



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ที่มีผลต่อ
ผลตอบสนองหลายตัว : กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์
Parameter Setting for Rod Push Production Process on Multiple Responses
: A Case Study in Motorcycle Parts Factory

نامผู้วิจัย นายเอราวิธ ถาวร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สุวิษกรณ์ วิชกุล, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์
ที่มีผลต่อผลตอบสนองหลายตัว : กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

Parameter Setting for Rod Push Production Process on Multiple Responses
: A Case Study in Motorcycle Parts Factory

โดย

นายเอราวิธ ถาวร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2554

เอราวิไล ถาวร 2554: การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์
ที่มีผลต่อผลตอบสนองหลายตัว : กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D. 87 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกน
กระทู้คลัตช์ที่มีผลต่อลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความหยابผิว และ
พิจารณาเวลาที่ใช้ในการผลิตควบคู่ไปกับลักษณะทางคุณภาพ จากการศึกษาปัญหาโรงงาน
ตัวอย่างพบว่าลักษณะทางคุณภาพทั้งสองมีค่าความสามารถของกระบวนการ (Process
Performance Capability) ต่ำกว่าเป้าหมายของโรงงานคือ 1.33 ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้แผนการ
ทดลองเช่น ทรัลดคอมโพสิตเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ ซึ่ง
ผลิตด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยมีปัจจัยควบคุมทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบของการกลึง
หยาบ อัตราป้อนของการกลึงหยาบ ความลึกตัดของการกลึงหยาบ ความเร็วรอบของการกลึง
ละเอียด และอัตราป้อนของการกลึงละเอียด และมีปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย คือ ความสึกหรอของเม็ด
มีด ผลการศึกษาพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางและความหยابผิวมีค่าเฉลี่ยหลังปรับปรุงใกล้เคียงกับค่า
เป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง และความสามารถของกระบวนการมีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมายของ
โรงงาน ในขณะที่รอบเวลาผลิตหลังปรับปรุงมีค่าลดลงจากปัจจุบันถึง 17.78%

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Erawin Thavorn 2011: Parameter Setting for Rod Push Production Process on Multiple Responses: A Case Study in Motorcycle Parts Factory. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya, Ph.D. 87 pages.

The objective of this research was to study appropriate setting of parameters in the production process of Rod Push - which impacts on quality characteristics such as diameter and surface roughness. Besides, the cycle time was also considered. At a study plant, the values of the Process performance capability of two quality characteristics were less than the manufacturer's targets of 1.33. Central Composite Design was employed to examine Rod Push produced by CNC with 5 controllable process factors including Spindle speed of rough-cutting, Feed rate of rough-cutting, Depth of cut of rough-cutting, Spindle speed of finish-cutting, and Feed rate of finish-cutting. The nuisance factor of CNC was tool wear. The results indicate that, the average diameter and the average surface roughness are closer to the targets and Process performance capability higher than manufactures' targets. Moreover, the cycle time is reduced (17.78% reduction).

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยนี้มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ดร.สุวิภรณ์ วิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณมานพ จิตตธร ผู้จัดการโรงงาน และคุณสรายุทธ สุบุญ หัวหน้าแผนกแมชชีนนิ่ง บริษัทไคเทค พรีซิชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์อุปการณ์ และสถานที่สำหรับงานวิจัยนี้ และคุณฤทธิ จึงสถาปัตยกรรม วิศวกรฝ่ายขาย บริษัทควอลิตี้ รีพอร์ต จำกัด ที่อนุเคราะห์กล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์เพื่อใช้วัดความหนาพิวสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้มาศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมในระดับปริญญาโท ทั้งนี้เพื่อนำความรู้ที่ได้นำกลับไปพัฒนาท้องถิ่นพื้นที่จังหวัดพะเยาและใกล้เคียง ให้มีความเจริญก้าวหน้า และยั่งยืนต่อไป

ท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนด้านการศึกษาเสมอมา รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอราวิล ถาวร

กันยายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	6
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าความสามารถของกระบวนการ	77
ภาคผนวก ข ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แผนการทดลองเซ็นทรัลคอม โพลิต	79
ภาคผนวก ค ชุดคำตอบ Local Solution ที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer	82
ภาคผนวก ง ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ ย้อนหลังของลักษณะทางคุณภาพ	4
2	ค่า α ที่ใช้กับแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตสำหรับคุณสมบัติ Rotatability	25
3	แผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตสำหรับคุณสมบัติการบล็อกเชิงตั้งฉากใน 2 บล็อก	26
4	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลอง	36
5	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง	40
6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง	41
7	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว	46
8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว	48
9	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต	52
10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต	53
11	เป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพของโรงงาน	58
12	ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer	59
13	ค่าทางสถิติต่างๆ ของผลก่อนและหลังปรับปรุง	61
14	การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุง	62
15	การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุง	62
16	วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนสองกลุ่ม (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	63
17	การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง	64
18	การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิวก่อนปรับปรุง	65
19	การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิวหลังปรับปรุง	65
20	วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนสองกลุ่ม (ความหยาบผิว)	66
21	การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงของความหยาบผิว	67
22	ค่าความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ หลังปรับปรุง	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ข้อมูลแผนการทดลองเซ็นทรัลคอม โพลิต	80
ค1 ชุดคำตอบ Local Solution	83
ง1 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ (รอบทำซ้ำที่ 1)	86
ง2 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ (รอบทำซ้ำที่ 2)	86

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตแกนกระทู้กลัดซ์	3
2	ทิศทางการกลึงแกนกระทู้กลัดซ์	3
3	การหาค่าความหยาบผิว R_a ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS B 0660	10
4	การหาค่าความหยาบผิว R_z ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS B 0660	11
5	เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ยี่ห้อ โอลิมปัส รุ่น LEXT OLS3100	13
6	ผังเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากค่าความสามารถของกระบวนการของลักษณะทางคุณภาพต่ำกว่าเป้าหมาย	19
7	ผังเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากรอบเวลาผลิตสูงกว่าเป้าหมาย	20
8	ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ของกระบวนการกลึงก้าน	21
9	กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของค่าผิดพลาด	29
10	กราฟของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ผลตอบสนอง	29
11	กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับที่ของการทดลอง	30
12	น้ำหนักรวมของผลตอบสนอง กรณีมีข้อกำหนดด้านเดียว	32
13	น้ำหนักรวมของผลตอบสนอง กรณีมีข้อกำหนดสองด้าน	33
14	การตรวจสอบค่าผิดพลาดสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง	42
15	การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง	45
16	การตรวจสอบค่าผิดพลาดสำหรับความหยาบผิว	49
17	การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว	51
18	การตรวจสอบค่าความผิดพลาดสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต	54
19	การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต	56
20	Optimization Plot ที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer	60
21	สมรรถภาพกระบวนการสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง	68
22	สมรรถภาพกระบวนการสำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว	69

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Y_1	= เส้นผ่าศูนย์กลาง
Y_2	= ความหนาผิว
Y_3	= รอบเวลาผลิต
A	= ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ
B	= อัตราป้อนของการกลึงหยาบ
C	= ความลึกตัดของการกลึงหยาบ
D	= ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด
E	= อัตราป้อนของการกลึงละเอียด
Block	= ปัจจัยรบกวน หรือความลึกหรือของเม็ดมีด
A*A	= ผลกระทบร่วมกำลังสองของความเร็วรอบของการกลึงหยาบ
B*B	= ผลกระทบร่วมกำลังสองของอัตราป้อนของการกลึงหยาบ
C*C	= ผลกระทบร่วมกำลังสองของความลึกตัดของการกลึงหยาบ
D*D	= ผลกระทบร่วมกำลังสองของความเร็วรอบของการกลึงละเอียด
E*E	= ผลกระทบร่วมกำลังสองของอัตราป้อนของการกลึงละเอียด
A*B	= ผลกระทบร่วมของความเร็วรอบของการกลึงหยาบและอัตราป้อนของการกลึงหยาบ
A*C	= ผลกระทบร่วมของความเร็วรอบของการกลึงหยาบและความลึกตัดของการกลึงหยาบ
A*D	= ผลกระทบร่วมของความเร็วรอบของการกลึงหยาบและความเร็วรอบของการกลึงละเอียด
A*E	= ผลกระทบร่วมของความเร็วรอบของการกลึงหยาบและอัตราป้อนของการกลึงละเอียด
B*C	= ผลกระทบร่วมของอัตราป้อนของการกลึงหยาบและความลึกตัดของการกลึงหยาบ
B*D	= ผลกระทบร่วมของอัตราป้อนของการกลึงหยาบและความเร็วรอบของการกลึงละเอียด
B*E	= ผลกระทบร่วมของอัตราป้อนของการกลึงหยาบและอัตราป้อนของการกลึงละเอียด
C*D	= ผลกระทบร่วมของความลึกตัดของการกลึงหยาบและความเร็วรอบของการกลึงละเอียด
C*E	= ผลกระทบร่วมของความลึกตัดของการกลึงหยาบและอัตราป้อนของการกลึงละเอียด
D*E	= ผลกระทบร่วมของความเร็วรอบของการกลึงละเอียดและอัตราป้อนของการกลึงละเอียด
S	= ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
#	= จำนวน

การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ที่มีผลต่อ
ผลตอบสนองหลายตัว : กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

Parameter Setting for Rod Push Production Process on Multiple Responses
: A Case Study in Motorcycle Parts Factory

คำนำ

ปัจจุบันความต้องการชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์มีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเติบโตของ
อุตสาหกรรมการผลิตรถจักรยานยนต์ที่มียอดขายสูงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งชิ้นส่วน
รถจักรยานยนต์ยังต้องผลิตเพื่อรองรับการสั่งซื้อสำหรับนำมาเป็นอะไหล่สำรองจำนวนมากอีกด้วย

ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์มีอยู่หลากหลายประเภท งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงแกนกระทุ้งคลัตช์
(Rod Push) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ประเภทหนึ่ง ทำหน้าที่เสมือนเป็นหมุดยึดเฟืองในระบบ
คลัตช์ของรถจักรยานยนต์ เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่มีการผลิตจำนวนมาก และมีการแข่งขันกันสูง ทำให้
ให้ผู้ประกอบการที่ผลิตได้อย่างรวดเร็ว และมีคุณภาพสูง จะทำให้ได้เปรียบคู่แข่งรายอื่นๆ ได้
อย่างมาก

การผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ทำการผลิตด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC Turning Machine)
ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ ในการผลิตมากมาย อาทิเช่น เม็ดมีด (Insert) สารหล่อเย็น (Coolant) ความเร็วรอบ
ของเพลางาน (Spindle Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกตัด (Depth of Cut) เป็นต้น ซึ่ง
ปัจจัยดังกล่าวหากตั้งค่าไม่เหมาะสมแล้ว ย่อมส่งผลกระทบต่อ

1. ลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) การผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์มีลักษณะทาง
คุณภาพที่สำคัญที่ต้องพิจารณาคือ

1.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) โดยเฉพาะส่วนก้านของแกนกระทุ้งคลัตช์ เป็นจุดที่
ลูกค้ากำหนดระดับการตรวจสอบอยู่ในระดับ บี (Rank B) หมายความว่า เป็นจุดที่ส่งผลกระทบต่อการใช้

งานโดยตรง ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนก้านมีขนาดเล็กหรือใหญ่ไป ก็ไม่สามารถนำไปประกอบ
เฟืองในระบบคลัตช์ได้

1.2 ความหยาบผิว (Surface Roughness) เนื่องจากชิ้นงานนี้ใช้ในการประกอบเฟืองในระบบคลัตช์ ผิวของชิ้นงานจึงต้องมีความเรียบเพียงพอเพื่อให้ง่ายแก่การประกอบ และเพื่อความสวยงามของชิ้นงาน

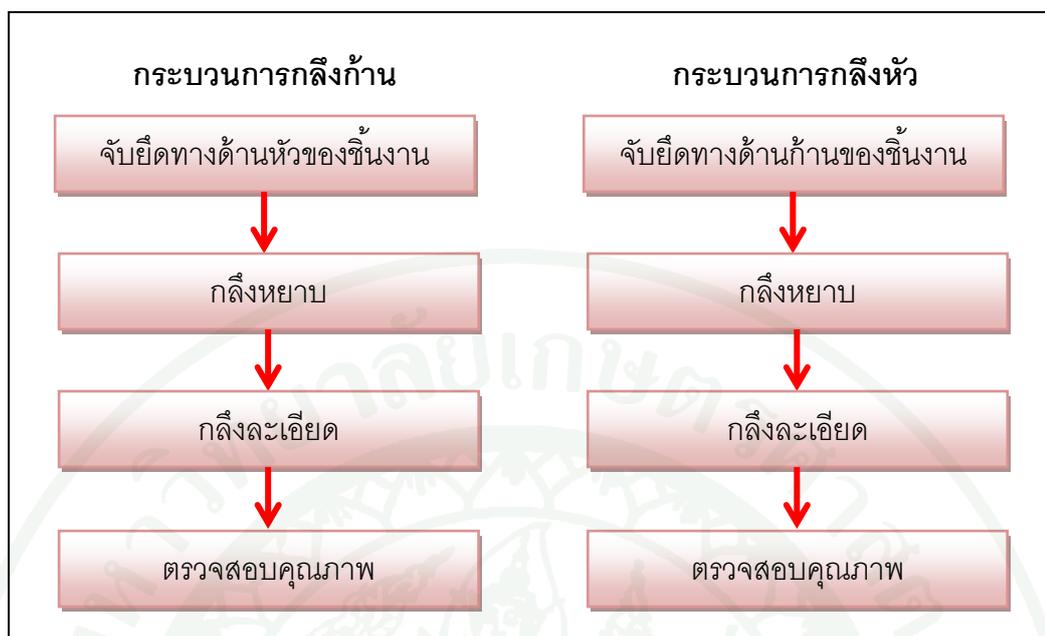
2. รอบเวลาผลิต (Cycle Time) เนื่องจากการผลิตแบบจำนวนมาก (Mass Production) ทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิต เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการแข่งขันในกลุ่มอุตสาหกรรมประเภทนี้ ยิ่งผลิตได้มากก็ยิ่งสร้างความได้เปรียบคู่แข่งได้มากเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าการตั้งค่าปัจจัยที่ไม่เหมาะสมเกิดผลกระทบทั้งด้านคุณภาพและรอบเวลาผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางคุณภาพทั้งสองชนิด และรอบเวลาผลิต โดยที่งานวิจัยนี้ได้เน้นถึงการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญที่สุด และการปรับปรุงรอบเวลาผลิตเป็นผลพลอยได้ที่ได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

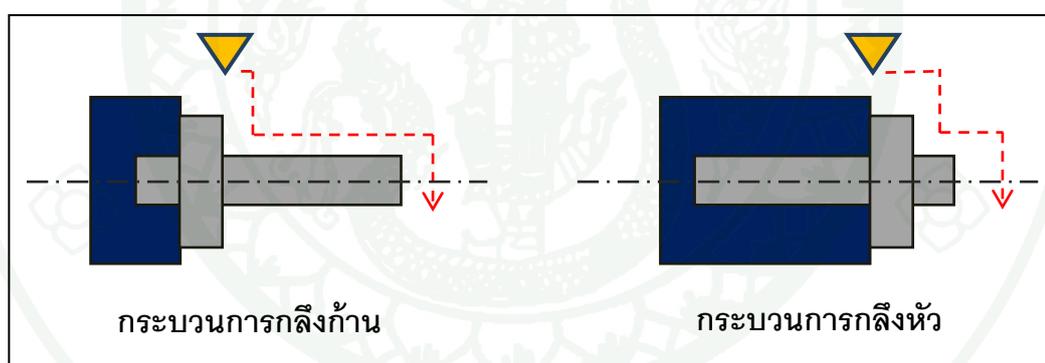
ความเป็นมาและปัญหาของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่างเป็นหนึ่งในผู้ผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยแบ่งการผลิตออกเป็น 2 ส่วนคือ การผลิตแบบทำตามคำสั่งซื้อ (Make to Order) ได้แก่ แม่พิมพ์ผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ และการผลิตแบบจำนวนมาก ได้แก่ แกนกระทุ้งคลัตช์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในส่วนของแกนกระทุ้งคลัตช์ เนื่องจากเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานที่มียอดการสั่งซื้ออย่างต่อเนื่องจำนวนมาก

การผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ ฝ่ายผลิตทำหน้าที่ในการผลิตชิ้นงาน และตรวจสอบชิ้นงานระหว่างรอให้เครื่องกลึงอัตโนมัติทำงานเสร็จ สำหรับการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ผลิตด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยแบ่งการผลิตออกเป็น 2 กระบวนการ คือกระบวนการกลึงก้าน และ กระบวนการกลึงหัว ซึ่งแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนที่เหมือนกัน เพียงแต่ต่างกันก็ตรงวิธีการจับชิ้นงานเท่านั้น แสดงได้ดังภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์



ภาพที่ 2 ทิศทางของการกลึงแกนกระทุ้งคลัตช์

จากการศึกษาการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ที่ประกอบด้วย 2 กระบวนการดังกล่าว ผู้วิจัยได้เลือกศึกษากระบวนการกลึงก้าน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่กลึงส่วนก้านของแกนกระทุ้งคลัตช์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญ (เส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบผิว) และเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาในการผลิตสูงสุด

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลการผลิต และสุ่มเก็บตัวอย่างชิ้นงานในกระบวนการกลึงก้านเพื่อนำมาตรวจสอบคุณภาพ ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2553 ถึง มกราคม พ.ศ.2554 โดย

สารสนเทศที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ค่าความสามารถของกระบวนการ โดยผู้วิจัยเลือกวิเคราะห์กระบวนการด้วยดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการที่แท้จริง (Actual Process Capability Index; C_{pk}) ร่วมกับค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการด้วยค่าเป้าหมายจากข้อกำหนด (C_{pm}) (ข้อกำหนดของลูกค้าได้กำหนดค่าเป้าหมายของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาพิวเท่ากับ 4.8725 มิลลิเมตร และ 2.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าความสามารถของกระบวนการทั้งสองได้แสดงสูตรการคำนวณในภาคผนวกที่ ก) พบว่ากระบวนการกึ่งก้าน ประสบปัญหาต่อไปนี้

1. จากการสำรวจข้อมูลลักษณะทางคุณภาพทั้ง 2 ชนิด ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกึ่งก้าน คือเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาพิว ผู้วิจัยได้สุ่มเก็บตัวอย่างและนำมาคำนวณหาความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ ของการผลิตย้อนหลัง ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าลักษณะทางคุณภาพทั้งสองมีค่าความสามารถของกระบวนการ ต่ำกว่าเป้าหมายคือ 1.33 ทำให้โรงงานต้องการปรับปรุงค่าดังกล่าวให้สูงขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ ย้อนหลังของลักษณะทางคุณภาพ

ค่าความสามารถของกระบวนการและ ค่าสถิติต่างๆ ของลักษณะทางคุณภาพ	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม
เส้นผ่านศูนย์กลาง			
- ค่า C_{pk}	0.74	0.81	0.64
- ค่า C_{pm}	0.61	0.65	0.54
- ค่าเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	4.8796	4.8788	4.8821
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	0.0063	0.0063	0.0038
ความหนาพิว *			
- ค่า C_{pk}	-	-	0.80
- ค่า C_{pm}	-	-	0.62
- ค่าเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	-	-	3.59
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ไมโครเมตร)	-	-	0.59

**หมายเหตุ เนื่องจากโดยปกติโรงงานได้วัดความหยาบผิวจากประสบการณ์ของผู้วัด ทำให้เดือนพฤศจิกายนและธันวาคม จึงไม่มีข้อมูลในเชิงตัวเลขเก็บไว้ ส่วนเดือนมกราคม ผู้วิจัยได้สุ่มชิ้นงานตัวอย่างนำไปวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวกับบริษัทที่เชี่ยวชาญการวัดโดยเฉพาะ

2. ผลิตไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า เนื่องจากปัจจุบัน โรงงานใช้เวลาผลิตแกนกระทู้คลัตช์ในกระบวนการกลึงกัน 45 วินาที ทำให้โรงงานมีเป้าหมายที่จะลดเวลาลงเหลือ 40 วินาที เพื่อให้ผลิตได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

3. ตั้งค่าระดับปัจจัยในการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ไม่เหมาะสม

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหยาบผิว และรอบเวลาผลิต ในกระบวนการผลิตส่วนก้านของแกนกระทู้คลัตช์ จากนั้นใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ช่วยหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน ทั้งนี้เพื่อให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงสุด และใช้เวลาในการผลิตต่ำที่สุด

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาผิว และรอบเวลาผลิต ในกระบวนการผลิตส่วนก้านของแกนกระทู้คลัตช์
2. กำหนดสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลในข้อที่ 1

