

ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยเซรามิกบอลต่อความแข็งผิว
และความเค้นตกค้างของเหล็ก SKD11

A STUDY OF INFLUENCES OF CERAMIC BALL BURNISHING
PROCESS ON SURFACE HARDNESS AND RESIDUAL STRESS
OF SKD11

อัครวัฒน์ ไบกว้าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต


คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกรดรีดผิวแข็งด้วยเซรามิกบอลต่อความ
แข็งผิวและความเค้นตกค้างของเหล็ก SKD11



อัศวรัตน์ ไบกว้าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

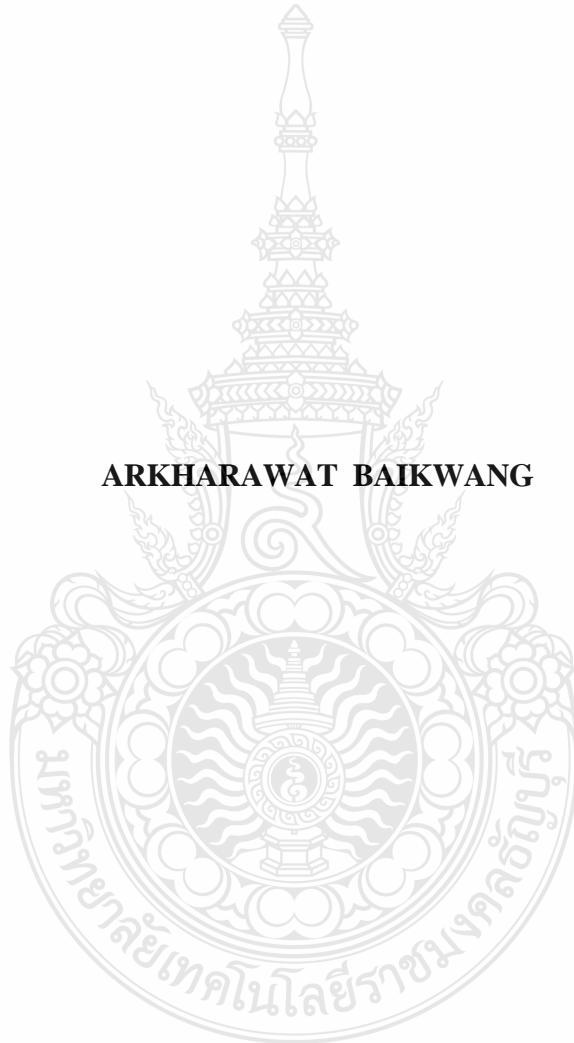
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**A STUDY OF INFLUENCES OF CERAMIC BALL BURNISHING PROCESS ON
SURFACE HARDNESS AND RESIDUAL STRESS OF SKD11**

ARKHARAWAT BAIKWANG

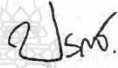



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
ACADEMIC YEAR 2020
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกดรีดผิวด้วยเซรามิกบอลต่อความแข็งผิวและ
ความเค้นตกค้างของเหล็ก SKD11
A Study of Influences of Ceramic Ball Burnishing Process on Surface
Hardness and Residual Stress of SKD11

ชื่อ - นามสกุล นายอัศววัฒน์ ไบกว้าง
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา 2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ปรกช สิริสุวัฒน์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา วัฒนากา, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกรดรีดผิวด้วยเซรามิกบอลต่อความแข็งแรงและความเค้นตกค้างของเหล็ก SKD11
ชื่อ-นามสกุล	นายอัศววัฒน์ ไบกว้าง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

การกรดรีดผิวแข็งเป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของชิ้นผิวโลหะทำให้เกิดผิวชิ้นงานมีความแข็งแรง เกิดความเค้นตกค้างภายในส่งผลให้ผิวของชิ้นงานจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ชิ้นงานมีความหยาบผิวดีขึ้น ด้วยจุดเด่นของการกรดรีดผิวแข็งนี้ทำให้สามารถนำไปพัฒนาการผลิตในงานอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่นการผลิตใบพัดเรือ และการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อลดขั้นตอน เวลา และความเสียหายของขั้นตอนการผลิตอื่น ๆ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการกรดรีดผิวแข็งวัสดุเหล็ก SKD11 ด้วยเซรามิกบอลชนิดซิลิกอนไนไตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกในการกรดรีดผิวแข็ง 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ความเร็วการเคลื่อนที่โต๊ะงานของการกรดรีดผิวแข็ง 2000 มิลลิเมตร/นาที อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตร เมื่อกรดรีดผิวแข็งเสร็จนำชิ้นงานมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงผิวความเค้นตกค้าง ค่าความหยาบผิว ความแข็งชิ้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของบริเวณหน้าตัดชิ้นงานกรดรีดผิวแข็ง

จากผลการทดลองการกรดรีดผิวแข็งพบว่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกและ ความลึกรีดผิวแข็งมีอิทธิพลร่วมกันที่ส่งผลต่อความแข็งแรงผิวของชิ้นงานค่าความแข็งแรงผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับค่าความเค้นตกค้างโดยค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 629.4 MHV หรือเท่ากับ 57.8 HRC ที่เงื่อนไขแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกในการกรดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเทียบเท่ากับกระบวนการอบชุบโลหะ ค่าความหยาบผิวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการขึ้นรูปที่สามารถยอมรับได้ ความแข็งชิ้นผิวมีค่าเฉลี่ยเทียบเคียงกับกระบวนการอบชุบผิวแข็ง ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริเวณแนวตัดขวางมีการอัดตัวอย่างหนาแน่นส่งผลให้บริเวณที่มีการกรดรีดผิวแข็งมีความแข็งแรงและความเค้นตกค้างเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : การกรดรีดผิวแข็งด้วยเซรามิกบอล ความเค้นตกค้าง ความแข็งชิ้นผิว

Thesis Title	A Study of Influences of Ceramic Ball Burnishing Process on Surface Hardness and Residual Stress of SKD11
Name – Surname	Mr. Arkharawat Baikwang
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2020

ABSTRACT

A ball burnishing process is a process of improving the physical properties of metal surface layers. The process improves the surface hardness, the internal residual stress, and the surface roughness of the workpiece. Accordingly, it could be used in a wide variety of industrial application development such as ship propeller manufacturing and mold manufacturing to shorten time and reduce damages in production processes.

The purpose of this research was to study the ball burnishing process of the SKD11 steel with a silicon nitride ceramic ball measuring 8 mm in diameter, the hydraulic oil pressures of 200, 400 and 600 bar, and the hardened depths of 0.3, 0.5 and 0.7 mm at the speed of 2000 mm/ min and the feed rate of 0.1 mm /rev. Then, the workpiece was examined for surface hardness, residual stress, surface roughness, and microstructure of the cross-sectional area of the burnished surface.

The results revealed that both the hydraulic oil pressure and the hardened depth influenced the surface hardness of the workpiece. The average surface hardness value had a tendency to be related to the internal residual stress value at the maximum value of 629.4 MHV or 57.8 HRC at the hydraulic oil pressure of 400 bar and the hardened depth of 0.5 mm which was equivalent to the result of a heat treatment process. The surface roughness was within acceptable machining standards. The average surface hardness could be compared to the result of a treatment process. Moreover, the

microstructure of the cross-sectional area of the burnished surface was densely packed, resulting in the increase of hardness and residual stress.

Keywords: ceramic ball burnishing process, residual stress, surface hardness



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่อง จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์ ประธานกรรมการสอบและกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา วัฒนาภา อาจารย์คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และวิทยาลัยเทคนิคชยานาอนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักรพร้อมทั้งสถานที่ในการสนับสนุนการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณและมอบความดีทั้งหมดให้ บิดา มารดา พี่ ภรรยา ลูกและเพื่อน ที่ให้การสนับสนุน รวมทั้งครู-อาจารย์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้ทำวิจัยกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อัศววัฒน์ ไบก้วง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัยวัตถุประสงค์การวิจัย.....	16
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	16
1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	17
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
1.6 คำนียามศัพท์เฉพาะ.....	18
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 การกัดรีดผิวแข็ง.....	19
2.2 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SKD11.....	26
2.3 พื้นผิวชิ้นงาน.....	28
2.4 ความหยابจากการผลิตแบบต่างๆ.....	32
2.5 ความเค้นตึงค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน.....	35
2.6 ทฤษฎีของการบวมการกัดโลหะ.....	50
2.7 เทคโนโลยีทางด้าน CNC.....	52
2.8 การชุบผิวแข็ง.....	55
2.9 ทบทวนวรรณกรรม.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	65
3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	65
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	66
3.3 การทดสอบเบื้องต้น.....	71
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	72
3.5 การทดสอบและจัดเก็บข้อมูล.....	76
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	79
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	80
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งแรง.....	80
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งของชั้นความลึกผิว.....	90
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความเค้นตกค้าง.....	92
4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบค่าความหยาบผิว.....	94
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างจุลภาคของผลึก.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
บรรณานุกรม.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองค่าความแข็งแรง.....	110
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองค่าความลึกของความแข็งแรง.....	114
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	25
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขต่าง ๆ ใช้สำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการรีดผิวละเอียด	26
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของ SKD11 (mass%).....	27
ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่าง ๆ.....	43
ตารางที่ 2.5 ตารางเทียบค่าความแข็ง.....	48
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องกัดยี่ห้อ First รุ่น V 700.....	68
ตารางที่ 3.2 แสดงการทดสอบเบื้องต้น.....	72
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ที่ใช้ในการทดสอบ.....	72
ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกัดรีดผิวแข็งขึ้นงาน.....	74
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งผิวมาตรฐาน (HV) ของเหล็ก SKD11 ก่อนการกัดรีดผิวแข็ง.....	81
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (HV) ของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็ง.....	81
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.3 มม.	83
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.5 มม.	84
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.7 มม.	85
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มม.	86
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มม.	87
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน ป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ความลึกการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มม.	88
ตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งผิว.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ ชั้นความลึกผิว 0.3 0.5 และ 0.7 มม.....	91
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa) ของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็ง	93
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11.....	94



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องมือขัดผิวแบบแข็ง.....	19
รูปที่ 2.2 Rolling force.....	20
รูปที่ 2.3 SEM photography of hard roller burnished surface.....	21
รูปที่ 2.4 Influence of machining parameters.....	22
รูปที่ 2.5 Surface quality at roller burnishing.....	23
รูปที่ 2.6 แรงกระทำของกระบวนการรีดผิวละเอียด.....	24
รูปที่ 2.7 แรงดันภายใต้ผิวชิ้นงานจากการรีด.....	24
รูปที่ 2.8 การจำลองโมเดลการรีดผิวละเอียด.....	26
รูปที่ 2.9 ความหยาบผิวชิ้นงาน ก่อนและหลังการรีดผิวละเอียด.....	28
รูปที่ 2.10 ลักษณะของพื้นผิว.....	29
รูปที่ 2.11 ค่าความหยาบผิว.....	31
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานค่าความหยาบ.....	33
รูปที่ 2.13 Reference Relation between Arithmetic Average Roughness(Ra) and Conventional Parameters.....	34
รูปที่ 2.14 ค่าความหยาบของกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ.....	34
รูปที่ 2.15 ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน.....	35
รูปที่ 2.16 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์.....	37
รูปที่ 2.17 หลักการความแข็งร็อคเวลล์.....	39
รูปที่ 2.18 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์.....	41
รูปที่ 2.19 หลักการการวัดค่าความแข็งวิกเกอร์.....	47
รูปที่ 2.20 ความแข็งของผิวชิ้นงาน.....	50
รูปที่ 2.21 ลักษณะของการกัด.....	51
รูปที่ 2.22 วิธีการป้อนตามมีด และป้อนสวนมีด.....	51
รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องกัด CNC.....	53
รูปที่ 2.24 แสดงอัตราป้อน.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 แสดงหลักการทำงานของ การชุบผิวแข็งแบบอินดักชั่น.....	56
รูปที่ 2.26 เครื่องอินดักชั่น.....	56
รูปที่ 2.27 เตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศสำหรับชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บูไรซิ่งและ แบบแก๊สอัดคาร์โบไนไตรดิง.....	57
รูปที่ 2.28 แสดงชั้นความแข็งลึกของการชุบผิวแข็งแบบคาร์บูไรซิ่งหรือคาร์โบไนไตรดิง และแบบอินดักชั่น.....	58
รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบความแข็งแกน (core hardness) ที่ได้จากการชุบผิวแข็ง แบบคาร์บูไรซิ่งและคาร์โบไนไตรดิงระหว่างเหล็กกล้าเจือต่ำ (JIS SCM 415) และเหล็กกล้าละมุน (Mild steel JIS SS400).....	59
รูปที่ 2.30 เปรียบเทียบความแข็งระหว่างการชุบผิวแข็งโดยวิธีคาร์บูไรซิ่งและไนไตรดิง.....	60
รูปที่ 3.1 ขนาดของบอลครีตผิวแข็งชิ้นงาน.....	66
รูปที่ 3.2 เครื่องมือกรัดผิวแข็ง.....	66
รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC).....	67
รูปที่ 3.4 เครื่องปั๊มไฮดรอลิก.....	68
รูปที่ 3.5 น้ำมันไฮดรอลิก HLP 68.....	69
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหยาบผิว.....	69
รูปที่ 3.7 เครื่อง Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester	70
รูปที่ 3.8 เครื่อง Metallurgical Microscope.....	70
รูปที่ 3.9 เครื่อง Portable X-ray Residual Stress Analyzer.....	71
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการทดสอบ.....	73
รูปที่ 3.11 การติดตั้งชุดหัวบอลครีตผิวแข็ง.....	74
รูปที่ 3.12 การจับยึดชิ้นงาน.....	75
รูปที่ 3.13 การกรัดผิวแข็งชิ้นงาน.....	75
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง.....	76
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการวัดค่าความเรียบผิว.....	76
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งพื้นผิว.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 การวัดความเค้นตกค้างตามแนวแกน.....	77
รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์.....	78
รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งพื้นผิว.....	78
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (HV) ของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็ง.....	82
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.3 มม.....	83
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.5 มม.....	84
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.7 มม.....	85
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มม.....	86
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มม.....	87
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็งที่สภาวะ แรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ความลึกการกรดรีดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มม.....	88
รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลหลักของความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกรดรีดผิวแข็งที่ ส่งผลต่อความแข็งผิว.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลหลักเปรียบเทียบความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกดรีด ผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งผิว.....	90
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความแข็งชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็ง	92
รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa) ของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็ง.....	93
รูปที่ 4.12 Topographyและพารามิเตอร์ของพื้นผิวหลังจากการกดรีดผิวแข็ง.....	99
รูปที่ 4.13 ค่าความหยาบผิวของเหล็ก SKD11 กดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 400$ bar, $D_b = 0.5$ mm.	100
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านกระบวนการกดรีดผิวแข็ง.....	102
รูปที่ 4.15 โครงสร้างผลึกของเหล็ก SKD11 เปรียบเทียบ (a) กดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 400$ bar, $D_b = 0.5$ mm. (b) Base.....	103
รูปที่ 4.16 ขนาดเกรนของเหล็ก SKD11.....	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) คือเหล็กที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมลงไป และอาจมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่เข้าไปด้วยตามปริมาณที่กำหนด เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติในการรับแรงต่าง ๆ ได้ดี เช่น แรงกระแทก (Impact Strength) แรงดึง (Tensile Strength) แรงอัด (Compressive Strength) และ แรงเฉือน (Shear Strength) ทนต่อการกัดกร่อน การเสียดสี และสามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จึงทำให้นิยมใช้งานกันในอุตสาหกรรมการผลิต และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย [1] เป็นเหล็กที่ถูกนำไปใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.25% เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.2-0.5% และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5 -1.5% [2] ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ละชนิดนำไปใช้ประโยชน์ในงานแตกต่างกันตามสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 มีความแข็ง ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอสูง สามารถนำไปใช้งานสำหรับเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กกล้าตาย มักจะใช้สำหรับแม่พิมพ์ปั๊ม แม่พิมพ์พลาสติก[3] ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดคัลเลอร์ ใบเลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียว (Tap) ใบมีดโกน ตะไบ แผ่นแกว เหล็กกัด สปริงแหนบ ลูกบอล แบริ่งลูกปืน

ในกระบวนการแปรรูปเพื่อให้ชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก SKD11 มีความแข็งแรง และรับแรงต่าง ๆ ได้ดี จะทำโดยผ่านกระบวนการชุบแข็ง (Tartaning) โดยการชุบแข็งอุณหภูมิ 1,000 ~ 1,050 °c โดยสารชุบ อากาศ น้ำมัน จนทำให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์ และทำให้เย็นตัวจนกลายเป็นโครงสร้างมาเทนไนต์ ซึ่งความแข็งหลังอบคืนตัวจะอยู่ในช่วง 55-62 HRC [4] หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งชิ้นงานต้องผ่านกระบวนการปรับผิวให้มีคุณภาพผิวตรงตามมาตรฐาน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5] ได้มีการนำกระบวนการกรดรีดผิวชิ้นงาน (Burnishing) ด้วยลูกกลิ้ง (Roller Burnishing) [6-7] และกระบวนการกรดรีดผิวแข็งด้วยการใช้บอล (Ball Burnishing) [8-11] เป็นวิธีการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานทางกายภาพ เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวโลหะ [12] สมบัติเชิงกลของวัสดุและรูปร่างทรงเรขาคณิตของความหยาบสุดท้ายถูกพิจารณา เมื่อต้องการใช้ ขั้นตอนการกรดรีดผิวแข็งด้วยบอลที่ประสบ

ความสำเร็จต้องมีการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ และความสมบูรณ์ของพื้นผิว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางบอลครีต ความเร็วในการกรัดผิวแข็ง อัตราป้อน แรงดันของการกรัดผิวแข็ง เป็นต้น [4] เป้าหมายหลักของกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลจึง มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน ลดความหยาบผิว และเพิ่มความเค้นตกค้างในงานนี้ วิธีการตอบสนองพื้นผิวถูกใช้เพื่อเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ขั้นตอนการกรัดจะใช้กับเครื่องจักรกลแบบเดียวกับที่พื้นผิวถูกกัด โดยการใช้บอลเซรามิกกรัดผิวชิ้นงาน ทำงานร่วมกับ เครื่องจักรอัตโนมัติ (Computer Numerical Control, CNC) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่เที่ยงตรงสูง ความแม่นยำ รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ สามารถผลิตชิ้นงานซ้ำ ๆ ได้ตลอดโดยมีคุณภาพและมาตรฐานเดียวกัน กระบวนการแปรรูปชิ้นงานใช้เครื่องกัด CNC เป็นตัวควบคุมความเร็ว อัตราป้อน และระยะป้อนลึก ในกรณีนี้บอลจะกลิ้งบนผิวชิ้นงานเพื่อกัดผิวแข็งโดยดำเนินการบนเครื่องกัดอัตโนมัติ (Machining center)

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปทางกายภาพ เพื่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งผิว (Surface Hardness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และความหยาบผิว (Surface Roughness) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงานจากกระบวนการกรัดผิวแข็ง ผลจากการศึกษา จะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานสำหรับงานที่ต้องการทั้งความแข็งและความเรียบของพื้นผิว ความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการกรัดผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ด้วยบอลเซรามิก (Ceramic Ball)

1.2.2 เพื่อศึกษาหาค่าของความแข็งผิว (Surface Hardness) ความหยาบผิว (Surface Roughness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และโครงสร้างจุลภาคของผลึก (Microstructure)

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

กระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยปัจจัยของ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกดบอล และความลึกของการกรัดผิวแข็งชิ้นงาน ส่งผลต่อความแข็งผิว ความเค้นตกค้าง ความหยาบผิว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11

1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.4.1 ตัวแปรต้น ประกอบด้วย

- แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) 200, 400 และ 600 บาร์
- ความลึกของการกรัดผิวแข็งชั้นงาน (Depth of Burnishing) 0.3, 0.5 และ 0.7

มิลลิเมตร

1.4.2 ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ความแข็งผิว (Surface Hardness)
- ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)
- ความหยาบผิว (Surface Roughness)
- การวัดโครงสร้างจุลภาคของผลึก (Microstructure)
- ชั้นความแข็ง (Hardness level)

1.4.3 ตัวแปรควบคุม

- อัตราการป้อน (Feed Rate)
- ความเร็วในการกรัดผิวแข็ง
- จำนวนครั้งในการกรัดผิวแข็งผ่านของบอลเซรามิก

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ที่มุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งผิว ในกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (Machining center) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ที่มีค่าความแข็งที่ไม่ผ่านการชุบ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.5.1 ทดลองใช้กับเครื่องกัดอัตโนมัติสามารถปรับความเร็วรอบสูงสุด 8,000 รอบ/นาที

1.5.2 ชั้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ที่มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 270-288 HV ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 75 มิลลิเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร พื้นที่ของแนวกรัด 25 ตารางมิลลิเมตร

1.5.3 บอลเซรามิกกรัดผิวแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

1.5.4 อัตราการป้อน (Feed Rate) 0.1 มิลลิเมตร/รอบ

1.5.5 ความเร็วในการกรัดผิวแข็ง 2,000 มิลลิเมตร/นาที

1.5.6 การวัดความแข็งด้วยเครื่อง Vickers Micro Hardness Tester

- 1.5.7 การวัดความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่อง Mitutoyo Surface tester SJ-310
- 1.5.8 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่อง Portable X-ray Residual Stress Analyzer
- 1.5.9 การวัดโครงสร้างจุลภาคของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical Microscope
- 1.5.10 การวัดความแข็งลึกลับจากผิวด้วยเครื่อง Vickers Micro Hardness Tester

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.6.1 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 หมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีซิลิคอน แมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม และธาตุอื่น ๆ ผสม
- 1.6.2 กระบวนการกรดรีดผิวแข็ง หมายถึง กระบวนการเพิ่มความแข็งผิว เพิ่มความเค้นตกค้าง และ ลดความหยาบผิวโดยใช้บอลกรดรีดไปบนพื้นผิวชิ้นงาน (Burnishing)
- 1.6.3 บอลกรดรีด หมายถึง บอลเซรามิกประกอบด้วยธาตุซิลิคอนไนไตรด์ (Si, N.) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร
- 1.6.4 แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก หมายถึง แรงดันที่ปั๊มดันน้ำมันไฮดรอลิกผ่านอุปกรณ์กรดรีดผิวแข็ง (Burnishing Pressure)
- 1.6.5 ความลึกของการกรดรีดผิวแข็ง หมายถึง ความลึกในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์กรดรีดผิวเข้าหาในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (Depth of Burnishing)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ทราบขั้นตอนการกรดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก ในงานกัดอัตโนมัติ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11
- 1.7.2 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งผิว ความเรียบผิว และความเค้นตกค้างโดยการใช้อัลเซรามิกในการกรดรีดผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11
- 1.7.3 นำข้อมูลจากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต

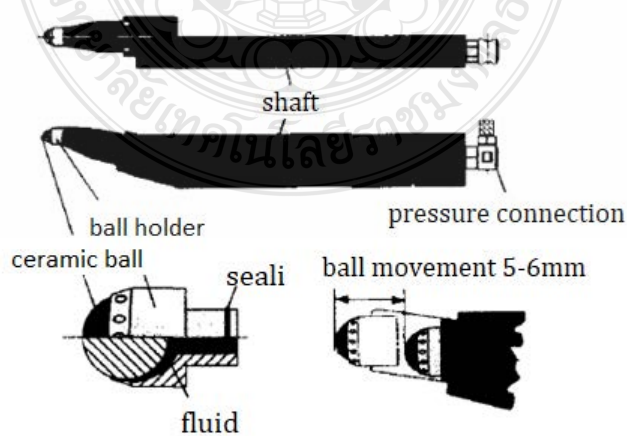
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกรัดรีดผิวแข็ง (Burnishing)

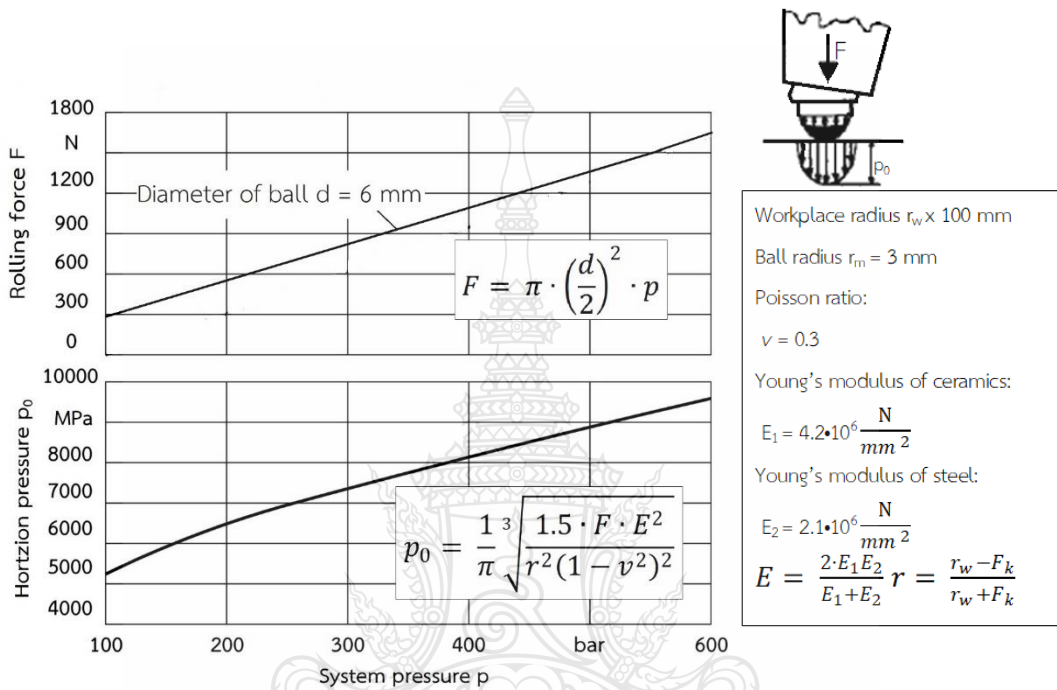
การกรัดรีดผิวแข็งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับปรับปรุงพื้นผิวและสามารถใช้งานได้กับเครื่องกัดประสิทธิภาพสูง ยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้มากกว่ากระบวนการทั่วไป เช่น การขัดแบบพิเศษ (Super Finishing) การขัดพวกคลื่นไอต์โอเสี่ย (Honing) และการเจียรระโน นอกจากนี้ผิวขัดมันยังทนต่อการสึกหลอสูงและมีอายุความล้า (Fatigue Life) ที่ดีขึ้น การศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกรัดรีดผิวแข็งด้วยบอล Deepak et al. [4] พิจารณาชนิดของวัสดุ พารามิเตอร์กระบวนการ และน้ำมันหล่อลื่น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้และอายุการใช้งานที่ยาวนานของเครื่องจักร ส่วนประกอบของชิ้นส่วนต้องได้รับการผลิตไม่เพียงแต่มีความถูกต้องด้านมิติ และทางเรขาคณิตแต่ยังมีผิวที่มีความละเอียดสูง การตกแต่งพื้นผิวมีบทบาทสำคัญในการมีอิทธิพลต่อลักษณะการทำงานเช่น ความต้านทานการสึกหรอ ความแข็งแรงต่อการล้าตัว ด้านทานแรงล้า ด้านทานต่อการกัดกร่อนและการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งวิธีการกลึง การกัดหรือ การเจียรระโนที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถเป็นไปตามข้อกำหนด

การทำงานของเครื่องมือขัดผิวแบบแข็งขึ้นอยู่กับหลักการ hydrostatic เซรามิกลูกกลิ้ง ลูกกลิ้งแข็งจะถูกกดลงพื้นผิวของชิ้นงานโดยแรงดันปานกลาง (อิมัลชันกับส่วนประกอบน้ำมัน 3-5%) ลูกบอลลอยอยู่บนแรงดันและสามารถหมุนได้ทุกทิศทางเกือบไม่มีแรงเสียดทาน โดยเครื่องมือใช้สำหรับขัดผิวแบบแข็ง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องมือขัดผิวแบบแข็ง [14]

บอลวัสดุแข็งที่จัดขึ้นในลักษณะนี้ถูกกดบนพื้นผิวการทำงานด้วยแรงดันสูงถึง 500 บาร์ เทียบเท่ากับกำลังกลิ้งของ 1400 N เนื่องจากมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก ๆ ของลูกเซรามิก, ความเครียดสูง Hertzian จะกระทำแม้จะมีแรงเหล่านี้ค่อนข้างเล็ก (รูปที่ 2.2) เกินจุดให้ผลผลิตและทำให้ความขรุขระสูงสุด ราบเรียบ



รูปที่ 2.2 Rolling force [14]

ในบันทึกข้อมูล profilometer ความขรุขระของยอดปรากฏชั้นสูงนำไปตั้งแต่แรกเห็น สงสัยว่า ผลการปรับให้ราบเรียบอาจเกิดจากการแตกออกของยอดสูง ปรากฏการณ์นี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความแตกต่างของการขยายในแกนแนวตั้งและแนวนอน, ซึ่งบิดเบือนความสูงของโปรไฟล์ยอดที่สัมพันธ์กับความกว้างของสูง

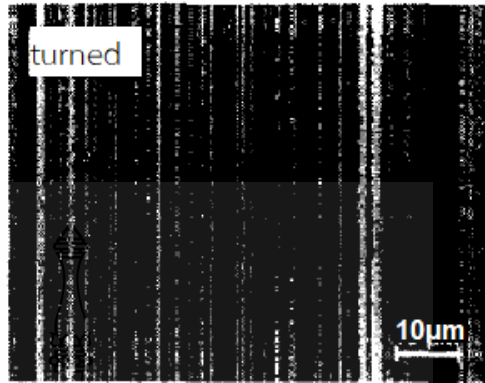
ผลของการทำให้เรียบบนยอดความขรุขระจะเห็นได้ชัดเมื่อสแกน SEM ของชิ้นงาน พื้นผิวก่อนและหลังการขึ้นรูปลูกกลิ้งอย่างหนักจะถูกเปรียบเทียบ รูปถ่าย (รูปที่ 2.3) ยังแสดงอยู่โครงสร้างที่เหลือโดยการเปลี่ยนด้วยขอบที่สวมใส่บนพื้นชิ้นงาน หมายเลขและมิติของยอดรายละเอียดมี แต่จะลดลงอย่างเห็นได้จากการแสดงผลแสงของ พื้นผิวเรียบได้รับการยืนยันโดยการเปรียบเทียบความสูงเฉลี่ยสูงสุดในส่วนที่สูง ไม่เกิดความเสียหายกับพื้นผิวเนื่องจากความหยابกร้านแตกหัก peaks หรือ cracks พบในการศึกษา

