



รายงานการวิจัย

การประมาณค่าความกลมของการกลิ้งคว้านรูใน
Roundness prediction models in boring

จตุพร ใจดำรงค์

Jatuporn Jaidumrong

ปิยวิทย์ สุวรรณ

Piyavit Suwan

บรรเลง คำเกตุ

Bunleng Kumket

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณ (เงินรายได้) ประจำปี พ.ศ. 2557

การประมาณค่าความกลมของการกลิ้งคว้านรูใน

จตุพร ใจดำรงค์ ปิยวิทย์ สุวรรณ และ บรรณ เลง คำเกตุ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาถึงอิทธิพลตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าความกลมของการคว้านรูในของท่อเหล็ก (S45C) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมด้วยเครื่องกลิ้งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ปัจจัยที่ใช้ศึกษาทดลองเพื่อศึกษาถึงสถานะที่มีค่ากลมของการคว้านรูใน คือ อัตราป้อน ความลึก และความเร็วตัด การทดลองกำหนดให้ใช้ค่าอัตราป้อน 0.065 - 0.095 มิลลิเมตรต่อรอบ ค่าความลึกของการกลิ้งคว้าน 0.16 - 0.28 มิลลิเมตร และค่าความเร็วตัด 135 - 165 เมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความกลม คือ ค่าอัตราป้อนซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าความกลมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ค่าอัตราป้อนมากขึ้นด้วยสมการ $R_c = 0.001036 + 0.041111 \text{ Feed} + 0.000167 \text{ Depth} - 0.00000556 \text{ Speed}$ การทดลองยืนยันผลพบว่าค่าความกลมที่ได้จากสมการเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริงมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เท่ากับ 9.366 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง การกลิ้งคว้านรู ความกลม

^{1, 2} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Roundness prediction models in boring

Jatuporn Jaidumrong Piyavit Suwan and Bunleng Kumket

Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of main factors on the roundness in boring steel pipe (S45C) in petroleum industrial that process by turning computer numerical controlled. The main factors, namely, feed rate, depth of cut and cutting speed were investigated for optimum roundness. In the experiment the main factors were use at 0.065 - 0.095 mm. per revolution in feedrate, 0.16 – 0.28 mm. in depth of cut, and 135 - 165 meter per minute in cutting speed. It was found from the experiment that the factor affecting roundness was feedrate with tendency for increase of roundness value at high feedrate. Therefore, in the boring pipe steel it was possible determine a cutting condition by mean of the equation $R_c = 0.001036 + 0.041111 \text{ Feed} + 0.000167 \text{ Depth} - 0.00000556 \text{ Speed}$. The result of the experiment of mean absolute percentage error (MAPE) of the equation of roundness is 9.366% which is less than the margin of error, and is acceptable.

Keywords: design of experiment, boring, roundness

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology
Srivijaya, Mueang Songkhla, Songkhla.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ งบรายจ่ายอื่น ๆ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประจำปีงบประมาณ 2557 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะผู้จัดทำ

5 สิงหาคม 2559



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	2
1.4 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ความเร็วตัดในงานกลึง	5
2.3 ความขรุขระผิว	6
2.4 ความกลม	6
2.5 การออกแบบการทดลอง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 แผนการดำเนินงาน	19
3.2 การออกแบบการทดลองและเครื่องมือที่	20
3.3 การกลึงคว้านรูชิ้นงาน	22
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	25
4.1 การทดลองที่ 1	25
4.2 การทดลองที่ 2	27
4.3 การทดลองที่ 3	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	33
5.1 สรุปผล	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง	36
ภาคผนวก ข ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง	44
ภาคผนวก ค ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน	48



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
3.1	แผนการดำเนินของโครงการ	19
3.2	ตัวแปรสำหรับแผนการทดลองตอนที่ 2	24
4.1	ความเบี่ยงเบนของค่าความกลมรุคว้าน	32
4.2	ผลการทดสอบ T-test ด้วยโปรแกรม Minitab 15	37



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ความเร็วตัดงานกลึง	5
2.2	ลักษณะของความขรุขระผิว	6
2.3	ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต R_a	7
2.4	ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง R_q	7
2.5	ความขรุขระผิวเฉลี่ยปริมาณ R_{sk}	7
2.6	ความขรุขระผิวเฉลี่ยรูปร่าง R_{ku}	8
2.7	ความขรุขระผิวขนาดโดยรวม R_t , R_y	8
2.8	ความขรุขระผิวขนาดหลุมลึกสุด R_v	9
2.9	ความขรุขระผิวขนาดยอดสูงสุด R_p	9
2.10	ความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย R_z	9
2.11	ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิต	10
2.12	ตัวอย่างพื้นผิวสำเร็จ	11
2.13	การวัดค่าความกลม	12
3.1	ชิ้นงานท่อในอุตสาหกรรมปิโตเลียม	20
3.2	ลักษณะเม็ดเม็ดคว้านรู	20
3.3	เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	21
3.4	นาฬิกาวัดความเรียบผิว	21
3.5	การกลึงคว้านรูกลม	22
4.1	ความเบี่ยงเบนมาตรฐานความกลม	25
4.2	การประมาณค่าความไวต่อกำลึงการทดสอบ	25
4.3	การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล	26
4.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความกลม	28
4.5	ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าความกลม	29
4.6	ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความกลม	30
4.7	การวิเคราะห์การถดถอย	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การกลึงเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งใช้ทำการผลิตชิ้นงานรูปทรงกระบอกภายในหรือภายนอกได้อย่างมีคุณภาพ ค่าความแม่นยำทางขนาดของกระบวนการกลึง การสีกหรือของเครื่องมือตัด คุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานสำเร็จนับได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญยิ่ง ซึ่งปัจจุบันปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ในกระบวนการผลิต [1] อย่างไรก็ตามค่าความหยาบผิวและค่าความกลม ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเงื่อนไขสำคัญอย่างยิ่งที่จะถูกพิจารณาถึงค่าที่ตรวจสอบได้สำหรับชิ้นส่วนในทางวิศวกรรม ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณภาพของชิ้นงานซึ่งเป็นที่ต้องการสูงมากในอุตสาหกรรม

อุปกรณ์การตรวจสอบรูปทรงของชิ้นงานโดยวิธีการขยายให้ใหญ่ขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมสูงมากขึ้นและเครื่องมือวัดแบบสัมผัสจะถูกใช้ในการวัดค่าความหยาบผิวในอุตสาหกรรมและห้องทดลองเพราะมีความรวดเร็ว มีความสามารถในการทำซ้ำ ง่ายต่อการทำงาน ราคาไม่สูงมากนัก และใช้เป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย [2] คุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานสำเร็จจะเป็นตัวแปรสุดท้ายของการทำงานและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) เป็นค่าที่ได้รับความนิยมในการใช้ตรวจสอบเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมสำหรับการกำหนดค่าความหยาบผิว [3]

การทำงานของกระบวนการกลึงคว้านรูสำหรับงานสวมแปรงแข็งของเหล็กคาร์บอนสูงซึ่งใช้สำหรับการทำงานที่ต้องการความคงทนแข็งแรงและมีอายุการทำงานยาวนานในปัจจุบันต้องมีการลองผิดลองถูกหลายครั้งจึงจะเริ่มทำงานผลิตได้หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ในกระบวนการผลิตจะเกิดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเพิ่มมากขึ้นก่อนการทำงานจริงซึ่งเวลานี้เองจะทำให้เพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิตของโรงงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจจะศึกษาที่จะประมาณค่าความกลมของการกลึงคว้านรูในเหล็กคาร์บอนสูงโดยวิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อสามารถประมาณค่าในข้างต้นได้ก่อนการทำงานจริงซึ่งคาดว่าจะช่วยลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อศึกษาปัจจัยของงานกลึงคว้านรูในที่มีผลต่อค่าความกลม
- 1.2 เพื่อประมาณค่าความกลมของการกลึงคว้านรูในเหล็กคาร์บอนสูงได้

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ศึกษาค่าความกลมของชิ้นงาน
- 1.3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการกลึงคว้าน
- 1.3.3 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ท่อเหล็ก ST45 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ½ นิ้ว
- 1.3.4 เม็ดมีดกลึง Insert ยี่ห้อ KENNAMETAL รุ่น KC5010
- 1.3.5 เครื่องกลึงอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ HASS CNC รุ่น SL-20
- 1.3.6 วัดความกลม (Roundness Test) ด้วยนาฬิกาวัดความเรียบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น KEZ008 ความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร

1.4 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในที่ได้กล่าวในโครงการวิจัยนี้เพื่อศึกษาสภาวะในการกลึงเหล็กคาร์บอนสูง เกรด St45 ที่มีผลต่อค่าความกลมของพื้นผิวชิ้นงานสำเร็จ เนื่องจากการสร้างเครื่องมือเครื่องจักรโดยส่วนใหญ่จะมีชิ้นส่วนเคลื่อนที่แบบหมุน เพื่อให้ชิ้นส่วนหมุนมีการทำงานได้อย่างราบเรียบหรือเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานหรือใช้พลังงานน้อยสุดดังนั้นการหมุนจึงต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วนหมุนให้น้อยที่สุดอีกด้วย ดังนั้นจำเป็นต้องนำแบร็งหรือรองเพลาลูกกลิ้งมาใส่ระหว่างชิ้นส่วนหมุนหรือเพลาลูกคว้านของชิ้นงาน

กระบวนการผลิตเพลาลูกคว้านเพื่อการสวมประกอบรองเพลาลูกกลิ้งจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าพิกัดความเผื่อของการประกอบชิ้นงาน ค่าความหยาบผิวและค่าความกลมของชิ้นงานยังมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนหมุนอีกด้วย เนื่องจากค่าในข้างต้นที่มีค่าความผิดพลาดสูงจะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของการหมุนชิ้นส่วนสูงมาก ดังนั้นอัตราการสึกหรอของชิ้นส่วนหมุนจึงมีค่ามาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาปัจจัยของการกลึงที่ส่งผลต่อค่าความกลมของรูคว้านชิ้นงานกลึง ได้แก่ ค่าความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกการกลึง เพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมซึ่งทำให้มีค่าความกลมของรูคว้านดีที่สุด เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหมุน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ได้สภาวะในการทำงานที่เหมาะสมกับการคว้านรู
- 1.5.2 ช่วยลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรในการคว้านรู
- 1.5.3 ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหมุน
- 1.5.4 ช่วยลดต้นทุนการผลิต
- 1.5.5 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัมพล เพชรคง [4] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิว ในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) โดยเทียบกับคุณภาพผิวของงานเจียรนัยเป็นเกณฑ์ วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel AISI/SUS 304) และใช้มีดกลึงอินเลิร์ทคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยกระบวนการซีวีดี (CA 6525) ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วตัด (cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และสารหล่อเย็น จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวคือ ความเร็วตัด ซึ่งมีคุณภาพผิวของงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 โดยที่ความเร็วตัดต่ำจะทำให้ค่าคุณภาพผิวของงานที่ดี แต่เมื่อเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นทำให้ค่าคุณภาพผิวของงานต่ำลงจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเป็นตัวระบุถึงอิทธิพลของความเร็วตัดที่มีต่อค่าความเรียบของงาน

ชาญชัย ศิวิไล และ สรรจตุชัย ชิวสุทธิศิลป์ [5] การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในงานกลึง ปอกเพลลาเหล็กกล้า ชนิด ST 37 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบของผิวงานกลึงคือ อัตราป้อน ความเร็วตัด และระยะป้อนลึก และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน อย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราป้อน ความเร็วตัด และระยะป้อนลึก ซึ่งมีความเพียงพอในการนำปัจจัยดังกล่าวไปออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการกลึงปอกผิวชิ้นงาน โดยทำการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่สามารถกลึงให้ได้ความเรียบผิวกำหนด ผลการศึกษาพบว่าเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสมในงานกลึงปอกเพลลาเหล็กกล้า ชนิด 37 ที่สามารถกลึงให้ได้ความเรียบผิวกำหนด คืออัตราป้อนที่ 0.09 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัดที่ 137 เมตรต่อนาที และระยะป้อนลึกที่ 0.10 มิลลิเมตร เมื่อตรวจสอบความเรียบผิวชิ้นงาน จากการทดลองยืนยันผลพบว่าผิวของชิ้นงานมีความเรียบใกล้เคียงกับความเรียบผิวกำหนด จากการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