ขอบเขตงานวิจัย

การผลิตแกนกระทู้คลัตช์ แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือกระบวนการกลึงก้าน และกระบวนการกลึงหัว โดยงานวิจัยฉบับนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการกลึงก้าน เนื่องจากส่วนก้านของแกนกระทู้คลัตช์เป็นส่วนที่มีลักษณะทางคุณภาพที่ลูกค้าให้ความสำคัญในการตรวจสอบ (เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาผิว) และเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาผลิตสูงสุด โดยกระบวนการกลึงก้านมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาแกนกระทู้คลัตช์ หมายเลขชิ้นส่วน 5YP-E6357-00
2. น้ำหล่อเย็น และเม็ดมิด ได้ถูกกำหนดจากโรงงาน ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. กำหนดสภาวะในการผลิตส่วนก้านแกนกระทู้คลัตช์ได้อย่างเหมาะสม โดยที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาผิว มีค่าความสามารถของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น
2. รอบเวลาผลิตส่วนก้านแกนกระทู้คลัตช์ลดลง
3. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้และเป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาวิธีการออกแบบการทดลอง

การตรวจเอกสาร

การตรวจเอกสารแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ทฤษฎีการตัดโลหะ ความหยาบผิว และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีการตัดโลหะ

สัจจาทิพย์ และคณะ (2544) กล่าวว่า iva การตัดชิ้นงานอย่างมีประสิทธิภาพต้องพิจารณาเลือกใช้เครื่องมือตัด (Tool) ให้เหมาะสมกับกระบวนการของการตัดโลหะ และต้องใส่ใจการตัด (Cutting Condition) อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงอุปกรณ์เสริมที่ต้องใช้ควบคู่ด้วย เช่น น้ำหล่อเย็น เป็นต้น โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1.1 เครื่องมือตัดสำหรับงานกลึง

เครื่องมือตัดสำหรับเครื่องกลึงอัตโนมัติ เรียกว่า เม็ดมีด การเลือกใช้เม็ดมีดให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้น ควรพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1.1 ลักษณะของตัวจับเม็ดมีด (Insert Clamping System) ขึ้นอยู่กับงานที่ต้องการทำงานว่าเป็นงานที่ต้องการตัดโลหะด้านนอกหรือด้านใน หนักหรือเบา รวมไปถึงความรวดเร็วในการเปลี่ยนอุปกรณ์ตัดใหม่

1.1.2 ขนาดและรูปร่างของตัวจับเม็ดมีด (Toolholder Size and Type) การเลือกมีผลต่อการทำงานชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้ และการใช้งาน ซึ่งขึ้นกับการเลือกงานใดควรใช้ขนาดและรูปร่างของตัวจับเม็ดมีดลักษณะใด

1.1.3 รูปร่างของเม็ดมีด (Insert Shape) รูปร่างของเม็ดมีดสัมพันธ์กับมุมที่เครื่องมือตัดเดินเข้าเนื้อชิ้นงาน (Entering Angle) ความแข็งแรงของขอบเม็ดมีด ความหลากหลายในการใช้งาน โดยปกติรูปร่างพื้นฐานเป็นรูปวงกลมไปจนถึงมุมที่ปลายเครื่องมือตัดเพียง 35 องศา

ก. รูปทรงเรขาคณิตของเม็ดมีด (Insert Geometry) รูปทรงของเม็ดมีดมีขนาดทางเรขาคณิตบางส่วนที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและชนิดวัสดุของชิ้นงานที่ใช้

ข. วัสดุของเม็ดมีด (Insert Grade) ในการคัดเลือกต้องให้ตรงกับคุณสมบัติที่ใช้กับวัสดุของชิ้นงานที่จะนำไปใช้ โดยต้องคำนึงถึงผิวของงานที่ต้องการ ความยากลำบากในการทำงาน ความปลอดภัย ตลอดจนอายุการใช้งาน

ค. ขนาดของเม็ดมีด (Insert Size) ขนาดของเม็ดมีดโดยทั่วไป ขึ้นอยู่กับความลึกของการตัด และสัดส่วนของคมมีด เม็ดมีดที่นำไปใช้งานต้องสามารถทนต่อภาวะการตัดโลหะได้

ง. รัศมีปลายทูล (Nose Radian) สำหรับชิ้นงานที่ต้องการผิวที่ดี จะต้องพิจารณารัศมีที่ปลายเครื่องมือตัดหรือปลายเม็ดมีดที่เหมาะสม นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงชนิดของวัสดุของชิ้นงานที่นำมาตัดโลหะด้วย

1.2 การกำหนดค่าเงื่อนไขการตัด

วัสดุที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตัดโลหะต้องมีความแข็ง (Hardness) มากกว่าวัสดุของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป จึงทำให้การตัดโลหะหรือตัดเฉือนได้โดยง่าย ดังนั้น ความเร็วรอบของเพลาหมุน หรือความเร็วรอบ และอัตราป้อน จะแตกต่างกันตามวัสดุต่างๆ ที่ใช้ และความละเอียดผิวที่ต้องการ ฉะนั้นการกำหนดความเร็วรอบ และอัตราป้อน รวมถึงความลึกตัด ต้องเหมาะสม เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูง อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดยาวนาน และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2.1 ความเร็วรอบ คือจำนวนรอบที่ชิ้นงานหมุนต่อหนึ่งนาที สำหรับงานกลึง โดยค่าความเร็วรอบในโปรแกรมเอ็นซี จะป้อนตามรหัสอักษร S เช่น

S = 1,200 rpm หมายถึง ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที

S09 หมายถึง หมายเลขรหัสความเร็วรอบที่ 09 (S09 = 400 rpm)

ในการป้อนค่าความเร็วรอบของเพลางานต้องกำหนดทิศทางการหมุนของเพลางานให้ถูกต้อง คือ หมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

1.2.2 อัตราป้อน คือระยะทางที่เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการตัดเฉือนในแต่ละรอบของการหมุนเพลางานของเครื่องกลึง โดยอัตราป้อนอาจมีหน่วยเป็น ระยะทางต่อรอบในการหมุนชิ้นงาน หรือระยะทางต่อนาที โดยโปรแกรมเอ็นซีโดยทั่วไปอัตราการป้อนจะถูกกำหนดแทนด้วยสัญลักษณ์ F เช่น

$F = 0.2 \text{ mm/rev.}$ หมายถึง อัตราป้อนเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ

$F = 40 \text{ mm/min.}$ หมายถึง อัตราป้อนเท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อนาที

1.2.3 ความลึกตัด คือระยะทางที่วัดจากผิวงานไปถึงจุดปลายเครื่องมือตัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของการทำงาน ความลึกตัดเป็นส่วนที่แสดงให้เห็นว่า จุดปลายเครื่องมือตัดมีลักษณะการเคลื่อนที่ตลอดขอบรูปของชิ้นงานในขณะที่ทำงานตัดเฉือนอย่างไร โดยระดับความลึกสามารถแบ่งเป็นลักษณะของการตัดโลหะได้ 2 กรณี

ก. การตัดโลหะหยาบ (Roughing) คือการตัดโลหะให้เศษโลหะไหลออกมาเร็วมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ผิวงานที่ออกมาจะไม่เรียบนัก เพราะมีค่าความลึกตัดมาก หรือเป็นขั้นหนา โดยจะเหลือผิวสำหรับการตัดโลหะในขั้นสุดท้ายอีกครั้ง

ข. การตัดโลหะละเอียด (Finishing) คือการตัดโลหะที่ทำให้เศษโลหะออกมาน้อยหรือมีค่าความลึกตัดน้อย หรือเป็นชั้นที่บางมาก ผิวงานออกมาเรียบ

1.3 น้ำหล่อเย็น

ของเหลวที่ใช้ระบายความร้อนให้กับคมตัด (Cutting Edge) ของเครื่องมือตัด หรือ น้ำหล่อเย็นเป็นของเหลว ประเภทน้ำหรือน้ำมัน เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดโลหะ มีผลช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของคมตัดนานขึ้น

อัตราการผสมของสารระบายความร้อนกับน้ำเปล่า ต้องให้ได้สัดส่วนตามที่กำหนดจากผู้ผลิต มิเช่นนั้นแล้ว อาจทำให้ชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรเกิดสนิมได้ โดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 8 ถึง 9.5

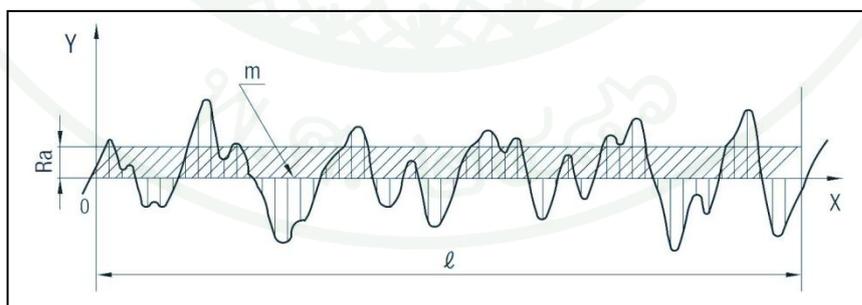
2. ความหยาบผิว

เนื่องจากการผลิต ชิ้นงานจำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอน และบางขั้นตอนผิวหน้างานก็แปรผันไปตามสภาพของเครื่องนั้นๆ กล่าวคือ ผิวหน้างานก็จะเปลี่ยนรูปไปตามกระบวนการผลิต เช่น กลึง ไส กัด เจียร เป็นต้น แม้แต่การใช้เครื่องมือชนิดเดียวกัน ผิวหน้างานก็ยังไม่เหมือนกัน โดยขึ้นอยู่กับการใช้เครื่องมือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกกัด หรืออาจจะเกิดจากความเที่ยงตรงของเครื่อง เป็นต้น

2.1 การวัดความหยาบผิว

การที่จะบอกได้ว่าลักษณะความหยาบของผิวหน้างานมีความสม่ำเสมอหรือไม่ มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard, JIS) รหัสมาตรฐาน JIS B 0660 ปี ค.ศ. 1998 ได้กำหนดวิธีการวัดไว้อย่างเคร่งครัดเป็นมาตรฐาน โดยสามารถสรุปวิธีการวัดค่าความหยาบผิวที่สำคัญไว้ดังนี้

วิธีที่ 1 ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ยทางเลขคณิตจากเส้นเฉลี่ย (Arithmetic Mean Deviation of the Profile) หรือ R_a หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวของช่วงที่ทำกรวัด มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm .)



ภาพที่ 3 การหาค่าความหยาบผิว R_a ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS B 0660

การคำนวณค่าความหยาบผิว R_a ได้ดังนี้

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

หรือประมาณค่าได้ดังนี้

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

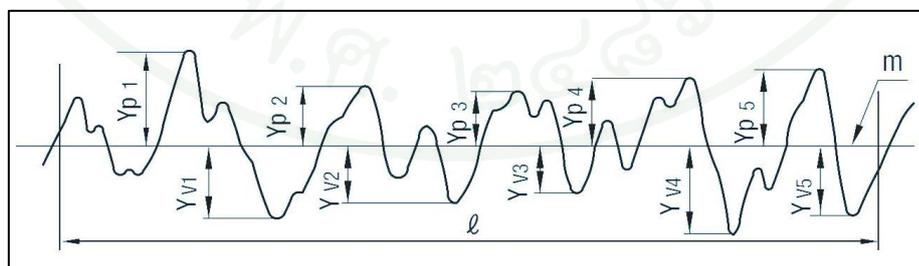
เมื่อ R_a คือ ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว

y_i คือ ค่าจริงทางทฤษฎีของขอบผิวหน้าที่มีค่าความเบี่ยงเบนไปจากเส้นเฉลี่ย

L คือ ระยะความยาวในการชักตัวอย่างตรวจสอบ

N คือ จำนวนของข้อมูลในช่วงระยะที่ทำการวัด

วิธีที่ 2 การยึดถือเอา 10 จุด ความสูงของยอดคลื่นผิวหน้าชิ้นงาน (Ten-Point Height of Irregularities) หรือ R_z หาได้จากการแบ่งการวัดทดสอบเป็น 5 ช่วง ตามระยะของตำแหน่งจุดสูงสุดของคลื่นจำนวน 5 จุด (The Heights of Five Highest Profile Peaks, y_{p_i}) และระยะของตำแหน่งจุดต่ำสุดของคลื่นจำนวน 5 จุด (The Depths of Five Deepest Profile Valleys, y_{v_i}) โดยเทียบกับเส้นกึ่งกลางของการวัด แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันแล้วหารด้วย 5 โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm .)



ภาพที่ 4 การหาค่าความหยาบผิว R_z ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS B 0660

การคำนวณค่าความหยาบผิว R_z ได้ดังนี้

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| - \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right) \quad (3)$$

เมื่อ R_z คือ ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว

y_{pi} คือ ค่าความเบี่ยงเบนของยอดคลื่นสูงสุด 5 ยอด ของผิวหน้างาน

y_{vi} คือ ค่าความเบี่ยงเบนของยอดคลื่นต่ำสุด 5 ยอด ของผิวหน้างาน

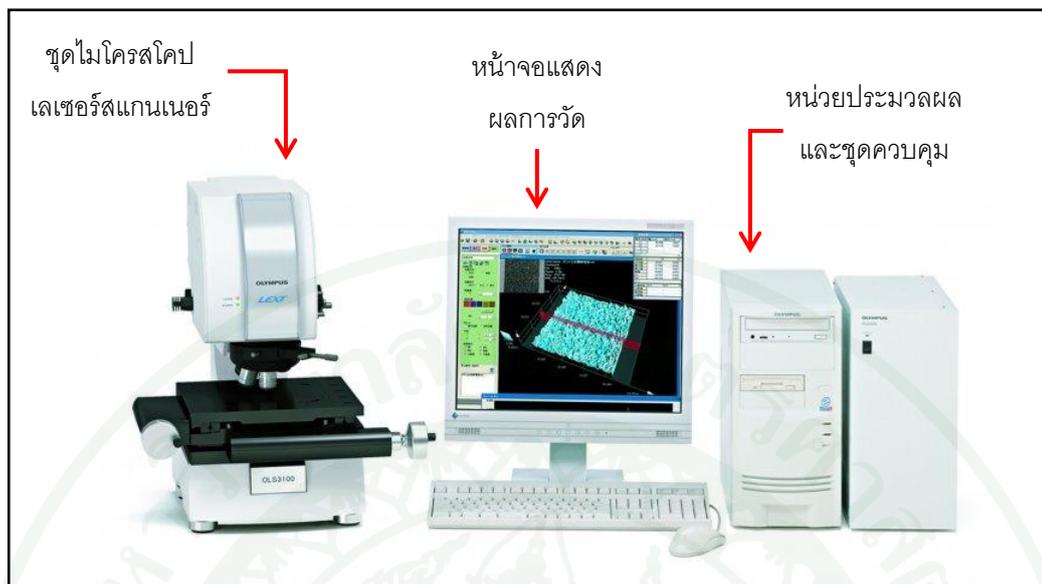
2.2 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ (Confocal Laser Scanning Microscope)

2.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ มีดังนี้

ก. ชุดไมโครสโคปเลเซอร์สแกนเนอร์ ประกอบด้วยโต๊ะวางชิ้นงาน (Microscope Frame) ที่สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน X และ Y ได้ โดยมีชุดเลเซอร์ไมโครสโคป ซึ่งประกอบด้วยกล้องไมโครสโคปแบบเลเซอร์จำนวน 4 ขนาด คือ กำลังขยาย 5 เท่า (5X) 10 เท่า (10X) 20 เท่า (20X) และ 100 เท่า (100X)

ข. หน้าจอแสดงผลการวัด (Monitor) ซึ่งแสดงผลภาพถ่ายด้วยเลเซอร์ไมโครสโคป ตามขนาดกำลังขยายที่ได้ตั้งค่าไว้ พร้อมทั้งแสดงค่าความหยาบผิวออกมาในรูปแบบของกราฟ และเชิงตัวเลข

ค. หน่วยประมวลผลและชุดควบคุม (Control PC and Controller) เป็นส่วนสำคัญในการประมวลผลข้อมูล และควบคุมระบบการวัด



ภาพที่ 5 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ยี่ห้อโอลิมปัส รุ่น LEXT OLS3100

2.2.2 การวิเคราะห์ความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

การวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ใช้หลักการของการแยกลำแสงเลเซอร์ออกเป็นสีที่แตกต่างกัน ที่สะท้อนมาจากพื้นผิวที่ต้องการวัด ซึ่งพบว่าการกระจายความเข้มแสงของแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ไปตกกระทบบนพื้นผิวที่ต้องการวัดค่าความหยาบผิวไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหยาบผิวในแต่ละส่วน จึงทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เฉลิมพล (2550) ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส AISI316 ด้วยไบมีดคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการสึกหรอไบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว โดยใช้เม็ดมีดกลึงซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ ปัจจัยในการศึกษาคือความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด และศึกษาอิทธิพลของอัตราการกำจัดเนื้อโลหะในการวัดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงและการวัดค่าความขรุขระพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และเครื่องวัดความหยาบผิวตามลำดับ ผลการทดลองสรุปได้ว่าความเร็วตัดและความลึกในการตัดให้ค่าการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงแบบ Flank Wear (VB) ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเพิ่มอัตราและอัตราการกำจัดเนื้อโลหะส่งผลให้ค่าความขรุขระพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งโดยสรุป สภาวะการตัดเนื้อที่ เหมาะสำหรับงานวิจัยนี้คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดมีค่า 160 เมตรต่อนาที 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

นวรรตน์ (2548) ได้ศึกษาหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ เพื่อให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลมีค่าสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และทำการปรับปรุงค่าความสามารถของกระบวนการ โดยนำเอาหลักการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต และการทดลองแบบทากูชิไปประยุกต์ใช้พร้อมๆ กัน โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ เครื่องจักรที่ใช้เชื่อมวงจร ระยะเวลาสร้างลูกบอล แรงกดที่ใช้สร้างลูกบอล แรงขยี้ที่ใช้สร้างลูกบอล อุณหภูมิที่ให้ก่อนจะทำการเชื่อมวงจร อุณหภูมิที่ใช้เชื่อมวงจร และความสูงของเข็มที่ใช้เชื่อมลูกบอลของเครื่องทดสอบ ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาสร้างลูกบอล แรงกดที่ใช้สร้างลูกบอลและแรงขยี้ที่ใช้สร้างลูกบอล ให้ผลเหมือนกันทั้งสองแผนการทดลอง แต่การวิเคราะห์สำหรับเครื่องจักรพบว่าแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะเวลาสร้างลูกบอลและแรงขยี้ที่ใช้สร้างลูกบอล ส่วนวิธีการของทากูชิพบว่าอิทธิพลร่วมดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถสรุปได้อีกว่าแผนการทดลองทั้งสองสามารถเพิ่มค่าแรงเฉือนของแรงเฉือนลูกบอล เพิ่มค่าความสามารถของกระบวนการ ให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีและอยู่ภายใต้ข้อกำหนด และพบว่า การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต มีประสิทธิภาพกว่าการทดลองแบบทากูชิ เนื่องจากสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด และขนาดตัวอย่างน้อยกว่าด้วย

รังสฤษฎ์ (2552) ได้ศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง MoO_3 ด้วยวิธีการอาร์เอฟรีแอคทีฟสเปคเตอร์ริง โดยใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติด้วยหลักการ

ออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต มีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้คือ กำลังไฟฟ้า ความดัน อัตราการผสมของก๊าซ Ar/O₂ และอัตราการผสมของก๊าซ C₂H₂/O₂ วิธีการพื้นผิวสะท้อนถูกใช้เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำให้ฟิล์มบางมีอัตราการเคลือบของฟิล์มมากที่สุด และมีลักษณะของพื้นผิวที่มีความขรุขระมากที่สุด ผลการทดลองพบว่าที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางทำให้ได้ค่าอัตราการเคลือบของฟิล์มเท่ากับ 7.89 นาโนเมตรต่อนาที และค่าความขรุขระของพื้นผิว 41.9 นาโนเมตร

สมพร (2552) ได้ศึกษาสภาวะการทำงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซีในการสร้างต้นแบบที่ทำจากพลาสติก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความหยาบของผิวชิ้นงาน โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกในการกลึง นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการนำเอาเครื่องกลึงซีเอ็นซีมาใช้ในกระบวนการในการขึ้นรูปพลาสติก เพื่อสร้างต้นแบบเซรามิกทดแทนปูนปลาสเตอร์แบบเดิม ผลการวิจัยพบว่ามีปัจจัยหลักที่สำคัญที่เกี่ยวข้องด้วยกันคืออัตราการป้อน และความลึกในการกลึง ผลการวิเคราะห์ควรตั้งค่าอัตราการป้อนที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ และค่าความลึกในการกลึงที่ 0.5 มิลลิเมตร จึงจะเหมาะสมสำหรับความหยาบผิวที่ดีที่สุด และการนำเครื่องซีเอ็นซีมาใช้ทดแทนแบบเดิม จะให้อัตราผลตอบแทน (Rate of Return) เท่ากับ 29.84% ต่อปี และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.4 ปี