Workpiece material 100 Cr 6 (62 HRC)

Cutting parameters:

V_c : 140 m/min
 t : 0.08 mm
 a_p : 0.2 mm
 V_B : 120 μ m
WSP: CNGA 120412

R_z : 2.12 μ m



rolling parameters:

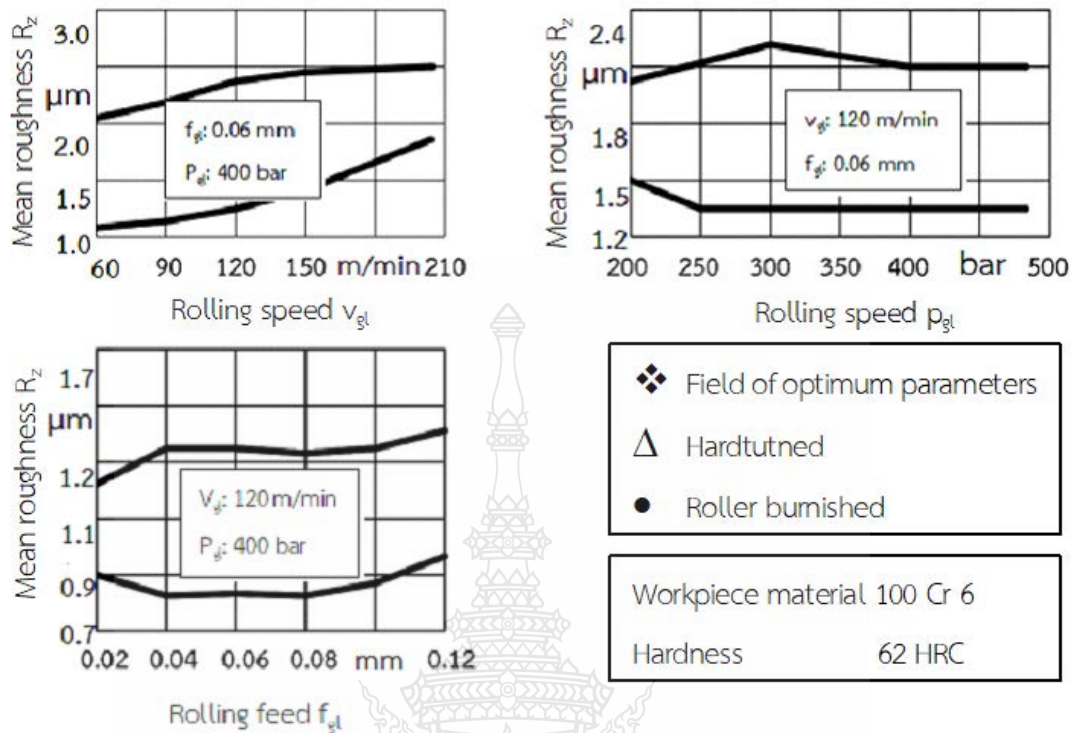
V_{gl} : 140 m/min
 f_{gl} : 0.06 mm
 p : 400 bar

R_z : 1.31 μ m



รูปที่ 2.3 SEM photography of hard roller burnished surface [14]

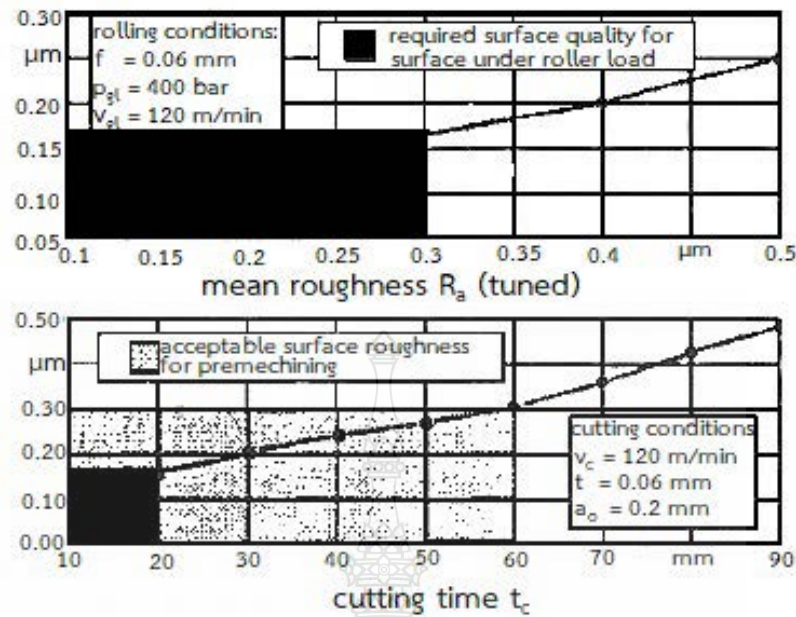
ขั้นตอนแรกของการศึกษาตรวจสอบผลของพารามิเตอร์การขัดผิวของลูกกลิ้งแข็งเกี่ยวกับคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานตัวแปรกระบวนการสำหรับการตีลูกกลิ้งแข็งเป็นความดันกลิ้ง P_{gl} , v_{gl} กลิ้ง ความเร็วและกลิ้งฟีด f_{gl} เห็นได้ชัดจากผลลัพธ์ของรูปแบบพารามิเตอร์ที่เป็นระบบที่แสดงไว้รูปที่ 2.4 ว่า ช่วงขนาดใหญ่อนุญาตให้มีค่าสูงสุดลดความหยาบเดิมสำหรับทั้งสามพารามิเตอร์



รูปที่ 2.4 Influence of machining parameters [14]

เมื่อตั้งค่าความเร็วในการป้อนลูกกลิ้งเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้มั่นใจว่าแตกต่างจากพีดแบบหมุน อัตราที่ใช้ในการดำเนินการก่อนหน้านี้ถ้าเหมือนกัน อัตราการป้อนจะใช้สำหรับการหมุนแข็งและลูกกลิ้งแข็งการขัดผิว, การปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมเสร็จสิ้นจะไม่ประสบความสำเร็จเพราะกลิ้งการเคลื่อนไหวยจะนานกับร่องพีดในพื้นผิวและไม่ทำให้แบนอาหารสันเขา

ค่าเฉลี่ยของเส้นศูนย์ต่ำกว่า $R_a = 0.17 \sim \text{tm}$ คือจำเป็นสำหรับพื้นผิวดิบบนแบร์ริงลูกกลิ้งขึ้นส่วนที่มีความเค้นสูงมาก คุณภาพผิวสามารถสร้างได้โดยไม่ต้องดำเนินการ finishing เพิ่มเติมเฉพาะเมื่อตัดขอบสวมน้อยมากและเฉพาะที่ต่ำค่าพีดด้วยกระบวนการที่ยาวพอสมควรต่อครั้ง การดำเนินการเสร็จสิ้นเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ การที่พื้นผิวมีความเรียบสูงทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นบนพื้นฐานทางเศรษฐกิจ



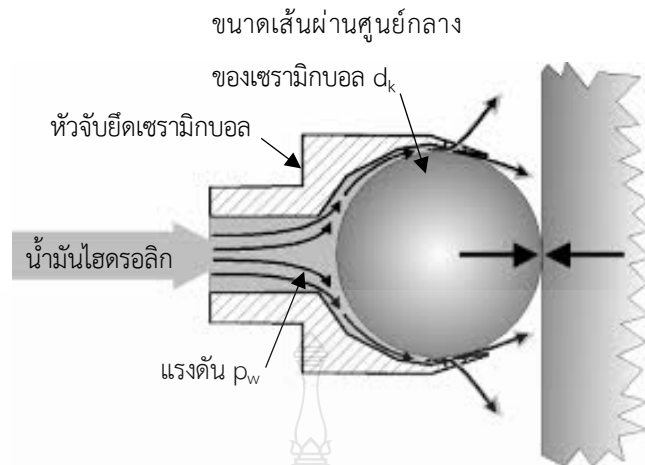
รูปที่ 2.5 Surface quality at roller burnishing [14]

รูปที่ 2.5 แสดงคุณภาพพื้นผิวที่สามารถประสบความสำเร็จหลังจากการรีดลูกกลิ้งสำหรับต่าง ๆ ความหยาบดั้งเดิม เห็นได้ชัดว่าความขรุขระที่อนุญาตหลังจากลูกกลิ้งแข็งการปั่นเงาสามารถรับได้ถึงต้นฉบับความขรุขระของ $R \sim 0.3 \text{ pm}$ จำเป็นความขรุขระของต้นฉบับจึงอยู่ในช่วงที่สามารถรู้ได้จากกระบวนการเปลี่ยนยากที่ค่าตัดที่มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเครื่องมือ

2.1.1. การกรัดผิวแข็งด้วยบอล (Ball Burnishing)

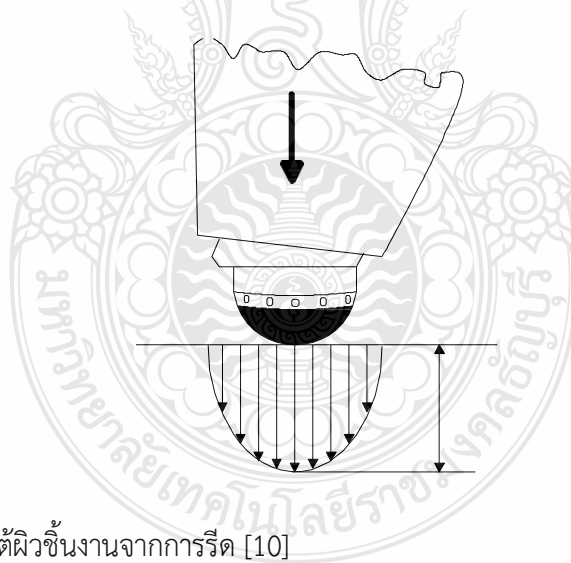
ลูกบอลที่ใช้ทำจากวัสดุเซรามิก ซึ่งมีความแข็งแรงสูง ลูกบอลถูกรีดบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความดันสูงบนผิวชิ้นงาน สำหรับอิทธิพลที่เกิดขึ้นโดยตรงต่อกระบวนการรีดผิวละเอียด คือ ความดันการรีด P_w และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกบอล K_d การคำนวณหาแรงที่ใช้การรีดนั้น ได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการลดปัญหาหลังจากภายใต้สภาวะ Hydrodynamic เดิมเป็นภายใต้สภาวะปัญหา Hydrostatic วิธีการนี้อนุญาตให้ใช้ได้เมื่อสัดส่วนของ Hydrostatic มีขนาดใหญ่กว่า Hydrodynamic อย่างชัดเจน [8] โดยระบบแรงดัน กระจายตัวตั้งฉากไปตามผิวของเซรามิกบอล และ ทุก ๆ จุดมีปริมาณแรงดันเท่า ๆ กัน โดยมีแรงดันที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานเท่านั้นที่ทำหน้าที่กรัดผิวชิ้นงาน ส่วนแรงดันบางส่วนจะไหลออกทางขอบข้างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.6 แรงจากการรีด สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$P_w = p_w \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_k}{4}\right)^2 \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.6 แรงกระทำของกระบวนการรีดผิวละเอียด [20]

ภายใต้การรีดนั้น สามารถเขียนรูปการกระจายของ แรงดันภายใต้ผิวชิ้นงานได้ดังรูปที่ 2.6 แรงดันที่เกิดขึ้นจากแรงรีดนั้น เกิดการกระจายแรงตามรูปทรงภูเขาคว่ำ โดยแรงดันสูงสุดเกิดขึ้นตรงจุดสัมผัสระหว่างผิวเซรามิกบอลกับผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 แรงดันภายใต้ผิวชิ้นงานจากการรีด [10]

แรงดัน P_0 ภายใต้แรงรีดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3E_W E}{2r^2(1-r^2)^2}} \quad (2.2)$$

เมื่อ $r = \frac{r_W \cdot r_B}{r_W + r_B} \quad (2.3)$

$$E = \frac{2E_W \cdot E_B}{E_W + E_B} \quad (2.4)$$

คำอธิบาย

r_W คือ รัศมีผิวชิ้นงาน

r_B คือ รัศมีลูกบอล

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

E_W คือ Young's Modulus ของ ชิ้นงาน

E_B คือ Young's Modulus ของ ลูกบอล

2.1.2. วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่ เหมาะสม สำหรับวิเคราะห์กระบวนการรีดผิวละเอียด เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลภายใต้ผิวชิ้นงาน ระหว่าง กระบวนการรีด และหลังกระบวนการรีด [11-12] โปรแกรมสำหรับใช้ วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงาน นี้ได้แก่ DEFORMTH ซึ่ง เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานขึ้นรูปโลหะ

ทำการวิเคราะห์กระบวนการรีดผิวละเอียดแบบ 3D (Three dimension) ซึ่งประกอบด้วย ชิ้นงาน และเซรามิกบอล เริ่มต้นโดยการสร้างโมเดล 3D ด้วยโปรแกรม Pro/ENGINEER จากนั้นแปลง (Export) ไฟล์โมเดลจาก Pro/ENGINEER มาเป็น ไฟล์ IGES (Initial Graphics Exchange Specification) แล้วนำไปประมวลผลในโปรแกรม DEFORMTH การวิเคราะห์เป็นแบบ Linear-elastic analysis ดังรูปที่ 2.8 คุณสมบัติของวัสดุ แสดงตารางที่ 2.1

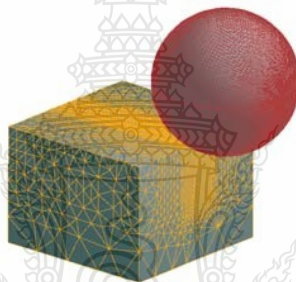
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [20]

	วัสดุ	E-Modul [GPa]	ν
ชิ้นงาน	TiAl4V	120	0.24
เซรามิกบอล	Ceramic	420	0.3

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการรีดผิวละเอียด กระทำโดยการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ผลการจำลองออกมาถูกต้องตามการทดลอง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขต่าง ๆ ใช้สำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการรีดผิวละเอียด [20]

	ขอบเขต เงื่อนไข	เอลิ เมนต์	Node	ความเร็ว [mm/s]	ความดัน [Bar]
ชิ้นงาน	Fixed	61,487	45,964	0.8	-
เซรามิกบอล	No	20,363	25,049	-	150



รูปที่ 2.8 การจำลองโมเดลการรีดผิวละเอียด [20]

2.2 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SKD11

เหล็กกล้าคาร์บอนปานสูง SKD11 มีความแข็งในช่วง 58-62 HRC ขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนที่ผสม เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับแรงต่าง ๆ ได้ดี ทนแรงดึงสูง ความสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน การเสียดสี และสามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย ความสามารถในการกลึงใสอยู่ในระดับปานกลาง เหมาะสำหรับเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กกล้าตาย มักจะใช้สำหรับแม่พิมพ์ปั๊ม แม่พิมพ์พลาสติก[3] ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดคulling ใบเลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียว (Tap) ใบมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กกัด สปริงแทนบ ลูกบอล แบริ่งลูกปืน รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการความแข็งแรง เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (SKD11/AISID2) มีส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเด่น (Significant Characteristics) ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง เกรด SKD11 ที่นิยม ใช้เนื่องจากมีราคาไม่ค่อสูงมากนัก มีความแข็งแรงสูงมา ด้านทานต่อการสึกหรอมีความต้านทาน แรงดึงที่ 128 kgf/ mm² เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 สามารถผ่านกระบวนการอบชุบโลหะด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ โดย

กระบวนการชุบแข็ง (Quenched and Tempered) กระบวนการอบอ่อนและ การดึง (Annealed and Cold-drawn) หรือกระบวนการอบปกติ (Normalized)

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของ SKD11 (mass%) [3]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S
1.55	0.1	0.15	11.50	0.7	0.3	0.2	<0.03	<0.03

2.2.1 สมบัติของธาตุที่ผสมในเหล็กกล้า SKD11 มีดังนี้

1. คาร์บอน (Carbon, C) เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับ เหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก แต่คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถ ในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

2. ซิลิคอน (Silicon, S) ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสิ้นแร่เหล็กมักมี ซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้น

3. แมงกานีส (Manganese, Mn) ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อ เหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนั้น แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

4. โครเมียม (Chromium, Cr) ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลง อย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลด ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็น รอยคม

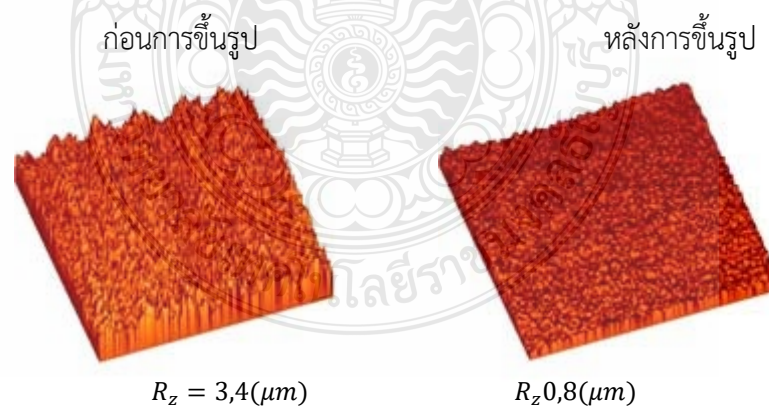
หรือความคมไม่ลงง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่ อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

5. โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ปกติจะใช้ผสมรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

6. นิกเกิล (Nickel, Ni) เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้นจึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

2.3 พื้นผิวชิ้นงาน (Surface Texture)

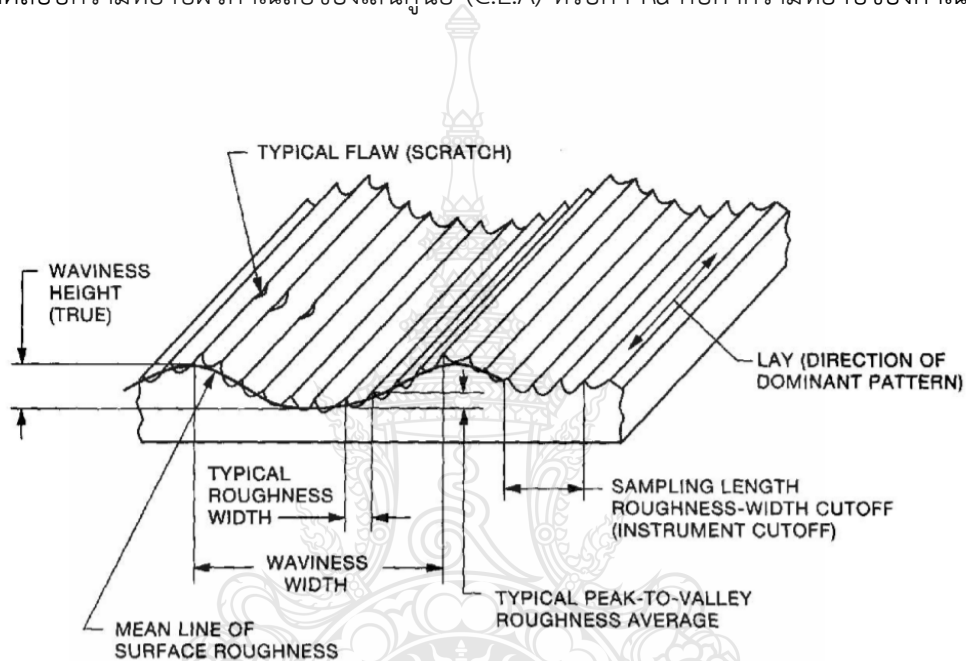
ผิวชิ้นงานหลังจากผ่านการรีดผิวละเอียดพบว่าคุณภาพผิวของชิ้นงานมีความหยาบผิวดี โดยเพิ่มขึ้นจากเดิม $3.4 \mu\text{m}$ เป็น $0.8 \mu\text{m}$ โดยความหยาบผิวเพิ่มขึ้นเป็น $2.6 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 2.9 จากการวิเคราะห์ด้วย AFM



รูปที่ 2.9 ความหยาบผิวชิ้นงาน ก่อนและหลังการรีดผิวละเอียด [20]

2.3.1 ความหยาบผิวและความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness and Surface Finish)

ความหยาบเป็นผลมาจากความแตกต่างทางด้านจลน์ของกระบวนการตัด ดังรูปที่ 2.10 ความหยาบของพื้นผิว มีความสำคัญต่อการใช้งานหลาย ๆ อย่าง เช่น แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวการสึกหรือจากการเสียดสีความสวยงาม (Looks) ความรู้สึกในการสัมผัส (Feels) ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม (Sealing Property) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของความหยาบของพื้นผิว R_a , R_z และ R_{max} วัดโดยใช้เครื่องทดสอบความหยาบผิวค่าเฉลี่ยของเส้นศูนย์ (C.L.A) หรือค่า R_a คือค่าความหยาบของค่าเฉลี่ย เลขคณิต



รูปที่ 2.10 ลักษณะของพื้นผิว [15]

ข้อดีของการตกแต่งพื้นผิวคือ

1. พื้นผิวตกแต่งที่ดีเยี่ยมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานที่สัมผัสได้
2. ลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงาน 2 ชิ้น
3. พื้นผิวตกแต่งที่ดีจะส่งผลให้มีความสวยงามมากขึ้นและความสามารถในการรับน้ำหนัก

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดอายุการกัดกร่อนและอายุความล้าของส่วนประกอบ

วิธีการวัดพื้นผิวชิ้นงานโดยทั่วไป คือการวัดความหยาบผิวที่สามารถถูกจำกัดค่าความ เบี่ยงเบนเฉลี่ยแทนตั้งวัดจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด โดยวิธีการเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าความหยาบเฉลี่ยคือ

$$Ra = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (2.5)$$

เมื่อ Ra = ค่าความหยาบเฉลี่ย

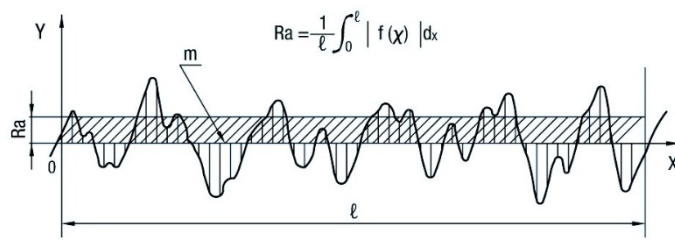
y = ค่าเบี่ยงเบนแทนตั้งจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด

L_m = ระยะทางที่เบี่ยงเบนไป

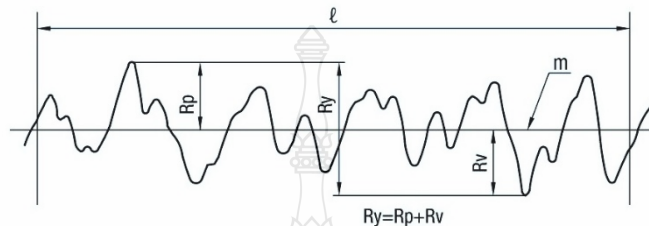
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวงาน

ค่าความหยาบของพื้นผิวมีผลโดยตรงต่อความเงามันของผิวชิ้นงาน การประมาณค่าความหยาบ มีการค่ากำหนดเป็นตัวเลขและมีวิธี Ten Spot Average Surface Roughness การคำนวณที่ชัดเจนค่าความหยาบที่ใช้กันแพร่หลายเป็น ได้แก่ความหยาบเฉลี่ย (Average Surface Roughness : Ra) ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Maximum height : R_{max}) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten Spot Average Surface Roughness : Rz) ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยแต่ละค่ามีวิธีการวัดดังนี้

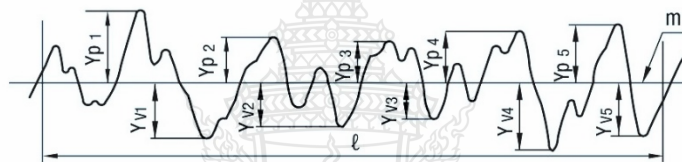
- ความหยาบเฉลี่ย (Average Surface Roughness: Ra) คือ ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ของพื้นที่ยอดแหลมบนเส้นอ้างอิง ค่าแกน x คือค่าเฉลี่ย ค่าแกน y คือ ค่าความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 2.11 (a)
- ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Maximum Height: R_y) คือ ค่าวัดจากจุดสูงสุดไปยังถึงจุดต่ำสุด ของผิวงานเทียบกับเส้นอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2.11 (b)
- ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten Spot Average Surface Roughness: Rz) คือ ค่าหา ได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วงคำนวณค่าความสูงของยอดกราฟบน 5 จุด และล่าง 5 จุด นำค่ามารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 2.11



(a) Arithmetical average roughness (Ra)



(b) Maximum height (Ry)



$$Rz = \frac{|Yp1, Yp2, Yp3, Yp4, Yp5| + |Yv1 + Yv2 + Yv3 + Yv4 + Yv5|}{5}$$

Yp1, Yp2, Yp3, Yp4, Yp5 : Heights of the of top five peaks within the sampled portion of reference length l

Yv1, Yv2, Yv3, Yv4, Yv5 : Heights of the five lowest valleys within the sampled portion of reference length l

(c) Ten-spot average roughness (Rz)

รูปที่ 2.11 ค่าความหยาบผิว [16]

พารามิเตอร์แสดงความหยาบของพื้นผิวและลักษณะอื่นที่ต้องการ การกำหนดลักษณะของพื้นผิวสามารถกำหนดจาก

1. ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต Ra (Roughness Value, μm)
2. การค่าความยาว Cut-off Length L (mm) สำหรับการวัดค่าความหยาบ
3. วิธีการผลิต (Production Process)
4. แนวการกัดชิ้นงาน (Lay)

5. เป็นค่าเผื่อแนะนำสำหรับการสั่งซื้อหรือเตรียมชิ้นงานเพื่อให้มีเนื้องานพอในการทำ
กระบวนการต่าง ๆ (Machining Allowance, mm)

2.4 ความหยาบจากการผลิตแบบต่างๆ

ค่าความหยาบที่สามารถผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตสำหรับการออกแบบและการ
เลือกค่าความหยาบเราจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการผลิตที่มีอยู่ด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆและ
ช่วงค่าความหยาบที่จะสามารถทำได้นั้นแสดงดังในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13



Ra (micron)	Applications	
$\sqrt{0.025}$ or $\sqrt{0.025}$ and $\sqrt{0.5}$ or $\sqrt{0.5}$	Very fine quality surface finishes, costly to produce	This very smoothly finished surface is produced by fine honing, lapping, buffing or super finishing machines. It is costly to produce and seldom required. It has a highly polished appearance, depending on the production process, is normally used on precision instruments such as gauges, laboratory equipment and finely made tools.
$\sqrt{0.1}$ or $\sqrt{0.1}$		This is similar to the finer grades to finish and has much the same application. Very refined surfaces have this high degree of finish. It is produced by honing lapping and buffing methods and is costly to produce
$\sqrt{0.2}$ or $\sqrt{0.2}$		This fine surface is produced by honing lapping and buffing methods. This texture could be specified on precision gauge and instrument work, and on high speed shafts and bearings where lubrication is not dependable.
$\sqrt{0.4}$ or $\sqrt{0.4}$		This fine quality surface can be produced by precision cylindrical grinding, coarse honing, buffing and lapping methods. It is used on high speed shafts, heavily loaded bearing and other application where smoothness is desirable for the proper functioning of a part.
$\sqrt{0.8}$ or $\sqrt{0.8}$		Medium quality finishes, used where reasonable surfaces are required	This first class machine finish can be easily produced on cylindrical, surface and centerless grinders but requires great care on lathes and milling machines. It is satisfactory for bearing and shafts carrying light loads and running at medium to slow speeds. It may used on parts where stress concentration is present. It is the finest finish that it is economical to produce, below these costs rise rapidly.
$\sqrt{1.6}$ or $\sqrt{1.6}$	This good machine finish can be maintained on production lathes and milling machines using sharp tools, fine feeds and high cutting speeds. It used when close fits are required but is unsuitable for fast rotation members. It may be used as a bearing surface when motion is slow and loads are light. This surface can be achieved on extrusions, rolled surfaces, die castings and permanent mold castings in controlled production.	
$\sqrt{2.2}$ or $\sqrt{2.2}$	This medium commercial finish is easily produced on lathes, milling machines and shapers. A finish commonly used in general engineering machining operations, it is economical to produce and of reasonable appearance. It is the roughest finish recommended for parts subjected to slow speeds, light loads, vibration and high stress, but it should not be used for fast rotating shafts. This finish may also be found on die castings, extrusions, permanent mold castings and rolled surfaces.	
$\sqrt{6.3}$ or $\sqrt{6.3}$	Rough finishes, used where quality surfaces are unimportant		This coarse production finish is obtained by taking coarse feeds on lathes, millers, shapers, boring and drilling machines. It is acceptable when tool marks have on bearing on performance or quality. This texture can also be found on the surfaces of metal molded castings, forgings, extruded and rolled surfaces, and can produced by rough hand filing or disc grinding.
$\sqrt{12.5}$ or $\sqrt{12.5}$		This surface is produced from heavy cuts coarse feeds by milling, turning, shaping, boring, disc grinding and snagging. It can also be obtained by sand casting, saw cutting, chipping, rough forging and oxy cutting. This finish is rarely specified and is used only where it is not seen or its appearance is unimportant, e.g. on machinery, jigs and fixtures.
$\sqrt{25}$		This very rough finish is produced by sand casting, torch and saw cutting, chipping and rough forgings. Machining operations are not required as this finish is suitable as found, e.g. on large machinery.