M. Marcos-Barcena. et.al. [6] ทำการทดลองกลึงอลูมิเนียมอัลลอย (AL-Cu) ทรงกระบอกด้วยวิธีการกลึงแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความกลมและปัจจัยของการกลึงโดยตรวจสอบความเบี่ยงเบนของค่าความกลมเมื่อกำหนดให้ค่าความลึกการกลึงมีค่าคงที่ ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นและค่าอัตราป้อนลดลงจะทำให้ค่าความกลมมีค่าลดลงด้วย จากข้อมูลการทดลองสามารถกำหนดสมการพหุนามตรีโกณมิติของการเบี่ยงเบนค่าความกลมได้อีกด้วยโดยพบว่าอัตราป้อนเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งทำให้เกิดค่าความแปรปรวนของปัจจัยการทดลอง

Lazaro Rico P. et.al. [7] ทำการศึกษาโดยการทดลองและวิเคราะห์ผลของปัจจัยในการตัดเฉือนของค่าความกลมสำหรับชิ้นงานทรงกระบอกวัสดุ AISI1080 ของกระบวนการกลึง การวิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยการออกแบบการทดลองแบบศูนย์กลาง ตัวแปรที่ถูกควบคุม คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกของการกลึง การทดลองกลึงตัดชิ้นงานและการทดสอบด้วยค่าทางสถิติแสดงถึงความเชื่อมั่นว่าค่าความเร็วตัดและปฏิสัมพันธ์กันของค่าความเร็วตัด-อัตราป้อน และค่าความเร็วตัด-ความลึกการกลึงมีผลต่อค่าความกลมของชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้การออกแบบการทดลองหาค่าที่ดีที่สุดของค่าความกลมและสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

Mohd Hafiz Bin Ismail. [8] การศึกษาผลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความกลมและนำไปสู่ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีของค่าความกลม เป้าหมายของการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราป้อน ความเร็วตัด และอัตราป้อนโดยวิธีการกลึงและวิเคราะห์ค่าความกลมของชิ้นงานสำเร็จด้วยเครื่องวัดความกลมซีเอ็นซี การทดลองโดยวิธีการบันทึกผลการทดลองและการวิเคราะห์ห้อย่างเป็นระบบ ซึ่งค่าทั้งหมดจะเป็นแบบสุ่ม การทดสอบค่าที่ได้จะใช้วิธีการ (Least square circle method) และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่ทำการศึกษา มีผลต่อค่าความกลม

N.H.Rafai and M.N.Islam. [9] ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาคูณภาพของชิ้นงานกลึงโดยวิธีการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการกลึงแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น การทดลองโดยกำหนดปัจจัยที่มีความเป็นอิสระต่อกันโดยพิจารณาถึงค่าที่ดีที่สุดของผลการกลึง การทดลองสามรูปแบบคือ แบบทั่วไป แบบวิเคราะห์พารโต ANOVA และแบบวิธีทากูชิ วัสดุเหล็กอัลลอย AISI4340 ผลการทดลองแสดงความแน่นอนของการรวมกันของปัจจัยการตัดเฉือน การตัดเฉือนแบบไม่ใช้น้ำหล่อเย็นจะให้ค่าความแม่นยำในการตัดเฉือนมากกว่าแบบใช้น้ำหล่อเย็น

Harish Kumar. et.al. [10] ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าของสภาวะปัจจัยที่เพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงานในกระบวนการกลึง ได้แก่ อัตราป้อนตัด ความเร็วรอบ ความลึกของการกลึง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นค่าเริ่มต้นและผลที่วัดได้จากชิ้นงาน คือ ค่าพิกิตความเผื่อขนาดของชิ้นงาน การทดลองนี้ออกแบบด้วยวิธีการทากูชิให้เป็นแบบ L9 อาเรย์ เพื่อหาค่าระดับของปัจจัยเริ่มต้นที่ดีที่สุด การทดลองพบว่ามีความเชื่อมั่นที่ค่าความหยาบผิวชิ้นงานกลึงของการทดลองแสดงว่าค่าความเร็วรอบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด

Samir A. et.al. [11] การทดลองกลึงชิ้นงานบนพื้นฐานของเทคนิคพื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคการออกแบบจุดศูนย์กลาง (CCD) การทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองกลึงชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน ต่อไปเป็นการกลึงชิ้นงานเหล็กคาร์บอนต่ำด้วยอัตราส่วน $L/D=2$ เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดของความหยาบผิวและความกลมของการกลึง สุดท้ายของการทดสอบกลึง จะทำการวัดค่าความผิดพลาดของค่าความหยาบผิวและค่าความกลมและนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ

ออกแบบการทดลอง สมการทางคณิตศาสตร์ของผลตอบเป็นสิ่งที่ทำการศึกษา สมการประมาณค่าความหยาบผิวแสดงค่าอัตราป้อน ความเร็วตัด และปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ มีผลมากกว่าค่าความลึกของการกลึงเพราะมันมีผลต่อค่าความหยาบผิวน้อยมาก ผลการทำงานจะแสดงค่าความเร็วตัดลดลงแต่อัตราป้อนเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวและค่าความกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การผลิตชิ้นงานมีพื้นผิวหยาบและมีค่าผิดพลาดของความกลมอยู่นอกพิสัยที่ยอมรับได้

2.2 ความเร็วตัดในงานกลึง

ความเร็วตัดในงานกลึง คือ ความยาวของเศษโลหะที่ถูกมีดกลึงตัดเฉือนออกมาในขณะที่กลึงว่ามีความยาวกี่เมตรในเวลา 1 นาที ความเร็วตัดจึงมีหน่วยเป็น ม./นาที ซึ่งในการคำนวณก็ใช้หลักการหาเส้นรอบวงของชิ้นงานกลึงคูณด้วยความเร็วรอบของชิ้นงานจึงมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (\text{ม./นาที}) \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนด

- V คือ ความเร็วตัดงานกลึง (เมตร/นาที)
 n คือ ความเร็วรอบชิ้นงานกลึง (รอบ/นาที)
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานของงานกลึง (มม.)

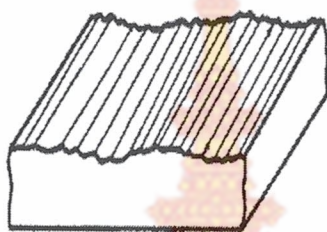
หมายเหตุ : ในสูตรที่หารด้วย 1000 เพราะต้องการเปลี่ยนหน่วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากมิลลิเมตรมาเป็นเมตร



รูปที่ 2.1 ความเร็วตัดงานกลึง

2.3 ความขรุขระผิว (Surface Roughness)

ความขรุขระผิวแปลมาจากคำภาษาอังกฤษ “Surface Roughness” หมายถึงขนาดความขรุขระของผิวหากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมากหากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อยความขรุขระหรือความหยาบจะใช้กับผิวของสแตนเลส แต่บางครั้งอาจใช้คำว่าความเรียบ (Flat) ซึ่งเป็นคำที่อาจทำให้สับสนเพราะความเรียบมักใช้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นเรียบหมายถึงแผ่นไม่ค่อยเป็นคลื่น (Wave)



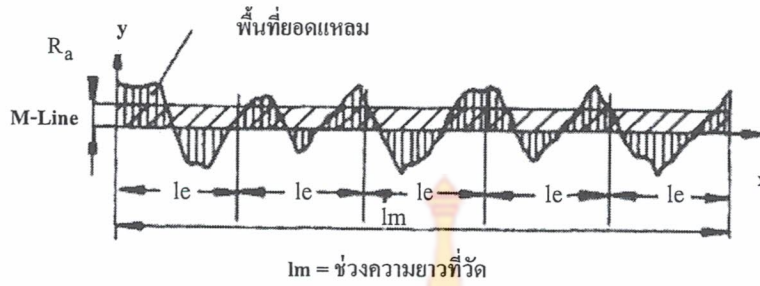
รูปที่ 2.2 ลักษณะของความขรุขระผิว

ด้วยเหตุผลในข้างต้นดังกล่าวความขรุขระผิวจึงจัดเป็นสมบัติทางโลหะวิทยาอย่างหนึ่งในการวัดความขรุขระผิวจะใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวซึ่งปัจจุบันมีหลายแบบหลายยี่ห้อ การวัดค่าความขรุขระผิวอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การวัดค่าความขรุขระผิวโดยเฉลี่ย และการวัดค่าความขรุขระผิวโดยขนาด

2.3.1 ประเภทการวัดความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average Parameter)

การวัดความขรุขระผิวเฉลี่ยคือ การอาศัยการวัดแล้วคำนวณค่าความขรุขระผิวออกมาเป็นค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยซึ่งจะทำให้เรารู้ระดับความขรุขระโดยรวม แต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาดเคลื่อนสูงต่ำของความขรุขระวิธีการวัดความขรุขระผิวเฉลี่ย มีดังนี้

1) ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average : R_a) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความขรุขระผิวการหาค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l_m) โดยที่ค่าของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



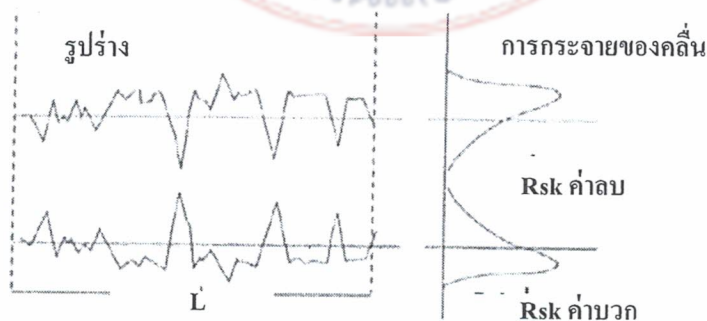
รูปที่ 2.3 ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต R_a

2) ความขรุขระผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square : R_q) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด



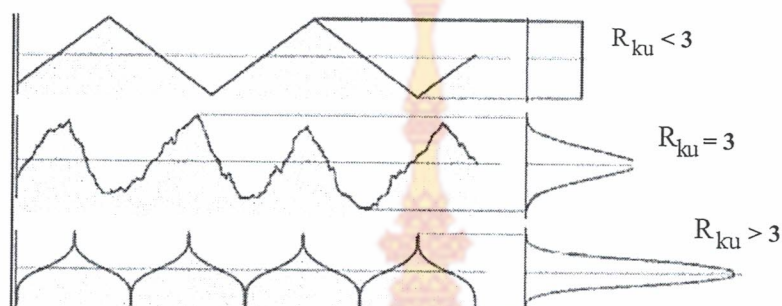
รูปที่ 2.4 ความขรุขระผิวเฉลี่ยกำลังสอง R_q

3) ความขรุขระผิวเฉลี่ยปริมาณ (Roughness Skewness : R_{sk}) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยการวัดปริมาณของยอด และหลุม โดยปริมาณของยอดให้เป็นค่าบวกส่วนปริมาณของหลุมให้เป็นค่าลบหากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือหลุมมากนั่นเอง



รูปที่ 2.5 ความขรุขระผิวเฉลี่ยปริมาณ R_{sk}

4) ความขรุขระผิวเฉลี่ยรูปร่าง (Roughness Kurtosis : R_{ku}) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิวว่ามีลักษณะยอดโค้งยอดแหลม หรือ ยอดเรียบ

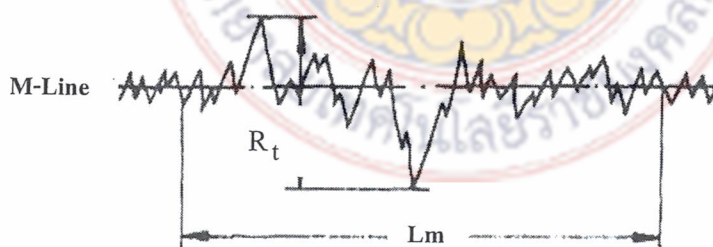


รูปที่ 2.6 ความขรุขระผิวเฉลี่ยรูปร่าง R_{ku}

2.3.2 ประเภทการวัดความขรุขระผิวโดยขนาด (Amplitude Parameter)

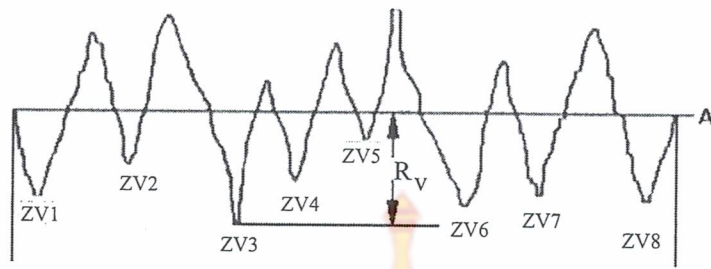
การวัดความขรุขระผิวโดยขนาดคือ การอาศัยการวัดหาค่าสูงต่ำของขนาดความขรุขระของพื้นผิวซึ่งจะทำให้เรารู้รูปลักษณะของความขรุขระได้ชัดเจนกว่าวิธีการวัดความขรุขระผิวโดยขนาด มีดังนี้