Aggarwal *et. al.* (2008) ได้ศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของลักษณะทางคุณภาพสำหรับเครื่องกลึงอัตโนมัติภายใต้สภาวะการตัดที่อุณหภูมิต่ำ โดยลักษณะคุณภาพมีอยู่ 4 ชนิด คือ อายุของมีดตัด แรงตัดเฉือน ความหยาบผิว และการบริโภคพลังงาน ของเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยใช้วัสดุโลหะชนิด AISI P20 และไนโตรเจนเหลวเป็นน้ำหล่อเย็น ปัจจัยที่ทำการควบคุมคือ ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกตัด และมุมมีดตัด สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกใช้การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาแบบจำลอง และส่วนที่สองใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของลักษณะทางคุณภาพทั้ง 4 จากการทดลองสรุปได้ว่าค่าของลักษณะทางคุณภาพทั้ง 4 ชนิดที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการพยากรณ์อยู่ในช่วง -6.25 ถึง 2.60%

Bouacha *et. al.* (2010) ได้ศึกษาการกลึงโลหะ AISI 52100 ด้วย CBN Tool โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัด เช่น ความเร็วตัด

อัตราป้อน และความลึกตัด กับผลตอบสนอง เช่น ความหยาบผิว และแรงตัด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน รูปแบบของสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน จะให้ค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมตรงตามจุดประสงค์ของงานวิจัย ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวคือ อัตราการป้อน และความเร็วตัด และความลึกตัดก็มีอิทธิพลสูงสุดที่ส่งผลต่อแรงตัด เมื่อเทียบกับอัตราการป้อน และความเร็วตัด

Choudhury and El-Baradie (1997) ได้วิจัยเพื่อหาตัวแปรที่ใช้ในการพยากรณ์หาค่าความหยาบผิวสำหรับการกลึงโลหะ EN 24T (290 BHN) ด้วยมีดตัด CNMA 12 04 04 (H13A) โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวสะท้อนและใช้เทคนิคของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^3 ทำการศึกษาหาปัจจัยหลักในการตัด เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดเฉือน ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ผลวิเคราะห์พบว่าอัตราการป้อนส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากกว่า ความเร็วตัด และความลึกตัด

Lalwani *et. al.* (2008) ได้ใช้การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อศึกษาหาผลกระทบของพารามิเตอร์ของแรงตัดเฉือน (แรงป้อน แรงขับเคลื่อน และแรงตัด) และความหยาบผิว ที่เกิดจากการกลึงชิ้นงานโลหะ MDN 250 (50 HRC) ด้วยมีดตัดที่เคลือบด้วยเซรามิก มีปัจจัยที่ส่งผลดังต่อไปนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกตัด ผลการวิเคราะห์สรุปว่า ความเร็วในการตัดไม่ส่งผลต่อพารามิเตอร์แรงตัดทั้ง 3 และความหยาบผิว ดังนั้นจากแบบจำลองของพารามิเตอร์ทั้ง 3 สรุปได้ว่าค่าความลึกตัดส่งผลต่อแรงป้อนมากที่สุด (89.05%) รองลงมาคืออัตราป้อน (6.61%) ส่วนแรงขับเคลื่อน ค่าความลึกตัดและอัตราป้อนก็มีความสำคัญมากที่สุด (49.59% และ 46.71%) และสุดท้ายแรงตัด ค่าความลึกตัดและอัตราป้อนมีความสำคัญมากที่สุด (52.60% และ 41.64%) สำหรับค่าความหยาบผิวอัตราป้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด

Noordin *et. al.* (2004) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวสะท้อนในการหาสมรรถภาพการกลึงด้วยมีดตัดที่ถูกชุบด้วยคาร์ไบด์โดยใช้กลึงเหล็กชนิด AISI 1045 ซึ่งมีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และมุมมีดตัด SCEA โดยมีผลตอบสนองคือ แรงตัดเฉือน และความหยาบผิว การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการกลึง ผลการทดลองสรุปได้ว่าอัตราการป้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความหยาบผิว และค่าแรงตัดเฉือน อย่างไรก็ตามปัจจัยอื่นๆ ก็ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองเช่นเดียวกัน

Tzeng *et. al.* (2009) ได้ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการกลึงโลหะ SKD11 (ตามมาตรฐาน JIS) ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยใช้การออกแบบการทดลองของทากูชิ ผลตอบสนองของงานวิจัยนี้มีอยู่ 3 ค่าคือ ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว ($R_a, \mu\text{m.}$) ค่าความหยาบผิวสูงสุด ($R_z, \mu\text{m.}$) และเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ($\mu\text{m.}$) โดยมีปัจจัยในการวิเคราะห์คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกตัด และ อัตราส่วนการผสมของน้ำหล่อเย็น โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ 3 ระดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าความลึกตัดมีอิทธิพลสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว ความเร็วตัดมีอิทธิพลสูงสุดต่อค่าความหยาบผิวสูงสุดและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน หลังจากนั้นทางคณะผู้วิจัยได้ทำการหาปัจจัยที่มีผลที่สุดสำหรับกระบวนการกลึงดังกล่าวด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลของการวิเคราะห์สรุปว่าความลึกของการตัดเนื้อเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- | | |
|--|-----------------|
| 1. เครื่องกลึงอัตโนมัติ TAKISAWA รุ่น EX-105 | จำนวน 1 เครื่อง |
| 2. ไมโครมิเตอร์ | จำนวน 1 เครื่อง |
| 3. กล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ | จำนวน 1 เครื่อง |
| 4. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล | จำนวน 1 เครื่อง |
| 5. เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี | จำนวน 1 เครื่อง |
| 6. โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ (Microsoft Excel) | จำนวน 1 ชุด |
| 7. โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เวิร์ด (Microsoft Word) | จำนวน 1 ชุด |
| 8. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab | จำนวน 1 ชุด |

วิธีการ

1. การวางแผนการทดลอง

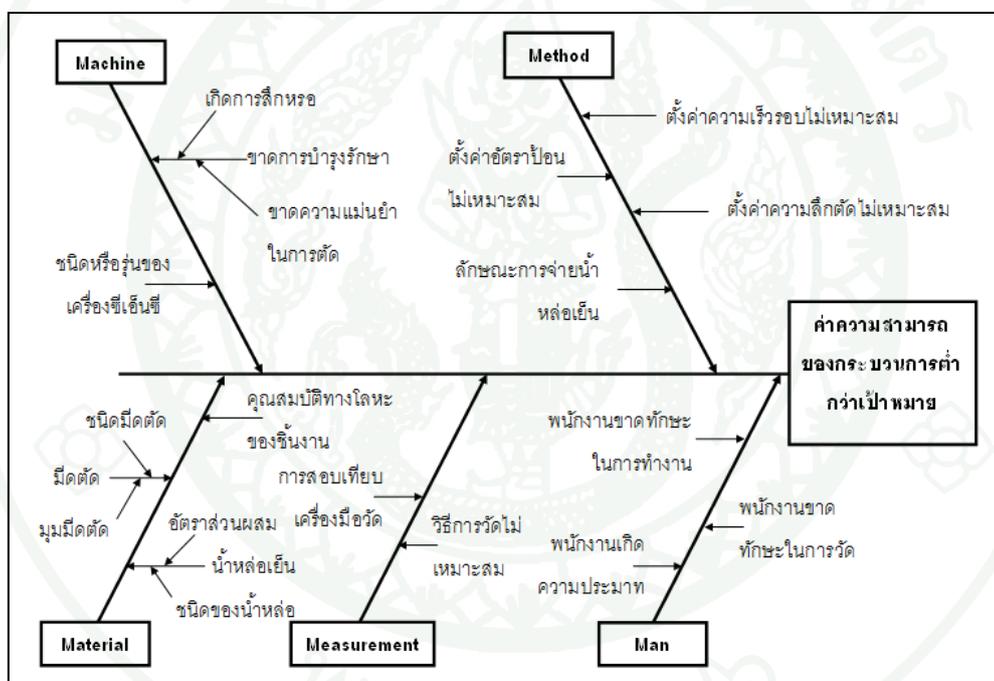
1.1 ศึกษากระบวนการผลิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษากระบวนการผลิตและข้อมูลการผลิตย้อนหลัง โดยวิเคราะห์จากค่า C_{pk} และการสอบถามผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการผลิต เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกปัญหาสำหรับงานวิจัย จากนั้นศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไป

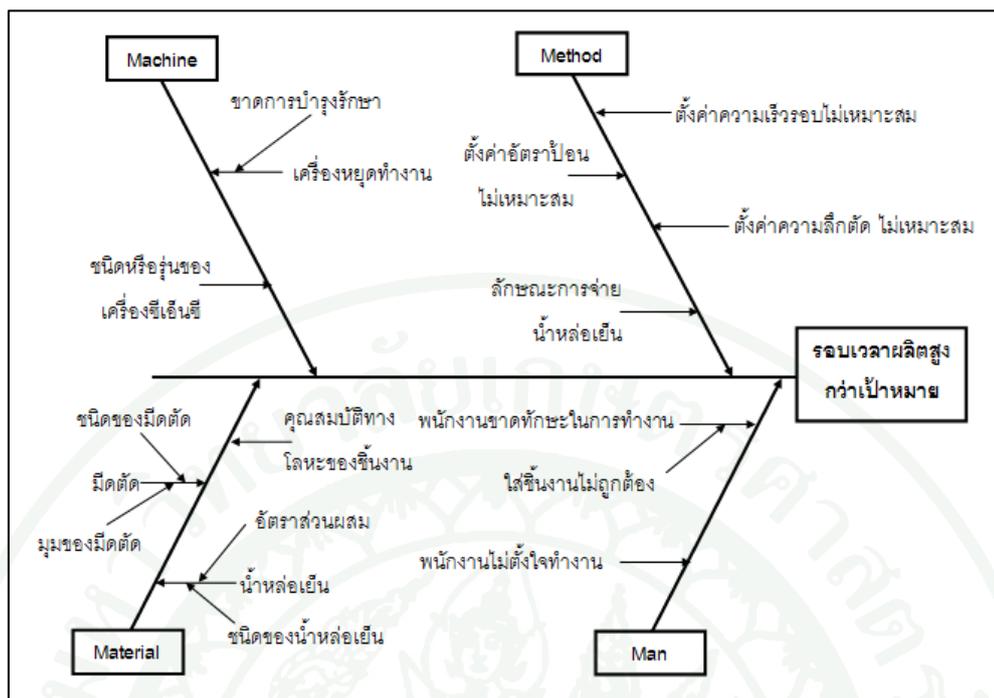
1.2 ระบุปัญหาที่จะทำการวิจัย

จากการศึกษาสภาพเดิมของการผลิตแกนกระทู้กลัดซ์ ในกระบวนการกลึงก้าน ซึ่งผู้วิจัยได้แยกพิจารณาสาเหตุของปัญหาออกเป็น 2 ประเด็นคือ

1. สาเหตุของปัญหาที่เกิดจากค่าความสามารถของกระบวนการของลักษณะทางคุณภาพ (เส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบผิว) ต่ำกว่าเป้าหมาย
2. สาเหตุของปัญหาที่เกิดจากรอบเวลาผลิตสูงกว่าค่าเป้าหมาย ซึ่งทั้งสองประเด็นสามารถสรุปได้จากผังเหตุและผล ดังภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 6 ผังเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากค่าความสามารถของกระบวนการของลักษณะทางคุณภาพต่ำกว่าเป้าหมาย



ภาพที่ 7 ผังเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากรอบเวลาผลิตสูงกว่าเป้าหมาย

1.3 กำหนดผลตอบแทนและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

1.3.1 ผลตอบสนอง (Responses) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการ เนื่องจากโรงงานต้องการระดับปัจจัย (Levels of Factor) ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตส่วนก้านแกนกระทุ้งคลัตช์ที่ส่งผลต่อลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญ 2 ประการคือ เส้นผ่านศูนย์กลางและความหยابผิว อีกทั้งยังคำนึงถึงรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตควบคู่ไปกับลักษณะทางคุณภาพอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลตอบแทนทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้

ก. เส้นผ่านศูนย์กลาง (Y_1) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

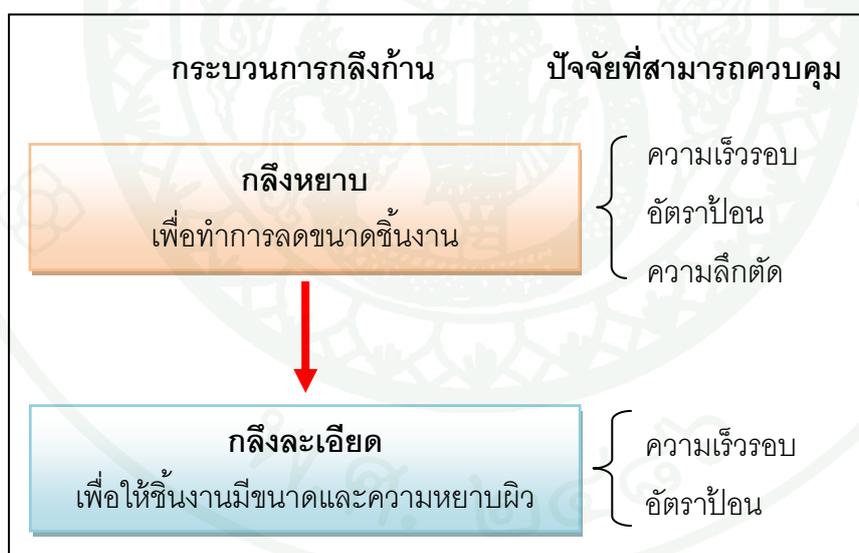
ข. ความหยابผิว (Y_2) วัดความหยابผิวโดยใช้วิธีการขีดถือเอา 10 จุด ความสูงของยอดคลื่นผิวหน้าชิ้นงาน หรือ R_z เป็นมาตรฐานการวัดความหยابผิวสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการวัดที่ลูกค้กำหนด มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร

ค. รอบเวลาผลิต (Y_3) มีหน่วยเป็นวินาที

1.3.2 ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าของผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผู้วิจัยได้ร่วมเป็นผู้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองร่วมกับหัวหน้าฝ่ายผลิตและพนักงานที่เกี่ยวข้องในการผลิต สามารถสรุปปัจจัยควบคุมจากผังเหตุและผล ทั้ง 2 ผัง ออกเป็น 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

- ก. ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm)
- ข. อัตราป้อน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)
- ค. ความลึกตัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

เนื่องจากกระบวนการกลึงก้านเป็นกระบวนการผลิตที่ต่อเนื่อง คือ ทำการกลึงหยาบและละเอียด ตามลำดับ โดยการกลึงหยาบมีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกตัด ส่วนการกลึงละเอียดมี 2 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ และอัตราป้อน ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ของกระบวนการกลึงก้าน

จากภาพที่ 8 สามารถสรุปเป็นปัจจัยควบคุมที่ใช้สำหรับการทดลอง ได้ดังนี้

- ก. ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ แทนด้วยสัญลักษณ์ A
- ข. อัตราป้อนของการกลึงหยาบ แทนด้วยสัญลักษณ์ B
- ค. ความลึกตัดของการกลึงหยาบ แทนด้วยสัญลักษณ์ C
- ง. ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด แทนด้วยสัญลักษณ์ D
- จ. อัตราป้อนของการกลึงละเอียด แทนด้วยสัญลักษณ์ E

1.3.3 ปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) เป็นปัจจัยในการออกแบบ ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อตอบสนองแต่ผู้วิจัยไม่สนใจในผลเหล่านั้น บางครั้งปัจจัยรบกวนเป็นสิ่งที่ไม่ทราบค่าและไม่สามารถควบคุมได้ แต่สำหรับงานวิจัยนี้เป็นปัจจัยรบกวนประเภทที่สามารถควบคุมได้ โดยปัจจัยรบกวนของงานวิจัยนี้คือ เม็ดมิด เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้งจะเกิดการสึกหรอขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการบล็อก (Blocking) มาใช้เพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดจากปัจจัยรบกวน

1.3.4 ปัจจัยคงที่ (Fixed Factors) คือ ปัจจัยที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดของทางโรงงาน ประกอบด้วย 4 ปัจจัยดังนี้

- ก. เครื่องกลึงอัตโนมัติ TAKISAWA รุ่น EX-105
- ข. เม็ดมิด ชนิด TNMG 16042N-SU ผลิตจากบริษัท SUMITOMO ELECTRIC
- ค. น้ำหล่อเย็น H/C 1050 ลักษณะของสารละลายเป็นแบบน้ำมัน ความเข้มข้นเท่ากับ 5-8 % และค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) เท่ากับ 8.5-9.5
- ง. คุณสมบัติทางโลหะของชิ้นงานทดลอง เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่ถูกส่งมาจากลูกค้าเพื่อทำการผลิต ไม่สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้

1.5 กำหนดแผนที่ใช้ในการทดลอง

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแกนกระทู้กัลต์ซ์ ดังนั้นแล้วการเลือกใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design) มาใช้เป็นแผนการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นแผนการ

ทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน (Second Order Response Surface Model) ซึ่งรูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนที่ได้จากการทดลองก็จะนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต

Box และ Draper (1987) กล่าวว่า วิธีการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตมีความยืดหยุ่น (Very Flexible) ในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษารูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน

ประไพศรีและพงศ์ชนัน (2551) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียของแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต ได้ดังนี้

ข้อดีของแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

- ก. เหมาะที่สุด (Most Effective and Efficient) ในการศึกษาแบบของสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน กรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factors)
- ข. มีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่ารีโซลูชัน (Resolution) ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k Full Factorial) และการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Factional Factorial)
- ค. โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับรีโซลูชันที่สาม (Resolution III) หรือรีโซลูชันที่ห้า (Resolution IV) สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ 2^{k-p} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน
- ง. แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial Portion) และจุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการตัวแบบเชิงเส้นตรง สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปแบบเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนจุดแกน (Axial Portion) จะได้รูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน

ข้อเสียของแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

ก. เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factors) ต้องทำการปรับแผนการทดลอง โดยเฉพาะกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพมากกว่า 1 ปัจจัย จำเป็นที่ต้องใช้การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน หรือการออกแบบแบบดี-ออฟติมอล (D-Optimal)

แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตเป็นแผนการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน ซึ่งมีรูปแบบสมการสำหรับ k ปัจจัยคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

โดยที่ $i=1,2,\dots,k$ $j=1,2,\dots,k$ และ $i \neq j$

y คือ ผลตอบสนอง

x_i คือ ปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ คือ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือสัมประสิทธิ์การถดถอย

ε คือ ค่าผิดพลาด

สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตโดยทั่วไป ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

ก. จำนวนจุดของแฟคทอเรียล (Factorial Points; n_f) โดยที่

$$n_f = \begin{cases} 2^k & \text{เมื่อเป็นการทดลองแบบ } 2^k \text{ แฟคทอเรียลเต็มรูป} \\ 2^{k-p} & \text{เมื่อเป็นการทดลองแบบ } 2^k \text{ แฟคทอเรียลบางส่วน} \end{cases} \quad (5)$$

ข. จำนวนของจุดศูนย์กลาง (Center Points; n_c) ต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 1 ครั้งเพื่อคำนวณหา Pure Error ในการวิเคราะห์การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack-of-Fit)

ค. จำนวนจุดในแนวแกน (Axial Points หรือ Star Points; n_a) สำหรับการออกแบบการทดลอง ทั้ง 2^k แฟกทอเรียล และ 2^{k-p} แฟกทอเรียลบางส่วน มีจำนวนเท่ากับ $2*k$ โดยแต่ละจุดอยู่ห่างจาก Center Points ด้วยระยะที่เท่ากันคือระยะ α

ดังนั้นการทดลองมีจำนวนจุดทั้งหมด (N) เท่ากับ $n_r + (2*k) + n_c$

ความสามารถในการหมุน (Rotatability) เป็นคุณสมบัติประเภทหนึ่งของแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิต โดยตัวแบบที่มีคุณสมบัตินี้สามารถทำให้ทุกจุดในการทดลองที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากัน (Equidistant) มีค่าความแปรปรวนคงที่ คุณสมบัติ Rotatability เป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology; RSM) โดยวัตถุประสงค์ของ RSM คือการหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งก่อนที่จะทดลองไม่สามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดในพื้นที่ผิวสะท้อนเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดหรือคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้คุณสมบัติ Rotatability สำหรับแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตก็เพื่อจะได้คำตอบที่ทำให้ตัวประมามีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง แผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตสามารถทำให้มีคุณสมบัติ Rotatability ได้โดยการเลือกค่า α ซึ่ง Myers และคณะ (2008) ได้นำเสนอค่า α ที่เหมาะสมที่ใช้กับแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตสำหรับคุณสมบัติ Rotatability ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า α ที่ใช้กับแผนการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิตสำหรับคุณสมบัติ Rotatability