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานค่าความหยาบ [30]

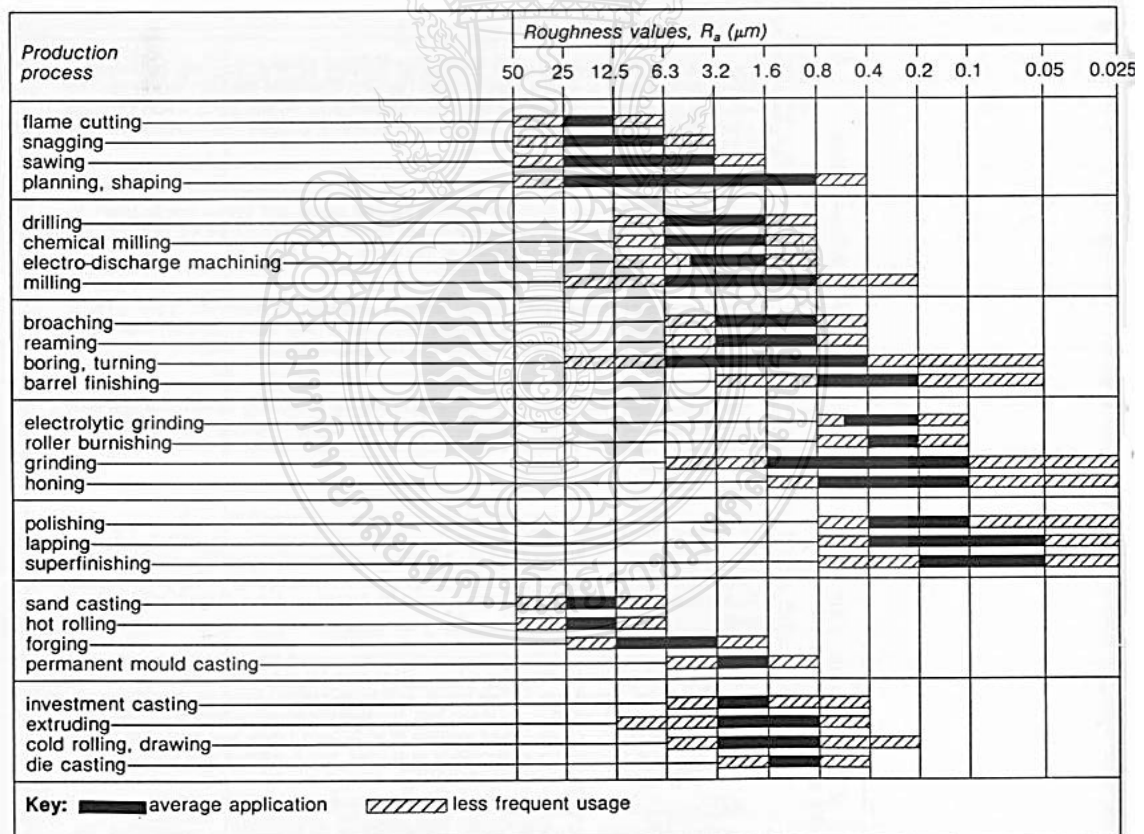
Reference Relation between Arithmetic Average Roughness(Ra)and Conventional Parameters

Arithmetic Average Roughness Ra			Maximum Height Ry	Ten-spot Average Roughness Rz	Reference Length of Ry(Rz) ℓ(mm)	Conventional Finish Symbol
Standard Series	Cut-off Value c(mm)	Graphical Representation of Surface Texture	Standard Series			
0.012 a 0.025 a 0.05 a 0.1 a 0.2 a	0.08 0.25	0.012 / ~ 0.2 /	0.05 s 0.1 s 0.2 s 0.4 s 0.8 s	0.05 z 0.1 z 0.2 z 0.4 z 0.8 z	0.08 0.25	▽▽▽
0.4 a 0.8 a 1.6 a	0.8		1.6 s 3.2 s 6.3 s	1.6 z 3.2 z 6.3 z	0.8	
3.2 a 6.3 a	2.5	3.2 / ~ 6.3 /	12.5 s 25 s	12.5 z 25 z	2.5	▽
12.5 a 25 a	8	12.5 / ~ 25 /	50 s 100 s	50 z 100 z	8	▽
50 a 100 a			-	200 s 400 s			200 z 400 z	-	~

*Interrelations among the three types shown here are not precise, and are presented for convenience only.

*Ra: The evaluation values of Ry and Rz are the cut-off value and the reference length each multiplied by five, respectively.

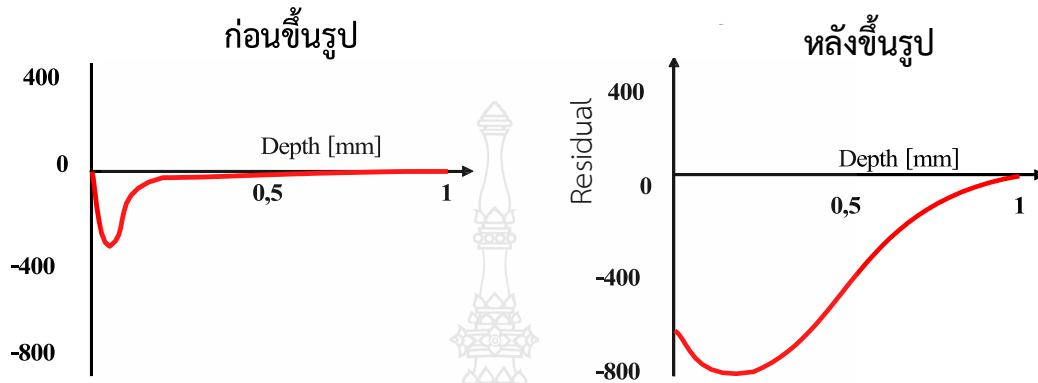
รูปที่ 2.13 Reference Relation between Arithmetic Average Roughness(Ra) and Conventional Parameters [31]



รูปที่ 2.14 ค่าความหยาบของกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ [31]

2.5 ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน (Residual stress under workpiece surface)

ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงานหลังจากการรีดผิวละเอียด มีค่า 800 MPa เป็นลักษณะความเค้นตกค้างอัด (Compressive residual stress) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 450 MPa ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 ความเค้นตกค้างภายใต้ผิวชิ้นงาน [20]

2.4.1 วิธีการวัดความเค้นตกค้าง

เทคนิคในการตรวจวัดค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงาน หรือโครงสร้างจะไม่สามารถตรวจวัด ค่าโดยตรงได้ จึงต้องหาค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีการทางอ้อม โดยอาศัยหลักการ ทฤษฎี อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องสำหรับวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความเค้นตกค้าง มีเทคนิคการวัดให้เลือกใช้ตาม ความเหมาะสม เทคนิคการวัดสามารถแบ่งออกเป็น การวัดทางกล (Mechanical) การวัดการกระจาย (Diffraction) การวัดสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า (Magnetic and Electrical Field)[17]

การหาค่าความเค้นตกค้างมีหลายวิธี

1. วิธีวิเคราะห์โลหะแบบทำลายชิ้นงานตัวอย่างได้แก่

- The Hole Drilling Method คือความเค้นตกค้างบริเวณขอบรูเจาะเกิดการคลายตัว เมื่อ เจาะหลุมเข้าไปในวัสดุความเค้นตกค้างตรวจสอบโดยเกจ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ผิวกับการคลายความเค้น (Stress Relaxation) หลักที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน วิธีการเจาะหลุมเหมาะกับการวัดความเค้นตกค้างคงข้างสม่ำเสมอ และไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าความเค้นตกค้างอยู่ตื้นๆ

- Curvature การวัดความโค้งงอ มักใช้เพื่อกำหนดความเค้นภายในชั้นเคลือบและชั้น เคลือบ การเพิ่ม/ลดชั้นผิวทำให้เกิดความเค้นซึ่งทำให้พื้นผิวโค้งขึ้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วง โค้ง

สะสมสามารถคำนวณรูปแบบที่สอดคล้องกันในความเครียดเป็นฟังก์ชันของความหนา (Deposit Thickness) ความโค้งงอสามารถวัดได้โดยใช้วิธี Contact (เช่น ความหยาบผิว (Profilometer) สเตรน เกจ (Strain Gauge) หรือ ไม่มีการสัมผัสโดยตรง (เช่น Video, Laser Scanning, Grids, Double Crystal Diffraction Topology) สามารถวัดความโค้งงอประมาณ 0.1×10^{-1} mm

2. วิธีวิเคราะห์แบบไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่างได้แก่

- The X-ray Diffraction Method เป็นการอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) ที่ตกกระทบหน้าผลึกของวัสดุที่มุมต่าง ๆ กัน ผลที่ได้จะสามารถหาค่าประกอบของวัสดุตัวอย่าง ขนาดผลึก และโครงสร้างผลึก รวมถึงค่าความเค้น XRD ช่วยในการวัดความเค้นบนพื้นผิวหรือใกล้พื้นผิว เป็นเทคนิคที่ลดความผิดพลาด และความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก หรือผิวไม่เรียบ สำหรับวัสดุผสมอาจต้องระบุเฟสก่อนวิเคราะห์หาความเค้นตกค้าง

- The Ultrasonic Techniques เป็นเทคนิคที่อาศัยความแปรปรวนจากความเร็วคลื่น อัลตราโซนิค เพื่อแสดงค่าความเค้นที่ตกค้าง ไม่เหมาะกับชิ้นงานบางระดับไมครอน

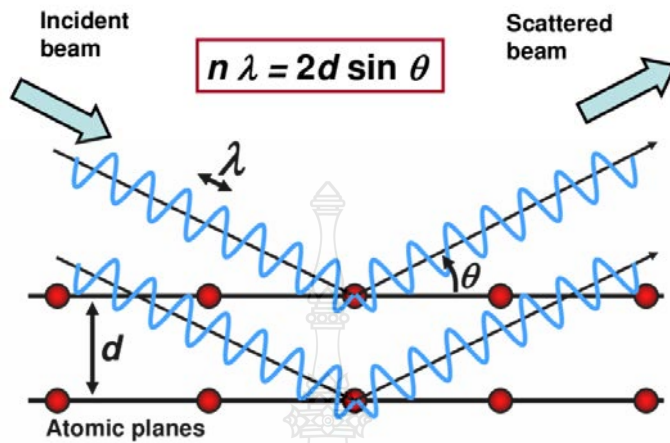
- The Magnetic Methods อาศัยการทำปฏิกิริยาแม่เหล็ก โดยการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องมือเฉพาะทาง สมบัติความเป็นแม่เหล็กสามารถอธิบายความแตกต่างของความเค้น ตกค้างโดยสังเกตสัญญาณจากโครงสร้างและสัญญาณโครงสร้างภายใต้ความเค้น วัสดุต้องมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

2.4.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD

การวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธี X-ray Diffraction ตามมาตรฐาน SAE J784a โดยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยอาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบ ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ และมีตัวรับรังสีเลี้ยวเบน เนื่องจากองศาในการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งสามารถบ่งชี้ ชนิดของสารประกอบที่มีในชิ้นงานและสามารถศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของ ชิ้นงาน โดยการหาค่าความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะใช้ X-ray Diffractometer ยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ โดยมี Detector เป็นตัวรับข้อมูล เพื่อหา มุมเลี้ยวเบน และความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนออกมาและ Recorder จะแสดงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่

เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบน แบบอัตรโนมิติ ดังรูปที่ 2.15 การเลี้ยวเบนสูงสุดจาก ผิวหน้าในตำแหน่งที่แตกต่างกันของชั้นงาน



รูปที่ 2.16 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ [18]

การหาปริมาณความเค้นตัก้างระดับมหภาคทำได้โดยการวัดความเครียดแบบสม่ำเสมอ (Uniform Strain) จากการเปลี่ยนตำแหน่งยอดของความเข้ม (Peak Position) หรือ ตำแหน่ง 2θ จากค่ามาตรฐาน ของฐานข้อมูล

สมการกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ซึ่งสามารถบอกความสัมพันธ์ของ ระยะระหว่าง ระนาบของโครงสร้างผลึก (Lattice Spacing, d) กับมุมที่เอกซเรย์เลี้ยวเบนจากระนาบใด ๆ นั้นของ โครงสร้างวัสดุแบบโครงสร้างพหุผลึก

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.6)$$

- เมื่อ
- d = ค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมในผลึก (d-spacing)
 - λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 - θ = มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงาน
 - n = ค่าคงที่เลขจำนวนเต็มใด ๆ ที่บอกลำดับการเลี้ยวเบนผ่านอะตอมในแต่ละระนาบของผลึก

การวัดระยะระหว่างระนาบที่เปลี่ยนแปลงไป ความเครียดระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นใน ระนาบผลึก แสดงดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta \Delta \theta \quad (2.7)$$

เมื่อ d_0 = ค่าระยะระหว่างระนาบอะตอมในผลึกในภาวะปราศจากความเค้น

λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

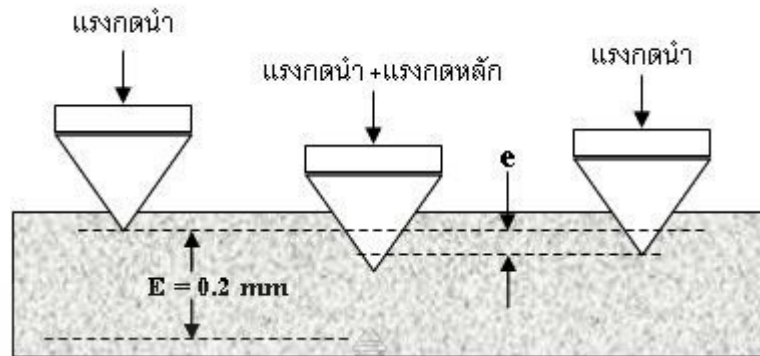
2.4.3 ความแข็งของผิวชิ้นงาน (Hardness result)

ค่าความแข็งของวัสดุถือได้ว่าเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่สามารถชี้ให้เห็นคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้นได้ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความเหนียว การทนต่อแรงเสียดสีและการสึกหรอ เป็นต้น ปัจจุบันการวัดค่าความแข็งสามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์วัดความแข็งล้วนแต่เป็นระบบอัตโนมัติ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับงานที่จะทดสอบ เพราะว่าวิธีทดสอบความแข็งนั้นมีหลายประเภท สำหรับวิธีการวัดความแข็งที่นิยมใช้ในงานโลหะนั้นมี 3 วิธี คือ

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hard Test)

หลักการ เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วย การทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ ร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) , ร็อกเวลล์บี (Rockwell – B) และร็อกเวลล์เอ (Rockwell – A) มิลลิเมตรมีค่า เท่ากับ 1 หน่วย)

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120° ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.17 หลักการความแข็งรอกเวลล์ [19]

ในการคิดเป็นค่าความแข็งนั้น ถ้าให้ E คือค่าคงที่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 mm และ e คือความลึกที่เกิดจากการเสียรูปร่างอย่างถาวรจากการกด ก็จะสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ ดังนี้

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์ซี} = 100 - \frac{e}{0.002} \text{HRC} \quad (2.8)$$

ฉะนั้นวัสดุที่ถูกกดเข้าไปลึกมากกว่า 0.2 mm หรือวัสดุอ่อน จะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีหรือเอแทน

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีมีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่ใช้หัวกดที่ทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว หรือ 1.59 มม. ใช้แรงกดหลัก 90 kgf เหมาะกับการทดสอบวัสดุอ่อน เพราะมีการยืดช่วงของ E เป็น 0.26 มม. และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 มม. ฉะนั้นค่าความแข็งจึงคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์บี} = 130 - \frac{e}{0.002} \text{HRB} \quad (2.9)$$

ในขณะที่การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอจะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี คือใช้หัวกดเพชรทรงกรวย และกำหนดระยะ E = 0.2 มม. แต่ใช้แรงกดหลัก 60 kgf เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนลง

ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็ง หรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ สามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขโดยตรง

ข้อดี เป็นการทดสอบค่าความแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทดสอบวัสดุได้ครอบคลุมเกือบทุกชนิด การทดสอบทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยเพราะสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ สามารถใช้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบบรินเนลล์ เพราะหัวกดมีขนาดเล็กกว่า

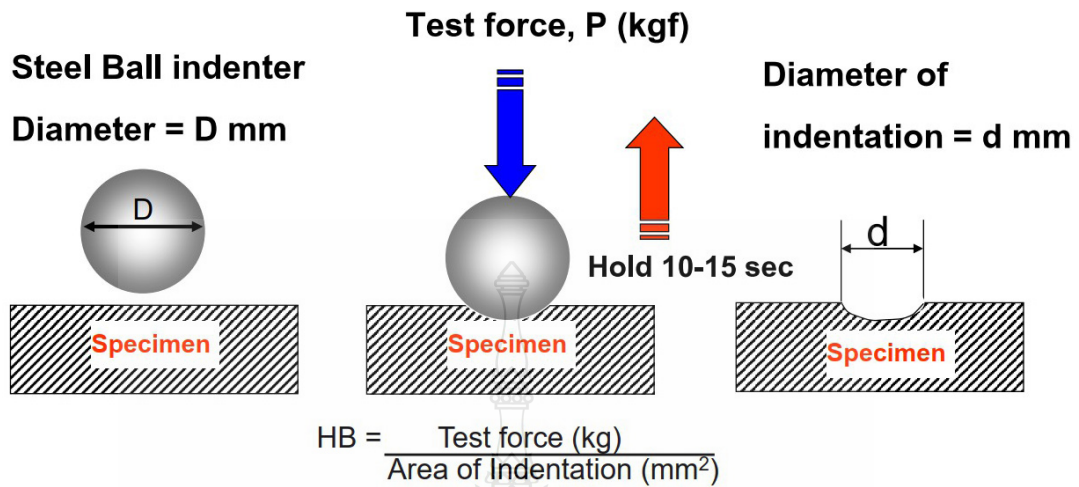
ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะผิวชิ้นงานทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมากเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กและไม่ลึกมาก (รอยกดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 0.2 – 1 มิลลิเมตร)

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด หรือมีมากพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปทรง
- ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดกับจุดศูนย์กลางรอยกดถัดไปหรือจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรมีระยะไม่น้อยกว่า 3 มม.
- การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี เหมาะกับการทดสอบวัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์ซีอยู่ในช่วง 20 – 67 HRC
- การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บี เหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์บีอยู่ในช่วง 35 – 100 HRB

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอก็มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่จะใช้แรงกดหลักต่ำกว่า คือ 60 kgf ด้วยน้ำหนักกดที่น้อยกว่านี้เอง ทำให้รอยกดของการทดสอบกับวัสดุเดียวกันตื้นกว่าเมื่อเทียบกับรอกเวลล์ซีและจึงสามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ในช่วงที่กว้างกว่า ตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงเซรามิกส์ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ข้อเสียในทางกลับกันก็คือความละเอียดในการแจกแจงระดับความแข็งจะหยาบกว่าเล็กน้อย เช่น ความแข็งในระดับ 28 และ 30 รอกเวลล์ซี อาจวัดแล้วได้ค่าไม่ต่างกันถ้าวัดด้วยรอกเวลล์เอ อย่างไรก็ตามรอกเวลล์เอสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานบางที่ความหนาต่ำสุดน้อยกว่ากรณีรอกเวลล์ซี ทั้งนี้ขึ้นกับค่าความแข็งของวัสดุด้วย ถ้าความแข็งมารอยกดจะตื้นและความหนาต่ำสุดที่จะทดสอบได้ก็จะมีค่าน้อย

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)



รูปที่ 2.18 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ [19]

หลักการ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ดังรูปที่ 2.17 โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาทีสำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค่าแรงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีสำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และทองเหลือง เป็นต้น ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย d ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด นั่นคือ

$$\text{ค่าความแข็งบริเนลล์} = \frac{F}{A} = \frac{0.102F}{0.5\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]} \quad (2.10)$$

แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (d) และขนาดแรงกดที่ใช้เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง ดังแสดงในตาราง โดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์คือ BHN หรือ HB

ข้อดี การวัดค่าความแข็งแรงแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึก เพราะหัวกดมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทางจุลภาคจึงมีผลน้อยต่อค่าการทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบ

ข้อเสีย ค่าความแข็งแรงได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บางมาก ๆ ได้

ข้อจำกัด

- การทดสอบแบบบริเนลล์ไม่ควรใช้วัดความแข็งแรงเกิน 450 HB เพราะค่าความแข็งแรงที่สูงกว่านี้อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปของหัวกด ทำให้รอยกดใหญ่กว่าความเป็นจริงหรือความแข็งแรงที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง

- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดหรือระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดจากขอบของชิ้นงานควรมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (2d)

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมีค่ามากกว่าสิบเท่าของความลึกรอยกด (10t) หรืออาจพิจารณาจากแรงกดให้เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทางด้านหลังของชิ้นงาน

- ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (d) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.2D – 0.7D หรือประมาณ 2 – 7 มิลลิเมตรสำหรับลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพราะหากรอยกดเล็กเกินไปจะทำให้ขอบของรอยกดไม่คมชัด ส่งผลให้วัดความยาวได้ยากและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการอ่านค่าความยาวจะมาก ในทางกลับกัน หากรอยกดมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการกดตัวของเนื้อชิ้นงานด้านข้างมาก

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ [19]

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm)	ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ					
	500	1000	1500	2000	2500	3000
	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.
2.00	158	316	473	632	788	945
2.05	150	300	450	600	750	899
2.10	143	286	428	572	714	856
2.15	136	272	408	544	681	817
2.20	136	260	390	520	650	780
2.25	124	248	372	496	621	745
2.30	119	238	356	476	593	712
2.35	114	228	341	456	568	682
2.40	109	218	327	436	545	653
2.45	104	208	313	416	522	627
2.50	100	200	301	400	500	601
2.55	96.3	193	289	385	482	578
2.60	92.6	185	278	370	462	555
2.65	89.0	178	267	356	445	534
2.70	85.7	171	257	343	429	514
2.75	82.6	165	248	330	413	495
2.80	79.6	159	239	318	398	477
2.85	76.8	154	230	307	384	461
2.90	74.1	148	222	296	371	444
2.95	71.5	143	215	286	358	429
3.00	69.1	138	207	276	346	415
3.05	66.8	134	200	267	334	401
3.10	64.6	129	194	258	324	388
3.15	62.5	125	188	250	313	375
3.20	60.5	121	182	242	303	363

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ [19] (ต่อ)

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm)	ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ					
	500	1000	1500	2000	2500	3000
	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.
3.25	58.6	117	176	234	293	352
3.30	56.8	114	170	227	284	341
3.35	55.1	110	164	220	276	331
3.40	53.4	107	160	214	267	321
3.45	51.8	104	156	207	259	311
3.50	50.3	101	151	201	252	302
3.55	48.9	97.8	147	196	244	293
3.60	47.5	95.0	142	190	238	285
3.65	46.1	92.2	138	184	231	277
3.70	44.9	89.8	135	180	225	269
3.75	43.6	87.2	131	174	218	262
3.80	42.4	84.8	127	170	212	255
3.85	41.3	82.6	124	165	207	248
3.90	40.2	80.4	121	161	201	241
3.95	39.1	78.2	117	156	196	235
4.00	38.1	76.2	114	152	191	229
4.05	37.1	74.2	111	148	186	223
4.10	36.2	72.4	109	145	181	217
4.15	35.3	70.6	106	141	177	212
4.20	34.4	68.8	103	138	172	207
4.25	33.6	67.2	101	134	167	201
4.30	32.8	65.6	98.3	131	164	197
4.35	32.0	64.0	95.9	128	160	192
4.40	31.2	62.4	93.6	125	156	187
4.45	30.5	61.0	91.4	122	153	183

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ [19] (ต่อ)

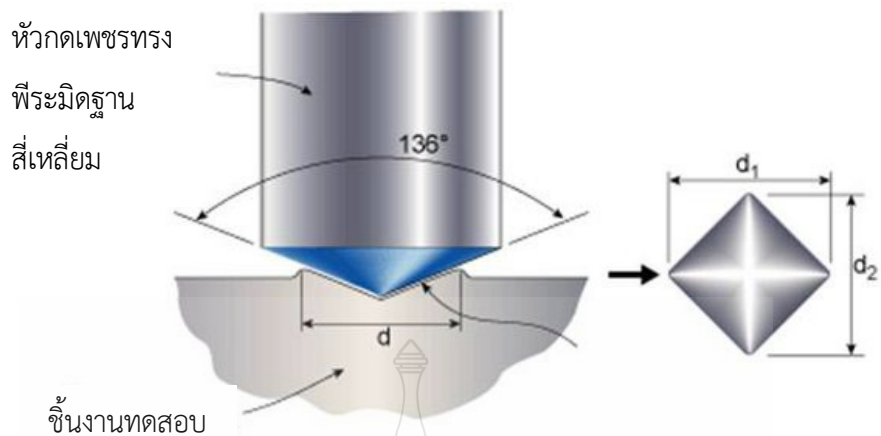
เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm)	ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ					
	500	1000	1500	2000	2500	3000
	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.	kgf.
4.50	29.8	59.6	89.3	119	149	179
4.55	29.1	58.2	87.2	116	145	174
4.60	28.4	56.8	85.2	114	142	170
4.65	27.8	55.6	83.3	111	139	167
4.70	27.1	54.2	81.4	108	136	163
4.75	26.5	53.0	79.6	106	133	159
4.80	25.9	51.8	77.8	104	130	156
4.85	25.4	50.8	76.1	102	127	152
4.90	24.8	49.6	74.4	99.2	124	149
4.95	24.3	48.6	72.8	97.2	122	146
5.00	23.8	47.6	71.3	95.2	119	143
5.05	23.3	46.6	69.8	93.2	117	140
5.10	22.8	45.6	68.3	91.2	114	137
5.15	22.3	44.6	66.9	89.2	112	134
5.20	21.8	43.6	65.5	87.2	109	131
5.25	21.4	42.8	64.1	85.6	107	128
5.30	20.9	41.8	62.8	83.6	105	126
5.35	20.5	41.0	61.5	82.0	103	123
5.40	20.1	40.2	60.3	80.4	101	121
5.45	19.7	39.4	59.1	78.8	98.5	118
5.50	19.3	38.6	57.9	77.2	96.5	116
5.55	18.9	37.8	56.8	75.6	95.0	114
5.60	18.6	37.2	55.7	74.4	92.5	111
5.65	18.2	36.4	54.6	72.8	90.8	109
5.70	17.8	35.6	53.3	71.2	89.2	107

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ [19] (ต่อ)

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกด (mm)	ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ					
	500 kgf.	1000 kgf.	1500 kgf.	2000 kgf.	2500 kgf.	3000 kgf.
5.75	17.5	35.0	52.5	70.0	87.5	105
5.80	17.2	34.4	51.5	68.8	85.8	103
5.85	16.8	33.6	50.5	67.2	84.2	101
5.90	16.5	33.0	49.6	66.0	82.5	99.2
5.95	16.2	32.4	48.7	64.8	81.2	97.3
6.00	15.9	31.8	47.7	63.6	79.5	95.5
6.05	15.6	31.2	46.8	62.4	78.0	93.7
6.10	15.3	30.6	46.0	61.2	76.7	92.0
6.15	15.1	30.2	45.2	60.4	75.3	90.3
6.20	14.8	29.6	44.3	59.2	73.8	88.7
6.25	14.5	29.0	43.5	58.0	72.6	87.1
6.30	14.2	28.4	42.7	56.8	71.3	85.5
6.35	14.0	28.0	42.0	56.0	70.0	84.0
6.40	13.7	27.4	41.2	54.8	68.8	82.5
6.45	13.5	27.0	40.5	54.0	67.5	81.0

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

หลักการ เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136° ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.19 หลักการการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ [19]

$$\begin{aligned}
 \text{ความแข็งวิกเกอร์} &= \text{แรงกด/พื้นที่ผิวรอยกด} \\
 &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\
 &= \frac{0.189F}{d^2} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกดควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

ตารางที่ 2.5 ตารางเทียบค่าความแข็ง [19]

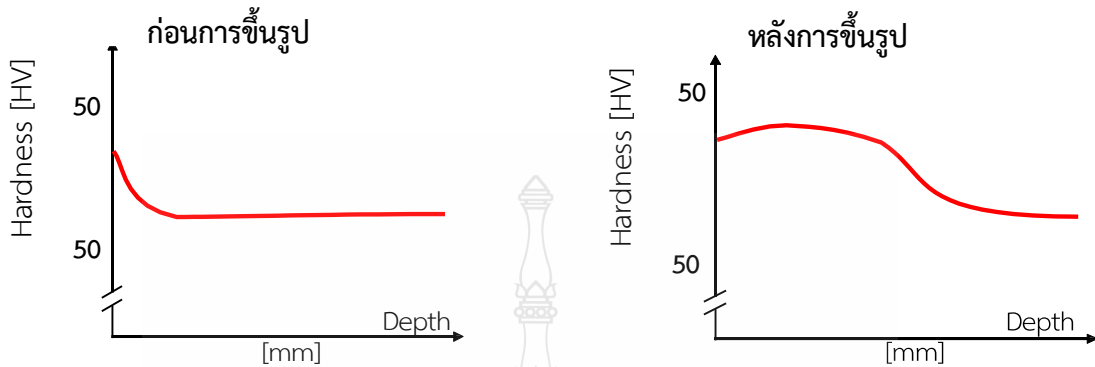
ค่าความแข็งจากการทดสอบหนึ่งๆนั้น สามารถเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบในหน่วยอื่น ๆ ได้ ดังได้แสดงในส่วนหนึ่งของตารางเทียบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E140-07 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบค่าความแข็งในกรณีที่ขึ้นงานผ่านการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบที่ต่างกัน

Rockwell C, 150 kgf.(HRC)	Rockwell A, 60 kgf.(HRA)	Rockwell B, 100 kgf.(HRB)	Brinell 10-mm Standard Ball 3000-kgf(HB)	Brinell 10-mm Carbide Ball 3000-kgf(HB)	Vickers Hardness Number (HV)
68	85.6	...	...	...	940
67	85.0	...	...	...	900
66	84.5	...	...	...	865
65	83.9	...	...	739	832
64	83.4	...	...	722	800
63	82.8	...	...	705	772
62	82.3	...	...	688	746
61	81.8	...	...	670	720
60	81.2	...	...	645	697
59	80.7	...	...	634	674
58	80.1	...	...	615	653
57	79.6	...	...	595	633
56	79.0	...	...	577	613
55	78.5	...	...	560	595
54	78.0	...	...	543	577
53	77.4	...	...	525	560
52	76.8	...	(500)	512	544
51	76.3	...	(487)	496	528
50	75.9	...	(475)	481	513
49	75.2	...	(464)	469	498
48	74.7	...	451	455	484
47	74.1	...	442	443	471

ตารางที่ 2.5 ตารางเทียบค่าความแข็ง [19] (ต่อ)