1) ความขรุขระผิวขนาดโดยรวม (Roughness Total Height : R_t, R_y) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึงหลุมลึกสุดของผิว ค่านี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเราต้องการขัดผิวเพื่อขจัดความขรุขระออกให้หมด เราจะรู้ได้ว่าจะต้องขัดผิวลงไปลึกกี่ไมครอน



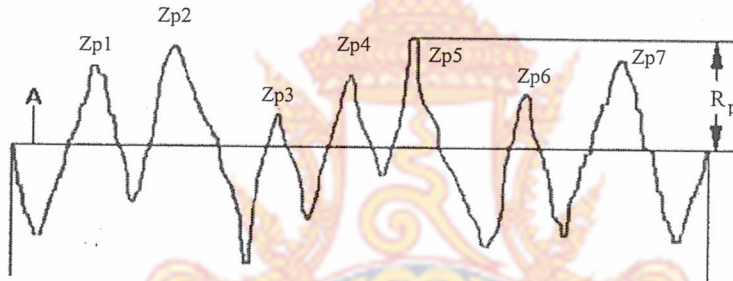
รูปที่ 2.7 ความขรุขระผิวขนาดโดยรวม R_t, R_y

2) ความขรุขระผิวขนาดหลุมลึกสุด (Roughness Valley : R_v) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความลึกของหลุมโดยแสดงความลึกหลุมที่มีขนาดลึกที่สุด



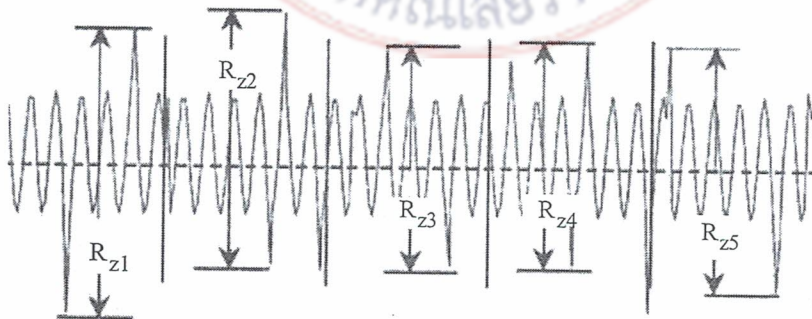
รูปที่ 2.8 ความขรุขระผิวขนาดหลุมลึกสุด R_v

3) ความขรุขระผิวขนาดยอดสูงสุด (Roughness Peak : R_p) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดโดยแสดงความสูงของยอดที่มีขนาดสูงที่สุด



รูปที่ 2.9 ความขรุขระผิวขนาดยอดสูงสุด R_p

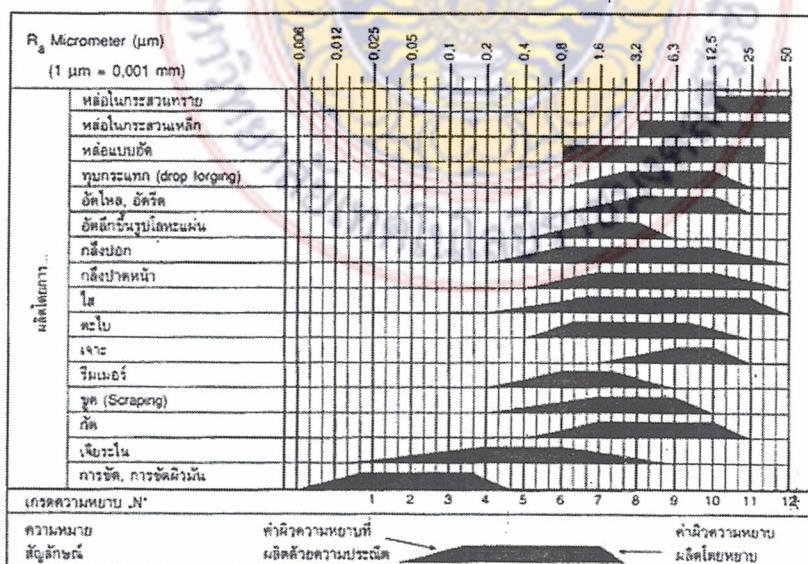
4) ความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-Point Mean : R_z) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุมโดยแสดงขนาดเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุมทั้งหมด 5 ชุด การวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ R_z มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 2.10 ความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย R_z

2.3.3 พื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- 1) การตัดหยาบ (Rough Cutting) หมายถึง การตัดงานที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็วแต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้อายุการใช้งานยาว ไม่เน้นความแม่นยำ หรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน งานส่วนมากในการตัดโดยใช้ใบมีดตัดมักจะเป็นการตัดหยาบใช้ความเร็วในการตัดค่อนข้างสูง อัตราป้อนสูง และความลึกในการตัดสูง เป็นผลให้ใช้แรงตัดสูงใช้กำลังในการตัดสูง และอาจจะต้องฉีดน้ำหล่อเย็นที่มีสมบัติของการหล่อเย็น หรือการลดแรงตัดได้ดี ทั้งนี้เพราะต้องการให้งานเสร็จเร็ว หลังจากงานตัดหยาบแล้วอาจจะต้องมีการตัดละเอียด หรือการเจียรในอีกครั้งหนึ่ง
- 2) การตัดปานกลาง (Medium Cutting) เป็นการตัดที่ประนีประนอมระหว่าง การตัดหยาบ และการตัดละเอียดคือ ต้องการให้งานเสร็จเร็วโดยที่ต้องการให้ความขรุขระผิวน้อยด้วย ซึ่งอาจจะทำได้ในบางกรณีโดยการเลือกค่าความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดที่เหมาะสม
- 3) การตัดละเอียด (Fine Cutting) หมายถึง การตัดที่ต้องการให้ค่าความขรุขระที่ต่ำ เน้นความแม่นยำ หรือความละเอียดของผิวสำเร็จของชิ้นงานไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็วแต่ถ้าเสร็จรวดเร็วก็เป็นการดีงานในลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นงานในขั้นตอนต่อเนื่องจากการตัดหยาบ หรือเป็นการตัดครั้งสุดท้าย ใช้ความเร็วในการตัดสูง หรือต่ำ ก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม อัตราป้อนต่ำ และความลึกในการตัด
- 4) การตัดละเอียดยิ่ง (Ultra-Fine Machining) ในการตัดชิ้นงานบางอย่าง เช่น การกลึงเลนส์ การกลึงอะลูมิเนียมให้พื้นผิวสำเร็จเป็นมันวาวคล้ายกระจก ค่าความขรุขระจะน้อยมากเป็นพิเศษ การจำแนกประเภทของการตัดโดยค่าความขรุขระของผิวสำเร็จดังนี้



รูปที่ 2.11 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิต

- การตัดหยาบ R_a ตั้งแต่ 12.5 ไมโครเมตร ขึ้นไป
- การตัดปานกลาง R_a ระหว่าง 0.8-12.5 ไมโครเมตร
- การตัดละเอียด R_a ระหว่าง 0.2-0.8 ไมโครเมตร
- การตัดละเอียดยิ่ง R_a ตั้งแต่ 0.1 ไมโครเมตร ลงไป

2.3.4 ลักษณะทั่วไปของพื้นผิว

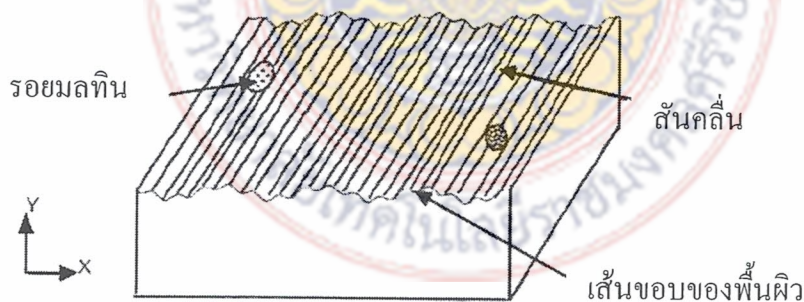
1) พื้นผิว (Surface) หมายถึง ส่วนนอกสุดของวัตถุที่จะต้องสัมผัสกับอวกาศ (Space) หรือสัมผัสเกี่ยวข้องกับวัตถุอื่นพื้นผิวของวัตถุส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเหมือนเกลียวคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวผสมกับละลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น

2) พื้นผิวสำเร็จ (Finish Surface) หมายถึง พื้นผิวที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิต เช่น พื้นผิวขึ้นงาน หรือชิ้นส่วนที่ได้จากการกลึง ไส กัด เจาะ หรือแม้กระทั่งกรรมวิธีที่ไม่ใช่การตัด เช่น การหล่อ การรีด การอัด เป็นต้น

3) ความเป็นคลื่น (Waviness) หมายถึง การเกิดคลื่นที่มีช่วงความยาวคลื่น ส่วนมากจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) จึงอาจแสดงได้โดยขนาดแอมพิจูด (Amplitude) ของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่นความขรุขระหมายถึง ละลอกคลื่นสั้นความขรุขระอาจแสดงได้โดยขนาดของคลื่น และโดยความยาวของคลื่นขอบเส้น เป็นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง

4) ความขรุขระผิว หมายถึง ละลอกคลื่นมีช่วงคลื่นสั้นความขรุขระผิวอาจแสดงได้โดยขนาดของคลื่น และโดยความยาวคลื่น

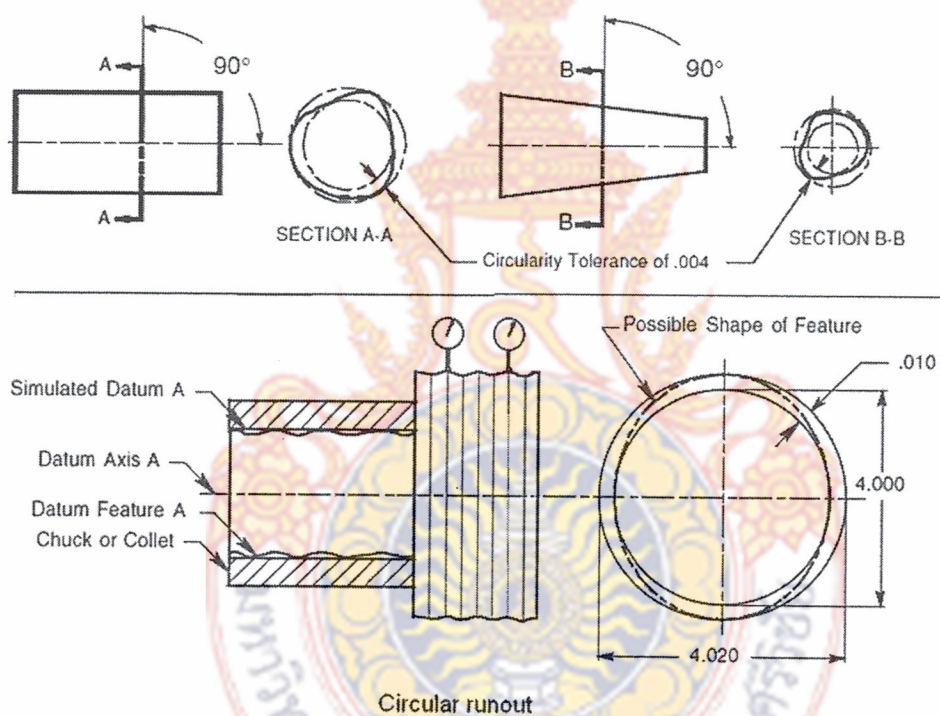
5) เส้นขอบ (Profile) เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างพื้นผิวสำเร็จ

2.4 ความกลม (Roughness)

การกลึงเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งใช้ทำการผลิตชิ้นงานรูปทรงกระบอกภายในหรือภายนอกได้อย่างมีคุณภาพ ค่าความแม่นยำทางขนาดของกระบวนการกลึง การสึกหรอของเครื่องมือตัด คุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานสำเร็จนับได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญยิ่ง ซึ่งปัจจุบันปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ในกระบวนการผลิต [1] อย่างไรก็ตามค่าความหยาบผิวและค่าความกลม ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเงื่อนไขสำคัญอย่างยิ่งที่จะถูกพิจารณาถึงค่าที่ตรวจสอบได้สำหรับชิ้นส่วนในทางวิศวกรรม ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณภาพของชิ้นงานซึ่งเป็นที่ต้องการสูงมากในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.13 การวัดค่าความกลม (Circularity)