จำนวนปัจจัย (k)	จำนวนจุดแฟกทอเรียล (n_r)	จำนวนจุดการทดลองทั้งหมด (N)	ค่า α
2	4	$8 + n_c$	1.414
3	8	$14 + n_c$	1.682
4	16	$24 + n_c$	2.000
5	32	$42 + n_c$	2.378
5 (1/2 rep.)	16	$26 + n_c$	2.000
6	64	$76 + n_c$	2.828
6 (1/2 rep.)	32	$44 + n_c$	2.378

จากตารางที่ 2 ค่า n_c หรือจำนวนจุดศูนย์กลางการทดลองสำหรับคุณสมบัติ Rotatability ต้องทำการรวมเอาจุดศูนย์กลางการทดลองไว้ด้วยกัน เพื่อให้ความแปรปรวนของผลตอบสนองมีค่าคงที่ โดยทั่วไปแนะนำให้จำนวนจุดศูนย์กลางการทดลองมีจำนวน 3-5 การทดลอง (Montgomery, 2009) และค่า α ของแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับคุณสมบัติ Rotatability สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$\alpha = \sqrt[4]{n_f} \quad (6)$$

การบล็อกในแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตเพราะต้องการลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในการทดลองเนื่องจากตัวแปรรบกวน โดยเรียกการบล็อกในแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตว่า การบล็อกเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Blocking) ซึ่งสามารถประมาณค่าอิทธิพลของปัจจัยและอิทธิพลของบล็อกออกจากกันได้ รวมทั้งยังได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่มีค่าความแปรปรวนน้อยที่สุดด้วย สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต จำนวนการบล็อกเชิงตั้งฉากขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยที่ศึกษา จำนวนการทดลอง และเศษส่วนการทดลอง โดยสามารถแยกเป็นการบล็อกในแฟกทอเรียล (Factorial Block) และการบล็อกในแนวแกน (Axial Point Block) โดยปกติแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตจะถูกให้สร้างการบล็อกเชิงตั้งฉากใน 2 บล็อกได้เสมอ โดยบล็อกแรกประกอบด้วย n_f จุดแฟกทอเรียล รวมกับ n_c จุดศูนย์กลาง และบล็อกที่สองประกอบด้วย $n_u = 2 * k$ จุดในแนวแกน รวมกับ n_c จุดศูนย์กลาง ซึ่ง Montgomery (2009) ได้แสดงรายละเอียดของแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับการบล็อกเชิงตั้งฉากใน 2 บล็อก ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับการบล็อกเชิงตั้งฉากใน 2 บล็อก

รายละเอียด	จำนวนปัจจัย (k)				
	2	3	4	5	5 (½ rep.)
Factorial Block(s)					
#จุดแฟกทอเรียล (n_f)	4	8	16	32	16
#บล็อก	1	2	2	4	1
#จุดการทดลองในบล็อก	4	4	8	8	16
#จุดศูนย์กลางในบล็อก (n_c)	3	2	2	2	6

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายละเอียด	จำนวนปัจจัย (k)				
	2	3	4	5	5 (½ rep.)
รวม#จุดทั้งหมดในบล็อก	7	6	10	10	22
Axial Block					
#จุดในแนวแกน (n_g)	4	6	8	10	10
#จุดศูนย์กลางในแนวแกน (n_{ca})	3	2	2	4	1
รวม#จุดทั้งหมดในบล็อก	7	8	10	14	11
รวม#จุดการทดลองทั้งหมด (N)	14	20	30	54	33
ค่าของ α					
Orthogonal Blocking	1.414	1.633	2.000	2.366	2.000
Rotatability	1.414	1.682	2.000	2.378	2.000

ที่มา: Montgomery (2009)

จากตารางที่ 3 ค่า α ของแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับการบล็อกเชิงตั้งฉากสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\alpha = \sqrt{\frac{n_f(n_a + n_{ca})}{2(n_f + n_{cf})}} \quad (7)$$

1.5 ทำการทดลองตามปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ได้จากแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต แบบ 2^{k-p} แฟลททอเรียลบางส่วน และทำการบันทึกผลการทดลอง

1.6 นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อสร้างสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน แบบเต็มรูป (Full Model) สำหรับนำไปหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตแกนกระทู้กัลด์ โดยมียรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

1.6.1 ประมาณค่าสัมประสิทธิ์และวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการถดถอย

1.6.2 ทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอย (Test of Assumption in Regression)

ประไพศรีและพงษ์ชนัน (2551) กล่าวว่าหลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวน ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติเกี่ยวกับค่าผิดพลาด (Residual) เสมอ ซึ่งข้อสมมติที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สมการถดถอยที่สำคัญมีอยู่ 4 ข้อ คือ

- i. ค่าผิดพลาดจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ
- ii. ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์
- iii. ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่
- iv. ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

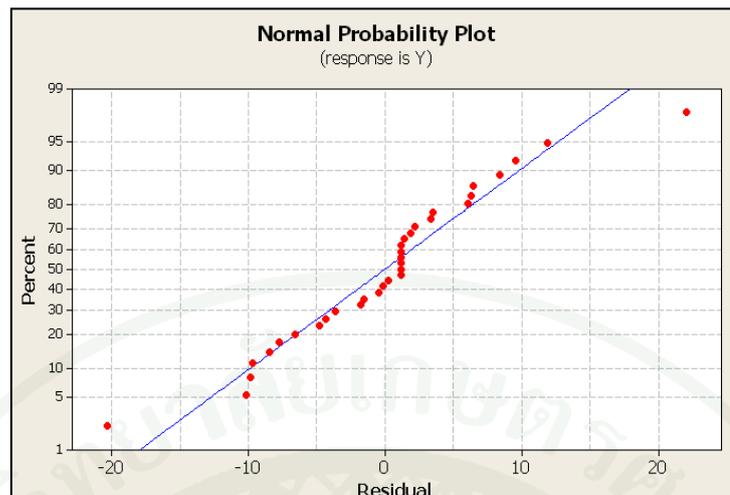
ในการทดสอบข้อสมมติใช้กราฟที่แตกต่างกันดังนี้

ก. กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ใช้ในการทดสอบข้อสมมติที่ (i) ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อสมมติที่ (i) ผ่าน หรือใช้การทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธี Anderson-Darling Test โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ

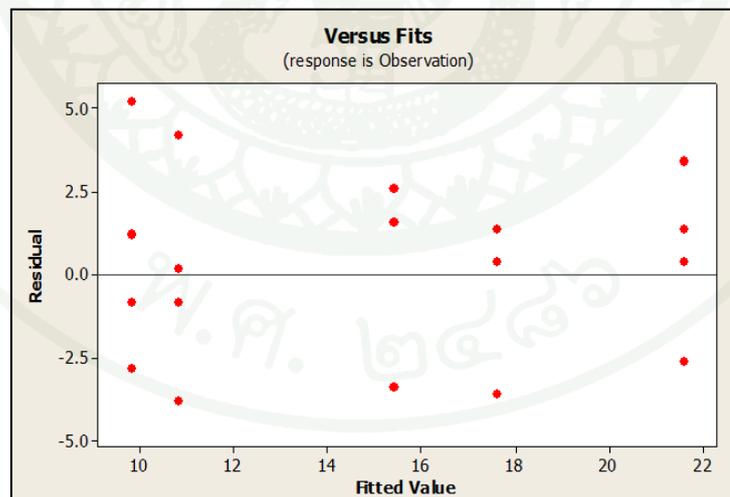
H_1 : ค่าผิดพลาดไม่มีการแจกแจงปกติ

การสรุปผลให้ดูจากค่า P-value ถ้ามีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติหรือว่าข้อสมมติที่ (i) ผ่าน



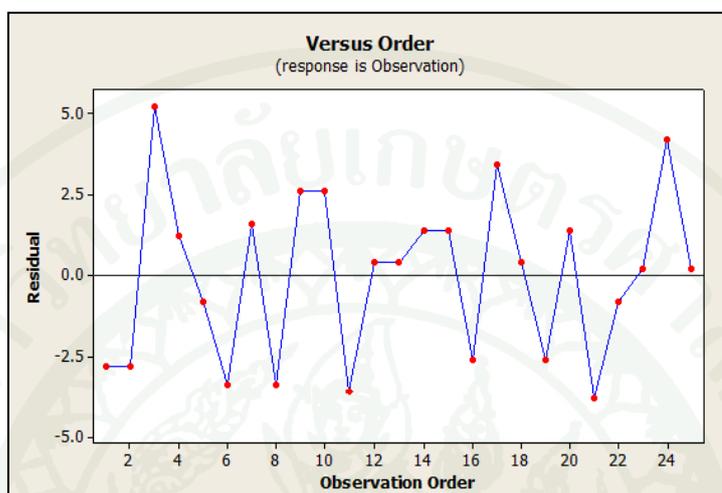
ภาพที่ 9 กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของค่าผิดพลาด

ข. กราฟของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ผลตอบสนอง ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ (ii) และ (iii) โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์ อย่างสมดุล) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวนคงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่ม แสดงถึงความน่าจะเป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาดซึ่งเป็นการตรวจสอบข้อสมมติที่ (iv)



ภาพที่ 10 กราฟของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ผลตอบสนอง

ค. กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับที่ของการทดลอง ใช้ในพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาด ถ้ายังมีรูปแบบความสัมพันธ์ แสดงว่าสมการถดถอยที่ใช้มีรูปแบบ (Form of Model) ไม่เหมาะสม



ภาพที่ 11 กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับที่ของการทดลอง

1.6.3 ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ประไพศรีและพงษ์ชนัน (2551) กล่าวว่าหลังจากประมาณค่าสัมประสิทธิ์ และทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอยแล้ว ก่อนที่จะนำสมการไปใช้ต้องทดสอบความเหมาะสมของสมการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการมาใช้ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ก. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่า สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองหรือตัวแปรตาม (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้น ยิ่ง ค่า R^2 มาก สมการถดถอยก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก

ข. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit Test) ทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่า x ซ้ำ แต่ผลลัพธ์ของผลตอบสนองที่ได้แตกต่างกัน มักเป็นข้อมูลที่

ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องการเก็บค่าซ้ำ (ทำการทดลองซ้ำ) ซึ่งสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ

H_0 : สมการถดถอยมีความเหมาะสม (There's no LOF)

H_1 : สมการถดถอยขาดความเหมาะสม (There's LOF)

โดยที่ค่า P-Value ของ Lack of Fit มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ ดังนั้นสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

1.7 หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ซึ่งได้นำหลักการของฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) มาช่วยในการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สกระทิงคลัตช์ที่มีผลต่อผลตอบสนองทั้ง 3 ค่า

ฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการพิจารณาสถานะของผลตอบสนอง ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอิสระ โดยค่าของความพึงพอใจของผลตอบสนอง (Desirability; d) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เมื่อ d มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง ผลตอบสนองนั้นอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ แต่ถ้า d มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความพึงพอใจก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อ d มีค่าเท่ากับหนึ่ง หมายถึงผลตอบสนองนั้นได้ความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ซึ่ง Myers และคณะ (2008) ได้อธิบายสมการของฟังก์ชันความพึงพอใจ ได้ดังสมการที่ 8 ถึง 11

กรณีที่ผลตอบสนองที่ใช้ในการพิจารณามีข้อกำหนดด้านเดียว ค่าความพึงพอใจหาได้จากสมการที่ 8 และ 9

เมื่อต้องการผลตอบสนองสูงสุด (Maximum) หาได้จากสมการที่ 8

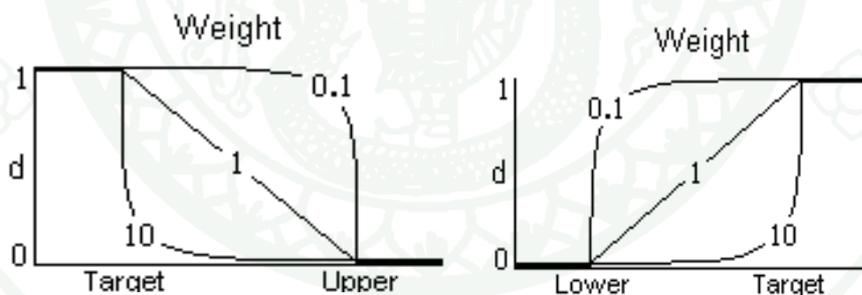
$$d = \begin{cases} 0 & y < T \\ \left(\frac{y-L}{T-L} \right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (8)$$

และเมื่อต้องการผลตอบแทนต่ำสุด (Minimum) หาได้จากสมการที่ 9

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (9)$$

เมื่อ d คือ ความพึงพอใจของผลตอบแทน
 y คือ ค่าของผลตอบแทน
 T คือ ค่าเป้าหมายผลตอบแทน (Target)
 L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบแทน
 U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบแทน

r คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบแทน (Weight) ซึ่งกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบแทน
 เลือกกำหนดค่าของน้ำหนัก ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 น้ำหนักของผลตอบแทน กรณีมีข้อกำหนดด้านเดียว

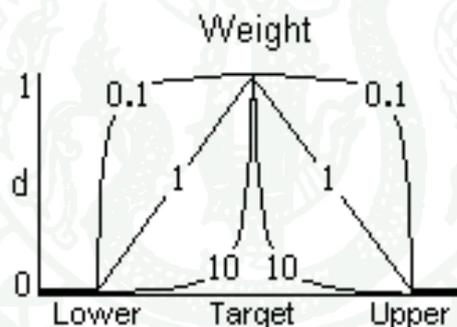
กรณีผลตอบแทนใช้ในการพิจารณามีข้อกำหนดสองด้าน ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบแทนหาได้จากสมการที่ 10

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ r_1 คือ ค่าน้ำหนักของค่าในระดับต่ำของผลตอบสนอง
 r_2 คือ ค่าน้ำหนักของค่าในระดับสูงของผลตอบสนอง

การกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบสนองกรณีนี้ สามารถเลือกกำหนดค่าน้ำหนัก

ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 น้ำหนักของผลตอบสนอง กรณีมีข้อกำหนดสองด้าน

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีหลายค่า ต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability; D) จากสมการที่ 11

$$D = [d_1 * d_2 * \dots * d_m]^{1/m} \quad (11)$$

เมื่อ D คือ ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability)

d คือ ความพึงพอใจของแต่ละผลตอบสนอง (Desirability)

m คือ จำนวนของผลตอบสนอง

และเมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีเพียงค่าเดียว ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองจะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองนั้น

สำหรับฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab นอกจากกำหนดค่าเป้าหมายและขอบเขตของเป้าหมายแล้ว ยังต้องกำหนดน้ำหนักและระบุความสำคัญของแต่ละผลตอบสนองด้วย

การกำหนดน้ำหนัก (Setting the Weight for the Desirability Function) เป็นการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจของแต่ละผลตอบสนอง ซึ่งสามารถเลือกเพื่อกำหนดให้น้ำหนักความสำคัญต่อเป้าหมาย โดยค่าน้ำหนักที่น้อยกว่า 1 (น้อยที่สุดคือ 0.1) ใช้เมื่อต้องการไม่เน้นความสำคัญที่ค่าเป้าหมาย ค่าน้ำหนักที่เท่ากับ 1 ใช้เมื่อต้องการเน้นความสำคัญที่ค่าเป้าหมาย เท่ากับค่าขอบเขต และค่าน้ำหนักที่มากกว่า 1 (มากที่สุดคือ 10) ใช้เมื่อต้องการเน้นความสำคัญที่ค่าเป้าหมาย

การระบุความสำคัญ (Specifying the Importance for Composite Desirability) เป็นการประเมินความสำคัญของผลตอบสนองแต่ละตัว เพื่อใส่ค่าลำดับความสำคัญของผลตอบสนองในการกำหนดค่าความสำคัญ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 ถ้าผลตอบสนองทุกตัวมีความสำคัญเท่ากันใช้ค่าที่โปรแกรมกำหนดไว้คือ 1 ให้กับผลตอบสนองทุกตัว แต่ถ้าผลตอบสนองมีความสำคัญที่ไม่เท่ากัน สามารถกำหนดในฟังก์ชันเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยความสำคัญมากจะมีค่าความสำคัญมาก และความสำคัญน้อยจะมีค่าความสำคัญน้อย

1.8 การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากฟังก์ชัน Response Optimizer ไปผลิตจริง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าต่างๆ ทางสถิติ

1.9 สรุปผลการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการยืนยันผลและคำนวณค่าสถิติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต

2. สถานที่ทำการทดลอง

บริษัทไคเทค พรีซิชั่น จำกัด 26/273-275 หมู่ 18 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง
จ.ปทุมธานี 12120

3. ระยะเวลาทำการวิจัย

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2553 ถึง 1 ตุลาคม พ.ศ.2554

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับนำไปตั้งค่าการผลิตแกนกระทิงคลัตช์ ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีคุณภาพสูงและเวลาในการผลิตลดลง อีกทั้งยังสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมใกล้เคียงกันได้

6. แหล่งทุนสนับสนุน

ทุนส่วนตัว

ผลและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อสร้างสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนสำหรับหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab และได้สร้างสมการพยากรณ์ (Prediction Model) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายผลตอบสนองด้วยวิธี Stepwise Selection หลังจากนั้นนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ไปใช้ในการยืนยันผล และสุดท้ายนำค่าที่ได้จากการทดลองยืนยันผลไปเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง

1. แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

การออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต สำหรับงานวิจัยนี้มีปัจจัยควบคุมที่ศึกษาทั้งสิ้น 5 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ (ปัจจัย A) อัตราป้อนของการกลึงหยาบ (ปัจจัย B) ความลึกตัดของการกลึงหยาบ (ปัจจัย C) ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด (ปัจจัย D) และอัตราป้อนของการกลึงละเอียด (ปัจจัย E) โดยศึกษาว่าปัจจัยดังกล่าวทั้งหมดนี้มีผลต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าความหยวบผิว และรอบเวลาผลิต ของแกนกระทุ้งคลัตช์หรือไม่ โดยได้กำหนดปัจจัยควบคุมออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และสูง (+1) และผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่มระดับของปัจจัยควบคุมออกนอกช่วงซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ ± 2 ดังสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับแผนการทดลองในงานวิจัยได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ระดับของปัจจัย				
		-2	-1	0	+1	+2
A	รอบต่อนาที	2,250	3,000	3,750	4,500	5,250
B	มิลลิเมตรต่อนาที	0.1	0.4	0.7	1	1.3
C	มิลลิเมตร	0.1	0.4	0.7	1	1.3
D	รอบต่อนาที	2,250	3,000	3,750	4,500	5,250
E	มิลลิเมตรต่อนาที	0.02	0.08	0.14	0.2	0.26

เนื่องจากงานวิจัยนี้ซึ่งงานทดลองมีจำนวนจำกัด ผู้วิจัยจึงเลือกแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต 2^{5-1} แฟคทอเรียลบางส่วน (2^{5-1} Fractional Factorial) มาใช้ทำการทดลอง และเพื่อลดปัจจัยรบกวนที่เกิดการสึกหรอของเมล็ดมีด ผู้วิจัยจึงได้ทำการบล็อกในแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต โดยแบ่งออกเป็น 2 บล็อก ซึ่งก็เพียงพอต่อการลดผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยรบกวน เนื่องจากว่าการทดลองของงานวิจัยนี้ใช้ซึ่งงานทดลองน้อย

แผนการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 33 ตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางผนวกที่ ข1 โดยมีรายละเอียดของแผนการทดลองดังนี้

1. รอบทำซ้ำ เท่ากับ 1 รอบ เนื่องจากข้อจำกัดของโรงงาน เพราะว่าโรงงานรับชิ้นงานจากลูกค้าเพื่อมาทำการผลิต ดังนั้นทางโรงงานจึงไม่ยอมให้เกิดชิ้นงานเสียเนื่องจากการทดลองที่มากเกินไป
2. จำนวนของจุดแฟคทอเรียล (n_p) มีจำนวนเท่ากับ 2^{k-p} ดังนั้นเท่ากับ $2^{5-1} = 16$ จุด
3. จำนวนของจุดศูนย์กลางจากตารางที่ 3 จุดศูนย์กลางจากบล็อกของแฟคทอเรียล (n_{cp}) จำนวน 6 จุด และจุดศูนย์กลางจากบล็อกของแนวแกน (n_{ca}) จำนวน 1 จุด ดังนั้นมีจำนวนจุดของจุดศูนย์กลางทั้งหมดเท่ากับ 7 จุด
4. จำนวนของจุดในแนวแกน (n_a) มีจำนวนเท่ากับ $2*k$ ดังนั้นเท่ากับ $2*5 = 10$ จุด
5. ระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกนกับจุดศูนย์กลางการทดลอง จากสมการที่ 7 มีค่าเท่ากับ

$$\alpha = \sqrt{\frac{16(10+1)}{2(16+6)}} = 2$$

1.1 การกำหนดรูปแบบสมการ (Model)

$$y_{ijklm} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \alpha_m + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\tau\alpha)_{im} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\alpha)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\alpha)_{km} + (\delta\alpha)_{lm} + \theta_n + \varepsilon_{ijklmn}$$

