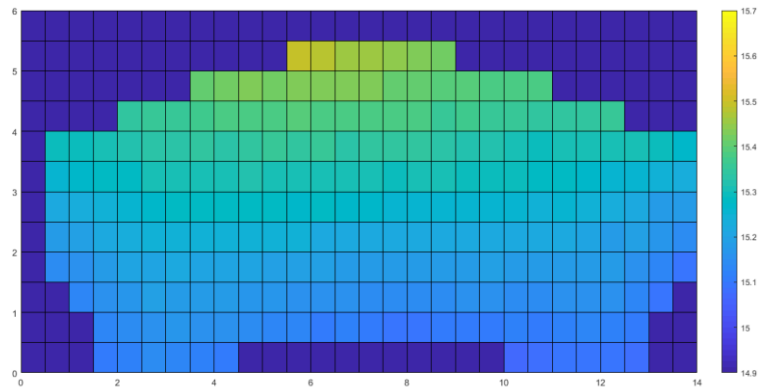
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-54 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 18 ( $5948 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3

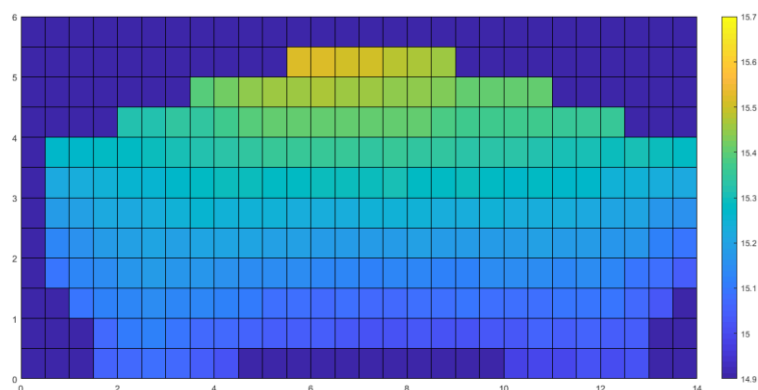


รูปที่ ค-55 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 19 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $9.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1

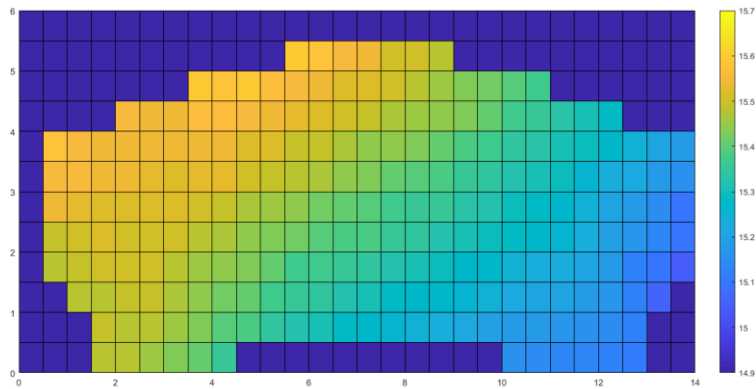


รูปที่ ค-56 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 19 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $9.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2

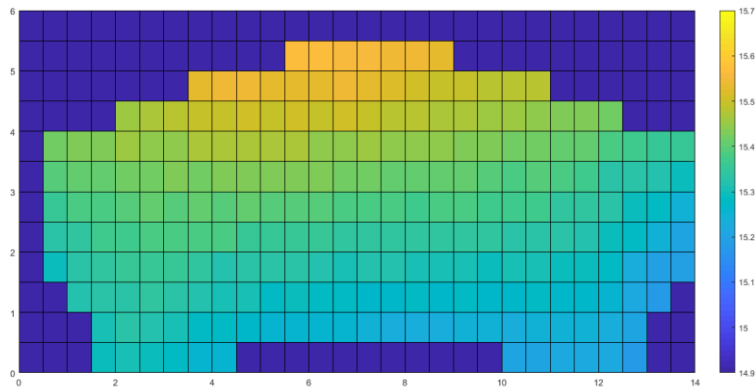
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-57 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 19 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $9.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3