Rockwell C, 150 kgf.(HRC)	Rockwell A, 60 kgf.(HRA)	Rockwell B, 100 kgf.(HRB)	Brinell 10-mm Standard Ball 3000-kgf(HB)	Brinell 10-mm Carbide Ball 3000-kgf(HB)	Vickers Hardness Number (HV)
46	73.6	...	432	432	458
45	73.1	...	421	421	446
44	72.5	...	409	409	434
43	72.0	...	400	400	423
42	71.5	...	390	390	412
41	70.9	...	381	381	402
40	70.4	...	371	371	392
39	69.9	...	362	362	382
38	69.4	...	353	353	372
37	68.9	...	344	344	363
36	68.4	(109.0)	336	336	354
35	67.9	(108.5)	327	327	345
34	67.4	(108.0)	319	319	336
33	66.8	(107.5)	311	311	327
32	66.3	(107.0)	301	301	318
31	65.8	(106.0)	294	294	310
30	65.3	(105.5)	286	286	302
29	64.8	(104.5)	279	279	294
28	64.3	(104.0)	271	271	286
27	63.8	(103.0)	264	264	279
26	63.3	(102.5)	258	258	272
25	62.8	(101.5)	253	253	266
24	62.4	(101.0)	247	247	260
23	62.0	(100.0)	243	243	254
22	61.5	99.0	237	237	248
21	61.0	98.5	231	231	243

ความแข็งของผิวชิ้นงานเกิดขึ้นโดยตรงจากผลของความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่เกิดขึ้นภายหลังการรีดผิวละเอียด โดยสามารถเพิ่มความแข็งผิวชิ้นงานได้จากเดิมประมาณ 60 HV ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 ความแข็งของผิวชิ้นงาน [20]

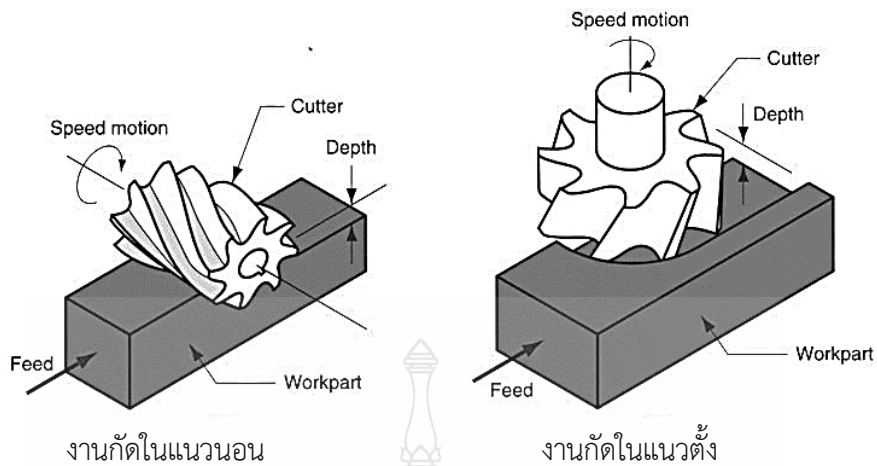
2.6 ทฤษฎีของการบวนการกัดโลหะ

Machining คือ กระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัดในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกิน ออกจากชิ้นงานและวัสดุส่วนที่เหลือจะมีรูปร่างตามต้องการ วิธีการกัดมีหลายประเภทซึ่งวิธีการที่ นิยมใช้กัน ได้แก่ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัดขึ้นรูป (Milling)

2.5.1 การกัดขึ้นรูป จะใช้เครื่องมือที่มีหลายคมตัด (Multiple Cutting Edges) มีดตัดจะหมุนและ เคลื่อนที่ช้า ๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทำให้เกิดระนาบผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed Direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของใบมีดตัดถูก กำหนดด้วยความเร็ว (Speed) จากลักษณะดังกล่าวมีการกัดขึ้นรูป 2 แบบ ดังรูปที่ 2.20 คือ

1) งานกัดในแนวอน (Peripheral Milling) ผิวงานกัดจะขนานกับแกนหมุน ดอกกัดชนิดนี้จะใช้ ผิวรอบวงในการกัดงานเรียบ ใช้งานกับเครื่องกันแนวอน และเครื่องกัดแนวตั้งรูปร่างของดอกกัด โดยทั่วไปจะมีลักษณะกลมทรงกระบอก ขนานวงใหญ่บางเป็นแผ่นจนหนาขึ้นไปและวงเล็กลงเป็นแท่ง

2) งานกัดในแนวตั้ง (Face Milling) ผิวงานกัดจะตั้งฉากกับแกนหมุนดอกกัดชนิดนี้จะมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางกว้างมากเพื่อทำผิวเรียบให้ได้ระนาบ เรียกดอกกัดผิวหน้าราบ ใช้งานกับเครื่องกัดแนวตั้ง

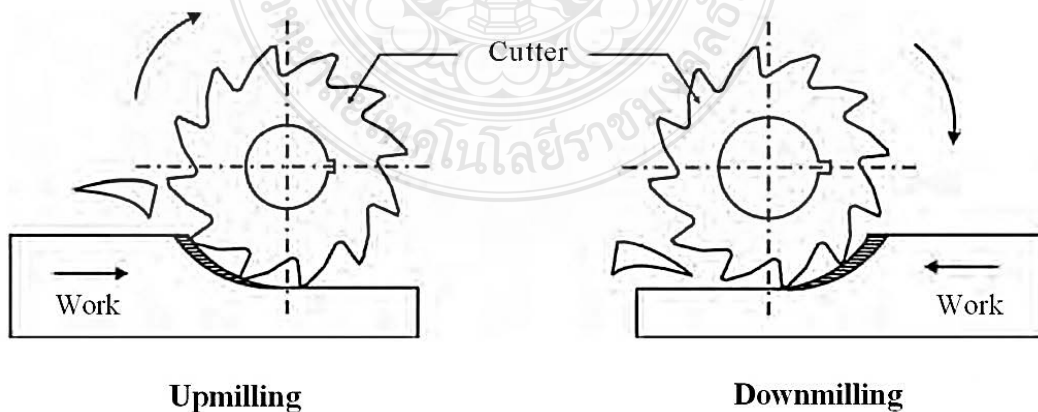


รูปที่ 2.21 ลักษณะของการกัด [21]

การเดินป้อนเพื่อให้เกิดการตัดเฉือนระหว่างชิ้นงานกับมีดกัด สามารถกระทำได้ 2 ลักษณะคือ การป้อนการกัดตามมีด (Down Cut Milling) และการป้อนกัดสวนมีด (Up Cut Milling) ความแตกต่างแสดงดังรูปที่ 2.21

1. การป้อนกัดตามมีด (Down Cut Milling) ทิศทางในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานจะมีทิศทางเดียวกันกับการหมุนของดอกกัด ความหนาของเศษและความดันที่เกิดในขณะที่ทำการตัดเฉือนจะลดลงเรื่อย ๆ ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้ มีผิวค่อนข้างเรียบและดี รวมทั้งสามารถยืดอายุการใช้งานคมตัดของดอก กัด

2. การป้อนกัดสวนมีด (Up Cut Milling) ทิศทางในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานจะมีทิศทางสวนทางกับทิศทางการหมุนของดอกกัดทำให้ความหนาของเศษและแรงที่ใช้ในการตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ที่พื้นของคมตัด ทำให้ผิวงานที่ได้จะไม่ค่อยเรียบ เกิดเป็นรอยสั้นๆ บนชิ้นงานกัด



รูปที่ 2.22 วิธีการป้อนตามมีด และป้อนสวนมีด [22]

2.7 เทคโนโลยีทางด้าน CNC

เครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ เครื่องจักรกลที่ใช้ผลิต หรือขึ้นรูปชิ้นงานที่มีมาตรฐานสูง ทำงาน โดย การโปรแกรมคำสั่งเข้าไปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้มีหลายภาษา ส่วนมากใช้งานโลหะที่มีความ ซ้ำซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง การควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี ในขั้นตอนต่าง ๆ อย่าง อัตโนมัติ แทนการใช้แรงงานคนควบคุมเครื่องหลักการทำงานของเครื่องจักรกลส่วนของ การควบคุม เครื่องจักรแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- 1) การควบคุมการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ (Movement)
- 2) การควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ (Speed)

Computer Numerical Control (CNC) แปลว่าการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ เป็น เทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Lathe) เครื่องเจียรระโน (Grinding) EDM และอื่น ๆ

2.6.1 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

ระบบควบคุมของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC) จะได้รับคำสั่งให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีทำงาน ด้วย ภาษาที่ระบบควบคุมเข้าใจดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนโปรแกรมเข้าไปในระบบควบคุม เมื่อ ระบบควบคุม อ่านโปรแกรมที่ป้อนเข้าไปจะนำไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงานโดยอาศัยมอเตอร์ ป้อน (Feed Motor) เพื่อให้แท่นเลื่อนเคลื่อนที่ได้ตามที่เราต้องการ เช่น เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Machine) ก็จะมีมอเตอร์ใน การเคลื่อนที่อยู่ 2 ตัว หรือเครื่องกัดซีเอ็นซีก็จะมีมอเตอร์ป้อน 3 ตัว เมื่อ ระบบควบคุมอ่านโปรแกรมจะ เปลี่ยนรหัสโปรแกรมให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อไปควบคุมให้ มอเตอร์ทำงาน โดยการส่งสัญญาณผ่าน ภาคขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive Amplified) และส่ง สัญญาณต่อไปยังมอเตอร์ป้อนแนวแกนที่ ต้องการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด ความเร็วและระยะทางการ เคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนจะต้องกำหนดให้ระบบ ควบคุมรู้ โดยระบบควบคุมซีเอ็นซี (CNC) จะทำงาน ร่วมกับระบบวัดขนาด (Measuring System) ซึ่ง ประกอบด้วยสเกลแนวตรง (Liner Scale) มีจำนวน เท่ากับจำนวนแนวแกนในการเคลื่อนที่ ของ เครื่องจักรกลโดยส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะทาง ที่แท่นเลื่อนเคลื่อนที่กลับไปยังระบบควบคุม ทำ ให้ระบบควบคุมรู้ว่าแท่นเลื่อนเคลื่อนที่ไปเป็น ระยะทางเท่าใดทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถผลิต ชิ้นงานให้มีรูปร่างและรูปทรงให้มีขนาดตามที่ ต้องการ โดยเครื่องจักรซีเอ็นซีแต่ละแบบแต่ละรุ่นจะมี ลักษณะเฉพาะและการประยุกต์ใช้งานที่ ต่างกันออกไป ข้อดีของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ

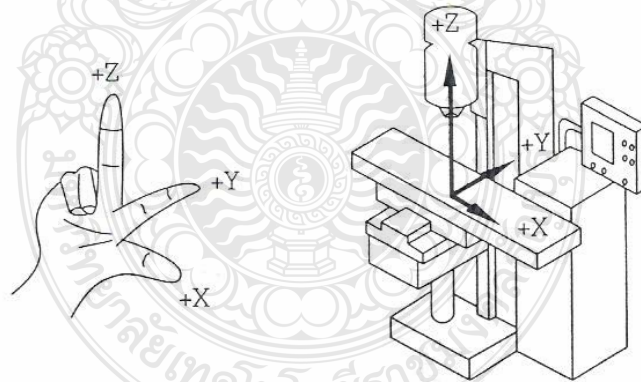
1. เครื่องซีเอ็นซี ได้รับการปรับปรุงให้มีการทำงานอัตโนมัติทำให้ลดแรงงานของผู้ควบคุม ในการผลิตชิ้นงานลงอีกทั้งคุณภาพของชิ้นงานเท่ากันทุกชิ้น เนื่องจากการสั่งงานโดยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ในเครื่องจักร ทำให้งานที่ได้เกิดความผิดพลาดได้น้อยมาก ๆ หรือแทบไม่มีผิดพลาด

2. ความละเอียดและความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงานสามารถผลิตงานออกมาได้อย่างรวดเร็ว และใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย ประหยัดพื้นที่ในการเก็บชิ้นงาน

3. ความยืดหยุ่นในการทำงาน เนื่องจากเครื่องจักรกลเหล่านี้ทำงานตามโปรแกรมสามารถ ทำงานได้ดีแม้ว่าชิ้นงานจะมีความยากและซับซ้อนสูงช่วยลดเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานลง การ เมื่อโปรแกรมประมวลผลและทำการผลิตชิ้นงานแล้ว สามารถเรียกโปรแกรมนำ กลับมาใช้ใหม่ในครั้ง ต่อไป

แกนและทิศทางเครื่องกัดซีเอ็นซี

เครื่องกัด CNC ประกอบด้วย แกนแกน X แกน Y และแกน Z การนำไปใช้งานเป็นงานกัดแบบ 3 มิติ โดยแกน X เป็นแกนที่ทำให้โต๊ะงาน (Table) เคลื่อนที่ตัดขวางแนวแกนของสปินเดิล ส่วน แกนแกน Y จะเป็นแนวที่ทำให้โต๊ะงานเคลื่อนที่ เข้า-ออกในแนวตั้งฉากหรือตัดขวางกับแกน X ส่วนแกน Z จะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ขึ้น-ลงของสปินเดิล เพื่อให้สามารถกัดงานแบบ 3 มิติได้แสดงดัง รูปที่ 22 ในปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านการผลิตพัฒนาขึ้น เครื่องกัด CNC สามารถทำงานมากกว่า 3 แกน (4 หรือ 5 แกน)



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องกัด CNC [23]

2.6.2 พารามิเตอร์สำหรับงานกัด

ในการกัดตัวแปรที่ ถูกนำมาพิจารณาในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดมากที่สุด ประกอบด้วยความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกของการตัดเฉือน (Depth of Cut) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวชี้วัดสมรรถภาพของกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed, v) หมายถึง ความยาวของเนื้อโลหะที่ถูกตัดผ่านปลายคมตัดภายในระยะเวลา 1 นาที ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น m/min ซึ่งในการตัดเฉือนวัสดุมีดตัดจะต้องมีความแข็งกว่าชิ้นงาน ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วตัด คือ วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด วัสดุชิ้นงานหากมีความแข็งมาก ความเร็วตัดจะต่ำ ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนลึกมากความเร็วตัดจะลดลง อัตราป้อนถ้า ป้อนตัดละเอียดความเร็วจะมาก การจับยึดชิ้นงานในการจัดยึดชิ้นงานที่ดีจะช่วยให้ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น และความสามารถและสภาพเครื่องจักร ถ้ามีกำลังขับสูงจะให้ความเร็วตัดที่สูง ความเร็วตัด สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2.12)$$

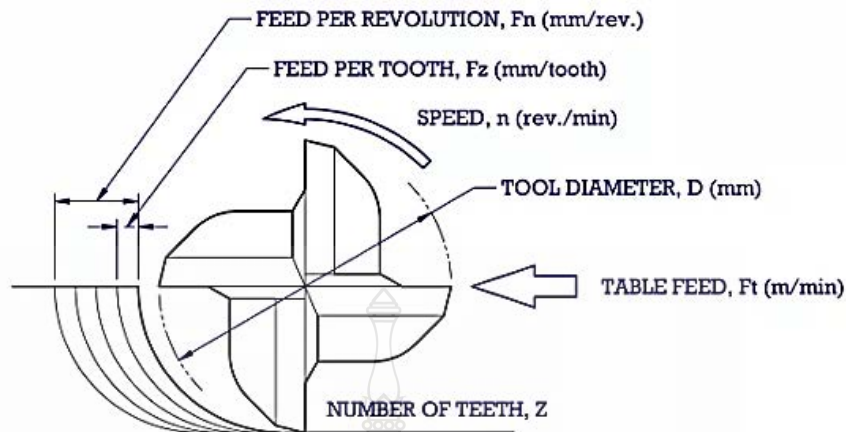
เมื่อ v_c = ความเร็วตัด (m/min)
 D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือ (mm)
 N = ความเร็วรอบของมีดกัด (min/rev)

2. อัตราป้อน (Feed Rate) อัตราป้อนตัด หมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่ เข้าหาชิ้นงาน มีความสำคัญในการกำหนดคุณภาพผิวของชิ้นงาน อัตราป้อนมีหน่วยเป็น m/min หรือ /rev โดยทั่วไปอัตราป้อนในเครื่องจักรแบ่งออกเป็น 3 แบบแสดงดังรูปที่ 2.23 คือ

- 1) อัตราป้อนของโต๊ะงานหรือความเร็วโต๊ะงาน (Table Feed, f_t) มีหน่วยเป็น mm/min โดยอัตรา ป้อนต่อฟันที่ว่าจะเป็นจำนวนคมตัดที่กัดงานจริง (Effective Teeth)
 - 2) อัตราป้อนต่อรอบ (Feed per Revolution, f_r) มีหน่วยเป็น mm/rev
 - 3) อัตราป้อนต่อฟัน (Feed per Tooth, f_z) มีหน่วยเป็น mm/tooth
- สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = n \times f_z \times V_c \quad (2.13)$$

เมื่อ f = อัตราป้อน (m/min)
 n = ความเร็วรอบของมีดกัด (min/rev)
 f_z = อัตราป้อนต่อฟัน (mm/tooth)
 V_c = ความเร็วตัด (m/min)



รูปที่ 2.24 แสดงอัตราป้อน [24]

3. ความลึกของการกัดหรือ ความกว้างของการตัดเฉือน (Depth of Cut) หมายถึง ระยะทางที่คมของเครื่องมือยังลึกเข้าไปในชิ้นงานในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่มีหน่วยเป็น mm การกำหนดความลึกของการตัดเฉือนต้องพิจารณา 2 ส่วน คือแรงมาในการขับเพลาลับเครื่องมือตัด หรือชิ้นงาน กับความแกร่งของเคื่องมือกัด ความลึกในการกัดมีผลต่อเวลาในการทำงาน แต่มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดตัดน้อยกว่า

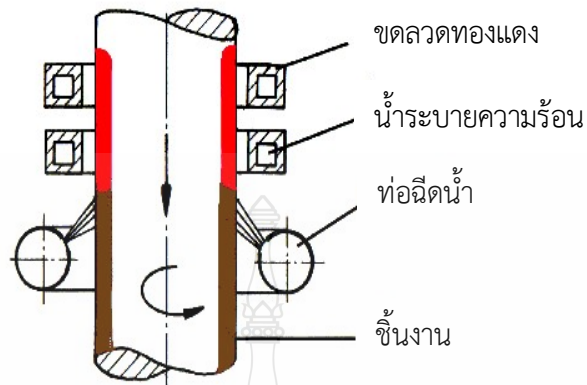
2.8 การชุบผิวแข็ง

ชิ้นงานที่ใช้งานในลักษณะต้องเสียดสีที่ผิวแต่ต้องการให้มีความเหนียวรับแรงกระแทกได้ดีควรมีลักษณะพิเศษ คือผิวแข็งสูงในขณะที่แกนกลางยังคงมีความยืดหยุ่นวิธีการชุบผิวแข็งเหล็กกล้ามีหลายวิธีแต่ละวิธีเหมาะกับเหล็กกล้าแต่ละชนิดแตกต่างกันโดยมีหลักการดังต่อไปนี้

การชุบผิวแข็งแบบอินдукชัน (Induction Hardening) ใช้หลักการให้ความร้อนเพื่อให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเฉพาะบริเวณผิวจากนั้นจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการฉีดหรือจุ่มด้วยน้ำ ความร้อนได้จากขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งทำด้วยท่อทองแดง ภายในมีน้ำไหลสำหรับการหล่อเย็น ขดลวดมีกระแสสลับความถี่สูง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเป็นกระแสไหลวนวงที่ผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.24

ค่าความแข็งผิวและชั้นลึกขึ้นกับค่าความถี่ ขนาดกำลังเครื่อง เวลาให้ความร้อน สารชุบและชนิดของเหล็ก การชุบแข็งวิธีนี้มักใช้วิธีทำชิ้นต่อชิ้น สามารถชุบผิวแข็งได้ดีกับชิ้นงานส่วนทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ความแข็งลึกส่วนใหญ่ที่ได้อยู่ในช่วง 0.5 – 2.0 mm สามารถชุบเฉพาะจุดที่ต้องการได้ดี ปัจจุบันสามารถควบคุมคุณภาพได้ดีมาก เหล็กกล้าที่สามารถชุบแข็งด้วยวิธีนี้ได้ต้องมีคาร์บอนไม่น้อย

กว่า 0.3% ส่วนใหญ่นิยมใช้เหล็กกล้า JIS S45C ซึ่งมีคาร์บอนผสม 0.45% ตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ รถแทรกเตอร์ รถมอเตอร์ไซด์ เครื่องจักรกลการเกษตร



รูปที่ 2.25 แสดงหลักการทำงานของ การชุบผิวแข็งแบบอินดักชั่น [25]



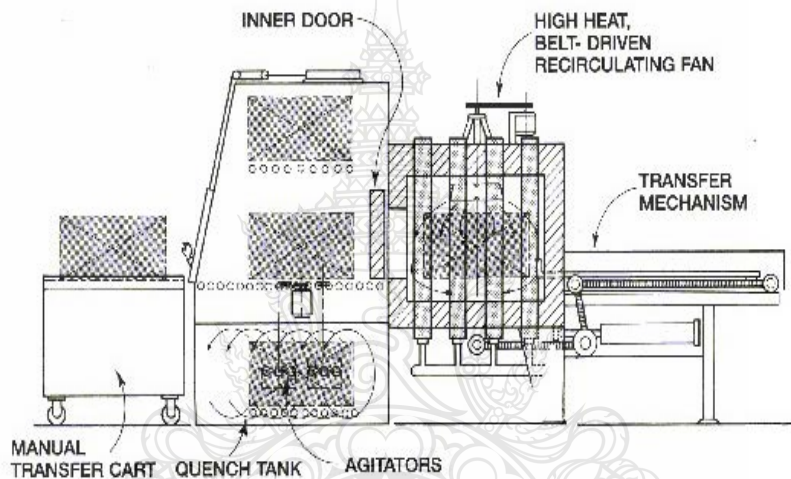
รูปที่ 2.26 เครื่องอินดักชั่น [25]

การชุบแข็งผิวแบบคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing) หลักการคือ การนำเหล็กกล้าซึ่งมีคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 0.22% ซึ่งปกติจะชุบแข็งไม่ได้) มาเพิ่มคาร์บอนที่ผิว ซึ่งสารเพิ่มคาร์บอนมีทั้งแบบของแข็ง (ถ่าน) ของเหลว (เกลือเคมี) และแก๊ส (LPG)

ในสมัยก่อนจะใช้สารเพิ่มคาร์บอนแบบของแข็งที่เรียกกันว่า แพ็คคาร์บูไรซิ่งโดยนำเม็ดถ่าน และชิ้นงานมาใส่กล่อง นำไปอบที่อุณหภูมิ 900 - 950 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 4-5 ชั่วโมง คาร์บอนจะแพร่ซึมเข้าไปแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง นำชิ้นงานออกมาจากกล่องแล้วใส่ในเตาเพื่ออบใหม่ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เสร็จแล้วชุบอีกที วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ใช้ต้นทุนไม่มากและขึ้นอยู่กับตัวถ่าน ซึ่งสามารถทำเองได้โดยผสมถ่านไม้กับสารเร่งปฏิกิริยา เช่นแบเรียมคาร์บอเนต

ปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือแบบแก๊สคาร์บูไรซิ่ง เหล็กกล้าจะได้รับความร้อนภายในเตาอบแบบปิด ที่อุณหภูมิประมาณ 900 - 950 องศาเซลเซียส ฉีดแก๊ส LPG เข้าไปพร้อมกับแก๊สพาหะ (เอ็นโดเทอร์มิกแก๊ส) แก๊สอะตอมคาร์บอนจาก LPG จะสามารถแพร่เข้าไปในผิวของเหล็กกล้า จากนั้นอุณหภูมิจะถูกลดลงมาเหลือประมาณ 850 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะถูกจุ่มชุบลงในบ่อน้ำมันเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและเกิดโครงสร้างแข็ง (มาร์เทนไซต์) เฉพาะบริเวณผิวซึ่งมีคาร์บอนสูงกว่า 0.3%

เหล็กกล้าที่เหมาะสมกับกรรมวิธีนี้นอกจากจะมีคาร์บอนต่ำแล้ว ยังต้องมีสารเจือผสมเล็กน้อย เช่น โครเมียม แมงกานีส โมลิบดีนัม และนิกเกิล เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งเหล็กกล้าที่นิยมใช้สำหรับกรรมวิธีนี้คือ JIS SCM 415 ซึ่งมีส่วนผสมคือ C 0.2% CR 1% Mo 0.2%



รูปที่ 2.27 เตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศ สำหรับชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บูไรซิ่งและแบบแก๊สอัดคาร์บอนไนโตรดิง [25]

การชุบแข็งผิววิธีนี้มักชุบเป็นรุ่น (Batch) ขึ้นอยู่กับขนาดของเตาอบ โดยแต่ละครั้งของการชุบแข็งจะได้ประมาณ 200 - 1000 กิโลกรัม ซึ่งกรรมวิธีนี้สามารถควบคุมความแข็งลึก (Case depth) ความสม่ำเสมอของความแข็ง ตลอดจนการเสียรูปสามารถทำได้ดี ข้อเสียคือเครื่องจักรมีราคาสูงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

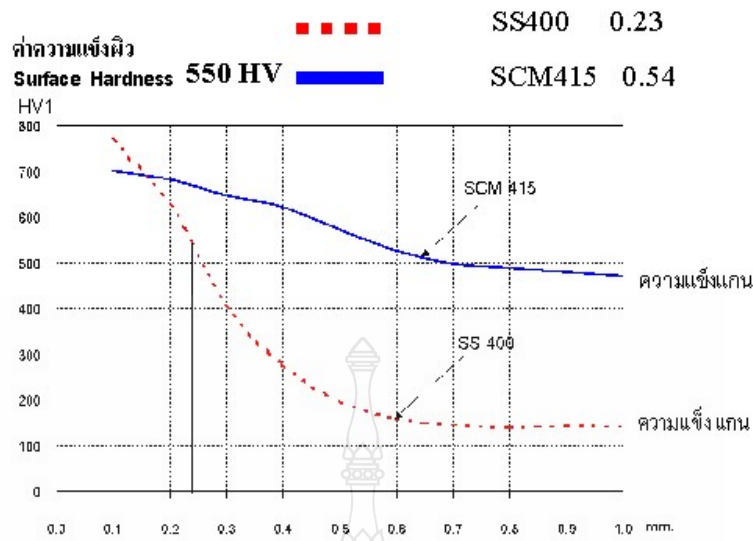


รูปที่ 2.28 แสดงชั้นความแข็งลึกของการชุบผิวแข็งแบบคาร์บูไรซิ่งหรือคาร์โบไนไตรดิง และแบบอินดักชั่นพบว่า การชุบแข็งแบบอินดักชั่น ความร้อนจะซึมเข้าไปลึกกว่าโดยเห็นได้อย่างชัดเจน [25]

การชุบผิวแข็งแบบคาร์โบไนไตรดิง (Carbonitriding) โดยหลักการแล้วคล้ายกับแบบคาร์บูไรซิ่ง คือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะถูกนำมาเพิ่มคาร์บอนที่ผิว และมีการเพิ่มไนโตรเจนเสริมควบคู่ไปกับคาร์บอนอีกส่วนหนึ่ง เหล็กกล้าจะถูกให้ความร้อนในเตาอบแบบปิดที่ประมาณ 860 - 900 องศาเซลเซียส แก๊ส LPG แก๊สพาหะ และแอมโมเนียจะถูกฉีดเข้าไปในเตา อะตอมคาร์บอนจาก LPG และไนโตรเจนจากแอมโมเนียจะแพร่เข้าไปในเหล็ก หลังจากนั้นเหล็กจะถูกลดอุณหภูมิลงมาเหลือประมาณ 860 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะถูกจุ่มชุบลงไปนในบ่อน้ำมัน เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดโครงสร้างแข็ง

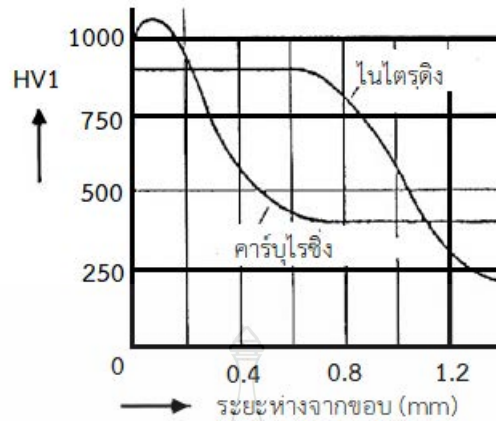
การเพิ่มไนโตรเจนเข้าไปในเหล็กกล้าจะช่วยให้เหล็กกล้ามีความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) เพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้สามารถใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ชุบแข็งในน้ำมันได้ แทนที่จะต้องชุบแข็งลงในน้ำซึ่งเย็นเร็วกว่าแต่มีผลทำให้เกิดการเสียรูป การชุบในบ่อน้ำมันทำให้การเสียรูปชิ้นงานที่ชุบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ข้อแตกต่างที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการใช้เหล็กกล้าเจือต่ำและเหล็กกล้าละมุนในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล คือค่าความแข็งที่แกน (core) จะมีความแตกต่างอย่างชัดเจน ความแข็งที่แตกต่างกันนี้ หมายถึง ความสามารถในการรับแรงที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามมิได้หมายความว่าชิ้นส่วนซึ่งทำจากเหล็กกล้าละมุนจะรับแรงได้น้อยกว่าชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกล้าเจือเสมอไป ทั้งนี้ต้องนำเอาขนาดของชิ้นส่วนมาพิจารณาควบคู่ไป



รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบความแข็งแกน (core hardness) ที่ได้จากการชุบผิวแข็งแบบคาร์บูไรซิ่งและคาร์โบไนไตรดิงระหว่างเหล็กกล้าเจือต่ำ (JIS SCM 415) และเหล็กกล้าละมุน (Mild steel JIS SS400) [25]