โดยที่ $i=1, 2$ $j=1, 2$ $k=1, 2$ $l=1, 2$ $m=1, 2$ และ $n=1, 2$

y_{ijklm} คือ ผลตอบสนองของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ปัจจัย C ที่ระดับ k ปัจจัย D ที่ระดับ l และปัจจัย E ที่ระดับ m

μ คือ ผลเฉลี่ยรวม (Grand Mean)

τ_i คือ ผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับที่ i

β_j คือ ผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j

γ_k คือ ผลกระทบของปัจจัย C ที่ระดับที่ k

δ_l คือ ผลกระทบของปัจจัย D ที่ระดับที่ l

α_m คือ ผลกระทบของปัจจัย E ที่ระดับที่ m

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย B ที่ระดับที่ j

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย C ที่ระดับที่ k

$(\tau\delta)_{il}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย D ที่ระดับที่ l

$(\tau\alpha)_{im}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย E ที่ระดับที่ m

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับที่ j และปัจจัย C ที่ระดับที่ k

$(\beta\delta)_{jl}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับที่ j และปัจจัย D ที่ระดับที่ l

$(\beta\alpha)_{jm}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับที่ j และปัจจัย E ที่ระดับที่ m

$(\gamma\delta)_{kl}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย C ที่ระดับที่ k และปัจจัย D ที่ระดับที่ l

$(\gamma\alpha)_{km}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย C ที่ระดับที่ k และปัจจัย E ที่ระดับที่ m

$(\delta\alpha)_{lm}$ คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัย D ที่ระดับที่ l และปัจจัย E ที่ระดับที่ m

θ_n คือ ผลกระทบที่เกิดจากบล็อกที่ n

ε_{ijklmn} คือ ค่าผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ปัจจัย C ที่ระดับ k ปัจจัย D ที่ระดับ l ปัจจัย E ที่ระดับ m และบล็อกที่ n

1.2 สมมติฐานการทดลอง

การวิเคราะห์แผนการทดลองเซ็นทรัลคอม โพลิต ผู้วิจัยได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) และตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

1.2.1 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก (Test of Main Factors) รูปทั่วไปของสมมติฐานที่ทดสอบคือ

H_0 : ปัจจัยหลัก ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อผลตอบสนอง

โดยปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$

1.2.2 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม (Test of Interaction Factors) รูปทั่วไปของสมมติฐานที่ทดสอบคือ

H_0 : ปัจจัยร่วม ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อผลตอบสนอง

โดยปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$

2. การวิเคราะห์แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

เป็นการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน โดยรูปแบบของสมการเป็นแบบเต็มรูปสำหรับใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ และวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับใช้ทำนายผลตอบสนอง ซึ่งการวิเคราะห์แผนการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยตัวแปรเข้ารหัส (Coded) โดยผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ตามผลตอบสนองทั้ง 3 ชนิดดังนี้

2.1 การวิเคราะห์สำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

2.1.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์

หลังจากทดลองและบันทึกผลการทดลอง ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการด้วยโปรแกรม Minitab

ตารางที่ 5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

พจน์ (Term)	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)	ค่าผิดพลาดมาตรฐานของ สัมประสิทธิ์ (SE Coefficient)	ค่า T-Test	ค่า P-value
Constant	4.87865	0.004356	1120.95	0.000
Block	0.00034	0.002141	0.159	0.876
A	0.00092	0.002367	0.387	0.706
B	-0.00175	0.002367	-0.736	0.475
C	0.00067	0.002367	0.282	0.783
D	-0.00233	0.002367	-0.986	0.345
E	0.01042	0.002367	4.400	0.001
A*A	-0.00011	0.002110	-0.52	0.959
B*B	-0.00086	0.002110	-0.408	0.691
C*C	-0.00211	0.002110	-1.000	0.339
D*D	-0.00024	0.002110	-0.112	0.913
E*E	0.00226	0.002110	1.074	0.306
A*B	-0.00438	0.002899	-1.509	0.159
A*C	0.00400	0.002899	1.380	0.195
A*D	-0.00162	0.002899	-0.560	0.586
A*E	0.00350	0.002899	1.207	0.253
B*C	-0.00325	0.002899	-1.121	0.286
B*D	-0.00162	0.002899	-0.506	0.586
B*E	0.00100	0.002899	0.345	0.737
C*D	0.00350	0.002899	1.207	0.253
C*E	0.00062	0.002899	0.216	0.833
D*E	-0.00275	0.002899	-0.948	0.363
S = 0.011597 R ² = 75.36% R ² (adj.) = 28.31%				

จากตารางที่ 5 ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีเพียง 1 ปัจจัยคือปัจจัย E เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
Block	0.000003	1	0.000003	0.03	0.876
Regression	0.004521	20	0.000226	1.68	0.189
Linear	(0.002839)	(5)	(0.000568)	(4.22)	(0.022)
Square	(0.000331)	(5)	(0.000066)	(0.49)	(0.776)
Interaction	(0.001480)	(10)	(0.000135)	(1.00)	(0.493)
Residual Error	0.001069	11	0.000135		
Lack of Fit	(0.000411)	(6)	(0.000178)	2.17	0.207
Pure Error	(0.000411)	(5)	(0.000082)		
Total	0.006004	32			

2.1.2 การทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอย

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติเกี่ยวกับค่าผิดพลาดทั้ง 4 ข้อเสมอ คือ (i) ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ (ii) ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์ (iii) ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่ และ (iv) ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน โดยการทดสอบข้อสมมติใช้กราฟที่แตกต่างดังนี้

1. กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (ภาพที่ 14 ก - 16 ก) ใช้ทดสอบข้อสมมติที่ (i) ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงแสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ หรือใช้กราฟฮิสโตแกรม (ภาพที่ 14 ค - 16 ค) ทดสอบข้อสมมติที่ (i) ได้ ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำแบบสมมาตรแสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ หรือใช้การทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธี Anderson-Darling Test โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ

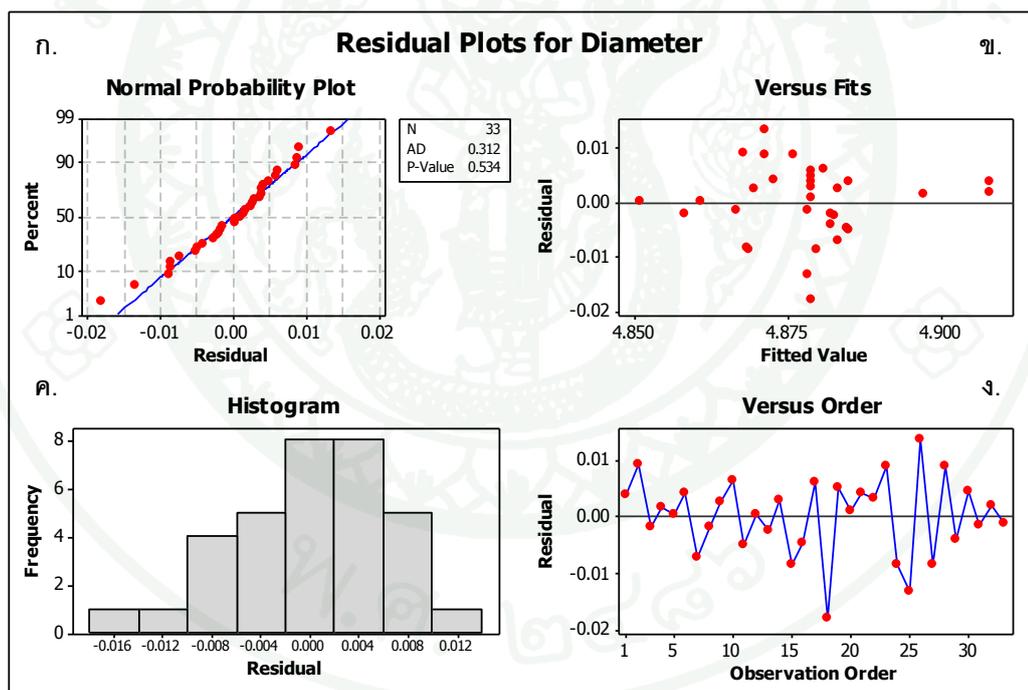
H_1 : ค่าผิดพลาดไม่มีการแจกแจงปกติ

โดยปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่า P-value < 0.05

2. กราฟของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ผลตอบสนอง (ภาพที่ 14 ข - 16 ข) ใช้ทดสอบข้อสมมติที่ (ii) และ (iii) หรือไม่ โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์อย่างสมดุล) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวนคงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่ม แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาดซึ่งเป็นการตรวจสอบข้อสมมติที่ (iv)

3. กราฟของค่าความผิดพลาดกับลำดับที่ของการทดลอง (ภาพที่ 14 ง - 16 ง) ใช้ในพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาด ถ้ายังมีรูปแบบความสัมพันธ์ แสดงว่าสมการถดถอยที่ใช้มีรูปแบบ (Form of Model) ไม่เหมาะสม

ดังนั้นการทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอยสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 4 ข้อ แสดงได้ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การตรวจสอบค่าผิดพลาดสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (ภาพที่ 14 ก) มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจากการทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธี Anderson-Darling Test ได้เท่ากับ 0.312 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.534 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้

ดังนั้นจึงสรุปว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฮิสโตแกรม (ภาพที่ 14 ค) ที่มีแนวโน้มว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงสมมาตร

จากภาพที่ 14 ข และ 14 ง พบว่าค่าผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่มรอบศูนย์ อย่างสมดุล และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนของค่าผิดพลาดมีค่าคงที่ และค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวอย่างสุ่มและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

2.1.3 การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

หลังจากประมาณค่าสัมประสิทธิ์ และทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอยแล้ว ก่อนที่จะนำสมการไปใช้ต้องทดสอบความเหมาะสมของสมการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการมาใช้ ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ประไพศรีและพงษ์ชนัน (2551) กล่าวว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ ค่า R^2 เป็นค่าที่อธิบายเปอร์เซ็นต์ (%) การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง ที่สามารถอธิบายได้ด้วย สมการถดถอยที่ประมาณขึ้น แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ ค่า R^2 มีเพิ่มขึ้นทั้งที่ตัวแปรที่เพิ่มเข้าไปไม่มีผลต่อ ผลตอบสนอง ดังนั้นจึงใช้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน เนื่องจากเมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระที่ ไม่มีผลต่อผลตอบสนองเข้าไปในสมการถดถอยแล้ว ค่า R^2_{adj} แทนที่มีค่าเพิ่มขึ้นแต่กลับมีค่าลดลง ดังนั้นการใช้ค่า R^2_{adj} จึงเหมาะสมกว่าการใช้ค่า R^2 ในการวิเคราะห์สมการถดถอย เนื่องจากการ หา % การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองด้วยตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองนั้นจริงๆ

ประไพศรีและพงษ์ชนัน (2551) กล่าวว่า การทดสอบการขาดความเหมาะสม ของสมการทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่า x ซ้ำ แต่ผลลัพธ์ของผลตอบสนองที่ได้แตกต่างกัน ซึ่งมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

H_0 : สมการถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : สมการถดถอยขาดความเหมาะสม

โดยปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$

จากตารางที่ 5 ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 28.31% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ 28.31 % และจากตารางที่ 6 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.207 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้ แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อน ค่า R^2_{adj} และ Lack of Fit ไม่ได้นำมาใช้ในการพิจารณา เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตแกนกระทู้กลัดซ์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer หลังจากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab สมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ

$$\begin{aligned} \text{Diameter} = & 4.87899 + 0.00092A - 0.00175B + 0.00067C - 0.00233D + \\ & 0.01042E - 0.00011A^2 - 0.00086B^2 - 0.00211C^2 - 0.00024D^2 + 0.00226E^2 - 0.00438AB + \\ & 0.00400AC - 0.00162AD + 0.00350AE - 0.00325BC - 0.00162BD + 0.00100BE + 0.00350CD + \\ & 0.00062CE - 0.00275DE \end{aligned} \quad (12)$$

โดยที่ - $2 \leq A$ (ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ) ≤ 2

- $2 \leq B$ (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ) ≤ 2

- $2 \leq C$ (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ) ≤ 2

- $2 \leq D$ (ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด) ≤ 2

- $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

2.1.4 การวิเคราะห์สมการพหุคูณ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสมการถดถอยสำหรับทำนายผลตอบสนองของกระบวนการผลิตแกนกระทู้กลัดซ์ โดยใช้วิธี Stepwise Selection โดยที่ ประไพศรีและพงษ์ชนัน (2551) กล่าวว่า วิธี Stepwise Selection เป็นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไป เนื่องจากอาศัยหลักการของวิธี Forward Selection และ Backward Elimination คู่กัน (Conditional-t test และ Marginal-t test) โดย

ทุกครั้ง que เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าไปในสมการจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระเดิมในสมการสามารถอยู่ในสมการได้ หรือควรตัดออกไป

การวิเคราะห์สมการพหุคูณสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง ผู้วิจัยได้พิจารณาจากปัจจัยควบคุมทั้ง 5 คือ A B C D และ E และปัจจัยรบกวนอีก 1 ปัจจัย คือ Block โดยใช้วิธี Stepwise Selection และได้กำหนดค่า α Enter และ α Remove เท่ากับ 0.05 (α Enter คือระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Conditional-t test และ α Remove คือระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Marginal-t test) ดังภาพที่ 15

Stepwise Regression: Diameter versus Blocks, A, B, C, D, E	
Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05	
Response is Diameter on 6 predictors, with N = 33	
Step	1
Constant	4.878
E	0.0104
T-Value	4.87
P-Value	0.000
S	0.0105
R-Sq	43.37
R-Sq(adj)	41.55
Mallows Cp	-1.0

ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพที่ 15 จากการวิเคราะห์ด้วย Stepwise Selection ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองคือ ปัจจัย E (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ดังนั้นสมการพหุคูณสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ

$$\text{Diameter} = 4.878 + 0.0104E \quad (13)$$

โดยที่ - $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

เนื่องจากสมการที่ 13 เป็นการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรเข้ารหัส เพื่อให้ง่ายแก่การนำสมการพยากรณ์ไปใช้งานในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ด้วยตัวแปรธรรมชาติหรือตัวแปรที่แท้จริง (Unicode) ได้ดังสมการที่ 14

$$\text{Diameter} = 4.854 + 0.174E \quad (14)$$

โดยที่ $0.02 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 0.26

ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 41.55% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ 41.55% ซึ่งเห็นได้ว่า ค่า R^2_{adj} ของสมการพยากรณ์มากกว่าสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน เนื่องจากมีเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองอยู่ในสมการเท่านั้น

2.2 การวิเคราะห์สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว

2.2.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์

หลังจากทดลองและบันทึกผลการทดลอง ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการ

ตารางที่ 7 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว

พจน์ (Term)	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)	ค่าผิดพลาดมาตรฐานของ สัมประสิทธิ์ (SE Coefficient)	ค่า T-Test	ค่า P-value
Constant	4.42736	0.4421	10.015	0.000
Block	-0.61432	0.2173	-2.827	0.016
A	-0.08650	0.2403	-0.360	0.726
B	-0.22350	0.2403	-0.930	0.372
C	-0.08233	0.2403	-0.343	0.738
D	0.14417	0.2403	0.600	0.561

ตารางที่ 7 (ต่อ)

พจน์ (Term)	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)	ค่าผิดพลาดมาตรฐานของ สัมประสิทธิ์ (SE Coefficient)	ค่า T-Test	ค่า P-value
E	1.69217	0.2403	7.043	0.000
A*A	0.00221	0.2141	0.010	0.992
B*B	-0.32391	0.2141	-1.513	0.159
C*C	-0.16254	0.2141	-0.759	0.464
D*D	0.29309	0.2141	1.369	0.198
E*E	0.41846	0.2141	1.954	0.077
A*B	0.18025	0.2943	0.613	0.553
A*C	-0.14938	0.2943	-0.508	0.622
A*D	0.01250	0.2943	0.042	0.967
A*E	-0.14813	0.2943	-0.503	0.625
B*C	0.07200	0.2943	0.245	0.811
B*D	-0.02187	0.2943	-0.074	0.942
B*E	0.11950	0.2943	0.406	0.692
C*D	0.31100	0.2943	1.057	0.313
C*E	-0.03913	0.2943	-0.133	0.897
D*E	-0.05700	0.2943	-0.194	0.850
S = 1.17708	$R^2 = 86.48\%$	$R^2(\text{adj.}) = 60.07\%$		

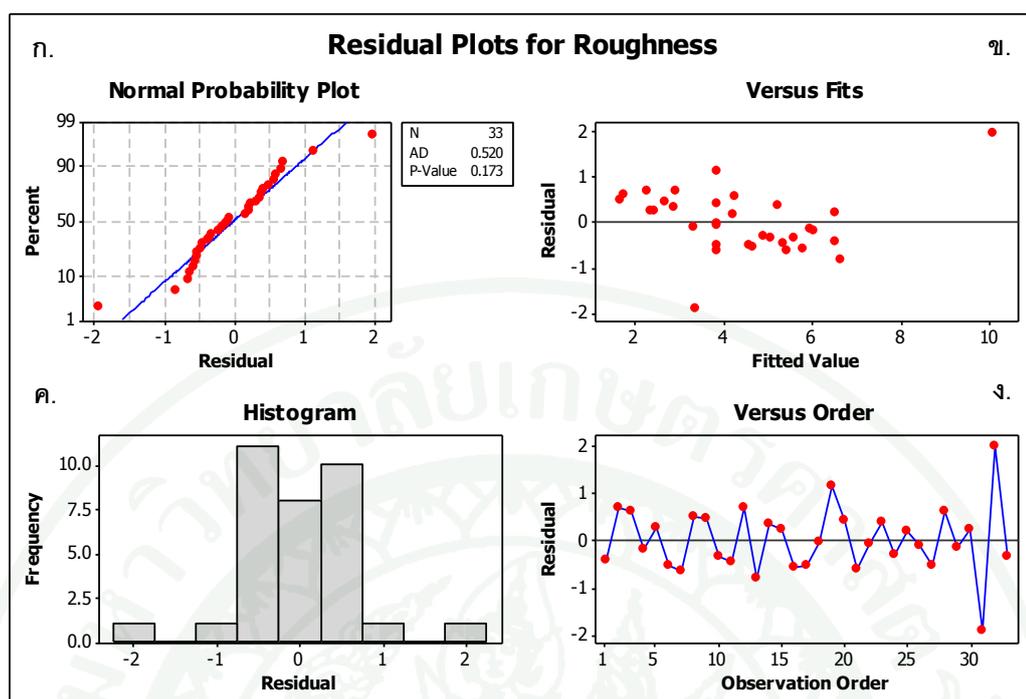
จากตารางที่ 7 ปัจจัยที่มีผลต่อความหายาบผิวมี 3 ปัจจัยคือปัจจัย Block E และ E*E เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 0.05

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองความหายาผิว

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
Block	11.070	1	11.0700	7.99	0.016
Regression	56.416	20	4.3208	3.12	0.028
Linear	(70.762)	(5)	(14.1524)	(10.21)	(0.001)
Square	(12.480)	(5)	(2.4960)	(1.80)	(0.193)
Interaction	(3.174)	(10)	(0.3174)	(0.23)	(0.986)
Residual Error	15.241	11	1.3855		
Lack of Fit	(13.118)	(6)	(2.1863)	5.15	0.046
Pure Error	(2.123)	(5)	(0.4245)		
Total	112.727	32			

2.2.2 การทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอย

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติเกี่ยวกับค่าผิดพลาดทั้ง 4 ข้อเสมอ คือค่าผิดพลาดต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่ และค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน โดยการทดสอบข้อสมมติใช้กราฟที่แตกต่างในการทดสอบดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การตรวจสอบค่าผิดพลาดสำหรับความหยาบผิว

กราฟความน่าจะเป็นจะเป็นการแจกแจงปกติ (ภาพที่ 16 ก) มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจากการทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธี Anderson-Darling Test ได้เท่ากับ 0.520 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.173 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฮิสโตแกรม (ภาพที่ 16 ค) ที่มีแนวโน้มว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงสมมาตร

จากภาพที่ 16 ข และ 16 ง พบว่าค่าผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่มรอบศูนย์อย่างสมดุล และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนของค่าผิดพลาดมีค่าคงที่ และค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวอย่างสุ่มและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

2.2.3 การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

หลังจากประมาณค่าสัมประสิทธิ์ และทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอยแล้ว ก่อนที่จะนำสมการไปใช้ต้องทดสอบความเหมาะสมของสมการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การ

วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการมาใช้ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

จากตารางที่ 7 ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 60.67% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว ได้ 60.67% และจากตารางที่ 8 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.046 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0.05 มาก เนื่องจากถ้าผู้วิจัยทำการปิดเป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง ก็จะเท่ากับ 0.05 หรือถ้ากำหนดความเชื่อมั่นที่ 99% ($\alpha=0.01$) ก็จะมากกว่า 0.05 ทำให้ผู้วิจัยสรุปได้ว่าไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสมแล้ว