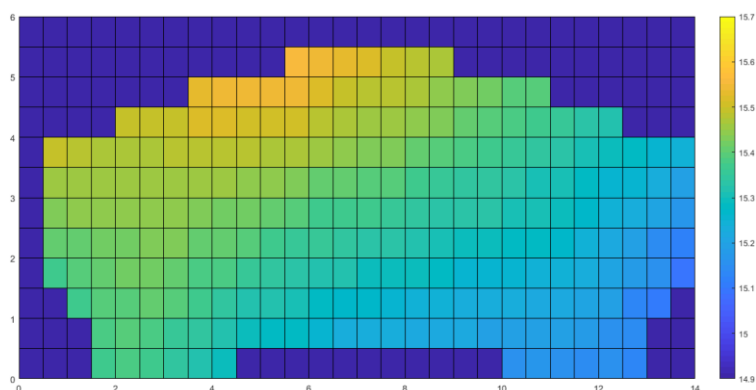


รูปที่ ค-58 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 20 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1

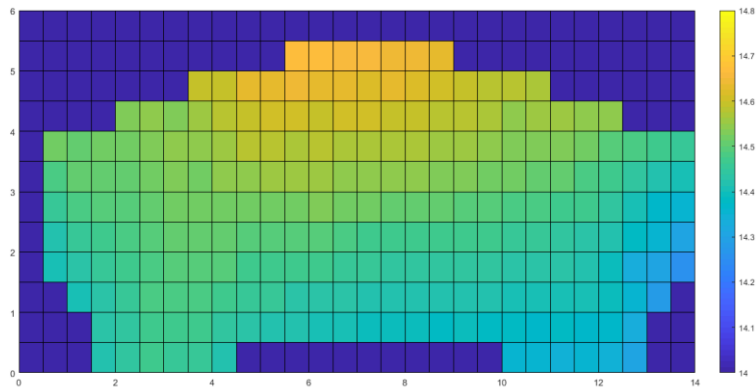


รูปที่ ค-59 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 20 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2

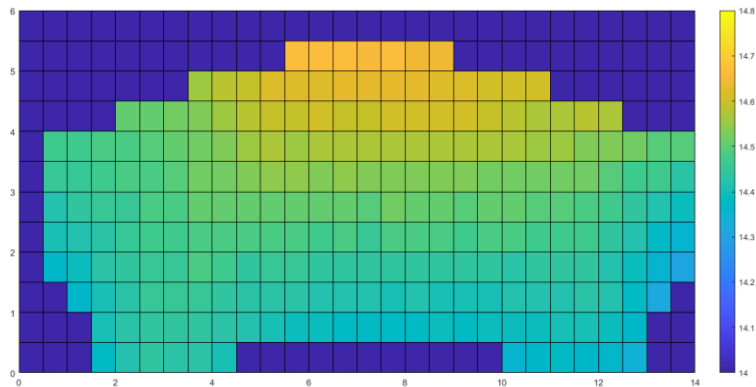
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-60 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 20 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $11.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3

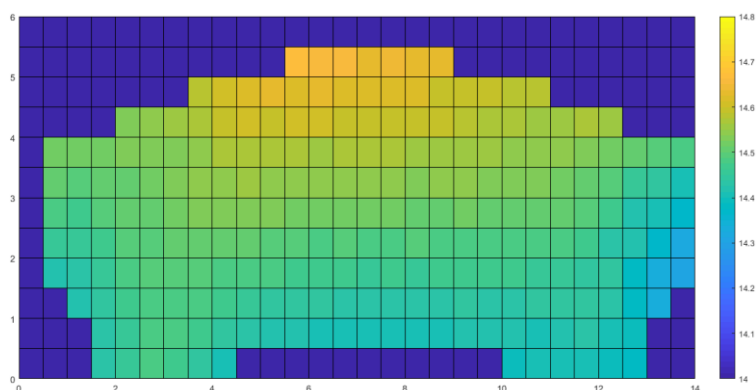


รูปที่ ค-61 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 21 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 1

