ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ	วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

A Study of Optimum Polishing Condition for Rotary Tool Polishing Hardness Steel

นามผู้วิจัย นายพจนศักดิ์ พจนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

A Study of Optimum Polishing Condition for Rotary Tool Polishing Hardness Steel

โดย

นายพจนศักดิ์ พจนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
พ.ศ. 2552

พจนศักดิ์ พจนา 2552: การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng. 156 หน้า

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็ง 60 ร็อกเวลเสกลซีด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน โดยทำการออกแบบหัวขัดเคลือบผงเพชรซึ่งอ้างอิงรูปแบบของหัวขัดจากมีดตัดเฉือนชนิดบอลโนส ใช้การเชื่อมประสานผงเพชรเข้ากับหัวขัดด้วยวิธีการเรซิ่น โดยมีความเข้มข้นของผงเพชรเป็น 4.4 กะรัตต่อตารางเซนติเมตร และใช้ทางเดินการกัดแบบเดินขัดไปในทิศทางเดียวแล้วยกกลับมาเริ่มขัดในระยะถัดไป (Zig Tool Path) นำมาประยุกต์ใช้เป็นทางเดินของหัวขัดในกระบวนการขัดผิว แล้วนำชิ้นงานเหล็กแข็งหลังการขัดผิวมาวิเคราะห์ความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานแบบ L_{12} เพื่อทำการศึกษาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณาคือ ขนาดอนุภาคผงเพชร, ความเร็วตัด, อัตราป้อน, ระยะป้อน, ระยะป้อนลึก และจำนวนครั้งของการขัดผิว ที่ปัจจัยละ 2 ระดับ แล้วนำผลที่ได้ไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการยืนยันความถูกต้องของการทดลองอีกครั้ง

ผลการทดลองพบว่าการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง คือ ใช้หัวขัดที่เคลือบผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 450 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และทำการขัดซ้ำ 2 ครั้ง และมีค่าทำนายอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือ 20.48 เดซิเบล นำค่าทำนายนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผล ซึ่งในขั้นตอนการทดลองเพื่อการยืนยันผลพบว่ามีอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีเฉลี่ยเป็น 19.28 เดซิเบล คิดเป็น94.18% ของค่าทำนาย และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหยาบผิวของเหล็กแข็งก่อนและหลังการขัดผิวพบว่าความหยาบผิวมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าสามารถประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนในกระบวนการขัดผิวได้เป็นอย่างดี

__________________ __________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Potejanasak Potejana 2009: A Study of Optimum Polishing Condition for Rotary Tool Polishing Hardness Steel. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 156 pages.

This research proposes a new application of 3-axis CNC milling machine for polishing the 60 HRC hardness steels. The rotary polishing tools are designed by refer to the end-mill ball nose's design. The diamond powder are coated in rotary polishing tools by resinoid bonding method and concentrated in 4.4 karat/cm^2. The Zig-milling tool paths are used to polish the hardness steel. After polishing, the confocal laser scanning microscope is used to analyze the arithmetic mean surface roughness of the hardness steels. The L_{12} orthogonal array of the Taguchi's method is selected to conduct the matrix experiment to determine the optimal polishing process parameters. The diamond grit size and cutting speed of the rotary polishing tools, feed rate and step over of the tool path, the depth of polishing process penetration, and polishing time are used to study. The combination of the optimal level for each factor of the hardness steel polishing process are used to study again in the confirmation experiment.

Experimental results show that the combination of the optimal level for each factor of the polishing process are the diamond grit size of 40-60 µm, 450 m/min cutting speed of rotary polishing tools, 50 mm/min feed rate and 20 µm step over with Zig tool path, 120 µm depth of penetration, and the number of polishing of two replication. The predicted signal to noise ratio of smaller - the better under optimal condition are calculated by using the data from the experiment are 20.48 dB. The optimal parameters for hardness steel polishing are used for the confirmation experiment. The results of the confirmation experiment are 19.28 dB mean signal to noise ratio of smaller - the better, about 94.18% of the predicted signal to noise ratio of smaller - the better under optimal condition. The results show that, the mean surface roughness of hardness steel polishing process is improved by the diamond rotary tools with the 3-axis CNC milling machine.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชนะ รักษ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ อ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาในการควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณเลิศ ทองเจือ ช่างเทคนิค ฝ่ายแม่พิมพ์พลาสติก และคุณกัมปนาท อ่วมกุล หัวหน้าฝ่ายเครื่องมือวัด สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและร่วมกันในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัทแมชชีนเนอรี่เอ็มโปเรียม (1995) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน นอกจากนี้ขอขอบพระคุณมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี และทุนสนับสนุนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

พจนศักดิ์ พจนา

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	50
อุปกรณ์	50
วิธีการ	53
ผลและวิจารณ์	73
ผล	73
วิจารณ์	109
สรุปและข้อเสนอแนะ	111
สรุป	111
ข้อเสนอแนะ	113
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	117
ภาคผนวก	120
ภาคผนวก ก ค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซีของชิ้นงานการทดลอง	121
ภาคผนวก ข ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองที่ 1 ถึง 12 ก่อนการขัดผิว	123
ภาคผนวก ค ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผลก่อนการขัดผิว	126
ภาคผนวก ง ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองที่ 1 ถึง 12 หลังการขัดผิว	128
ภาคผนวก จ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผลหลังการขัดผิว	135
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผล	139
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	156

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดอนุภาคของเพชรตามมาตรฐานของสหพันธ์ผู้ผลิตสารขัดสีภาคพื้นยุโรป	8
2	ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร	11
3	การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ ของวิธีการทากูชิ กับจำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล	28
4	การสุ่มสมบูรณ์	32
5	การสุ่มซ้ำอย่างง่าย	33
6	การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อค	34
7	มาตรฐานของตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานของวิธีการทากูชิแบบ L_{12} (L_{12} Orthogonal Array)	38
8	ระดับของแต่ละปัจจัยการทดลอง	58
9	ตารางมาตรฐานออทอกอนอล อะเรย์ L_{12} (2^6) ที่ 6 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ	59
10	ระดับของปัจจัยในแต่ละการทดลองขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด	60
11	การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อคของตารางออทอกอนอล อะเรย์ L_{12} (2^{11}) ที่ 6 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ	62
12	ลำดับการทดลองของบล๊อคแรก	63
13	ลำดับการทดลองของบล๊อคที่สอง	63
14	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a	75
15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a	86
16	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
17	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z	101
18	การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a	105
19	การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z	107

ตารางผนวกที่

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซีของชิ้นงานสำหรับการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์	122
ก2	ค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซีของชิ้นงานสำหรับการทดลองยืนยันผล	122
ข1	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 ก่อนกระบวนการขัดผิว	124
ข2	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 ก่อนกระบวนการขัดผิว	124
ค1	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 ก่อนกระบวนการขัดผิว	127
ค2	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 ก่อนกระบวนการขัดผิว	127
ง1	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	129
ง2	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ง3	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	130
ง4	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	131
ง5	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	132
ง6	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	132
ง7	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	133
ง8	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	134
จ1	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่1 หลังกระบวนการขัดผิว	136
จ2	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่2 หลังกระบวนการขัดผิว	136
จ3	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่3 หลังกระบวนการขัดผิว	136
จ4	ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่4 หลังกระบวนการขัดผิว	137
จ5	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	137
จ6	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	137
จ7	ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

จ8 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว 138

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของชิ้นส่วนที่เรียกว่าแลปในขณะแลปปิง และสภาพผิวงานก่อน (Before) และหลัง (After) การแลปปิง	4
2	ลักษณะต่างๆของหัวขัดสำหรับการแลปปิงและโพลิชชิง และวิธีใช้เครื่องมือขัดซึ่งมีทั้งแบบหมุนขับด้วยระบบลมหรือระบบไฟฟ้า	5
3	ชุดหัวขัดเคลือบเพชรและคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Diamond and Cubic Boron Nitride Mounted Points Rotary Tools)	5
4	เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	12
5	แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	13
6	การหาค่าความหยาบผิว R_p ตามลำดับที่ 2004 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660	14
7	การหาค่าความหยาบผิว R_m ตามลำดับที่ 2005 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660	15
8	การหาค่าความหยาบผิว R_z ตามลำดับที่ 2007 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660	15
9	การหาค่าความหยาบผิว R_a ตามลำดับที่ 2010 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660	16
10	เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ยี่ห้อโอลิมปัส รุ่น LEXT OLS3100	18
11	วิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงเส้นโดยการกำหนดเส้นตรงอ้างอิงจำนวน 1 เส้น ด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์แสกนเนอร์	19
12	ผลของการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเชิงเส้นด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์	19
13	ผลของการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์	20
14	ผังแสดงเหตุและผล	22
15	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	หัวขัดเคลือบผงเพชร	50
17	ชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ที่ใช้ในการทดลอง	50
18	เครื่องทดสอบค่าความแข็งรุ่น มิตูโตโย่ เออาร์เค-600	51
19	ไดอัลเกจเพื่อใช้ในการวัดระดับในแนวระนาบแกน X	52
20	การกัดผิวชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ด้วยมีดกัดบอลโนส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร	53
21	ผังแสดงเหตุและผลของการกำหนดปัจจัยที่จะนำมาทำการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดซึ่งได้จากการระดมสมอง โดยปัจจัยที่อยู่ในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่เลือกมาทำการออกแบบการทดลอง	56
22	มีดกัดบอลโนสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร	66
23	แบบจำลองชิ้นงานหัวขัดที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออโต้แคด โดยส่วนปลายของหัวขัดซึ่งมีสีดำเป็นส่วนที่ทำการเคลือบสารขัดสีชนิดผงเพชร	67
24	ทางเดินหัวขัดที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีระยะป้อน 20 ไมโครเมตร	67
25	ทางเดินหัวขัดที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีระยะป้อน 60 ไมโครเมตร	68
26	การติดตั้งหัวขัดเข้ากับคอลเลต	68
27	การติดตั้งคอลเลตเข้ากับสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน พร้อมทั้งวัดความสมดุลย์การหมุนของหัวขัดด้วยไดอัลเกจ	69
28	การวัดระนาบในแนวแกน X ของการจับยึดชิ้นงานบนปากกาจับชิ้นงานด้วยไดอัลเกจ	69
29	การป้อนโปรแกรมทางเดินของหัวขัดให้กับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน	70
30	การขัดผิวด้วยหัวขัดร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน	71
31	การปรับตำแหน่งการวัดชิ้นงานโดยการเลื่อนตำแหน่งโต๊ะงานในแนวแกน X และแนวแกน Y	71
32	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า

ภาพที่		หน้า
33	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z	92
34	ความเสียหายของชิ้นงานการทดลองจากการใช้ผงเพชรที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากเกินไป	113
35	ความเสียหายที่มีต่อหัวขัดในกรณีที่ใช้ผงเพชรที่ละเอียดมากเกินไป	114
36	ความเสียหายของชิ้นงานการทดลองซึ่งเกิดจากหัวขัดเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน Z สัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง	114
37	ชิ้นงานของทางเดินหัวขัดที่ได้รับการปรับปรุงและถูกใช้ในการทดลองทั้งหมด	115

ภาพผนวกที่

ฉ1	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	140
ฉ2	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	140
ฉ3	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	141
ฉ4	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	141
ฉ5	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	142
ฉ6	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	142
ฉ7	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	143

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ฉ8	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	143
ฉ9	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	144
ฉ10	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	144
ฉ11	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	145
ฉ12	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	145
ฉ13	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	146
ฉ14	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	146
ฉ15	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	147
ฉ16	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	147
ฉ17	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	148
ฉ18	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	148
ฉ19	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	149
ฉ20	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	149

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ฉ21	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	150
ฉ22	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	150
ฉ23	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	151
ฉ24	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	151
ฉ25	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	152
ฉ26	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว	152
ฉ27	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	153
ฉ28	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว	153
ฉ29	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	154
ฉ30	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว	154
ฉ31	สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	155
ฉ32	การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว	155

การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

A Study of Optimum Polishing Condition for Rotary Tool Polishing Hardness Steel

คำนำ

การขัดผิวเป็นกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงาน เพื่อให้มีความหยาบผิวลดลง และให้ได้คุณภาพผิวของชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การขัดผิวเป็นกระบวนการตัดเฉือนชนิดหนึ่ง โดยใช้สารขัดสีในรูปแบบผงหรือฝุ่นซึ่งวางอยู่ระหว่างชิ้นงานกับอุปกรณ์ขัดผิว สารขัดสีนี้จะทำหน้าที่ในการตัดเฉือนชิ้นงาน เพื่อให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานลดลง

อุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบัน ให้ความสำคัญกับอุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก เพราะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรง, ขนาด และคุณภาพที่มีมาตรฐานในระดับเดียวกันได้หลายชิ้นในคราวเดียวกัน การใช้แม่พิมพ์เป็นเวลานานมักจะเกิดการสึกหรอที่ผิวของแม่พิมพ์ จึงต้องการกระบวนการในการบำรุงรักษา ซึ่งการขัดผิวถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณภาพผิวของแม่พิมพ์ให้ดีขึ้น มีความเที่ยงตรงมากขึ้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาได้มาตรฐานตรงตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงกระบวนการของการขัดผิวเหล็กแข็งที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ รวมไปถึงศึกษาและออกแบบหัวขัด (Polishing Rotary Tools) ที่เหมาะสมต่อการขัดผิวเหล็กแข็ง โดยใช้ความสามารถของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน แล้วทำการศึกษาถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการขัดผิวมีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวของเหล็กแข็ง จึงนำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) มาใช้ในการศึกษาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยของกระบวนการขัดผิวที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็ง และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาการออกแบบหัวขัดและกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็ง

2. เพื่อศึกษาความหยาบผิวของเหล็กแข็งที่ได้จากกระบวนการขัดผิว

3. เพื่อออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด โดยทำการศึกษาและออกแบบหัวขัดเคลือบสารขัดสีชนิดผงเพชรที่สามารถทำการขัดผิวร่วมกับการใช้ความสามารถของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนได้ จากนั้นทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ เพื่อหาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองการขัดผิว จากนั้นนำวิธีการของกระบวนการขัดผิวที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานในภาคอุตสาหกรรม

การตรวจเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด ได้อาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่อไปนี้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย

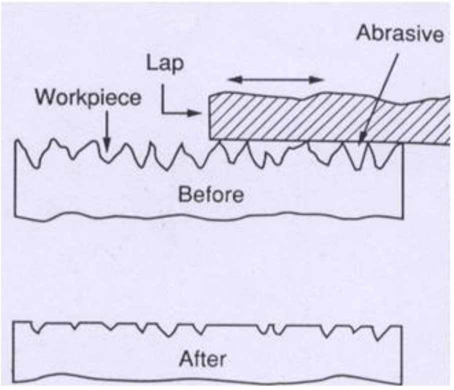
1. กระบวนการตัดเฉือนด้วยสารขัดสี (Abrasive Machining Process)
2. สารขัดสีความแข็งสูง (Super-Abrasive)
3. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน (3-Axis CNC Milling Machine)
4. ความหยาบผิว (Surface Roughness)
5. ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)
6. การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)

1. กระบวนการตัดเฉือนด้วยสารขัดสี

การแลปปิง (Lapping) และการโพลิชชิง (Polishing) เป็นกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานให้มีความหยาบผิวลดลง เพื่อให้ได้พิกัดความเผื่อของขนาดชิ้นงานดียิ่งขึ้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การแลปปิงและโพลิชชิงจัดอยู่ในกระบวนการตัดเฉือนโดยใช้สารขัดสี ซึ่งจะให้ค่าพิกัดความเผื่อของความเรียบผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น การได้ความขนานกัน (Parallelism) และความหนาที่เหมาะสม

การแลปปิงส่วนใหญ่แล้วจะใช้กับชิ้นงานที่มีความแข็ง โดยมีหลักการที่สำคัญคือ เป็นกระบวนการที่กระทำกับผิวชิ้นงานด้วยสารขัดสี (Abrasive) ทั้งแบบอ่อนและแบบแข็ง เมื่อใช้สารขัดสีแบบแข็งในรูปแบบเป็นผงหรือฝุ่นนั้นก็จะนำสารขัดสีที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาวางระหว่างผิวงานที่จะทำการแลปปิงนั้น กับชิ้นส่วนที่เรียกว่า แลป (Lap) ซึ่งโดยปกติแล้วแลปจะอ่อนกว่าชิ้นงาน และอนุภาคของสารขัดสีที่ละเอียดจะมีความแข็งมากกว่าผิวของงานและผิวของแลปที่สัมผัสอยู่ ดังนั้นภายใต้สภาวะแรงดันกดที่คงที่แน่นอนสม่ำเสมอก็จะช่วยทำให้อนุภาคของสารขัดสีที่ละเอียดนี้ฝังตัว (Embedded) เข้าไปภายในผิวหน้าของแลป จึงมีผลให้ผิวหน้าของแลปเติมเต็มหรือบรรจุอนุภาคของสารขัดสีเข้าไป ซึ่งกระบวนการที่มีแรงกระทำให้อนุภาคสารขัดสีฝังตัวเข้าไปที่ผิวหน้าของแลปนี้จะเรียกว่า การชาร์จจิง (Charging) และเมื่อผิวหน้าของแลปที่ได้รับการอัดประจุหรือชาร์จจิงแล้วนั้น นำไปเคลื่อนที่แลปปิงไปมาบนผิวงานก็จะทำให้อนุภาคของสารขัดสีที่อยู่บนผิวหน้าแลปทำการตัดอนุภาคของโลหะจากผิวหน้าชิ้นงาน

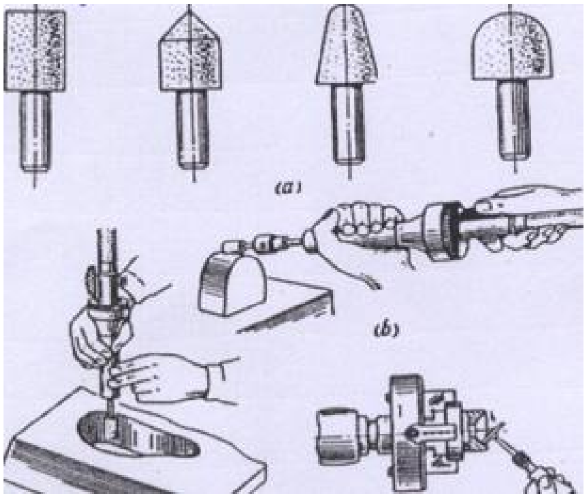
การแลปปิงด้วยสารขัดสีแบบอ่อน (Soft Abrasive) ซึ่งอยู่ในรูปแบบเนื้อครีมเหลว (Paste) จะแตกต่างจากวิธีที่ใช้สารขัดสีแบบแข็งที่กล่าวมาแล้ว และจะใช้เฉพาะกับผิวงานขั้นสำเร็จ (Finishing Surface) ที่ละเอียดเท่านั้น หลักการที่สำคัญของกระบวนการแลปปิงด้วยสารขัดสีแบบอ่อนคือ การสร้างชั้นที่ละเอียดของวัสดุอ่อน (Fine Layer of Soft Materials) บนผิวหน้าของชิ้นงานที่จะทำการแลปปิงนั้น และด้วยผลจากปฏิกิริยาทางเคมีที่มีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเนื้อครีมเหลวร่วมกับสารขัดสีในขณะที่แลปมีการเคลื่อนที่ สารขัดสีแบบอ่อนจะกำจัดเยื่อหุ้มหรือฟิล์มบางๆ ออกจากจุดที่มีการนูนยื่นออกมาจากชิ้นงาน ทำให้จุดที่เปิดออกนี้ได้รับการกระทำปฏิกิริยาอีกครั้งด้วยครีมเหลวแล้วก็จะถูกเคลือบด้วยเยื่อหุ้มหรือฟิล์มบางๆอีกครั้งหนึ่ง และกระบวนการนี้ก็จะกระทำซ้ำๆ กันต่อไปอีก จึงมีผลทำให้ผิวโลหะได้รับการกระทำด้วยกระบวนการเคมี-กลไก (Chemico-Mechanical Treatment)



ภาพที่ 1 ลักษณะของชิ้นส่วนที่เรียกว่าแลปในขณะแลปปิง และสภาพผิวงานก่อน (Before) และหลัง (After) การแลปปิง

ที่มา: อำนาจ (2548)

ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ปั๊ม (Press Tools) ที่มีความแข็งแรง และมีรูปร่างเป็นโพรง (Cavities) ได้แก่ แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป (Drawing), แม่พิมพ์ขึ้นรูปเหรียญหรือคอยนิ่ง (Coining) และแม่พิมพ์ดันรัดขึ้นรูปขณะชิ้นงานเย็น (Cold Extrusion) เป็นต้น จะทำการแลปปิงโดยใช้หัวขัดแบบเพชร (Diamond Points), แลปของทองแดง (Red Copper) และเส้นใยที่เคลือบด้วยเนื้อครีมเหลวแบบเพชร (Textolite Coated with Diamond Paste) เพื่อให้ได้การยึดติดของสารขัดสีกับผิวหน้าของแลปที่ดียิ่งขึ้น ควรทำให้ผิวหน้าของแลปนั้นมีความหยาบเกิดขึ้นเล็กน้อย โดยตะไบขนาดเล็ก (Needle File)



ภาพที่ 2 ลักษณะต่างๆของหัวขัดสำหรับการแลปปิงและโพลิชชิง และวิธีใช้เครื่องมือขัดซึ่งมีทั้งแบบหมุนขับด้วยระบบลมหรือระบบไฟฟ้า

ที่มา: อำนาจ (2548)

ภาพที่ 3 ชุดหัวขัดเคลือบเพชรและคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Diamond and Cubic Boron Nitride Mounted Points Rotary Tools)

ที่มา: ฝ่ายแม่พิมพ์พลาสติก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2552)

รูปร่างที่แตกต่างกันของหัวขัดสำหรับการขัดผิว ที่สามารถนำไปใช้งานด้วยการจับยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องจักรแบบที่มีเพลายืดหยุ่นในตัวได้ เช่น เครื่องเจียรนัยที่มีเพลาแบบยืดหยุ่นได้ (Flexible Shaft Grinding Machines) สามารถที่จะนำไปขัดผิวผิวหน้าของพันช์และดายได้ ดังในภาพที่ 2 โดยสามารถทำการขัดผิวดายตัวเมีย (Females Dies) ที่มีรูปลักษณะเป็นโพรงทรงกลม (Spherical Cavities) และสามารถทำการแลปปิงในหัวจับของเครื่องกลึงที่หมุนเคลื่อนที่ได้

อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Materials-Removal Rate) จะเป็นสัดส่วนกับสิ่งที่มีอิทธิพลเหล่านี้ คือ ความเร็วในการขัดผิว, แรงดันกด, ชนิดและขนาดของอนุภาค, ชนิดของสารขัดสี, ชนิดของสารเจือหรือของไหลที่ใช้ในการขัดผิว และสัดส่วนของอนุภาคสารขัดสีต่อหน่วยของของไหลที่ใช้ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการขัดผิวส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแลป ด้วยความเร็วที่สูงกว่าจะทำให้ได้ประสิทธิภาพ หรือความสามารถในการแลปปิงที่สูงกว่า แต่ยิ่งมีความเร็วสูงมากก็จะนำไปสู่การหกล้นกระจัดกระจายของสารขัดสีแบบครีมเหลว และนอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานอีกด้วย

คุณภาพและประสิทธิภาพของการขัดผิวนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุสำหรับการขัดผิว (Lapping and Polishing Material) ดังนั้น จึงต้องเอาใจใส่ในการเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสม เพื่อที่จะได้ประหยัดเวลา และหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ รวมทั้งจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้อีกด้วย สารขัดสีที่มีอยู่มีหลากหลายรูปแบบซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ทั้งสารขัดสีแบบอ่อน, แบบแข็ง, แบบที่มีความทนทานสูง, แบบที่เปราะและแตกหักได้ง่าย, แบบหยาบและแบบละเอียด และจากที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนกันและเป็นระเบียบไปจนถึงมีรูปร่างลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นต้น ตัวอย่างสารขัดสีสำหรับการตัดเฉือนวัสดุอ่อน เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide), การ์เน็ต (Garnet) และซีเรียมออกไซด์ (Cerium Oxide) ส่วนวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะตัดเฉือนด้วย ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide), โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide) และเพชร (Diamond)

ขนาดอนุภาคของสารขัดสีในกระบวนการขัดผิวนับเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของความหยาบผิวชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้ผู้ปฏิบัติงานขัดผิวจึงต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ขนาดอนุภาคสารขัดสีให้เหมาะสมกับกระบวนการตัดเฉือนแต่ละประเภท และควรต้องเปลี่ยนสารขัดสีจากที่มีขนาดอนุภาคหยาบไปสู่ละเอียดทีละเล็กทีละน้อย

2. สารขัดสีความแข็งสูง

หน้าที่ของสารขัดสีคือ การตัดเนื้อวัสดุออกมา แต่เนื่องจากสารขัดสีแต่ละตัวมีอนุภาคขนาดเล็ก ฉะนั้นถ้าต้องการที่จะตัดเนื้อวัสดุให้ออกมาในอัตราที่มากๆ ต่อหน่วยเวลา จะต้องใช้สารขัดสีจำนวนมากในเวลาเดียวกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความต้องการนำเอาสารขัดสีมาจับตัวกัน หรือเชื่อมประสานกัน (Bonded Abrasive) เพื่อทำให้สารขัดสีเหล่านั้นสามารถทำการตัดเฉือนพร้อมกันได้หลายอนุภาคในเวลาเดียวกัน

สารขัดสีชนิดที่มีความแข็งสูง เช่น เพชรและคิวบิกโบรอนไนไตรด์ ซึ่งมีระดับความแข็งสูงกว่าอุปกรณ์ตัดเฉือนโดยทั่วไป และมีลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ความร่วน (Friability) ของสารขัดสี เป็นความสามารถในการแตกตัวของอนุภาคสารขัดสี ซึ่งช่วยให้สารขัดสีมีความคมขึ้นอีกครั้งด้วยตัวของมันเอง ซึ่งหลักการนี้จะทำให้สารขัดสีรักษาความคมได้ตลอดการใช้งาน แต่การที่สารขัดสีมีความร่วนมากเกินไป แสดงว่ามีความแข็งแรงน้อยจะทำให้สารขัดสีแตกตัวได้ง่ายในระหว่างการทำงาน จึงต้องทำการเลือกใช้สารขัดสีให้เหมาะสมกับสภาพการทำงาน

2.1 คุณสมบัติของเพชร

เพชรเป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่มีความแข็งมากที่สุดคือ 7,000 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร มีความต้านทานการสึกหรอสูง ใช้ในการตัดวัสดุอโลหะ (Non-Ferrous Materials) สามารถให้อายุการใช้งานยาวนานกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์หลายเท่า นิยมใช้ในการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง ส่วนใหญ่เพชรที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมมักจะเป็นเพชรสังเคราะห์ (Polycrystalline Diamond, PCD)

2.2 ขนาดอนุภาคของเพชร (Diamond Grit Size)

ขนาดอนุภาคของเพชรที่ประสานเข้ากับอุปกรณ์ตัดเฉือน ส่งผลต่ออัตราการตัดเฉือนชิ้นงาน (Stock Removal Rates) และคุณภาพผิวของชิ้นงาน (Surface Finish of Workpiece) โดยสามารถแบ่งขนาดอนุภาคของเพชรและคิวบิกโบรอนไนไตรด์ตามมาตรฐานของสหพันธ์ผู้ผลิตสารขัดสีภาคพื้นยุโรป (Federation of European Producers of Abrasives, FEPA) ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาคของเพชรตามมาตรฐานของสหพันธ์ผู้ผลิตสารขัดสีภาคพื้นยุโรป

Application					
Grinding		Lapping		Polishing	
ASTM-E-11-70	FEPA (μm)	ASTM-E-11-70	FEPA (μm)	ASTM-E-11-70	FEPA (μm)
20/25	851	200	80-100	1,800	6-12
30/35	601	400	40-60	2,000	6-10
40/45	426	600	30-40	3,000	4-8
50/60	301	800	20-30	5,000	3-6
60/70	251	1,000	15-20	8,000	2-4
80/100	181	1,200	10-20	11,000	1-3
100/120	151	1,500	10-16	14,000	0-2
120/140	126			60,000	0-1
140/170	107			100,000	0-1/2
170/200	91				
200/230	76				
230/270	64				
270/325	54				
325/400	46				

ที่มา: มาตรฐานสหพันธ์ผู้ผลิตสารขัดสีภาคพื้นยุโรป

2.3 ลักษณะการเชื่อมประสานผงเพชรเข้ากับอุปกรณ์ตัดเฉือน (Bonds)

สารขัดสีสามารถจับตัวกันหรือเชื่อมประสานกันได้ด้วยวัสดุที่ทำหน้าที่จับยึดระหว่างอนุภาคของสารขัดสีเข้าด้วยกันเรียกว่า การเชื่อมประสาน (Bonding) โดยจะเกิดช่องว่าง (Porosity) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกำจัดเศษโลหะในระหว่างการทำงาน ช่วยให้เศษโลหะไม่เข้าไปทำลายผิวชิ้นงาน สามารถแบ่งลักษณะการเชื่อมประสานตามวิธีการในการเชื่อมประสานได้ดังนี้

2.3.1 การเชื่อมประสานด้วยเรซิน (Resin Bond) เป็นการผสมระหว่างผงเพชรเข้ากับวัตถุประสานที่เรียกว่า เรซิน (Resin) มีประสิทธิภาพสูงสามารถทำการเจียรนัย (Grinding) ให้ชิ้นงานมีความเงาและลื่น ให้ความยืดหยุ่นตัวสูง มีส่วนประกอบของไฟเบอร์กลาส (Fiber Glass) อยู่ภายในการเชื่อมประสาน เพื่อเป็นการถ่วงการแยกตัวของสารขัดสีออกจากอุปกรณ์ตัดเฉือนในกรณีที่เกิดความดันที่ผิดปกติ เหมาะสมในการเจียรนัยวัสดุประเภท คาร์ไบด์, เหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel, HSS), แสตนเลส สตีล (Strainless Steel) เป็นต้น มีอายุการใช้งานสูงพอสมควร แต่ก็ให้ความคุ้มค่าต่อการทำงานได้ดี และเหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดสูงและความเที่ยงตรงสูง

2.3.2 การเชื่อมประสานด้วยโลหะ (Metal Bond) เป็นการผสมระหว่างผงเพชรประสานเข้ากับเนื้อทองเหลือง (Brass) หรือทองแดง (Bronze) มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุประสานชนิดอื่นๆ เหมาะสมกับการจับตัวของสารขัดสีที่มีความแข็งสูง ใช้งานได้ดีกับวัสดุประเภท กระจก, คอนกรีต, หิน, และเซรามิค เป็นต้น สามารถใช้งานภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ดี มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและคงทน แต่มีข้อเสียคือราคาสูง

2.3.3 การเชื่อมประสานด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplate Bond) ใช้กระบวนการทางไฟฟ้ามาเป็นตัวเชื่อมประสานโดยใช้วัตถุประสานคือ นิเกิล (Nikle) เคลือบผงเพชรเข้ากับอุปกรณ์ตัดเฉือน เหมาะสมกับการใช้งานทั่วไป สามารถใช้ได้กับวัสดุประเภท คาร์ไบด์, เหล็กกล้ารอบสูง, แสตนเลส สตีล เป็นต้น แต่มีอายุการใช้งานสั้น ข้อดีก็คือ สามารถเจียรนัยขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว และมีราคาถูก

2.3.4 การเชื่อมประสานด้วยเซรามิค (Vitrified Bond or Ceramic Bond) เป็นการเชื่อมประสานผงเพชรเข้ากับอุปกรณ์ตัดเฉือนด้วยใยแก้วหรือเซรามิค ทำให้อุปกรณ์ตัดเฉือนมีความแข็งแกร่งมากขึ้น โดยความแข็งแกร่งที่เพิ่มขึ้นเกิดจากโครงสร้างของใยแก้วหรือเซรามิคเอง อีกทั้งยังมีความคงทนสูง มีแรงยึดเหนี่ยวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี มีความต้านทานการกัดกร่อนของน้ำมัน, กรด และน้ำได้ดี สามารถใช้ได้กับวัสดุประเภท เหล็กกล้ารอบสูง, โลหะผสมระหว่างโครเมียมกับโคบอลต์, เหล็กกล้าเครื่องมือ และเหล็กที่มีส่วนผสมของโลหะสูง เป็นต้น

2.4 ความเข้มข้นของอนุภาคผงเพชรต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Concentration)

การเลือกใช้ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้น ต้องพิจารณาตามความเหมาะสมของชิ้นงานและกรรมวิธีในการทำงาน เช่น การเจียรนัย, การขัดผิว เป็นต้น โดยสามารถแบ่งช่วงของความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรตามความเหมาะสมในการใช้งานได้ดังนี้

2.4.1 ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในระดับสูง (High Concentration) โดยมีค่าความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ยึดติดกับอุปกรณ์ตัดเฉือนในระดับ 125 ถึง 250 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับอนุภาคของสารขัดสีชนิดเพชรที่มีขนาด 120 ถึง 140 ตามมาตรฐาน ASTM-E-11-70 เพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนของอนุภาค และลดภาระงานของแต่ละอนุภาค