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 12 ค่า R^2_{adj} และ Lack of Fit ไม่ได้นำมาใช้ในการพิจารณา ดังนั้นสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนสำหรับผลตอบแทนของความหยาบผิว คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface Roughness} = & 3.8130 - 0.0865A - 0.2235B - 0.0823C + 0.14417D + \\ & 1.69217E + 0.0022A^2 - 0.32391B^2 - 0.1625C^2 + 0.2931D^2 + 0.4185E^2 + 0.1802AB - 0.1494AC + \\ & 0.0125AD - 0.1481AE + 0.072BC - 0.0218BD + 0.1195BE + 0.3110CD - 0.0391CE - \\ & 0.0570DE \end{aligned} \quad (15)$$

- โดยที่ - $2 \leq A$ (ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ) ≤ 2
 - $2 \leq B$ (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ) ≤ 2
 - $2 \leq C$ (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ) ≤ 2
 - $2 \leq D$ (ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด) ≤ 2
 - $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

2.2.4 การวิเคราะห์สมการพหุคูณ

การวิเคราะห์สมการพหุคูณสำหรับผลตอบแทนของความหยาบผิว ผู้วิจัยได้พิจารณาจากปัจจัยควบคุมทั้ง 5 คือ A B C D และ E และปัจจัยรบกวนอีก 1 ปัจจัย คือ Block โดยใช้วิธี Stepwise Selection และได้กำหนดค่า α Enter และ α Remove เท่ากับ 0.05 (α Enter คือ

ระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Conditional-t test และ α Remove คือระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Marginal-t test) ดังภาพที่ 17

Stepwise Regression: Roughness versus Blocks, A, B, C, D, E		
Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is Roughness on 6 predictors, with N = 33		
Step	1	2
Constant	4.388	2.750
E	1.69	1.69
T-Value	6.96	7.91
P-Value	0.000	0.000
Blocks		1.23
T-Value		3.18
P-Value		0.003
S	1.19	1.05
R-Sq	60.96	70.78
R-Sq (adj)	59.70	68.84
Mallows Cp	8.0	0.7

ภาพที่ 17 การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว

จากภาพที่ 17 จากการวิเคราะห์ด้วย Stepwise Selection ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองคือ ปัจจัย E (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) และ Block (ปัจจัยรบกวนหรือความลึกหรือของเม็ดมีด) ดังนั้นสมการพยากรณ์สำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface Roughness} &= 2.75 + 1.23 + 1.69E \\ &= 3.98 + 1.69E \end{aligned} \quad (16)$$

โดยที่ - $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

เนื่องจากสมการที่ 16 เป็นการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรเข้ารหัส เพื่อให้ง่ายแก่การนำสมการพยากรณ์ไปใช้งานในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ด้วยตัวแปรธรรมชาติหรือตัวแปรที่แท้จริงได้ดังสมการที่ 17

$$\text{Surface Roughness} = 0.0313 + 28.2E \quad (17)$$

โดยที่ $0.02 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 0.26

ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 68.84% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความหยาดหิว ได้ 68.84% ซึ่งเห็นได้ว่า ค่า R^2_{adj} ของสมการพยากรณ์มากกว่าสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นที่ผิวสะท้อน เนื่องจากมีเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองอยู่ในสมการเท่านั้น

2.3 การวิเคราะห์สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต

2.3.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์

หลังจากทดลองและบันทึกผลการทดลอง ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการ

ตารางที่ 9 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต

พจน์ (Term)	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)	ค่าผิดพลาดมาตรฐานของ สัมประสิทธิ์ (SE Coefficient)	ค่า T-Test	ค่า P-value
Constant	36.3463	5.151	7.057	0.000
Block	-3.0682	2.532	-1.212	0.251
A	-1.9583	2.799	-0.700	0.499
B	-6.1250	2.799	-2.188	0.051
C	-5.8750	2.799	-2.099	0.060
D	-1.4583	2.799	-0.521	0.613
E	-9.7083	2.799	-3.468	0.005
A*A	-1.2390	2.495	-0.497	0.629
B*B	3.6360	2.495	1.457	0.173
C*C	3.3860	2.495	1.357	0.202
D*D	-0.9890	2.495	-0.396	0.699
E*E	6.7610	2.495	2.710	0.020
A*B	-0.3125	3.429	-0.091	0.929
A*C	0.3125	3.429	0.091	0.929

ตารางที่ 9 (ต่อ)

พจน์ (Term)	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)	ค่าผิดพลาดมาตรฐานของ สัมประสิทธิ์ (SE Coefficient)	ค่า T-Test	ค่า P-value
A*D	-0.9375	3.429	-0.273	0.790
A*E	-0.5625	3.429	-0.164	0.873
B*C	3.6875	3.429	1.075	0.305
B*D	1.1875	3.429	0.346	0.736
B*E	2.0625	3.429	0.602	0.560
C*D	-0.1875	3.429	-0.055	0.957
C*E	-1.0625	3.429	-0.310	0.762
D*E	0.6875	3.429	0.201	0.845
S = 13.7146 R ² = 76.95% R ² (adj.) = 32.93%				

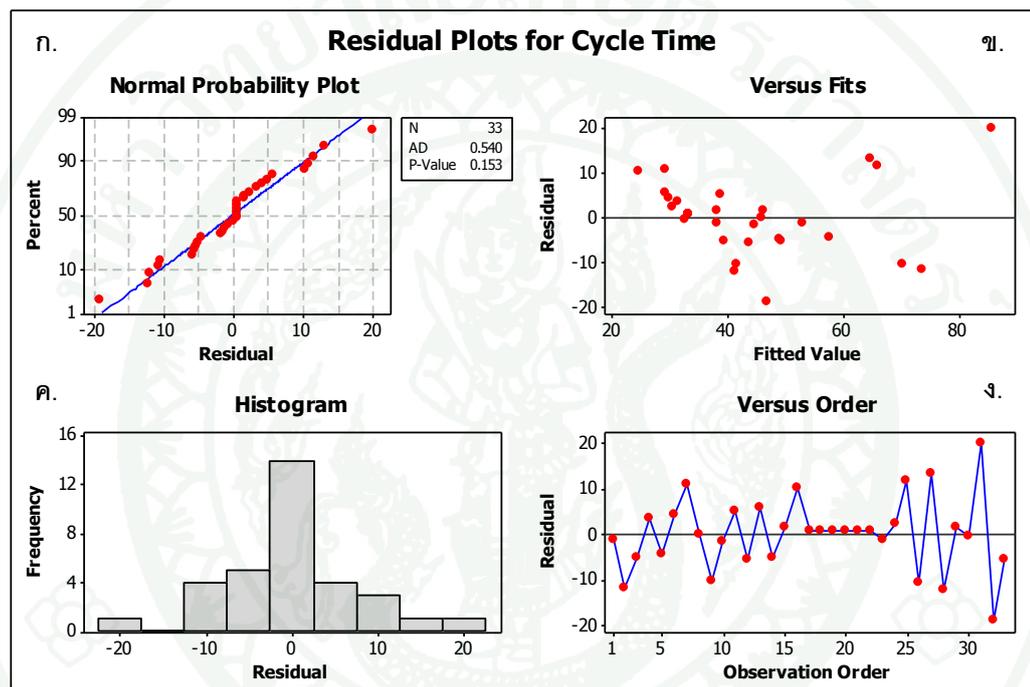
จากตารางที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาผลิตมี 4 ปัจจัยคือปัจจัย B C E และ E*E เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 0.05

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
Block	276.14	1	276.136	1.47	0.251
Regression	6629.42	20	331.471	1.76	0.167
Linear	(4133.88)	(5)	(826.775)	(4.40)	(0.019)
Square	(2138.92)	(5)	(427.785)	(2.27)	(0.119)
Interaction	(356.63)	(10)	(35.663)	(0.19)	(0.993)
Residual Error	2068.98	11	188.090		
Lack of Fit	(2068.98)	(6)	(344.831)	-	-
Pure Error	(0.00)	(5)	(0.000)		
Total	8974.55	32			

2.3.2 การทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอย

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติเกี่ยวกับค่าผิดพลาดทั้ง 4 ข้อเสมอ คือค่าผิดพลาดต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่ และค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน โดยการทดสอบข้อสมมติใช้กราฟที่แตกต่างในการทดสอบดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต

กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (ภาพที่ 18 ก) มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจากการทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธี Anderson-Darling Test ได้เท่ากับ 0.540 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.153 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฮิสโตแกรม (ภาพที่ 18 ค) ที่มีแนวโน้มว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงสมมาตร

จากภาพที่ 18 ข – 18 ง พบว่าค่าผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่มรอบศูนย์อย่างสมมูล และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนของค่า

ผิดพลาดมีค่าคงที่ และค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวอย่างสุ่มและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

2.3.3 การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

หลังจากประมาณค่าสัมประสิทธิ์ และทดสอบข้อสมมติของสมการถดถอยแล้ว ก่อนที่จะนำสมการไปใช้ต้องทดสอบความเหมาะสมของสมการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการมาใช้ ทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

จากตารางที่ 9 ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 32.93% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของรอบเวลาผลิต ได้ถึง 32.93% และจากตารางที่ 10 ค่า P-value ของ Lack of Fit ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากการทดลองในงานวิจัยนี้ทำการทดลองกับ เครื่องกลึงอัตโนมัติทำให้เมื่อทดลองในแต่ละระดับ รอบเวลาผลิตมีค่าคงที่เสมอไม่ว่าทดลองซ้ำกี่ครั้งก็ตาม ดังนั้นการทดสอบ Lack of Fit สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิตจึงหาค่าไม่ได้

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 12 ค่า R^2_{adj} และ Lack of Fit ไม่ได้ นำมาใช้ในการพิจารณา ดังนั้นสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนสำหรับ ผลตอบสนองรอบเวลาผลิต คือ

$$\begin{aligned} \text{Cycle Time} = & 33.28 - 1.96A - 6.12B - 5.87C - 1.46D - 9.71E - 1.24A^2 + \\ & 3.64B^2 + 3.39C^2 - 0.99D^2 + 6.76E^2 - 0.31AB + 0.31AC - 0.94AD - 0.56AE + 3.69BC + 1.19BD \\ & + 2.06BE - 0.19CD - 1.06CE + 0.69DE \end{aligned} \quad (18)$$

- โดยที่ - $2 \leq A$ (ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ) ≤ 2
- $2 \leq B$ (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ) ≤ 2
- $2 \leq C$ (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ) ≤ 2
- $2 \leq D$ (ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด) ≤ 2
- $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

2.3.4 การวิเคราะห์สมการพหุคูณ

การวิเคราะห์สมการพหุคูณสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต ผู้วิจัยได้พิจารณาจากปัจจัยควบคุมทั้ง 5 คือ A B C D และ E และปัจจัยรบกวนอีก 1 ปัจจัย คือ Block โดยใช้วิธี Stepwise Selection และได้กำหนดค่า α Enter และ α Remove เท่ากับ 0.05 (α Enter คือระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Conditional-t test และ α Remove คือระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์แบบ Marginal-t test) ดังภาพที่ 19

Stepwise Regression: Cycle Time versus Blocks, A, B, C, D, E				
Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05				
Response is Cycle Time on 6 predictors, with N = 33				
Step	1	2	3	
Constant	43.73	43.73	43.73	
E	-9.7	-9.7	-9.7	
T-Value	-3.23	-3.42	-3.63	
P-Value	0.003	0.002	0.001	
B		-6.1	-6.1	
T-Value		-2.16	-2.29	
P-Value		0.039	0.030	
C			-5.9	
T-Value			-2.20	
P-Value			0.036	
S	14.7	13.9	13.1	
R-Sq	25.21	35.24	44.47	
R-Sq(adj)	22.79	30.92	38.72	
Mallows Cp	9.2	6.1	3.4	

ภาพที่ 19 การวิเคราะห์ Stepwise Selection สำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิต

จากภาพที่ 19 จากการวิเคราะห์ด้วย Stepwise Selection ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองคือ ปัจจัย B (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ) C (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ) และ E (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ดังนั้นสมการพหุคูณสำหรับผลตอบสนองรอบเวลาผลิตคือ

$$\text{Cycle Time} = 43.73 - 6.1B - 5.9C - 9.7E \quad (19)$$

- โดยที่ - $2 \leq B$ (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ) ≤ 2
- $2 \leq C$ (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ) ≤ 2
- $2 \leq E$ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด) ≤ 2

เนื่องจากสมการที่ 19 เป็นการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรเข้ารหัส เพื่อให้ง่ายแก่การนำสมการพยากรณ์ไปใช้งานในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ด้วยตัวแปรธรรมชาติหรือตัวแปรที่แท้จริงได้ดังสมการที่ 20

$$\text{Cycle Time} = 94.38 - 20.4B - 19.6C - 162E \quad (20)$$

โดยที่

$$0.1 \leq B \text{ (อัตราป้อนของการกลึงหยาบ)} \leq 0.1$$

$$0.1 \leq C \text{ (ความลึกตัดของการกลึงหยาบ)} \leq 0.1$$

$$0.02 \leq E \text{ (อัตราป้อนของการกลึงละเอียด)} \leq 0.26$$

ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 38.72% หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของรอบเวลาผลิต ได้ 38.72% ซึ่งเห็นได้ว่า ค่า R^2_{adj} ของสมการพยากรณ์มากกว่าสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน เนื่องจากมีเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลตอบสนองอยู่ในสมการเท่านั้น

3. การเลือกสถานะที่เหมาะสมในการผลิต

หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลองจากแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต ผู้วิจัยได้นำสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน ไปหาสถานะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้กำหนดค่าน้ำหนักของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหยาบผิว และรอบเวลาผลิต เท่ากับ 1 เนื่องจากว่าต้องการให้ความสำคัญที่ค่าเป้าหมายเท่ากับค่าขอบเขต และระบุความสำคัญของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบผิวเท่ากับ 10 เนื่องจากเป็นผลตอบสนองที่เป็นลักษณะทางคุณภาพสำคัญที่ต้องการปรับปรุงค่ามากที่สุด และระบุความสำคัญของรอบเวลาผลิตเท่ากับ 1 เนื่องจากเป็นผลตอบสนองที่เป็นเป้าหมายรอง การนำรอบเวลาผลิตมาวิเคราะห์เนื่องจากต้องการปรับปรุงลักษณะทางคุณภาพทั้งสองโดยที่ไม่กระทบต่อกำลังการผลิต ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์ รอบเวลาผลิตมีค่าลดลงก็เป็นผลพลอยได้ของงานวิจัยนี้ สรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพของโรงงาน

ผลตอบสนอง	หน่วย	เป้า	ขอบ	ค่าเป้า	ขอบ	น้ำ	ความ
		หมาย	เขตล่าง	หมาย	เขตบน	หนัก	สำคัญ
เส้นผ่านศูนย์กลาง	มิลลิเมตร	Target	4.855	4.8725	4.89	1	10
ความหยาบผิว	ไมโครเมตร	Minimize	-	2.5	3.5	1	10
รอบเวลาผลิต	วินาที	Minimize	-	40	45	1	1

หลังจากป้อนค่าดังตารางที่ 11 ในฟังก์ชัน Response Optimizer แล้ว โปรแกรมได้คำนวณหาค่าที่เหมาะสม โดยวิธีการลดพื้นที่ด้วยจุดเริ่มต้นหลายๆ จุด เพื่อให้ได้ค่าความพึงพอใจรวมสูงสุด และเพื่อหาชุดคำตอบที่เหมาะสมต่อไป

ฟังก์ชัน Response Optimizer ได้คำนวณหาค่าที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน และได้แสดงชุดคำตอบที่ได้ทั้งหมด (Local Solution) ดังตารางภาคผนวกที่ ค1 ซึ่งชุดคำตอบที่ได้ทั้งหมดนี้อยู่ในรูปของตัวแปรเข้ารหัส ดังนั้นก่อนที่จะนำไปตั้งค่าจริง ต้องแปลงเป็นตัวแปรถอดรหัสหรือตัวแปรธรรมชาติก่อน โดย

ตัวแปรธรรมชาติของความเร็รรอบของการกลิ้งหยาบ (ξ_A) คือ

$$\xi_A = (A * 750) + 3,750 \quad (21)$$

ตัวแปรธรรมชาติของอัตราป้อนของการกลิ้งหยาบ (ξ_B) คือ

$$\xi_B = (B * 0.3) + 0.7 \quad (22)$$

ตัวแปรธรรมชาติของความลึกตัดของการกลิ้งหยาบ (ξ_C) คือ

$$\xi_C = (C * 0.3) + 0.7 \quad (23)$$

ตัวแปรธรรมชาติของความเร็วยรอบของการกลิ้งละเอียด (ξ_D) คือ

$$\xi_D = (D * 750) + 3,750 \quad (24)$$

ตัวแปรธรรมชาติของอัตราป้อนของการกลิ้งละเอียด (ξ_E) คือ

$$\xi_E = (E * 0.06) + 0.14 \quad (25)$$

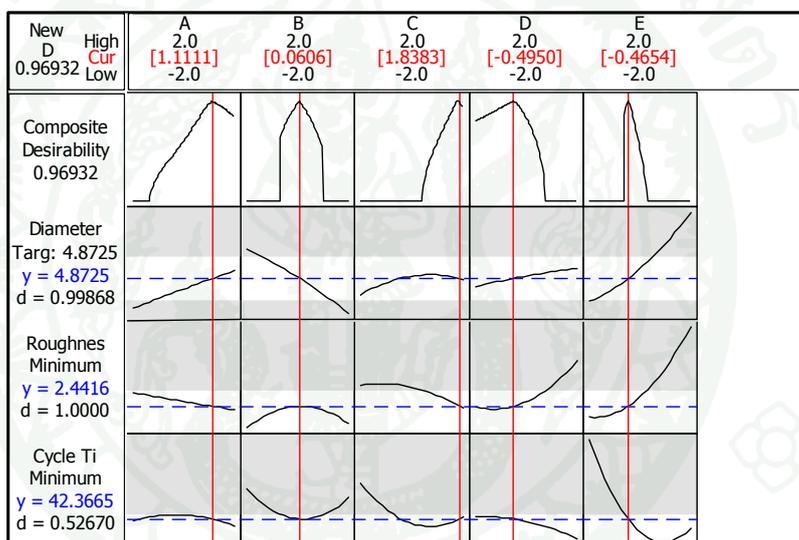
หลังจากแปลงชุดคำตอบที่ได้ทั้งหมดจากตัวแปรเข้ารหัสเป็นตัวแปรธรรมชาติ ผู้วิจัยได้นำชุดคำตอบที่ได้ทั้งหมดมาเรียงค่าฟังก์ชันจากมากไปหาน้อย ดังตารางที่ 12 ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกให้โรงงานเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับนำไปตั้งค่าเครื่องกลิ้งอัตโนมัติได้จริง และเพื่อให้การยืนยันผลเป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ

ตารางที่ 12 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer

ทางเลือก	ปัจจัยควบคุม					ผลตอบสนอง			ค่าความพึงพอใจรวม
	A	B	C	D	E	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความหยาบผิว	รอบเวลาผลิต	
1	5,005	0.75	1.30	2,250	0.12	4.8725	2.19	40	1.00
2	2,314	1.21	0.95	3,754	0.13	4.8725	2.50	40	0.99
3	5,250	1.06	1.30	2,765	0.15	4.8721	2.52	35	0.98
4	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8725	2.44	42	0.97
5	2,897	1.30	0.50	5,250	0.12	4.8728	2.56	42	0.93
6	3,992	1.18	0.42	2,947	0.10	4.8724	2.60	43	0.89
7	3,598	1.18	0.25	4,131	0.14	4.8725	2.50	44	0.88

เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพและสามารถใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ โรงงานได้เลือกทางเลือกที่ 4 สำหรับนำไปตั้งค่าโดยมีเหตุผลอยู่ 2 ประการคือ ประการแรกความเร็วยรอบ (ปัจจัย A และ D) ไม่สามารถตั้งค่าสูงกว่า 5,000 รอบต่อนาทีได้ เนื่องจากทำให้เครื่องกลิ้งอัตโนมัติเกิดการสั่นสะเทือนเป็นผลให้กระบวนการกลิ้งขาดความแม่นยำ สาเหตุที่ผู้วิจัยไม่ได้กำหนดระดับที่ใช้ใน