การชุบผิวแข็งแบบไนไตรดิง เป็นวิธีการที่สามารถใช้ได้กับเหล็กกล้าแทบทุกชนิด (เหล็กที่ทำไนไตรดิงได้ดีและง่ายควรมีส่วนผสมของอลูมิเนียมหรือโครเมียม) ให้ความแข็งผิวสูงกว่าวิธีที่กล่าวมาข้างต้น แต่มีความแข็งลึกไม่มาก และใช้เวลานานกว่า ข้อดีคือ ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำ ประมาณ 550 - 570 องศาเซลเซียส และไม่จำเป็นต้องทำให้เย็นตัวเร็ว จึงทำให้การเสียรูปต่ำด้วย ใช้หลักการให้อะตอมไนโตรเจนทำปฏิกิริยารวมกับเหล็กเป็นสารประกอบเหล็กไนไตรด์ซึ่งมีความแข็งสูงแต่ความลึกที่ได้จากการชุบวิธีนี้จะน้อย (น้อยกว่า 100 ไมครอน ถ้าชุบแบบคาร์โบไนไตรดิงทำได้ลึกเป็นระดับมิลลิเมตร) วิธีไนไตรดิง ที่ใช้มีทั้งแบบแก๊ส (gas nitriding) ซอลท์บัท (salt bath nitriding) และพลาสมา (plasma nitriding) สารที่ใช้ให้อะตอมไนโตรเจน ได้แก่ แก๊สแอมโมเนีย สำหรับการชุบผิวแข็งไนไตรดิงแบบแก๊ส และเกลือไซยาไนด์ สำหรับการชุบผิวแข็งไนไตรดิงแบบซอลท์บัท เป็นต้น ตัวอย่างชิ้นส่วนงานที่ทำการชุบแบบนี้ เช่น วาล์วเครื่องยนต์ ปลอกลูกสูบแม่พิมพ์อัดรีด แม่พิมพ์พลาสติก ครอบอกเครื่องฉีดพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 2.30 เปรียบเทียบความแข็งระหว่างการชุบผิวแข็งโดยวิธีคาร์บูไรซิงและไนโตรดิง [25]

2.9 ทบทวนวรรณกรรม

Liviu Luca et al. [10] การกัดรีดผิวแข็งเป็นวิธีการตกแต่งชิ้นงานโดยไม่เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ (Chinless) ซึ่งใช้เครื่องแบบลูกกลิ้งรีดกดกับชิ้นงานเพื่อให้เกิดการเสียรูปพลาสติกของชั้นผิว การพัฒนาล่าสุดทำให้การกัดรีดผิวแข็งของชิ้นส่วนเหล็กที่ทนความร้อนได้ความแข็งถึง 65 HRC คุณสมบัติของการกัดรีดผิวแข็ง ได้แก่ ความหยابที่ดี (เทียบเท่ากับการเจียร) รวมทั้งการปรับปรุง ลักษณะทางกลของพื้นผิว (ความแข็งแรงต่อการล้าตัว (Fatigue Strength) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) และอัตราส่วนแบริง (Bearing Ratio) เนื่องจากการใช้ความเค้นอัดใน ชั้นผิว อิทธิพลของพารามิเตอร์การกัดรีดผิวแข็ง เมื่อมีความหยابผิวสำหรับส่วนประกอบเหล็กที่แข็ง (64 HRC) ผลของพารามิเตอร์การกัดรีดผิวแข็งต่อความหยابผิวขั้นสุดท้าย Hydrostatic เป็นเครื่องมือ หลักที่ใช้สร้างแรงสัมผัส โดยความดันของของไหลที่ตัวจับบอล เหล็กชุบแข็งถูกใช้ พารามิเตอร์การ ทำงานที่เลือกแสดง ความสัมพันธ์กับความดันไฮดรอลิก การป้อนและความเร็วในการกัดรีดผิวแข็ง และรัศมีจมูกมีด (Nose Radius) ผลการทดลองแสดงให้เห็นอิทธิพลของแรงกดตันในกระบวนการ มี อิทธิพลที่สำคัญของความหยابผิวเดิมหลังจาก Hard Turning พบว่ามีเงื่อนไขในการรับความหยابผิว ในช่วงของการบด (0.5 μm)

LN. Lopez de Lacall et al. [9] ได้ศึกษาการใช้กระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเพื่อปรับปรุงคุณภาพขั้นสุดท้ายของเครื่องมือขึ้นรูป (Molds and Dies) กระบวนการนี้จะเปลี่ยนความหยابผิวของพื้นผิวที่ผ่านการกัดผิวด้วย Ball-end ก่อนหน้านี้ เพื่อบรรลุความต้องการด้านการตกแต่ง สำหรับ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการปั๊มขึ้นรูปตาย การกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลสามารถใช้งานได้ง่ายในแมชชีน นิ่งเซ็นเตอร์ เช่นเดียวกับที่ใช้สำหรับงานกัด ด้วยวิธีนี้เป็นการลดทั้งเวลาการรอคอย (Lead Times) และต้นทุนการผลิต

ลงอย่างมาก ทั้งกระบวนการกัดรีดผิวแข็งและพารามิเตอร์หลักๆ จะนำมาพิจารณา โดยคำนึงถึงอิทธิพลของการตกแต่ง ความสมบูรณ์ของพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากมีผลของความเรียบ ของพื้นผิวของกระบวนการ และการขึ้นรูปแบบเย็น ตัวอย่างของวัสดุที่แตกต่างกัน เมื่อเศษถูกกัดออก จากชิ้นงานจะเกิดผิวงานใหม่ (Machined Surfaces) และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีการ อธิบายค่าความหยาบผิวของพื้นผิวสูงสุดและค่าเฉลี่ยข้อความหยาบผิว ข้อสรุปสำคัญ คือ การใช้รัศมี ขนาดใหญ่ของความลึกของการตัดเฉือนในการทำงาน Ball-end Milling พร้อมกับความลึกของรัศมีเล็ก ๆ ในระหว่างการกัดรีดผิวแข็ง อาจทำให้เกิดความหยาบสุดท้ายที่ยอมรับได้ประหยัดเวลาในการ ผลิตได้มาก สำหรับผลการทดสอบความหยาบผิวที่ดีที่สุดจะได้รับถ้าการกัดรีดผิวแข็งของบอลทำไป ตามทิศทางป้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางป้อนรีด ความลึกของผิว ด้านรัศมีที่ต่ำลงจะทำให้ความหยาบ ลดลง ความแรงดันสูงสุด 20 MPa นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพสูงสุดสำหรับวัสดุ 35-55 IRC ในวัสดุ อ่อน (< 35 HRC) แรงดันจาก 15 MPa ทำให้ลดความหยาบผิวลงอย่างเห็นได้ชัดใน กรณีที่ใช้วัสดุที่ แข็งกว่า 50 HRC ความดันมากกว่า 20 MPa อาจไม่สามารถลดความหยาบได้มากพอ การตรวจสอบ ความเค้นอัดเป็นสถานะพื้นผิวขั้นสุดท้ายหลังการกัดรีดผิวแข็งไม่ได้เป็นลักษณะสำคัญในแม่พิมพ์ และตาย แต่อาจมีความสำคัญกับวัสดุอื่น ๆ ไม่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างจุลภาคเกิดจาก ชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กและความเสี่ยงจากความล้าควรน้อยลงหรืออย่างน้อยเหมือนกัน กว่าชิ้นงานที่ไม่ได้กัดรีดผิวแข็ง คุณภาพของ Ball Milling และการกัดรีดผิวแข็งความลึกของแนวรัศมีของการตัด โดยทั่วไปของความหยาบผิว (2, 0.6-0.9 มม.) อาจจะเพียงพอถ้าใช้การกัดรีดผิวแข็งที่ถูกต้องหลังจาก นั้น (a, 0.05-0.1 มม.) แต่การกัดรีดผิวแข็งจะถูกใช้ที่การป้อนสูงสุด (15 m/min) แทนการกัด 1-2 นาที /นาที่ การประยุกต์ใช้ในการกัดรีดผิวแข็งของกายสำหรับชิ้นส่วนหลังคาของรถที่ใช้แล้วมีการใช้งาน แล้วตัวอย่าง ในระยะสั้นการรีดผิวแข็งด้วยบอลสามารถแก้ปัญหาที่เป็นไปได้สำหรับการขัดขั้นพิเศษ ของแม่พิมพ์และคาย

Pavan Kumar and Purohit G K [11] ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือกัดรีดผิวแข็ง การ แปรรูปโลหะ ในปัจจุบันมีความสนใจความเค้นตกค้างแบบอัดในส่วนประกอบต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต วิธีการทั่วไปของกระบวนการตกแต่ง ได้แก่ การเจียรระไน การเจาะขึ้นรูปใช้เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นส่วนโลหะ แต่ขั้นตอนการกัดรีดผิวแข็งซึ่งมีบทบาทเหมือนกันในกระบวนการตกแต่งมีข้อดี หลายอย่างที่ เกี่ยวข้องกับการกัดรีด ผลการศึกษาเกี่ยวกับประเด็นการออกแบบและการพัฒนา เครื่องมือในการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอล โดยการเลือกวัสดุขนาดและการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการและเครื่องมือให้ใช้งานง่าย ใช้เวลาน้อยกับค่าใช้จ่ายขั้นต่ำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในงานนี้ สามารถใช้กับเครื่องกลึง ตัวเลือกนี้จะเพิ่มความยืดหยุ่นของเครื่องมือและช่วยให้เราสามารถ ดำเนินการได้ เครื่องมือกัดรีดที่ออกแบบมา

ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Ball Holder, Square Casing, lock pins และ threaded lock Support และ Spring การออกแบบเครื่องมือทำขึ้นโดยคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่ จะเลือกและควบคุมในงาน ผลการทดลอง จะดำเนินการโดยคำนึงถึงความเร็ว การป้อน แรง และ จำนวนรอบที่ผ่าน และผลของพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ค่าความหยาบผิว และค่าความแข็ง พบว่า 1) ความมันเงาเหมือนพื้นผิวผ่านการตกแต่ง 2) ความสม่ำเสมอของมิติ/ความสามารถในการทำซ้ำได้ 3) การดำเนินการ Single Pass 4) การเพิ่มในความแข็ง พื้นผิว และ5) ลดการทำงานซ้ำและการปฏิเสธ ชิ้นงาน

A. Rodriguez et al. [12] การกรัดผิวแข็งผิวด้วยบอลลึก (Deep Ball-burnishing) เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวทางกลสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพ และคุณภาพของเพลาลมุน เมื่อเทคนิคนี้ถูกนำมา รวมกัน และใช้หลังจากการกลึงแบบเดิม กระบวนการที่เกิดขึ้นจะทำได้อย่างรวดเร็ว ง่าย และคุ้มค่า สามารถใช้ ร่วมกับเครื่องกลึงและการกลึงในสายการผลิต อิทธิพลของการกรัดผิวแข็งลึก กระบวนการนี้ทำให้พื้นผิวที่ดี มีความเค้นตกค้างอัดสูง และการเพิ่มความแข็งของชั้นผิว การแปรผัน ของความเร็วในการกรัดผิวแข็ง แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบและความแข็งของชิ้นงาน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำการกรัดผิวแข็ง โดยใช้ความเร็วสูงสุดที่เครื่องรองรับได้เพื่อลดเวลาในการ ประมวลผล ความดันของการกรัดผิวแข็งเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการนี้ ความดันกดสูงเพิ่ม ความแข็งผิว แต่ถ้าความดันสูงเกินไป บอลเซรามิกอาจ สร้างเส้นลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน ส่งผลให้ ผิวหน้าหยาบผิวขึ้น ด้วยวิธีนี้การประมาณค่าความดันในการกรัดผิวแข็งที่ดีที่สุดเป็นประเด็นสำคัญ ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ อัตราการป้อนกรัดต่อการ หมุนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่ม ผลผลิต การวิเคราะห์เวลาและค้นหาสำหรับอัตราการป้อนกลึงที่เหมาะสม เพื่อลดเวลาของ กระบวนการ การวัดความเค้นตกค้างโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction แสดงให้เห็นว่าความเค้นอัดถูก นำมาใช้ในส่วนประกอบ ความเค้นตกค้างเหล่านี้จะเกิดขึ้นที่ความลึกประมาณ 1 มิลลิเมตร การกรัด ผิวแข็งช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นส่วนกลึง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคนิคนี้ช่วย เพิ่มคุณภาพผิว (ถึง 0.3 ไมโครเมตร) เพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน (ถึง 60% Brinell) และ แนะนำความเค้นตกค้างอัด ซึ่งเหมาะสำหรับการยึดความถี่ของชิ้นงานและเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของ ชิ้นส่วน

Tao Zhang et al. [13] ศึกษาการทดลองและทฤษฎีการกรัดผิวแข็งของ Aerospace Alloy การ กรัดผิวแข็งเป็นที่รู้จักกันดีว่ามีประสิทธิภาพมากสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวที่การผลิต งานวิจัย มุ่งเน้นไปที่การหาแบบจำลองที่คาดการณ์ความหยาบของพื้นผิวและความเค้นตกค้างตามข้อมูลการ ทดลองพื้นผิวที่ราบรื่นของวัสดุการบินและอวกาศที่ปรับเปลี่ยนโดยการกรัดผิวแข็งด้วยบอล มี อิทธิพล สำคัญของพารามิเตอร์กระบวนการเกี่ยวกับความหยาบของผิวและความเค้นสูงสุดแบบจำลอง Second-

order Empirical ที่เกี่ยวข้องกับความดัน ความเร็ว และการป้อน ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับ การทำนาย ความหยาบของผิวซึ่งสามารถใช้ได้ เมื่อเทียบกับผลการทดลองแรงดันเป็นปัจจัยที่สำคัญ ต่อความเค้น ตกค้างแบบอัด อย่างไรก็ตามแบบจำลองเอมไพริคัลมีความเข้ากันกับผลการทดลอง การศึกษาผลกระทบ ของพารามิเตอร์การกรัดผิวแข็งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้: 1) ผลกระทบที่สำคัญของ พารามิเตอร์กระบวนการ ถูกสร้างขึ้นเมื่อความหยาบของผิวหน้าซึ่งรวมถึงความดันที่สูงขึ้นจะทำให้ พื้นผิวหยาบ ในขณะที่การป้อน ลดความหยาบของพื้นผิวลงเล็กน้อยจากระดับปานกลาง การเพิ่มขึ้น ของป้อนจะเพิ่มความหยาบของผิว ผลกระทบที่สำคัญของความเร็วควรคำนึงถึงทั้งในระดับต่ำหรือสูง แต่อิทธิพลของความหยาบของพื้นผิวที่ หมุนไม่มีนัยสำคัญ 2) แบบจำลองเอมไพริคัลของลำดับที่สอง มีค่าที่เหมาะสมโดยการวิเคราะห์ความ แปรปรวนและค่าจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการ ทดลอง 3)การกรัดผิวแข็งจะเปลี่ยนความ เค้นตกค้างในการรับแรงดึงให้เหลือน้อยลง ซึ่งความดัน เป็นปัจจัยสำคัญแบบจำลอง การทำนายที่มีผลไม่ ถูกต้องถูกเมื่อพิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เชิง คุณภาพของความเค้นตกค้าง

N. M. Oureshi et al. [14] ทำการวิเคราะห์ผลของกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยลูกกลิ้ง (Roller)และบอล (Ball) ต่อความหยาบของพื้นผิวเหล็ก EN8 เป็นการศึกษาเชิงทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่ผล ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกรัดผิวในวัสดุในงานอุตสาหกรรม การ ตกแต่งพื้นผิวต่าง ๆ เช่น lapping, honing เป็นต้น ซึ่งเป็นการกำจัดวัสดุออกจากผิวในการทดลองนี้ กระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลและลูกกลิ้งซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกใช้กับพารามิเตอร์การ กลิ้งที่ แตกต่างกันเพื่อให้ได้ผิวที่ต้องการ การทดลองดำเนินการในเครื่อง CNC สำหรับ EN8 โดยใช้วิธี Taguchi กำหนดพารามิเตอร์เครื่องจักรที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวเสร็จสิ้นในการทดลองนี้ ความเร็วในป้อน ความลึกการเจาะ และจำนวนครั้งของการผ่าน ปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมดจะได้รับการ ปรับปรุงโดยใช้วิธี Taguchi ผลจากการทดลองพบว่า การกรัดผิวแข็งด้วยลูกกลิ้งที่ความเร็ว 800 rpm อัตราป้อน 0.05 mm/rev ความลึกการเจาะ 0.4 mm และจำนวนครั้งของการผ่าน 4 รอบ เป็นค่าที่

เหมาะสม และ สำหรับการกรัดผิวแข็งด้วยบอล ความเร็ว 500 rpm อัตราป้อน 0.3 mm/rev ความลึก การเจาะ 0.3 mm และ จำนวนครั้งของการผ่าน 4 รอบ เป็นค่าที่เหมาะสม

Lars Hiegemann et al. [25] ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อทำนายความหยาบของพื้นผิวที่ ถูก กรัดผิวแข็งโดยทำการออกแบบสำหรับกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลของพื้นผิวที่เคลือบโดย ไม่ ต้องใช้การทดสอบเบื้องต้น แบบจำลองแสดงความเป็นไปได้ที่จะทำนายความหยาบหลังจากการ ริดร้อน เคลือบผิวและวัสดุที่ใช้ด้วยเหตุนี้สมการที่ใช้ในการศึกษาได้จาก Hiegemann et al. (2015) ค่า ความ หยาบก่อนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลและความดันสัมผัสภายใต้บอลขณะที่แรงดันถูกกำหนด การ ทดลอง

กำหนดความหยาบในกึ่งกลางของแท่งกดรีดสามารถวิเคราะห์ได้จากการพัฒนาแบบจำลองที่ ขึ้น Rolling Track ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการทดลองกดรีด สำหรับการออกแบบของกระบวนการ กดรีดผิวแข็งด้วยบอลการกำหนดความดัน เส้นผ่าศูนย์กลางลูกกลมและค่าความแข็ง Brinell จำเป็นต้อง ใช้สำหรับการกดรีดผิวแข็งด้วยลูกกลมของพื้นผิวและไม่เพียงแต่ One Rolling Track ระยะห่าง ระหว่าง Rolling Track จะเพิ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลแบบจำลองนี้สอดคล้องกับการทดลอง สำหรับ leveling สูงสุดในช่วงกลางของการติดตาม One Rolling Track ในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการ ทดลองกับแบบจำลองอยู่ระหว่าง 2.8% ถึง 9.4% เท่านั้นนอกจากนี้ยังมีการปรับระดับพื้นผิวรวมของ พื้นผิวทั้งหมดด้วยในพื้นที่ทำงานที่เหมาะสมสามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลอง กับแบบจำลองได้ 8.99% เพื่อให้การทำนายความหยาบเป็นไปอย่างแม่นยำสำหรับวัสดุที่ แตกต่างกัน เช่นเดียวกับเครื่องมือกลึง (เส้นผ่าศูนย์กลางลูกที่แตกต่างกัน) จะสังเกตว่าแบบจำลองสามารถใช้ได้ นอกจากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทุกตัวด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับความหยาบลดลง มากหลังจากการกดรีดผิวแข็ง

ผลจากการทบทวนวรรณกรรมแสดงให้เห็นถึงวิธีการกดรีดผิวแข็งด้วยบอลเป็นการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานทั้งทางกายภาพ และทางกล สำหรับกระบวนการกดรีดผิวแข็งด้วยบอลส่งผลกระทบต่อระดับพื้นผิวหยาบ ค่าความแข็งของพื้นผิว และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมี พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความดัน ความเร็วของเครื่องมือ อัตราป้อน ความลึกในการกดรีด และ จำนวน ครั้งของการกดรีด และสารหล่อลื่น ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคนี้ช่วยเพิ่ม ความแข็งของผิวชิ้นงาน ลดความหยาบผิว และเพิ่มความเค้นตกค้างอัดเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เหมาะ สำหรับการยึดความล้าของชิ้นงานและเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นส่วน และการกดรีดผิว แข็งที่สภาวะที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มผลผลิต และเพื่อลดเวลาของกระบวนการ ใน ส่วนของเครื่องมือและวิธีการในการวิเคราะห์ผลของความแข็ง ความหยาบผิว ความเค้นตกค้าง และ โครงสร้างจุลภาคของผลึก จำเป็นต้องใช้วิธีการที่สอดคล้องกับชนิดของวัสดุ

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองที่มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน เพื่อปรับปรุงความแข็งของผิวชิ้นงาน เพิ่มความเค้นตกค้างและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก วัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 มีลักษณะเป็น High Alloy Steel ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ในการกัดที่ความเร็วสูง เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง และบรรลุตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอน วิธีการดำเนินงานตามลำดับ ดังนี้

- 3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.3 การทดลองเบื้องต้น
- 3.4 การออกแบบการทดลอง
- 3.5 การทดสอบและจัดเก็บข้อมูล
- 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย การกำหนดตัวแปรและขอบเขตของการแก้ปัญหาอย่างละเอียด เพื่อการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก โดยการพิจารณาแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก และความลึกของผิวที่ใช้ในการกัดรีดเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 เป็นชิ้นงานในการทดสอบกระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก เพื่อหาค่าความหยาบผิว ค่าความแข็งผิวที่กัดรีด การวัดความเค้นตกค้างโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction และการวัดชั้นความแข็งผิว โดยการกำหนดชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตรหนา 6 มิลลิเมตร บอลสำหรับการกัดรีดผิวแข็งเป็นเซรามิก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร กำหนดค่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกที่ใช้ในการกัดรีด 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ในการศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลที่ต้องการมีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลองหลายชนิด เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลองที่ให้ค่าแม่นยำจนเสร็จสิ้นกระบวนการได้แก่

3.2.1 บอลกดรีดผิวแข็งชิ้นงาน

การกดรีดผิวแข็งด้วยบอล (Ball Burnishing) เป็นบอลเซรามิกชนิด ซิลิคอนไนไตรด์ เซรามิกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงเครื่องกดรีดที่ประกอบด้วยเกจวัดความดันช่องจ่ายน้ำมันไฮดรอลิก



รูปที่ 3.1 ขนาดของบอลกดรีดผิวแข็งชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 เครื่องมือกดรีดผิวแข็ง

3.2.2 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC)

ในงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษารกตริตผิวแข็งชิ้นงานด้วยบอลเซรามิก โดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) เพื่อให้ค่าที่ถูกต้องในการทดลอง ยี่ห้อ First รุ่น V 700 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องกัด แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าระยะป้อนลึก แนวแกน Z ความเร็วการเคลื่อนที่ไต่งานในแนวแกน X และ Y ที่ใช้ในการกรตริตผิวแข็ง และติดตั้งเครื่องมือที่ใช้จับบอลกรตริตผิวแข็งเข้าไปในหัวของเครื่องกัดได้ โดยสามารถปรับตั้งค่าความเร็วเคลื่อนที่ของไต่งานได้ สูงถึง 3000 มิลลิเมตร/นาที ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องกัดยี่ห้อ First รุ่น V 700

Modal	V 700
Rated power	15 kva
Power supply	200 V 50 Hz
Full load current	50 A
Machine weight	3690 kg
Pneumatic pressure	> 6 bar
Spindle speed range	0-8000 rpm

3.2.3 เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก

เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก แสดงดังรูปที่ 3.4 เครื่องสามารถสร้างแรงดันสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกประมาณ 1.4 ลิตร/นาที จำนวนรอบของปั้มประมาณ 1420 รอบ/นาที ปริมาณบรรจุถัง 30 ลิตร แรงดันไฟฟ้า 380-400 โวลต์ ไฟ 3 สาย ใช้ น้ำมันไฮดรอลิก (HLP 68) แสดงดังรูปที่ 3.5 งานอุตสาหกรรมชนิดผสมสารป้องกันการสึกหรอ ที่ช่วยปกป้องอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่องจักรได้ดี ทำให้สามารถคงประสิทธิภาพการใช้งานของระบบไฮดรอลิกได้ยาวนาน ใช้กับระบบไฮดรอลิกทั่วไปที่ต้องการ



รูปที่ 3.4 เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก



รูปที่ 3.5 น้ำมันไฮดรอลิก HLP 68

3.2.4 เครื่องมือวัดความหยาบผิว

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหยาบผิวแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Mitutoyo Surface Roughness test SJ-310 ดังแสดงรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหยาบผิว

3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์ (Vickers Micro Hardness Tester)

โดยเครื่องทดสอบ Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ Innovatest รุ่น HVS-1000A ใช้ในการหาค่าความแข็งของการทดสอบ โดยสามารถวัดค่าความแข็งภายในครั้งเดียวได้ทั้ง 2 ระบบคือแบบวิกเกอร์ และร็อคเวลล์ สเกล C (Rockwell Scale C) แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester

3.2.6 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Inspection)

ดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบจุลภาคโลหะ (Metallurgical Microscope) ยี่ห้อ SOPTOP รุ่น CX40M ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีการขยายภาพ 10, 40, 200, 400, และ 800 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง Metallurgical Microscope

3.2.7 เครื่อง Portable X-ray Residual Stress Analyzer

ทำการวัด ด้วยเครื่อง Portable X-ray Residual Stress Analyzer (μ -X360s) มีขนาดของคอลลิเมเตอร์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร หน่วยเซ็นเซอร์: W114 x H107 x D213 (มม.) และน้ำหนัก 2.4 กิโลกรัม ช่วยในการวัดความเค้นตกค้างของผิวเพื่อความตักค้างในชิ้นงานที่กัดรีดผิวแข็งด้วยบอลแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง Portable X-ray Residual Stress Analyzer

3.3 การทดลองเบื้องต้น

การทดสอบเบื้องต้นใช้ตัวแปรอิสระ คือ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Pressure) และความลึกของการกรัดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) โดยการเตรียมชิ้นงานจำนวน 36 ชิ้น การกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่ความดัน 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 3 ระดับ คือ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ทำการทดสอบเบื้องต้นดังตารางที่ 3.3 กำหนดให้อัตราการป้อน (Feed Rate) เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร/รอบ ความเร็วการกรัดผิวแข็ง (Speed) เท่ากับ 2000 มิลลิเมตร/นาที จำนวนของการกรัดผิวแข็ง (Number of Passes) 8 ครั้ง

การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยการศึกษาแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก และความลึกของการกรัดผิวแข็งเพื่อค่าความหยาบผิว ความแข็งแบบวิกเกอร์ ความเค้นตกค้าง ความลึกของความแข็งผิว และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงสรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งประกอบด้วย

1. การกรัดผิวแข็งด้วยหัวบอลที่ความดัน 200 400 และ 600 บาร์
2. ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 3 ระดับคือ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงการทดสอบเบื้องต้น

Hydraulic Pressure (Bar)	Depth of Burnishing (mm)	Test 1	Test 2	Test 3
200	0.3	×	×	×
	0.5	×	×	×
	0.7	×	×	×
400	0.3	×	×	×
	0.5	×	×	×
	0.7	×	×	×
600	0.3	×	×	×
	0.5	×	×	×
	0.7	×	×	×

3.4 การออกแบบการทดลอง

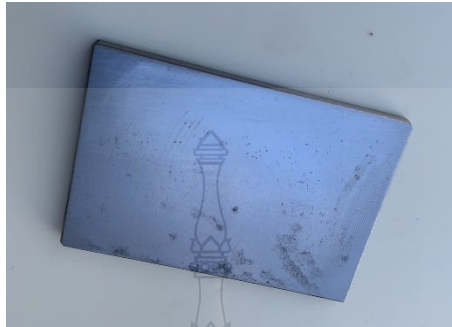
3.4.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 มีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ที่ใช้ในการทดสอบ [3]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S
1.55	0.1	0.15	11.50	0.7	0.3	0.2	<0.03	<0.03

จากรูปที่ 3.10 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 ที่ตัดให้มีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และหนา 8 มิลลิเมตร นำเหล็ก SKD11 ไปกัดตกแต่งหน้าด้วย เครื่องกัดซีเอ็นซีทั้ง 2 ด้านให้มีขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการทดสอบ

3.4.2 ทดสอบบอลเซรามิก

บอลเซรามิกที่ใช้ในการกรัดผิวแข็งประกอบด้วยซิลิคอนไนไตรด์เซรามิก มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล สเกล C ความแข็งของบอล เซรามิกก่อนใช้งานมีค่า 79 HRC

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองศึกษาพารามิเตอร์ของการกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก แสดงดังตารางที่

3.4 การทดลองจะเป็นทำการกรัดผิวแข็งชิ้นงานด้วยหัวบอลเซรามิกภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

1. ชิ้นงาน SKD 11 ที่ไม่ผ่านการรีดผิวแข็ง
2. ชิ้นงาน SKD 11 ที่ผ่านการชุบแข็ง
3. การกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่ความดัน 200, 400 และ 600 บาร์
4. ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 3 ระดับ คือ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกรัดผิวแข็งชิ้นงาน

Hydraulic Pressure (Bar)	Depth of Burnishing (mm)	Test 1	Test 2	Test 3
200	0.3	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.7	x	x	x
400	0.3	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.7	x	x	x
600	0.3	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.7	x	x	x

โดยการทดลอง ชิ้นงาน 36 ชิ้น ในการกรัดชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี ร่วมกับการกรัดผิวแข็งชิ้นงานด้วยบอลเซรามิกโดยตั้งค่าเครื่องกัดซีเอ็นซี ด้วยอัตราป้อน 2,000 มิลลิเมตร/นาที่ และปั๊มไฮดรอลิก มีแรงดันสูง 600 บาร์ ขั้นตอนการทดลองได้ดำเนินการตามลำดับดังนี้

1. ติดตั้งชุดหัวบอลกรัดผิวแข็งเข้ากับป้อนมีดของเครื่องกัดซีเอ็นซี และติดตั้งเกจวัดความดันน้ำมันไฮดรอลิกอุปกรณ์การกรัดผิวแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การติดตั้งชุดหัวบอลกรัดผิวแข็ง

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมขนาดแล้ว ดังรูปที่ 3.10 มา 1 ชิ้น ทำการจับยึดกับบล็อกที่เตรียมไว้สำหรับจับยึดชิ้นงานในการกรัดด้วยบอลเซรามิก แสดงดังรูปที่ 3.12



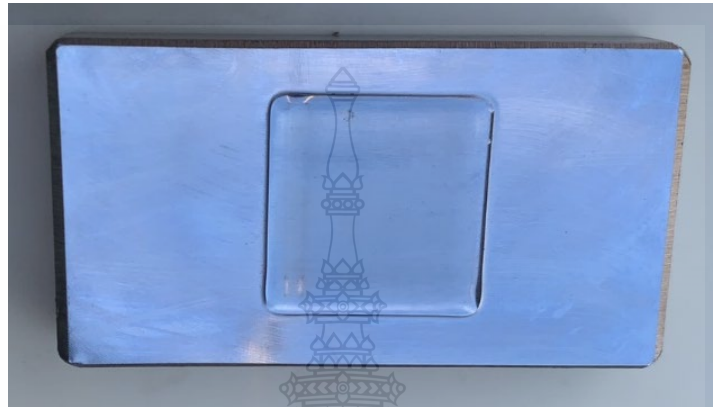
รูปที่ 3.12 การจับยึดชิ้นงาน

3. ทำการขัดชิ้นงานด้วยหัวบอลการกรัดผิวแข็งลงไปบนเครื่องซีเอ็นซี ทำการกรัดผิวแข็งด้วยบอลไปทางแกน X แล้ววนไปทางแกน Y ให้ได้พื้นที่ 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การกรัดผิวแข็งชิ้นงาน