2.4.2 ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในระดับปานกลาง (Medium Concentration) โดยมีค่าความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ยึดติดกับอุปกรณ์ตัดเฉือนในระดับ 75 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เหมาะกับงานเจียรนัยทุกประเภท เหมาะสมกับอนุภาคของเพชรที่มีขนาด 50 จนถึงขนาด 120 ตามมาตรฐาน ASTM-E-11-70

2.4.3 ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในระดับต่ำ (Low Concentration) โดยมีค่าความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ยึดติดกับอุปกรณ์ตัดเฉือนในระดับ 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับอนุภาคของเพชรที่มีขนาด 35 ถึง 40 ตามมาตรฐาน ASTM-E-11-70

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หน่วยเปอร์เซ็นต์ (%)	ปริมาณความจุของสารขัดสีความแข็งสูง หน่วยกะรัตต่อตารางเซนติเมตร (Karat/cm^2)
25	1.1
50	2.2
75	3.3
100	4.4
125	5.5
150	6.6
175	7.7
200	8.8
250	11

ที่มา: มาตรฐานสหพันธ์ผู้ผลิตสารขัดสีภาคพื้นยุโรป

3. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

3.1 องค์ประกอบของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

3.1.1 ชุดควบคุม เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บโปรแกรม (Memory) และแก้ไขดัดแปลงโปรแกรม (Edit) ได้ คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจโปรแกรมที่ป้อน แล้วทำการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีให้ทำงานตามคำสั่งโปรแกรมเอ็นซี ชุดควบคุมประกอบด้วย แผงควบคุม (Control Panel), จอภาพ (Monitor), แป้นพิมพ์ (Keyboard or Keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed), ความเร็วสปินเดิล (Spindle Speed) เป็นต้น

3.1.2 กลไกการเคลื่อนที่ ได้แก่ ฟีดมอเตอร์ (Feed Motor) ซึ่งเป็นโซโวมอเตอร์ (Servo Motor) ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ได้โดยใช้ บอลสกรู (Ball Screw) แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) โดยมีตำแหน่งหรือระยะ

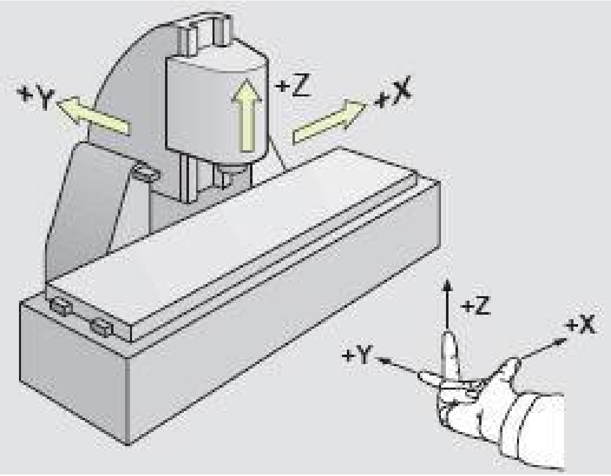
ทางการเคลื่อนที่ และในส่วนของความเร็วของการเคลื่อนที่ถูกควบคุมโดยรับสัญญาณจากคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้จะมีรางนำทาง (Guide Way) รองรับการเคลื่อนที่ในแกนต่างๆ

3.1.3 ตัวเครื่องจักรคือ โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลัก เช่น แท่นเครื่อง (Machine Bed), โต๊ะวางชิ้นงาน (Table), แท่นติดตั้งสปินเดิล (Spindle Head) และมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor) เป็นต้น

ภาพที่ 4 เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

3.2 แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน มี 3 โคออร์ดิเนต คือ X, Y และ Z ทิศทางของทั้ง 3 โคออร์ดิเนตกำหนดจากแกน Z โดยให้แกน Z อยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของสปินเดิล โดยทิศทางบวกชี้เข้าหาสปินเดิล แล้วสองแกนที่เหลือใช้กฎมือขวา



ภาพที่ 5 แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนแนวตั้ง มีโคออร์ดิเนต Z ในแนวตั้ง และระนาบ XY ในแนวนอนหรือบนระนาบของโต๊ะวางชิ้นงาน โดยมีแกน X เป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวา แกน Y เป็นการเคลื่อนที่เข้าออก และแกน Z เป็นการเคลื่อนที่ขึ้นลงของมีดกัดเมื่อเทียบกับชิ้นงาน

4. ความหยาบผิว

4.1 ลักษณะผิวงาน (Surface Types) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งประเทศเยอรมัน รหัส 140 (DIN 140) ได้กำหนดคุณภาพผิวงานไว้ดังนี้

4.1.1 คุณภาพของผิวงานใช้กับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดแน่นอน

4.1.2 ผิวดิบ เป็นผิวงานที่ไม่ต้องการความละเอียดมากแต่ต้องการความสม่ำเสมอ

4.1.3 ผิวหยาบ เป็นผิวงานที่สามารถมองเห็นรอยปาดผิวของเครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า

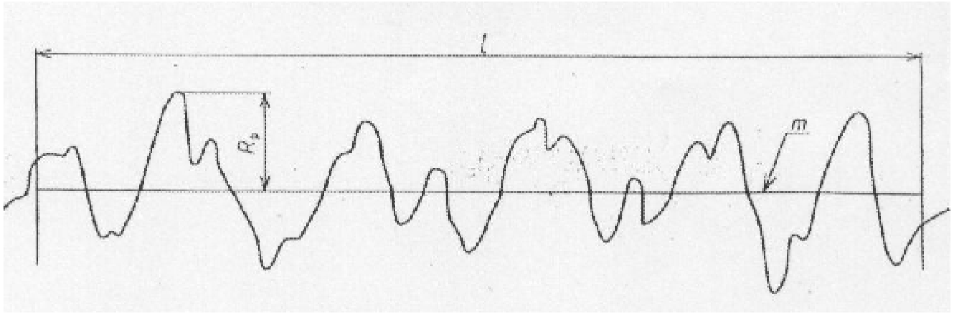
4.1.4 ผิวละเอียดปานกลาง เป็นผิวงานที่สามารถมองเห็นรอยปาดผิวของเครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนได้ด้วยตาเปล่า แต่อาจไม่ชัดเจนนัก

4.1.5 ผิวละเอียด รอยปาดผิวของเครื่องมือที่ใช้ตัดเฉือนจะมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น

4.1.6 ผิวละเอียดที่สุด เป็นผิวงานที่มีความละเอียดเงาเป็นมัน สะท้อนภาพได้คล้ายกระจก เช่น งานเจียรนัยและงานขัดผิว

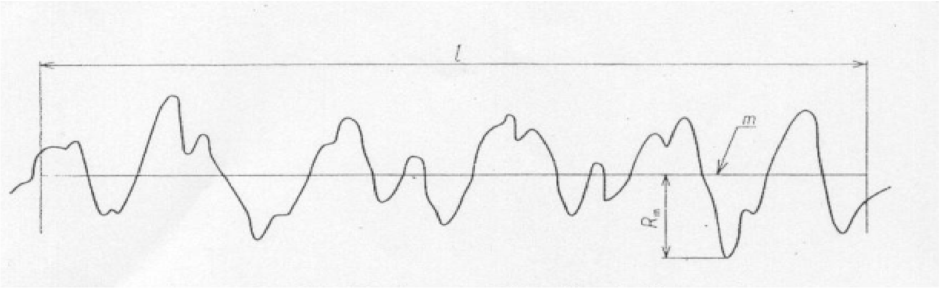
4.2 การวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness Measurement) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard, JIS) รหัสมาตรฐาน JIS B 0660 ปี ค.ศ. 1998 ดังนี้

4.2.1 ค่าความหยาบผิว R_p (Maximum Profile Peak Height) หมายถึง ระยะสูงสุดของคลื่นเมื่อเทียบกับเส้นกึ่งกลาง (*m*-Line) ซึ่งอยู่ในช่วงระยะที่ทำการวัด (length, *l*)



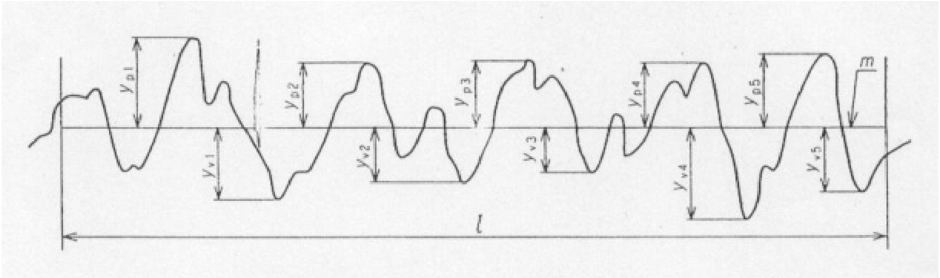
ภาพที่ 6 การหาค่าความหยาบผิว R_p ตามลำดับที่ 2004 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660

4.2.2 ค่าความหยาบผิว R_m (Maximum Profile Valley Depth) หมายถึง ระยะต่ำสุดของคลื่นเมื่อเทียบกับเส้นกึ่งกลาง ซึ่งอยู่ในช่วงระยะที่ทำการวัด



ภาพที่ 7 การหาค่าความหยาบผิว R_m ตามลำดับที่ 2005 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660

4.2.3 ค่าความหยาบผิว R_z (Ten Point Height of Irregularities) ซึ่งหาได้จากการแบ่งการวัดทดสอบเป็น 5 ช่วง ตามระยะของตำแหน่งจุดสูงสุดของคลื่นจำนวน 5 จุด (The Heights of Five Highest Profile Peaks, y_{pi}) และ ระยะของตำแหน่งจุดต่ำสุดของคลื่นจำนวน 5 จุด (The Depths of Five Deepest Profile Valleys, y_{vi}) โดยเทียบกับเส้นกึ่งกลางของการวัด แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันแล้วหารด้วย 5 โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

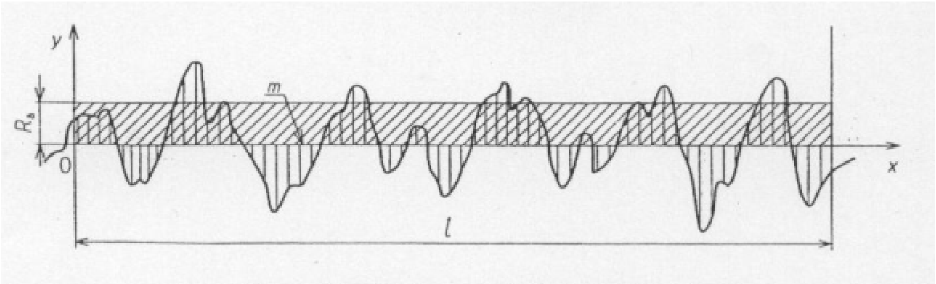


ภาพที่ 8 การหาค่าความหยาบผิว R_z ตามลำดับที่ 2007 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660

การคำนวณค่าความหยาบผิว R_z ดังนี้

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

4.2.4 ค่าความหยาบผิว R_a (Arithmetic Mean Deviation of the Profile) หมายถึง ค่าความหยาบผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หารด้วยความยาวของช่วงที่ทำการวัด โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตร



ภาพที่ 9 การหาค่าความหยาบผิว R_a ตามลำดับที่ 2010 ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น รหัสมาตรฐาน JIS B 0660

การคำนวณค่าความหยาบผิว R_a ดังนี้

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |y(x)|dx \qquad (2)$$

หรือประมาณค่าได้ดังนี้

$$R_a \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \qquad (3)$$

โดย y_i คือ ระยะของจุดต่างๆ บนคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นกึ่งกลาง โดยพิจารณาตลอดระยะที่ทำการวัด

n คือ จำนวนของข้อมูลในช่วงระยะที่ทำการวัด

4.2.5 ค่าความหยาบผิว R_q (Root-Mean-Square Deviation of the Profile) หมายถึงรากที่สองของค่าความหยาบผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หารด้วยความยาวของช่วงที่ทำการวัด โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

การคำนวณค่าความหยาบผิว R_q ดังนี้

$$R_a = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L \left| y^2(x) \right| dx} \qquad (4)$$

4.3 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ (Confocal Laser Scanning Microscope)

4.3.1 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ประกอบด้วยส่วนประกอบ ดังนี้

ก. ชุดไมโครสโคปเลเซอร์สแกนเนอร์ ประกอบด้วยโต๊ะวางชิ้นงาน (Microscope Frame) ที่สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน X และแกน Y ได้ (XY Stage) โดยมีชุดเลเซอร์ไมโครสโคปซึ่งประกอบด้วยกล้องไมโครสโคปแบบเลเซอร์จำนวน 3 ขนาดกำลังขยายคือ 5 เท่า (5X), 10 เท่า (10X), 20เท่า (20X), 50 เท่า (50X) และ 100 เท่า (100X)

ข. หน้าจอแสดงผลการวัด (Monitor) ซึ่งจะแสดงภาพขยายที่ขยายด้วยชุดเลเซอร์ไมโครสโคป ตามขนาดกำลังขยายที่ได้ตั้งค่าไว้ พร้อมทั้งแสดงค่าความหยาบผิวออกมาในรูปแบบของกราฟและเชิงตัวเลข

ค. หน่วยประมวลผลและชุดควบคุม (Control PC and Controller) เป็นส่วนสำคัญในการประมวลผลข้อมูล และควบคุมระบบการวัด

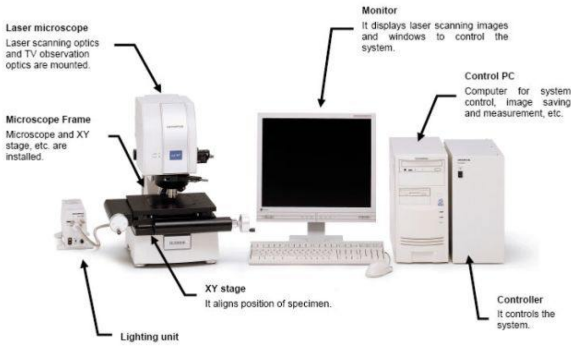


Photo 1-1 Standard type

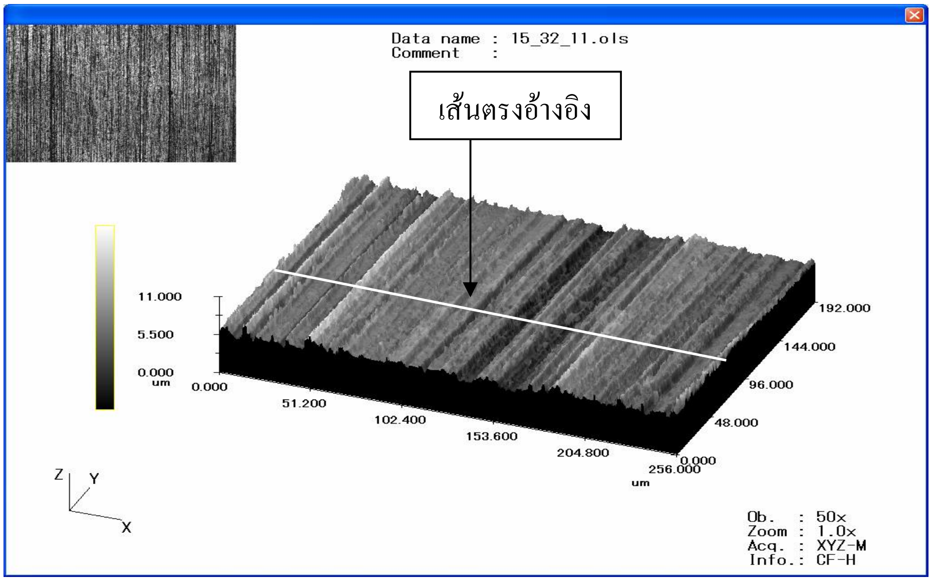
ภาพที่ 10 เครื่องวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ยี่ห้อโอลิมปัส รุ่น LEXT OLS3100

4.3.2 หลักการการวิเคราะห์ความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

การวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ใช้หลักการของการแยกลำแสงเลเซอร์ออกเป็นสีที่แตกต่างกัน ที่สะท้อนมาจากพื้นผิวที่ต้องการวัด ซึ่งพบว่าการกระจายความเข้มของแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ไปตกกระทบบนพื้นผิวที่ต้องการวัดค่าความหยาบผิวไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหยาบผิวในแต่ละส่วน จึงทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ

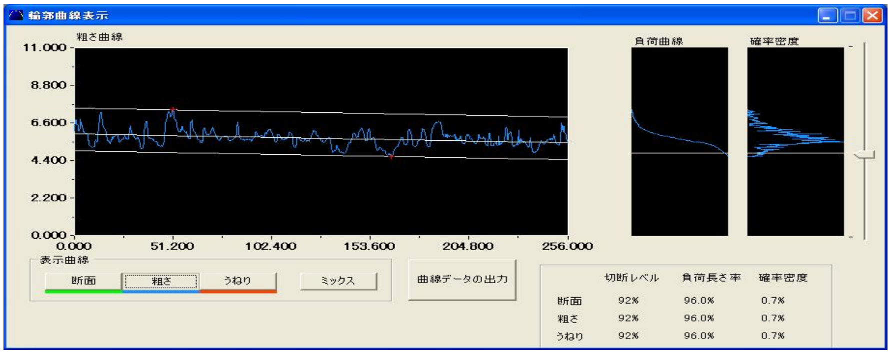
ก. วิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงเส้น (Line Surface Roughness) ด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

เป็นวิธีการวัดโดยกำหนดเส้นตรงอ้างอิงของการวัดจำนวนหนึ่งเส้น ทั้งนี้ระดับความสูงหรือต่ำของพื้นผิวชิ้นงานในส่วนที่ถูกวิเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบกับเส้นตรงอ้างอิงเส้นนี้ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 วิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงเส้นโดยการกำหนดเส้นตรงอ้างอิงจำนวน 1 เส้น ด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

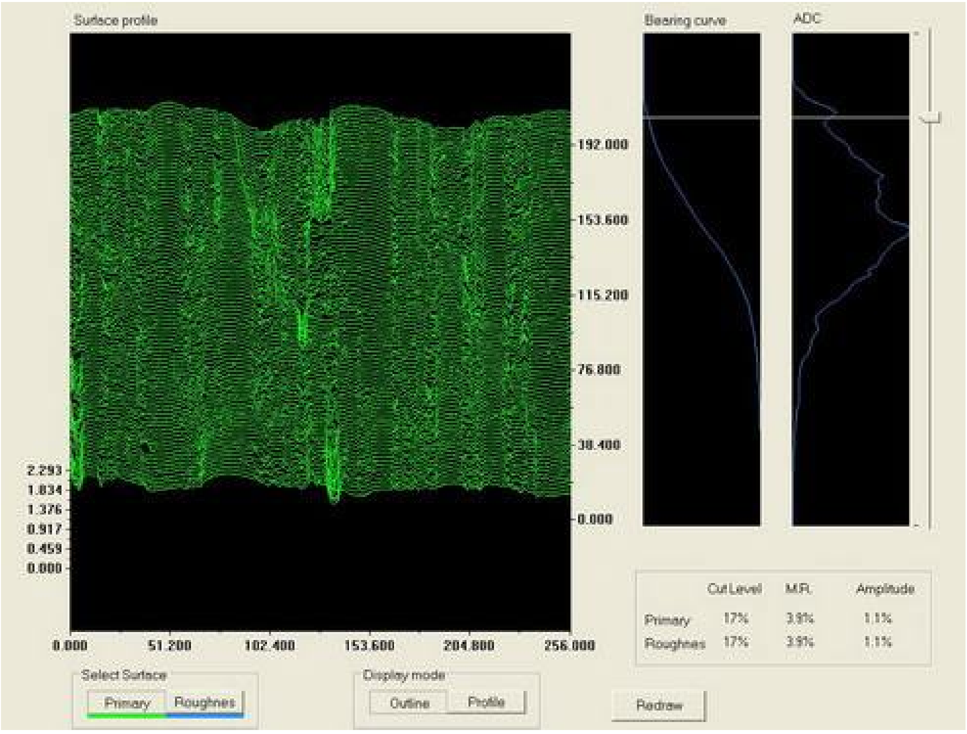
ผลที่ได้จากการวัดค่าความหยาบผิวด้วยวิธีการนี้มีข้อเสียกล่าวคือ เป็นการสุ่มวัดด้วยเส้นตรงอ้างอิงเพียงเส้นเดียว จึงมีความละเอียดแม่นยำในการวัดค่อนข้างน้อย และจำเป็นต้องทำการวัดในหลายๆจุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว



ภาพที่ 12 ผลของการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเชิงเส้นด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

ข. วิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบ (Plane Surface Analysis) ด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

เป็นวิธีการวัดค่าความหยาบผิวเชิงเส้นหลายๆเส้นอย่างต่อเนื่องลงบนพื้นที่ขนาด กว้าง 0.192×0.256 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งความต่อเนื่องของการวัดค่าความหยาบผิวเชิงเส้นนั้นเปรียบดังเป็นการสร้างระนาบอ้างอิงของการวัด โดยวิธีการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวชนิดนี้จะให้ค่าความหยาบผิวของทั้งพื้นผิว ซึ่งมีความละเอียดและความแม่นยำในการวัดสูงกว่าการวัดโดยใช้เส้นตรงอ้างอิงเพียงเส้นเดียว



ภาพที่ 13 ผลของการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

5. ผังแสดงเหตุและผล

5.1 แนวความคิดของผังแสดงเหตุและผล

ความหมายของผังแสดงเหตุและผล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น คือผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง

จากแนวความคิดเกี่ยวกับกระบวนการของ ชิวฮาร์ท (Shewhart) ที่ว่า กระบวนการสามารถแยกเป็นสาเหตุหลักๆได้ 4 ประการ กล่าวคือ คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วิธีการ (Method), และวัตถุดิบ (Material) นั้น ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาว่า (Kaoru Ishikawa) ได้นำแนวความคิดของชิวฮาร์ทมาพัฒนาโดยการสร้างเป็นผังแสดงสาเหตุของปัญหา ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้างปลาหรือที่เรียกว่า ผังก้างปลา โดยผังนี้มีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกของปลาที่รวบรวมปัจจัยที่เป็นสาเหตุของปัญหา และส่วนหัวปลาที่เป็นข้อสรุปสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา

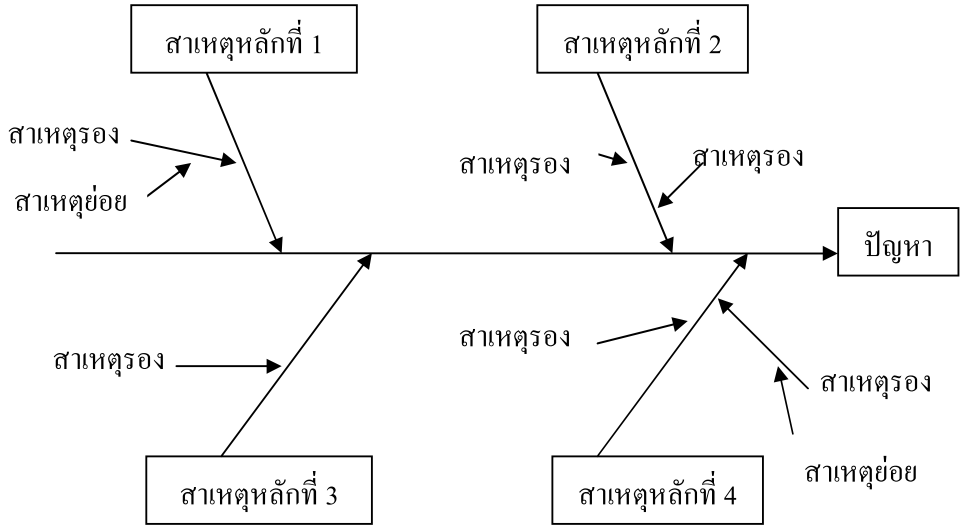
5.2 วิธีการสร้างผังแสดงเหตุและผล

5.2.1 ทำการเลือกปัญหาที่เราให้ความสนใจ และต้องการทราบที่มาของปัญหานั้น โดยทำการระบุในส่วนของหัวปลา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบุปัญหา

5.2.2 ระบุสาเหตุหลักของปัญหา

5.2.3 ระบุสาเหตุรอง ซึ่งเป็นดังรายละเอียดปลีกย่อยของสาเหตุหลัก

5.2.4 ระบุสาเหตุย่อย



ภาพที่ 14 ผังแสดงเหตุและผล

6. การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองเป็นสาขาหนึ่งของสถิติ เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลอง เกี่ยวข้องกับการจัดการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงหรือข้อมูลที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

6.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

การออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องตัดสินใจได้ โดยพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจุดประสงค์ของการทดลอง คือ การยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) และการค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) การทดลองสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) หรือการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)

6.1.1 หลักการเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นระเบียบวิธีที่จำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราควบคุมปัจจัยต่างๆได้ และสามารถตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้นได้ด้วยระเบียบวิธีทางสถิติที่เหมาะสม สาเหตุที่ต้องมีการออกแบบการทดลองก็คือ ต้องการแยกอิทธิพลที่เกิดขึ้นต่อสิ่งที่ต้องการวัด ตัวอย่างเช่น การใช้ปุ๋ย 2 ชนิด ก และ ข ทดลองกับต้นข้าวที่มีอายุ 3 กับ 15 วัน ถ้าเราไม่จำแนกต้นข้าวตามอายุก่อนที่จะให้ปุ๋ยทั้ง 2 ชนิดแล้ว เราก็จะไม่สามารถทราบได้เลยว่าผลที่ได้ เช่น ความสูงของต้นข้าว เกิดจากปุ๋ย หรืออายุของต้นข้าว

6.1.2 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองที่ได้ เรียกว่า แผนแบบการทดลอง แบ่งออกได้ดังนี้

ก. กำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นการรับรู้และนิยามปัญหาที่สนใจ โดยผู้ทดลองกำหนดถึงสิ่งที่อยากทราบและกำหนดว่าต้องการอะไร และต้องการทำการศึกษาสิ่งที่เกี่ยวข้องอย่างรอบคอบ

ข. กำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาอิทธิพล อาจเป็นปัจจัยเดี่ยว, 2 ปัจจัย หรือ 3 ปัจจัย ฯลฯ

ค. กำหนดตัวแปรหรือลักษณะที่ต้องการวัดผลที่ได้จากการทดลอง เป็นการกำหนดตัวแปรตอบสนอง โดยต้องพิจารณาถึงความสามารถในการวัดได้ และความถูกต้องแม่นยำ

ง. กำหนดกระบวนการที่ใช้ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา เป็นการเลือกรูปแบบการทดลองที่เหมาะสม โดยต้องให้ความสนใจถึงความมีประสิทธิภาพทางสถิติและความมีประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์

จ. ดำเนินการทดลอง โดยต้องให้ความสนใจถึงการสุ่ม ความถูกต้องในการวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง

ฉ. ทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยทฤษฎีการอนุมานทางสถิติ

ช. ทำการสรุปผลและให้ข้อเสนอแนะ

6.1.3 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

ก. ทรีทเมนต์ (Treatments) หรือปัจจัย (Factor) เป็นวิธีการต่างๆซึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองหรือเกิดขึ้นกับหน่วยทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ตัวอย่างเช่น การทดลองทางการเกษตร ทรีทเมนต์อาจแบ่งออกเป็น ชนิดของปุ๋ย, พันธุ์พืช และอาหารสูตรต่างๆ เป็นต้น

ข. หน่วยทดลอง (Experimental Unit) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของวัสดุทดลองที่ได้รับทรีทเมนต์ใดๆ ในครั้งหนึ่งๆ หน่วยทดลองอาจเป็นหน่วยเดียว เช่น ต้นพืช 1 ต้นที่ปลูกในกระถาง หรือหน่วยกลุ่มซึ่งการทดลองด้านพืช เรียกว่า แปลงย่อย (Plot) หน่วยทดลองแต่ละหน่วยจะให้ค่าสังเกตเพียง 1 ค่า

ค. ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (Experimental Error) เป็นความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองที่ได้รับทรีทเมนต์เดียวกัน หรือความผันแปรของหน่วยทดลองที่ได้รับทรีทเมนต์เดียวกัน ซึ่งความผันแปรนั้นมีอยู่ในหน่วยทดลองหรือเกิดขึ้นขณะทดลอง

ง. การสุ่ม (Randomization) เป็นการจัดทรีทเมนต์ให้กับหน่วยทดลองโดยวิธีสุ่ม ซึ่งเป็นการทำให้หน่วยการทดลองมีโอกาสได้รับทรีทเมนต์ใดทรีทเมนต์หนึ่งเท่าๆกัน แผนแบบการทดลองที่ต่างกันจะมีวิธีการสุ่มที่แตกต่างกัน

จ. การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทรีทเมนต์หนึ่งๆ ปรากฏในหน่วยทดลองมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและความแน่นอนของการทดลอง ทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ และทำให้สรุปผลการทดลองได้กว้างขึ้น

ฉ. การบล๊อค (Blocking) เป็นการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอิทธิพลแทรกซ้อนออกไป เป็นการสร้างข้อมูลให้มีความแม่นยำมากขึ้น

ช. ตัวแปรสุ่ม (Random Variable) คือ ตัวแปรหรือลักษณะที่ใช้ศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง

ซ. ความเป็นเอกรูปของหน่วยทดลอง (Uniformly) กล่าวคือ ในการเลือกสิ่งทดลอง ผู้ทำการทดลองจะพยายามหาหน่วยทดลองที่มีความเป็นเอกรูปมากที่สุด เพื่อขจัดปัจจัยอื่นที่จะมีอิทธิพลต่อผลที่วัดหรือค่าสังเกต (Observation) นอกจากทรีทเมนต์ และเพื่อให้ผลตอบสนองของแต่ละหน่วยทดลองต่อทรีทเมนต์เดียวกันเหมือนกัน การเลือกสิ่งทดลองที่มีความเป็นเอกรูปคือเลือกหน่วยทดลองที่มีปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าสังเกตที่ศึกษาเหมือนกัน

ฌ. ค่าสังเกต (Observed Value) คือ ค่าของตัวแปรหรือของลักษณะที่ศึกษา ที่วัดได้จากการทดลอง

การทดลอง (Experiment) เป็นการจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลอง โดยที่การทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นคือ การทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นตัดสินใจจะเป็นขั้นตอนการนำสิ่งที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่างๆ

6.2 วิธีการทากูชิ (Taguchi’s Method)

6.2.1 แนวคิดของวิธีการทากูชิ

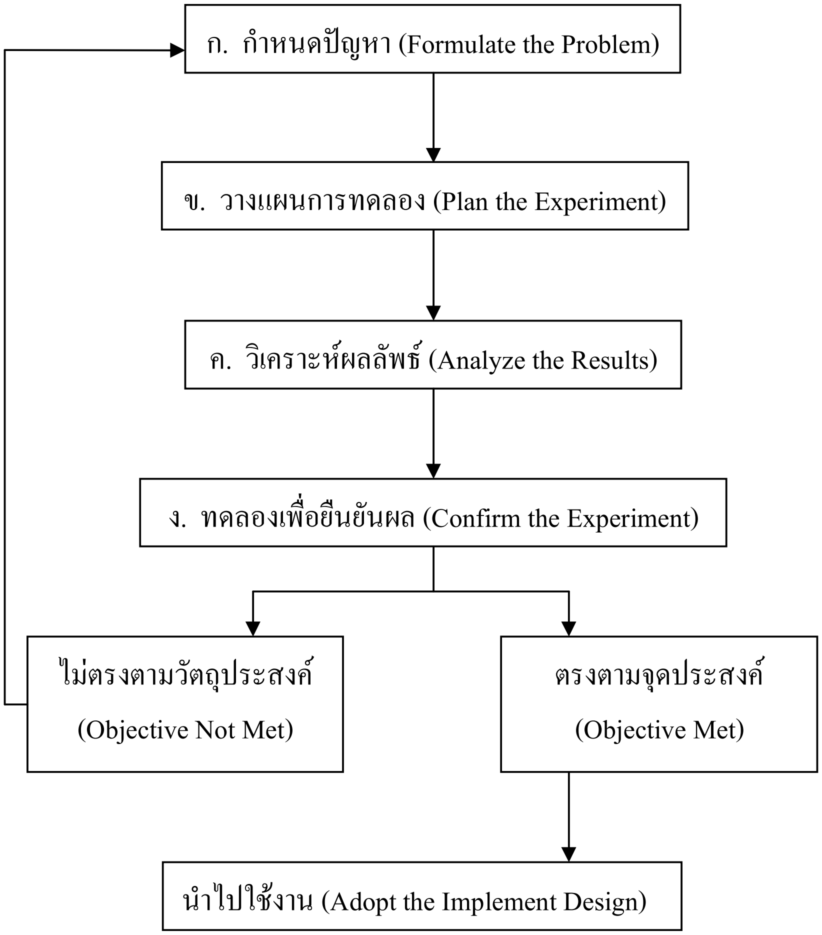
แนวคิดของวิธีการทากูชิเป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ แทนที่จะใช้การสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่ขบวนการสุดท้ายซึ่งได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการสุ่มตรวจสอบแบบทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออกแต่คุณภาพของกระบวนการยังคงเหมือนเดิม ซึ่งอันที่จริงแล้วกระบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพ และสำคัญกว่าการสุ่มตัวอย่าง วิธีการทากูชิได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ แต่โดยทั่วไปแล้วคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม วิธีการทากูชิจะพยายามทำให้กระบวนการสามารถทำงานได้ตามที่ถูกออกแบบโดยมีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวน หรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน

6.2.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ

เป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยควบคุม (Control Factor) เช่น ขนาดของชิ้นส่วนซึ่งสามารถควบคุมได้โดยผู้ทำการออกแบบ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor or Noise Factor) เช่น ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม, การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์, กรรมวิธีการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วย ซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของการออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็ง (Robust Design, RD) เป็นการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ โดยทำการลดความไวของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่มีต่อแหล่งความผันแปร และทำการควบคุมแหล่งผันแปรเหล่านี้ หรืออีกนัยหนึ่งคือ การออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็งจะลดความผันแปรของค่าตอบสนอง โดยทำการเลือกปรับตั้งที่ปัจจัยควบคุม เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก (Hard-to-Control Noise)

6.2.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ

วิธีการทากูชิสำหรับสนับสนุนการออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็ง มีขั้นตอนในการปฏิบัติที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 15 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ

ก. กำหนดปัญหา

ในขั้นตอนนี้ผู้ทำการทดลองจะต้องจัดการกับปัญหาของการออกแบบกระบวนการที่เข้มแข็งให้แน่นอน โดยการกำหนดวัตถุประสงค์เริ่มต้นของกระบวนการให้ชัดเจน และกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของค่าตอบสนองของกระบวนการ (Process Response) แล้วทำการไตร่ตรองวัตถุประสงค์เหล่านี้

ข. วางแผนการทดลอง สามารถแยกออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 คือ การออกแบบตารางการทดลอง (Design the Matrix Experiment) ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆปัจจัยพร้อมกัน โดยใช้การกำหนดตารางแผนการทดลองที่เรียกว่า ออทอกอนอล อะเรย์ (Orthogonal Array) เป็นตารางมาตรฐานที่ใช้ในการลดจำนวนการทดลอง การนำตารางมาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย โดยการกำหนดตารางแผนการทดลองวิธีนี้มีประโยชน์ กล่าวคือ ผลสรุปที่ได้จากการทดลองแต่ละการทดลองจะครอบคลุมกับขอบเขตของการทดลองทั้งหมด โดยมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

การใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มีข้อดีคือ ทำให้สามารถลดการทดลองให้น้อยลง และเป็นผลให้ลดเวลาและต้นทุนในการทดลองได้อย่างมาก โดยสามารถเปรียบเทียบจำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ กับ จำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล ดังนี้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ ของวิธีการทากูชิกับจำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ตารางออทอกอนอล อะเรย์	จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย	จำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์	จำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล
L_4	3	2	4	8
L_8	7	2	8	128
L_9	4	3	9	81
L_{12}	11	2	12	2,048
L_{16}	15	2	16	32,768
L_{16}	5	4	16	1,024

ที่มา: Bandurek *et al.* (1988)

การเลือกใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ จำเป็นต้องมีการพิจารณาในหลายๆ ส่วนประกอบกันดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ระดับขั้นความอิสระ (Degree of Freedom) โดยระดับขั้นความอิสระ คือ ตัวเลขที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยหลัก หรือปัจจัยร่วม ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการกำหนดระดับให้ได้ค่าเฉพาะที่ถูกต้องที่สุด การพิจารณาค่าระดับขั้นความอิสระในการทดลองจุขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย โดยจำแนกประเภทของปัจจัยได้ดังนี้

ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก ทำการคำนวณได้ดังนี้

ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก = จำนวนระดับของปัจจัย- 1 (5)

ในส่วนของปัจจัยร่วม เรียกระดับขั้นความอิสระว่า ค่าองศาอิสระ ซึ่งทำการคำนวณได้ดังนี้

ค่าองศาอิสระ = ผลคูณของระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก (6)

ส่วนที่ 2 การเลือกตารางออทอกอนอล อะเรย์ โดยทำการพิจารณาระดับขั้นความอิสระของปัจจัย แล้วนำมาเปรียบเทียบกับระดับขั้นความอิสระของตารางออทอกอนอล อะเรย์มาตรฐาน โดยมีวิธีการดังนี้

ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก ทำการคำนวณได้ดังนี้

ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก = (ระดับของปัจจัยหลัก – 1) ×จำนวนปัจจัยหลัก (7)

ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยร่วม ทำการคำนวณได้ดังนี้

ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยร่วม = (ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักที่ 1) × (ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักที่ 2) – จำนวนปัจจัยร่วม (8)

ระดับขั้นความอิสระโดยรวม หาได้จาก

ค่าระดับขั้นความอิสระโดยรวม = ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก+ ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยร่วม (9)

การเลือกตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานนั้น ให้นำเอาระดับขั้นความอิสระโดยรวม เปรียบเทียบกับระดับขั้นความอิสระของตารางออออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน โดยต้องเลือกตารางมาตรฐานที่มีระดับขั้นความอิสระที่มากกว่าหรือเท่ากับระดับขั้นความอิสระโดยรวมที่คำนวณได้

ส่วนที่ 3 การลดค่าอคติในการทดลองสามารถแบ่งได้ เป็นสองชนิดคือ

ค่าความคลาดเคลื่อนหลัก เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้มักจะเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนกรรมวิธีการทดลอง สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนนี้ได้โดยการลดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองให้น้อยที่สุด หรือให้ปัจจัยที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองอยู่ในลำดับต้นๆของการทดลอง

การลดค่าความคลาดเคลื่อนรอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความคลาดเคลื่อนภายในการทดลอง ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองหลายครั้งในรูปแบบการทดลองเดิม โดยค่าความคลาดเคลื่อนรองนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดและค่าความคลาดเคลื่อนตามธรรมชาติของการวัด โดยที่ธรรมชาติของการวัดแก้ไขโดยการหาค่าเฉลี่ยจากการทำการวัดหลายๆครั้ง ในส่วนของความคลาดเคลื่อนของระบบ สามารถแก้ไขได้โดยการฝึกฝนการทำการทดลอง และเครื่องมือในการทำการทดลองที่มีความเที่ยงตรงสูง

ส่วนที่ 4 การสุ่มการทดลอง โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนในการทดลองเกิดจากลำดับการทดลองที่มีค่าเสื่อมสภาพในตัวเอง ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองหลายครั้ง หรือเกิดการรวมตัวเมื่อมีการทดลองหลายครั้ง โดยไม่สามารถแก้ไขทางกายภาพได้ เราสามารถลดปัญหาความคลาดเคลื่อนนี้โดยทำการสุ่มการทดลองเพื่อกระจายความคลาดเคลื่อนออกไปอย่างทั่วถึงได้ ทั้งนี้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ สามารถแบ่งลักษณะการสุ่มการทดลองได้ดังนี้

การสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization) กล่าวคือ ในกรณีที่มีการทำซ้ำจะทำการสุ่มเฉพาะการทดลองของการทำซ้ำรอบนั้นๆ โดยทุกการทดลองมีโอกาสเท่ากันที่จะถูกเลือกทดลองเป็นลำดับแรก และเลือกทดลองในลำดับต่อๆไปตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

การสุ่มซ้ำอย่างง่าย (Simple Repetition) การสุ่มชนิดนี้ใช้ในกรณีที่มีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Setup) และการทดลองต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในกรณีที่มีการเปลี่ยนรูปแบบการทดลอง จึงต้องทำการทดลองให้เสร็จสิ้นทีละรอบการทำซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 5

การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อค (Complete Randomization within Block) การสุ่มชนิดนี้ใช้ในกรณีที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนระดับของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง จึงต้องทำการบล๊อคระดับของตัวแปรนั้นเสียก่อน แล้วจึงทำการสุ่มภายในบล๊อค ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 4 การสุ่มสมบูรณ์

	Factors									
	A	B	C	D	E	F	G			
	Column Number									
Trial Number	1	2	3	4	5	6	7	y data		
1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	*	*	*

Randomized within first round → first y data column

Randomized within second round → second y data column

Randomized within third round → third y data column

ที่มา: Ross (1989)

ตารางที่ 5 การสุ่มซ้ำอย่างง่าย

	Factors							
	A	B	C	D	E	F	G	
	Column Number							
Trial Number	1	2	3	4	5	6	7	y data
1	1	1	1	1	1	1	1	* * *
2	1	1	1	2	2	2	2	* * *
3	1	2	2	1	1	2	2	* * *
4	1	2	2	2	2	1	1	* * *
5	2	1	2	1	2	1	2	* * *
6	2	1	2	2	1	2	1	* * *
7	2	2	1	1	2	2	1	* * *
8	2	2	1	2	1	1	2	* * *

Random order of trials

do all repetition for a trial

ที่มา: Ross (1989)

ตารางที่ 6 การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อค

	Factors							
	A	B	C	D	E	F	G	
	Column Number							
Trial Number	1	2	3	4	5	6	7	y data
1	1	1	1	1	1	1	1	* * *
2	1	1	1	2	2	2	2	* * *
→ 3	1	2	2	1	1	2	2	* * *
4	1	2	2	2	2	1	1	* * *
5	2	1	2	1	2	1	2	* * *
6	2	1	2	2	1	2	1	* * *
→ 7	2	2	1	1	2	2	1	* * *
8	2	2	1	2	1	1	2	* * *

Random order of trials in block 1

Random order of trials in block 2

ที่มา: Ross (1989)

ส่วนที่ 5 การกำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำของการทดลอง โดยจำนวนการทดลองซ้ำนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการทดลองคร่าวๆ ก่อนเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล โดยสามารถประมาณค่าได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังสมการที่ 10 (Montgomery, 2005)

$$e = \frac{(t_{\alpha/2,n-1}) \cdot s}{\sqrt{n}} \qquad (10)$$

เมื่อ e หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

α หมายถึง ระดับนัยสำคัญ

n หมายถึง จำนวนรอบการทดลอง

s หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ทำการกำหนดความคลาดเคลื่อนของระบบขึ้นใหม่ ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการซึ่งปกติจะมีค่าน้อยกว่าผลของความคลาดเคลื่อนของระบบที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 1 แล้วนำไปหาจำนวนรอบทำซ้ำของการทดลองที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 11

$$n' = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot s}{e} \right)^2 \qquad (11)$$

เมื่อ n' หมายถึงจำนวนของการทดลองซ้ำที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดลองและรวบรวมข้อมูล (Conduct the Experiment and Collect Data) การทดลองจริงนั้นเป็นการทำให้บรรลุผลสำเร็จ และการปฏิบัติการทดลองนี้เป็นการหาค่าตอบสนองของกระบวนการ ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปใส่ในตาราง ตัวชี้วัดการปฏิบัติสำหรับการทดลองทั้งหมด แล้วจะทำการแปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio or S/N Ratio) ซึ่งอัตราส่วนนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimize) ของปัญหา แต่ถ้าหากเกิดความล้มเหลวในการหาเป้าหมาย ก็จะนำไปสู่การสรุปผลที่ผิดพลาดได้ในเรื่องของระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยที่คุณลักษณะของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

ชนิดที่ 1 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ หรือกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller the Better Type Problem) เช่น ความต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์, ความต้องการให้เกิดมลภาวะเป็นพิษน้อยที่สุดจากโรงงาน, ความต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งมีสูตรในการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นดังนี้

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (12)$$

เมื่อ S/N_{LB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ หรือใช้สัญลักษณ์ η_{LB} โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต

y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

ชนิดที่ 2 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดโดยมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือจำกัดไว้ หรือค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal the Best Type Problem) เช่น ความต้องการให้ความหนาของโพลีซิลิโคนมีค่าตามที่กำหนดไว้ในลักษณะที่มีคุณภาพ สำหรับปัญหาในกรณีนี้เมื่อค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ความแปรปรวนก็จะเป็นศูนย์ด้วย และพบว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแบบนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

$$S/N_{NB} = -10\log\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \qquad (13)$$

เมื่อ S/N_{NB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่าเท่ากับที่ได้กำหนดไว้หรือจำกัดไว้ หรือใช้สัญลักษณ์ η_{NB} โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

s^2 คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

ชนิดที่ 3 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือกรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger the Better Type Problem) เช่น ความต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากที่สุด, ความต้องการให้น้ำมันของรถบรรทุกสามารถขับเคลื่อนรถบรรทุกได้จำนวนระยะทางมากที่สุด เป็นต้น

$$S/N_{HB} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (14)$$

เมื่อ S/N_{HB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือใช้สัญลักษณ์ η_{HB} โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต

y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิจะประกอบด้วยเซตของการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยของกระบวนการที่เราต้องการศึกษา หลังจากทำการกำหนดตารางแผนการทดลอง เรียบร้อยแล้ว จะทำการดำเนินการทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองตามตารางแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ และเมื่อดำเนินการทดลองเสร็จแล้วจะต้องนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆในการทดลอง

การสร้างตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางมาตรฐานของวิธีทากูชิ ทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ ผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม และระดับของปัจจัยควบคุม (Control Factor Level) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิที่เหมาะสม เช่น สมมติว่าต้องการศึกษาเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยควบคุม 11 ปัจจัย ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของกระบวนการ ผู้ออกแบบการทดลองได้เลือกระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยไว้ 2 ระดับเท่ากันทุกปัจจัย ตารางแผนการทดลองที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างนี้คือ ตาราง รูปแบบ L_{12} ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 มาตรฐานของตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานของวิธีการทากูชิแบบ L_{12} (L_{12} Orthogonal Array)

ลำดับ	คอลัมน์										
การทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	3	1	1	2	1	2	1	2	2	1

ที่มา: Ross (1989)

ค. วิเคราะห์ผลลัพธ์

หลังจากที่ได้ตารางผลลัพธ์ของการทดลองที่ถูกต้องแล้ว การสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของอิทธิพลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัย ขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ผลลัพธ์คือ วิเคราะห์ข้อมูลจากตารางผลลัพธ์ของการทดลองโดยใช้ผลลัพธ์นี้ทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัย (Optimal Factor Level Combination) ซึ่งจะให้ผลการปฏิบัติที่ดีที่สุด ขั้นตอนนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean, ANOM)

โดยทำการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวน และหาความสัมพันธ์ที่สำคัญของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยโดยวิธีการแยกความแปรปรวน หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Square, MS) สำหรับปัจจัยควบคุม ดังนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน สามารถทำการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย สำหรับการเลือกใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน ดังนี้ (Bagchi, 1993)

ขั้นที่ 1 เริ่มจากการพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน กล่าวคือ

$$\overline{S/N} = \frac{1}{N}\left[\sum_{i=1}^{N} S/N_i\right] \tag{15}$$

เมื่อ $\overline{S/N}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง
S/N_i คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละลำดับการทดลอง
N คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด
i คือ ลำดับการทดลอง โดย i=1, 2, 3, …,N

จากนั้นทำการพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยสมมติว่าปัจจัยควบคุมที่เราต้องการพิจารณาคือปัจจัย A

$$\overline{S/N}_{A_j} = \frac{\text{ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ j}}{n} \tag{16}$$

เมื่อ $\overline{S/N}_{A_j}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย A ระดับที่ j
n คือ จำนวนการทดลองในระดับที่ j ของปัจจัย

อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยทำการพิจารณาผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) คือ การนำข้อมูลที่อยู่ในระดับเดียวกันมารวมกัน โดยใช้การยกกำลังสองทั้งนี้เพื่อหักล้างผลกระทบเรื่องเครื่องหมาย โดยคำนวณหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละการทดลองที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง

เริ่มจากพิจาณาหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง

$$SS_A = n\sum_{j=1}^{k}(\overline{S/N}_{A_j} - \overline{S/N})^2 \qquad (17)$$

เมื่อ k คือ จำนวนระดับของปัจจัย A

j คือ ระดับของปัจจัย โดย j = 1, 2,…, k

จากนั้นพิจารณาผลรวมกำลังสองโดยรวม (Total Sum of Square, SS_T)ของการทดลอง จากสมการ

$$SS_T = N\sum_{i=1}^{N}(S/N_i - \overline{S/N})^2 \qquad (18)$$

ทั้งนี้ความแตกต่างของผลรวมกำลังสองของปัจจัยทั้งหมดกับผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน SS_E

ขั้นที่ 2 ทำการพิจารณาระดับขั้นความอิสระของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน โดยระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักคือ จำนวนระดับของปัจจัยหลัก-1 และระดับขั้นความอิสระรวมคือ (จำนวนการทดลองทั้งหมด-1)*(จำนวนกลุ่ม-1) ดังนั้น ระดับขั้นความอิสระของความคลาดเคลื่อนคือ ระดับขั้นความอิสระรวม- ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักของแต่ละปัจจัย

ขั้นที่ 3 ทำการพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Sum Square, MS) โดยที่ค่ากำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองหารด้วยระดับขั้นความอิสระ ดังนี้ (Montgomery, 2005)

$$MS_{Factor} = \frac{\text{Factor Effect Sum of the Square}}{\text{Factor Degree of Freedom}} \quad (19)$$

เมื่อ MS_{Factor} คือ ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยสำหรับปัจจัยควบคุม

Factor Effect Sum of the Square คือ ผลรวมกำลังสองแต่ละค่าของปัจจัย

Factor Degree of Freedom คือ ระดับขั้นความเสรีสำหรับผลรวมของกำลังสองแต่ละปัจจัย

และความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความผิดพลาด มีนิยามว่า

$$MS_{E} = \frac{\text{Error Sum of the Square}}{\text{Error Degree of Freedom}} \quad (20)$$

เมื่อ MS_{E} คือ ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาด

Error Sum of the Square คือ ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด

Error Degree of Freedom คือ ระดับขั้นความเสรีของความผิดพลาด

ขั้นที่ 4 ทำการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวน โดยในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน มีพจน์หนึ่งที่เรียกว่า อัตราส่วนของความแปรปรวน (Variance Ratio or F-Ratio) ซึ่งอัตราส่วนนี้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบนัยสำคัญอิทธิพลของปัจจัย ค่าอัตราส่วนความแปรปรวนดังแสดงในสมการที่ 21

$$F = \frac{MS_{Factor}}{MS_E} \qquad (21)$$

เมื่อ F คือ อัตราส่วนของความแปรปรวน

การพิจารณาผลการทดสอบ F ของปัจจัยใดๆ ที่ระดับการยอมรับ $(1-\alpha)$ หรือที่เรียกว่า " สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น" ยกตัวอย่างเช่น ที่ $\alpha = 0.05$ จะได้สัมประสิทธ์ความเชื่อมั่นคือ 0.95 หรืออีกนัยหนึ่งคือ ที่ช่วงความเชื่อมั่น $100(1-\alpha)\% = 100(1-0.05)\% = 95\%$ โดยสามารถแบ่งอัตราส่วนของความแปรปรวน หรือเรียกว่าการจัดอันดับสำหรับอัตราส่วนของความแปรปรวน ในการออกแบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ ได้ดังนี้ (Bagchi, 1993)

กรณี $F > 1$ หมายถึง ผลของปัจจัยควบคุมมีค่ามากกว่าความแปรปรวน ที่สืบเนื่องมาจากผลของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (Experimental Error) และผลของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect)

กรณี $F < 1$ หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีผลมากกว่าผลของปัจจัยควบคุม หรือปัจจัยควบคุมไม่มีนัยสำคัญ

กรณี $F \approx 2$ หมายถึง ปัจจัยควบคุมมีผลปานกลางเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

กรณี $F > 4$ หมายถึง ปัจจัยควบคุมมีผลอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง หรือปัจจัยควบคุมมีนัยสำคัญอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อค่าตอบสนองได้จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก (Percentage Contribution) ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใดได้ ดังนี้ (Peace, 1993)

$$\text{Percentage Contribution of Factor} = \left(\frac{SS_{Factor}}{SS_T}\right) \times 100\% \qquad (22)$$

เราใช้แนวทางนี้ในการตัดสินเลือกปัจจัยซึ่งนำมาใช้ในการพยากรณ์สมการทางคณิตศาสตร์ โดยอีกนัยหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของอิทธิพลของปัจจัยควบคุม ซึ่งถือว่าเป็นชนิดหนึ่งของสัญญาณ (Signal) และกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองถือว่าเป็นชนิดหนึ่งของสิ่งรบกวน (Noise) ดังนั้น การใช้สัดส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นสัดส่วนไม่อิสระในกรณีกายภาพเช่นนี้ และแสดงออกมาได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของค่าตอบสนอง (Response) ที่วัดค่าได้

การทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกับการทดลองเพื่อการยืนยันผลในขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการทากูชิ พิจารณาดังนี้(Jenson *et al*, 1988)

$$\eta_{opt} = m + \sum(m_i - m) \qquad (23)$$

เมื่อ η_{opt} คือ ค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

m คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยของการทดลองทั้งหมด

m_i คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ i

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดนั้น นำมาจากข้อมูลการทดลองโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน ร่วมกับข้อมูลของระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย แล้วนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลของการทดลองเพื่อยืนยันผลว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

ง. การทดลองเพื่อยืนยันผล

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทดลองในกระบวนการที่เข้มแข็ง เป็นขั้นตอนเกี่ยวกับการพิสูจน์ค่าที่ดีที่สุดของการรวมกันของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมีเหตุผล โดยการกำหนดตารางแผนการทดลองให้สอดคล้องกับโครงการที่จะทำการปรับปรุง ในการกำหนดแผนการทดลองเพื่อยืนยันผลจะใช้การรวมกันของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งการรวมกันของปัจจัยได้จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ถ้าค่าตอบสนองมีค่าตรงตามที่ได้ทำนายไว้ ก็แสดงว่าการรวมกันของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจริง สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kita *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการโพลิชชิงพื้นผิวโค้ง โดยเป็นการประยุกต์ใช้ความสามารถของเครื่องเจียรนัยระบบควบคุมเชิงตัวเลข (Grinding Center, GC) ร่วมกับหัวขัดแบบทรงกลม (Elastic Ball Type Wheel) โดยการศึกษานี้ทำให้เกิดกระบวนการโพลิชชิงที่มีความแม่นยำสูง กล่าวคือ เป็นการประยุกต์ใช้ความสามารถของเครื่องเจียรนัยระบบควบคุมเชิงตัวเลขที่สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดตัดในกระบวนการตัดเฉือนให้เป็นระบบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ไปเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวขัดที่สามารถขัดพื้นผิวโค้งได้ ซึ่งก็คือเป็นการประยุกต์กระบวนการตัดเฉือน (Cutting Process) ไปเป็น กระบวนการขัด (Polishing Process) โดยจากงานวิจัยพบว่า กระบวนการขัดผิวที่ได้จากการประยุกต์ใช้ความสามารถของเครื่องเจียรนัยระบบควบคุมเชิงตัวเลข สามารถขัดผิวพื้นผิวโค้ง เช่น พื้นผิวโค้งแบบพาราโบลิก (Parabolic Surface), พื้นผิวโค้งแบบทรงกลม (Sphere Surface) โดยยังคงความถูกต้องแม่นยำด้านขนาดและรูปร่างไว้ได้ ซึ่งสิ่งนี้เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดในกระบวนการขัดผิวชิ้นงานต่างๆ เทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างสูงต่อกระบวนการขัดผิวแม่พิมพ์ ซึ่งโดยปกติมีพื้นผิวโค้งหลากหลายรูปแบบ ในอนาคตต่อไปได้

Hocheng and Kuo (2002) ได้ทำการศึกษาการใช้เครื่องขัดผิวอุลตร้าโซนิค ในการขัดผิวแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งโดยปกติแล้วเครื่องอุลตร้าโซนิค (Ultrasonic Machine) เหมาะกับการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งและเปราะ การวิจัยนี้มีการศึกษาผลกระทบที่มีต่อพื้นผิวของแม่พิมพ์โลหะจากขนาดอนุภาคของสารขัดสีและค่าความดันสถิต (Static Load) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแม่พิมพ์ ในการทดลองของงานวิจัยนี้มีการใช้สารขัดสีที่มีอนุภาคแตกต่างกัน 5 ขนาด ดังนี้ เบอร์ 100, 400,

800, 1500, 2000 แล้วกำหนดค่าความดันสถิตไว้คงที่ค่าหนึ่งคือ 841 กิโลปาสคาล (KPa) พบว่า สารขัดสีที่มีอนุภาคเบอร์ 400 ดีที่สุดในกลุ่มการทดลอง แล้วทำการทดลองหาค่าความดันสถิตที่เหมาะสม โดยทำการเปลี่ยนค่าความดันสถิตจาก 591 กิโลปาสคาลจนถึง 1291 กิโลปาสคาล แล้วคงที่อนุภาคของสารขัดสีที่เบอร์ 400 พบว่ายิ่งความดันสถิตมีค่าสูงขึ้นก็จะยิ่งช่วยกระตุ้นการขัดผิวแม่พิมพ์ได้เป็นอย่างดี จากการทดลองทั้งสองส่วนสามารถสรุปได้ว่า ขนาดของสารขัดสีมีผลต่อความหยาบผิวแม่พิมพ์ และค่าความดันสถิตที่มากจะช่วยกระตุ้นในการขัดผิวได้เป็นอย่างดี

Yuan *et al.* (2003) ได้ศึกษาการแลปปิงและการขัดผิวโดยใช้วัสดุที่อ่อนเป็นตัวขัดผิวให้กับผลึกคริสตัล (Quartz Crystal) ซึ่งพบว่าโดยปกติวัสดุที่อ่อนจะช่วยลดการทำลายพื้นผิวชิ้นงาน โดยเฉพาะในกระบวนการขัดผิวที่พบสารขัดสีมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีสิ่งสกปรกในการทำงาน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงสารขัดสี รวมถึงสภาพแวดล้อมในการทำงานที่เหมาะสม โดยทำการพิจารณาในสภาวะที่อิทธิพลจากเครื่องจักรมีผลกระทบต่อกระบวนการขัดผิวน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณารูปแบบการขัดผิวที่เรียกว่า วิธีการขัดผิวที่มีความเที่ยงตรงสูง (Ultra-Precision Polishing) โดยได้ออกแบบการทดลองไว้ดังนี้ กล่าวคือ กำหนดขนาดของผลึกคริสตัลไว้ที่ต่ำกว่า 0.5 ไมโครเมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของสารขัดสีชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ตามลำดับดังนี้ เบอร์ 1000, 2000 และ 4000 แล้วทำการศึกษาถึงความเร็วในการขัดผิว (Lapping Speed) ตั้งแต่ช่วง 80 ถึง 170 เมตรต่อนาที (m/min) และแรงกดในการขัดผิว (Lapping Pressure) ตั้งแต่ช่วง 100 ถึง 150 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีผลต่ออัตราการขัด (Stock Removal) ของผลึกคริสตัล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่า การใช้ความหยาบของพื้นผิวผลึกคริสตัลเป็น 1-2 Å โดยใช้ผงขัดซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) และหัวขัด K3-pitch ในการทดลอง โดยพบอัตราการขัดที่เหมาะสมคือ 1-4 Å/s

Choi and Jeong (2004) ได้ทำการศึกษากระบวนการขัดผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานฉีดพลาสติก ซึ่งต้องการคุณภาพผิวแม่พิมพ์ที่ดีกว่าแม่พิมพ์ในงานด้านอื่นๆ โดยทำการศึกษาค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในระดับนาโนเมตร ซึ่งกระบวนการขัดผิวโดยทั่วไปจะมีผลกระทบจากความต้านทาน (Loading) และความมันวาว (Glazing) งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการขัดผิวโดยใช้สารขัดสีสำหรับการขัดแบบเปียกนำมาออกแบบและผลิตเป็นแผ่น (Hydrophilic Fix Abrasive Pad) ด้วยการยึดเหนี่ยวของสารโพลิเมอร์ (Polymer Binder Network) ซึ่งนำมาใช้ร่วมกับเครื่องจักรสำหรับการขัดแบบเปียกที่อาศัยหลักการขยายตัวของน้ำ (Water Swelling Mechanism) ซึ่งวิธีการนี้มีเสถียรภาพของเครื่องมือในการขัดผิว โดยปราศจากความต้านทานและความมันวาวที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ โดยทำการเลือกโพลิเมอร์ 3 ประเภทผสมกันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

(Weight Ratio) คือ PEG, PEGMA, TMPTA มาใช้ในการทดสอบว่าโพลีเมอร์ผสมสูตรใดที่สามารถยึดสารขัดสีได้ดีและเหมาะกับการใช้งานร่วมกับเครื่องขัดผิว จากกลุ่มตัวอย่างโพลิเมอร์ที่เลือกมา พบว่าอัตราส่วนของ PEG:PEGMA:TMPTA ที่เหมาะสมที่สุดคือ 4:5:1 สามารถยึดติดสารขัดสีได้ดี จากนั้นทำการทดลองหาขนาดอนุภาคของสารขัดสีที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งสารขัดสีออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1ใช้สารขัดสีแบบเปียกเบอร์ 100, 600, 1000 และ ชุดที่ 2 ใช้สารขัดสีชนิดบ่ม (Thermo-Curable) เบอร์ 100, 400, 800, 1800 โดยทั้งสองชุดจะทำการทดลองขัดชิ้นงานแล้วนำไปวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างทั้งสองชุด พบว่าความหยาบของผิวชิ้นงานแม่พิมพ์โลหะหลังจากการขัดผิวด้วยสารขัดสีแบบเปียกเบอร์ เป็น 15.1 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความหยาบผิวที่บอกได้ว่าผิวชิ้นงานมีคุณภาพดีในระดับนาโนเมตร

Klocke *et al.* (2005) ได้ศึกษากระบวนการขัดผิวชิ้นงานเหล็กผสมโครเมี่ยมและโมลิบดินั่ม (CrMo-steel) 2 ชนิด คือ ชนิดแข็ง (Ground Hardened) ซึ่งมีค่าความแข็งประมาณ 50 หน่วยร็อกเวลล์สเกลซี (HRC) และชนิดอ่อน (Ground Unhardened) ซึ่งมีค่าความแข็งน้อยกว่า 30 หน่วยร็อกเวลล์สเกลซี ชิ้นงานทั้งสองชนิดถูกนำมาขัดผิวด้วยหัวขัดที่มีส่วนผสมของเพชร (Diamond Suspension) ที่ใช้ร่วมกับเครื่องขัดผิวแบบหมุน (Spherical Grinding Machine) ซึ่งหลังจากการขัดผิวในแต่ละขั้นพื้นผิวของชิ้นงานถูกวิเคราะห์โดยไมโครสโคปชนิดลำแสง (Light-Microscope) และอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดลำแสงสีขาว (White Light Interferometer) เพื่อหาค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แล้วทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอนด้วยไมโครสโคป (Transmission Electron Microscopy, TEM) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์รอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro Cracks) และการเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastics Deformation) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ขอบของชิ้นงาน (Near-Surface Zone)โดยจากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการขัดผิวเหล็กผสมโครเมี่ยมและโมลิบดินั่มชนิดแข็งจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรได้ยากกว่าชนิดอ่อนซึ่งมีโอกาสเกิดได้สูง และการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของการเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนขอบชิ้นงาน สรุปได้ว่า การเปลี่ยนรูปถาวรมีผลต่อการตัดเฉือนในกระบวนการขัด และส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน ดังนั้น อัตราการตัดเฉือนของกระบวนการขัดผิว (Removal Rates) ของเหล็กผสมโครเมี่ยมและโมลิบดินั่มชนิดอ่อนควรต่ำ แล้วค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเหล็กผสมโครเมี่ยมและโมลิบดินั่มมีความแข็งมากขึ้น เพื่อให้ได้คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ดี

ภูวดล (2541) ได้ทำการศึกษาถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเจียรนัยเหล็กหล่อสีเทาด้วยหินเจียรชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์และคิวบิกโบรอนไนไตรด์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเงื่อนไขในการเจียรนัยที่เหมาะสม และอายุการใช้งานของหินเจียรนัยทั้งสองชนิด โดยส่วนของการเจียรนัยผิวเหล็กหล่อสี

เทาด้วยหินซิลิกอนคาร์ไบด์ ได้ใช้เงื่อนไขการเจียรนัยที่ความเร็วตัด (Cutting Speed, v) ที่ 30 ถึง 80 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อน (Feed Rate, f) ที่ 30 ถึง 70 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด (Depth of Cut, d) เป็น 38 ถึง 42 ไมครอน โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของหินเจียรนัยคือ ความหยาบผิวของชิ้นงานต้องน้อยกว่า 3 ไมครอน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงอายุการใช้งานของหินเจียรแต่ละก้อนที่เงื่อนไขการเจียรนัยที่แตกต่างกัน ซึ่งนำไปสู่การหาค่าใช้จ่ายในการเจียรนัย จากนั้นทำการทดลองกับหินเจียรนัยแบบคิวบิกโบรอนไนไตรด์ โดยมีเงื่อนไขของการเจียรนัยที่ความเร็วตัด (Cutting Speed, v) ที่ 30 ถึง 80 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อน (Feed Rate, f) ที่ 30 ถึง 70 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัดเป็น 16 ถึง 20 ไมครอน แล้วทำการวิเคราะห์เงื่อนไขในการเจียรนัยและเลือกหินเจียรที่เหมาะสม โดยในส่วนของการวิเคราะห์อายุการใช้งานหินเจียร (Tool Life) ใช้สมการความสัมพันธ์ของเทเลอร์ (Taylor's Equation) แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีในการเจียรนัย โดยเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอายุการใช้งานกับความเร็วตัด, อัตราการป้อน และความลึกในการตัด ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจียรนัยเหล็กหล่อสีเทาทั้งในกรณีเงื่อนไขค่าใช้จ่ายต่ำสุดและกำลังการผลิตสูงสุดพบว่าควรเลือกใช้หินเจียรชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยมีเงื่อนไขเหมาะสมที่สุด 2 กรณี กล่าวคือ กรณีแรก ค่าใช้จ่ายต่ำสุด ที่ความเร็วตัด 41 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อน70 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัดเป็น 38 ไมครอน ซึ่งทำให้อัตราการผลิตเท่ากับ 1,786 ชิ้นต่อวัน เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานต่ำสุดคือ 14.97 บาทต่อ 1,000 ชิ้น กรณีที่สอง กำลังการผลิตสูงสุด ที่ความเร็วตัด 75 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อน70 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัดเป็น 38 ไมครอน ซึ่งทำให้อัตราการผลิตเท่ากับ 2,464 ชิ้นต่อวัน เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานต่ำสุดคือ 34.25 บาทต่อ 1,000 ชิ้น