การทดลองเริ่มแรกของปัจจัย A ให้มีค่าไม่เกิน 5,000 รอบต่อนาที เนื่องจากระดับของปัจจัยที่โรงงานใช้อยู่ปัจจุบันได้กำหนดจากประสบการณ์และความชำนาญของหัวหน้าแผนกซึ่งไม่ทราบว่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบันเป็นสภาวะที่เหมาะสมหรือไม่ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์หาคำตอบจากพื้นผิวสะท้อนที่ถูกสร้างด้วยสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน (สมการที่ 12 15 และ 18) ได้ครอบคลุมทุกค่า ผู้วิจัยจึงต้องกำหนดระดับของปัจจัยให้ครอบคลุมทุกค่าเท่าที่เป็นไปได้ในการผลิต ซึ่งระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองนี้ได้ร่วมกำหนดจากผู้วิจัยและหัวหน้าแผนกแมชชีนนิ่ง และประการที่สองอัตราป้อนของการกลึงหยาบ (ปัจจัย B) มีค่าที่ไม่สูงมากนักเนื่องจากถ้าอัตราป้อนของการกลึงหยาบสูงเป็นผลให้เมื่อดีเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว ต้นทุนการผลิตก็จะสูงขึ้นตามเช่นกัน



ภาพที่ 20 Optimization Plot ที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแกนกระทุ้งคลัตช์กรณีวิเคราะห์ด้วยสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนเมื่อแปลงเป็นตัวแปรธรรมชาติแล้วคือ ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ (A) เท่ากับ 4,583 รอบต่อนาที อัตราป้อนของการกลึงหยาบ (B) เท่ากับ 0.72 มิลลิเมตรต่อ นาที ความลึกตัดของการกลึงหยาบ (C) เท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด (D) เท่ากับ 3,379 รอบต่อนาที และอัตราป้อนของการกลึงละเอียด (E) เท่ากับ 0.11 มิลลิเมตรต่อ นาที

4. การยืนยันผลการทดลอง

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์แผนการทดลองเช่น ทรัสคอมโพสิต ไปทดลองกับกระบวนการผลิตจริง โดยเก็บตัวอย่างการทดลองทั้งหมด 2 รอบ ๆ ละ 10 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 20 ตัวอย่าง แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ง1 – ง2

4.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

นำค่าที่ได้จากการทดลองยืนยันผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยวิธีทางสถิติ โดยข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติต่างๆ ของผลก่อนและหลังปรับปรุง

ค่าสถิติต่างๆ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
เส้นผ่านศูนย์กลาง		
ค่าเฉลี่ย	4.8821	4.8782
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0038	0.0021
จำนวนข้อมูล	10	20
ความหนาผิว		
ค่าเฉลี่ย	3.59	2.71
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.59	0.58
จำนวนข้อมูล	10	20

4.1.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง

ก. การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุงว่ามีค่ามากกว่า 4.8725 มิลลิเมตรหรือไม่ สถิติที่ใช้ทดสอบคือ การแจกแจงแบบที (T-Distribution) กรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีสมมติฐานคือ

$$H_0: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = 4.8725 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$H_1: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} > 4.8725 \text{ มิลลิเมตร}$$

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุง

แหล่งที่มา	จำนวน ข้อมูล	ค่า เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด มาตรฐาน	ค่า T	ค่า P-value
เส้นผ่านศูนย์กลาง	10	4.88210	0.00381	0.00121	7.96	0.000
องศาเสรี (d.f.) = 9						

จากตารางที่ 14 ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุงมีค่ามากกว่า 4.8725 มิลลิเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ข. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุงว่ามีค่ามากกว่า 4.8725 มิลลิเมตรหรือไม่ สถิติที่ใช้ทดสอบคือการแจกแจงแบบที กรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$H_0: \mu_{\text{หลังปรับปรุง}} = 4.8725 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$H_1: \mu_{\text{หลังปรับปรุง}} > 4.8725 \text{ มิลลิเมตร}$$

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุง

แหล่งที่มา	จำนวน ข้อมูล	ค่า เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด มาตรฐาน	ค่า T	ค่า P-value
เส้นผ่านศูนย์กลาง	20	4.8775	0.0023	0.00052	9.60	0.000
องศาเสรี (d.f.) = 19						

จากตารางที่ 15 ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุงมีค่ามากกว่า 4.8725

มิลลิเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งก่อนและหลังปรับปรุงมีค่ามากกว่า 4.8725 มิลลิเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางว่าหลังปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง (ค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงมากกว่าค่าเฉลี่ยหลังปรับปรุง) หรือไม่ ดังนั้นสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ การแจกแจงแบบที กรณีเก็บตัวอย่างสองชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แต่เนื่องจากไม่ทราบค่าความแปรปรวนที่แท้จริงของทั้งสองกลุ่ม (σ_1^2 และ σ_2^2) และความสัมพันธ์ระหว่าง σ_1^2 และ σ_2^2 จึงต้องทดสอบความแปรปรวนก่อน ดังนั้นสมมติฐานของการทดสอบคือ

$$H_0: \sigma^2_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = \sigma^2_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

$$H_1: \sigma^2_{\text{ก่อนปรับปรุง}} \neq \sigma^2_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

ตารางที่ 16 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนสองกลุ่ม (เส้นผ่านศูนย์กลาง)

แหล่งที่มา	จำนวนข้อมูล	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแปรปรวน
เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุง	10	0.004	0.000
เส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุง	20	0.002	0.000
อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.638			
อัตราส่วนของความแปรปรวน = 2.683			
ค่า F test = 2.68 และค่า P-value = 0.067			
องศาเสรี (d.f.) ก่อนปรับปรุง = 9 และ องศาเสรี (d.f.) หลังปรับปรุง = 19			

จากตารางที่ 16 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.067 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มประชากรมีค่าเท่ากัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังปรับปรุง โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = \mu_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} > \mu_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง

แหล่งที่มา	จำนวน ข้อมูล	ค่า เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด มาตรฐาน
เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนปรับปรุง	10	4.8821	0.0038	0.0012
เส้นผ่านศูนย์กลางหลังปรับปรุง	20	4.8775	0.0023	0.0005

ค่า T-value = 4.11 ค่า P-value = 0.000 และ องศาเสรี (d.f.) = 28

จากตารางที่ 17 ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหลังปรับปรุง หรือหลังปรับปรุงเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกระทู้กลัดซ์มีค่าเข้าใกล้เป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวง่อนและหลังปรับปรุง

ก. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวก่อนปรับปรุงว่ามีค่ามากกว่า 2.5 ไมโครเมตรหรือไม่ สถิติที่ใช้ทดสอบคือ การแจกแจงแบบที กรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$H_0: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = 2.5 \text{ ไมโครเมตร}$$

$$H_1: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} > 2.5 \text{ ไมโครเมตร}$$

ตารางที่ 18 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวก่อนปรับปรุง

แหล่งที่มา	จำนวน ข้อมูล	ค่า เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด มาตรฐาน	ค่า T	ค่า P-value
ความหยابผิว	10	3.594	0.674	0.213	5.13	0.000
องศาเสรี (d.f.) = 9						

จากตารางที่ 18 ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยความหยابผิวก่อนปรับปรุงมีค่ามากกว่า 2.5 ไมโครเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ข. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวหลังปรับปรุงว่ามีค่ามากกว่า 2.5 ไมโครเมตรหรือไม่ สถิติที่ใช้ทดสอบคือการแจกแจงแบบที กรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$H_0: \mu_{\text{หลังปรับปรุง}} = 2.5 \text{ ไมโครเมตร}$$

$$H_1: \mu_{\text{หลังปรับปรุง}} > 2.5 \text{ ไมโครเมตร}$$

ตารางที่ 19 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวหลังปรับปรุง

แหล่งที่มา	จำนวน ข้อมูล	ค่า เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด มาตรฐาน	ค่า T	ค่า P-value
ความหยابผิว	20	2.731	0.534	0.119	1.93	0.034
องศาเสรี (d.f.) = 19						

จากตารางที่ 19 ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.034 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยความหยابผิวหลังปรับปรุงมีค่ามากกว่า 2.5 ไมโครเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยابผิวว่าหลังปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง (ค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงมากกว่าค่าเฉลี่ยหลังปรับปรุง) หรือไม่ ดังนั้นสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ การแจกแจงแบบที กรณีเก็บตัวอย่างสองชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แต่เนื่องจากไม่ทราบค่าความแปรปรวนที่แท้จริงของทั้งสองกลุ่ม (σ_1^2 และ σ_2^2) และความสัมพันธ์ระหว่าง σ_1^2 และ σ_2^2 จึงต้องทดสอบความแปรปรวนก่อน ดังนั้นสมมติฐานของการทดสอบคือ

$$H_0: \sigma^2_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = \sigma^2_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

$$H_1: \sigma^2_{\text{ก่อนปรับปรุง}} \neq \sigma^2_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

ตารางที่ 20 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนสองกลุ่ม (ความหยابผิว)

แหล่งที่มา	จำนวนข้อมูล	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแปรปรวน
ความหยابผิวก่อนปรับปรุง	10	0.674	0.455
ความหยابผิวหลังปรับปรุง	20	0.534	0.285
อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.262			
อัตราส่วนของความแปรปรวน = 1.594			
ค่า F test = 1.59 และค่า P-value = 0.375			
องศาเสรี (d.f.) ก่อนปรับปรุง = 9 และ องศาเสรี (d.f.) หลังปรับปรุง = 19			

จากตารางที่ 20 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.375 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มประชากรมีค่าเท่ากัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความหยابผิวก่อนและหลังปรับปรุง โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} = \mu_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ก่อนปรับปรุง}} > \mu_{\text{หลังปรับปรุง}}$$

ตารางที่ 21 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงของความหยาบผิว

แหล่งที่มา	จำนวน	ค่า	ส่วนเบี่ยงเบน	ค่าผิดพลาด
	ข้อมูล	เฉลี่ย	มาตรฐาน	มาตรฐาน
ความหยาบผิวก่อนปรับปรุง	10	3.594	0.674	0.21
ความหยาบผิวหลังปรับปรุง	20	2.731	0.534	0.12

ค่า T-value = 3.82 ค่า P-value = 0.000 และ องศาเสรี (d.f.) = 28

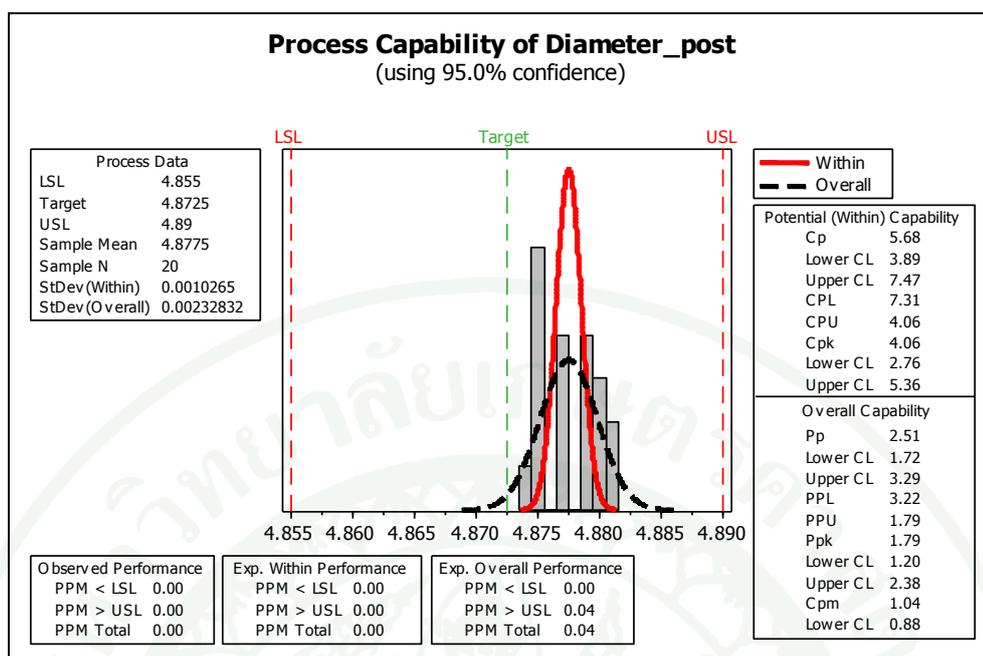
จากตารางที่ 21 ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวมากกว่าหลังปรับปรุง หรือหลังปรับปรุงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวมีค่าเข้าใกล้เป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 วิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ

ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างชิ้นงานชิ้นผลทั้ง 20 ชิ้น มาวิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนตามแต่ละผลตอบสนอง

4.2.1 ผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลการยืนยันผลสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งมีข้อกำหนด 2 ด้านคือข้อกำหนดด้านบน (USL) เท่ากับ 4.89 มิลลิเมตร ข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) เท่ากับ 4.855 มิลลิเมตรและค่าเป้าหมายเท่ากับ 4.8725 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 21

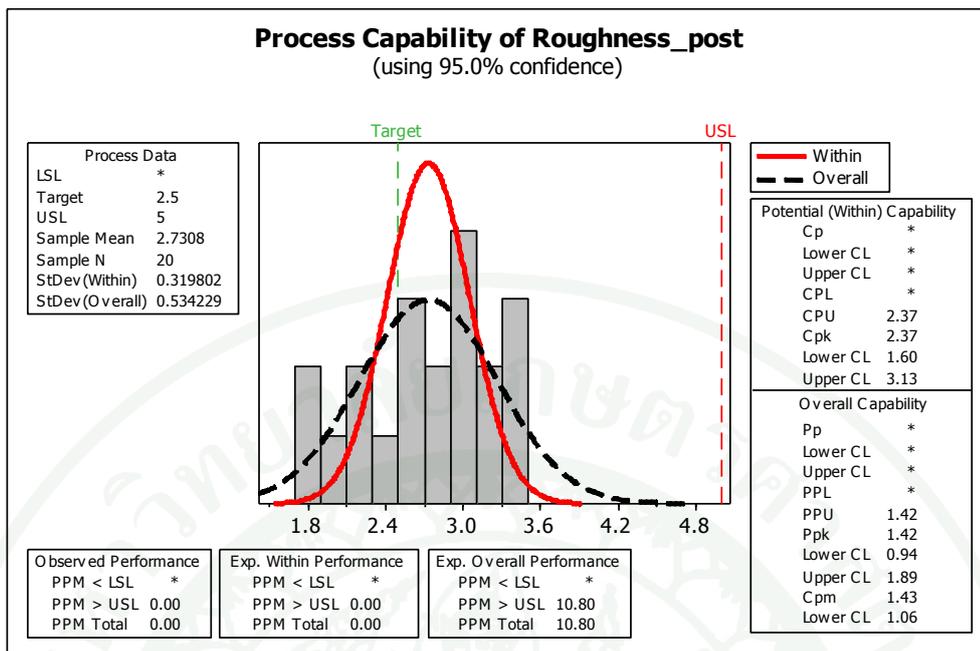


ภาพที่ 21 สมรรถภาพกระบวนการสำหรับผลตอบสนองเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพที่ 21 พบว่าไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยค่า C_{pk} เท่ากับ 4.06 แสดงว่ากระบวนการดีมาก ค่าเฉลี่ยของกระบวนการเลื่อนไปทางด้านบน (USL) เพียงเล็กน้อย และช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ $2.76 \leq C_{pk} \leq 5.36$ และค่า C_{pm} เท่ากับ 1.04 ช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ $0.88 \leq C_{pm} \leq 2.38$

4.2.2 ผลตอบสนองความหยาบผิว

ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลการยืนยันผลสำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว ซึ่งมีข้อกำหนด 1 ด้านคือข้อกำหนดด้านบนเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และค่าเป้าหมายเท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 สมรรถภาพกระบวนการสำหรับผลตอบสนองความหยาบผิว

จากภาพที่ 22 พบว่าไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยค่า C_{pk} เท่ากับ 2.37 ค่าเฉลี่ยของกระบวนการเลื่อนไปทางด้านบน (USL) เพียงเล็กน้อย และช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ $1.60 \leq C_{pk} \leq 3.13$ และค่า C_{pm} เท่ากับ 1.43 ช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ $1.06 \leq C_{pm} \leq 1.89$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ที่มีผลต่อลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญคือเส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบผิว อีกทั้งยังคำนึงถึงรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตควบคู่ไปกับลักษณะทางคุณภาพอีกด้วย โดยงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการกลึงก้านเนื่องจากส่วนก้านของแกนกระทู้คลัตช์เป็นส่วนที่มีลักษณะทางคุณภาพที่ถูกค่าให้ความสำคัญในการตรวจสอบ และเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาผลิตสูงสุด จากการศึกษาปัญหาโรงงานตัวอย่างพบว่าลักษณะทางคุณภาพทั้งสองมีค่าความสามารถของกระบวนการต่ำกว่าเป้าหมายของโรงงานคือ 1.33 และรอบเวลาผลิตมากกว่าเป้าหมายของโรงงานคือ 40 วินาที

กระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ทั้งหมดผลิตด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยผู้วิจัยได้ร่วมกับหัวหน้าฝ่ายแมชชีนนิ่งและพนักงานที่เกี่ยวข้องในการผลิต สรุปปัจจัยควบคุมได้ 5 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ อัตราป้อนของการกลึงหยาบ ความลึกตัดของการกลึงหยาบ ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด และอัตราป้อนของการกลึงละเอียด และมีปัจจัยรบกวนคือความลึกห่อของเม็ดมีด โดยต้องการศึกษาว่าปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้มีผลต่อผลตอบสนองทั้งสามได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหยาบผิวและรอบเวลาผลิต หรือไม่

งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต 2^{5-1} แฟคทอเรียลบางส่วน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 บล็อก (จุดแฟคทอเรียลและจุดในแนวแกน) เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยรบกวน หลังจากทดลอง ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อสร้างสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองทั้ง 3 ชนิดได้แก่

1. เส้นผ่านศูนย์กลางมี 1 ปัจจัยคืออัตราป้อนของการกลึงละเอียด (E)
2. ความหยาบผิวมี 3 ปัจจัยคืออัตราป้อนของการกลึงละเอียด (E) ปัจจัยร่วมกำลังสองของการกลึงละเอียด (E*E) และปัจจัยรบกวน (Block) ซึ่งเห็นได้ว่าความลึกห่อของเม็ดมีดส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

3. รอบเวลาผลิตมี 4 ปัจจัยคืออัตราป้อนของการกลึงหยาบ (B) ความลึกตัดของการกลึงหยาบ (C) อัตราป้อนของการกลึงละเอียด (E) และปัจจัยร่วมกำลังสองของการกลึงละเอียด (E^2)

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Selection ในโปรแกรม Minitab เพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับใช้ในการทำนายแต่ละผลตอบสนองของกระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ ดังสมการที่ 14 17 และ 20

สมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อน (สมการที่ 12 15 และ 18) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตแกนกระทู้คลัตช์ จากการวิเคราะห์พบว่า สถานะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบของการกลึงหยาบ (A) เท่ากับ 4,583 รอบต่อนาที อัตราป้อนของการกลึงหยาบ (B) เท่ากับ 0.72 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกตัดของการกลึงหยาบ (C) เท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของการกลึงละเอียด (D) เท่ากับ 3,379 รอบต่อนาที และอัตราป้อนของการกลึงละเอียด (E) เท่ากับ 0.11 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.8725 มิลลิเมตร ความหยาบผิวเท่ากับ 2.44 ไมโครเมตร และรอบเวลาผลิตเท่ากับ 42 วินาที โดยค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.97 และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาทดลองยืนยันผลเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง โดยใช้วิธีการทางสถิติในการทดสอบ พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความหยาบผิวมีค่าเฉลี่ยหลังปรับปรุงใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นผลให้ค่าความสามารถของกระบวนการ (ค่า C_{pk} และ C_{pm}) ของผลตอบสนองทั้งสองมีค่าเพิ่มมากขึ้น สรุปได้ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ค่าความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ หลังปรับปรุง

ค่าความสามารถของกระบวนการและค่าสถิติต่างๆ	ลักษณะทางคุณภาพ	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความหยาบผิว
ค่าเฉลี่ย	4.8775 มิลลิเมตร	2.73 ไมโครเมตร
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0023 มิลลิเมตร	0.53 ไมโครเมตร
ค่า C_{pk} (เป้าหมายเท่ากับ 1.33)	4.06	2.37
ช่วงความเชื่อมั่น C_{pk} ที่ 95%	$2.76 \leq C_{pk} \leq 5.36$	$1.60 \leq C_{pk} \leq 3.13$
ค่า C_{pm} (เป้าหมายเท่ากับ 1.33)	1.04	1.43
ช่วงความเชื่อมั่น C_{pm} ที่ 95%	$0.88 \leq C_{pm} \leq 2.38$	$1.06 \leq C_{pm} \leq 1.89$

จากตารางที่ 22 พบว่าค่า C_{pk} ของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.06 ช่วงความเชื่อมั่นของค่า C_{pk} อยู่ระหว่าง 2.76 กับ 5.36 และค่า C_{pk} ของความหยาบผิวเท่ากับ 2.37 ช่วงความเชื่อมั่นของค่า C_{pk} อยู่ระหว่าง 1.60 กับ 3.13 เห็นได้ว่าค่า C_{pk} ของผลตอบสนองทั้งสองมีค่าสูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ และเมื่อวิเคราะห์จากค่า C_{pm} ของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.04 เห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนด ดังนั้นต้องทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ค่า C_{pm} สูงขึ้นตรงตามเป้าหมาย โดยช่วงความเชื่อมั่นของค่า C_{pm} อยู่ระหว่าง 0.88 กับ 2.38 และค่า C_{pm} ของความหยาบผิวมีค่าเท่ากับ 1.43 เห็นได้ว่ามีค่าสูงกว่าเป้าหมาย โดยช่วงความเชื่อมั่นของค่า C_{pm} อยู่ระหว่าง 1.06 กับ 1.89 ในขณะที่รอบเวลาผลิตมีค่าเท่ากับ 37 วินาที เห็นได้ว่าลดลงมากกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ (40 วินาที) และลดลงต่ำกว่ารอบเวลาผลิตปัจจุบันถึง 17.78%

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยนี้การสึกหรอของเม็ดมิดส่งผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นควรศึกษาอิทธิพลที่เกิดจากการสึกหรอของเม็ดมิดด้วย ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถนำมาศึกษาต่อได้ในอนาคต
2. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะส่วนก้านของแกนกระทู้กัลด์ซ์เท่านั้น ยังมีกระบวนการผลิตส่วนหัวที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง ซึ่งประสบปัญหาคล้ายๆ กับส่วนก้านของแกนกระทู้กัลด์ซ์
3. งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต 2^{5-1} แฟคทอเรียลบางส่วน ทำให้การประมาณสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพื้นผิวสะท้อนมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองแบบ 2^{5-1} แฟคทอเรียลบางส่วนในงานวิจัยนี้ พิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 2 เท่านั้น ทำให้การวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อนเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์พื้นผิวสะท้อนมีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น ควรใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต 2^5 แฟคทอเรียลเต็มรูป ซึ่งพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมทั้งหมด
4. งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้าให้มากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เฉลิมพล คล้ายนิล และ พงษ์พันธ์ ราชศักดิ์. 2550. อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส AISI316 ด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว, น. 527-532. ใน รายงานการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2550. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

นวรรตน์ จันทร์กระเวน. 2548. การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเหวี่ยงบอล ในกระบวนการเชื่อมวงจร กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

รังสฤษฎ์ สุทธิคุณ. 2552. การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง. น.428-433. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

สัจจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์, คุรงค์ฤทธิ์ ชาญณรงค์, ชวลิต อภิชัยมงคล, พรพิมล ไชยภินันท์, รัตนา เสมาทศน์ และ นัดดา วิมลทรัพย์สิน. 2544. เทคโนโลยีซีเอ็นซี การโปรแกรมและการใช้งานสำหรับเครื่องกลึงและเครื่องกัด. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมพร ตีบซัด และ อิศรา วีระวัฒน์สกุล. 2552. การหาสภาวะการดำเนินงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซีในการสร้างต้นแบบที่ทำจากพลาสติก วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 16(3): 1-13.