ที่มา <http://www.comscan.biz/content/circularity>

อุปกรณ์การตรวจสอบรูปทรงของชิ้นงานโดยวิธีการขยายให้ใหญ่ขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมสูงมากขึ้นและเครื่องมือวัดแบบสัมผัสจะถูกใช้ในการวัดค่าความหยาบผิวในอุตสาหกรรมและห้องทดลองเพราะมีความรวดเร็ว มีความสามารถในการทำซ้ำ ง่ายต่อการทำงาน ราคาไม่สูงมากนัก และใช้เป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย [2] คุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานสำเร็จจะเป็นตัวแปรสุดท้ายของการทำงานและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) เป็นค่าที่ได้รับความนิยมในการใช้ตรวจสอบเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมสำหรับการกำหนดค่าความหยาบผิว [3]

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental)

เซอร์ โรนอล เอ. ฟิชเจอร์ (Sir Ronald A. Fisher) เป็นผู้คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น เนื่องจากการที่ได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับการรับผิดชอบทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางการเกษตรรอตทัมสเตต มหานครลอนดอน ประเทศอังกฤษเป็นเวลานานหลายปี ฟิชเจอร์ เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง ในปี ค.ศ. 1933 ฟิชเจอร์ ก็ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยลอนดอน การนำออกแบบการทดลองไปใช้ในยุคแรก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรและชีวภาพ ซึ่งทำให้คำศัพท์และคำนิยามส่วนมากที่ใช้กันอยู่ทางด้านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสาขาทางการเกษตรและชีวภาพ อย่างไรก็ตามการนำการออกแบบการทดลองมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมครั้งแรกปรากฏประมาณช่วง ปี ค.ศ. 1930 ซึ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง คืออุตสาหกรรมสิ่งทอ หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลงวิธีการออกแบบการทดลองก็เริ่มได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากในการใช้การออกแบบการทดลอง สำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ก็ยังมีมีการนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งานและประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมาได้มีการฟื้นฟูความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองขึ้นในสหรัฐอเมริกา เพราะอุตสาหกรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่นๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว และวิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นปัจจัยสำคัญ ต่อความสำเร็จทางด้านการแข่งขัน

2.5.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองจะให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปข้อมูลที่ได้อย่างสมเหตุสมผล วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลอง นั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการทดลองที่จะนำ มาใช้และหลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

2.5.1.1 เรพลีเคชั่น (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ เรพลีเคชั่นมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรพลีเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาด กลายเป็นหน่วยของการชี้วัดขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมวลผลกระทบบนี้

2.5.1.2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและลำดับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่ทำแรนดอมไมเซชันการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

2.5.1.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจ ต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.5.2 แนวทางในการออกแบบการทดลองใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหาจะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องการเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2.5.2.2 การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดของเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองให้มีจำนวนน้อยการเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรของเขตให้กว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

2.5.2.3 เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบนี้ ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือทั้งคู่ ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดค่าตัวแปรนั้น อย่างไร

2.5.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาขนาดตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชัน ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เรา จะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้ เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

2.5.2.5 การทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจ ว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลอง ถือว่า การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อ ความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

2.5.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลอง เพื่อผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองถูก ออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็น วิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมี เครื่องมือช่วยวัดที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทาง วิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความ น่าเชื่อถือ

2.5.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะ ต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทาง กราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการ ทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5.3 การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ (Single Factor Experiment) มี a ระดับของ ปัจจัย (a เงื่อนไข) โดยการทดลองเป็นแบบการสุ่มสมบูรณ์ ลำดับการทดลองแบบสุ่มเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการหลีกเลี่ยงผลของตัวแปรรบกวนที่ไม่ทราบค่า ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ค่าไป หรือไม่สามารถควบคุมได้ในขณะทำการทดลอง

2.5.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน หากมีค่าระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่างๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นตรง

2.5.3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

2.5.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป กรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น กรณี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลีเคต จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลองและเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือปัจจัยเหล่านั้นมีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากการเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในการทดลองบางอย่าง อาจพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะเกิดขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ปัจจัย เป็นการออกแบบการทดลองที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับและปัจจัย C มี c ระดับ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลองเท่ากับ $abc\dots n$ สำหรับแบบจำลองแบบตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติที่ใช้ F – Test จำนวนชั้นความเสรีสำหรับผลหลักใดๆ มีค่าเท่ากับระดับของปัจจัยจำนวนระดับลบด้วย 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย

2.5.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ใช้งานมากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น

2.5.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 เป็นการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix)

2.5.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองมีความเหมาะสม เพียงใด นั่น คือ ในการทดลองจะเกิดความผิดพลาดทุกครั้ง ดังนั้นค่าการทดลองที่ดี ต้องมีความผิดพลาด (e_{ih}) น้อยที่สุด วิธีการทดสอบว่าการทดลองที่มีความเหมาะสมคือ การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความผิดพลาด

ที่เกิดขึ้น (Error) ที่เป็นไปตามหลัก $e_{ih} \sim NID(0, \sigma^2)$ ซึ่งทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้หรือไม่

2.5.4.5 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

1) การตรวจสอบว่ามีการกระจายของแบบปกติหรือไม่โดยใช้ Normal Probability Paper หรืออิตโตแกรมทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือและค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบเส้นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภาพการกระจายทดสอบโดยดูจากค่าความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าลำดับการสุ่มที่สามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภาพการกระจาย ทดสอบโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปฏิบัติ (Treatment) และเศษเหลือว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละการปฏิบัติมีความสูงไม่แตกต่างกันแสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

2.5.4.6 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

2.5.4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วแยกความแปรปรวนเนื่องจาก ทรีตเมนต์และความแปรปรวนที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่งหมายถึง รีพีทอะบิลิตีแล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่เทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือรีโปรดิวซิเบิล (Reproducibility)

2.5.4.8 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรมนั้นมักต้องทำการตัดสินใจภายใต้ตัวแปรจำนวนอย่างน้อยสองตัวหรือมากกว่าที่มีความสัมพันธ์กัน

2.5.4.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย เมื่อมีตัวแปรอิสระหนึ่งตัวแปรและตัวแปรตามหนึ่งตัวแปร แต่ถ้าหากตัวแปรตามหนึ่งตัวแปรกับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปรจะเรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression)

2.5.4.10 การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอยเป็นสถิติที่ใช้ในการทำนายตัวแปรวิธีหนึ่ง เมื่อมีตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว และต้องการทดสอบว่าตัวแปรต้นนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างไร ในกรณีที่มีตัวแปรเพียง 2 ตัวเช่นนี้การวิเคราะห์การถดถอยนี้เรียกว่า Bivariate regression หรือ Simple regression

2.5.4.11 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) บางครั้งเรามีข้อมูลลักษณะเป็นกลุ่ม (Category data) อยู่สองกลุ่ม เช่น เครื่องจักรกับชิ้นงานที่ผลิตได้ เพศของ

นักเรียนกับคณะที่เลือกอันดับหนึ่งในการสอบเข้าเรียนต่อในมหาวิทยาลัย เป็นต้น เราต้องการจะพิสูจน์ว่าตัวแปรที่หนึ่งเป็นเหตุหรือมีผลต่อตัวแปรที่สองหรือไม่ เครื่องมือที่ใช้เพื่อทำการทดสอบข้อมูลลักษณะนี้ เราเรียกว่า Contingency Table หรือบางครั้งก็เรียก Chi-square test

2.5.4.12 การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability) เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทรีตเมนต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่

2.5.4.13 การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis)



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาสภาวะในการคว้านรูในของชิ้นงานท่อด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการออกแบบ การทดลอง ซึ่งในการทดลองขั้นตอนต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการทดสอบความมีคุณภาพของข้อมูล ความ เป็นอิสระของข้อมูล และการเปรียบเทียบการแปรปรวนของข้อมูล โดยมีการดำเนินงานดังนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

ใช้เวลา 12 เดือน เริ่มตั้งแต่ กุมภาพันธ์ 2557 ถึง มิถุนายน 2558

ตาราง 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ

ขั้นตอนดำเนินงาน	ปี 2556				
	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	P	←→			
	A	←→			
2. ออกแบบการทดลอง	P	←→			
	A	←→			
3. จัดเตรียมเครื่องจักรและชิ้นงานทดลอง	P	←→			
	A	←→			
4. ดำเนินการทดลอง และบันทึกข้อมูล	P	←→	←→		
	A	←→	←→		
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	P		←→	←→	
	A		←→	←→	
6. เขียนรายงานวิจัย	P			←→	←→
	A			←→	←→
7. จัดพิมพ์เอกสารรายงานวิจัย ปริยญาณิพนธ์	P			←→	←→
	A			←→	←→
8. เสนอผลงานวิจัย	P			←→	←→
	A			←→	←→

3.2 การออกแบบการทดลองและเครื่องมือ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความกลมในการกลึงคว้านรูของท่อในอุตสาหกรรมปิโตเลียม ชนิดวัสดุ S45C ผู้ทดลองได้แบ่งขั้นตอนการออกแบบการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกจะทำการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง ในการทดลองแต่ละระดับ ขั้นตอนที่สองจะเป็นการทดลองปรับตัวแปรเพื่อหาค่าความสูงครีป ขั้นตอนที่สามจะเป็นการทดลองเพื่อยืนยันผล

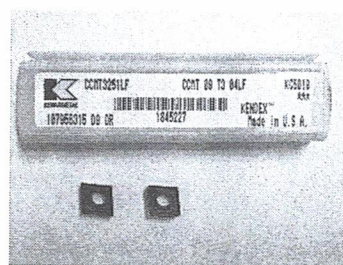
3.2.1 วัสดุชิ้นงานและใบมีดตัด

1) ชิ้นงานท่อในอุตสาหกรรมปิโตเลียม ชนิดวัสดุ S45C จากการศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์พบว่าขนาดชิ้นงานที่ใช้อยู่ทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ $2\frac{1}{4}$ นิ้ว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ $1\frac{3}{4}$ นิ้ว มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานท่อในอุตสาหกรรมปิโตเลียม

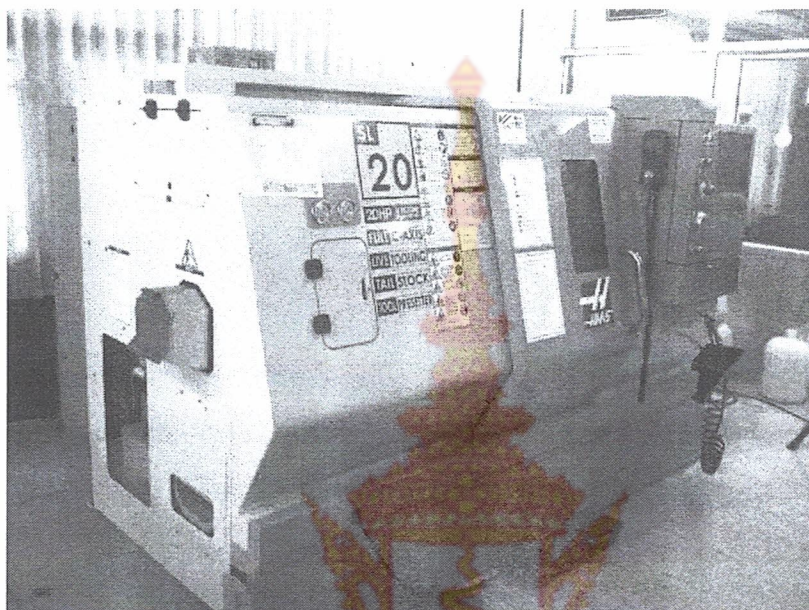
2) เม็ดมีดกลึง KENNAMETAL CCMT 09 T3 04LF วัสดุเม็ดมีด KC5010 เม็ดมีดแบบ Positive Insert Geometry, LF – Smooth cut pre-turning surface มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 และ ด้ามมีดกลึงคว้าน KENNAMETAL A00S-SCLCR 09 ND9