พงศ์ชนัน และ นพดล (2550) ทำการศึกษาการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ (Reamer Hole) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติประยุกต์ที่เรียกว่า การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้คือ เหล็ก S50C จาก 2 บริษัทคือ บริษัทไดโดและบริษัทฟูตาบะ ด้วยสารหล่อเย็นสองชนิดคือ Ecocool 700NBF และ Ecocool Bio914 โดยพิจารณาปัจจัยที่น่าสนใจจำนวน 3 ปัจจัย คือ อัตราป้อนของดอกรีมเมอร์ (Feed Rate) หน่วยเมตรต่อนาที, ความเร็วรอบ (Spindle Speed) หน่วยรอบต่อนาที และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการคว้านรูเรียบ (Diameter before Reaming) หน่วยมิลลิเมตร การกำหนดระดับเบื้องต้นของปัจจัยใช้วิธี OVAT (One Variable At the Time) และวิธีเชิงแฟคทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) นอกจากนี้ยังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งวิธีเชิงแฟคทอเรียลชนิดสองระดับ และวิธีสตีพเดสเซนท์ (Steepest Descent) โดยผลการทดลองพบว่าในครั้งแรกของการพัฒนาให้ผลตอบสนองที่

ดีขึ้นกับทุกชนิดของเหล็กและสารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามผลการปรับปรุงด้วยกระบวนการในครั้งที่ 2 ไม่มีการพัฒนาที่ดีขึ้น ทั้งนี้อาจสืบเนื่องจากขั้นตอนในการปรับระดับของปัจจัยอื่นมากเกินไป

Shiou and Hsu (2008) ได้ทำการศึกษาคุณภาพผิวของเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (STAVAX) ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการเจียรนัยด้วยหัวเจียรทรงกลม (Ball Grinding) กระบวนการขัดผิวด้วยหัวขัดทรงกลม (Ball Burnishing and Ball Polishing) ด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining Center) โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิแบบ L_{18} โดยศึกษาถึงปัจจัยควบคุมจำนวน 7 ปัจจัยคือ จำนวนครั้งของการขัดผิว, ความเร็วรอบ, ชนิดของสารขัดสี, อัตราป้อน, ระยะป้อน, ความลึกของการขัด และชนิดของสารหล่อเย็น โดยพบว่า การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือ ทำการขัดผิวซ้ำ 2 ครั้ง, ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที, สารขัดสีชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 3 ไมโครเมตร, อัตราป้อน 60 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 90 ไมโครเมตร และ ใช้น้ำหล่อเย็นที่มีอัตราส่วนผสม 1 ต่อ 30 จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผลการทดลองว่ามีอันตรกิริยาระหว่างแต่ละปัจจัยควบคุมหรือไม่ พบว่าไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเกิดขึ้น แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ แล้วเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดจำนวน 2 ปัจจัยซึ่งพบว่า ระยะป้อนลึกและชนิดของสารหล่อเย็นมีอิทธิพลต่อกระบวนการมากที่สุด แล้วนำปัจจัยทั้งสองมาทำการทดลองซ้ำอีกครั้งด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างการขัดผิวด้วยวิธีการเบอร์นิชชิ่ง (Burnishing Process) และการโพลิชชิง ซึ่งพบว่าเมื่อทำการโพลิชชิงแล้วค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะอยู่ในระดับ 0.12 ถึง 0.022 ไมโครเมตร ซึ่งมีความละเอียดสูง

Mouri *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การวัดและวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวโดยการใช้หลักการของการแยกลำแสงเลเซอร์ออกเป็นแสงซึ่งมีสีที่แตกต่างกัน ที่สะท้อนมาจากพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการทำการวัด ซึ่งพบว่าการกระจายความเข้มของแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ไปตกกระทบบนพื้นผิวที่ต้องการวัดค่าความหยาบผิวไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหยาบผิวในแต่ละส่วน จึงทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ งานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้หลักการวัดแบบมีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายทางคอมพิวเตอร์ (On-Line Measuring) หรือที่เรียกว่าการวัดแบบติดตามประเมินผล (Monitoring) โดยมีการนำเอากล้องวีดีโอ (Video Camera) และโฟโต้เซนเซอร์ (Photo Sensors) มาใช้ในการวัดค่าความเข้มของแสง กล่าวคือ กล้องวีดีโอจะทำการตรวจสอบหาตำแหน่งที่มีการกระจายความเข้มของแสงที่มีค่าสูงสุด และกล้องวีดีโอยังถูกใช้ในการ

หาตำแหน่งของโฟโต้ไดโอด (Photo Diode) โดยใช้ระบบการประมวลผลรูปภาพ (Image Processing) ร่วมด้วย จากวิธีการนี้เมื่อทำการวัดค่าความหยาบผิวจะมีการแสดงค่าเส้นโค้งของการกระจายของความเข้มของแสง (Distribution Curve) หรือที่เรียกว่าเส้นโค้งการกระจายความเข้มของแสงจริง (True Distribution Curve) ที่เกิดจากกระบวนการวัด ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว และทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูล กล่าวคือเลือกจุดสองจุดที่อยู่บนเส้นโค้งการกระจายความเข้มของแสงจริง ให้ทำการกำหนดค่าของจุดที่หนึ่งให้คงที่ แล้วทำการเปลี่ยนค่าของจุดที่สองซึ่งจะทำให้เกิดเส้นโค้งใหม่ที่เรียกว่า เส้นโค้งเพื่อการประเมินผล (Calculated Curve) แล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งจริงทั้งนี้เพื่อเป็นการหาตำแหน่งของโฟโต้ไดโอดที่เหมาะสมที่สุดอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. หัวขัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรเคลือบผงเพชรที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 80 ถึง 100 ไมโครเมตร และ 40 ถึง 60 ไมโครเมตร

ภาพที่ 16 หัวขัดเคลือบผงเพชร

2. เหล็ก SCM 415 ชุบผิวแข็ง ขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร, ยาว 40 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร จำนวน 17 ชิ้น

ภาพที่ 17 ชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ที่ใช้ในการทดลอง

3. มีดกัดบอลโนส (End Mill Ball Nose) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

4. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน รุ่นโฟกัสไซกิ ความเร็วสปินเดิลสูงสุด 20,000 รอบต่อนาที (Focusseiki 20,000 r.p.m.)

5. เครื่องทดสอบค่าความแข็งรุ่น มิตูโตโย่ เออาร์เค-600 (Mitutoyo ARK-600 Hardness Testing Machine)

ภาพที่ 18 เครื่องทดสอบค่าความแข็งรุ่น มิตูโตโย่ เออาร์เค-600

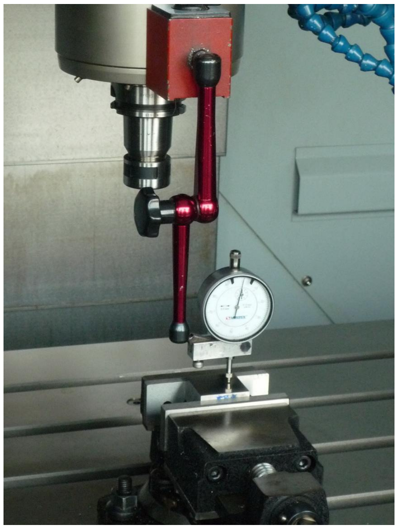
ที่มา: ฝ่ายเครื่องมือวัด สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2552)

6. โปรแกรมยูนิกราฟิค รุ่นเอ็นเอกซ์ 3 (UniGraphics Version NX3)

7. เครื่องวัดค่าความหยาบผิวแบบกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ยี่ห้อโอลิมปัส รุ่นแอลอีเอกซ์ที โอแอลเอส3100 (Confocal Laser Scanning Microscope LEXT OLS3100)

8. เครื่องคอมพิวเตอร์

9. ไดอัลเกจ (Dial Gauge)



ภาพที่ 19 ไดอัลเกจเพื่อใช้ในการวัดระดับในแนวระนาบแกน X

ที่มา: ฝ่ายแม่พิมพ์พลาสติก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2552)

10. โปรแกรมมินิแทป รุ่น 15.1.1 (Minitab Version 15.1.1)

11. โปรแกรมออโต้แคด รุ่น2007 (AutoCAD Version 2007)

วิธีการ

1. การเตรียมชิ้นงานเหล็ก SCM 415

1.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ด้วยการตัดเฉือนแท่งเหล็กขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร, ยาว 400 มิลลิเมตร และหนา 25 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น ด้วยเลื่อยไฟฟ้าและเครื่องไสให้เป็นชิ้นงานขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร, ยาว 40 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้น

1.2 การชุบผิวแข็ง (Surface Hardening) ทำการชุบผิวแข็งด้วยวิธีการคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing) ซึ่งเป็นการเพิ่มธาตุคาร์บอนให้กับชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ซึ่งจากเดิมที่มีค่าความแข็งประมาณ 30-40 ร็อกเวลส์เสกลซี ให้มีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 60 ร็อกเวลส์เสกลซี

1.3 การกัดละเอียด (Finishing Milling) โดยเป็นกระบวนการกัดในขั้นตอนสุดท้ายด้วย มีดกัดบอลโนส (End Mill Ball Nose) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนความเร็วรอบของสปินเดิล 8,000 รอบต่อนาที, อัตราป้อน 800 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร และระยะป้อนลึก 10 ไมโครเมตร

ภาพที่ 20 การกัดผิวชิ้นงานเหล็ก SCM 415 ด้วยมีดกัดบอลโนส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

1.4 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Testing) หลังจากผ่านกระบวนการชุบผิวแข็ง โดยทำการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบค่าความแข็งรุ่น มิตูโตโย่ เออาร์เค-600 โดยใช้การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซี

2. การกำหนดปัญหา (ขั้นตอนที่ 1 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ)

โดยทำการศึกษาปัญหาในการทำการขัดผิวเหล็กแข็งในปัจจุบันของโรงงานขัดผิวแม่พิมพ์แห่งหนึ่งพบว่า โดยปกติใช้แรงงานคนร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆในการขัดผิว เช่น เครื่องขัดอุลตร้าโซนิค (Ultrasonic Lapping Machine), เครื่องขัดแรงลม (Air Lappers) อุปกรณ์เหล่านี้มักจะเกิดปัญหาจากความไม่แน่นอนในการทำงานของแรงงานคน กล่าวคือแรงในการกดอุปกรณ์ขัดผิวลงบนผิวชิ้นงานของพนักงานไม่เท่ากันตลอดการทำการขัดผิว ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความหยาบผิวชิ้นงาน หรืออาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและรูปทรงของชิ้นงานซึ่งไม่สามารถเป็นที่ยอมรับได้ ทั้งนี้เนื่องด้วยความสามารถในการทำงานของพนักงานแต่ละคนขึ้นอยู่กับทักษะประสบการณ์ในการทำงาน ความถนัด และความเชี่ยวชาญในงานลักษณะที่แตกต่างกัน

ปัญหาอีกอย่างหนึ่งของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยแรงงานคนคือ ไม่สามารถทราบเวลาในการทำการขัดผิวที่แน่นอนได้ ในชิ้นงานแบบเดียวกันพนักงานแต่ละคนก็ใช้เวลาในการขัดผิวไม่เท่ากัน ทำให้เกิดปัญหาการส่งงานล่าช้า ปัญหานี้จึงเป็นอีกปัญหาหนึ่งต้องการทำการแก้ไข

ปัญหาต่างๆเหล่านี้ได้มาจากการสังเกตุกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงได้นำปัญหาเหล่านี้มาทำการระดมสมอง (Brain Storming) กับผู้ร่วมทำการวิจัย และอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อหาแนวทางในการศึกษาและแก้ปัญหาต่างๆเหล่านี้ จึงได้เกิดแนวความคิดในการประยุกต์ใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพ มีความเที่ยงตรงและมีความแม่นยำ อีกทั้งมีความเป็นอัตโนมัติในการทำงาน ซึ่งพบว่าเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาทำการศึกษาร่วมกับการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดผิวซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนได้ และใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางมาตรฐานออทอกอนอล อะเรย์ นำมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการขัดผิว ทั้งนี้เพื่อสร้างกระบวนการการขัดผิวเหล็กแข็งที่เป็นอัตโนมัติ ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานเหล็กแข็งให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

3. การวางแผนการทดลอง (ขั้นตอนที่ 2 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ)

3.1 ทำการออกแบบตารางการทดลอง

3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่จะนำมาพิจารณา

จากการระดมสมองระหว่างผู้ทำการวิจัย, ผู้ร่วมทำการวิจัย, อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้เชี่ยวชาญในการขัดผิวแม่พิมพ์ พบว่าปัจจัยที่เราสนใจในการทดลองประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนร่วมกับการออกแบบหัวขัดเคลือบผงเพชรให้สามารถทำการขัดผิวร่วมกันได้นั้นจะทำการศึกษาปัจจัยควบคุมจำนวน 6 ปัจจัย คือ

ก. ขนาดอนุภาคของผงเพชร หน่วยไมโครเมตร

ข. ความเร็วตัด (Cutting Speed) หน่วยเมตรต่อนาที

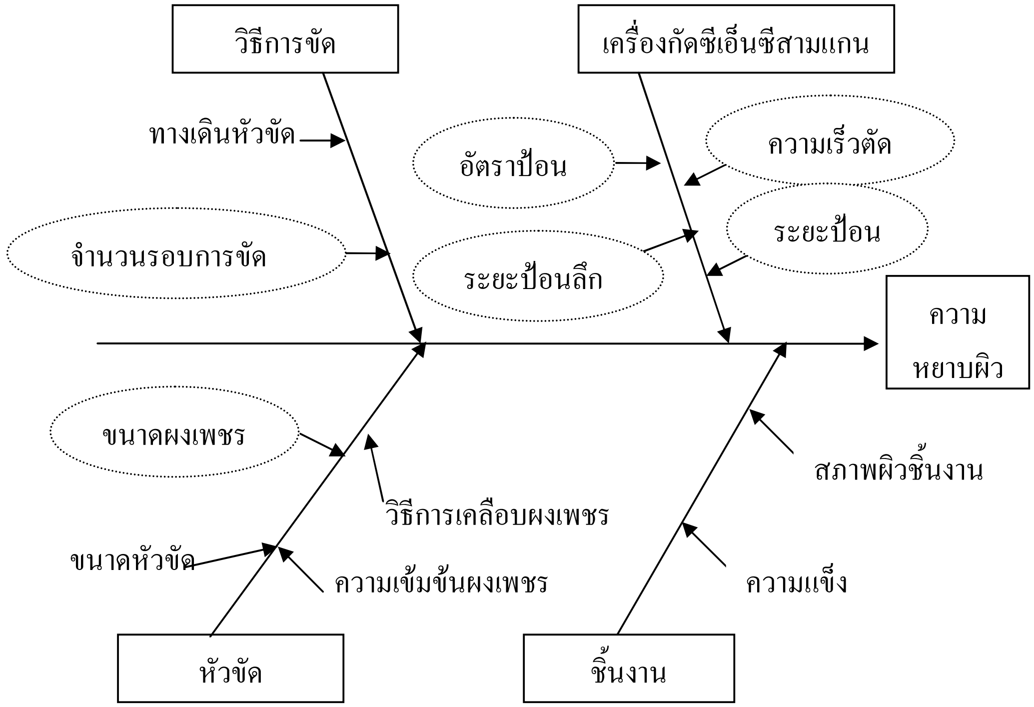
ค. อัตราป้อน (Feed Rate) หน่วยมิลลิเมตรต่อนาที

ง. ระยะป้อน (Step Over) หน่วยไมโครเมตร

จ. ระยะป้อนลึก (Depth of Penetration) หน่วยไมโครเมตร

ฉ. จำนวนรอบการขัด (Polishing Time) หน่วยรอบ

ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้จะไม่นำมาทำการพิจารณา ทั้งนี้สามารถจำแนกปัจจัยตามผังแสดงเหตุและผล ได้ดังนี้



ภาพที่ 21 ผังแสดงเหตุและผลของการกำหนดปัจจัยที่จะนำมาทำการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดซึ่งได้จากการระดมสมอง โดยปัจจัยที่อยู่ในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่เลือกมาทำการออกแบบการทดลอง

ผังแสดงเหตุและผลข้างต้นเป็นการจำแนกปัจจัยของการทดลองในกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดโดยใช้ข้อมูลจากการระดมความคิดและการทดลองเบื้องต้นพบว่าคนและสิ่งแวดล้อมในการทดลองนั้นเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบกับการทดลองจึงไม่ถูกกำหนดลงในผังแสดงเหตุและผลนี้ และไม่มีการนำมาพิจารณาในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ

3.1.2 การจำแนกปัจจัย

การจำแนกปัจจัยหลักและปัจจัยสัญญาณรบกวนจะพิจารณาจากความสามารถในการควบคุมได้ในกระบวนการขัดผิว โดยปัจจัยทั้งหมดที่นำมาพิจารณาในการทดลองทั้ง 6 ปัจจัยสามารถทำการควบคุมได้ทุกปัจจัย จึงจัดได้ว่าเป็นปัจจัยหลักทั้งหมด

3.1.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

กระบวนการในการขัดผิวเหล็กแข็งที่ได้จากการระดมความคิดจากผู้ร่วมทำการวิจัยหลายๆฝ่ายนั้น พบว่าจะต้องมีการจ้างผลิตหัวขัดจากผู้ผลิตหัวขัดที่มีความเชี่ยวชาญ เพราะเทคโนโลยีและกรรมวิธีการเคลือบผงเพชรมีความซับซ้อนอีกทั้งต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือเฉพาะด้าน อาทิเช่น แม่พิมพ์สำหรับการเคลือบสารขัดสี วัสดุเชื่อมประสานสารขัดสี เป็นต้น และในส่วนของการวิเคราะห์ความหยาบผิวจะต้องมีการว่าจ้างบริษัทที่มีความเชี่ยวชาญในระบบการวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์แสกนเนอร์ เมื่อทำการรวบรวมค่าใช้จ่ายเบื้องต้นพบว่าค่าใช้จ่ายของทั้งสองส่วนตามที่กล่าวมานั้นมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งในการทำการทดลองแต่ละครั้งเมื่อประมวลผลทางเดินหัวขัดด้วยโปรแกรมยูนิกราฟฟิค รุ่น เอ็นเอ็กซ์3 พบว่าใช้เวลาการขัดนาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง จึงกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองของทุกๆ ปัจจัยที่ปัจจัยละ 2 ระดับ ดังต่อไปนี้

ก. ขนาดอนุภาคของผงเพชร แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 ขนาด 80-100 ไมครอน และระดับที่ 2 ขนาด 40-60 ไมครอน

ข. ความเร็วตัด (Cutting Speed) แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 คือ 300 เมตรต่อนาทีและระดับที่ 2 คือ 450 เมตรต่อนาที

ค. อัตราป้อน (Feed Rate) แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 คือ 50 มิลลิเมตรต่อนาทีและระดับที่ 2 คือ 150 มิลลิเมตรต่อนาที

ง. ระยะป้อน (Step Over) แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 คือ 20 ไมโครเมตร และระดับที่ 2 คือ 60 ไมโครเมตร

จ. ระยะป้อนลึก (Depth of Penetration) แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 คือ 60 ไมโครเมตรและ ระดับที่ 2 คือ 120 ไมโครเมตร

ฉ. จำนวนรอบการขัด (Polishing Time) หน่วยรอบ แบ่งออกเป็น 2 ระดับดังนี้ ระดับที่ 1 คือ 1 รอบและระดับที่ 2 คือ 2 รอบ

ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางแสดงระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 8 ระดับของแต่ละปัจจัยการทดลอง

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	หน่วย
ก. ขนาดอนุภาคของผงเพชร	80-100	40-60	ไมโครเมตร
ข. ความเร็วตัด	300	450	เมตรต่อนาที
ค. อัตราป้อน	50	150	มิลลิเมตรต่อนาที
ง. ระยะป้อน	20	60	ไมโครเมตร
จ. ระยะป้อนลึก	60	120	ไมโครเมตร
ฉ. จำนวนครั้งของการขัด	1	2	ครั้ง

3.1.4 การเลือกตารางการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่มีผลการทดลองที่เที่ยงตรงที่สุด คือ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) แต่การทดลองดังกล่าวเหมาะสมกับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยในการทดลองไม่มากนัก และระดับของแต่ละปัจจัยมีน้อย เช่น การทดลองที่มีปัจจัย3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ดังนั้นจำนวนแบบการทดลองเท่ากับ 2^3 หรือเท่ากับ 8 การทดลอง แต่ถ้าหากมี 6 ปัจจัยตามที่เราต้องการศึกษา จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 2^6 หรือเท่ากับ 64 การทดลอง ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า ค่าใช้จ่ายในการทดลองค่อนข้างสูง และใช้เวลาในการทำการทดลองแต่ละการทดลองเป็นเวลานาน เพื่อแก้ปัญหาการออกแบบการทดลองนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ ซึ่งสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้ อีกทั้งสามารถลดเวลาในการทดลองและลดค่าใช้จ่ายได้มาก โดยสามารถทำการเลือกตารางออทอกอนอล อะเรย์ ดังนี้

ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก = (ระดับของปัจจัย – 1) × จำนวนปัจจัย

= (2-1) × 6

= 6

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ทำการพิจารณาปัจจัยร่วม ดังนั้น ระดับขั้นความอิสระรวม คือ 6 และในการเลือกตารางออทอกอนอล อะเรย์ จะต้องเลือกตารางออทอกอนอล อะเรย์ที่มีระดับขั้นความอิสระของตารางมากกว่าหรือเท่ากับระดับขั้นความอิสระของปัจจัย ดังนั้นจากการคำนวณระดับขั้นความอิสระรวมของปัจจัยเท่ากับ 6 จึงเลือกตารางมาตรฐานออทอกอนอล อะเรย์ L_{12} (2^{11}) ซึ่งมีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 11

ตารางที่ 9 ตารางมาตรฐานออทอกอนอล อะเรย์ L_{12} (2^{6}) ที่ 6 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ

การทดลอง	ปัจจัย					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2
3	1	1	2	2	2	1
4	1	2	1	2	2	1
5	1	2	2	1	2	2
6	1	2	2	2	1	2
7	2	1	2	2	1	1
8	2	1	2	1	2	2
9	2	1	1	2	2	2
10	2	2	2	1	1	1
11	2	2	1	2	1	2
12	2	3	1	1	2	1

ซึ่งสามารถแสดงระดับของปัจจัยในแต่ละการทดลอง ได้ดังนี้

ตารางที่ 10 ระดับของปัจจัยในแต่ละการทดลองขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

การทดลอง	ขนาดอนุภาคสารขัดสี (ไมโครเมตร)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/min)	ระยะป้อน (ไมโครเมตร)	ระยะป้อนลึก (ไมโครเมตร)	จำนวนครั้งของการขัด (ครั้ง)
1	80-100	300	50	20	60	1
2	80-100	300	50	20	60	2
3	80-100	300	150	60	120	1
4	80-100	450	50	60	120	1
5	80-100	450	150	20	120	2
6	80-100	450	150	60	60	2
7	40-60	300	150	60	60	1
8	40-60	300	150	20	120	2
9	40-60	300	50	60	120	2
10	40-60	450	150	20	60	1
11	40-60	450	50	60	60	2
12	40-60	450	50	20	120	1

3.1.5 การพิจารณาลดค่าอคติในการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนหลัก หรือความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลอง จะเกิดขึ้นขณะที่มีการเปลี่ยนรูปแบบกรรมวิธีการทดลองจากวิธีการทดลองหนึ่งไปสู่อีกวิธีการทดลองหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถลดได้โดยการลดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองให้น้อยที่สุด กล่าวคือ ในการเลือกใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ ควรให้ปัจจัยที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองอยู่ในลำดับต้นๆ

จากการออกแบบแนวทางในการศึกษาพบว่าการติดตั้งหัวขัดเข้ากับสปินเดิลจะต้องทำการวัดค่าความร่วมศูนย์ด้วยไดอัลเกจ เพื่อทราบลักษณะการหมุนของหัวขัดว่ามีการหนีศูนย์หรือไม่ และต้องทำการปรับตั้งให้หัวขัดมีความสมดุลย์ในการหมุนมากที่สุด ทั้งนี้ต้องมีการปรับระดับการจับยึดหัวขัดให้เหมาะสม กระบวนการเตรียมการทดลองส่วนนี้ใช้เวลาค่อนข้างนานจึงจำเป็นต้องกำหนดปัจจัยในลำดับแรกเป็น ขนาดของอนุภาคผงเพชร ทั้งนี้เพื่อขจัดการ

เปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนี้ลง เป็นการช่วยลดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดลองลดลง

3.1.6 การสุ่มการทดลอง

เพื่อให้เป็นไปตามการลดค่าอคติในการทดลองดังขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งต้องการลดการเปลี่ยนระดับของขนาดอนุภาคสารขัดสีให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จึงเลือกใช้ การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อค การสุ่มชนิดนี้ใช้ในกรณีที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนระดับของตัวแปรตัวใดตัวแปรหนึ่ง ซึ่งในการทดลองนี้คือ ขนาดอนุภาคสารขัดสี จึงต้องทำการบล๊อคที่ระดับแรกคือ 80-100 ไมโครเมตรเสียก่อนแล้วจึงทำการสุ่มภายในบล๊อคนี้ จากนั้นทำการสุ่มในบล๊อคที่เหลือคือ 40-60 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล๊อคของตารางออทอกอนอล อะเรย์ L_{12} (2^{11}) ที่ 6 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ

การทดลอง	ปัจจัย					
	1	2	3	4	5	6
1	80-100	300	50	20	60	1
2	80-100	300	50	20	60	2
3	80-100	300	150	60	120	1
4	80-100	450	50	60	120	1
5	80-100	450	150	20	120	2
6	80-100	450	150	60	60	2
7	40-60	300	150	60	60	1
8	40-60	300	150	20	120	2
9	40-60	300	50	60	120	2
10	40-60	450	150	20	60	1
11	40-60	450	50	60	60	2
12	40-60	450	50	20	120	1

การสุ่มในบล๊อคแรก ที่ขนาดอนุภาคผงเพชรขนาด 80-100 ไมโครเมตร

การสุ่มในบล๊อคที่สอง ที่ขนาดอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร

วิธีการในการสุ่มการทดลอง ใช้การสุ่มหยิบสลากที่มีหมายเลขประจำการทดลอง ซึ่งบรรจุอยู่ในกล่องแบบปิด ซึ่งสามารถสรุปลำดับการทดลองของแต่ละบล็อคได้ดังนี้

ตารางที่ 12 ลำดับการทดลองของบล๊อคแรก

ลำดับการทดลอง	1	2	3	4	5	6
การทดลอง	5	4	1	3	2	6

ตารางที่ 13 ลำดับการทดลองของบล๊อคที่สอง

ลำดับการทดลอง	1	2	3	4	5	6
การทดลอง	8	7	10	12	9	11

3.1.7 การกำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำของการทดลอง

จำนวนการทดลองซ้ำนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการทดลองคร่าวๆ ก่อนเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล โดยสามารถประมาณค่าได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

ทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการทดลองเริ่มต้นที่ 2 รอบ โดยอ้างอิงข้อมูลตามตารางผนวกที่ 1ฉ และ 2ฉ ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_N}{N}$$

โดย

N คือ จำนวนสมาชิกเซตข้อมูลการทดลอง

x_i คือ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลอง

$$\bar{x} = \frac{(0.0976 + 0.1087 + 0.1139 + 0.0916 + ... + 0.1642)}{96}$$

$$\bar{x} = \frac{10.5980}{96} = 0.1104$$

จากนั้นทำการคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง ได้จากสูตร

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}$$

โดย

σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

N คือจำนวนสมาชิกเซตข้อมูลการทดลอง

x_i คือ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลอง

ดังนั้น

$$\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 = (0.0976 - 0.1104)^2 + (0.1087 - 0.1104)^2 + (0.1139 - 0.1104)^2 + ... + (0.1642 - 0.1104)^2 = 0.5043$$

แทนค่า $\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 = 0.5043$ ที่ได้ลงในสมการข้างต้น ได้ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{96} \times 0.5043}$$

$$\sigma = 0.0725$$

จากข้อมูลการทดลองกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ทำการทดลองเริ่มต้นที่ 2 รอบ ได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองเท่ากับ 0.0725 µm เพราะฉะนั้นจะได้ความคลาดเคลื่อนของระบบเท่ากับ

$$e = \frac{(t_{0.025,1}) \cdot 0.0725}{\sqrt{2}} = \frac{12.706 \times 0.0725}{1.414} = 0.6514 \quad \mu m$$

กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการให้มีค่าเท่ากับ 10% ของค่าความคลาดเคลื่อนของระบบที่คำนวณได้ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการจะมีค่าเท่ากับ 0.06514 µm

นำผลของความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการไปทำการคำนวณหาจำนวนรอบทำซ้ำของการทดลองที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 11 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0725 และความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการเท่ากับ 0.06514 µm จะได้จำนวนรอบทำซ้ำเท่ากับ

$$n' = \left(\frac{1.96 \cdot 0.0725}{0.06514} \right)^2 = 3.7587$$

ได้จำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 3 และ 4 รอบ ตามลำดับ ซึ่งจำนวนการทดลองดังกล่าวเหล่านี้นั้นเพียงพอต่อความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในด้านของความถูกต้องแม่นยำและความเชื่อมั่นของผลลัพธ์

3.2 วิธีการทำการทดลอง

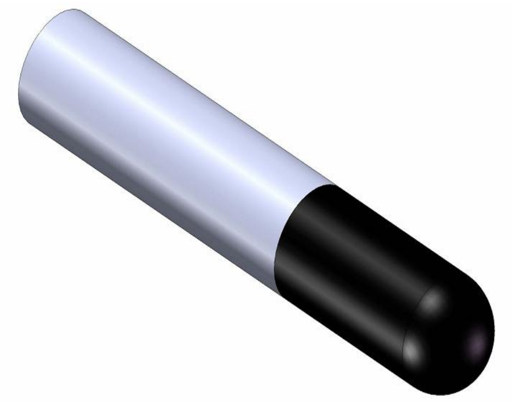
โดยเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นแบบค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ เพราะ ค่าความหยาบผิวยิ่งมีค่าลดต่ำลงแสดงว่าชิ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น หรืออาจกว่าวได้ว่าผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้นนั่นเอง

3.2.1 การออกแบบและสร้างหัวขัดเคลือบสารขัดสีชนิดผงเพชร

ทำการออกแบบหัวขัดโดยใช้โปรแกรมออโต้แคด โดยในส่วนของการออกแบบนั้นอ้างอิงรูปแบบหัวขัดจากรูปแบบของมีดกัดบอลโนส ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ในการกัดผิวขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งลักษณะเด่นของมีดกัดแบบบอลโนสจะมีส่วนปลายเป็นโค้งครึ่งทรงกลมและมีร่องคายเศษ สามารถกัดผิวชิ้นงานได้หลากหลายลักษณะพื้นผิว เช่น พื้นผิวโค้งเว้า, พื้นผิวโค้งนูน และพื้นผิวในแนวระนาบ ลักษณะของมีดกัดบอลโนสดังแสดงในภาพที่ 22

ภาพที่ 22 มีดกัดบอลโนสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

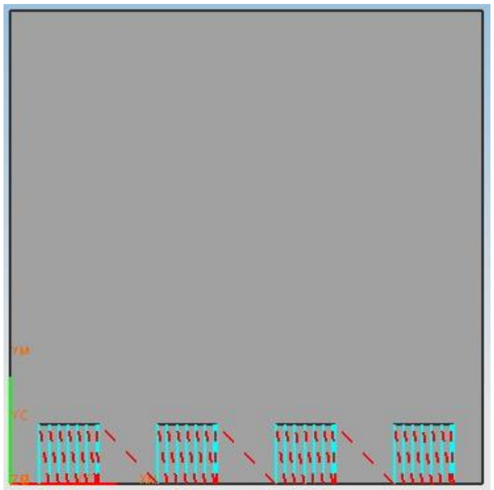
ในส่วนของการสร้างหัวขัดใช้เหล็ก S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนที่จะทำการเคลือบผิว เป็น 8 มิลลิเมตร แล้วทำการเคลือบสารขัดสีด้วยวิธีการเชื่อมประสานสารขัดสีชนิดผงเพชรด้วยเรซิ่น ด้วยค่าความเข้มข้นของอนุภาคสารขัดสี 4.4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเหมาะกับการขัดผิวเหล็กที่มีความแข็งสูง โดยในส่วนของเรซิ่นและผงเพชรจะมีความหนา 2 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถทำการขัดผิวได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้วิธีการเดียวกันนี้กับผงเพชรทั้งสองระดับที่ใช้ในการทดลอง