Aggarwal, A., H. Singh, P. Kumar and M. Singh. 2008. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. **Journal of Materials Processing Technology** 205: 42-50.

Bouacha, K., M.A. Yallese, T. Mabrouki and J.F. Rigal. 2010. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials** 28: 349-361.

Choudhury, I.A. and M.A. El-Baradie. 1997. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. **Journal of Materials Processing Technology** 67: 55-61.

JIS (Japan International Standard). 1998. **Surface roughness-Terminor-Part 1: Surface and its Parameter**. B 0660

Lalwani, D.I., N.K. Mehta and P.K. Jain. 2008. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. **Journal of Materials Processing Technology** 206: 167-179.

Montgomery, D.C. and G.C. Runger. 2009. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Montgomery, D.C. 2009. **Design and Analysis of Experiment**. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Montgomery, D.C. 2009. **Statistical Quality Control: A Modern Introduction**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

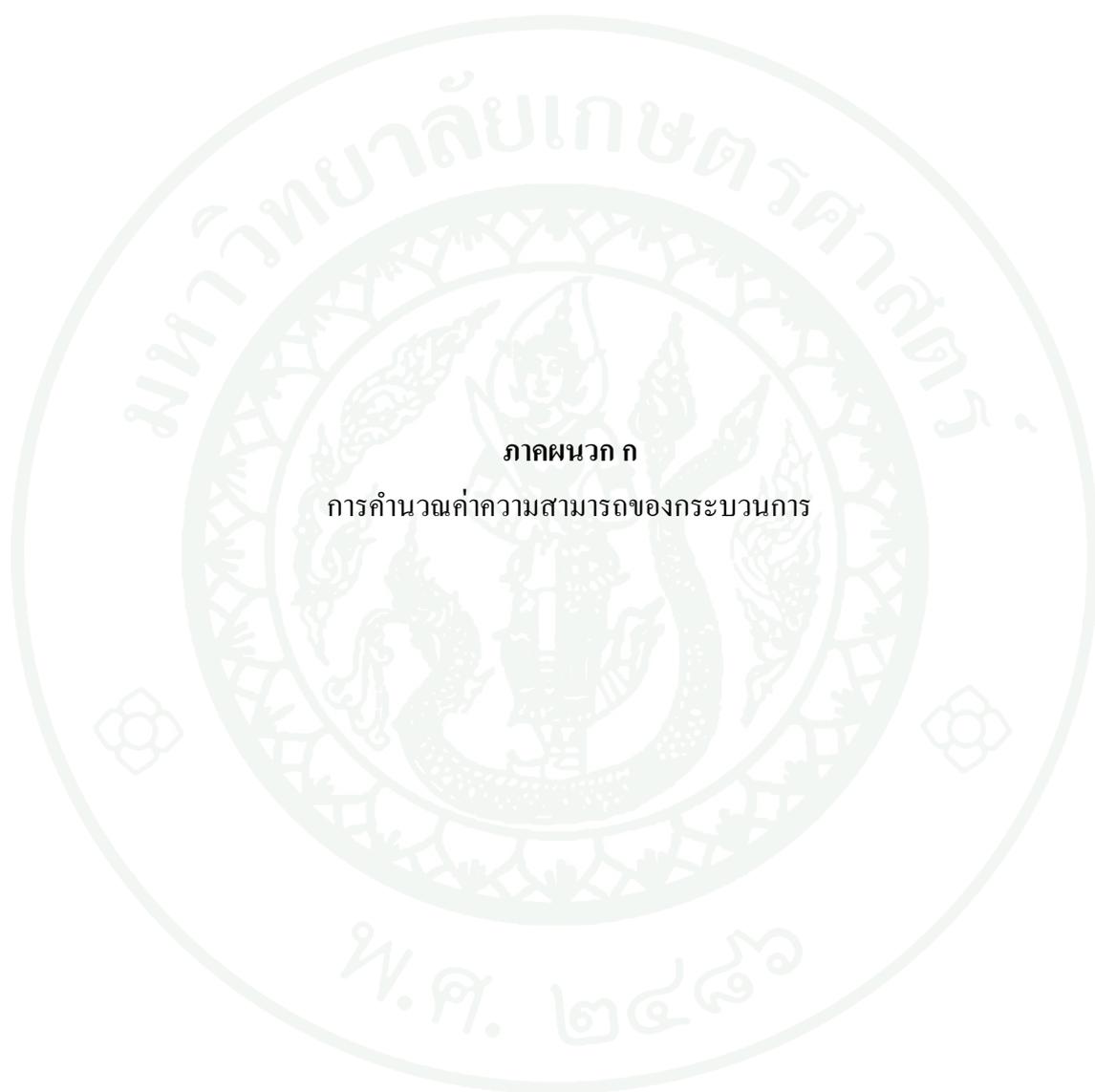
Myers, R.H., D.C. Montgomery and C.M. Anderson-Cook. 2008. **Response Surface Methodology: Product Optimization Using Designed Experiment**. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Noordin, M.Y., V.C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting and A. Abdullah. 2004. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. **Journal of Materials Processing Technology** 145: 46-58.

Tzeng, C.J., Y.H. Lin, Y.K. Yang and M.C. Jeng. 2009. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. **Journal of Materials Processing Technology** 209: 2753-2759.



ภาคผนวก



การคำนวณค่าความสามารถของกระบวนการ

1. ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการที่แท้จริง (C_{pk})

ข้อกำหนดสองด้าน

$$C_{pk} = \min(C_{pl}; C_{pu}) \text{ เมื่อ } C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\hat{\sigma}}, C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\hat{\sigma}}$$

ข้อกำหนดด้านเดียว

$$C_{pk} = \frac{USL - \mu}{3\hat{\sigma}} \text{ หรือ } C_{pk} = \frac{\mu - LSL}{3\hat{\sigma}}$$

โดยที่

- μ = ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ
- USL = ข้อกำหนดด้านบน
- LSL = ข้อกำหนดด้านล่าง
- σ = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

2. ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการด้วยค่าเป้าหมายจากข้อกำหนด (C_{pm})

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}$$

โดยที่

- USL = ข้อกำหนดด้านบน
- LSL = ข้อกำหนดด้านล่าง
- σ = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ
- μ = ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ
- T = ค่าเป้าหมาย

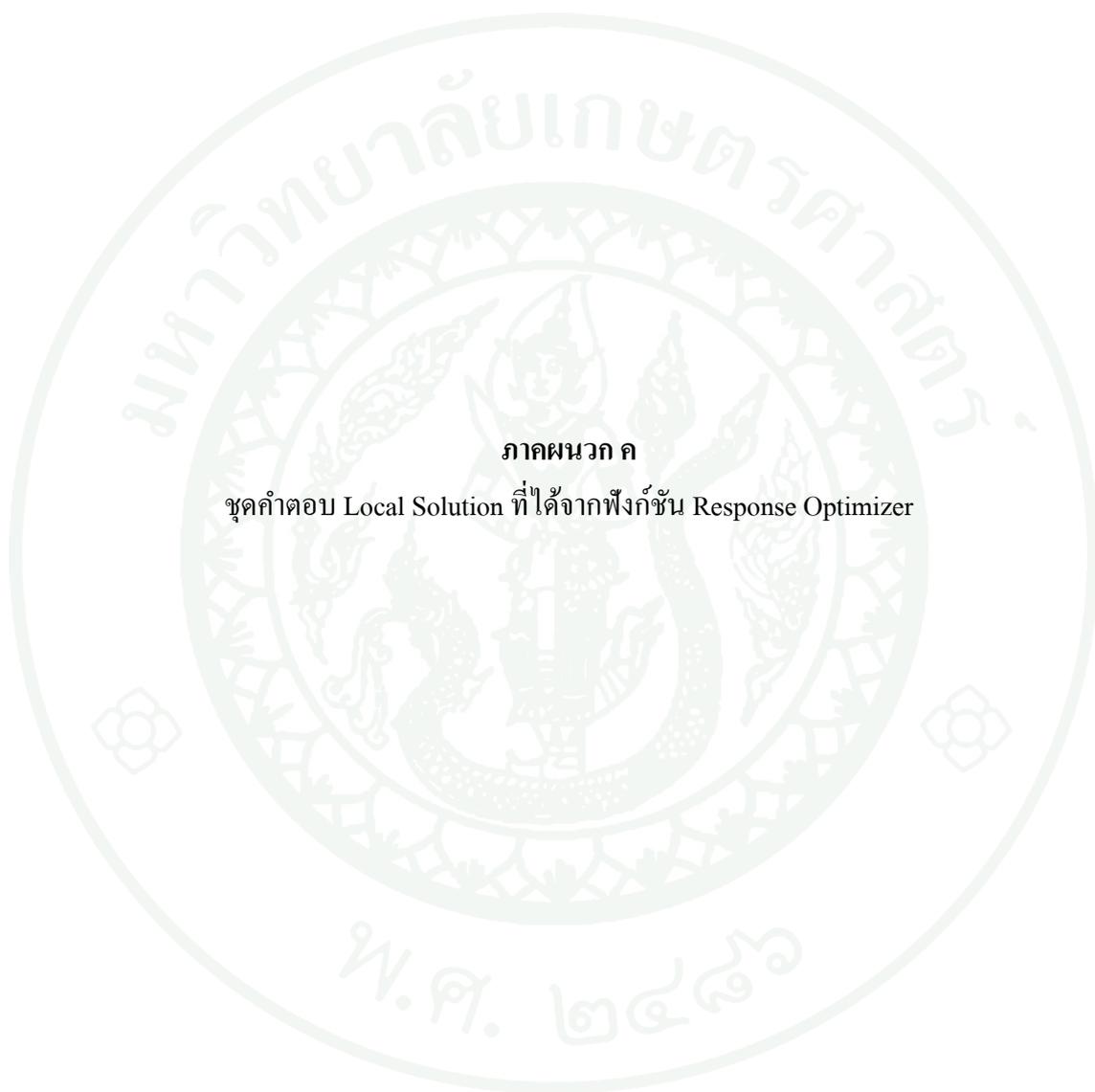


ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมพิวเตอร์

Std. Order	Run Order	Pt Type	Blocks	ปัจจัยควบคุม (ตัวแปรธรรมชาติ)					เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความ หยาบผิว	รอบ เวลาผลิต
				A	B	C	D	E			
1	2	1	1	3,000	0.4	0.4	3,000	0.20	4.8890	6.07	52
2	10	1	1	4,500	0.4	0.4	3,000	0.08	4.8770	3.62	62
3	13	1	1	3,000	1.0	0.4	3,000	0.08	4.8800	2.34	44
4	11	1	1	4,500	1.0	0.4	3,000	0.20	4.8990	5.81	35
5	5	1	1	3,000	0.4	1.0	3,000	0.08	4.8610	2.58	53
6	20	1	1	4,500	0.4	1.0	3,000	0.20	4.9120	4.09	34
7	7	1	1	3,000	1.0	1.0	3,000	0.20	4.8760	4.77	40
8	22	1	1	4,500	1.0	1.0	3,000	0.08	4.8560	2.12	46
9	8	1	1	3,000	0.4	0.4	4,500	0.08	4.8720	3.12	60
10	14	1	1	4,500	0.4	0.4	4,500	0.20	4.8870	5.21	43
11	17	1	1	3,000	1.0	0.4	4,500	0.20	4.8800	4.87	44
12	3	1	1	4,500	1.0	0.4	4,500	0.08	4.8510	2.94	38
13	9	1	1	3,000	0.4	1.0	4,500	0.20	4.8800	5.80	35
14	19	1	1	4,500	0.4	1.0	4,500	0.08	4.8860	3.19	44
15	18	1	1	3,000	1.0	1.0	4,500	0.08	4.8600	2.66	48
16	6	1	1	4,500	1.0	1.0	4,500	0.20	4.8800	5.19	35
17	1	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8850	3.29	34
18	4	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8610	3.77	34
19	16	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8840	4.95	34
20	15	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8800	4.22	34
21	21	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8830	3.19	34
22	12	0	1	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8820	3.74	34
23	29	-1	2	2,250	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8850	5.60	37
24	23	-1	2	5,250	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8710	4.58	33
25	32	-1	2	3,750	0.1	0.7	3,750	0.14	4.8650	4.38	78

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Std. Order	Run Order	Pt Type	Blocks	ปัจจัยควบคุม (ตัวแปรธรรมชาติ)					เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความ หยาบพิว	รอบ เวลาผลิต
				A	B	C	D	E			
26	28	-1	2	3,750	1.3	0.7	3,750	0.14	4.8850	3.19	31
27	30	-1	2	3,750	0.7	0.1	3,750	0.14	4.8600	4.03	78
28	25	-1	2	3,750	0.7	1.3	3,750	0.14	4.8800	4.83	29
29	27	-1	2	3,750	0.7	0.7	2,250	0.14	4.8780	5.77	40
30	31	-1	2	3,750	0.7	0.7	5,250	0.14	4.8770	6.72	32
31	24	-1	2	3,750	0.7	0.7	3,750	0.02	4.8650	1.41	106
32	26	-1	2	3,750	0.7	0.7	3,750	0.26	4.9100	12.09	28
33	33	0	2	3,750	0.7	0.7	3,750	0.14	4.8770	4.69	34



ภาคผนวก ค

ชุดคำตอบ Local Solution ที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer

ตารางผนวกที่ ค1 ชุดคำตอบ Local Solution

Iteration	ปัจจัยควบคุม (ตัวแปรเข้ารหัส)					เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความหนาแน่น	รอบเวลาผลิต	ค่าฟังก์ชัน
	A	B	C	D	E				
1	1.11	0.06	1.84	-0.49	-0.47	4.8725	2.44	42	0.97
2	-0.38	-0.97	2.00	-0.12	0.04	4.8725	3.45	41	0.24
3	0.70	-1.18	1.37	0.76	-0.47	4.8877	3.44	44	0.09
4	-0.54	-1.77	2.00	-0.86	0.48	4.8725	3.48	44	0.13
5	0.29	-0.92	1.64	-2.00	-0.12	4.8714	3.16	43	0.56
6	0.11	2.00	-1.76	-0.82	0.34	4.8886	3.45	44	0.07
7	2.00	1.19	2.00	-1.31	0.18	4.8721	2.52	36	0.98
8	2.00	0.90	2.00	-1.62	0.62	4.8881	3.46	31	0.07
9	0.94	2.00	-1.93	0.53	0.57	4.8611	3.49	44	0.07
10	-1.43	2.00	1.06	-1.39	0.44	4.8725	3.43	38	0.29
11	-1.35	1.13	-1.47	0.09	0.22	4.8893	3.40	45	0.06
12	0.32	1.59	-0.92	-1.07	-0.68	4.8724	2.60	44	0.89
13	-1.14	2.00	-0.66	2.00	-0.28	4.8728	2.56	42	0.93
14	-1.69	2.00	0.89	0.88	0.24	4.8731	3.44	43	0.25
15	1.75	2.00	-1.63	-1.89	-0.92	4.8569	3.50	45	0.01
16	-1.88	1.96	-1.16	2.00	-0.14	4.8845	1.95	45	0.51
17	-2.00	1.78	-1.24	1.75	0.52	4.8878	3.47	45	0.06
18	1.57	1.05	1.72	1.26	-0.92	4.8571	3.45	45	0.07
19	-1.93	2.00	1.97	-1.84	-0.65	4.8567	1.22	44	0.30
20	2.00	-0.13	-0.09	0.19	-0.95	4.8656	3.38	45	0.24
21	1.93	-0.88	1.39	1.23	-1.03	4.8887	3.44	45	0.06
22	-1.91	1.69	0.82	0.01	-0.18	4.8725	2.50	40	1.00
23	1.55	1.22	2.00	-1.27	-0.19	4.8609	2.01	43	0.58
24	0.52	-1.37	1.24	0.49	-0.27	4.8876	3.38	45	0.12
25	2.00	-0.95	-0.03	-0.55	-0.33	4.8853	3.45	45	0.11
26	-0.73	-1.20	2.00	-1.00	-0.05	4.8612	3.11	44	0.36
27	-0.20	1.60	-1.51	0.51	-0.06	4.8725	2.50	45	0.88

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Iteration	ปัจจัยควบคุม (ตัวแปรเข้ารหัส)					เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความหนาแน่น	รอบเวลาผลิต	ค่าพึงพอใจรวม
	A	B	C	D	E				
28	-1.29	0.10	0.31	-0.46	-0.71	4.8714	3.33	45	0.36
29	1.67	0.15	2.00	-2.00	-0.31	4.8725	2.19	40	1.00
30	2.00	-0.15	0.06	0.19	-0.95	4.8661	3.38	45	0.26
31	-0.70	1.59	-1.42	2.00	-0.32	4.8647	2.51	45	0.67
32	-2.00	-0.11	1.18	-0.69	-0.79	4.8574	3.20	45	0.20
33	1.83	0.38	-0.61	0.25	-0.96	4.8558	3.39	45	0.07



ภาคผนวก ง
ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์

ตารางผนวกที่ ง1 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ (รอบทำซ้ำที่ 1)

ที่	ปัจจัย					เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความ หยาบผิว	รอบ เวลาผลิต
	A	B	C	D	E			
1	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8750	2.26	37
2	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8750	3.04	37
3	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8790	2.82	37
4	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8790	3.46	37
5	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8790	3.27	37
6	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8800	2.60	37
7	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8770	1.76	37
8	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8770	2.40	37
9	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8800	3.39	37
10	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.8810	2.09	37

ตารางผนวกที่ ง2 ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ (รอบทำซ้ำที่ 2)

ที่	ปัจจัย					เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความ หยาบผิว	รอบ เวลาผลิต
	A	B	C	D	E			
1	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.875	1.76	37
2	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.875	3.09	37
3	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.875	2.91	37
4	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.875	3.09	37
5	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.874	3.38	37
6	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.877	2.74	37
7	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.88	2.68	37
8	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.877	3.26	37
9	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.881	2.53	37
10	4,583	0.72	1.25	3,379	0.11	4.879	2.11	37

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายเอราวิธ ถาวร
เกิดวันที่	9 เมษายน พ.ศ.2529
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำแหน่งปัจจุบัน	พนักงานมหาวิทยาลัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ - ทุนการศึกษาที่ได้รับ -	