รูปที่ 3.2 ลักษณะเม็ดมีดคว้านรู

3.2.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ HAAS รุ่น SL-20



รูปที่ 3.3 เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

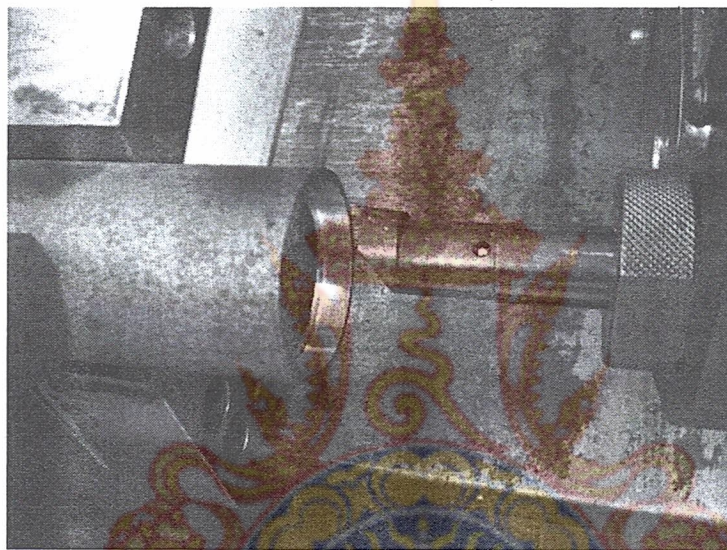
- 2) นาฬิกาวัดความเรียบผิวยี่ห้อ Mitutoyo KEZ088 ความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 นาฬิกาวัดความเรียบผิว

3.3 การกลึงคว้านรูชิ้นงาน

การออกแบบวิธีการวัด (Design of Measurement Method) การวัดค่าความกลมของรูคว้านที่ผิวด้านในของท่อที่ผ่านการคว้านรูลักษณะดังรูปที่ 3.5 การทดลองนี้จะทำการคว้านรูของท่อที่ระดับต่างๆกันโดยมีระยะความลึก 10 มิลลิเมตร และใช้นาฬิกาวัดความเรียบผิววัดค่าความกลมของรูคว้านบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดย แล้วทำการวัดค่าความกลมโดยหมุนชิ้นงานรอบตัวเองและอ่านค่าความกลมของรูคว้านที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การกลึงคว้านรูกลม



รูปที่ 3.6 การวัดค่าความกลม

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง

3.4.1 การทดลองที่ 1

การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่างในการออกแบบการทดลองนี้จะใช้โปรแกรมมินิแท็ปรุ่น 14 อาศัยหลักการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เนื่องจากพารามิเตอร์ α , β , σ , A จะเป็นค่าที่กำหนดค่าแน่นอนไม่ได้ เพียงแต่จะประมาณการเท่านั้น ประกอบกับในงานวิศวกรรมขนาดของตัวอย่างจะได้รับการกำหนดอยู่แล้วภายใต้ข้อจำกัดทางวิศวกรรม โดยให้ป้อนค่าที่เก็บได้จากการทดลอง โดยที่มีปัจจัยเดียวตลอดทั้งการทดลอง และให้ป้อนข้อมูลขนาดตัวอย่าง (n) ในช่วงที่สามารถทำการทดลองได้ เพื่อพิจารณาถึงความไวของขนาดสิ่งตัวอย่างที่มีผลต่อค่ากำลังการทดสอบภายใต้ขนาดความแตกต่างสูงสุด โดยค่าความแตกต่างจะพิจารณาจากค่าความกลมของรูคว้านซึ่งถือว่าความแตกต่างที่ทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน โดยค่าทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) โดยการเก็บข้อมูลจากอัตราป้อน 0.080 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการกลึง 0.20 มิลลิเมตร และความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ซึ่งสามารถตรวจสอบค่าความกลมเฉลี่ยของรูคว้าน ต่อจากนั้นให้นำค่าไปคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.1

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_i - \mu)^2}{n}} \quad (3.1)$$

การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่างโดยนำค่าเฉลี่ย (SS Means) ค่าความกลมของรูคว้านไปทำการคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Assumed standard deviation) จากนั้นนำมาหาจำนวนครั้งในหาทดลองแต่ละระดับหรือขนาดสิ่งตัวอย่าง (Power and Simple Size)

3.4.2 แผนการทดลองที่ 2

การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของสภาวะในการกลึงคว้านที่มีผลต่อค่าความกลมของรูคว้าน การออกแบบการทดลองทั่วไปหลายระดับ (General Factorial Design) ครั้งนี้ได้กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อค่าความกลมของรูคว้านมีค่าคงที่ และกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อค่าความกลมของรูคว้านไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ตาราง 3.2 ตัวแปรสำหรับแผนการทดลองตอนที่ 2

	ระดับการทดลอง			
	1	2	3	4
อัตราป้อนตัด (Feed) (mm/rev)	0.065	0.080	0.095	
ความลึกกลึง (Depth) (mm)	0.16	0.20	0.24	0.28
ความเร็วตัด (Speed) (m/min)	135	150	165	

3.4.3 แผนการทดลองที่ 3

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อยืนยันว่า ผลการทดลองให้การทดลองที่สอดคล้องกัน โดยเป็นการนำสมการเชิงเส้นจากสมการแผนการทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อปรับตัวแปรเพื่อหาค่าความกลมของรูคว้านที่มีผลต่อการทดลอง และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงสำหรับการนำมาพยากรณ์สภาวะการกลึงคว้านรูที่เกิดจากการสุ่มเลือกและนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

การออกแบบการทดลองได้ทำการสุ่มสภาวะการกลึงคว้านรูอยู่ในขอบเขตของสมการเชิงเส้นตรงสามารถพยากรณ์ได้โดยการสุ่มเลือก 8 สภาวะการกลึงคว้านรูโดยกำหนดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์



บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

4.1 การทดลองที่ 1

การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่างมีผลการทดลองโดยค่าสถิติที่ใช้สำหรับข้อมูลคือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์และระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการเก็บข้อมูลการทดลองคว้านรูเมื่อกำหนดสภาวะการกลิ้ง อัตราป้อน 0.080 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการกลิ้ง 0.20 มิลลิเมตรและความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที การทดลองซ้ำในสภาวะการตัด 16 ครั้ง

การทดลองในการหาขนาดสิ่งตัวอย่างนำค่าเฉลี่ยความกลมเท่ากับ 0.0036 ไปทำการคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีผลแสดงในรูปที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 0.000681 จากนั้นนำมาหาจำนวนครั้งในหาทดลองแต่ละระดับโดยใช้โปรแกรมมินิแทป พบว่าควรเลือกใช้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 5 ตัวอย่าง ซึ่งไม่มีความไวต่อกำลังการทดสอบโดยดูจากค่าความเชื่อมั่นที่ 96.1828 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

Descriptive Statistics: Test-1

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Maximum
Test-1	0.003600	0.000152	0.000681	0.003000	0.005000

รูปที่ 4.1 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานความกลม

Power and Sample Size

One-way ANOVA

Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.000681 Number of Levels = 3

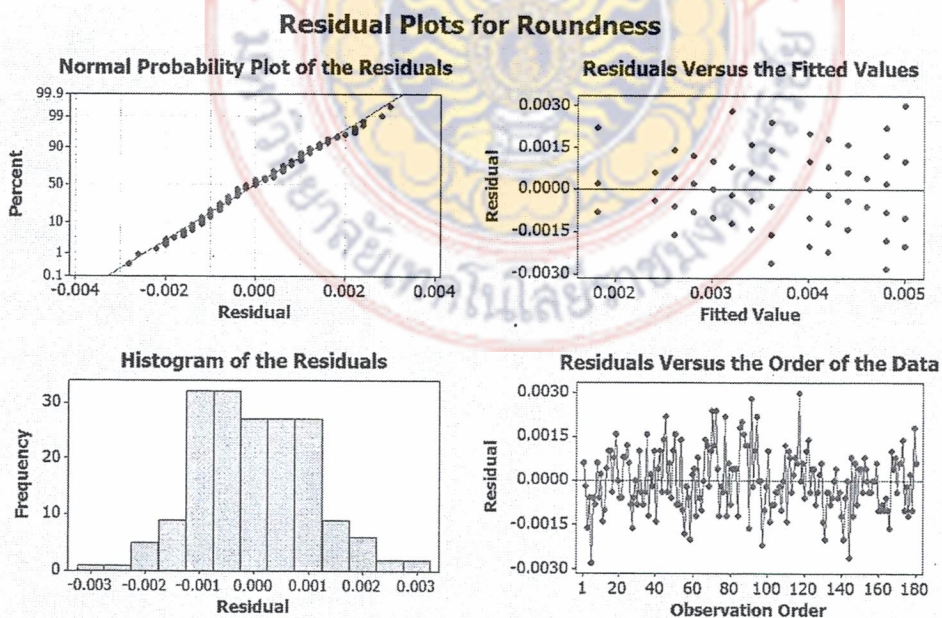
SS Means	Sample Size	Power	Maximum Difference
0.000002	2	0.337473	0.002
0.000002	3	0.694010	0.002
0.000002	4	0.884878	0.002
0.000002	5	0.961828	0.002
0.000002	6	0.988433	0.002
0.000002	7	0.996729	0.002

The sample size is for each level.

รูปที่ 4.2 การประมาณค่าความไวต่อกำลังการทดสอบ

เมื่อดำเนินการทดลองตามทีออกแบบไว้ก็จะได้ค่าความกลมรูดว่าน ซึ่งก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต้องทำการตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน ดังรูปที่ 4.3 คือ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นต้องทราบก่อนว่าข้อมูลนั้นมีคุณภาพหรือไม่ตามลักษณะสมบัติของข้อมูล

1) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากการสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายรอบค่าที่ควรจะเป็นเท่าๆกัน เนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่แผนภาพกระจาย (Residuals the Fitted Values) โดยแกน X คือลำดับการทดลอง และแกน Y คือค่าเศษเหลือถ้าข้อมูลที่เก็บมาถ้ามีความเป็นอิสระต่อกันนั้นค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภาพกระจายต้องกระจัดกระจายไร้รูปแบบไม่มีแนวโน้มหรือออกนอกพิสัย (Outlier) แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาไม่ได้เก็บมาอย่างสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลมีรูปแบบไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้ว แสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ จากภาพแสดงให้เห็นถึงการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจะเห็นได้ว่าการกระจายข้อมูลอย่างอย่างไรรูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่าไม่มีความเป็นอิสระของข้อมูล นั่นคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม



รูปที่ 4.3 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

2) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวสุ่มจะต้องมีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสาเหตุของการเฉลี่ยออกของสิ่งที่ไม่ได้รับการควบคุม แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ กระจายทดสอบความเป็นปกติ โดยแกน X คือค่าเฉลี่ยและแกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน ถ้าการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ แสดงว่าข้อมูลได้มาจากกระบวนการที่กำหนดเป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขปัญหาก่อนการวิเคราะห์จากรูปที่ได้มีลักษณะเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3) การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability Test) เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทริตเมนต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่โดยข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้จัดทำเป็นมาตรฐาน แล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่แผนภาพการกระจาย ดังแสดงในโดยแกน X คือผลต่างของความขรุขระ และแกน Y คือ ค่าเฉลี่ยเหลือถ้าข้อมูลที่เก็บมามีเสถียรภาพความแปรปรวนค่าเฉลี่ยเหลือที่ใส่ลงในแผนภาพกระจายต้องมีความยาวเท่ากัน

จากรูปที่ 4.3 แกน X คือ ผลต่างของค่าความสูงครีบตัดและแกน Y คือ ค่าเฉลี่ยเหลือถ้าข้อมูลที่เก็บมามีเสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเฉลี่ยเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภาพกระจายต้องมีความยาวเท่าๆ กันดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนตามที่ได้ออกแบบไว้

การประเมินคุณสมบัติทั้ง 3 ประการของข้อมูล การทดสอบหาค่าความกลมของรูคว้านสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติ ทั้ง 3 ประการ คือ ข้อมูลมีความเป็นอิสระ ข้อมูลมีความเป็นปกติ และข้อมูลมีความเสถียรภาพ

4.2 การทดลองที่ 2

การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis) หลังจากการทดลองโดยการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลเมื่อพบว่าข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเรียบร้อยแล้วก่อนนำข้อมูลมาวิเคราะห์ต้องทำการตรวจสอบก่อนว่า ข้อมูลที่เก็บมาภายใต้การออกแบบการทดลองมีความผิดพลาดเล็กน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจถ้าหากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง แสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบสมการ และสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแต่ถ้าสัมประสิทธิ์ต่ำ แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาเนื่องจากการออกแบบนั้นมีสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้จำนวนมาก จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความรู้ในเชิงวิศวกรรมใหม่และจะต้อง