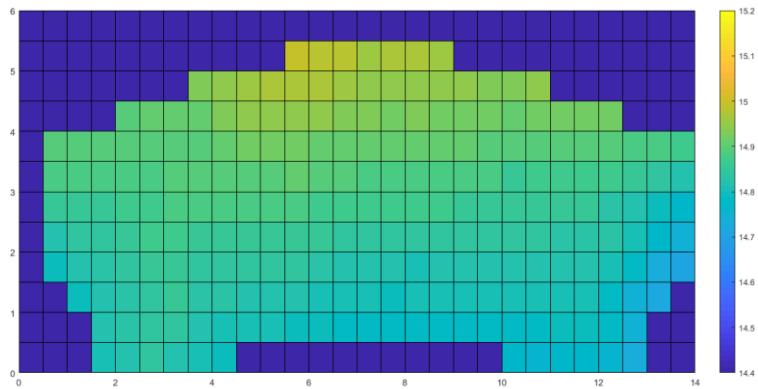


รูปที่ ค-62 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 21 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 2

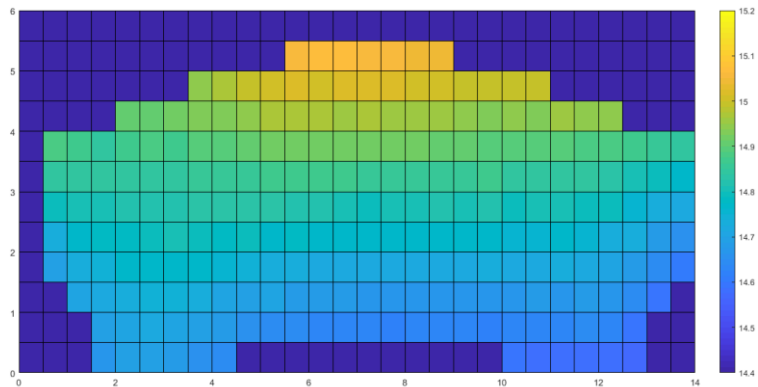
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-63 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 21 ( $7568 \text{ mm}^2$ ;  $0.5 \text{ mm}$ ;  $15.5 \text{ rpm}$ ) ชั้นที่ 3

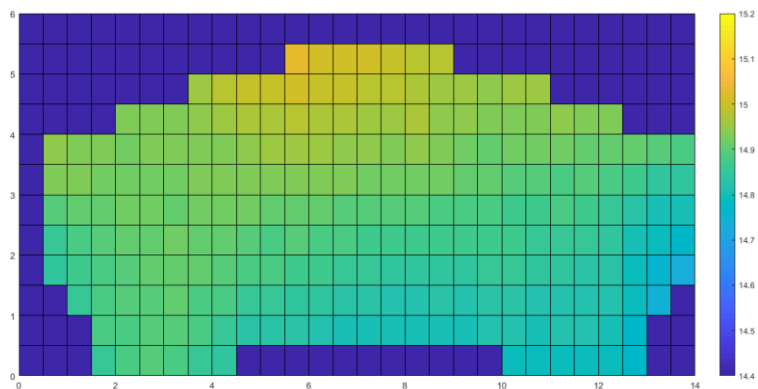


รูปที่ ค-64 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 22 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1

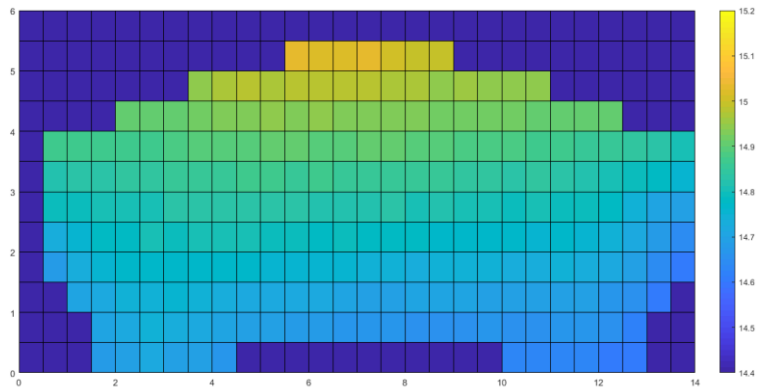


รูปที่ ค-65 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 22 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