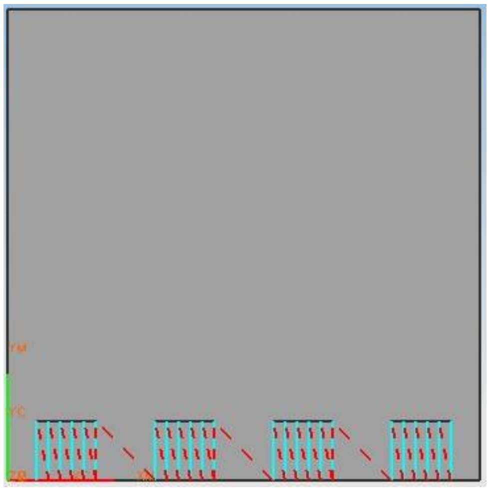
ภาพที่ 23 แบบจำลองชิ้นงานหัวขัดที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออโต้แคด โดยส่วนปลายของหัวขัดซึ่งมีสีดำเป็นส่วนที่ทำการเคลือบสารขัดสีชนิดผงเพชร

3.2.2 การออกแบบและสร้างโปรแกรมเส้นทางเดินของหัวขัดในกระบวนการขัดผิว

ทำการออกแบบทางเดินของหัวขัดด้วยโปรแกรมยูนิกราฟฟิค รุ่นเอ็นเอกซ์ 3 โดยการทดลองในแต่ละการทำซ้ำจะทำการขัดผิวลงบนพื้นที่ขนาด 25 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะทางเดินดังแสดงในภาพที่ 24 และ 25 โดยเป็นการกำหนดให้หัวขัดเดินขัดไปในทิศทางเดียวแล้วยกกลับมาเริ่มขัดในระยะถัดไป (Zig Tool Path)



ภาพที่ 24 ทางเดินหัวขัดที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีระยะป้อน 20 ไมโครเมตร

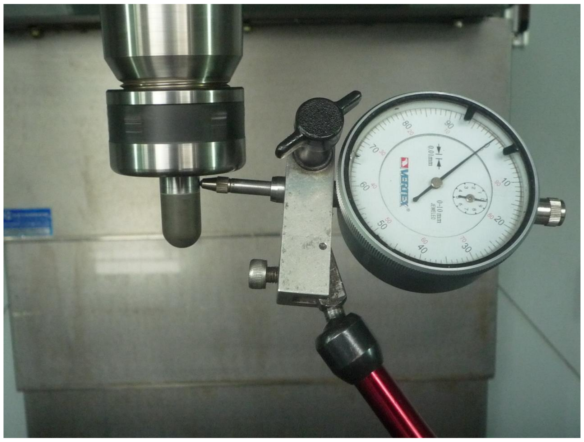


ภาพที่ 25 ทางเดินหัวขัดที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีระยะป้อน 60 ไมโครเมตร

3.2.3 การขัดผิวชิ้นงานเหล็กแข็งด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน

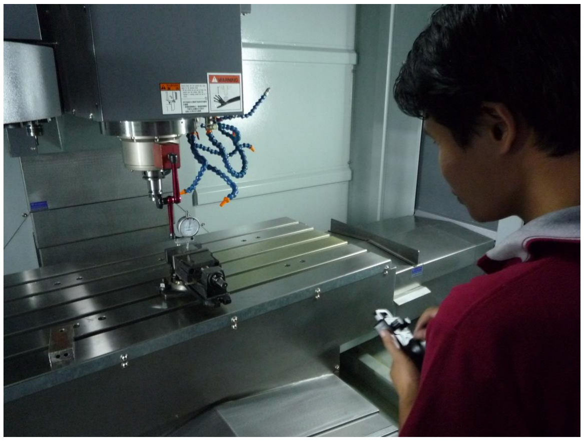
ก. ทำการติดตั้งหัวขัดเข้ากับคอลเลต (Collet) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร แล้วติดตั้งเข้ากับสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซี พร้อมทั้งตรวจสอบการหนีศูนย์ของหัวขัด โดยต้องทำการปรับตั้งให้ได้สมดุลย์การหมุนของหัวขัดเสมอ โดยขั้นตอนนี้จะทำการจับเวลาและเรียกว่า เวลาในการจับยึดหัวขัด หน่วยวินาที

ภาพที่ 26 การติดตั้งหัวขัดเข้ากับคอลเลต



ภาพที่ 27 การติดตั้งคอลเลตเข้ากับสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน พร้อมทั้งวัดความสมดุลย์การหมุนของหัวขัดด้วยไดอัลเกจ

ข. ทำการจับยึดชิ้นงานการทดลองด้วยปากกาจับชิ้นงานแล้วทำการวัดระนาบในแนวแกน X ของชิ้นงานด้วยไดอัลเกจ โดยพยายามปรับระดับในแนวแกน X ให้ทั้งระนาบแกน X มีความสมดุลกันอยู่ในช่วงความแตกต่างไม่เกิน 10 ไมโครเมตร โดยขั้นตอนนี้จะทำการจับเวลาและเรียกว่า เวลาในการจับยึดชิ้นงาน หน่วยวินาที



ภาพที่ 28 การวัดระนาบในแนวแกน X ของการจับยึดชิ้นงานบนปากกาจับชิ้นงานด้วยไดอัลเกจ

ค. ทำการป้อนโปรแกรมทางเดินของหัวขัดให้กับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน ซึ่งในส่วนของโปรแกรมทางเดินของหัวขัดที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมยูนิกราฟฟิคนั้น จะมีข้อมูลในส่วนของความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาที, อัตราป้อนในหน่วยมิลลิเมตรต่อนาที และระยะป้อน

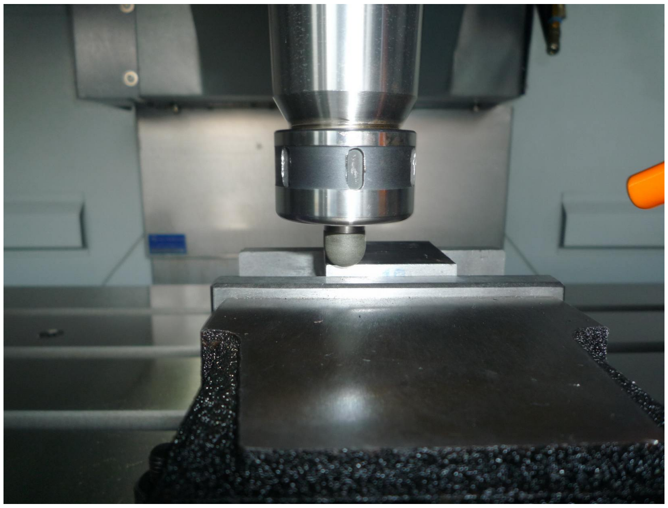
ในหน่วยไมโครเมตรไว้อยู่แล้ว แต่จำเป็นต้องมีการกำหนดระยะป้อนลึกที่คีย์บอร์ดของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนให้ตรงกับเงื่อนไขของแต่ละการทดลอง โดยขั้นตอนนี้จะทำการจับเวลาและเรียกว่า เวลาในการป้อนโปรแกรมทางเดินหัวขัด หน่วย วินาที

ภาพที่ 29 การป้อนโปรแกรมทางเดินของหัวขัดให้กับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน

โดยทั้งสามขั้นตอนข้างต้นนั้น เป็นขั้นตอนของการเตรียมการทดลอง จึงต้องทำการจับเวลาในการเตรียมการทดลอง (Setup Time) ด้วยนาฬิกาจับเวลาเสมอ

ง. ทำการขัดผิว โดยก่อนเริ่มการขัดผิวในทุกๆ การทำซ้ำ จึงต้องทำการปรับตั้งให้จุดแรกที่หัวขัดสัมผัสกับชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่งในแนวแกน Z = 0 ของแต่ละพื้นที่การทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากระยะป้อนลึกเป็นปัจจัยควบคุมที่ต้องทำการศึกษา โดยในการขัดผิวของแต่ละการทำซ้ำจะทำการขัดผิวลงบนชิ้นงานชิ้นเดียวกันในแต่ละตำแหน่ง ทำให้ไม่มีความแตกต่างของคุณสมบัติของชิ้นงานเหล็กแข็งในการทดลอง

จ. เมื่อการขัดผิวด้วยหัวขัดในแต่ละการทดลองเสร็จสิ้นลง ทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการขัดผิวของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถบันทึกได้จากเวลาในการขัดผิวที่ปรากฏอยู่บนหน้าจอของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนได้เลย



ภาพที่ 30 การขัดผิวด้วยหัวขัดร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน

3.2.4 ทำการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานเหล็กแข็งหลังจากการขัดผิว ด้วยกล้องไมโครโสคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์

ก. ทำการจัดวางชิ้นงานลงบนโต๊ะงาน โดยปรับตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการทำการวัดค่าความหยาบผิว

ภาพที่ 31 การปรับตำแหน่งการวัดชิ้นงานโดยการเลื่อนตำแหน่งโต๊ะงานในแนวแกน X และแนวแกน Y

ข. ทำการเลือกระดับกำลังขยายของกล้องไมโครสโคป โดยเลือกใช้กำลังขยายขนาด 50 เท่า

ค. เลือกวิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบ โดยเลือกพื้นที่ของการวัดเป็น 0.256×0.192 ตารางมิลลิเมตร ระบบเลเซอร์จะทำการแสกนทั้งพื้นผิวที่เราต้องการทำการวัดแล้วแสดงผล จากนั้นทำการบันทึกผลการวัดค่าความหยาบผิว

โดยในแต่ละรอบการทำซ้ำจะทำการวัดความหยาบผิวเชิงระนาบจำนวน 4 ตำแหน่งพื้นที่ รวมแล้วในหนึ่งการทดลองจะมีค่าสังเกตุทั้งหมด 16 ค่าสังเกตุ หรือค่าความหยาบผิวจำนวน 16 ค่า

4. ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลอง (ขั้นตอนที่ 3 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ)

ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 15.1.1 ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และแสดงรายละเอียดในส่วนของผลของการทดลอง

5. ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (ขั้นตอนที่ 4 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ)

โดยนำเอาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 4 มาทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยแสดงรายละเอียดผลของการทดลองยืนยันผลในส่วนของผลการทดลอง

6. สรุปผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัย ของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์)

1.1 กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a

1.1.1 การวิเคราะห์การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a และเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ตามสมการที่ 12 ในหน่วยเดซิเบล สามารถทำการคำนวณได้ดังนี้

การทดลองที่ 1

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0976^2 + 0.1087^2 + 0.1139^2 + ... + 0.0589^2 + 0.0534^2}{16}\right) = 21.7539$$

การทดลองที่ 2

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.1253^2 + 0.1246^2 + 0.1344^2 + ... + 0.1098^2 + 0.1265^2}{16}\right) = 18.5785$$

การทดลองที่ 3

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0925^2 + 0.1729^2 + 0.1864^2 + ... + 0.0425^2 + 0.0645^2}{16}\right) = 17.1730$$

การทดลองที่ 4

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0626^2 + 0.0711^2 + 0.0785^2 + ... + 0.0814^2 + 0.0971^2}{16}\right) = 20.9057$$

การทดลองที่ 5

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0478^2 + 0.0441^2 + 0.0493^2 + ... + 0.0552^2 + 0.0595^2}{16}\right) = 23.8983$$

การทดลองที่ 6

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0725^2 + 0.0666^2 + 0.0651^2 + ... + 0.1234^2 + 0.1252^2}{16}\right) = 18.8012$$

การทดลองที่ 7

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.3022^2 + 0.2754^2 + 0.2188^2 + ... + 0.0886^2 + 0.0921^2}{16}\right) = 12.8310$$

การทดลองที่ 8

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0585^2 + 0.0553^2 + 0.0614^2 + ... + 0.1285^2 + 0.0694^2}{16}\right) = 22.2178$$

การทดลองที่ 9

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0467^2 + 0.0711^2 + 0.0688^2 + ... + 0.0380^2 + 0.0266^2}{16}\right) = 26.0963$$

การทดลองที่ 10

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0748^2 + 0.0722^2 + 0.0648^2 + ... + 0.0621^2 + 0.0628^2}{16}\right) = 22.5402$$

การทดลองที่ 11

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.1042^2 + 0.0888^2 + 0.0795^2 + ... + 0.0685^2 + 0.0670^2}{16}\right) = 25.5888$$

การทดลองที่ 12

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.1070^2 + 0.1066^2 + 0.0990^2 + ... + 0.0884^2 + 0.0475^2}{16}\right) = 18.5732$$

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัย โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a

Response Table for Signal to Noise Ratios, Smaller the Better						
Level	Diamond Grit Size	Cutting Speed	Feed Rate	Step Over	Depth of Penetration	Polishing Times
1	20.19	19.78	21.42	21.26	19.52	18.96
2	20.81	21.22	19.58	19.73	21.48	22.03
Delta	0.62	1.44	1.84	1.53	1.96	3.07
Rank	6	5	3	4	2	1

ผลต่างของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยยังสามารถบอกถึงลำดับของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวจากการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดได้อีกด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

ผลกระทบของขนาดผงเพชร = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |20.19-20.81|

= 0.62

ผลกระทบของความเร็วตัด = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |19.78-21.22|

= 1.44

ผลกระทบของอัตราป้อน = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |21.42-19.58|

= 1.84

ผลกระทบของระยะป้อน = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |21.26-19.73|

= 1.53

ผลกระทบของระยะป้อนลึก = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |19.52-21.48|

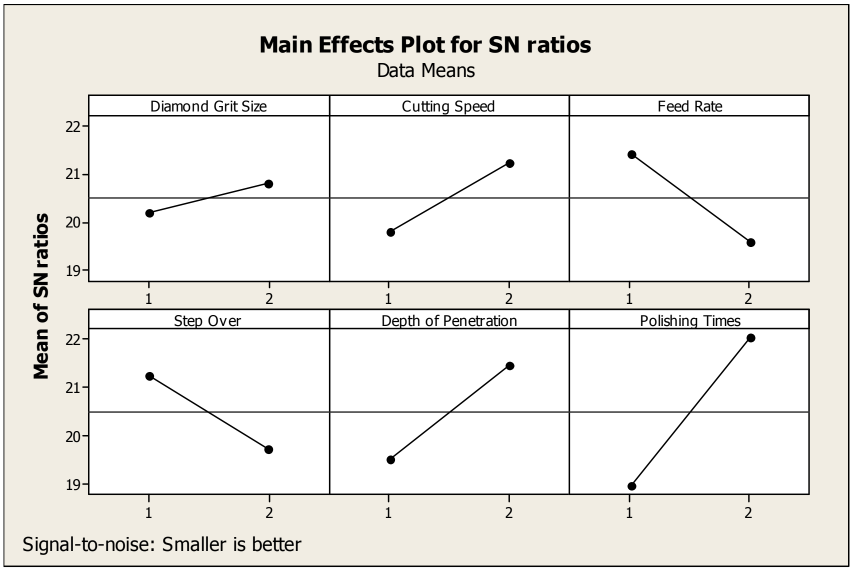
= 1.96

ผลกระทบของจำนวนครั้งการขัด = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |18.96-22.03|

= 3.07

สามารถเรียงลำดับผลกระทบต่อการทดลองของแต่ละปัจจัยจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ จำนวนครั้งของการขัด, ระยะป้อนลึก, อัตราป้อน, ระยะป้อน, ความเร็วตัด และขนาดอนุภาคผงเพชร ตามลำดับ และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 32 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a

การประเมินผลจากกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a พบว่าระดับของปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 450 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวคือ 2 ครั้ง โดยนำเอาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดที่ได้ ไปทำการทดลองเพื่อการยืนยันผลในขั้นตอนต่อไป

1.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของแต่ละปัจจัยการทดลอง (Analysis of Variance for S/N Ratio) และใช้การทดสอบ F (F-test) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้ดังนี้

พิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 15 ได้ดังนี้

$$\overline{S/N} = \frac{1}{12}(S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 ... + S/N_{12})$$

$$= \frac{1}{12}(21.7539 + 18.5785 + 17.1730 + ... + 18.5732) = 20.4965$$

จากนั้นทำการพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยใช้สมการที่ 16 ได้ดังนี้

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของขนาดอนุภาคผงเพชร

$$\overline{S/N}_{\text{Diamond Grit Size}_1} = \frac{21.7539 + 18.5785 + 17.1730 + 20.9057 + 23.8983 + 18.8012}{6} = 20.1851$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของขนาดอนุภาคผงเพชร

$$\overline{S/N}_{\text{Diamond Grit Size}_2} = \frac{12.8310 + 22.2178 + 26.0963 + 22.5402 + 25.5888 + 18.5732}{6} = 20.8079$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของความเร็วตัด

$$\overline{S/N}_{\text{Cutting Speed}_1} = \frac{21.7539 + 18.5785 + 17.1730 + 12.8310 + 22.2178 + 26.0963}{6} = 19.7751$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของความเร็วตัด

$$\overline{S/N}_{\text{Cutting Speed}_2} = \frac{20.9057 + 23.8983 + 18.8012 + 22.5402 + 22.5888 + 18.5732}{6} = 21.2179$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของอัตราป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Feed Rate}_1} = \frac{21.7539 + 18.5785 + 20.9057 + 26.0963 + 22.5888 + 18.5732}{6} = 21.4161$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของอัตราป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Feed Rate}_2} = \frac{17.1730 + 23.8983 + 18.8012 + 12.8310 + 22.2178 + 22.5402}{6} = 19.5769$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของระยะป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Step Over}_1} = \frac{21.7539 + 18.5785 + 23.8983 + 22.2178 + 22.5402 + 18.5732}{6} = 21.2603$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของระยะป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Step Over}_2} = \frac{17.1730 + 20.9057 + 18.8012 + 12.8310 + 26.0963 + 22.5888}{6} = 19.7327$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของระยะป้อนลึก

$$\overline{S/N}_{\text{Depth of Penetration}_1} = \frac{21.7539 + 18.5785 + 18.8012 + 12.8310 + 22.5402 + 22.5888}{6} = 19.5156$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของระยะป้อนลึก

$$\overline{S/N}_{\text{Depth of Penetration}_1} = \frac{17.1730 + 20.9057 + 23.8983 + 22.2178 + 26.0963 + 18.5732}{6} = 21.4774$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของจำนวนครั้งของการขัด

$$\overline{S/N}_{\text{Polishing Time}_1} = \frac{21.7539 + 17.1730 + 20.9057 + 12.8310 + 22.5402 + 18.5732}{6} = 18.9628$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของจำนวนครั้งของการขัด

$$\overline{S/N}_{\text{Polishing Time}_1} = \frac{18.5785 + 23.8983 + 18.8012 + 22.2178 + 26.0963 + 22.5888}{6} = 22.0301$$

จากนั้นพิจารณาหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 17 ดังนี้

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยขนาดอนุภาคผงเพชร

$$SS_{\text{Diamond Grit Size}} = 6(S/N_{\text{Diamond Grit Size}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Diamond Grit Size}_2} - \overline{S/N})^2$$
$$= 6(20.1851 - 20.4965)^2 - 6(20.8079 - 20.4965)^2 = 1.164$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยความเร็วตัด

$$SS_{\text{Cutting Speed}} = 6(S/N_{\text{Cutting Speed}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Cutting Speed}_2} - \overline{S/N})^2$$
$$= 6(19.7751 - 20.4965)^2 - 6(21.2179 - 20.4965)^2 = 6.245$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยอัตราป้อน

$$SS_{\text{Feed Rate}} = 6(S/N_{\text{Feed Rate}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Feed Rate}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6(21.4161 - 20.4965)^2 - 6(19.5769 - 20.4965)^2 = 10.147$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยระยะป้อน

$$SS_{\text{Step Over}} = 6(S/N_{\text{Step Over}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Step Over}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6(21.2603 - 20.4965)^2 - 6(19.7327 - 20.4965)^2 = 7.001$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยระยะป้อนลึก

$$SS_{\text{Depth of Penetration}} = 6(S/N_{\text{Depth of Penetration}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Depth of Penetration}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6(19.5156 - 20.4965)^2 - 6(21.4774 - 20.4965)^2 = 11.546$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$SS_{\text{Polishing Times}} = 6(S/N_{\text{Polishing Times}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Polishing Times}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6(18.9628 - 20.4965)^2 - 6(22.0301 - 20.4965)^2 = 28.225$$

จากนั้นทำการพิจารณาหาผลรวมกำลังสองโดยรวม โดยใช้สมการที่ 18 ดังนี้

$$SS_T = 12\sum_{i=1}^{12}(S/N_i - \overline{S/N})^2$$
$$= 12 \times ((21.7539 - 20.4965)^2 + (18.5785 - 20.4965)^2$$
$$+ (17.1730 - 20.4965)^2 + ... + (18.5732 - 20.4965)^2) = 136.2524$$

ทั้งนี้ความแตกต่างของผลรวมกำลังสองโดยรวมกับผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน(Sum Square of Error, SS_E) สามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - SS_{Factors}$$
$$= 136.2524 - (1.164 + 6.245 + 10.147 + 7.001 + 11.546 + 28.225)$$
$$= 71.924$$

จากนั้นทำการพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่ากำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองหารด้วยระดับขั้นความอิสระ และระดับขั้นความอิสระของทุกปัจจัยมีค่าเท่ากับ 1 โดยใช้สมการที่ 19 ดังนี้

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยขนาดอนุภาคผงเพชร

$$MS_{Diamond\ Grit\ Size} = \frac{SS_{Diamond\ Grit\ Size}}{Degree\ of\ Freedom_{Diamond\ Grit\ Size}}$$
$$= \frac{1.164}{1} = 1.164$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยความเร็วตัด

$$MS_{\text{Cutting Speed}} = \frac{SS_{\text{Cutting Speed}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Cutting Speed}}}$$

$$= \frac{6.245}{1} = 6.245$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยอัตราป้อน

$$MS_{\text{Feed Rate}} = \frac{SS_{\text{Feed Rate}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Feed Rate}}}$$

$$= \frac{10.147}{1} = 10.147$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยระยะป้อน

$$MS_{\text{Step Over}} = \frac{SS_{\text{Step Over}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Step Over}}}$$

$$= \frac{7.001}{1} = 7.001$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยระยะป้อนลึก

$$MS_{\text{Depth of Penetration}} = \frac{SS_{\text{Depth of Penetration}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Depth of Penetration}}}$$

$$= \frac{11.546}{1} = 11.546$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$MS_{\text{Polishing Times}} = \frac{SS_{\text{Polishing Times}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Polishing Times}}}$$

$$= \frac{28.225}{1} = 28.225$$

และความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความผิดพลาด โดยใช้สมการที่ 20 ดังนี้

$$\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} = (\text{Number of } L_{12}\text{'s Experiments} - 1) = 12 - 1 = 1$$

$$\text{Degree of Freedom}_{\text{Error}} = (\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} - \sum \text{Degree of Freedom}_{\text{Factors}})$$

$$= 11 - 6 = 5$$

ดังนั้น

$$MS_E = \frac{SS_{\text{Error}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Error}}}$$

$$= \frac{71.924}{5} = 14.385$$

จากนั้น ทำการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจากสมการที่ 21 ดังนี้

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยขนาดอนุภาคสารขัดสี

$$F_{\text{Diamond Grit Size}} = \frac{MS_{\text{Diamond Grit Size}}}{MS_E} = \frac{1.164}{14.385} = 0.08$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยความเร็วตัด

$$F_{\text{Cutting Speed}} = \frac{MS_{\text{Cutting Speed}}}{MS_E} = \frac{6.245}{14.385} = 0.43$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยอัตราป้อน

$$F_{\text{Feed Rate}} = \frac{MS_{\text{Feed Rate}}}{MS_E} = \frac{10.147}{14.385} = 0.71$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยระยะป้อน

$$F_{\text{Step Over}} = \frac{MS_{\text{Step Over}}}{MS_E} = \frac{7.001}{14.385} = 0.49$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยระยะป้อนลึก

$$F_{\text{Depth of Penetration}} = \frac{MS_{\text{Depth of Penetration}}}{MS_E} = \frac{11.546}{14.385} = 0.80$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$F_{\text{Polishing Times}} = \frac{MS_{\text{Polishing Times}}}{MS_E} = \frac{28.225}{14.385} = 1.96$$

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-Value
Diamond Grit Size	1	1.164	1.164	0.08	0.788
Cutting Speed	1	6.245	6.245	0.43	0.539
Feed Rate	1	10.147	10.147	0.71	0.439
Step Over	1	7.001	7.001	0.49	0.517
Depth of Penetration	1	11.546	11.546	0.80	0.411
Polishing Times	1	28.225	28.225	1.96	0.220
Error	5	71.924	14.385		
Total	11	136.252			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดเมื่อทำการพิจารณาความหยาบผิว R_a เป็นตัวแปรตอบสนองคือ จำนวนครั้งของการขัดผิว กล่าวคือค่าการทดสอบ F ของจำนวนรอบการขัดผิวคือ 1.96 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 หมายถึง ผลของจำนวนรอบการขัดผิวมีค่ามากกว่าความแปรปรวนที่สืบเนื่องมาจากผลของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ส่วนปัจจัยอื่นๆที่เหลือมีค่าการทดสอบ F น้อยกว่า 1 จึงไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อค่าตอบสนองได้จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก (Percentage Contribution) ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใด โดยใช้สมการที่ 22 ได้ดังนี้

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยขนาดอนุภาคสารขัดสี

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Diamond Grit Size}} = \left(\frac{SS_{\text{Diamond Grit Size}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{1.164}{136.252} \right) \times 100\% = 0.85\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยความเร็วตัด

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Cutting Speed}} = \left(\frac{SS_{\text{Cutting Speed}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{6.245}{136.252} \right) \times 100\% = 4.58\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยอัตราป้อน

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Feed Rate}} = \left(\frac{SS_{\text{Feed Rate}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{10.147}{136.252} \right) \times 100\% = 7.45\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยระยะป้อน

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Step Over}} = \left(\frac{SS_{\text{Step Over}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{7.001}{136.252} \right) \times 100\% = 5.14\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยระยะป้อนลึก

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Depth of Penetration}} = \left(\frac{SS_{\text{Depth of Penetratio}}}{SS_T}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{11.546}{136.252}\right) \times 100\% = 8.474\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Polishing Times}} = \left(\frac{SS_{\text{Polishing Times}}}{SS_T}\right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{28.225}{136.252}\right) \times 100\% = 20.72\%$$

จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลักเพื่อต้องการทราบว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใดพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลองการขัดผิวด้วยหัวขัดมากที่สุดคือ จำนวนครั้งของการขัด ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบแบบ F

1.2 กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z

1.2.1 การวิเคราะห์การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z และเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ตามสมการที่ 12 ในหน่วยเดซิเบล สามารถทำการคำนวณได้ดังนี้

การทดลองที่ 1

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.1718^2 + 1.2684^2 + 1.3133^2 + ... + 0.8926^2 + 2.2177^2}{16}\right) = -3.1907$$

การทดลองที่ 2

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{3.5556^2 + 1.8581^2 + 1.7113^2 + ... + 2.8820^2 + 3.2262^2}{16}\right) = -6.9819$$

การทดลองที่ 3

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.1382^2 + 1.4661^2 + 1.4351^2 + ... + 0.6235^2 + 1.2690^2}{16}\right) = -3.2399$$

การทดลองที่ 4

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.9535^2 + 0.7883^2 + 2.3430^2 + ... + 2.1917^2 + 2.2322^2}{16}\right) = -4.9535$$

การทดลองที่ 5

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.9728^2 + 0.8675^2 + 1.1883^2 + ... + 1.2386^2 + 2.4835^2}{16}\right) = -3.8445$$

การทดลองที่ 6

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.2497^2 + 1.4122^2 + 0.9503^2 + ... + 1.7274^2 + 1.5158^2}{16}\right) = -3.4301$$

การทดลองที่ 7

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{2.6398^2 + 2.5719^2 + 2.4564^2 + ... + 1.1651^2 + 1.7521^2}{16}\right) = -6.8578$$

การทดลองที่ 8

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.1128^2 + 2.6394^2 + 0.9309^2 + ... + 1.9118^2 + 1.5439^2}{16}\right) = -3.2557$$

การทดลองที่ 9

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.7616^2 + 0.8525^2 + 0.8046^2 + ... + 0.7686^2 + 0.4308^2}{16}\right) = 3.6127$$

การทดลองที่ 10

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.9485^2 + 0.7101^2 + 0.9873^2 + ... + 0.6607^2 + 0.9293^2}{16}\right) = -0.7578$$

การทดลองที่ 11

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.2648^2 + 1.0334^2 + 1.2216^2 + ... + 2.1429^2 + 1.5463^2}{16}\right) = -5.4754$$

การทดลองที่ 12

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.9501^2 + 0.9407^2 + 1.0374^2 + ... + 1.5245^2 + 1.0423^2}{16}\right) = -2.2356$$

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัย โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z

Response Table for Signal to Noise Ratios, Smaller the Better						
Level	Diamond Grit Size	Cutting Speed	Feed Rate	Step Over	Depth of Penetration	Polishing Times
1	-4.273	-3.319	-3.204	-3.378	-4.449	-3.539
2	-2.495	-3.449	-3.564	-3.391	-2.319	-3.229
Delta	1.788	0.131	0.360	0.013	2.130	0.310
Rank	2	5	3	6	1	4

ผลต่างของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยสามารถบอกถึงลำดับของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวของการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดได้อีกด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

ผลกระทบของขนาดผงเพชร = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-4.273-(-2.495)|

= 1.778

ผลกระทบของความเร็วตัด = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-3.319-(-3.449)|

= 0.131

ผลกระทบของอัตราป้อน = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-3.204-(-3.564)|

= 0.360

ผลกระทบของระยะป้อน = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-3.378-(-3.391)|

= 0.013

ผลกระทบของระยะป้อนลึก = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-4.449-(-2.319)|

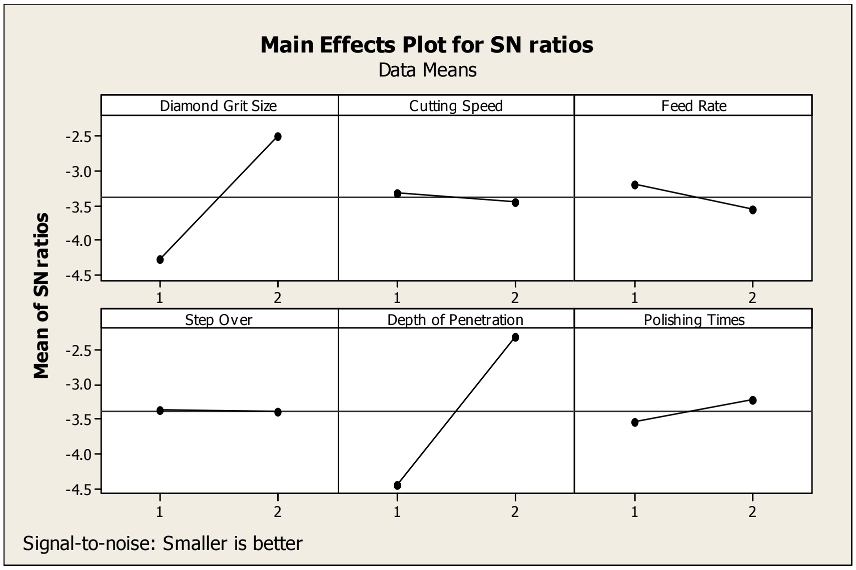
= 2.130

ผลกระทบของจำนวนครั้งการขัด = |ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1- ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2|

= |-3.539-(-3.229)|

= 0.310

สามารถเรียงลำดับผลกระทบต่อการทดลองของแต่ละปัจจัยจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ คือ ระยะป้อนลึก, ขนาดอนุภาคผงเพชร, อัตราป้อน, จำนวนครั้งของการขัด, ความเร็วตัด, ระยะป้อน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 16 และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 33 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z

การประเมินผลจากกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z พบว่าระดับของปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 300 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวที่ 2 ครั้ง โดยนำเอาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดที่ได้ ไปทำการทดลองเพื่อการยืนยันผลในขั้นตอนต่อไป

1.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของแต่ละปัจจัยการทดลอง (Analysis of Variance for S/N Ratio) และใช้การทดสอบ F (F-test) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้ดังนี้

พิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 15 ได้ดังนี้

$$\overline{S/N} = \frac{1}{12}(S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 ... + S/N_{12})$$
$$= \frac{1}{12}((-3.1907) + (-6.9819) + (-3.2399) + ... + (-2.2356)) = -3.3842$$

จากนั้นทำการพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยใช้สมการที่ 16 ได้ดังนี้