ออกแบบการทดลองใหม่โดยการเพิ่มบล็อก (Blocking) โดยกันแหล่งความแปรปรวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป และภายหลังจากที่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนและทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงครีบตัด เพื่อนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไปดังสมการที่ 4.1

$$R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย}}{\text{ความแปรปรวนของข้อมูล}} \quad (4.1)$$

แต่เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตีค่าความหมาย R-Square จึงต้องใช้สถิติอีกตัวในการประเมินที่เรียกว่า R-Square ที่ได้รับการปรับค่า R-Square (adjust)

การวิเคราะห์ผลการทดลองของผลการทดสอบวัดความขรุขระผิวตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 34.56 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjust R^2 มีค่าเท่ากับ 18.66 เปอร์เซ็นต์ นั้นแสดงถึงความสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้

ดังนั้นจะได้ว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่าความสูงครีบตัด ส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายได้ แสดงว่าการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสมจึงสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการวิเคราะห์ด้วยรูปที่ 4.4

General Linear Model: Roundness versus Feed, Depth, Speed

Factor	Type	Levels	Values
Feed	fixed	3	0.065, 0.080, 0.095
Depth	fixed	4	0.16, 0.20, 0.24, 0.28
Speed	fixed	3	135, 150, 165

Analysis of Variance for Roundness, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed	2	0.0000462	0.0000462	0.0000231	16.56	0.000
Depth	3	0.0000028	0.0000028	0.0000009	0.67	0.570
Speed	2	0.0000030	0.0000030	0.0000015	1.08	0.342
Feed*Depth	6	0.0000233	0.0000233	0.0000039	2.79	0.014
Feed*Speed	4	0.0000074	0.0000074	0.0000019	1.33	0.261
Depth*Speed	6	0.0000114	0.0000114	0.0000019	1.37	0.232
Feed*Depth*Speed	12	0.0000119	0.0000119	0.0000010	0.71	0.741
Error	144	0.0002008	0.0002008	0.0000014		
Total	179	0.0003069				

S = 0.00118087 R-Sq = 34.56% R-Sq(adj) = 18.66%

รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความกลม

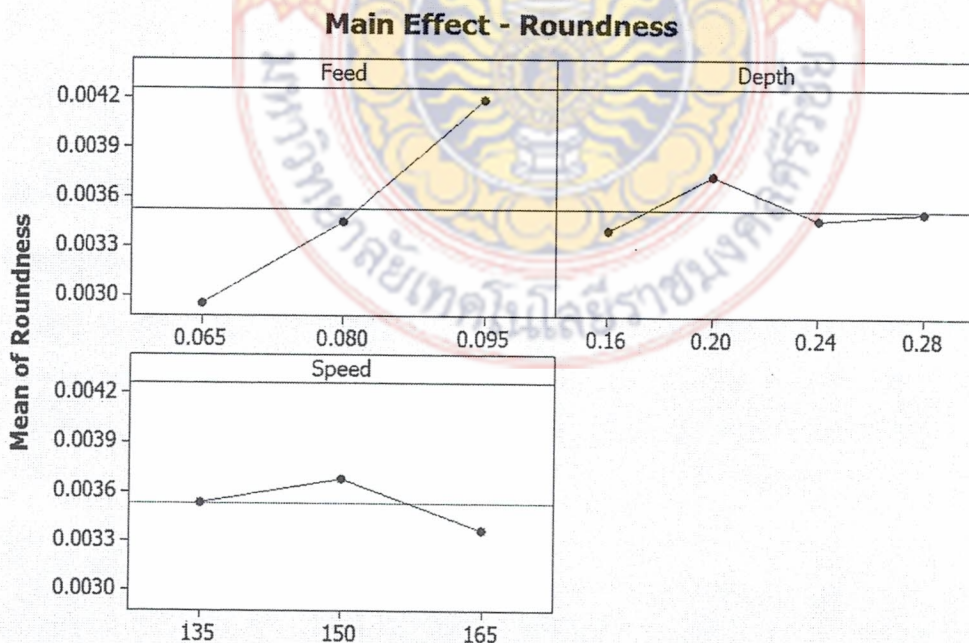
ผลการวิเคราะห์จากสมมติฐานการทดลอง

H_0 : ตัวแปรไม่มีผลต่อค่าความกลม

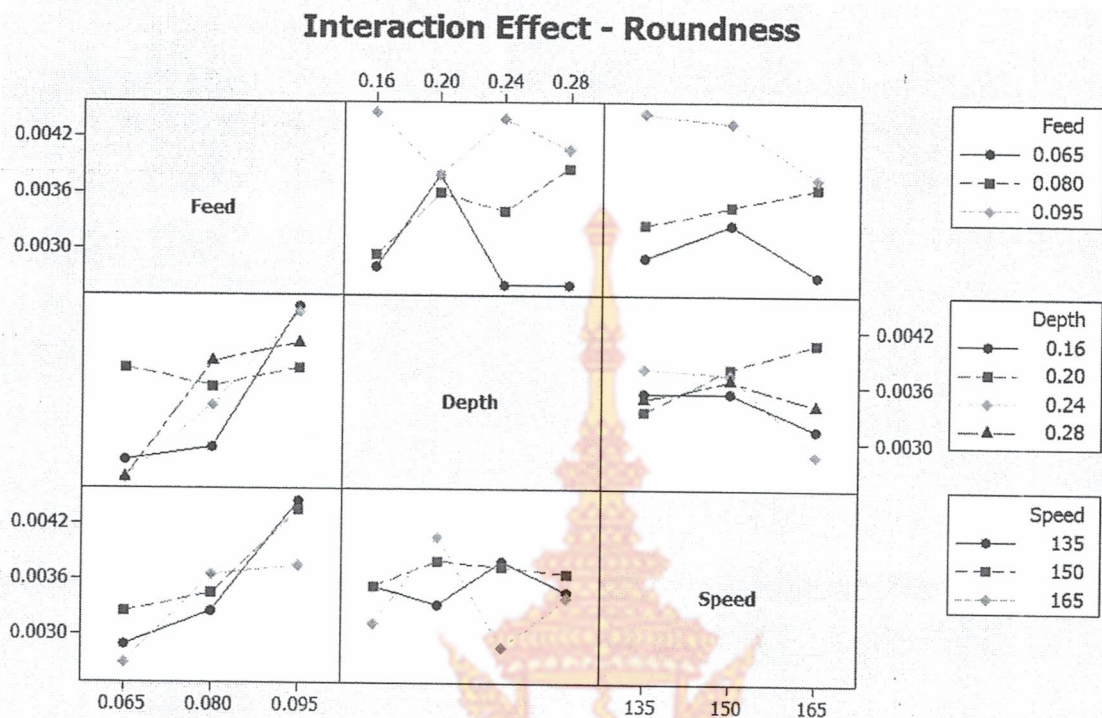
H_1 : ตัวแปร มีผลต่อค่าความกลม

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% ($\alpha = 0.05$) จะได้ค่า F_{α, v_1, v_2} จากตาราง F - Ratio ที่ $\alpha = 0.05$ จะได้ค่า F โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจคือ ถ้า F-Ratio มีค่ามากกว่า F_{α, v_1, v_2} จะปฏิเสธ H_0 หมายถึงตัวแปรนั้นจะมีผลต่อค่าความกลม

- 1) การวิเคราะห์ค่าอัตราป้อน จากรูปที่ 4.4 ค่า P-Value = 0.000 มีน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าอัตราป้อนมีผลต่อค่าความกลม
- 2) การวิเคราะห์ค่าความลึกจากรูปที่ 4.4 พบว่ามีค่า P-Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐาน H_0 สรุปว่าค่าความลึกในการคว้านไม่มีผลต่อค่าความกลม
- 3) การวิเคราะห์ค่าความเร็วตัดจากรูปที่ 4.4 พบว่ามีค่า P-Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าความเร็วตัดในการคว้านไม่มีผลต่อค่าความกลม
- 4) การวิเคราะห์ค่า Interaction ระหว่างปัจจัยนั้นพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอัตราป้อนและความลึกมีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือยอมรับ H_1 ซึ่งกล่าวได้ว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอัตราป้อนและความลึกมีผลต่อค่าความกลม



รูปที่ 4.5 ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าความกลม



รูปที่ 4.6 ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความกลม

ผลการวิเคราะห์การทดลองจากรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความกลมของการคว้านรูชิ้นงาน คือ ค่าอัตราป้อน โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อค่าอัตราป้อนมีค่ามากขึ้นค่าความกลมของการคว้านรูก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

4.3 การทดลองที่ 3

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่าความสูงครีบบัดที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยค่าอัตราป้อน ค่าความลึกในการกลึง และความเร็วตัด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองปรับตัวแปรเพื่อหาค่าความสูงครีบบัด ซึ่งทำการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรมมินิแทบ รุ่น 14 โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7

Regression Analysis: Roundness versus Feed, Depth, Speed

The regression equation is

$$\text{Roundness} = 0.00104 + 0.0411 \text{ Feed} + 0.00017 \text{ Depth} - 0.000006 \text{ Speed}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.001036	0.001338	0.77	0.440
Feed	0.041111	0.007402	5.55	0.000
Depth	0.000167	0.002027	0.08	0.935
Speed	-0.00000556	0.00000740	-0.75	0.454

$$S = 0.00121633 \quad R\text{-Sq} = 15.1\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 13.7\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0.000046477	0.000015492	10.47	0.000
Residual Error	176	0.000260384	0.000001479		
Total	179	0.000306861			

รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์การถดถอย

การทดลองสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก และตัวแปรตามในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.1

$$R_c = 0.001036 + 0.041111 \text{ Feed} + 0.000167 \text{ Depth} - 0.00000556 \text{ Speed} \quad (4.1)$$

เมื่อกำหนดให้

R_c (Roundness)	คือ ค่าความกลม (มิลลิเมตร)
F (Feed)	คือ ค่าอัตราป้อน (0.065 - 0.095 มิลลิเมตรต่อรอบ)
D (Depth of Cut)	คือ ค่าความลึก (0.16 - 0.28 มิลลิเมตร)
S (Cutting Speed)	คือ ความเร็วตัด (135 - 165 เมตรต่อนาที)

การทดลองเพื่อยืนยันผลที่ได้สอดคล้องกันการทดลองที่ผ่านมา โดยนำสมการเชิงเส้นมาพยากรณ์ค่าความกลม โดยทำการสุ่มสภาวะการตัดอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนการพยากรณ์สำหรับค่าความสูงครีบตัดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าจริงที่ได้จากการทดลองและการคำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเบี่ยงเบนของค่าความกลมรูคว้าน

ลำดับ	Feed	Depth	Speed	Roundness measure	Roundness calculate	Error
1	0.066	0.18	145	0.005	0.0045856	0.000414414
2	0.087	0.26	161	0.004	0.0055512	-0.001551237
3	0.068	0.21	155	0.005	0.0047284	0.000271582
4	0.079	0.25	149	0.003	0.005154	-0.002153959
5	0.081	0.19	158	0.004	0.0052762	-0.001276201
6	0.092	0.23	137	0.005	0.0056183	-0.000618342
7	0.065	0.27	164	0.003	0.0046651	-0.001665145
8	0.073	0.19	152	0.004	0.004914	-0.000913953

การหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_i - F_i}{X_i} \times 100}{N} = 9.366\% \quad (4.2)$$

เมื่อกำหนดให้

- X_i คือ ค่าความกลมที่คำนวณจากสมการ (Roundness calculate)
- F_i คือ ค่าความกลมที่วัดได้จากการทดลอง (Roundness measure)
- N คือ จำนวนสภาวะการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เท่ากับ 9.366% ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด 10% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ผลการศึกษาทดลองการกลึงคว้านรูในของท่อ S45C ด้วยเครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาค่าความกลมของการกลึงคว้านรูในของท่อที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยใช้วิธีการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Block Factorial Design) การทดลองได้กำหนดตัวแปร คือ อัตราป้อน ความลึก และความเร็วดัด โดยกำหนดตัวแปรผลตอบสนอง คือ ค่าความกลมของการคว้านรู ผลการทดลองพบว่า

5.1.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความกลม คือ อัตราป้อน

5.1.2 จากการทดลองได้สมการถดถอยเชิงเส้น คือ

$$R_c = 0.001036 + 0.041111 \text{ Feed} + 0.000167 \text{ Depth} - 0.00000556 \text{ Speed}$$

โดยสมการที่ได้ก็นำไปใช้กับการกลึงคว้านรูในอัตราป้อน 0.065-0.095 มิลลิเมตรต่อรอบตัด ความลึกของการกลึง 0.16-0.28 มิลลิเมตร และความเร็วดัด 135-165 เมตรต่อนาที