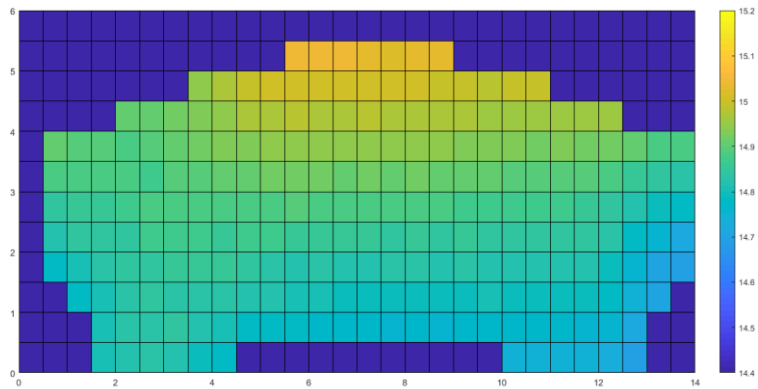
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-66 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 22 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3

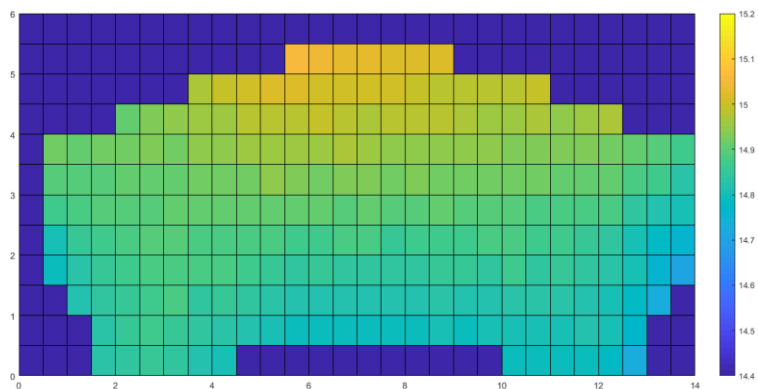


รูปที่ ค-67 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 23 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1

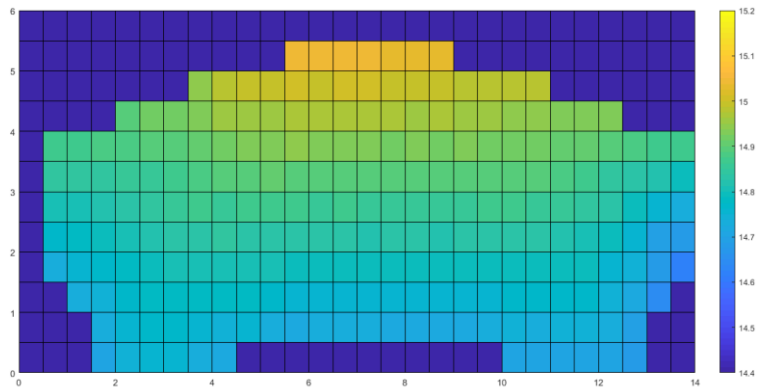


รูปที่ ค-68 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 23 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2

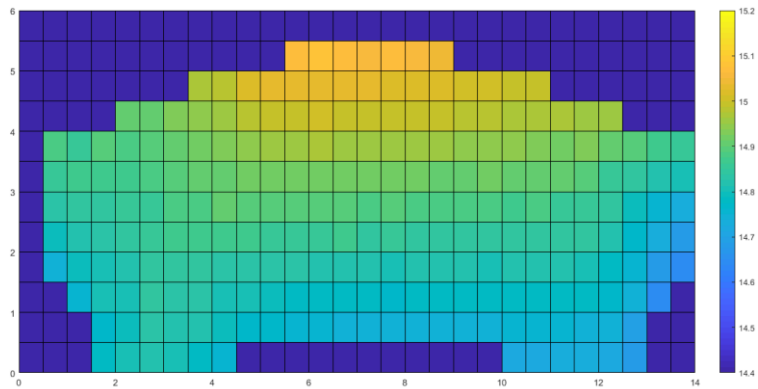
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-69 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 23 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 3