4. ทำการป้อนค่าความลึก ค่าความดันน้ำมันไฮดรอลิก โดยความเร็วการเคลื่อนที่
โต๊ะงานในการกดรีดผิวแข็งคงที่ตามระดับตัวแปรที่กำหนด เมื่อเสร็จสิ้นชิ้นงานให้กลับไปทำตามตัวแปร
ที่กำหนดไว้โดยดำเนินการตามข้อ 1 - 4 จนครบการทดลองทำการทดลอง 3 ครั้ง แสดงรูปที่ 3.14 ชิ้นงานที่
ผ่านการกดรีดผิวแข็ง

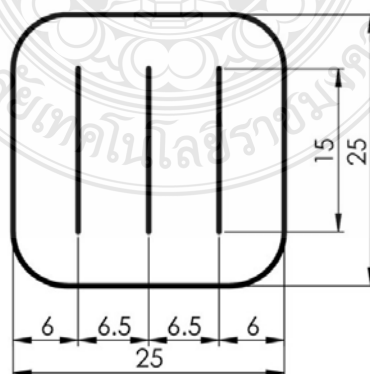


รูปที่ 3.14 ชิ้นงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง

3.5 การทดสอบและจัดเก็บข้อมูล

3.5.1 การวัดความหยาบผิว

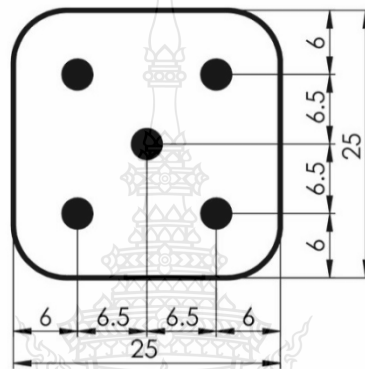
การวัดความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่อง Mitutoyo Surface tester รุ่น SJ-310
ทำการวัดโดยการแบ่งพื้นผิวเป็นส่วนส่วนดังรูปที่ 3.15 จากนั้นทำการวัดค่าความเรียบผิวได้แต่ละจุด
และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการวัดค่าความเรียบผิว

3.5.2 การวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

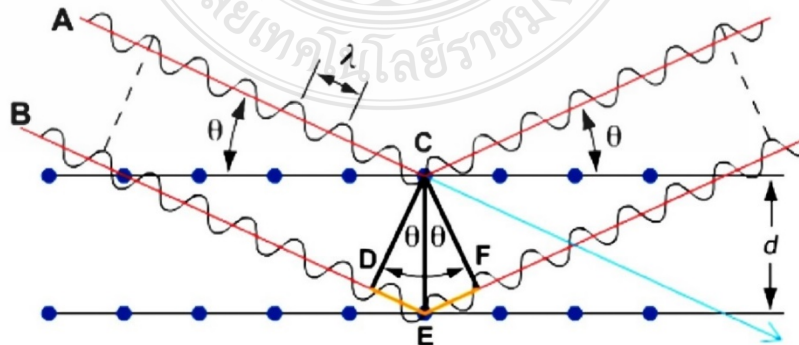
การวัดค่าความแข็งพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์เครื่อง Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ Innovatest รุ่น HVS-1000A ใช้แรงกดเพื่อวัดค่าความแข็งขนาด 100 กรัม เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยจะทำการวัดชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่สภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นงานด้วย Vickers Micro Hardness Tester ทำการวัดโดยการตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.16 และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งพื้นผิว

3.5.3 การวัดความเค้นตกค้าง

การวัดค่าความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงานทั้งก่อนการกรัดผิวแข็ง และภายหลังจากการกรัดผิวแข็งด้วยหัวบอลเซรามิกโดยการวัดความเค้นตกค้างบนผิวหรือใกล้พื้นผิว ด้วยเครื่องมือวัด Portable X-ray Residual Stress Analyzer (μ -X360s) โดยใช้หลักการ X-ray วัดค่าแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การวัดความเค้นตกค้างตามแนวแกน [32]

3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

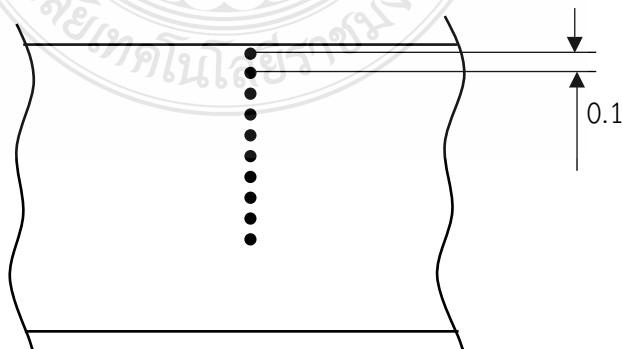
การวิเคราะห์ภาพพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ Innovates ดังรูปที่ 3.18 เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็ง สามารถดูงานละเอียดของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์

3.5.5 การวัดความแข็งลึกลับ

การวัดค่าความแข็งลึกลับจากพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เครื่อง Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ Innovatest รุ่น HVS-1000A ใช้แรงกดเพื่อวัดค่าความแข็งขนาด 100 กรัม เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยจะทำการวัดชิ้นงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่สภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นงานด้วย Vickers Micro Hardness Tester ทำการวัดโดยการกำหนดตำแหน่ง จำนวน 10 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.19 และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาความแข็งที่ลึกจากพื้นผิวกดรีด



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งพื้นผิว

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไขเทียบกับความแข็งผิวของ SKD11 ไม่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งและเทียบค่าความแข็งผิวของ SKD11 ที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งเพื่อหาเงื่อนไขของการกรดรีดที่ทำให้ความแข็งผิวอยู่ในช่วงการใช้งาน

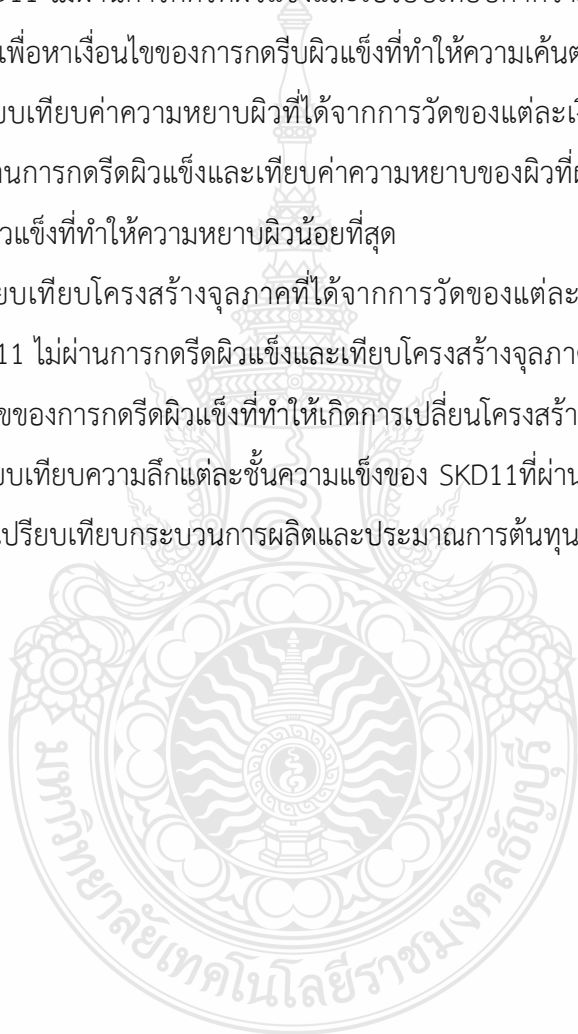
3.6.2 เปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไขเทียบกับความเค้นตกค้างผิวของ SKD11 ไม่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งและเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างผิวของ SKD11 ที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งเพื่อหาเงื่อนไขของการกรดรีดผิวแข็งที่ทำให้ความเค้นตกค้างมากที่สุด

3.6.3 เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไขเทียบกับความหยาบผิวของ SKD11 ที่ไม่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งและเทียบค่าความหยาบของผิวที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งเพื่อหาเงื่อนไขของการกรดรีดผิวแข็งที่ทำให้ความหยาบผิวน้อยที่สุด

3.6.4 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไขเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 ไม่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งและเทียบโครงสร้างจุลภาคของ SKD11 ที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งเพื่อหาเงื่อนไขของการกรดรีดผิวแข็งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค

3.6.5 เปรียบเทียบความลึกแต่ละชั้นความแข็งของ SKD11 ที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็ง

3.6.6 การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตและประมาณการต้นทุนการผลิต



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปทางกายภาพ เพื่อปรับปรุงความแข็งผิว (Surface Hardness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ลดความหยาบผิว (Surface Roughness) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคผลึกของพื้นผิวชิ้นงานจากกระบวนการกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่มีความแข็ง 79 HRC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ในกระบวนการกัดผิวแข็งของเหล็ก SKD11 ตัวแปรต้นในการศึกษาประกอบด้วย แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกในการกัดผิวแข็งที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร โดยใช้กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 27 ชิ้น ใช้ความเร็วเคลื่อนที่โต๊ะงาน 2000 มิลลิเมตร/นาที อัตราการป้อน 0.1 มิลลิเมตร/นาที จำนวนของการกัดผิวแข็ง 8 ครั้ง โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

- 4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งผิว
- 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งของผิว
- 4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความเค้นตกค้าง
- 4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบค่าความหยาบผิว
- 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างจุลภาคของผลึก

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งผิว

ในการดำเนินการทดลองศึกษาการกัดผิวแข็งเหล็ก SKD11 ด้วยบอลเซรามิกที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกในการกัดผิวแข็งที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อหาความแข็งผิวด้วยเครื่องทดสอบ Automatic Turret Digital Display Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ Innovates รุ่น HVS-1000A ใช้ในการหาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

4.1.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ก่อนและหลังการกัดผิว

การวัดค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ก่อนการกัดผิวแข็ง การทดสอบค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV) ของเหล็ก SKD11 แสดงค่าในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงมาตรฐาน (MHV) ของเหล็ก SKD11 ก่อนการกัดรีดผิวแข็ง

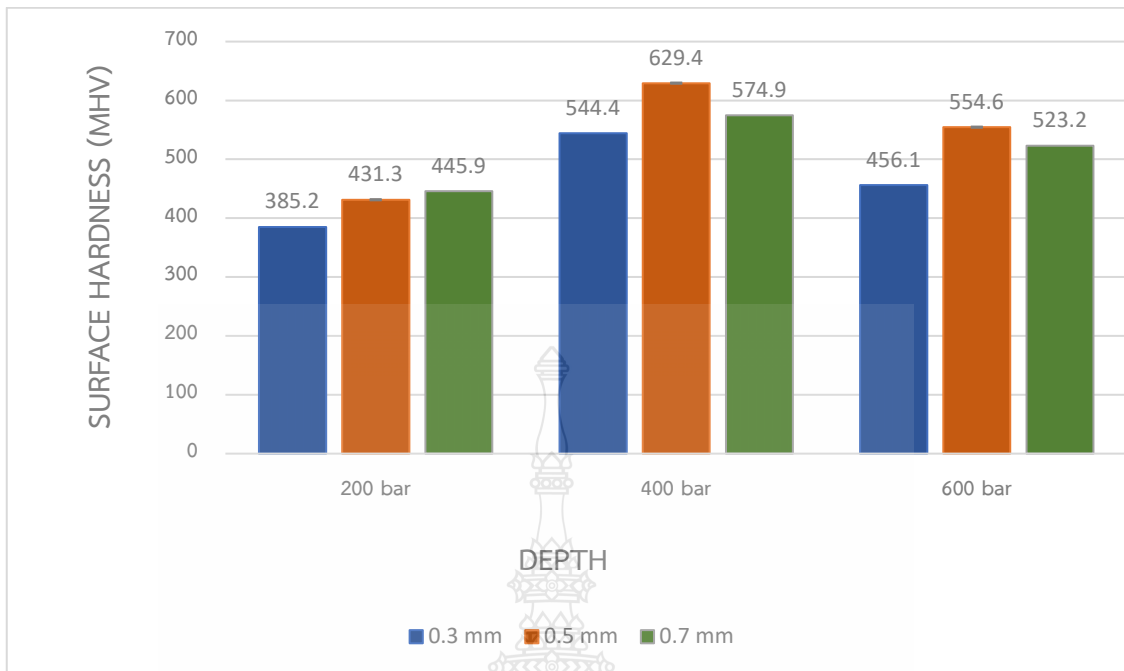
แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกัดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (MHV)
200 400 และ 600	0.3 0.5 และ 0.7	270-288

ค่าความแข็งแรงมาตรฐานของเหล็ก SKD11 ก่อนการกัดรีดผิวแข็งชิ้นงาน พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 279 MHV

การวัดค่าความแข็งแรงของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็ง การทดสอบค่าความแข็งแรง ด้วยบอลเซรามิกที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกในการกัดรีดผิวแข็งที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร การทดสอบค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (MHV) ของเหล็ก SKD11 แสดงค่าในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (MHV) ของเหล็ก SKD11 หลังการกัดรีดผิวแข็ง

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกัดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (MHV)
200	0.3	385.2
	0.5	431.3
	0.7	445.9
400	0.3	544.4
	0.5	629.4
	0.7	574.9
600	0.3	456.1
	0.5	554.6
	0.7	523.2



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV) ของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง ผลการทดลองค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิว ขึ้นงานทั้งหมด พบว่าค่าความแข็งผิวเฉลี่ย 505.03 MHV ซึ่งมีค่าความแข็งของผิวมากกว่าก่อนการกดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก

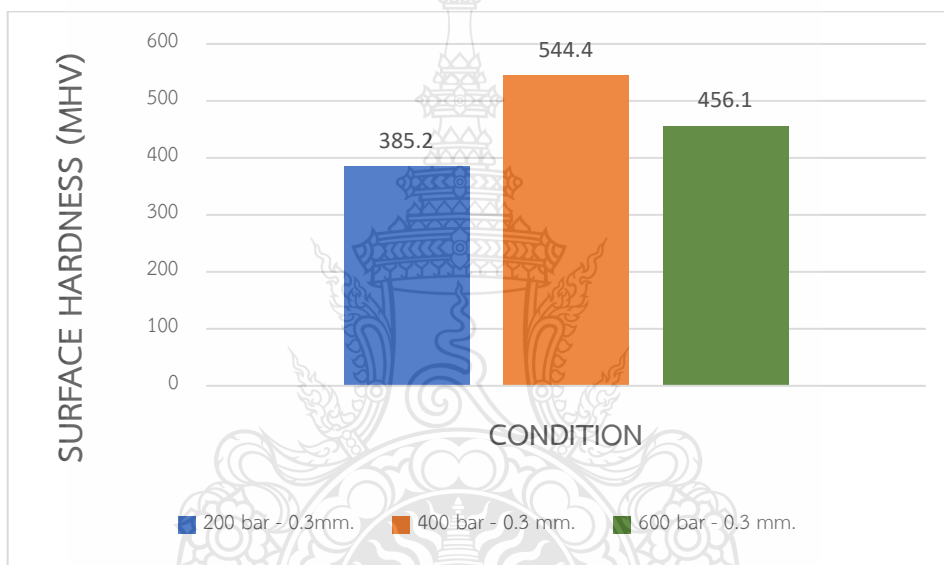
4.1.2 การวิเคราะห์แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ส่งผลต่อความแข็งเฉลี่ยผิวของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกดรีดผิวแข็งคงที่ ที่ความลึก 0.3 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งในสถานะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ความลึก 0.3 มิลลิเมตร ขึ้นงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 544.4 MHV ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.3 มิลลิเมตร

ความลึกในการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
0.3	200	385.2
	400	544.4
	600	456.1



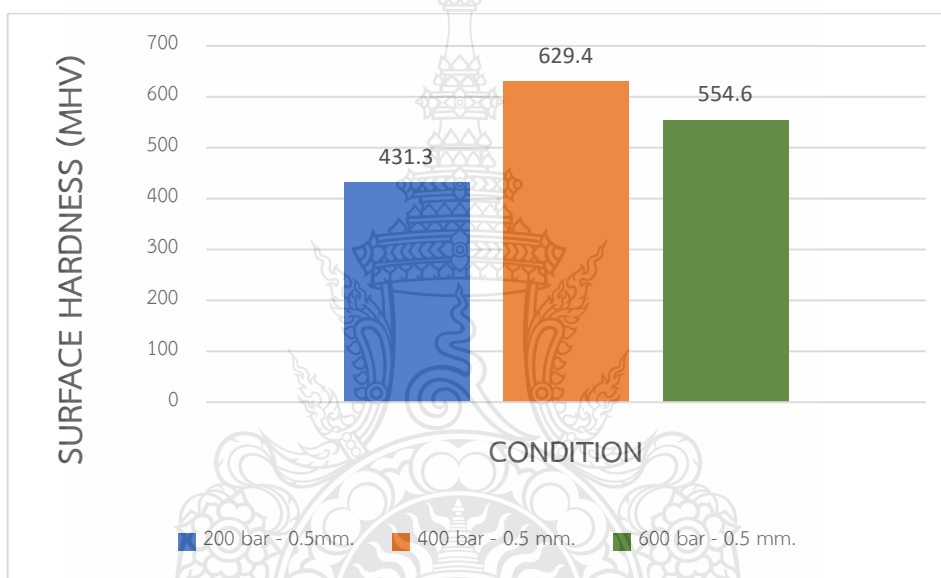
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.3 มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกดรีดผิวแข็งคงที่ ที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งในสภาวะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 629.4 MHV ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.5 มิลลิเมตร

ความลึกในการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
0.5	200	431.3
	400	629.4
	600	554.6



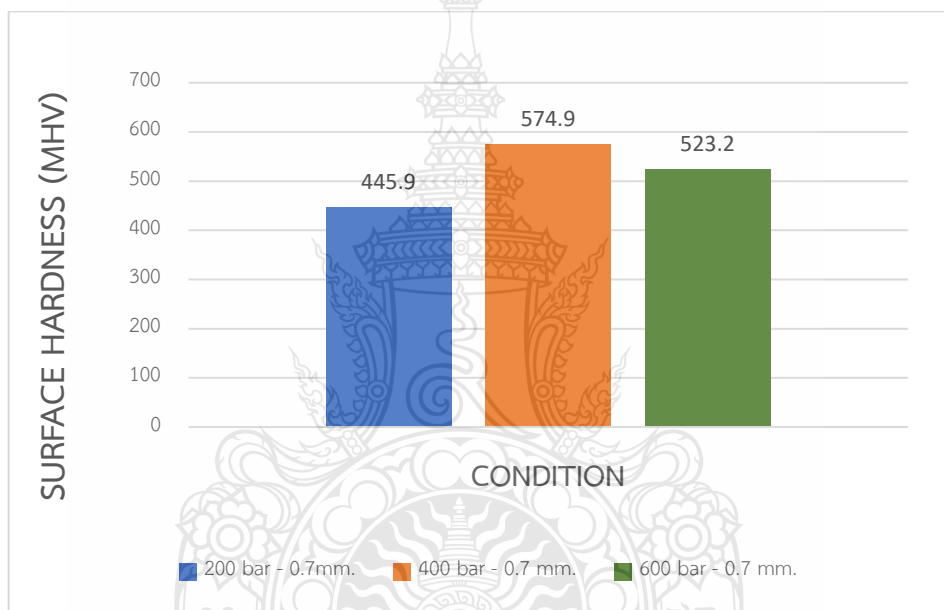
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.5 มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกดรีดผิวแข็งคงที่ ที่ความลึก 0.7 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งในสภาวะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ความลึก 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 574.9 MHV ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.7 มิลลิเมตร

ความลึกในการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
0.7	200	445.9
	400	574.9
	600	523.2



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ 0.7 มิลลิเมตร

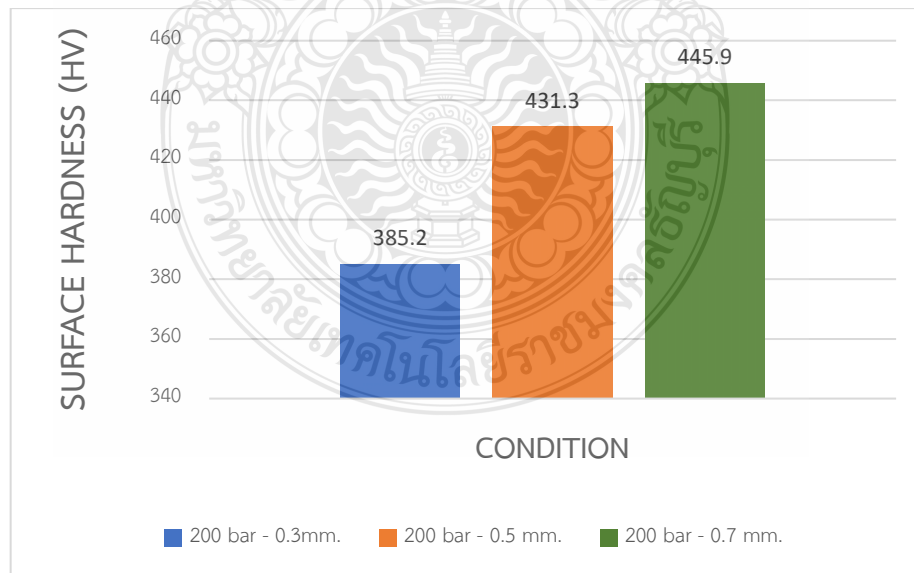
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างที่ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200 400 และ 600 บาร์ พบว่าค่าความแข็งสูงเมื่อความลึกที่ 0.5 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 400 บาร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ยผิวสูง พบว่าค่าความแข็ง ที่ความลึกของการกดรีดผิวแข็งลดลงจาก 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร และความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตรทุกแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกพบว่าค่าความแข็งผิวลดลงด้วย ความลึกที่เหมาะสมสำหรับการกดรีดผิวแข็งคือ 0.5 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งเฉลี่ยผิวของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร และ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกคงที่ ที่ความดัน 200 บาร์

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งในสถานะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ความลึก 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.7 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 445.9 MHV ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สถานะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกรัดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
200	0.3	385.2
	0.5	431.3
	0.7	445.9



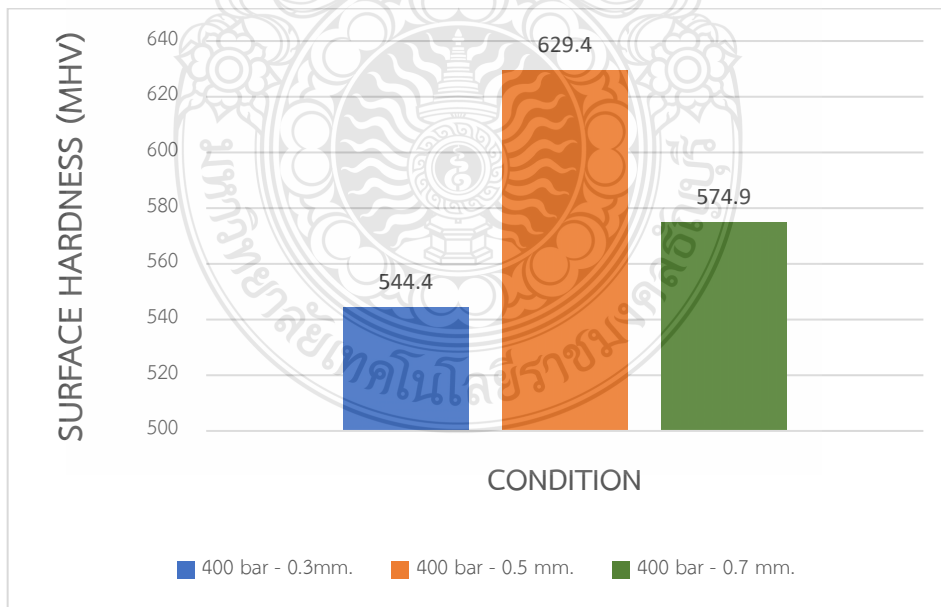
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สถานะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกคงที่ ที่ความดัน 400 บาร์

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งในสภาวะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 400 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ความลึก 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 629.4 MHV ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกรัดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
400	0.3	544.4
	0.5	629.4
	0.7	574.9



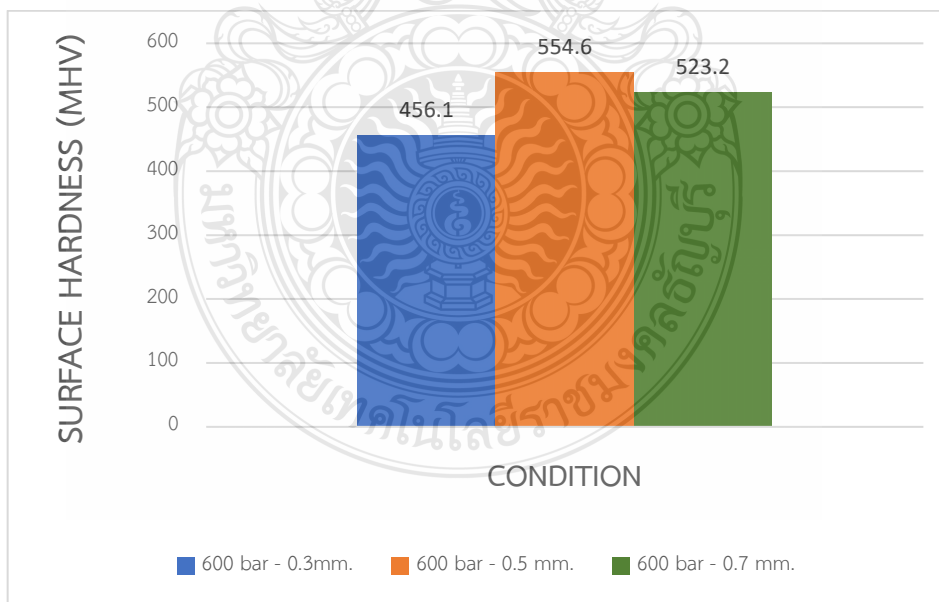
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกคงที่ ที่ความดัน 600 บาร์

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งในสภาวะความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 600 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ความลึก 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ และที่ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.7 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุดที่ 475.4 MHV ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกรัดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย (MHV)
600	0.3	456.1
	0.5	554.6
	0.7	523.2



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ให้ค่าความแข็งสูงสุด และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 629.4 MHV และที่แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก 200 และ 600 บาร์ มีค่าความแข็งที่ลดลง เนื่องจากชั้นความลึกผิวมีผลต่อความแข็งผิวชิ้นงาน การเปลี่ยนรูปแบบอลาสติกเกิดจากการใช้แรงดันพอเหมาะสัมพันธ์กับความลึกของการกรัดผิวแข็งที่อุณหภูมิปกติ โดยความหนาของชั้นโลหะเกิดขึ้นหลังจากจากบัพอัดของพื้นผิวจะมากขึ้นเมื่อการกรัดผิวที่ลึกขึ้น แรงดันที่เหมาะสมจะเพิ่มประสิทธิภาพของการบวมการกรัดผิวแข็ง

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของเหล็ก SKD11 ในสภาวะการกรัดผิวแข็ง จากข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของเหล็ก SKD11 จากตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งผิว ได้จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างความแข็งผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งในแต่ละสภาวะ

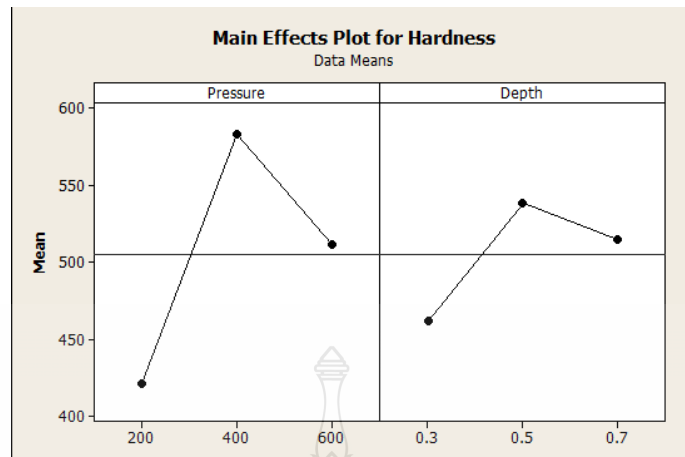
ตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งผิว

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressure	2	118799	118799	59399	534.41	0.000
Depth	2	27634	27634	13817	124.31	0.000
Pressure* depth	4	4712	4712	1178	10.60	0.000
Error	18	2001	2001	111		
Total	26	153145				

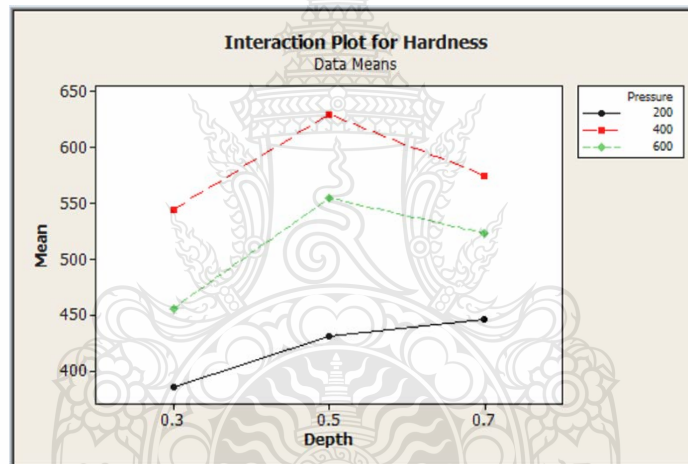
S = 10.5427 R-Sq = 98.69% R-Sq(adj) = 98.11%

เมื่อพิจารณาค่าแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิว คือ ความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มีความสัมพันธ์กัน ที่ค่า P-Value ของปัจจัย Pressure, Depth, Pressure* depth = 0.000 < (0.05) ซึ่งส่งผลร่วมกันต่อความแข็งของผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

ผลวิเคราะห์อิทธิพลหลัก ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวคือ ความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มีความสัมพันธ์กันในการกรัดผิวแข็ง รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 ผ่านการกรัดผิวแข็ง พบว่าค่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 400 บาร์ ค่าความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.5 มิลลิเมตรจะทำให้ความแข็งผิวชิ้นงานมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลหลักของความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกรัดรีดผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งผิว



รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลหลักเปรียบเทียบความลึกและแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกรัดรีดผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งผิว

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งของชั้นความลึกผิว

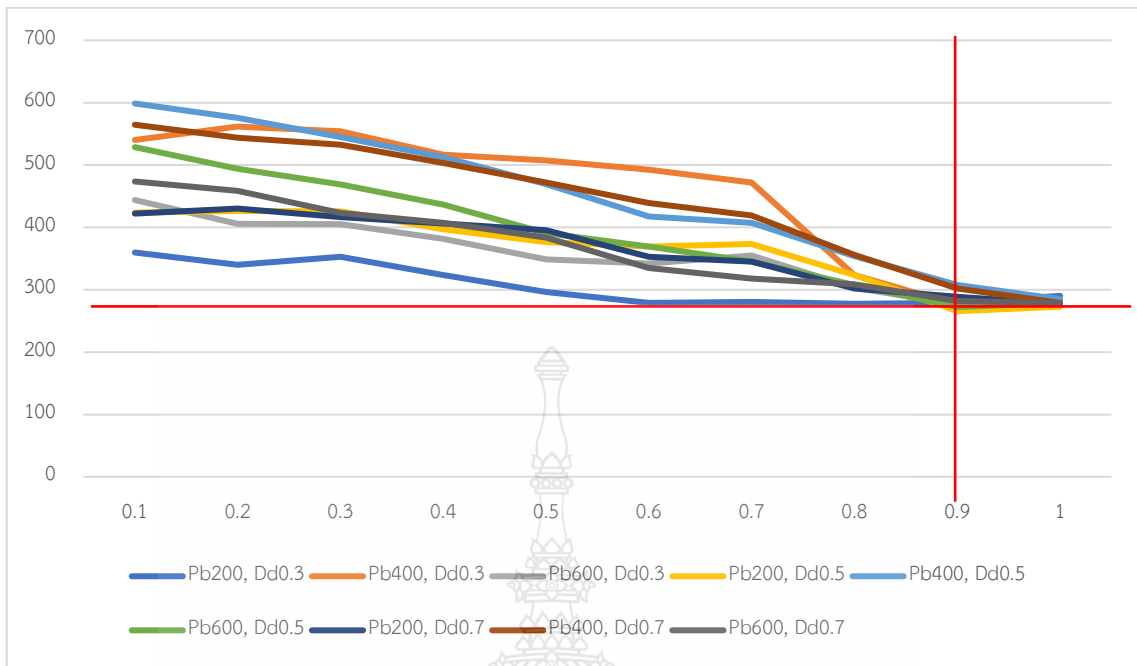
จากข้อมูลการทดสอบค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดรีดผิวแข็งโดยการวัดที่ชั้นความลึกผิว 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร จำนวนจุดกด 10 จุด/ชิ้นงาน ซึ่งการทดสอบค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 ปรากฏผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ ชั้นความลึกผิว 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

ชั้นความลึก ในการกด วัดผิวแข็ง	Dd 0.3			Dd 0.5			Dd 0.7		
	Pb200	Pb400	Pb600	Pb200	Pb400	Pb600	Pb200	Pb400	Pb600
0.1	359.7	540.1	443.9	423.5	598.7	528.7	422	564.6	473.6
0.2	340.1	561.7	405.9	426.3	575.6	493.9	430.2	543.9	458.5
0.3	352.6	554	405.2	425.6	545	468.8	416.4	532.4	423.4
0.4	323.5	516.4	381.6	397.1	512.3	436.3	406.3	503.5	407.2
0.5	296.2	507.5	348.9	376.3	469.3	391	395.6	472.1	383.8
0.6	278.9	492.6	342.2	369.3	417.3	369.3	352.6	439.3	335
0.7	280.3	472.2	355	373.6	407.2	344.9	344.9	418.9	317.7
0.8	277.5	323.4	302.9	323.4	354	307.5	302.1	355.7	308.8
0.9	278.9	275.8	276.5	265.7	307.5	272.2	288.8	302.1	282.2
1.0	290.2	283.2	279.3	272.6	284.9	278.7	277.5	278.8	278.5

จากการทดสอบหาค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งพบว่า การกดรีดลึก 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งลึกจากผิว 0.8 มิลลิเมตร มีค่าความแข็ง 323.4 MHV จากนั้นเป็นค่าความแข็งฐานของชิ้นงาน การกดรีดลึก 0.5 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งลึกจากผิว 0.9 มิลลิเมตร มีค่าความแข็ง 307.5 MHV จากนั้นเป็นค่าความแข็งฐานของชิ้นงาน และที่การกดรีดลึก 0.5 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ มีค่าความแข็งลึกจากผิว 0.9 มิลลิเมตร มีค่าความแข็ง 302.1 MHV

จากการทดสอบหาค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกดรีดผิวแข็งสามารถสรุปได้ว่า ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ การกดรีดลึก 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าความแข็งลึกสูงสุดจากผิว 0.9 มิลลิเมตร โดยมีค่าความแข็งของผิว 307.2 MHV ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็ง

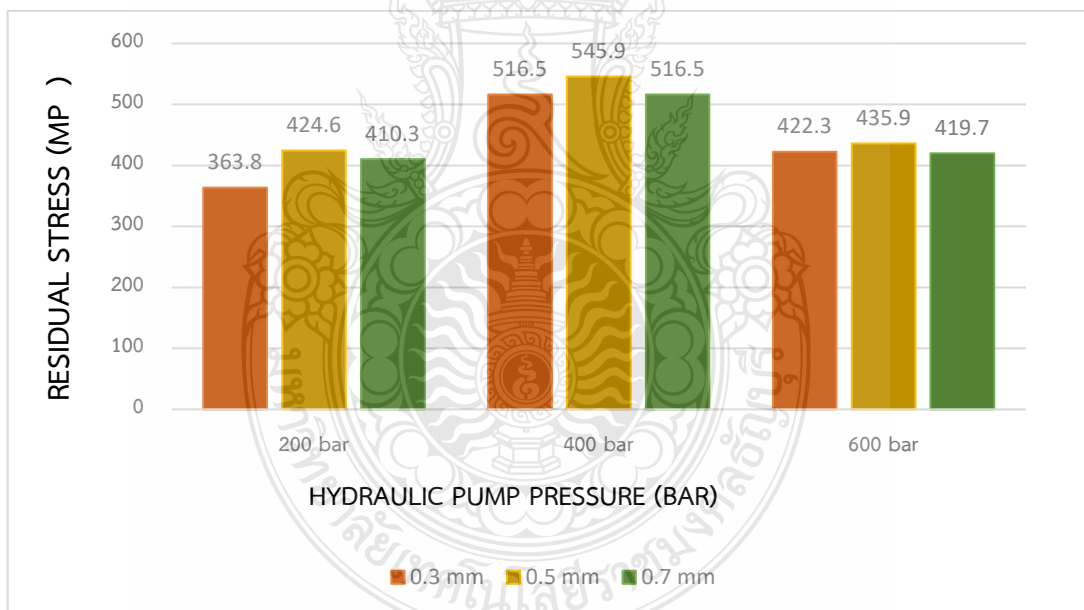
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความเค้นตกค้าง

ในการทดลองการกรดรีดผิวแข็งเหล็ก SKD11 ด้วยบอลเซรามิกที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ ความลึกในการกรดรีดผิวแข็ง 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบ Portable X-ray Residual Stress Analyzer (μ -X360s) เพื่อใช้ในการหาค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ

4.3.1 ผลการทดสอบค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรดรีดผิวแข็ง การทดสอบค่าความเค้นตกค้างบนผิวเฉลี่ย (MPa) ของเหล็ก SKD11 โดยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ใช้สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง บนพื้นผิวของ SKD11 ความแตกต่างของความเค้นตกค้างบนพื้นผิวที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็ง แสดงค่าในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa) ของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็ง

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกในการกรัดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa)
200	0.3	363.8
	0.5	424.6
	0.7	410.3
400	0.3	516.5
	0.5	545.9
	0.7	535.6
600	0.3	422.3
	0.5	435.9
	0.7	419.7



รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa) ของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ย (MPa) บนพื้นผิวของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง ผลการทดลองหาค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดผิวแข็งชิ้นงานทั้งหมด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกรัดผิวแข็งที่สุดคือ

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ และ ความลึกของการกรัดผิว 0.7 มิลลิเมตร ค่าความเค้นตกค้างอัด 545.9 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อมีค่าความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น

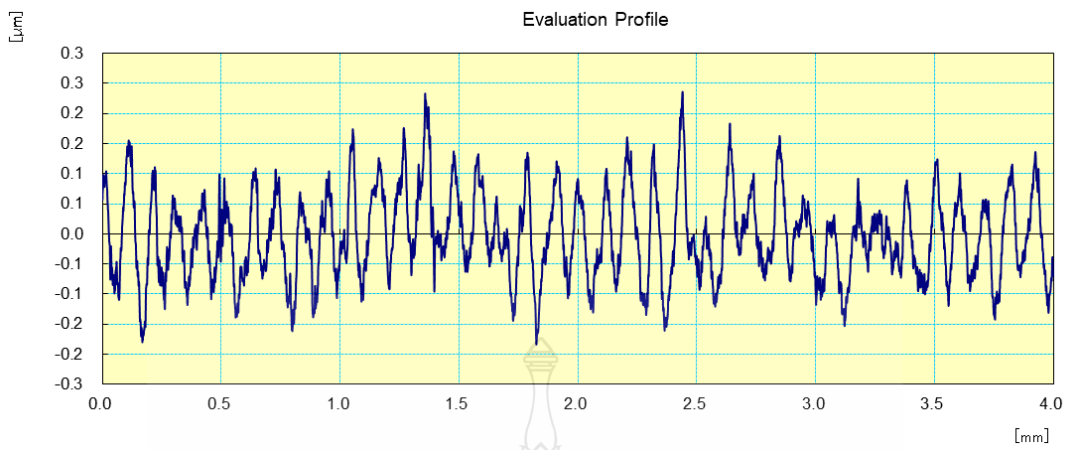
4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบค่าความหยาบผิว

การทดลองการกรัดผิวเชิงลึก SKD11 ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกรัดผิวเชิง 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกการกรัดผิวเชิง 0.3 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อหาความหยาบผิว ด้วยเครื่องมือที่ใช้วัดความหยาบผิวแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Mitutoyo Surface Roughness test SJ-310 การวัดความหยาบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิค Coherence Scanning Interferometry (CSI) ในการวัด จะใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบบรอดแบนด์และรวมเทคนิคการสแกนแบบแนวตั้ง ด้วยเทคนิคออปติคัล เมตริกซ์เพื่อให้ได้การวัดพื้นผิวแบบสามมิติ พารามิเตอร์ Ra(Sa), Rq(Sp), Rz(Sz) สอดคล้องกัน

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการทดลองกรัดผิวเชิงด้วย บอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) ในการกดบอลกรัดผิวเชิง 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวเชิง (Depth of Burnishing) 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร

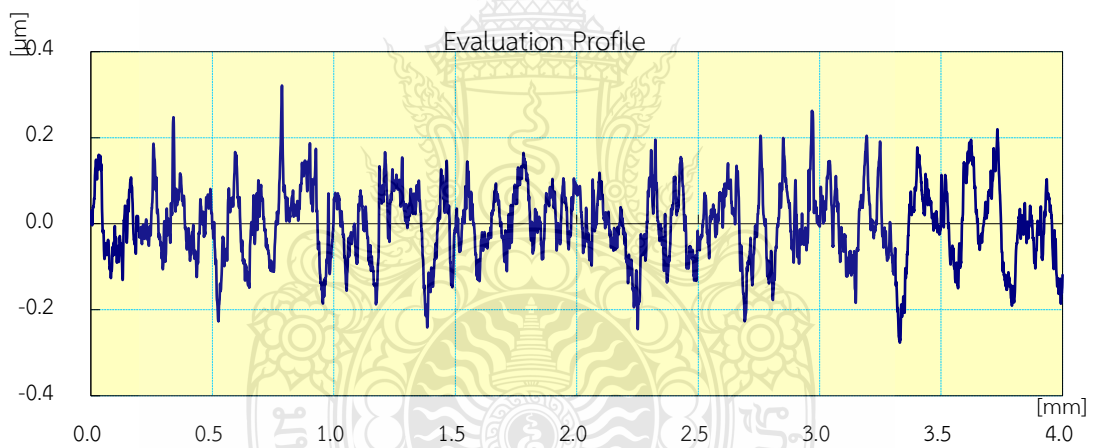
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของเหล็ก SKD11

แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการ กรัดผิวเชิง (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์ความหยาบผิว		
		Ra(Sa) (μm)	Rq(Sp) (μm)	Rz(Sz) (μm)
200	0.3	0.059	0.072	0.347
	0.5	0.069	0.085	0.480
	0.7	0.250	0.320	1.706
400	0.3	0.291	0.362	2.056
	0.5	0.315	0.398	2.631
	0.7	0.404	0.532	3.734
600	0.3	0.408	0.521	3.104
	0.5	0.429	0.534	2.911
	0.7	0.613	0.908	5.790



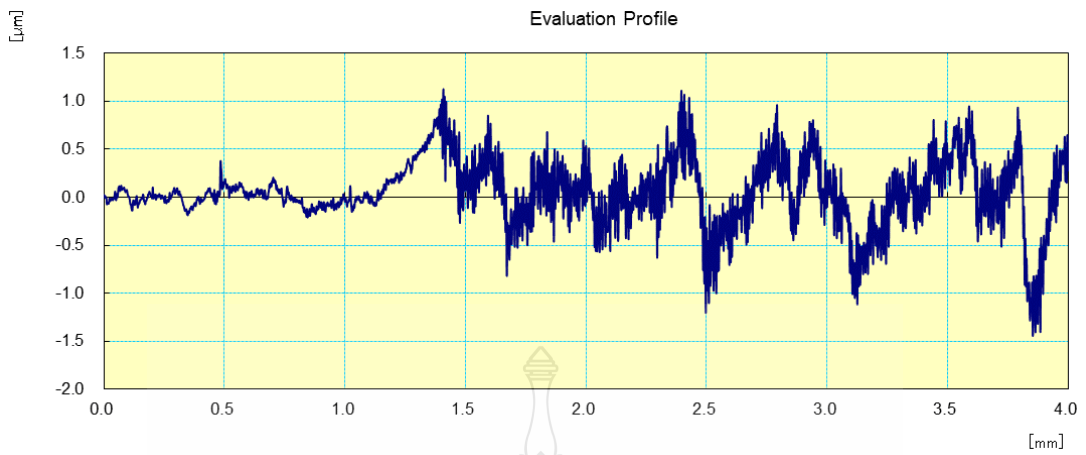
Ra	0.059 µm	Rq	0.072 µm	Rz	0.347 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 200 bar, Db = 0.3 mm



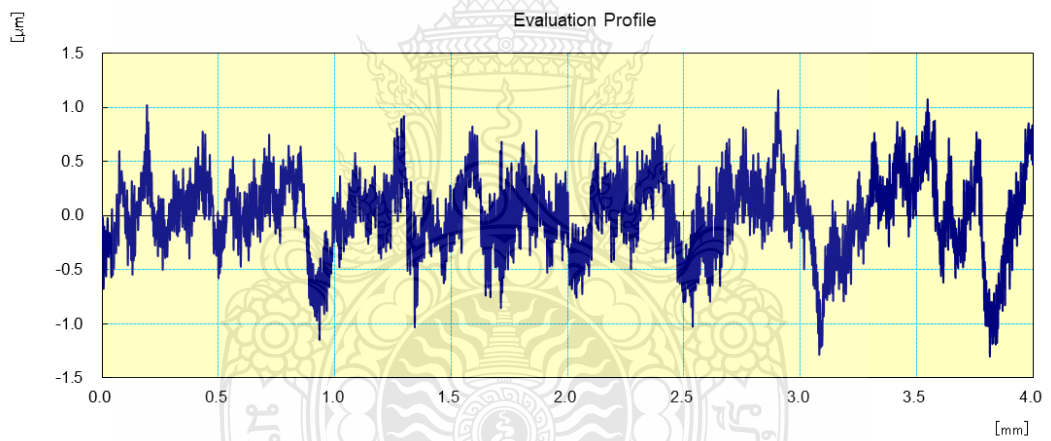
Ra	0.069 µm	Rq	0.085 µm	Rz	0.480 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 200 bar, Db = 0.5 mm



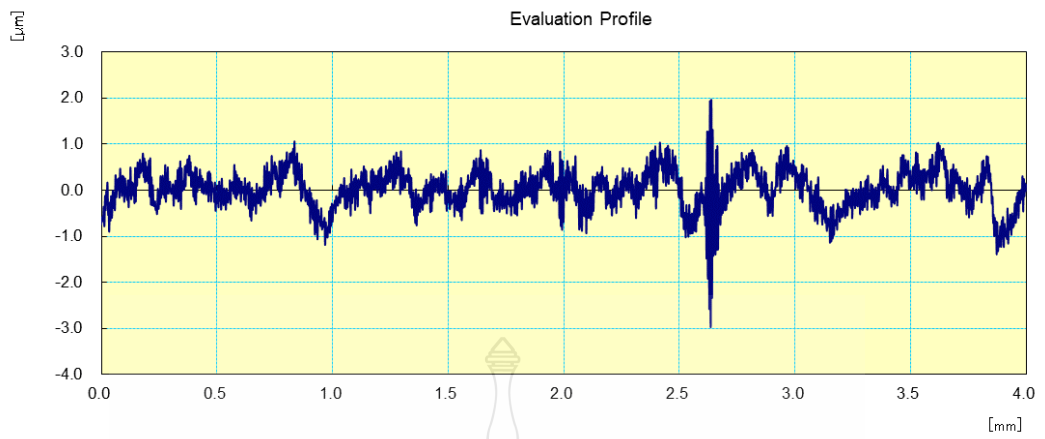
Ra	0.250 µm	Rq	0.320 µm	Rz	1.706 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 200 bar, Db = 0.7 mm



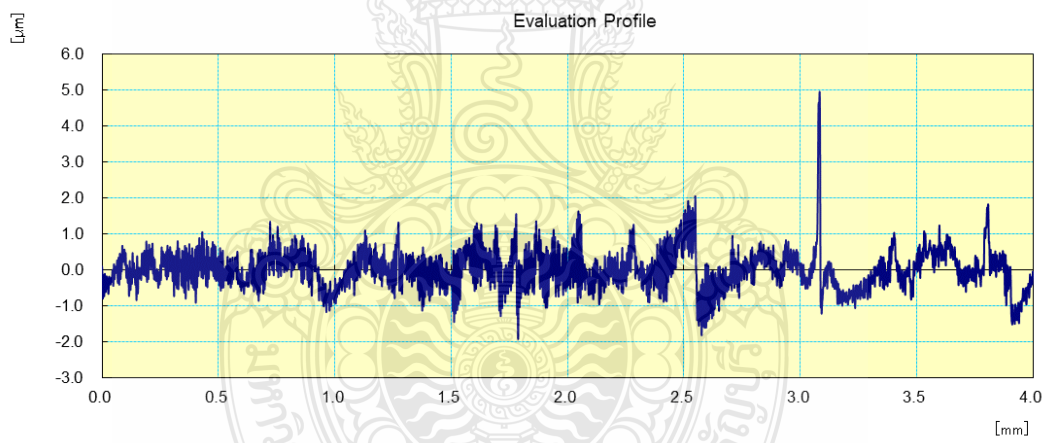
Ra	0.291 µm	Rq	0.362 µm	Rz	2.056 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 400 bar, Db = 0.3 mm



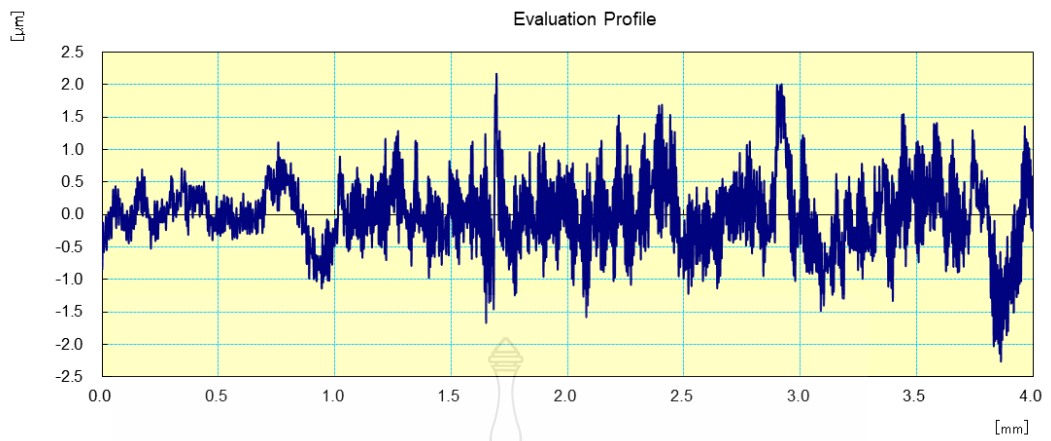
Ra	0.315 µm	Rq	0.398 µm	Rz	2.631 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 400 bar, Db = 0.5 mm



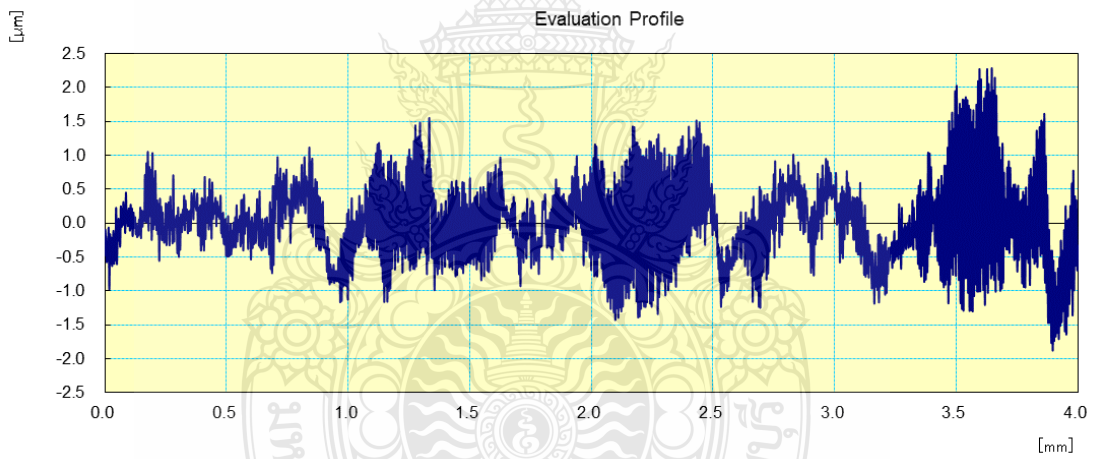
Ra	0.404 µm	Rq	0.532 µm	Rz	3.734 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 400 bar, Db = 0.7 mm



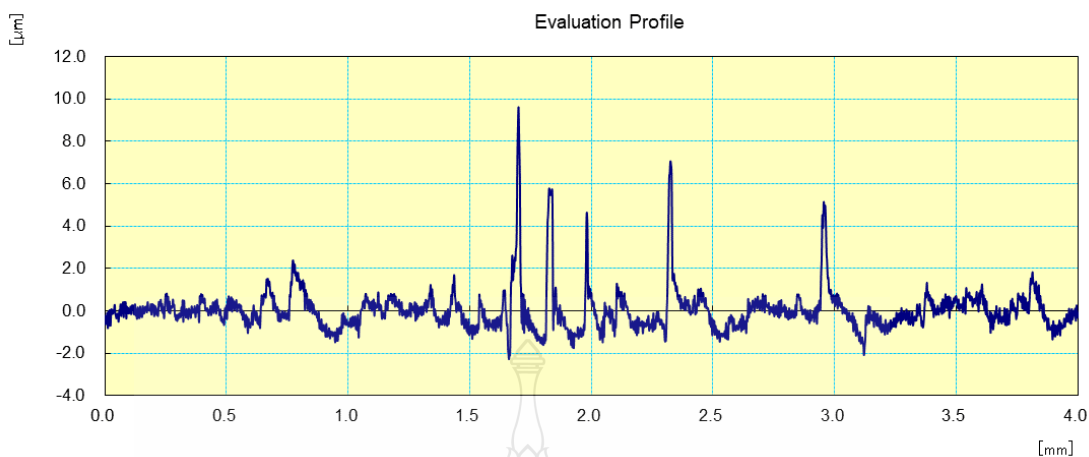
Ra	0.408 µm	Rq	0.521 µm	Rz	3.104 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 600 bar, Db = 0.3 mm



Ra	0.429 µm	Rq	0.534 µm	Rz	2.911 µm
----	----------	----	----------	----	----------

Pb = 600 bar, Db = 0.5 mm



Ra	0.613 µm	Rq	0.908 µm	Rz	5.790 µm
----	----------	----	----------	----	----------

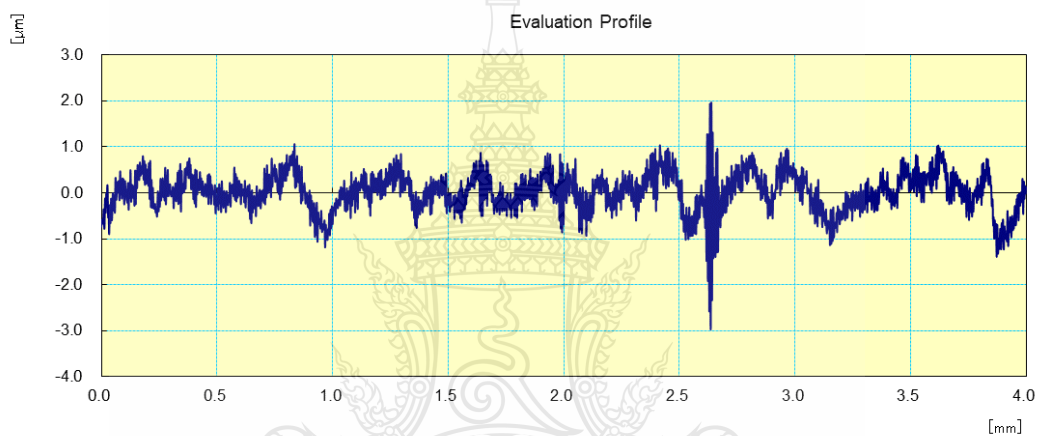
Pb = 600 bar, Db = 0.7 mm

รูปที่ 4.12 Topographyและพารามิเตอร์ของพื้นผิวหลังจากการกัดผิวแข็ง

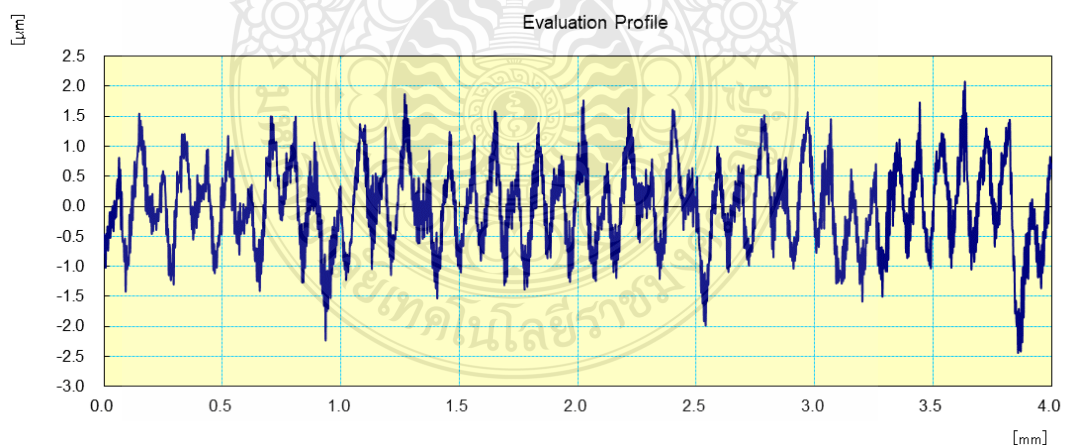
จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของชิ้นงาน หลังการทดลองกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก จากการวิเคราะห์ของภาพพื้นผิว ผลมาจากความสูงของพื้นผิวที่ยังไม่ได้กัดผิวแข็งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดความสูงที่สุด Ra (Sa) = 1.40 µm, Rp (Sp) = 5.51 µm และ Rz (Sz) = 11.98 µm จากการวิเคราะห์ของภาพพื้นผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกัดผิวแข็ง พบว่าค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการกัดผิวแข็งได้รับค่าพารามิเตอร์ช่วงความกว้างมีดังต่อไปนี้: Ra (Sa) = 0.060-0.613 µm, Rp (Sp) = 0.072-1.908 µm และ Rz (Sz) = 0.347-5.790 µm ค่าพารามิเตอร์ช่วงความสูงที่สุดอยู่ที่ (Ra (Sa) = 0.429 – 0.613 µm) หลังการทดลองการกัดผิวแข็งด้วยบอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกัดบอลกัดผิวแข็ง 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อไปนี้ อธิบายรูปร่างโดยทั่วไปการกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกทำให้ความสูงของพื้นผิวลดลง การกัดผิวแข็งช่วงของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดที่ดีที่สุด Ra (Sa) = 0.315 µm, Rp (Sp) = 0.398 µm Rz (Sz) = 2.631 µm ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกัดบอลกัดผิวแข็ง 400 บาร์ และความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร

4.3.1 ผลของการทดลองความหยาบผิวของเหล็ก

จากข้อมูลในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของเหล็ก SKD11 หลังการรีดผิวแข็ง ค่าความแตกต่างของความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าเมื่อชิ้นงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตรจะให้ค่า Ra (Sa) = 0.315 μm , Rp (Sp) = 0.398 μm Rz (Sz) = 2.631 μm ซึ่งเป็นค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการกดรีดผิวแข็ง จะให้ค่า Ra (Sa) = 0.562 μm , Rp (Sp) = 0.688 μm และ Rz (Sz) = 3.664 μm จะเห็นว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการกดรีดผิวแข็งจะมีค่าความหยาบผิวดลดลง