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของขนาดอนุภาคผงเพชร

$$\overline{S/N}_{\text{Diamond Grit Size}_1} = \frac{-3.1907 - 6.9819 - 3.2399 - 4.9535 - 3.8445 - 3.4301}{6} = -4.2734$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของขนาดอนุภาคผงเพชร

$$\overline{S/N}_{\text{Diamond Grit Size}_2} = \frac{-6.8578 - 3.2557 + 3.6127 - 0.7578 - 5.4754 - 2.2356}{6} = -2.4949$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของความเร็วตัด

$$\overline{S/N}_{\text{Cutting Speed}_1} = \frac{-3.1907 - 6.9819 - 3.2399 - 6.8578 - 3.2557 + 3.6127}{6} = -3.3189$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของความเร็วตัด

$$\overline{S/N}_{\text{Cutting Speed}_2} = \frac{-4.9535 - 3.8445 - 3.4301 - 0.7578 - 5.4754 - 2.2356}{6} = -3.4495$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของอัตราป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Feed Rate}_1} = \frac{-3.1907 - 6.9819 - 4.9535 + 3.6127 - 5.4754 - 2.2356}{6} = -3.2041$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของอัตราป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Feed Rate}_2} = \frac{-3.2399 - 3.8445 - 3.4301 - 6.8578 - 3.2557 - 0.7578}{6} = -3.5643$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของระยะป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Step Over}_1} = \frac{-3.1907 - 6.9819 - 3.8445 - 3.2557 - 0.7578 - 2.2356}{6} = -3.3777$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของระยะป้อน

$$\overline{S/N}_{\text{Step Over}_2} = \frac{-3.2399-4.9535-3.4301-6.8578+3.6127-2.2356}{6} = -3.3906$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของระยะป้อนลึก

$$\overline{S/N}_{\text{Depth of Penetration}_1} = \frac{-3.1907-6.9819-3.4301-6.8578-0.7578-2.2356}{6} = -4.4490$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของระยะป้อนลึก

$$\overline{S/N}_{\text{Depth of Penetration}_2} = \frac{-3.2399-4.9535-3.8445-3.2557+3.6127-2.2356}{6} = -2.3194$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของจำนวนครั้งของการขัด

$$\overline{S/N}_{\text{Polishing Times}_1} = \frac{-3.1907-3.2399-4.9535-6.8578-0.7578-2.2356}{6} = -3.5392$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของจำนวนครั้งของการขัด

$$\overline{S/N}_{\text{Polishing Times}_2} = \frac{-6.9819-3.8445-3.4301-3.2557+3.6127-5.4754}{6} = -3.2291$$

จากนั้นพิจาณาหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 17 ดังนี้

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยขนาดอนุภาคผงเพชร

$$SS_{\text{Diamond Grit Size}} = 6(S/N_{\text{Diamond Grit Size}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Diamond Grit Size}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-4.2373) - (-3.3842))^2 - 6((-2.4949) - (-3.3842))^2 = 9.4890$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยความเร็วตัด

$$SS_{\text{Cutting Speed}} = 6(S/N_{\text{Cutting Speed}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Cutting Speed}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-3.3190) - (-3.3842))^2 - 6((-3.4495) - (-3.3842))^2 = 0.0512$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยอัตราป้อน

$$SS_{\text{Feed Rate}} = 6(S/N_{\text{Feed Rate}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Feed Rate}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-3.2041) - (-3.3842))^2 - 6((-3.5643) - (-3.3842))^2 = 0.3893$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยระยะป้อน

$$SS_{\text{Step Over}} = 6(S/N_{\text{Step Over}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Step Over}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-3.3777) - (-3.3842))^2 - 6((-3.3906) - (-3.3842))^2 = 0.0005$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยระยะป้อนลึก

$$SS_{\text{Depth of Penetration}} = 6(S/N_{\text{Depth of Penetration}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Depth of Penetration}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-4.4490) - (-3.3842))^2 - 6((-2.3194) - (-3.3842))^2 = 13.6051$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$SS_{\text{Polishing Times}} = 6(S/N_{\text{Polishing Times}_1} - \overline{S/N})^2 - 6(S/N_{\text{Polishing Times}_2} - \overline{S/N})^2$$

$$= 6((-3.5392) - (-3.3842))^2 - 6((-3.2291) - (-3.3842))^2 = 0.2885$$

จากนั้นทำการพิจารณาหาผลรวมกำลังสองโดยรวม โดยใช้สมการที่ 18 ดังนี้

$$SS_T = 12\sum_{i=1}^{12}(S/N_i - \overline{S/N})^2$$

$$= 12 \times \begin{bmatrix} (-3.1907 - (-3.3842))^2 + (-6.9819 - (-3.3842))^2 \\ + (-3.2399 - (-3.3842))^2 + \ldots + (-2.2356 - (-3.3842)^2) \end{bmatrix} = 89.3075$$

ทั้งนี้ความแตกต่างของผลรวมกำลังสองโดยรวมกับผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน(Sum Square of Error, SS_E) สามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Factors}}$$

$$= 89.3075 - (9.4890 + 0.0512 + 0.3893 + 0.0005 + 13.6051 + 0.2885)$$

$$= 65.4840$$

จากนั้นทำการพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่ากำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองหารด้วยระดับขั้นความอิสระ และระดับขั้นความอิสระของทุกปัจจัยมีค่าเท่ากับ 1 โดยใช้สมการที่ 19 ดังนี้

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยขนาดอนุภาคผงเพชร

$$MS_{\text{Diamond Grit Size}} = \frac{SS_{\text{Diamond Grit Size}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Diamond Grit Size}}}$$

$$= \frac{9.4890}{1} = 9.4890$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยความเร็วตัด

$$MS_{\text{Cutting Speed}} = \frac{SS_{\text{Cutting Speed}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Cutting Speed}}}$$

$$= \frac{0.0512}{1} = 0.0512$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยอัตราป้อน

$$MS_{\text{Feed Rate}} = \frac{SS_{\text{Feed Rate}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Feed Rate}}}$$

$$= \frac{0.3839}{1} = 0.3839$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยระยะป้อน

$$MS_{\text{Step Over}} = \frac{SS_{\text{Step Over}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Step Over}}}$$

$$= \frac{0.0005}{1} = 0.0005$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยระยะป้อนลึก

$$MS_{\text{Depth of Penetration}} = \frac{SS_{\text{Depth of Penetration}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Depth of Penetration}}}$$

$$= \frac{13.6051}{1} = 13.6051$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$MS_{\text{Polishing Times}} = \frac{SS_{\text{Polishing Times}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Polishing Times}}}$$

$$= \frac{0.2885}{1} = 0.2885$$

และความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความผิดพลาด โดยใช้สมการที่ 20 ดังนี้

$$\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} = (\text{Number of } L_{12}\text{'s Experiments} - 1) = 12 - 1 = 1$$

$$\text{Degree of Freedom}_{\text{Error}} = (\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} - \sum \text{Degree of Freedom}_{\text{Factors}})$$

$$= 11 - 6 = 5$$

ดังนั้น

$$MS_E = \frac{SS_{\text{Error}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Error}}}$$

$$= \frac{65.4840}{5} = 13.0968$$

จากนั้น ทำการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจากสมการที่ 21 ดังนี้

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยขนาดอนุภาคสารขัดสี

$$F_{\text{Diamond Grit Size}} = \frac{MS_{\text{Diamond Grit Size}}}{MS_E} = \frac{9.4890}{13.0968} = 0.72$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยความเร็วตัด

$$F_{\text{Cutting Speed}} = \frac{MS_{\text{Cutting Speed}}}{MS_E} = \frac{0.0512}{13.0968} = 0$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยอัตราป้อน

$$F_{\text{Feed Rate}} = \frac{MS_{\text{Feed Rate}}}{MS_E} = \frac{0.3893}{13.0968} = 0.03$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยระยะป้อน

$$F_{\text{Step Over}} = \frac{MS_{\text{Step Over}}}{MS_E} = \frac{0.0005}{13.0968} = 0$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยระยะป้อนลึก

$$F_{\text{Depth of Penetration}} = \frac{MS_{\text{Depth of Penetration}}}{MS_E} = \frac{13.6051}{13.0968} = 1.04$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$F_{\text{Polishing Times}} = \frac{MS_{\text{Polishing Times}}}{MS_E} = \frac{0.2885}{13.0968} = 0.02$$

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-Value
Diamond Grit Size	1	9.4890	9.4890	0.72	0.434
Cutting Speed	1	0.0512	0.0512	0.00	0.953
Feed Rate	1	0.3893	0.3893	0.03	0.870
Step Over	1	0.0005	0.0005	0.00	0.995
Depth of Penetration	1	13.6051	13.6051	1.04	0.355
Polishing Times	1	0.2885	0.2885	0.02	0.888
Error	5	65.4840	13.0968		
Total	11				

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดเมื่อทำการพิจารณาความหยาบผิว R_z เป็นตัวแปรตอบสนองคือ ระยะป้อนลึก กล่าวคือค่าการทดสอบ F ของระยะป้อนลึกคือ 1.04 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 หมายถึง ผลของระยะป้อนลึกมีค่ามากกว่าความแปรปรวนที่สืบเนื่องมาจากผลของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ส่วนปัจจัยอื่นๆที่เหลือมีค่าการทดสอบ F น้อยกว่า 1 จึงไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อค่าตอบสนองได้จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใด โดยใช้สูตรที่ 22 ได้ดังนี้

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยขนาดอนุภาคสารขัดสี

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Diamond Grit Size}} = \left(\frac{SS_{\text{Diamond Grit Size}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{9.4890}{89.3075} \right) \times 100\% = 10.63\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยความเร็วตัด

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Cutting Speed}} = \left(\frac{SS_{\text{Cutting Speed}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.0512}{89.3075} \right) \times 100\% = 0.06\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยอัตราป้อน

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Feed Rate}} = \left(\frac{SS_{\text{Feed Rate}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.3893}{89.3075} \right) \times 100\% = 0.44\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยระยะป้อน

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Step Over}} = \left(\frac{SS_{\text{Step Over}}}{SS_T} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.0005}{89.3075} \right) \times 100\% = 0.00056\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยระยะป้อนลึก

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Depth of Penetration}} = \left(\frac{SS_{\text{Depth of Penetration}}}{SS_T}\right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{13.6051}{89.3075}\right) \times 100\% = 15.23\%$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัยจำนวนครั้งของการขัด

$$\text{Percentage Contribution}_{\text{Polishing Times}} = \left(\frac{SS_{\text{Polishing Times}}}{SS_T}\right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.2885}{89.3075}\right) \times 100\% = 0.32\%$$

จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลักเพื่อต้องการทราบว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใดพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลองการขัดผิวด้วยหัวขัดมากที่สุดคือ ระยะป้อนลึก และปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลองการขัดผิวด้วยหัวขัดในระดับรองลงมาคือ ขนาดอนุภาคผงเพชร ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบแบบ F

2. การทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

2.1 กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a

นำอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของตัวแปรตอบสนองคือค่าความหยาบผิว R_a จากตารางที่ 15 มาใช้ในการทำนายร่วมกับสมการที่ 18 ดังนี้

$$m = \frac{(20.19 + 20.81 + 19.78 + ... + 18.96 + 22.03)}{12} = 20.50$$

$$\sum(m_i - m) = (20.19 - 20.5) + (20.81 - 20.5) + (19.78 - 20.5) + \dots + (22.03 - 20.5) = -0.020$$

แทนค่าลงในสมการที่ 18 ได้ดังนี้

$$\eta_{opt} = m + \sum(m_i - m) = 20.50 + (-0.020) = 20.48$$

ในกรณีที่พิจารณาความหยาบผิว R_a เป็นตัวแปรตอบสนอง พบว่ามีค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ 20.48 เดซิเบลโดยสามารถนำค่าทำนายนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผลว่ามีอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

2.2 กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z

นำอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของตัวแปรตอบสนองคือค่าความหยาบผิว R_z จากตารางที่ 15 มาใช้ในการทำนายร่วมกับสมการที่ 18 ดังนี้

$$m = \frac{((-4.273) + (-2.495) + (-3.319) + \dots + (-3.539) + (-3.229))}{12} = -3.384$$

$$\sum(m_i - m) = (-4.273 - 3.384) + (-2.495 - 3.384) + (-3.319 - 3.384) + \dots + (-3.229 - 3.384) = -0.156$$

แทนค่าลงในสมการที่ 18 ได้ดังนี้

$$\eta_{opt} = m + \sum(m_i - m) = -3.384 + (-0.156) = -3.54$$

ในกรณีที่พิจารณาความหยาบผิว R_z เป็นตัวแปรตอบสนอง พบว่ามีค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ -3.54 เดซิเบลโดยสามารถนำค่าทำนายนี้ไปใช้ใน

การเปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผลว่ามีอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

3. การทดลองเพื่อยืนยันผล

3.1 กรณีพิจารณาความหยาบผิว R_a เป็นตัวแปรตอบสนอง

จากผลการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานแบบ L_{12} โดยเลือกพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a นั้นมีการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a

ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง
ขนาดอนุภาคผงเพชร (μm)	40-60
ความเร็วตัด (m/min)	450
อัตราป้อน (mm/min)	50
ระยะป้อน (μm)	20
ระยะป้อนลึก (μm)	120
จำนวนครั้งของการขัด (ครั้ง)	2

โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ได้ดังนี้

การทดลองยืนยันผลที่ 1

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.1228^2 + 0.1137^2 + 0.1056^2 + ... + 0.1194^2 + 0.1131^2}{16}\right) = 19.3655$$

การทดลองยืนยันผลที่ 2

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0701^2 + 0.0569^2 + 0.0553^2 + ... + 0.0842^2 + 0.0939^2}{16}\right) = 20.8799$$

การทดลองยืนยันผลที่ 3

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{0.0746^2 + 0.1616^2 + 0.1574^2 + ... + 0.0838^2 + 0.0731^2}{16}\right) = 17.5942$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_a มีค่าเท่ากับ

$$\text{Average } S/N_{LB} \text{ for Confirmation} = \left(\frac{19.3655 + 20.8799 + 17.5942}{3}\right) = 19.2799$$

จากนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการทดลองเพื่อยืนยันผล กับค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีที่พิจารณาความหยาบผิว R_a เป็นตัวแปรตอบสนอง พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการทดลองเพื่อยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 19.2799 และคิดเป็น 94.18% ของค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดซึ่งมีค่า $\eta_{opt} = 20.48$ ซึ่งบอกได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองยืนยันผลมีค่าใกล้เคียงกับผลของการทดลองด้วยตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน แบบ L_{12}

3.2 กรณีพิจารณาความหยาบผิวเป็น R_z ตัวแปรตอบสนอง

จากผลการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิโดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานแบบ L_{12} โดยเลือกพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z นั้นมีการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z

ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง
ขนาดอนุภาคผงเพชร (μm)	40-60
ความเร็วตัด (m/min)	300
อัตราป้อน (mm/min)	50
ระยะป้อน (μm)	20
ระยะป้อนลึก (μm)	120
จำนวนครั้งอขงการขัด (ครั้ง)	2

โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ได้ดังนี้

การทดลองยืนยันผลที่ 1

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.7001^2 + 1.4974^2 + 1.3960^2 + ... + 2.9907^2 + 1.8861^2}{16}\right) = -4.7889$$

การทดลองยืนยันผลที่ 2

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.0287^2 + 0.9303^2 + 1.0020^2 + ... + 1.3722^2 + 2.1325^2}{16}\right) = -4.1002$$

การทดลองยืนยันผลที่ 3

$$S/N_{LB} = -10\log\left(\frac{1.1253^2 + 1.4124^2 + 1.4923^2 + ... + 0.8572^2 + 1.0316^2}{16}\right) = -1.6014$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ความหยาบผิว R_z มีค่าเท่ากับ

$$\text{Average } S/N_{LB} \text{ for Confirmation} = \left(\frac{(-4.7889)+(-4.1002)+(-1.6014)}{3}\right) = -3.4968$$

จากนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการทดลองเพื่อยืนยันผล กับค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีที่พิจารณาความหยาบผิว R_z เป็นตัวแปรตอบสนอง พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการทดลองเพื่อยืนยันผลมีค่าเท่ากับ -3.4968 และคิดเป็น 98.78% ของค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดซึ่งมีค่า $\eta_{opt} = -3.54$ ซึ่งบอกได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองยืนยันผลมีค่าใกล้เคียงกับผลของการทดลองด้วยตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน แบบ L_{12}

วิจารณ์

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของตัวแปรตอบสนองทั้งสองชนิด กล่าวคือ ความหยาบผิว R_a และความหยาบผิว R_z พบว่ามีความแตกต่างกันของการรวมกันระหว่างระดับในแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน 1 ปัจจัย คือความเร็วตัด โดยกรณีพิจารณาค่าความหยาบผิว R_a เป็นตัวแปรตอบสนองนั้นมีความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองคือ 450 เมตรต่อนาที แต่ในกรณีพิจารณาค่าความหยาบผิว R_z เป็นตัวแปรตอบสนองนั้นมีความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองคือ 300 เมตรต่อนาที

เนื่องด้วยการวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองต่างกันนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้อย่างสิ้นเชิง เพราะใช้ดัชนีชี้วัดที่แตกต่างกันและมีวิธีการวิเคราะห์ความหยาบผิวแตกต่างกัน ในโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับแม่พิมพ์ หรือชิ้นงานโลหะที่มีความละเอียดของผิวสูงจะอ้างอิงการวิเคราะห์ความหยาบผิวทั้งสองรูปแบบ โดยการวิเคราะห์ความหยาบผิว R_a นั้นเป็นการวิเคราะห์โดยให้ความสนใจในทุกตำแหน่งของพื้นผิวที่ต้องการทำการวัดและวิเคราะห์ ซึ่งเปรียบได้กับเป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ส่วนการวิเคราะห์ความหยาบผิว R_z นั้นมุ่งเน้นไปที่จุดยอดที่สูงที่สุดและจุดที่ต่ำที่สุดของพื้นผิวที่ต้องการทำการวิเคราะห์ ซึ่งเปรียบได้กับการวิเคราะห์ระดับพิสัยของข้อมูล จึงทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างกัน

ในกรณีของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออทอกอนอลอะเรย์ มาตรฐานนั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลการทดลองโดยใช้การทดลองเพื่อยืนยันผล ซึ่งต้องการพิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อทำการทดลองอีกครั้งตามรูปแบบของการรวมกันระหว่างระดับในแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง ผลการทดลองต้องมีความใกล้เคียงกัน โดยในกรณีที่พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a พบว่าระดับของปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ ใช้หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 450 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวที่ 2 ครั้ง และในกรณีที่พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z พบว่าระดับของปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดคือ ใช้หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 300 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวที่ 2 ครั้ง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีของการทดลองเพื่อยืนยันผล กับค่าทำนาย

อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีนั้นมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการของกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดร่วมกับการใช้ความสามารถของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนนั้นสามารถนำมาใช้ในกระบวนการขัดผิวได้จริง โดยที่เมื่อทำการทดลองในครั้งต่อๆมาก็มีผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน

ในส่วนของการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง พบว่าจำนวนครั้งของการขัดผิว เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว R_a มากที่สุด กล่าวคือในการทดลองการขัดผิวเมื่อทำการขัดซ้ำๆ ลงไปในชิ้นงานก็จะยิ่งช่วยให้ผิวของชิ้นงานถูกอนุภาคของผงเพชรขัดทับอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ความหยาบผิว R_a มีค่าลดต่ำลงได้ และปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว R_z มากที่สุดซึ่งคือระยะป้อนลึก กล่าวคือระยะป้อนลึกทำให้เกิดความสูงของสแกลลอป (Scallop Height) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างแนวทางเดินของหัวขัดสองแนวที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งสิ่งนี้มีผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์ความหยาบผิว R_z

ที่กล่าวมาเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุบางประการที่ส่งผลโดยตรงต่อความหยาบผิวในรูปแบบต่างๆ โดยสังเกตจากผลของการวิเคราะห์ความหยาบผิวด้วยกล้องไมโครสโคปชนิดเลเซอร์สแกนเนอร์ ร่วมกับการสังเกตในขณะที่มีการทดลองขัดผิวเพื่อหาแนวทางในการสนับสนุนผลจากการวิเคราะห์เหล่านี้ด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ส่วนแรกเป็นการมุ่งเน้นไปที่การออกแบบกระบวนการในการขัดผิวเหล็กแข็งให้มีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้นทดแทนการใช้แรงงานคน โดยใช้ความสามารถของเครื่องจักรที่มีอยู่คือเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน ซึ่งมีความเที่ยงตรงและแม่นยำในการทำงานสูงร่วมกับการออกแบบหัวขัดเคลือบผงเพชรให้ใช้ในกระบวนการขัดผิวด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนได้ โดยในส่วนแรกคือการออกแบบหัวขัดนั้นได้อ้างอิงตามรูปแบบของมีดตัดเฉือนชนิดบอลโนส และเคลือบผงเพชรเข้ากับหัวขัดโดยใช้เรซิ่นเป็นตัวเชื่อมประสาน

จากนั้นทำการออกแบบกระบวนการในการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน โดยประยุกต์ใช้ทางเดินของกระบวนการกัดมาเป็นทางเดินของกระบวนการขัดผิว อีกทั้งทำการระดมสมองจากหลายๆฝ่ายเพื่อหาปัจจัยที่สนใจและคาดว่าจะมีผลต่อการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด ซึ่งปัจจัยเหล่านั้นประกอบด้วย ขนาดอนุภาคของสารขัดสี, ความเร็วตัด, อัตราป้อน, ระยะป้อน, ระยะป้อนลึก และจำนวนครั้งของการขัดผิว ปัจจัยละสองระดับ โดยในสวนนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน แบบ L_{12} เพื่อหาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน โดยตัวแปรตอบสนองที่เป็นตัวชี้วัดผลของการทดลองคือ ความหยาบผิว R_a และความหยาบผิว R_z ของเหล็กแข็งที่ได้จากกระบวนการขัดผิว

จากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดกรณีตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_a พบว่าการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนคือ ใช้หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 450 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวที่ 2 รอบ เมื่อทำการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของผลการทดลองว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด พบว่าผลการทดลองเพื่อยืนยันผลคิดเป็น 94.18 % ของผลการทดลองด้วยตารางออทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลการทดลองในครั้งต่อมามีแนวโน้มของผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน

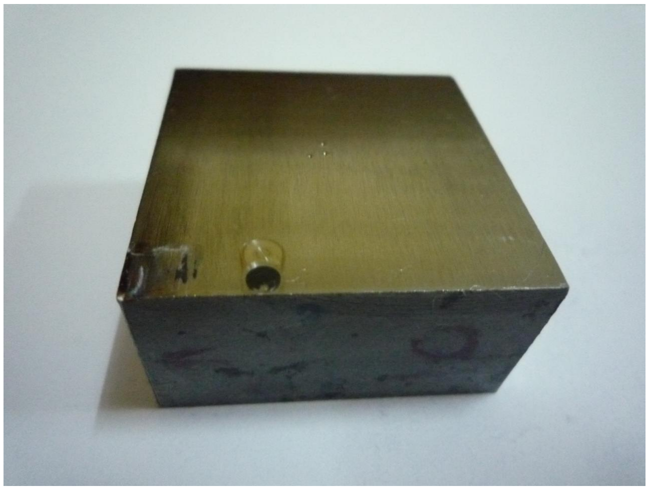
และจากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดกรณีตัวแปรตอบสนองคือความหยาบผิว R_z พบว่าการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองกระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนคือ ใช้หัวขัดเคลือบอนุภาคผงเพชรขนาด 40-60 ไมโครเมตร, ความเร็วตัด 300 เมตรต่อนาที, อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อน 20 ไมโครเมตร, ระยะป้อนลึก 120 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งของการขัดผิวที่ 2 รอบ เมื่อทำการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของผลการทดลองว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด พบว่าผลการทดลองเพื่อยืนยันผลคิดเป็น 98.78 % ของผลการทดลองด้วยตารางออทอกอนอลอะเรย์ มาตรฐาน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลการทดลองในครั้งต่อมามีแนวโน้มของผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน

จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัดที่ได้นำเสนอนี้ มีการออกแบบวิธีการขัดและหัวขัดให้เหมาะสมกับชิ้นงานและเหมาะสมกับการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน ร่วมกับความเป็นอัตโนมัติในการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนนั้นสามารถขัดผิวเหล็กแข็งให้มีค่าความหยาบผิวลดลงได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้วิธีการขัดผิวนี้ในการขัดผิวชิ้นงานเหล็กแข็งได้

ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาที่พบ

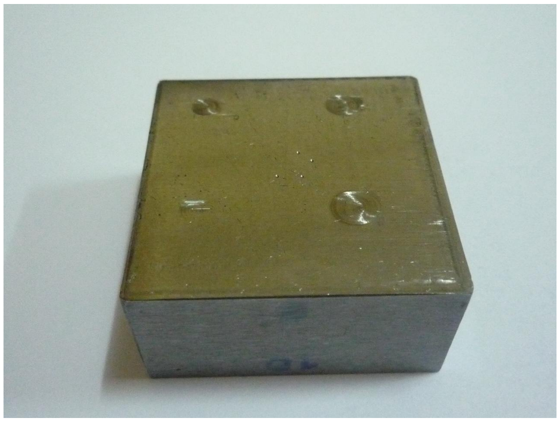
1.1 ในการทำการทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งด้วยหัวขัด โดยใช้ความสามารถของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ เบื้องต้นได้มีการทดลองใช้หัวขัดที่มีสารขัดสีที่มีความละเอียดสูง คือ ผงเพชรที่มีขนาดอนุภาค 6-10 ไมโครเมตร เพราะคาดว่าสารขัดสีที่มีความละเอียดสูงน่าจะสามารถทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหยาบผิวต่ำลง แต่พบว่าในขณะที่หัวขัดเริ่มต้นสัมผัสกับชิ้นงาน ผงเพชรที่เคลือบอยู่กับชิ้นงานบริเวณส่วนปลายของหัวขัดซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานโดยตรงนั้นหลุดร่อนออกมา ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างเหล็กหัวขัดกับชิ้นงานโดยตรง ซึ่งไม่ตรงตามวิธีการของการแลบปิงและโพลิชชิ่งที่จะต้องเป็นการขัดสีระหว่างสารขัดสีกับชิ้นงาน จึงทำการระดมสมองจากหลายๆ ฝ่ายสรุปได้ว่า สารขัดสีที่มีอนุภาคละเอียดมากเกินไปไม่เหมาะกับการขัดผิวชิ้นงานที่มีความแข็งสูงถึงประมาณ 60 ร็อกเวลส์เสกลซีได้ กล่าวคือผงเพชรไม่สามารถกดขัดผิวชิ้นงานได้ จึงทำการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยขนาดอนุภาคผงเพชรให้มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 34 ความเสียหายของชิ้นงานการทดลองจากการใช้ผงเพชรที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากเกินไป

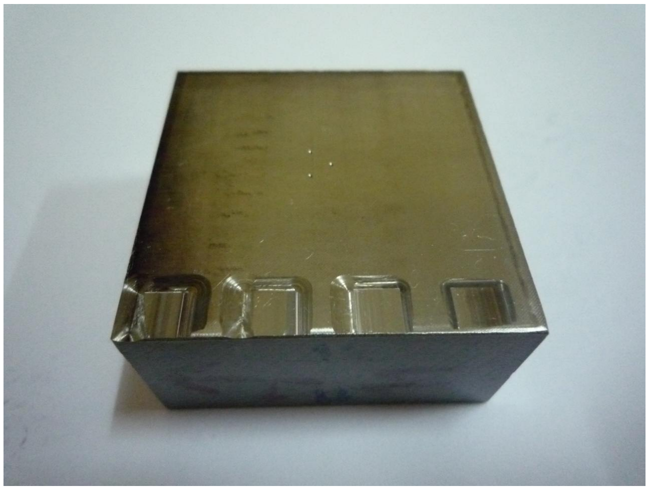
ภาพที่ 35 ความเสียหายที่มีต่อหัวขัดในกรณีที่ใช้ผงเพชรที่ละเอียดมากเกินไป

1.2 ปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการขัดผิวชิ้นงานเหล็กแข็งด้วยหัวขัดร่วมกับการใช้ความสามารถของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนอีกประการหนึ่งซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือ การเริ่มต้นสัมผัสระหว่างหัวขัดกับชิ้นงาน จากการทดลองเบื้องต้นได้กำหนดโปรแกรมทางเดินการขัดผิวโดยให้หัวขัดเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน Z ของเครื่องกัดซีเอ็นซี แล้วเข้าสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยตรงและป้อนลึกลงไปอีก 60 และ 120 ไมโครเมตร พบว่าเกิดการกระแทกระหว่างหัวขัดกับผิวชิ้นงาน ทำให้หัวขัดเกิดความเสียหายโดยผงเพชรหลุดร่อนออกไปจนหมด ไม่สามารถทำการขัดผิวต่อไปได้ สภาพผิวเกิดความเสียหายดังในภาพที่ 36 และสภาพของหัวขัดเป็นดังภาพที่ 35 เช่นกัน



ภาพที่ 36 ความเสียหายของชิ้นงานการทดลองซึ่งเกิดจากหัวขัดเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน Z สัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการคิดหาแนวทางในการแก้ปัญหานี้ กล่าวคือทำการออกแบบทางเดินหัวขัดโดยขั้นแรกให้หัวขัดเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน Z และอยู่ในระยะป้อนลึกตามที่กำหนด โดยเป็นการเคลื่อนที่อยู่ภายนอกบริเวณขอบของชิ้นงาน ขั้นที่สองหัวขัดจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y เข้าไปขัดชิ้นงาน เป็นการช่วยลดการกระแทกโดยตรงระหว่างปลายหัวขัดกับชิ้นงาน และพบว่าสามารถทำการขัดผิวได้อย่างต่อเนื่องและช่วยลดปัญหาการสึกหรอของหัวขัดได้อีกด้วย จึงใช้ทางเดินหัวขัดวิธีการนี้ในการขัดผิวกับทุกๆ การทดลอง



ภาพที่ 37 ชิ้นงานของทางเดินหัวขัดที่ได้รับการปรับปรุงและถูกใช้ในการทดลองทั้งหมด

1.3 ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือการหลุดร่อนของผงเพชรซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ และไม่ได้นำมาทำการพิจารณาในการออกแบบการทดลอง แต่ได้มีการทดลองเบื้องต้นและสอบถามข้อมูลจากผู้ผลิตสารขัดสี พบว่าการเคลือบสารขัดสีให้มีความหนามากๆไม่สามารถแก้ปัญหาให้หัวขัดสามารถขัดผิวชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานได้ เพราะยิ่งเคลือบสารขัดสีให้มีความหนามากขึ้น การยึดเกาะระหว่างสารขัดสีกับวัสดุที่ใช้ทำหัวขัดก็จะยิ่งลดน้อยลง ทั้งนี้จากประสบการณ์ของผู้ผลิตหัวขัดพบว่าในลักษณะงานขัดผิว อุปกรณ์ที่มีการเคลือบสารขัดสีมักจะทำการเคลือบสารขัดสีให้มีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 มิลลิเมตร แต่จะใช้การเปลี่ยนหัวขัดอันใหม่เมื่อมีการสึกหรอ หรือส่งหัวขัดที่สึกหรอกลับไปให้ผู้ผลิตหัวขัดทำการเคลือบสารขัดสีใหม่ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหัวขัดเกิดขึ้น อีกทั้งเสียเวลาในการดำเนินการซ่อมแซม

2. แนวทางในการพัฒนา

จากแนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้ที่มุ่งสร้างความเป็นอัตโนมัติให้กับกระบวนการขัดผิว โดยใช้ความสามารถของเครื่องจักรที่มีอยู่ให้ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน นอกจากเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนซึ่งมีความเที่ยงตรงแม่นยำสูงและได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ และพบว่าสามารถใช้ทางเดินของการกัดให้เป็นทางเดินของการขัดผิวชิ้นงานเหล็กแข็งได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเครื่องจักรอื่นๆ ที่น่าจะนำมาประยุกต์ใช้ในการขัดผิวได้ อาทิเช่น เครื่องเจาะ ถึงแม้ว่าเครื่องเจาะโดยทั่วไปไม่ได้มีความเป็นอัตโนมัติมากนัก เพราะยังต้องใช้คนในการบังคับสปินเดิลขึ้นและลงตามแนวแกน Z อีกทั้งเครื่องเจาะมีแกนการเคลื่อนที่ในการทำงานเพียงแกนเดียวคือแนวแกน Z แต่ลักษณะการหมุนของสปินเดิลเครื่องเจาะ น่าจะสามารถประยุกต์ใช้ในการขัดผิวได้ ยกตัวอย่างเช่น ใช้เครื่องเจาะร่วมกับหัวขัดเคลือบสารขัดสีในการขัดรูใน ซึ่งเหมาะกับโรงงาน หรือผู้ประกอบการที่ไม่มีเครื่องจักรที่มีความทันสมัยมากนัก แต่ต้องการวิธีการในการขัดผิวที่เที่ยงตรงมากขึ้น และรู้จักการประยุกต์ใช้เครื่องจักรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์หลากหลายด้าน

นอกจากนี้ยังสามารถทดลองการขัดผิวเหล็กแข็งที่มีรูปร่างหรือรูปทรงที่มีความแตกต่างออกไป เช่น ชิ้นงานที่มีโค้งเว้าหรือโค้งนูน เป็นต้น โดยนำเอาการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการทดลอง ทั้งนี้เมื่อรูปทรงของเหล็กแข็งเปลี่ยนไป จะต้องทำการออกแบบทางเดินหัวขัดให้เหมาะสมกับชิ้นงานนั้นๆ อีกทั้งต้องทำการออกแบบหัวขัดให้เหมาะสมกับการขัดผิวชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ ทั้งนี้เพื่อเป็นการพัฒนาการขัดผิวให้มีวิธีการที่สอดคล้องกับชิ้นงานในหลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติกร ฤทธิ์สิงห์ และ เลอศักดิ์ สุมาลย์. 2546. **การปรับปรุงคุณภาพงานหล่อนิกเกิล- อะลูมิเนียมบรอนซ์ โดยวิธีการของทากูชิ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2539. **สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 1.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

_______. 2540. **สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 2.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

กันตภัทร ชาติวิชัยกุล. 2549. เครื่องมือวัดและตรวจสอบความหยาบผิว. **เมททิลเวอร์คกิ้งอัพเดท** 3(12): 4.

ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ และ นภดล ฉิ่งทอง. 2550. การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง, น. 231-242. ใน **รายงานการประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2550.** มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.

ภูวดล วงศ์สร้างทรัพย์. 2541. **การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเจียรเหล็กหล่อสีเทาด้วยหินซิลิกอนคาร์ไบด์และ คิวบิกโบรอนไนไตรด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อำนาจ แก้วสามัคคี. 2548. Lapping and Polishing ปรับคุณภาพผิวงานขั้นสำเร็จในงานแม่พิมพ์. **ส่งเสริมเทคโนโลยี** 32(180): 141-145.

Bandurek, G.R., J. Disney and A. Bendell. 1988. Application of Taguchi Methods to Surface Mount Processes. **Quality and Reliability Engineering International 4:** 171-181.

Choi, J.Y. and H.D. Joeng. 2004. A study on polishing of molds using hydrophilic fixed abrasive pad. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 44:** 1163-1169.

Montgomery, D.C. 2005. **Design and Analysis of Experiments.** 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Peace, G.S. 1993. **Taguchi Methods: A Hand-on Approach.** 2nd ed. Addison Wesley, Massachusetts.

JIS (Japan International Standard). 1998. **Surface roughness – Terminology – Part 1: Surface and its parameters.** B 0660

Jenson, F.P., D.T. Conner and K.L. Wong. 1988. **Quality and Reliability Engineering International.** A Wiley-Interscience Publication, Sussex, England.

Hocheng, H. and K.L. Kuo. 2002. Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 42:** 7-13.

Kita, Y., K. Ikoku and X. Wu. 2007. Intelligent polishing of free from surface by grinding center, pp.121-126. *In* **The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century**. The Japan Society of Mechanical Engineers, Kyushu University, Fukuoka.

Klocke, F., O. Dambon and G.G. Capudi. 2005. Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel. **Wear 258:** 1794-1803.

Mouri, A., N. Nobuya and T. Inari. 2002. Surface roughness measurement using laser diffraction pattern obtained by a video camera and photo-sensors. **SICE :** 2517-2519.

Bagchi, T.P. 1993. **Taguchi Method Explained Practical Steps to Robust Design**. 2nd ed. Prentice Hall of India, India.

Ross, P.J. 1989. **Taguchi Techniques for Quality Engineering**. 2nd ed. McGraw-Hill, New York.

Shiou, F.J. and C.C. Hsu. 2008. Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining center. **Journal of Materials Processing Technology 205:** 249-258

Yuan,J.L., P. Zhao, J. Ruan, Z.X. Cao, W.H. Zhao and T. Xing. 2003. Lapping and polishing process for obtaining super-smooth surfaces of quartz crystal**. Journal of Materials Processing Technology 138:** 116-119.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกลซีของชิ้นงานการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซีของชิ้นงานสำหรับการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์

การทดลอง	ค่าความแข็ง (ร็อกเวลส์เสกลซี)			ค่าความแข็งเฉลี่ย (ร็อกเวลส์เสกลซี)
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
1	55.6	57.6	58.7	57.3
2	59.2	59.4	58.9	59.2
3	58.6	59.3	57.8	58.6
4	58.6	59.2	58.9	58.9
5	59.5	58.5	58.5	58.8
6	59.6	58.5	57.4	58.5
7	56.2	49.5	57.7	54.5
8	58.3	58.6	58.8	58.6
9	54.1	56.9	59.2	56.7
10	58.6	60.5	59.4	59.5
11	60.9	59.1	57.8	59.3
12	57.5	58.6	57.8	58.0

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าความแข็งแบบร็อกเวลส์เสกลซีของชิ้นงานสำหรับการทดลองยืนยันผล

การทดลองยืนยันผล	ค่าความแข็ง (ร็อกเวลส์เสกลซี)			ค่าความแข็งเฉลี่ย (ร็อกเวลส์เสกลซี)
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
1	60.6	60.6	59.5	60.2
2	58.6	58.7	59.8	59.0
3	59.6	58.7	57.3	58.5

ภาคผนวก ข

ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองที่ 1 ถึง 12 ก่อนการขัดผิว

ตารางผนวกที่ ข1 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 ก่อนกระบวนการขัดผิว

ลำดับการทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.1692	0.2165	0.2011	0.2027	0.197375
2	0.1041	0.2352	0.1628	0.2548	0.189225
3	0.2236	0.2413	0.1909	0.1742	0.207500
4	0.1114	0.0704	0.5159	0.6628	0.340125
5	0.1642	0.0969	0.1498	0.1430	0.138475
6	0.0595	0.0572	0.0515	0.0363	0.051125
7	0.0504	0.0892	0.0655	0.0768	0.070475
8	0.0891	0.0976	0.0840	0.0711	0.085450
9	0.0467	0.0509	0.0966	0.0555	0.062425
10	0.2444	0.0875	0.2461	0.4090	0.246750
11	0.0517	0.0853	0.1032	0.0865	0.081675
12	0.1916	0.1763	0.4042	0.6282	0.350075

ตารางผนวกที่ ข2 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 ก่อนกระบวนการขัดผิว

ลำดับการทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.6102	1.9940	1.8366	1.9424	1.845800
2	1.3382	2.0434	2.0721	2.6403	2.023500
3	1.5592	1.8548	1.3224	1.3259	1.515575
4	3.1594	0.9185	3.4133	4.0047	2.873975

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
5	2.7842	2.3811	2.5898	2.7176	2.618175
6	3.1960	0.9409	1.2816	2.3146	1.933275
7	0.3855	1.1048	0.8967	0.9055	0.823125
8	0.8071	2.1347	1.2523	0.8823	1.269100
9	0.6999	0.9684	1.4780	1.3949	1.135300
10	2.0859	1.0813	2.1253	4.3444	2.409225
11	0.6708	1.4644	2.1499	0.8248	1.277475
12	2.9015	1.6076	2.7322	3.1602	2.600375

ภาคผนวก ค

ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผลก่อนการขัดผิว

ตารางผนวกที่ ค1 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 ก่อนกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.7499	0.5455	0.1507	0.3062	0.438075
2	0.7879	0.7793	0.3965	0.3769	0.585150
3	0.0377	0.1143	0.1965	0.1304	0.119725

ตารางผนวกที่ ค2 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 ก่อนกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	4.4028	3.0102	2.0882	2.5868	3.022000
2	4.9477	5.1416	3.5606	3.1301	4.195000
3	0.8493	1.0407	1.9603	1.3175	1.291950

ภาคผนวก ง

ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองที่ 1 ถึง 12 หลังการขัดผิว

ตารางผนวกที่ ง1 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0976	0.1087	0.1139	0.0916	0.102950
2	0.1253	0.1246	0.1344	0.1135	0.124450
3	0.0925	0.1729	0.1864	0.0844	0.134050
4	0.0626	0.0711	0.0785	0.0701	0.070575
5	0.0478	0.0441	0.0493	0.0489	0.047525
6	0.0725	0.0666	0.0651	0.0686	0.068200
7	0.3022	0.2754	0.2188	0.3949	0.297825
8	0.0585	0.0553	0.0614	0.0515	0.056675
9	0.0467	0.0711	0.0688	0.0529	0.059875
10	0.0748	0.0722	0.0648	0.0713	0.070775
11	0.1042	0.0888	0.0795	0.1231	0.098900
12	0.1070	0.1066	0.0990	0.0816	0.098550

ตารางผนวกที่ ง2 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0504	0.0632	0.0630	0.0508	0.056850
2	0.1643	0.1400	0.1739	0.1688	0.161750
3	0.2250	0.2330	0.2114	0.2026	0.218000
4	0.0827	0.1229	0.1097	0.0778	0.098275

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
5	0.0526	0.0806	0.0591	0.0546	0.061725
6	0.1031	0.0991	0.0978	0.0958	0.098950
7	0.3190	0.2535	0.2416	0.3172	0.282825
8	0.1071	0.0469	0.0491	0.0485	0.062900
9	0.0686	0.0372	0.0453	0.0581	0.052300
10	0.0652	0.1078	0.1054	0.0681	0.086625
11	0.0484	0.0574	0.0558	0.0522	0.053450
12	0.1600	0.2332	0.1846	0.1642	0.185500

ตารางผนวกที่ ง3 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0850	0.0949	0.1042	0.0833	0.091850
2	0.0593	0.0706	0.0527	0.0524	0.058750
3	0.0867	0.0919	0.0767	0.0662	0.080375
4	0.1074	0.0865	0.0945	0.1142	0.100650
5	0.0876	0.0734	0.0761	0.0888	0.081475
6	0.1190	0.1709	0.1722	0.1398	0.150475
7	0.1481	0.1959	0.1650	0.1193	0.157075
8	0.0622	0.0808	0.0869	0.0610	0.072725
9	0.0529	0.0332	0.0324	0.0557	0.043550

ตารางผนวกที่ ง3 (ต่อ)

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
10	0.0784	0.0507	0.0614	0.0783	0.067200
11	0.0793	0.0591	0.0528	0.0805	0.067925
12	0.0378	0.0670	0.0674	0.0747	0.061725

ตารางผนวกที่ ง4 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0804	0.0651	0.0589	0.0534	0.064450
2	0.0797	0.0776	0.1098	0.1265	0.098400
3	0.0444	0.0405	0.0425	0.0645	0.047975
4	0.0832	0.0764	0.0814	0.0971	0.084525
5	0.0715	0.0445	0.0552	0.0595	0.057675
6	0.1187	0.1244	0.1234	0.1252	0.122925
7	0.1042	0.0936	0.0886	0.0921	0.094625
8	0.1285	0.0719	0.1285	0.0694	0.099575
9	0.0303	0.0436	0.0380	0.0266	0.034625
10	0.0817	0.0659	0.0621	0.0628	0.068125
11	0.0638	0.0645	0.0685	0.0670	0.065950
12	0.1015	0.0743	0.0884	0.0475	0.077925

ตารางผนวกที่ ง5 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.1718	1.2684	1.3133	1.1209	1.218600
2	3.5556	1.8581	1.7113	1.3203	2.111325
3	1.1382	1.4661	1.4351	1.1451	1.296125
4	0.9535	0.7883	2.3430	1.8248	1.477400
5	0.9728	0.8675	1.1883	1.5540	1.145650
6	1.2497	1.4122	0.9503	0.9762	1.147100
7	2.6398	2.5719	2.4564	2.7325	2.600150
8	1.1128	2.6394	0.9309	0.9481	1.407800
9	0.7616	0.8525	0.8046	0.8846	0.825825
10	0.9485	0.7101	0.9873	1.0666	0.928125
11	1.2648	1.0334	1.2216	1.5742	1.273500
12	0.9501	0.9407	1.0374	0.9260	0.963550

ตารางผนวกที่ ง6 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.4989	0.9879	1.2171	1.2966	1.250125
2	2.6278	1.7382	1.7052	1.6218	1.923250
3	1.5717	1.5551	1.6343	2.0080	1.692275
4	1.1847	4.0346	1.9087	1.2014	2.082350

ตารางผนวกที่ ง6 (ต่อ)

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
5	1.2682	0.9460	0.6519	0.7014	0.891875
6	1.5173	1.3748	1.6123	1.1263	1.407675
7	2.4473	2.0597	2.4898	2.6220	2.404700
8	1.2887	0.8630	1.0629	1.7525	1.241775
9	0.6081	0.5146	0.5317	0.5321	0.546625
10	1.2734	1.6437	1.6328	1.4190	1.492225
11	1.3149	0.9536	1.0854	0.9910	1.086225
12	1.5342	1.7526	1.5364	1.6505	1.618425

ตารางผนวกที่ ง7 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.8264	0.8211	3.0237	1.5793	1.562625
2	2.9199	2.2672	0.8684	1.1129	1.792100
3	2.5050	1.4565	1.4013	1.2599	1.655675
4	1.0562	1.3468	1.0692	1.0526	1.131200
5	1.7681	1.6868	1.3206	1.0147	1.447550
6	1.6872	1.8430	1.6577	1.4701	1.664500
7	2.3426	2.1406	2.2703	1.8320	2.146375
8	1.0563	1.1404	1.4797	1.2946	1.242750
9	0.6247	0.6426	0.6526	0.6521	0.643000

ตารางผนวกที่ ง7 (ต่อ)

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
10	1.1507	0.5998	0.6863	1.0051	0.860475
11	1.4030	1.3588	1.2108	1.7361	1.427175
12	0.7209	0.7635	0.6211	0.6646	0.692525

ตารางผนวกที่ ง8 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 12 (วิธีการทากูชิ L_{12} ออทอกอนอล อะเรย์) รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลอง	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.3076	0.8926	0.7684	2.2177	1.296575
2	2.7869	1.2191	2.8820	3.2262	2.528550
3	0.7700	0.8890	0.6235	1.2690	0.887875
4	0.9956	0.9904	2.1917	2.2322	1.602475
5	2.7014	2.4669	1.2386	2.4835	2.222600
6	1.8054	1.4427	1.7274	1.5158	1.622825
7	1.3522	1.5432	1.1651	1.7521	1.453150
8	1.6249	1.5240	1.9118	1.5439	1.651150
9	0.4016	0.6594	0.7686	0.4308	0.565100
10	1.0045	1.0281	0.6607	0.9293	0.905650
11	5.2121	1.6027	2.1429	1.5463	2.626000
12	2.0542	1.7264	1.5245	1.0423	1.586850

ภาคผนวก จ

ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผลหลังการขัดผิว

ตารางผนวกที่ จ1 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่1 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.1228	0.1137	0.1056	0.1376	0.1199
2	0.0701	0.0569	0.0553	0.0681	1.0491
3	0.0746	0.1616	0.1574	0.0898	0.1209

ตารางผนวกที่ จ2 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่2 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0742	0.0974	0.1088	0.0692	0.0874
2	0.1284	0.0967	0.0884	0.0696	0.0958
3	0.1907	0.2170	0.2195	0.1957	0.2057

ตารางผนวกที่ จ3 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่3 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0662	0.1207	0.1222	0.1326	0.1104
2	0.1119	0.1026	0.1021	0.1166	0.1083
3	0.0547	0.0698	0.0745	0.0691	0.0670

ตารางผนวกที่ จ4 ความหยาบผิว R_a ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่4 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_a				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.0820	0.1011	0.1194	0.1131	0.1039
2	0.0743	0.0884	0.0842	0.0939	0.0855
3	0.0829	0.0808	0.0838	0.0731	0.0802

ตารางผนวกที่ จ5 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.7001	1.4974	1.3960	2.8201	1.8534
2	1.0287	0.9303	1.0020	1.2353	1.0491
3	1.1253	1.4124	1.4923	0.9446	1.2437

ตารางผนวกที่ จ6 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว

การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.9146	1.3228	1.3907	1.0507	1.1697
2	2.8016	1.5462	1.9646	1.6271	1.9849
3	1.4766	1.6759	1.5308	1.7980	1.6203

ตารางผนวกที่ จ7 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

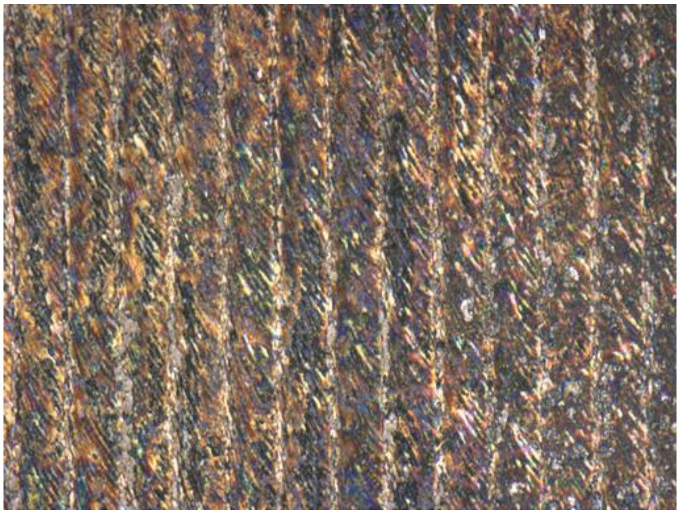
การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	0.7744	1.5479	1.4684	1.7868	1.3944
2	2.3766	1.2236	1.0704	1.4000	1.5177
3	0.8444	0.8022	0.7687	0.8888	0.8260

ตารางผนวกที่ จ8 ความหยาบผิว R_z ของการทดลองยืนยันผลที่ 1 ถึงการทดลองยืนยันผลที่ 3 รอบการทดลองที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

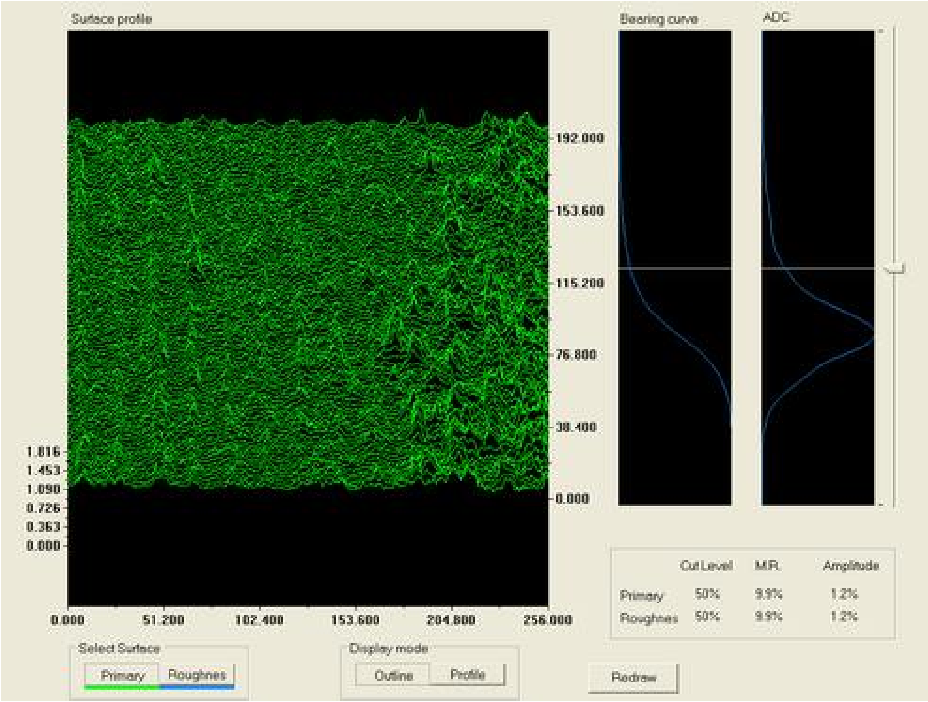
การทดลองยืนยันผล	ความหยาบผิว R_z				ค่าเฉลี่ย (ไมครอน)
	พื้นที่การวัดที่ 1 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 2 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 3 (ไมครอน)	พื้นที่การวัดที่ 4 (ไมครอน)	
1	1.2115	2.2880	2.9907	1.8861	2.0941
2	1.4120	1.1192	1.3722	2.1325	1.5090
3	1.0071	0.7989	0.8572	1.0316	0.9237

ภาคผนวก ฉ

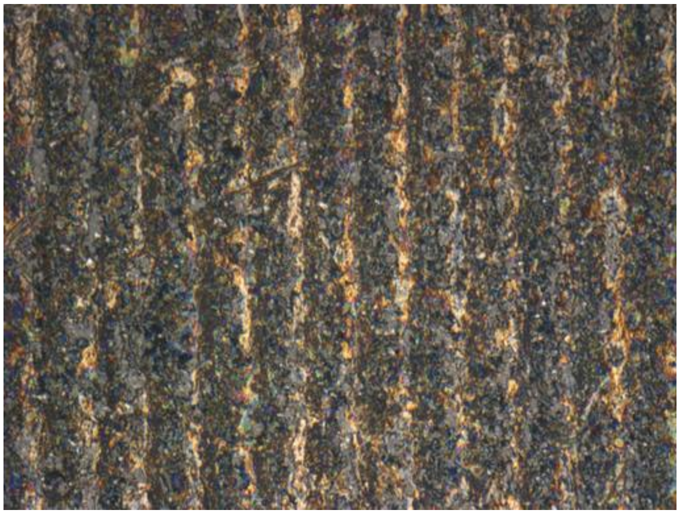
การวิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงานการทดลองเพื่อยืนยันผล



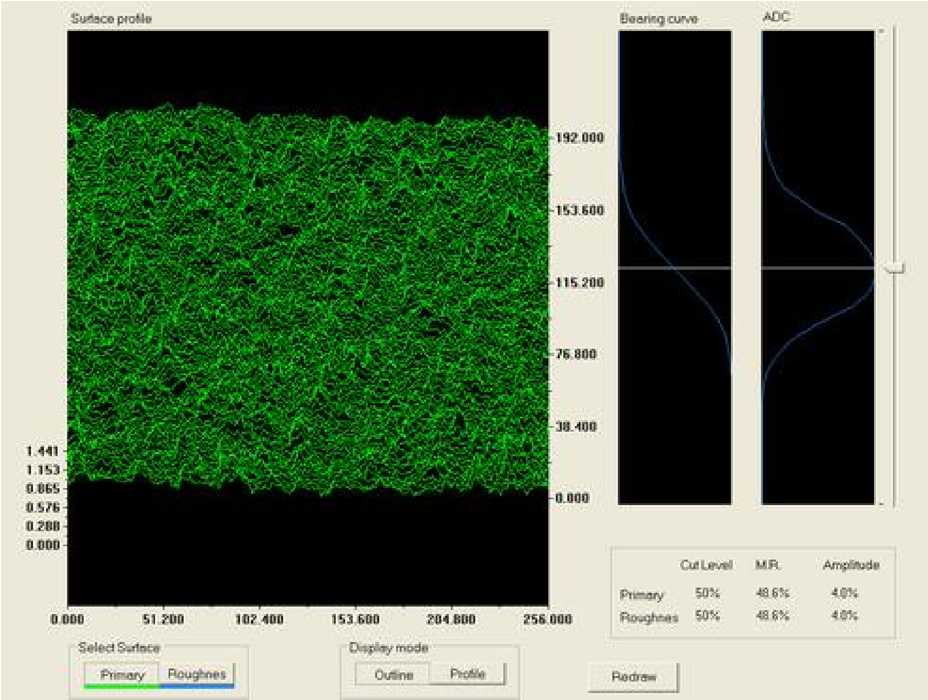
ภาพผนวกที่ ฉ1 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



ภาพผนวกที่ ฉ2 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว

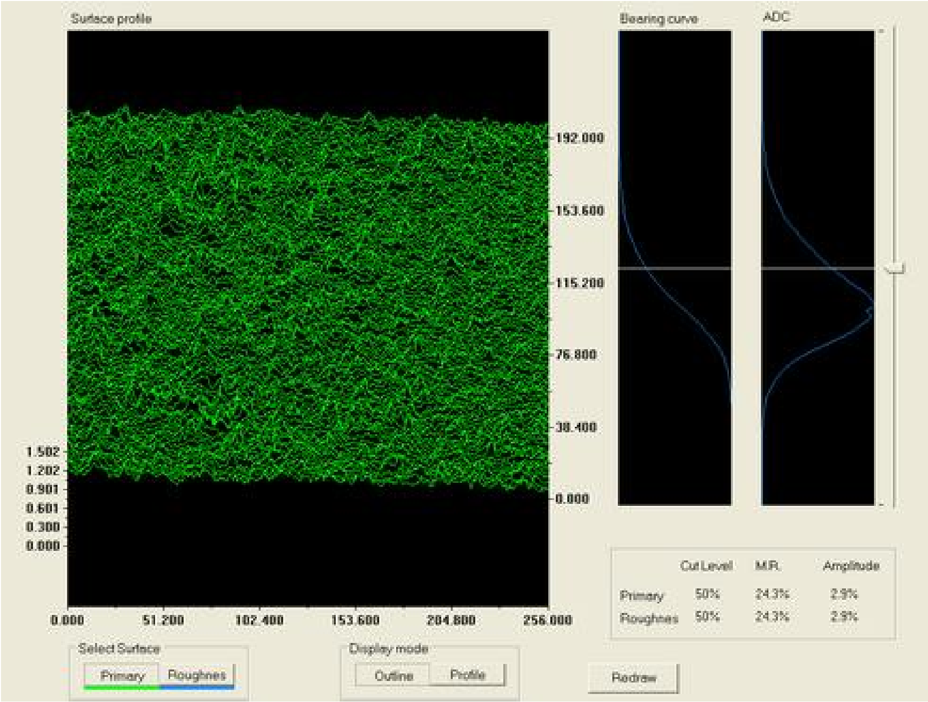


ภาพผนวกที่ ฉ3 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



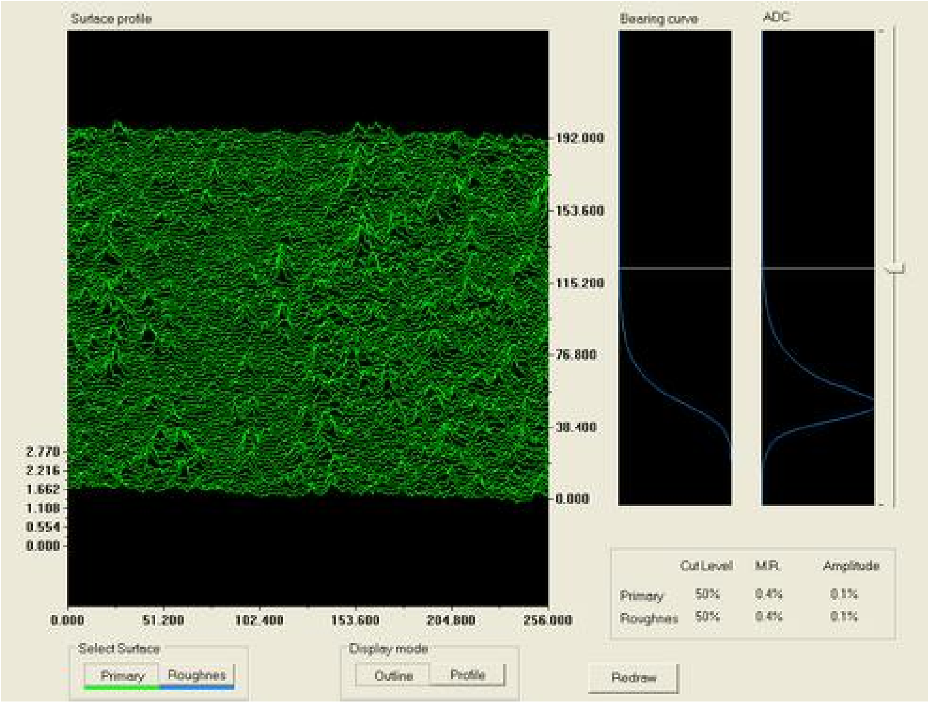
ภาพผนวกที่ ฉ4 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว

ภาพผนวกที่ ฉ5 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว



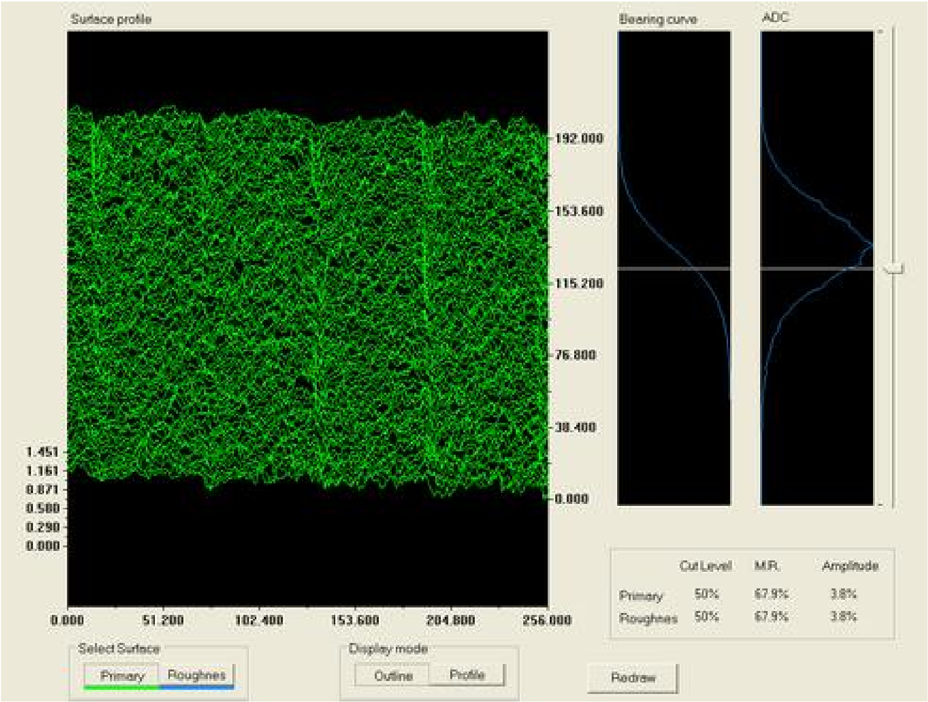
ภาพผนวกที่ ฉ6 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

ภาพผนวกที่ ฉ7 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

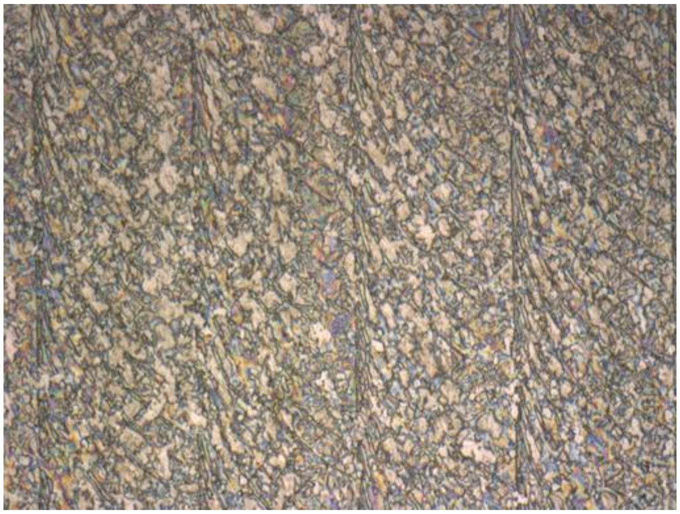


ภาพผนวกที่ ฉ8 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 1 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

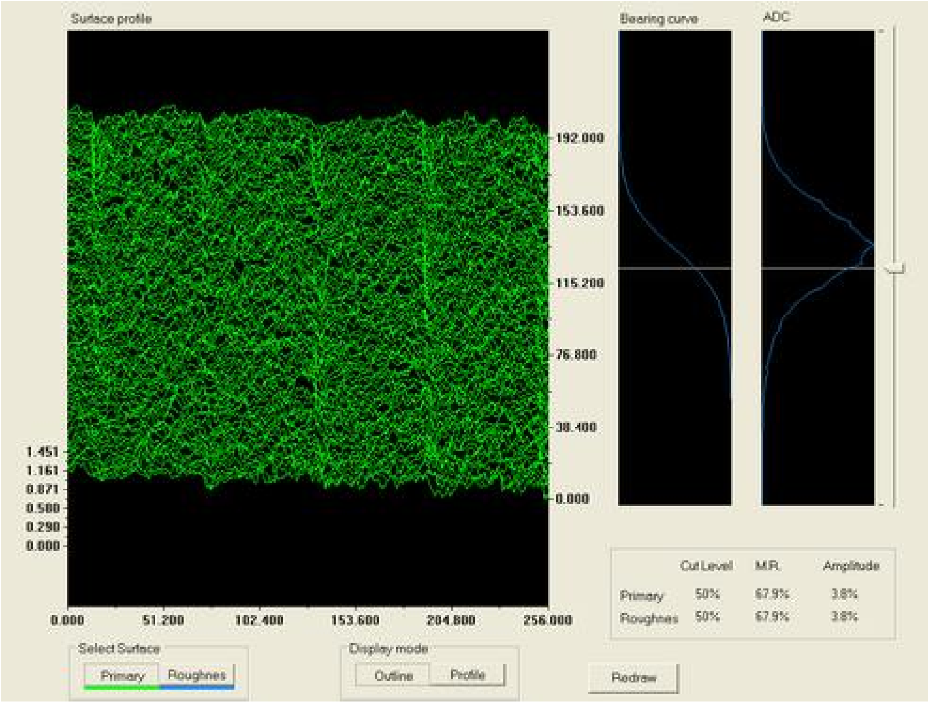
ภาพผนวกที่ ฉ9 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