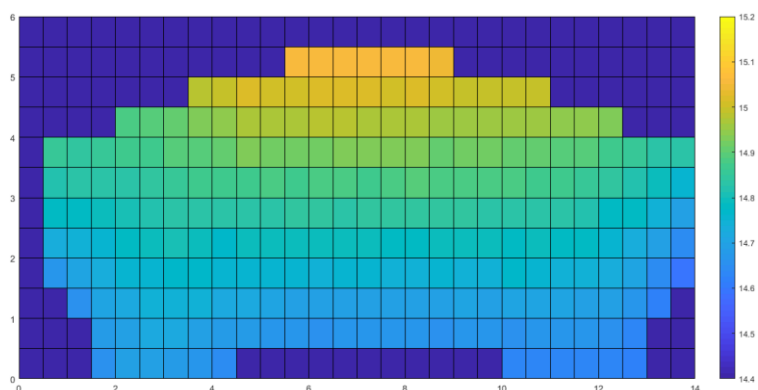


รูปที่ ค-70 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 24 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1

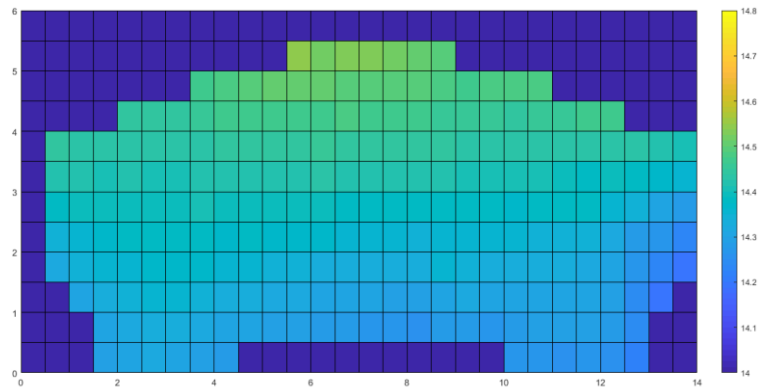


รูปที่ ค-71 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 24 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2

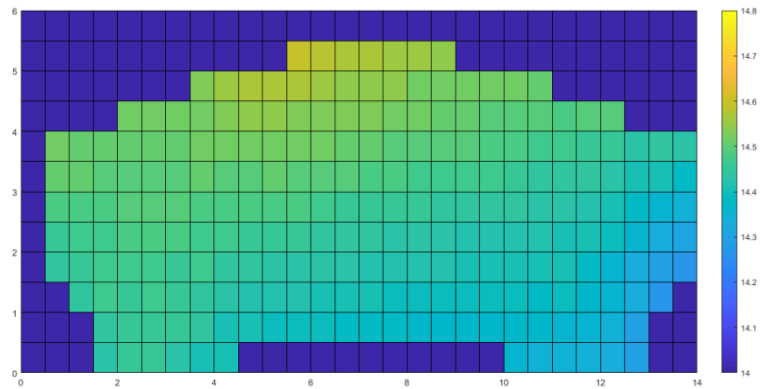
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-72 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 24 (7568 mm<sup>2</sup>; 1 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3