5.1.3 จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการกับค่าวัดจริงโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความกลมมีค่าความคลาดเคลื่อนขนาดไม่เกิน 10% ผลการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสมการค่าความกลมเท่ากับ 9.366% ซึ่งน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าต่ำ เนื่องจาก R^2 มีค่าเท่ากับ 34.56% และค่า Adjust R^2 มีค่าเท่ากับ 18.66% นั้นแสดงถึงความสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความรู้ในเชิงวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้นและพิจารณาปรับปรุงออกแบบการทดลองใหม่โดยการเพิ่มบล็อก (Blocking) โดยกันแหล่งความแปรปรวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป

บรรณานุกรม

- [1] Lahidji, B., Determining deflection for metal turning operation. *Journal of Industrial Technology*. 13(2), pp. 21-23, 1997.
- [2] Mitsui, K. In process sensors for surface roughness and their applications. *Precision engineering*, Vol. 9, p. 212-220, 1986.
- [3] Gorlenko, O. A. Assessment of surface roughness parameters and their interdependence. *Precision Engineering*. Vol. 3:2, 1981.
- [4] กัมพล เพชรคง (2553). ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://dcms.thailis.or.th/tdc/> (วันที่ค้นข้อมูล : 9 กันยายน 2554).
- [5] ชาญชัย ศิวิไล และ สรรฐติชัย ชิวสุทธีศิลป์ (2011). การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในงานกลึงปอกเพลลาเหล็กกล้า ชนิด 37 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://researchs.eng.cmu.ac.th/UserFiles/File/Journal/18_2/7Chanchai.pdf (วันที่ค้นข้อมูล : 20 ตุลาคม 2554).
- [6] M. Marcos-Barcena. et. al. Study of roundness on cylindrical bars turned of aluminum-copper alloys UNSA92024. 13th International scientific conference on achievements in mechanical and materials engineering. 16-16 May 2005. Gliwice-Wista, Poland.
- [7] Lazaro Rico P. et.al. An experimental study of cutting parameters and roundness of a turned steel part. *International Journal of Industrial Engineering, Special Issue – Mexico Conference*, 416-422, 2010.
- [8] Mohd Hafiz Bin Ismail. An experiment study of the effect of cutting speed, depth of cut and feed rate to roundness in cnc lathe. Bachelor degree of manufacturing engineering report. University of Teknikal, Malaysia, 2009.
- [9] N. H. Rafai and M. N. Islam. Comparison of dry and flood turning in terms of quality of turned parts. *Proceeding of the World Congress on Engineering (WCS)*, Vol. III, June 30 – July 2, 2010, London, U.K.

- [10] Harish Kumar. et. al. Optimization of cutting parameters in CNC turning.
International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 3. Issue 3.
May-June 2013, pp.331-334.
- [11] Samir A. et.al. Surface roughness and roundness error prediction models in turning low
carbon steel. Vol 3, Number 2, pp.47-68. 2012.
- [12] ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ



ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง



ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 2

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
91	1	0.08	0.24	135	0.004
112	2	0.065	0.2	135	0.003
20	3	0.08	0.24	150	0.002
58	4	0.08	0.28	135	0.003
61	5	0.095	0.16	135	0.002
105	6	0.095	0.24	165	0.003
45	7	0.065	0.24	165	0.001
30	8	0.095	0.2	165	0.004
120	9	0.065	0.28	165	0.002
125	10	0.08	0.2	150	0.003
174	11	0.095	0.2	165	0.002
146	12	0.065	0.16	150	0.002
51	13	0.08	0.16	165	0.003
2	14	0.065	0.16	150	0.004
114	15	0.065	0.2	165	0.005
70	16	0.095	0.28	135	0.004
143	17	0.095	0.28	150	0.005
106	18	0.095	0.28	135	0.006
115	19	0.065	0.24	135	0.003
136	20	0.095	0.2	135	0.003
64	21	0.095	0.2	135	0.003
71	22	0.095	0.28	150	0.005
4	23	0.065	0.2	135	0.004
119	24	0.065	0.28	150	0.004
82	25	0.065	0.28	135	0.003
85	26	0.08	0.16	135	0.002

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
33	27	0.095	0.24	165	0.002
130	28	0.08	0.28	135	0.003
23	29	0.08	0.28	150	0.004
18	30	0.08	0.2	165	0.004
73	31	0.065	0.16	135	0.004
39	32	0.065	0.16	165	0.002
81	33	0.065	0.24	165	0.001
118	34	0.065	0.28	135	0.002
101	35	0.095	0.2	150	0.006
16	36	0.08	0.2	135	0.002
155	37	0.065	0.28	150	0.003
93	38	0.08	0.24	165	0.003
74	39	0.065	0.16	150	0.004
65	40	0.095	0.2	150	0.003
164	41	0.08	0.24	150	0.004
60	42	0.08	0.28	165	0.005
27	43	0.095	0.16	165	0.004
159	44	0.08	0.16	165	0.004
9	45	0.065	0.24	165	0.004
171	46	0.095	0.16	165	0.004
102	47	0.095	0.2	165	0.004
123	48	0.08	0.16	165	0.002
43	49	0.065	0.24	135	0.004
63	50	0.095	0.16	165	0.006
89	51	0.08	0.2	150	0.002
121	52	0.08	0.16	135	0.002
100	53	0.095	0.2	135	0.005
44	54	0.065	0.24	150	0.002

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
126	55	0.08	0.2	165	0.003
62	56	0.095	0.16	150	0.004
56	57	0.08	0.24	150	0.003
78	58	0.065	0.2	165	0.002
117	59	0.065	0.24	165	0.002
94	60	0.08	0.28	135	0.004
5	61	0.065	0.2	150	0.003
35	62	0.095	0.28	150	0.005
108	63	0.095	0.28	165	0.003
59	64	0.08	0.28	150	0.003
152	65	0.065	0.24	150	0.003
92	66	0.08	0.24	150	0.005
13	67	0.08	0.16	135	0.004
98	68	0.095	0.16	150	0.004
116	69	0.065	0.24	150	0.004
166	70	0.08	0.28	135	0.006
49	71	0.08	0.16	135	0.004
144	72	0.095	0.28	165	0.006
32	73	0.095	0.24	150	0.005
149	74	0.065	0.2	150	0.003
165	75	0.08	0.24	165	0.003
178	76	0.095	0.28	135	0.004
97	77	0.095	0.16	135	0.007
129	78	0.08	0.24	165	0.002
46	79	0.065	0.28	135	0.003
157	80	0.08	0.16	135	0.002
180	81	0.095	0.28	165	0.004
68	82	0.095	0.24	150	0.005

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
156	83	0.065	0.28	165	0.003
21	84	0.08	0.24	165	0.002
113	85	0.065	0.2	150	0.006
42	86	0.065	0.2	165	0.006
19	87	0.08	0.24	135	0.005
162	88	0.08	0.2	165	0.006
54	89	0.08	0.2	165	0.006
12	90	0.065	0.28	165	0.001
57	91	0.08	0.24	165	0.006
26	92	0.095	0.16	150	0.004
8	93	0.065	0.24	150	0.004
133	94	0.095	0.16	135	0.007
132	95	0.08	0.28	165	0.004
1	96	0.065	0.16	135	0.003
107	97	0.095	0.28	150	0.002
168	98	0.08	0.28	165	0.003
41	99	0.065	0.2	150	0.004
95	100	0.08	0.28	150	0.005
55	101	0.08	0.24	135	0.002
25	102	0.095	0.16	135	0.004
47	103	0.065	0.28	150	0.002
3	104	0.065	0.16	165	0.002
86	105	0.08	0.16	150	0.003
179	106	0.095	0.28	150	0.004
79	107	0.065	0.24	135	0.002
37	108	0.065	0.16	135	0.003
17	109	0.08	0.2	150	0.004
173	110	0.095	0.2	150	0.003

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
151	111	0.065	0.24	135	0.004
77	112	0.065	0.2	150	0.005
66	113	0.095	0.2	165	0.003
90	114	0.08	0.2	165	0.005
88	115	0.08	0.2	135	0.004
138	116	0.095	0.2	165	0.004
175	117	0.095	0.24	135	0.008
131	118	0.08	0.28	150	0.004
158	119	0.08	0.16	150	0.004
140	120	0.095	0.24	150	0.004
150	121	0.065	0.2	165	0.005
84	122	0.065	0.28	165	0.004
10	123	0.065	0.28	135	0.002
72	124	0.095	0.28	165	0.004
28	125	0.095	0.2	135	0.004
169	126	0.095	0.16	135	0.004
154	127	0.065	0.28	135	0.002
83	128	0.065	0.28	150	0.003
137	129	0.095	0.2	150	0.005
127	130	0.08	0.24	135	0.002
67	131	0.095	0.24	135	0.003
34	132	0.095	0.28	135	0.004
99	133	0.095	0.16	165	0.004
153	134	0.065	0.24	165	0.001
176	135	0.095	0.24	150	0.004
24	136	0.08	0.28	165	0.004
48	137	0.065	0.28	165	0.003
87	138	0.08	0.16	165	0.002

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
14	139	0.08	0.16	150	0.003
40	140	0.065	0.2	135	0.002
6	141	0.065	0.2	165	0.002
15	142	0.08	0.16	165	0.002
109	143	0.065	0.16	135	0.003
36	144	0.095	0.28	165	0.001
148	145	0.065	0.2	135	0.004
52	146	0.08	0.2	135	0.002
122	147	0.08	0.16	150	0.004
11	148	0.065	0.28	150	0.002
104	149	0.095	0.24	150	0.005
141	150	0.095	0.24	165	0.004
50	151	0.08	0.16	150	0.003
124	152	0.08	0.2	135	0.004
69	153	0.095	0.24	165	0.004
167	154	0.08	0.28	150	0.004
135	155	0.095	0.16	165	0.004
75	156	0.065	0.16	165	0.002
96	157	0.08	0.28	165	0.004
110	158	0.065	0.16	150	0.003
29	159	0.095	0.2	150	0.005
38	160	0.065	0.16	150	0.002
139	161	0.095	0.24	135	0.004
53	162	0.08	0.2	150	0.002
7	163	0.065	0.24	135	0.002
172	164	0.095	0.2	135	0.003
145	165	0.065	0.16	135	0.002
22	166	0.08	0.28	135	0.002

ตาราง ก-1 ผลการทดลองค่าความกลมของการกลึงคว้านรูใน (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Feed	Depth	Speed	Roundness
103	167	0.095	0.24	135	0.006
128	168	0.08	0.24	150	0.004
160	169	0.08	0.2	135	0.004
142	170	0.095	0.28	135	0.004
163	171	0.08	0.24	135	0.004
111	172	0.065	0.16	165	0.003
177	173	0.095	0.24	165	0.005
31	174	0.095	0.24	135	0.004
76	175	0.065	0.2	135	0.003
134	176	0.095	0.16	150	0.003
161	177	0.08	0.2	150	0.003
80	178	0.065	0.24	150	0.002
170	179	0.095	0.16	150	0.006
147	180	0.065	0.16	165	0.003

ภาคผนวก ข
ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง



ภาคผนวก ข-1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกลึง CNC ยี่ห้อ Hass CNC รุ่น SL-20



รูปที่ ข-1 เครื่องกลึงอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อเครื่องจักร