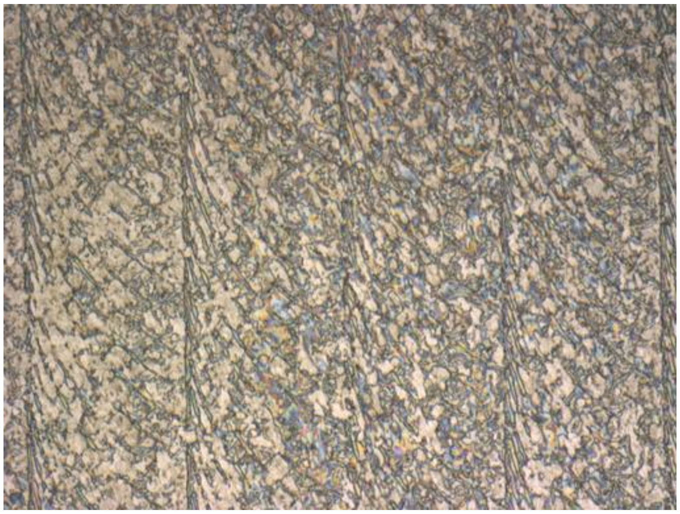
ภาพผนวกที่ ฉ10 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



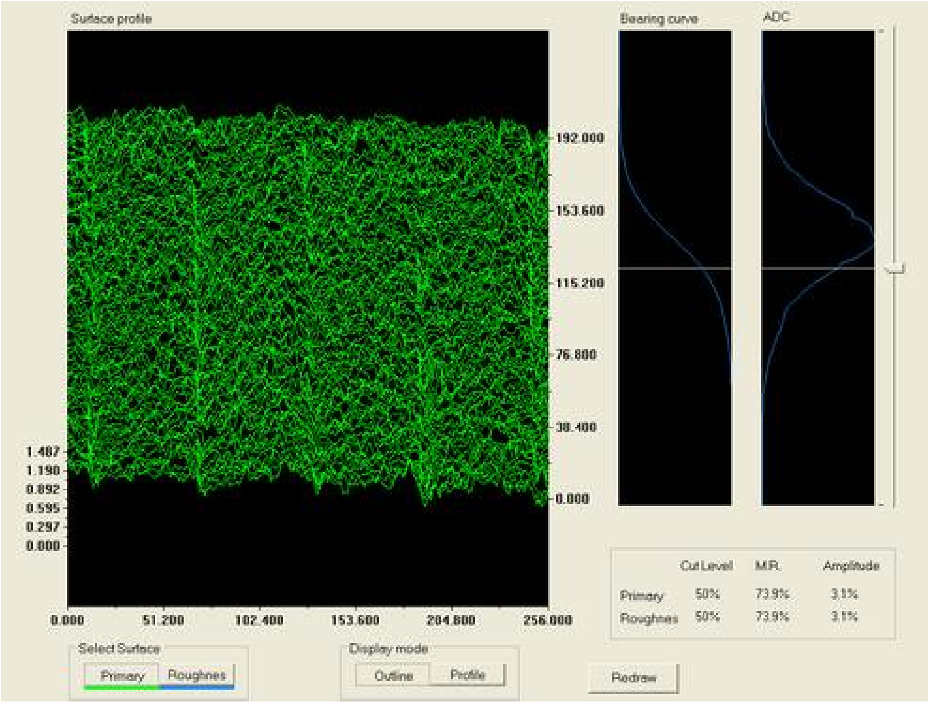
ภาพผนวกที่ ฉ11 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



ภาพผนวกที่ ฉ12 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว

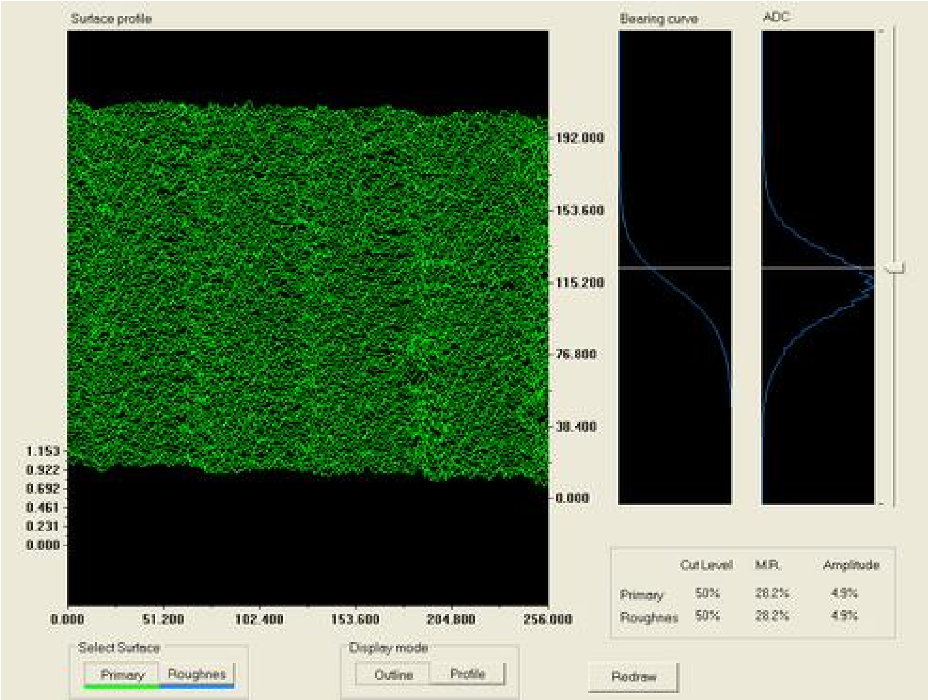


ภาพผนวกที่ ฉ13 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

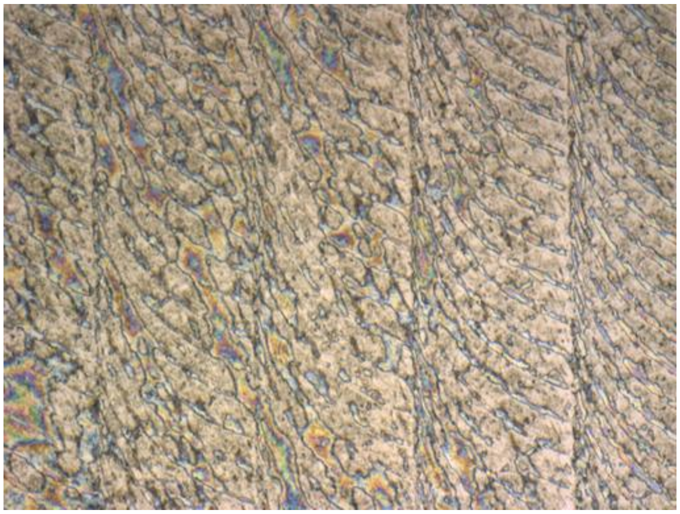


ภาพผนวกที่ ฉ14 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว

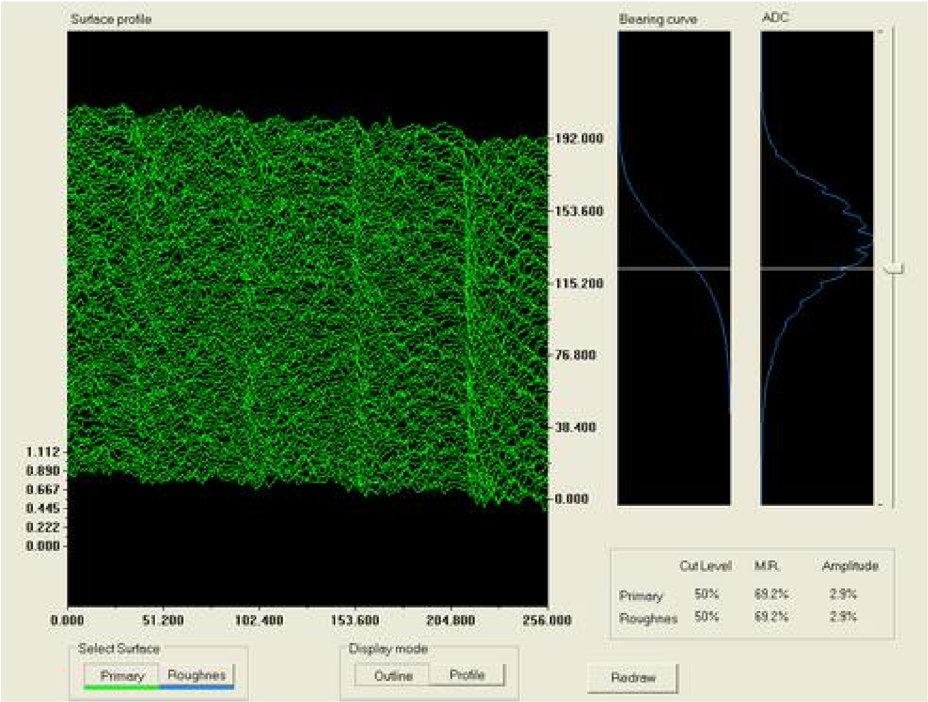
ภาพผนวกที่ ฉ15 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว



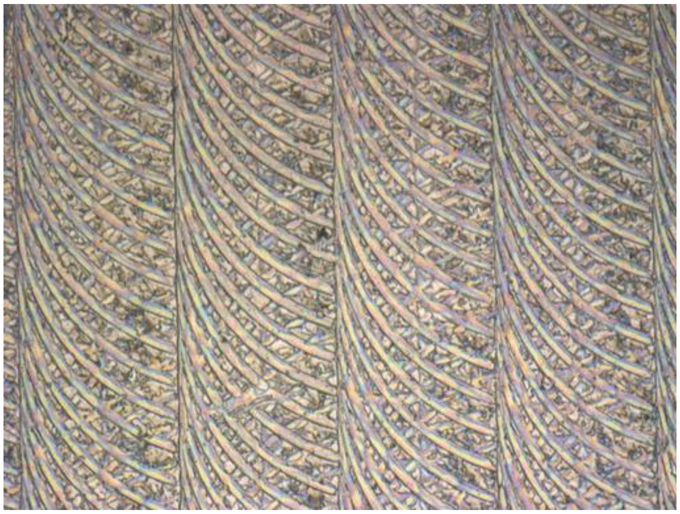
ภาพผนวกที่ ฉ16 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 2 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว



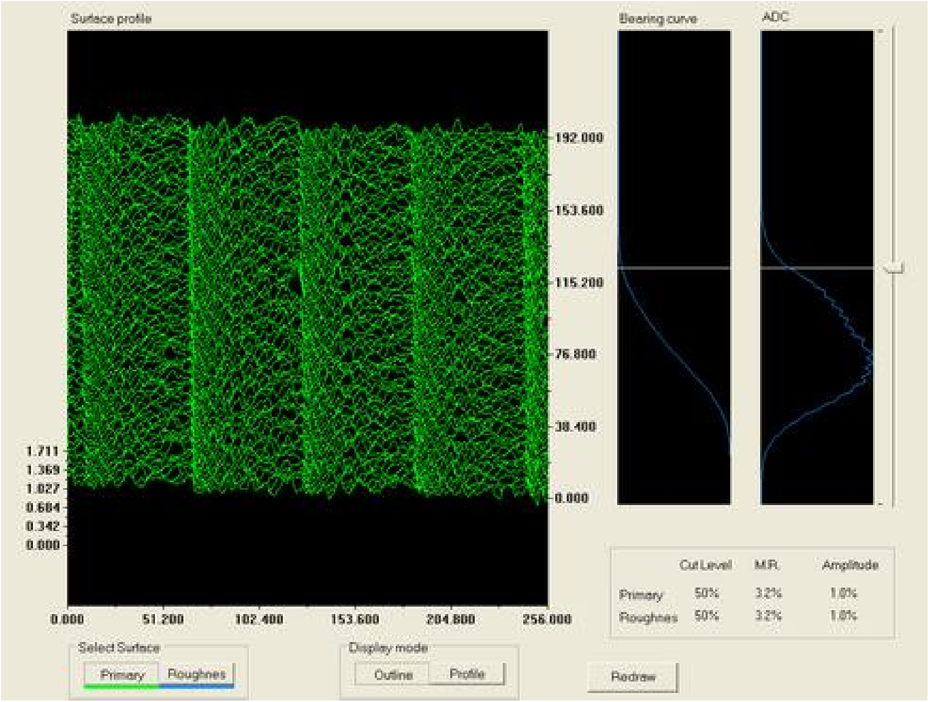
ภาพผนวกที่ ฉ17 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



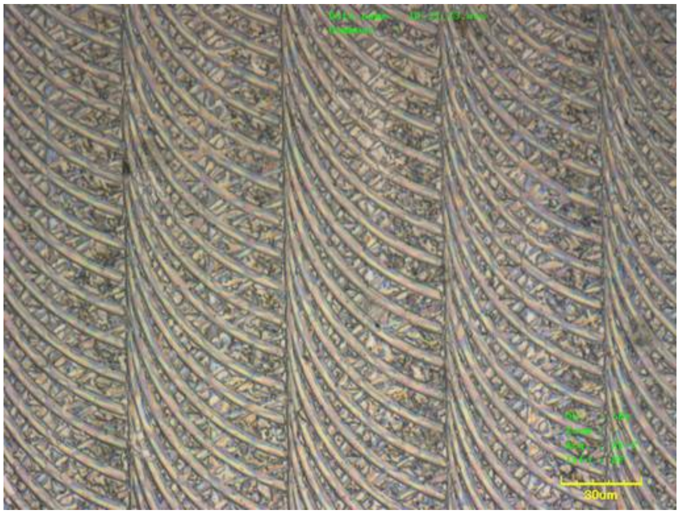
ภาพผนวกที่ ฉ18 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



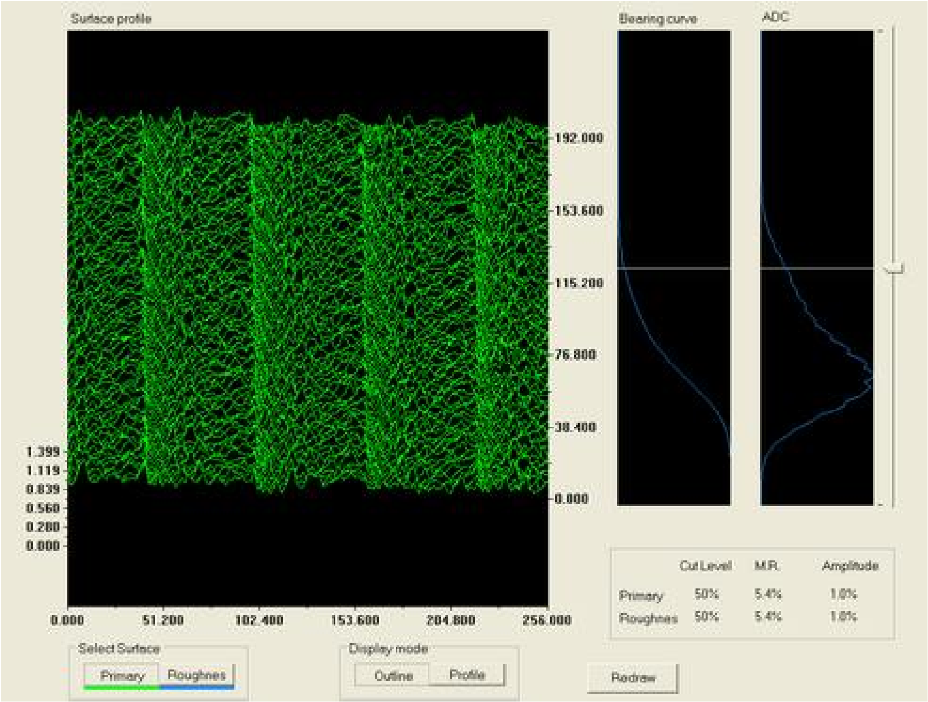
ภาพผนวกที่ ฉ19 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



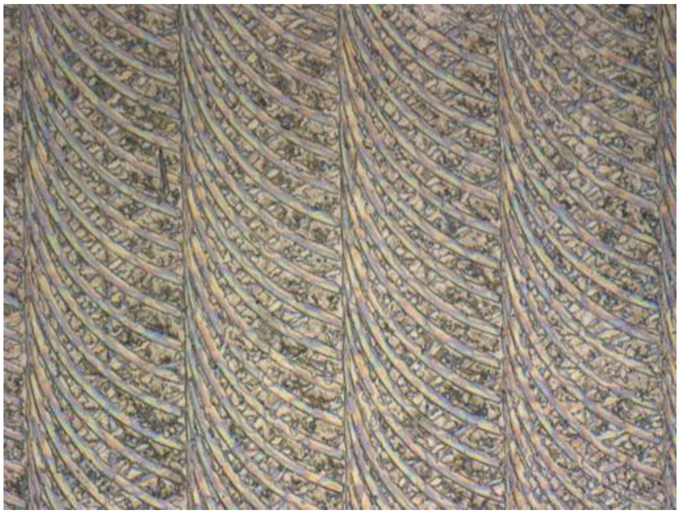
ภาพผนวกที่ ฉ20 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



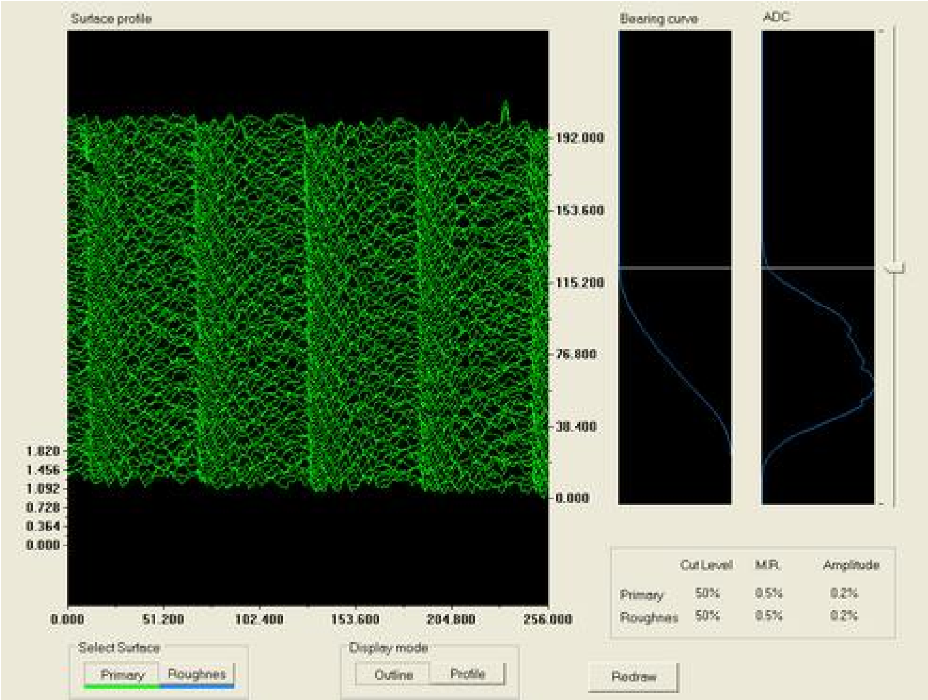
ภาพผนวกที่ ฉ21 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว



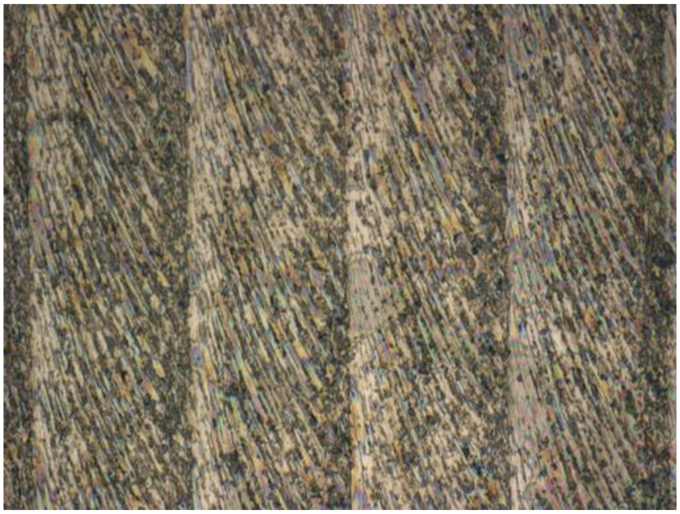
ภาพผนวกที่ ฉ22 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว



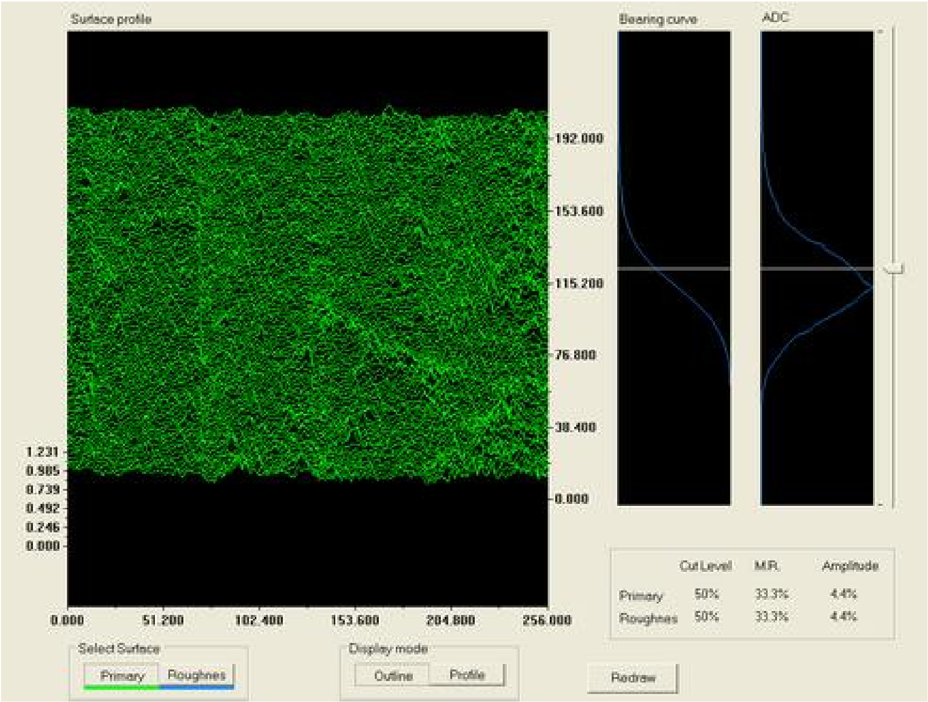
ภาพผนวกที่ ฉ23 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว



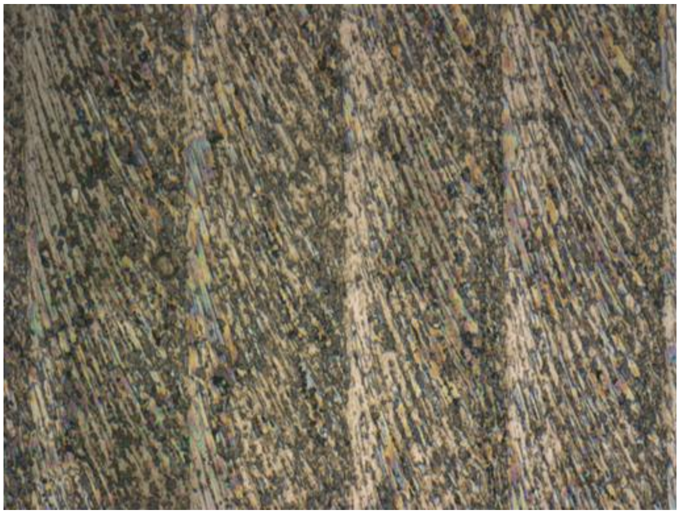
ภาพผนวกที่ ฉ24 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 3 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว



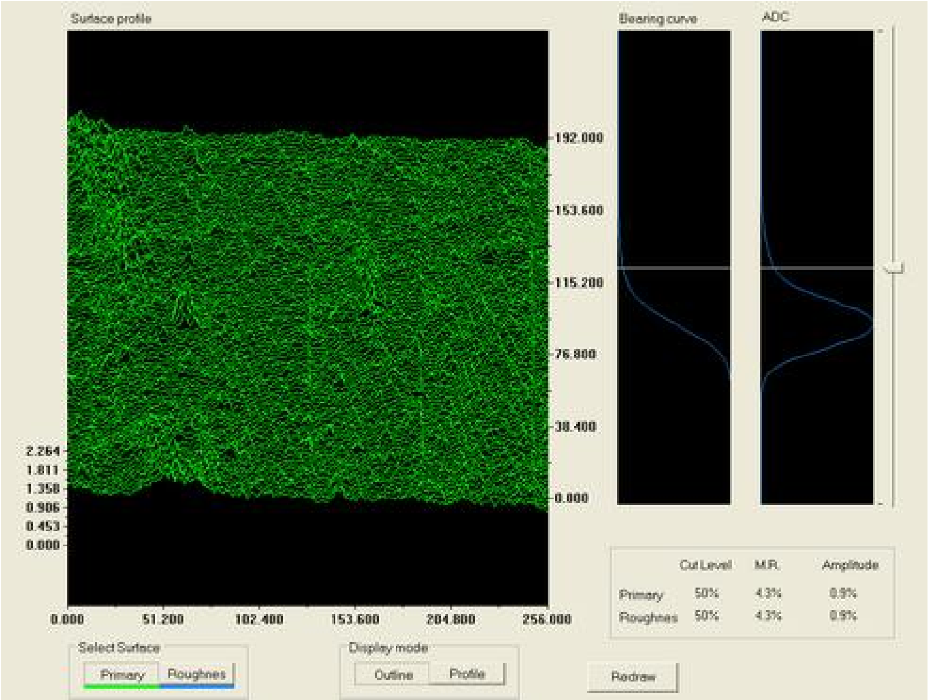
ภาพผนวกที่ ฉ25 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



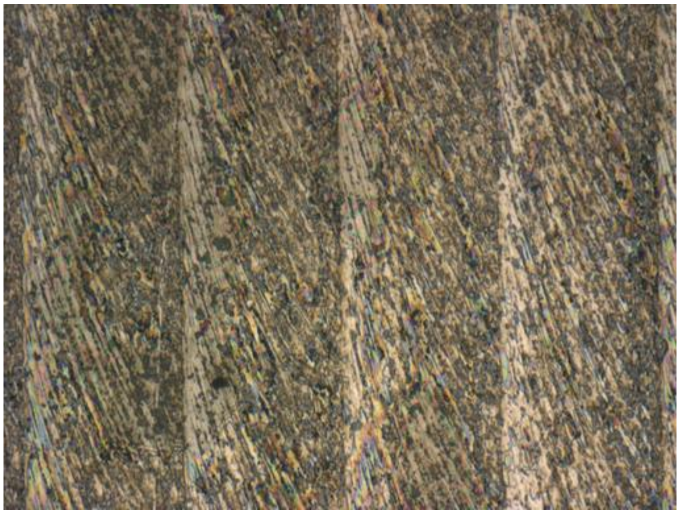
ภาพผนวกที่ ฉ26 แสดงการวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 1 หลังกระบวนการขัดผิว



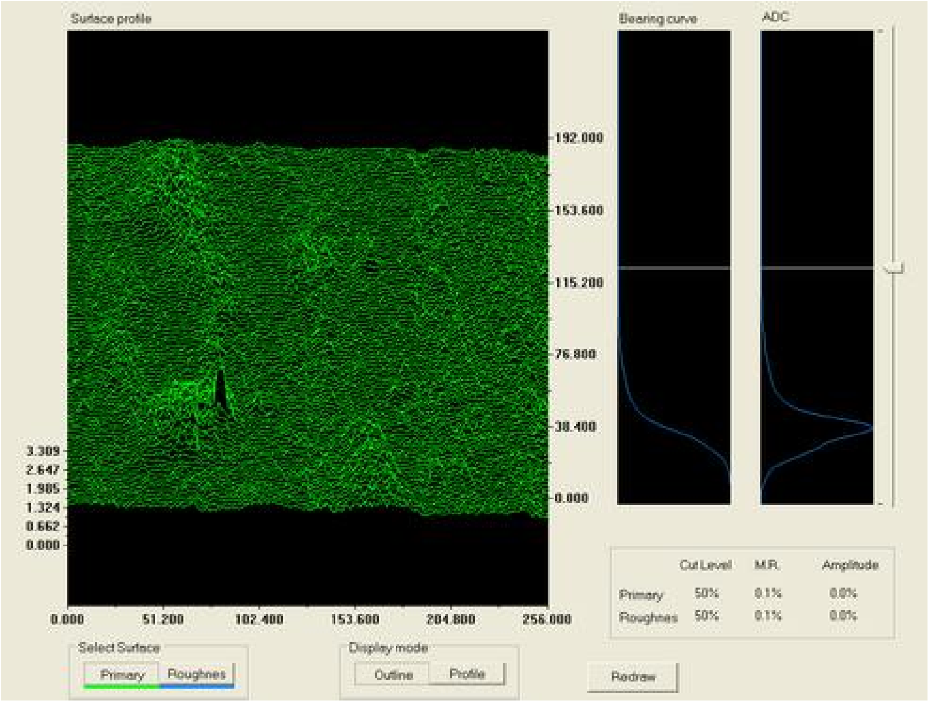
ภาพผนวกที่ ฉ27 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



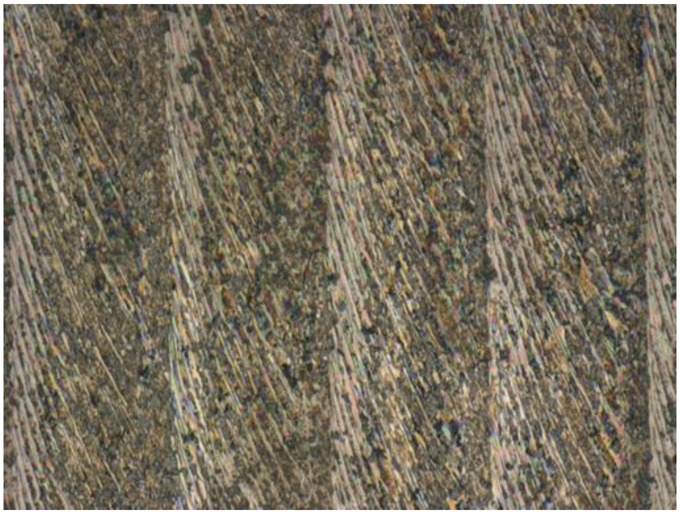
ภาพผนวกที่ ฉ28 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 2 หลังกระบวนการขัดผิว



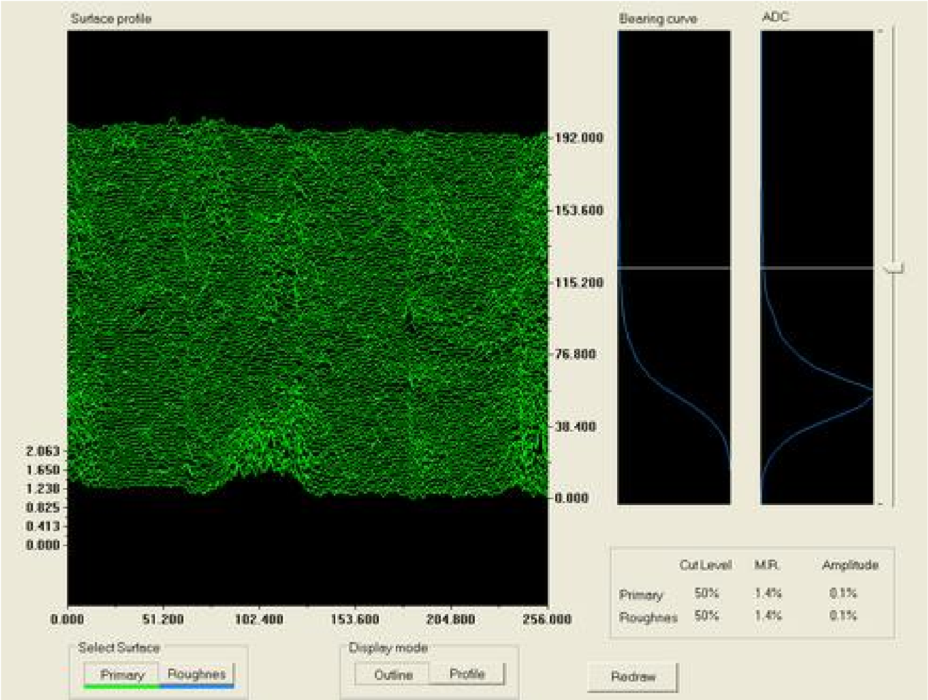
ภาพผนวกที่ ฉ29 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว



ภาพผนวกที่ ฉ30 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 3 หลังกระบวนการขัดผิว



ภาพผนวกที่ ฉ31 สภาพผิวกำลังขยาย 50 เท่าของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว



ภาพผนวกที่ ฉ32 การวิเคราะห์ความหยาบผิวเชิงระนาบของชิ้นงานการทดลองยืนยันผลที่ 1 รอบการทดลองที่ 4 พื้นที่การวัดที่ 4 หลังกระบวนการขัดผิว

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายพจนศักดิ์ พจนา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 เมษายน 2525
สถานที่เกิด	แพร่
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (การผลิต) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนการศึกษาของมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี เพื่อใช้ในการค้นคว้าวิจัย ประจำปี 2551 2. ทุนสนับสนุนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2552