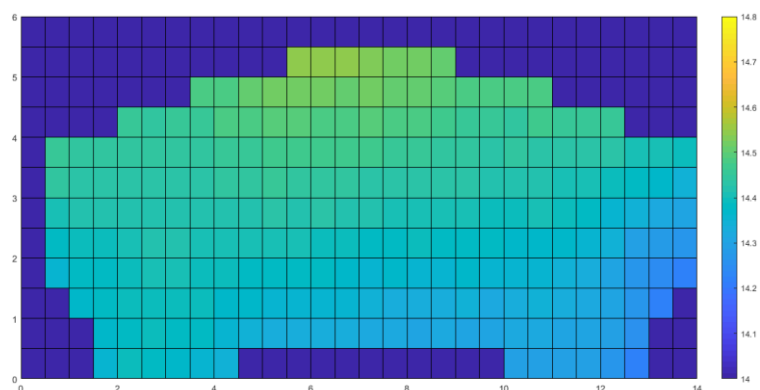


รูปที่ ค-73 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 25 (7568 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 1



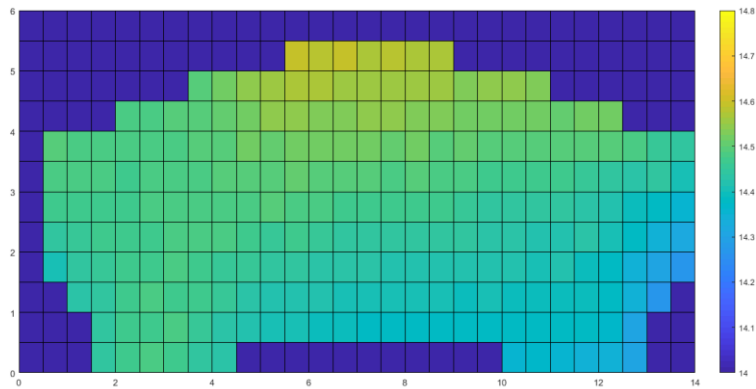
รูปที่ ค-74 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 25 (7568 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

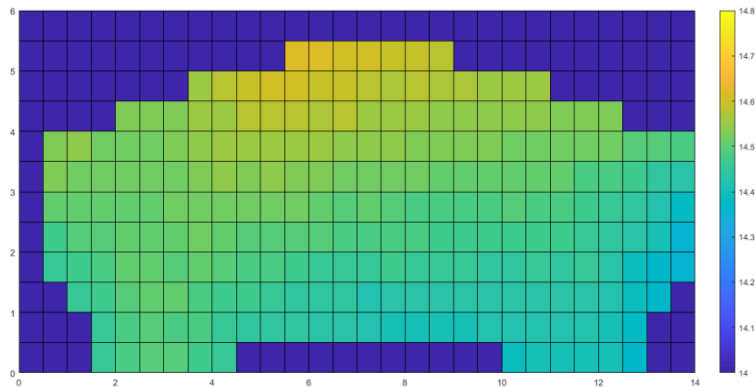


รูปที่ ค-75 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 25 (7568 mm<sup>2</sup>; 1.5 mm; 9.5 rpm) ชั้นที่ 3



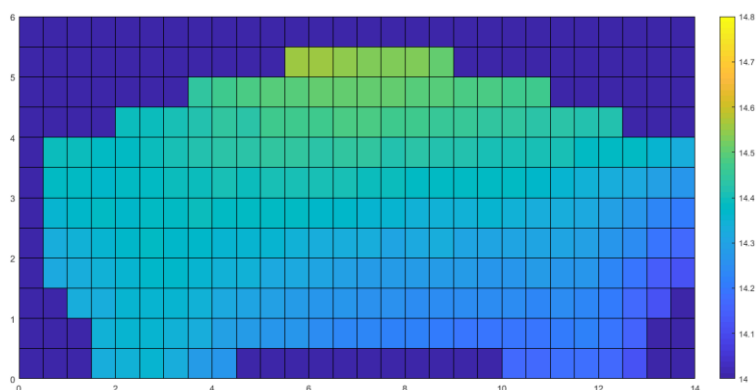


รูปที่ ค-76 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 26 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 1