เครื่องกลึงอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ยี่ห้อ/รุ่น

ยี่ห้อ Hass CNC รุ่น SL-20

ประเทศผู้ผลิต

สหรัฐอเมริกา

ปีที่ซื้อ

พ.ศ. 2552

รายละเอียดของเครื่องจักร

MAXSPEED

45-2000 รอบ/นาที

MAXFEED

14-900 มิลลิเมตร/นาที

SPINDLEMOTER

7.5 แรงม้า

FEEDMOTER

1.5 แรงม้า

กำลังลม

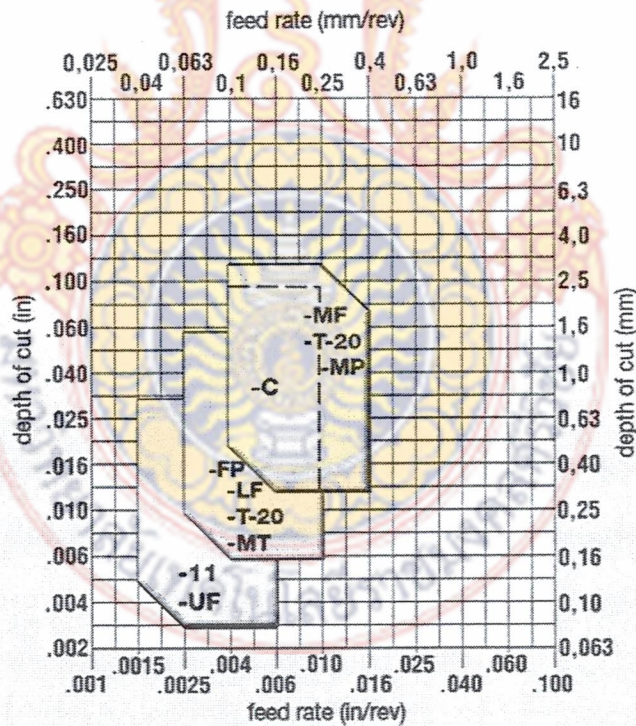
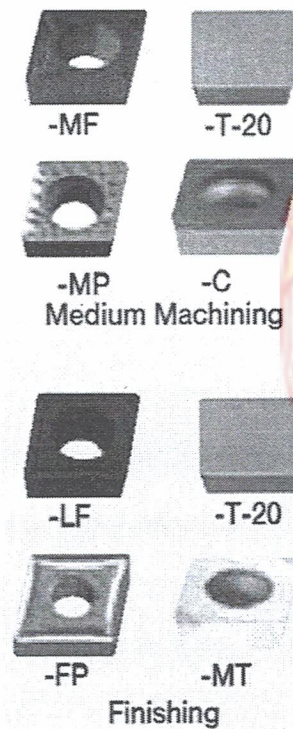
100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ภาคผนวก ข-2 ข้อมูลทางเทคนิคเครื่องมือตัดเม็ดมีด Insert

Medium- and High-Carbon Steels (>0,3% C)		speed — m/min (SFM)								starting conditions ◀		
material group	grade	135 (450)	180 (600)	225 (800)	275 (900)	320 (1050)	360 (1200)	410 (1350)	455 (1500)	495 (1650)	m/min	SFM
P2	KCP05/KTP10										240	800
	KCP10										265	880
	KCP25										195	650
	KCP30/KCP40										150	500
	KT315										270	880
	KCU10/KC5010										200	650

cutting condition	Positive Insert Geometry					
	-11/-UF	-LF	-MF	-FP	-MP	-MW
heavily interrupted cut	☼	—	KCK20	KCK20	KCK20	KCK20
lightly interrupted cut	⊙	KCU10/KC5010	KCK20	KCK20	KCK20	KCK20
varying depth of cut, casting, or forging skin	⊙	KCU10/KC5010	KCK15	KCK15	KCK20	KCK20
smooth cut, pre-turned surface	⊙	KT315	KCU10/KC5010	KCK15	KCK20	KCK20

Positive Inserts



ภาคผนวก ค
ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน



ตาราง ค-1 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.25$

		V_1																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	
V_2	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.9	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	9.71	9.76	
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44	3.45	3.46	
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	2.47	2.47	
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	1.88	1.87
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75	1.75	1.75	1.74
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	1.66	1.66	1.65
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.59
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	1.51	1.51	1.50
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.47	1.47	1.47
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.45	1.45	1.44
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.42
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.41	1.40
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.4	1.4	1.39	1.38	1.38
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.36
	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.35
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.34
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.33
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.32
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.30
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.30
	24	1.39	1.4	1.46	1.44	0.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.29
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31	1.29	1.28	1.28
	26	1.38	1.46	1.45	1.4	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29	1.28	1.28
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3	1.28	1.27	1.27
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.27	1.27
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.26	1.26
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28	1.27	1.26	1.26
40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.24	1.22	1.22	
50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23	1.21	1.19	1.19	
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22	1.18	1.16	1.16	
120	1.34	1.4	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19	1.14	1.12	1.12	

ตาราง ค-2 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.10$

		V_1																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	
V_2	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.9	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	62.53	62.8	
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44	9.47	9.47	
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	5.16	5.15	
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	3.80	3.79
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	3.16	3.14
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75	2.78	2.76	
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	2.54	2.51	
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.6	1.6	2.36	2.34	
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.55	2.23	2.21	
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	2.13	2.11	
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	2.05	2.03	
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.99	1.96	
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.93	1.90	
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.89	1.86	
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.4	1.4	1.85	1.82	
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.81	1.78	
	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.78	1.75	
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.75	1.72	
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.73	1.70	
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.71	1.68	
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.69	1.66	
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.67	1.64	
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.66	1.62	
	24	1.39	1.4	1.46	1.44	0.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.64	1.61	
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31	1.63	1.59	
	26	1.38	1.46	1.45	1.4	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.61	1.58	
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3	1.60	1.57	
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29	1.59	1.56	
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29	1.58	1.55	
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28	1.57	1.54	
40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.51	1.47		
50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23	1.44	1.40		
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22	1.37	1.32		
120	1.34	1.4	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19	1.30	1.24		

ตาราง ค-3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.05$

		V ₁																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60
V ₂	1	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246	248	249.3	250.1	251.1	252.2
	2	18.51	19	19.16	19.25	19.3	19.33	19.35	19.37	19.38	19.4	19.41	19.43	19.45	19.46	19.47	19.48	19.48
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.7	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6	5.96	5.91	5.86	5.8	5.77	5.75	5.72	5.69
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.5	4.46	4.43
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.1	4.06	4	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.4	3.38	3.34	3.30
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.5	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.95	2.89	2.86	2.83	2.79
	10	4.96	4.1	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.7	2.66	2.62
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.2	3.09	3.01	2.95	2.9	2.85	2.79	2.72	2.65	2.6	2.57	2.53	2.49
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3	2.91	2.85	2.8	2.75	2.69	2.62	2.54	2.5	2.47	2.43	2.38
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.6	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30
	14	4.6	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.7	2.65	2.6	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.9	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.4	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11
	17	4.45	3.59	3.2	2.96	2.81	2.7	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02
	19	4.38	3.52	3.13	2.9	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98
	20	4.35	3.49	3.1	2.87	2.71	2.6	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.2	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.1	2.05	2.01	1.96	1.92
	22	4.3	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.4	2.34	2.3	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89
	23	4.28	3.42	3.03	2.8	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.2	2.13	2.05	2	1.96	1.91	1.86
	24	4.26	3.4	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.3	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.84
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.6	2.49	2.4	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.9	1.85	1.80
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.2	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79
	28	4.2	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77
	29	4.18	3.33	2.93	2.27	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.1	0.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64	
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.4	2.29	2.2	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.78	1.73	1.69	1.59	1.53	
60	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246	248	249.3	250.1	1.55	1.43	
120	18.51	19	19.16	19.25	19.3	19.33	19.35	19.37	19.38	19.4	19.41	19.43	19.45	19.46	19.47	1.39	1.32	

ตาราง ค-4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.025$

		V ₁																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60
V ₂	1	647. 8	799. 8	864. 2	899. 6	921. 8	937. 1	948. 2	956. 6	963. 3	968. 6	976. 7	984. 9	993. 1	998. 1	1001	1006	1010
	2	38.5 1	39	39.1 7	39.2 5	39.3	39.3 3	39.3 6	39.3 7	39.3 9	39.4	39.4 1	39.4 3	39.4 5	39.4 6	39.4 6	39.4 7	39.4 8
	3	17.4 4	16.0 4	15.4 4	15.1	14.8 8	14.7 3	14.6 2	14.5 4	14.4 7	14.4 2	14.3 4	14.2 5	14.1 7	14.1 2	14.0 8	14.0 4	13.9 9
	4	12.2 2	10.6 5	9.98	9.6	9.36	9.2	9.07	8.98	8.9	8.84	8.75	8.66	8.56	8.5	8.46	8.41	8.36
	5	10.0 1	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.27	6.23	6.18	6.12
	6	8.81	7.26	6.6	6.23	5.99	5.82	5.7	5.6	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.11	5.07	5.01	4.96
	7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.9	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.4	4.36	4.31	4.25
	8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.3	4.2	4.1	4	3.94	3.89	3.84	3.78
	9	7.21	5.71	5.08	5.72	4.48	4.32	4.2	4.1	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.6	3.56	3.51	3.45
	10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.35	3.31	3.26	3.20
	11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.16	3.12	3.06	3.00
	12	6.55	5.1	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.01	2.96	2.91	2.85
	13	6.41	4.97	4.35	4	3.77	3.6	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.88	2.84	2.78	2.72
	14	6.3	4.86	4.24	3.89	3.66	3.5	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.78	2.73	2.67	2.61
	15	6.2	4.77	4.15	3.8	3.58	3.41	3.29	3.2	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.69	2.64	2.59	2.52
	16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.5	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.61	2.57	2.51	2.45
	17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.55	2.5	2.44	2.38
	18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.1	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.49	2.44	2.38	2.32
	19	5.92	4.51	3.9	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.44	2.39	2.33	2.27
	20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.4	2.35	2.29	2.22
	21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.8	2.73	2.64	2.53	2.42	2.36	2.31	2.25	2.18
	22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.7	2.6	2.5	2.39	2.32	2.27	2.21	2.14
	23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.9	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.29	2.24	2.18	2.11
	24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.7	2.64	2.54	2.44	2.33	2.26	2.21	2.15	2.08
	25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.3	2.23	2.18	2.12	2.05
	26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.1	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.21	2.16	2.09	2.03
	27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.8	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.18	2.13	2.07	2.00
	28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.9	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.16	2.11	2.05	1.98
	29	5.59	4.2	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.14	2.09	2.03	1.96
	30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.2	2.12	2.07	2.01	1.94
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.9	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	1.99	1.94	1.88	1.80	
50	5.34	3.97	3.39	3.05	2.83	2.67	2.55	2.46	2.38	2.32	2.22	2.17	2.06	1.94	1.87	1.74	1.67	
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.87	1.82	1.61	1.53	
120	5.15	3.8	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.3	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.75	1.69	1.48	1.39	

ตาราง ค-5 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.01$

		V_1																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	
V_2	1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6017	6157	6209	6240	6260	6287	6313	
	2	98.5	99	99.2	99.3	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.48	99.47	
	3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.7	26.6	26.5	26.41	26.32	
	4	21.2	18	16.7	16	15.5	15.2	15	14.8	14.7	14.6	14.4	14.2	14	13.9	13.8	13.75	13.65	
	5	16.3	13.3	12.1	11.4	11	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.72	9.55	9.45	9.38	9.29	9.20	
	6	13.8	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.1	7.98	7.87	7.72	7.56	7.4	7.3	7.23	7.14	7.06	
	7	12.3	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.06	5.99	5.91	5.82	
	8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.26	5.2	5.12	5.03	
	9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.8	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.71	4.65	4.57	4.48	
	10	10	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.2	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25	4.17	4.08	
	11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.4	4.25	4.1	4.01	3.94	3.86	3.78	
	12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.5	4.39	4.3	4.16	4.01	3.86	3.76	3.7	3.62	3.54	
	13	9.07	6.7	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.3	4.19	4.1	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51	3.43	3.34	
	14	8.86	6.541	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.8	3.66	3.51	3.41	3.35	3.27	3.18	
	15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4	3.89	3.8	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21	3.13	3.05	
	16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.2	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.1	3.02	2.93	
	17	8.4	6.11	5.19	4.67	4.34	4.1	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3	2.92	2.83	
	18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.6	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92	2.84	2.75	
	19	8.18	5.93	5.01	4.5	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.3	3.15	3	2.91	2.84	2.76	2.67	
	20	8.1	5.85	4.94	4.43	4.1	3.87	3.7	3.56	3.46	3.37	3.23	3.03	2.94	2.84	2.78	2.69	2.61	
	21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.4	3.31	3.17	3.03	2.88	2.79	2.72	2.64	2.55	
	22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.73	2.67	2.58	2.50	
	23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.3	3.21	3.07	2.93	2.78	2.69	2.62	2.54	2.45	
	24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.9	3.67	3.5	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.64	2.58	2.49	2.40	
	25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.7	2.6	2.54	2.45	2.36	
	26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.57	2.5	2.42	2.33	
	27	7.68	5.49	4.6	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.54	2.47	2.38	2.29	
	28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.9	2.75	2.6	2.51	2.44	2.35	2.26	
	29	7.6	5.42	4.54	4.04	3.73	3.5	3.33	3.2	3.09	3	2.87	2.73	2.57	2.48	2.41	2.33	2.23	
	30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.7	3.47	3.3	3.17	3.07	2.98	2.84	2.7	2.55	2.45	2.39	2.30	2.21	
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.8	2.66	2.52	2.37	2.27	2.2	2.11	2.02		
50	7.17	5.06	4.2	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.78	2.7	2.56	2.42	2.27	2.17	2.1	1.94	1.84		
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.5	2.35	2.2	2.1	2.03	1.76	1.66		