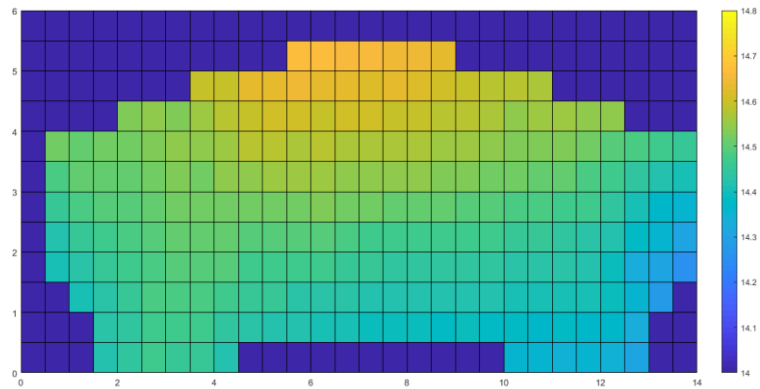


รูปที่ ค-77 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 26 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 2

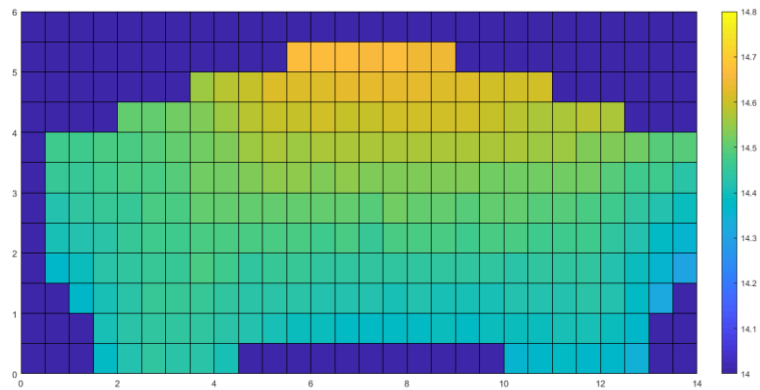
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



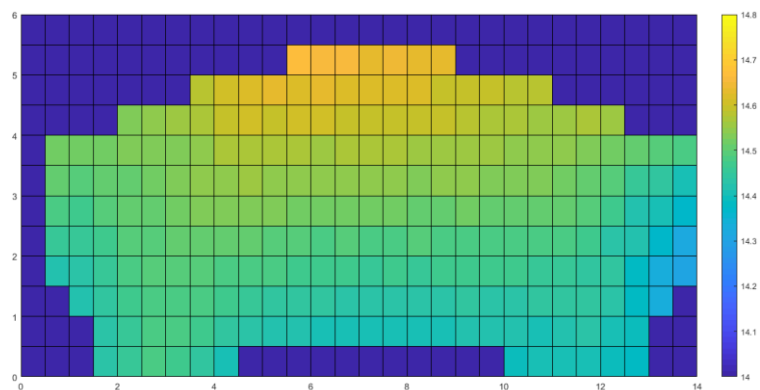
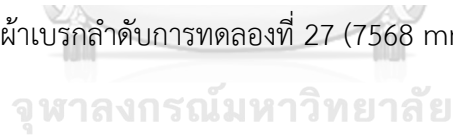
รูปที่ ค-78 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 26 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 11.5 rpm) ชั้นที่ 3



รูปที่ ค-79 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 27 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 1



รูปที่ ค-80 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 27 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 2



รูปที่ ค-81 รูปจำลองผิวผ้าเบรกลำดับการทดลองที่ 27 ( $7568 \text{ mm}^2$ ; 1.5 mm; 15.5 rpm) ชั้นที่ 3

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศวิตา ฉายสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/73 หมู่ที่ 4 ตำบลปากนคร อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000
ผลงานตีพิมพ์	การนำเสนอผลงานระดับนานาชาติ S. Chaysakul, M. Sriwiboon, T. Kaewkongka and T. Bovornratanaraks, "Grinding Process Development for Brake Pad Surface Flatness Improvement", the Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, Bangkok, Thailand, February 7th-8th, 2019. (Poster) การนำเสนอผลงานในระดับนานาชาติและบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ S.Chaysakul, T. Bovornratanaraks and T. Kaewkongka, "Grinding process development for the improvement of brake pad surface flatness", The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology, Bangkok, Thailand, May 30th, 2019 (Poster); 296-301