(a) Pb = 400 bar, Db = 0.5 mm



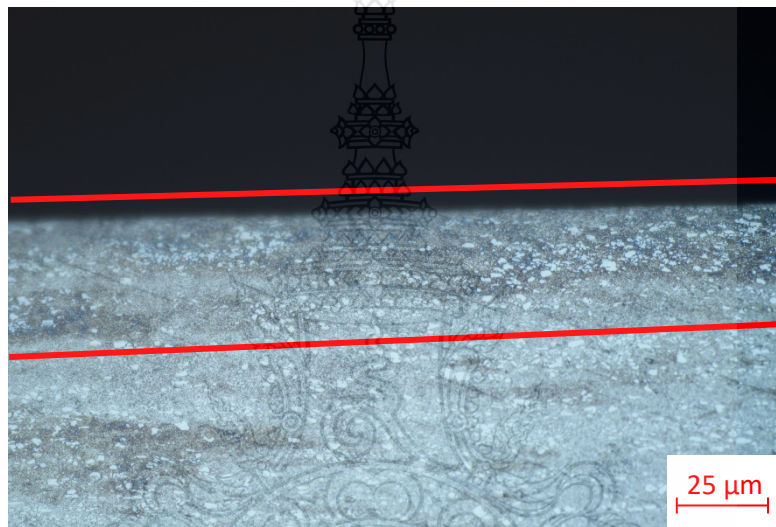
(b) Base

รูปที่ 4.13 ค่าความหยาบผิวของเหล็ก SKD11 (a) กดรีดผิวแข็งที่ Pb = 400 bar, Db = 0.5 mm

(b) Base

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างจุลภาคของผลึก

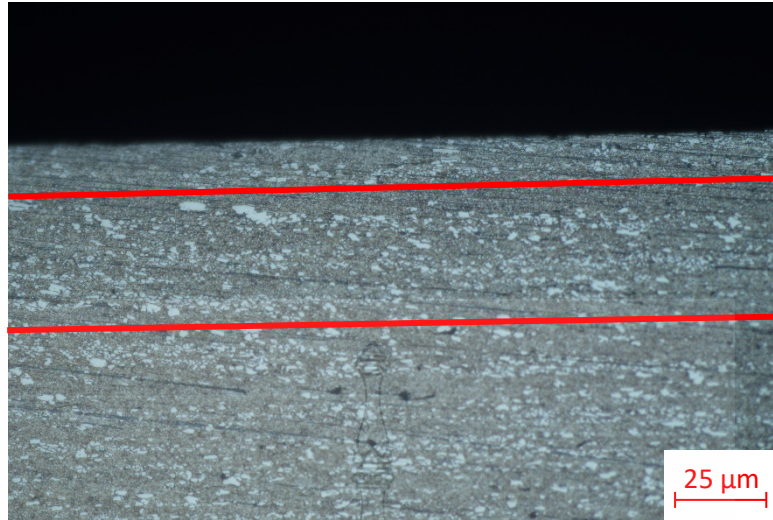
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยจะพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก หลังการกดรีดผิวแข็ง จากรูปที่ 4.16 พบว่า เหล็ก SKD11 ที่ผ่านกระบวนการกดรีดผิวแข็งจะมีโครงสร้างจุลภาคเกิดการอัดตัว ซึ่งเกิดการดิสโลเคชันแบบขอบ (Edge Dislocation) เกิดการบิดเบี้ยวในผลึก จากรูปจะเป็นเกรนที่มีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น และลักษณะของเกรนที่เรียวยาวตามแนวการกดรีด ซึ่งสามารถสังเกตความแตกต่างได้จากสภาวะการกดรีดผิวแข็งที่ต่างกัน



(a) $P_b = 200 \text{ bar}$ $D_b = 0.5 \text{ mm}$



(b) $P_b = 400 \text{ bar}$ $D_b = 0.5 \text{ mm}$



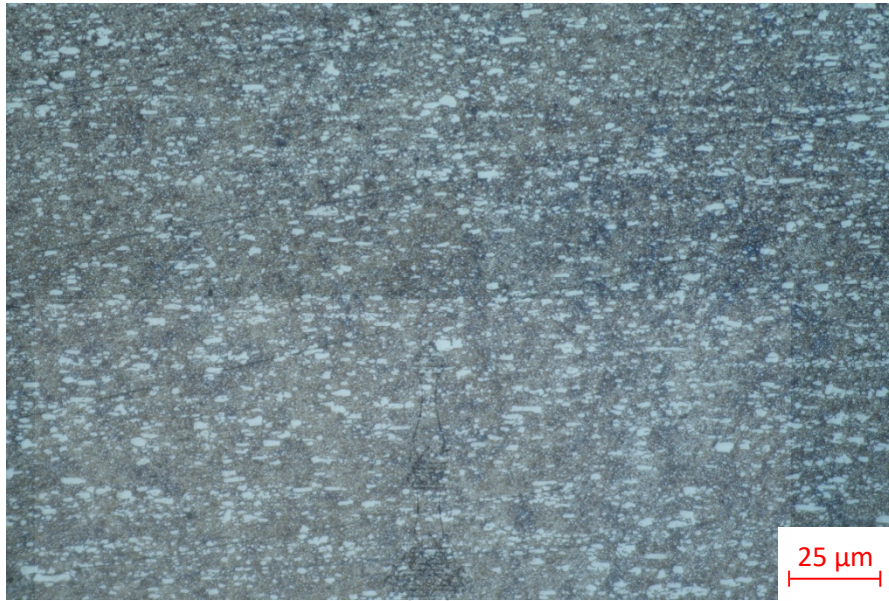
(c) $P_b = 600 \text{ bar}$ $D_b = 0.5 \text{ mm}$

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านกระบวนการกดรีดผิวแข็ง

จากการศึกษาพฤติกรรมการกดรีดผิวแข็งด้วยบดเซรามิกของเหล็ก SKD11 โดยการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เหล็กที่ผ่านกระบวนการกดรีดผิวแข็งจะเกิดการอัดตัวของเกรนในบริเวณที่ทำการกดรีดผิวแข็ง เมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนการกดรีดผิวแข็งที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนภายใน แสดงดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ลักษณะของเม็ดเกรนจะมีขนาดเรียวยาวตามระนาบการกดรีดโดยสามารถวัดขนาดได้ตามรูป

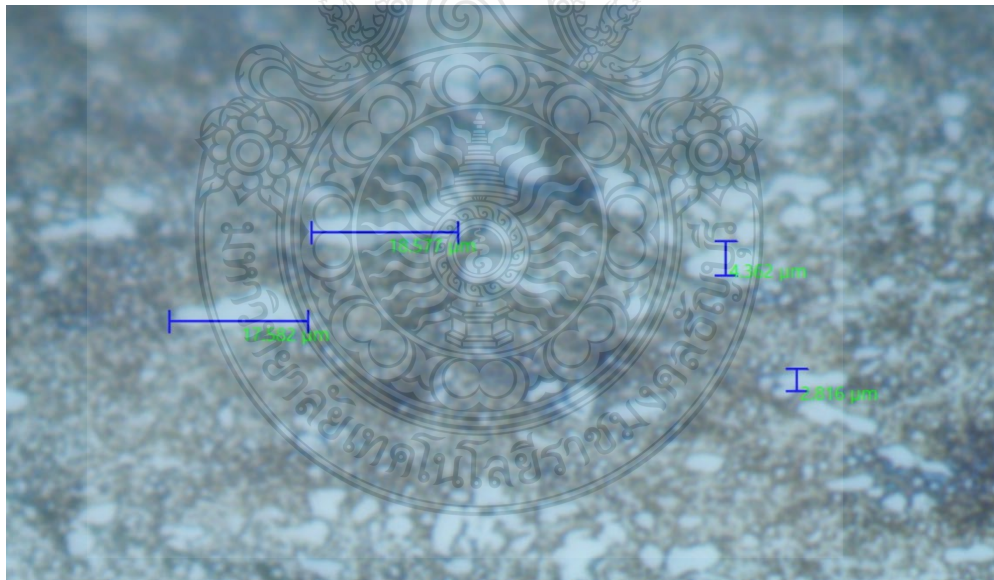


(a) $P_b = 400 \text{ bar}$, $D_b = 0.5 \text{ mm}$



(b) Base

รูปที่ 4.15 โครงสร้างผลึกของเหล็ก SKD11 เปรียบเทียบ (a) กัดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 400 \text{ bar}$, $D_b = 0.5 \text{ mm}$ (b) Base



รูปที่ 4.16 ขนาดเกรนของเหล็ก SKD11

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค่าความเปลี่ยนแปลงในกระบวนการกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก โดยการหาค่าความแข็งผิว (Surface Hardness) ความแข็งลึกจากผิว (Hardness Depth) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ความหยาบผิว (Surface Roughness) การวัดโครงสร้างจุลภาคของผลึก (Microstructure) กระบวนการกัดผิวแข็งเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่มีความโตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ในการกัดผิวแข็งใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 600 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง SKD11 สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบความแข็งผิวบนพื้นผิวของเหล็ก SKD11 ค่าความแข็งผิวของเหล็กก่อนกัดผิวแข็ง มีค่าเฉลี่ยประมาณ 279 MHV หลังการกัดผิวด้วยบอลเซรามิกด้วยเงื่อนไขการทดลอง พบว่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุดคือ 629.4 MHV ซึ่งเงื่อนไขที่มีอิทธิพลหลักต่อความแข็งผิวอย่างมีนัยสำคัญคือแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกัดผิวแข็ง ความแข็งที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการชุบผิวแข็งพบว่าเทียบเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

5.1.2 การวิเคราะห์ความแข็งของแต่ละชั้นความลึกผิวของเหล็ก SKD11 โดยค่าความแข็งผิวของเหล็กมีค่าเฉลี่ยประมาณ 279 MHV หลังการกัดผิวแข็ง ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ ชั้นความลึกผิว 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร สามารถสรุปได้ว่า ความแข็งที่เพิ่มขึ้นมีความลึกที่ระดับ 0.9 มิลลิเมตร ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการชุบผิวแข็งมีค่าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

5.1.3 การวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้างที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานในระหว่างการกัดผิวแข็ง เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) การวัดค่าความเค้นบนพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการกัดผิวแข็ง เป็นการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างที่เกิดจากแรงอัดในแนวนอนบนพื้นผิว ค่าความเค้นตกค้างของแรงอัดเพิ่มขึ้น เกิดจากการอัดตัวของพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการ

รีดผิวแข็งที่สุดคือ แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ และ ความลึกของการกรัดรีดผิว 0.7 มิลลิเมตร ค่าความเค้นตกค้างอัด 545.9 MPa

5.1.4 การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวการใช้เทคนิคการ Coherence Scanning Interferometry (CSI) หลังการทดลองการกรัดรีดผิวแข็งด้วยบอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกดบอลกรัดรีดผิวแข็ง 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อไปนี้อธิบายรูปร่างโดยทั่วไปการกรัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกทำให้ ความสูงของพื้นผิวลดลง การกรัดรีดผิวแข็งช่วงของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดที่ดีที่สุด Ra (Sa) = 0.059 μm , Rp (Sp) = 0.072 μm Rz (Sz) = 0.347 μm ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกดบอลกรัดรีดผิว แข็ง 200 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.3 มิลลิเมตร แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าความแข็ง ผิวซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยพบว่าค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดความหยาบผิว Ra (Sa) = 0.315 μm , Rp (Sp) = 0.398 μm Rz (Sz) = 2.631 μm ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกดบอลกรัดรีดผิว แข็ง 400 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร เป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์กำหนดสามารถ ยอมรับได้ และปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักส่งผลต่อค่าความหยาบผิวคือแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ความลึก ของการกรัดรีดผิวแข็งมีอิทธิพลร่วมกันที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของชิ้นงาน

5.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD11 ที่ผ่านการกรัดรีดผิวแข็ง ด้วยกล้อง จุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กพบว่าบริเวณที่ผ่านการกรัดรีดผิวแข็งจะเกิดการอัดตัวของเกรน มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีการกรัดรีดผิวแข็งเมื่อเทียบกับเหล็ก SKD11 ที่ไม่ได้กรัดรีดผิว แข็ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้ในการประกอบการวิเคราะห์ผลให้ ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น เช่น ความเร็วการกรัดรีดผิวแข็ง (Burnishing speed) ระยะห่างการกรัดรีดในแต่ละ รอบ (Feed Rate) จำนวนครั้งในการกรัดรีดซ้ำ (Number of Burnishing) และสารหล่อลื่น (Lubricant) ความโตของบอลเซรามิก (Size of Ceramic Ball) เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] SKD11 เหล็กกล้าคาร์บอนวัสดุในงานต่าง ๆ, บริษัท MISUMI ประเทศไทย จำกัด (Online), 2563, Available:https://th.misumiec.com/th/pr/recommend_category/carbon_steel201904/
- [2] SKD11 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง, บริษัท จุฬาวรรณ จำกัด (Online), 2563, Available: <https://www.juthawan.co.th/product-item/skd-11/>
- [3] SKD11 คุณสมบัติและการใช้งาน, บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด (Online), 2563, Available: <http://www.bssteel.co.th/product-detail-DC11.php>
- [4] SKD11 การชุบผิวแข็ง, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) (Online), 2563, Available: https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=85&read=true&count=true
- [5] มนตรี ชาวสุข “อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งและความเค้นตกค้างผิวในกระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอล”วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2561.
- [6] A.A.Ibrahim, S.M.Abd Rabbo, and A.A.Ebied, “Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy logic,” **Journal of materials processing technology**, vol 209, 2009, pp. 2428–2435, Available: ScienceDirect (23 November 2017).
- [7] Malleswara Rao J. N. , Chenna Kesava Reddy A. and Rama Rao P. V., “The effect of roller burnishing on surface hardness and surface roughness on mild steel specimens”, **International Journal Of Applied Engineering Research**, vol. 1(4), 2011, pp. 777–785. April 2011.
- [8] Masato Okada, Shohei Suenobu, Kei Watanabe, Yorihiro Yamashita and Naoki Asakawa, “Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects,” **Mechatronics**, vol.29, 2015, pp. 110–118, Available: Elsevier Ltd (3 March 2018).
- [9] N. H. Loh and S. C. Tam, “Effects of ball burnishing parameters on surface finish A literature survey and discussion,” **Precision Engineering**, vol. 10(4), pp.215-220, October 1988.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Muñoz and J.A. Sánchez, “Quality improvement of ballend milled sculptured surfaces by ball burnishing,” **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, 2005, pp.1659–1668, Available: Elsevier Ltd (12 February 2018).
- [11] Liviu Luca, Sorin Neagu-Ventzel and Ioan Marinescu, “Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels,” **Precision Engineering** vol. 29, 2005, pp. 253– 256, Available: ScienceDirect (19 February 2018).
- [12] Pavan Kumar and Purohit G K, “Design and Development of Ball Burnishing Tool” **Proc. of Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering, AETAME, 2013**, pp.771-775, Available: Elsevier Ltd (13 November 2017).
- [13] Deepak Mahajan and Ravindra Tajane, “A Review on Ball Burnishing Process,” **International Journal of Scientific and Research Publications**, vol 3(4), 2013, pp. 1-8, Available: ijsrp.org (13 November 2017).
- [14] F.Klocke, J. Liermann, “Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces” Chair of Manufacturing Technologies, Technical University Aachen, Germany. 1998.
- [15] Surface Roughness, JIS B (online), 2018, Available: us.misumi-ec.com/pdf/press/us_12e_pr1257.pdf (11 January 2018).
- [16] P.J. Withers and H.K.D.H. Bhadesia, “Residual Stress Part1-measurement Techniques”, **Materials Science and Technology**, vol.17, pp. 355-365, April 2001.
- [17] X-ray diffraction, Veqter (online), 2018, Available: veqter.co.uk/residual-stress-measurement/xray-diffraction (16 March 2018).
- [18] การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, Chang, 1994, p. 436 (Online), 2563, Available: <http://library.tru.ac.th/images/academic/book/b55056/09-Chapter-7.pdf>
- [19] อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำจร, “การวัดความแข็ง” (Online), 2563, Available: http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] ศิริชัย ต่อสกุล, “การศึกษาสมบัติเชิงกลจากกระบวนการรีดผิวละเอียด ด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551.
- [21] Liermann, J., “Hartdrehen wälzbelasteter Bauteile”, Dissertation WZL RWTH – Aachen, 1998
- [22] SECTION 22 CHIP REMOVAL OPERATIONS, (Online), 2563, Available: <https://docplayer.biz.tr/51891633-Bolum-22-talas-kaldirma-islemleri.html>
- [23] เอกสารปฏิบัติการประกอบรายวิชา 02206482 ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ, Computer Numerical Control, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] การคำนวณหาความเร็วรอบ speed และอัตราป้อน Feed, Design Engineer Life, (online), 2020, Available: <https://sites.google.com/site/aarlek567/home/kar-khanwn-khwamrew-rxb>
- [25] ผศ.สมนึก วัฒนศรียกุล, “การใช้วิศวกรรมย้อนรอย สำหรับหาคุณลักษณะด้านกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล, การชุบผิวแข็ง, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [26] A. Rodriguez, L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz and J. Albizuri “Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique” **Surface & Coatings Technology**, vol.206, 2012, pp.2817–2824, Available: Elsevier Ltd (3 February 2018).
- [27] Tao Zhang, NiloBugtai and Ioan D. Marinescu, “Burnishing of aerospace alloy: A theoretical–experimental approach,” **Journal of Manufacturing Systems**, vol.37, pp.472–478 , Available: ScienceDirect (13 February 2018).
- [28] N. M. Qureshi, Vaibhav B. Patil, Basavaraj D. Teli, Radhika S. Mohite and Sonal S. Patil, “Analysis of effect of ball and roller burnishing processes on surface roughness on EN8 Steel,” **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, vol. 4 (6), June 2015.

- [29] Lars Hiegemann, Christian Weddeling and A. Erman Tekkaya. “Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces” **Journal of Materials Processing Technology**, vol.232, pp.63–77, 2016.
- [30] ลักษณะของพื้นผิว Surface Texture, (Online), 2563, Available:
<http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/2103203%20Mech%20drawing/Ch3%20surface%20texture.pdf>
- [31] Surface Roughness (JIS B 0601-2001), (Online), 2563, Available:
<http://files.engineering.com/download.aspx?folder=1d149e35-945a-4839-9ef3-3162af3752f4&file=Binder2.pdf>
- [32] การเคลื่อนที่ และอัตราเร็วของแสงและการสะท้อนแสงของแสง, (Online), 2563, Available:
http://pornpimon345.blogspot.com/p/blog-page_4.html



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

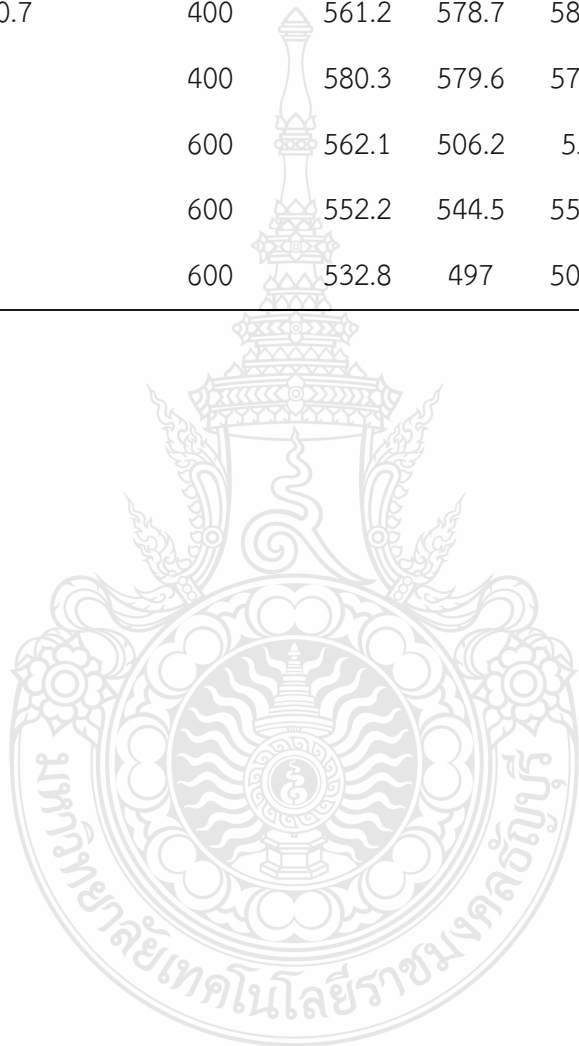
ข้อมูลการทดลองค่าความแข็งผิว

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดรีดผิวแข็ง

งานชิ้นที่	ความลึกการกรัด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดัน น้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าความแข็ง (HV)				
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
1		200	391.4	387.5	392.8	389.5	375.7
2		200	388.2	389.7	391.1	389.2	392.5
3		200	397.5	346.2	354.8	395.1	396.9
4		400	542.9	531.8	552.6	520.7	535.8
5	0.3	400	552.7	548.3	544.7	538.8	540
6		400	541.1	543.7	551.3	587.3	534.7
7		600	462.1	432.8	472.5	454.5	445.7
8		600	459.8	467.7	462.8	465.2	459.1
9		600	435.7	454.6	457.1	463.3	448.8
10		200	425.3	424.3	477.9	395.6	456.8
11		200	402.2	447.6	412	437.1	442
12		200	471.1	473	419.1	391.4	394.6
13		400	624.3	645.9	606.1	638.2	651.6
14	0.5	400	626.4	620.6	631.7	603.7	629
15		400	626.9	623.8	655.7	631.7	625.3
16		600	571.1	573	559.1	591.4	594.6
17		600	552.2	547.6	572	537.1	542
18		600	525.3	524.3	577.9	495.6	556.8
19		200	429	456.2	436	444.8	442
20		200	444.3	457.2	462.1	409	465
21		200	476.9	453.8	455.7	431.7	425.3

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SKD11 หลังการกรัดรีดผิวแข็ง (ต่อ)

งานชิ้นที่	ความลึกการกรัด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดัน น้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าความแข็ง (HV)				
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
22		400	577.9	582.1	573.1	575.8	563.8
23	0.7	400	561.2	578.7	589.3	569.3	557.7
24		400	580.3	579.6	578.8	578.2	579.1
25		600	562.1	506.2	554	472.5	553
26		600	552.2	544.5	551.1	548.8	490.3
27		600	532.8	497	502.2	463.8	517.6



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองค่าความแข็งลึกจากผิวของการกดรีด



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งลิกจากผิวของการกดรีด (Level hardness tester for Burnishing)

ชั้นงาน	ความลึกการกดรีดผิวแข็ง (มม.)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ชั้นความลึกในการวัดค่าความแข็ง (มิลลิเมตร)				
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1		200	359.7	340.1	352.6	323.5	296.2
4	0.3	400	540.1	561.7	554	516.4	507.5
9		600	443.9	405.9	405.2	381.6	348.9
10		200	423.5	426.3	425.6	397.1	376.3
13	0.5	400	552.6	525.6	495	476.3	469.3
18		600	459.7	443.9	422	406.3	361
19		200	422	430.2	416.4	406.3	395.6
22	0.7	400	564.6	543.9	554	523.5	502.1
27		600	473.6	458.5	423.4	407.2	383.8

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งลิกจากผิวของการกดรีด (Level hardness tester for Burnishing) (ต่อ)

ชั้นงาน	ความลึกการกดรีดผิวแข็ง (มม.)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ชั้นความลึกในการวัดค่าความแข็ง (มิลลิเมตร)				
			0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1		200	261	248.9	216.9	208.8	217.7
4	0.3	400	492.6	472.2	323.4	265.9	235.8
9		600	342.2	355	302.9	235	224.4
10		200	369.3	373.6	323.4	244.9	238.9
13	0.5	400	417.3	407.2	354	307.5	248.4
18		600	369.3	344.9	307.5	272.2	230.3
19		200	352.6	344.9	302.1	235.8	209.7
22	0.7	400	469.3	438.9	397.1	302.1	278.8
27		600	335	317.7	308.8	272.2	268.5



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



**The 5th Rajamangala Manufacturing and Management
Technology Conference 2020**

การประชุมวิชาการราชมนังคาลัยด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 5

R MTC 2020

Production Technology and Management for Improving Smart Farming

Proceedings
Conference 2020

3-4 September 2020, K.P. Grand Hotel Chanthaburi

www.rmtc2020.org



Conference Topics

- Production and Operations Management
- Manufacturing engineering
- Materials Science and Applications
- Supply Chain and Logistics
- Industrial Education
- Other Related fields

Abstract Book of
Rajamangala Manufacturing & Management
Technology Conference 2020
(RMTC 2020)



สนับสนุนโดย

ENTECH



3-4 กันยายน 2563

ณ โรงแรม เค พี แกรนด์ จังหวัดจันทบุรี



คำนำ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference) หรือ RMTC เป็นงานประชุมวิชาการระดับชาติ ที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 9 แห่ง ที่มีวัตถุประสงค์ร่วมกันเพื่อสร้างเวทีแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านวิชาการและการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิชาการเพื่อต่อยอดงานวิจัย และถ่ายทอดข้อมูลให้แก่ภาคอุตสาหกรรมโดยมีสาขาที่เกี่ยวข้อง 6 สาขา คือ การจัดการการผลิตและการดำเนินงาน (Production and Operations Management) วิศวกรรมการผลิต (Manufacturing Engineering) วัสดุศาสตร์และการประยุกต์ใช้งาน (Materials Science and Application) โซ่อุปทานและโลจิสติกส์ (Supply Chain and Logistics) วิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Education) และในสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง (Other Related Fields) ในปี พ.ศ. 2563 นี้ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพหลักในการจัดประชุมวิชาการและเครือข่ายจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 8 แห่ง และองค์กรที่เกี่ยวข้องกับวิชาชีพ 3 องค์กร คือ สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย (TDIA) และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT) โดยใช้ชื่อว่า “RMTC 2020” ซึ่งจัดการประชุมวิชาการ ระหว่างวันที่ 3 ถึง 4 กันยายน พ.ศ. 2563 ณ โรงแรม เค ที แกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2020 ได้รวบรวม บทความที่ผ่านการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิและได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการขึ้นเป็นหนังสือรวบรวมบทความวิชาการและบทความวิจัย การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2020 เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยผลงานทางด้านวิชาการ ผลงานสร้างสรรค์ในระดับชาติ ด้านวิศวกรรมเทคโนโลยีการผลิต การจัดการ หรือสาขาที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งสร้างภาพลักษณ์ที่ดีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลต่อสาธารณชน และเป็นข้อมูลให้แก่นักวิชาการ นักวิจัย และผู้ที่สนใจ ได้ใช้อ้างอิงเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรม และประเทศต่อไป

คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ

ราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2020

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2020

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์	ประมุงคล	(มทร.ตะวันออก)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช	นนท์แสงโรจน์	(มทร.ตะวันออก)
อาจารย์ธิตติ	หมอรัญญา	(มทร.ตะวันออก)
อาจารย์จิรวัดน์	ณ พัทลุง	(มทร.ตะวันออก)
อาจารย์ศราวุธ	จันทร์กลาง	(มทร.ตะวันออก)
อาจารย์ยิ่งยศ	ทิพย์ศรีราช	(มทร.ตะวันออก)
อาจารย์สมภาร	ศรีประเทือง	(มทร.ตะวันออก)
นายพิชิตชัย	เรือน้อย	(มทร.ตะวันออก)
นางสาววรรรณิสา	อยู่สนอง	(มทร.ตะวันออก)

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2020 ประจำเครือข่าย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนินท์	มีมนต์	(มทร.ธัญบุรี)	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์	วัชรศรีสำเร็จ	(มทร.สุวรรณภูมิ)	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย	ต่อสกุล	(มทร.ธัญบุรี)	กรรมการ
รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์	ระวีวงศ์	(มทร.ศรีวิชัย)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชระ	กัญจนกาญจน์	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ	อุดมศรี	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
อาจารย์สัญญา	คำจริง	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณน	สุจारी	(มทร.รัตนโกสินทร์)	กรรมการ
อาจารย์เนรัฐชลา	กำไลทอง	(มทร.รัตนโกสินทร์)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นทีชัย	ผู้สดี	(มทร.ล้านนา)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน	ดุษฎี	(มทร.ล้านนา)	กรรมการ
อาจารย์สุทธิพงษ์	จำรูญรัตน์	(มทร.พระนคร)	กรรมการ
อาจารย์ธวัชชัย	ชาติตำนาน	(มทร.พระนคร)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย	จันทร์มณี	(มทร.กรุงเทพ)	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ฤทธิชัย	ภาเนียม	(มทร.กรุงเทพ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์	วรรณศรี	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิกายุจนจาร	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์	ธรรมแสง	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสิษฐ์	ศรีน้อย	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช	นนท์แสงโรจน์	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการ
อาจารย์จิรวัดน์	ณ พัทลุง	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูไธตี	สนิ	(มทร.ศรีวิชัย)	กรรมการและเลขานุการ
อาจารย์ธิตติ	หมอรัญญา	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2020 ด้านบทความ

อาจารย์ยิ่งยศ	ทิพย์ศรีราช	ประธานกรรมการ
อาจารย์ขวัญจิต	ออกเวหา	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตันย์	ทองอวัช	กรรมการ
อาจารย์วัชรธร	จันทร์ชมภู	กรรมการ

อาจารย์กฤษฎา	เจริญมูล	กรรมการ
อาจารย์ยุพา	บุญมี	กรรมการ
อาจารย์สุจิตรา	ทิพย์ศรีราช	กรรมการและเลขานุการ

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewer)

ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์	พงศ์ศุภสมิทธิ	ข้าราชการบำนาญ
ศาสตราจารย์ ดร.สิน	พันธ์พินิจ	ข้าราชการบำนาญ
ศาสตราจารย์ ดร.วีไล	รังสาดทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.อรธกกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์	ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา	เศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล	เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช	วุฒิพรพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์	สุรนนท์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.มณิศรา	พิริยวิรุตม์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวีรัช	พลูปราชญ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ	รัตน์วีไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ศิริ	สิงห์เถื่อน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์เลิศชัย	ระตะนะอาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตตร	หอมรสสุคนธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุตสาคร	อินธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา	เกียรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	เกียรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์	แก้วพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร	สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนากล	กฤตวรกาญจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท	เกษมเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ	สุดสนธิ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ	กลุ่มจิตตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.กวิน	สนธิเพิ่มพูน	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย	บันเทิงจิตตร	มหาวิทยาลัยสยาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์	เทพพิทักษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์จันทร์ชา	นาควชิรตระกูล	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์วรัญญา	โนนม่วง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์	ระวีวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์เดช	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ไพบูลย์	แย้มเผื่อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสชนก	จงประสิทธิ์พร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์	สิริเกษมสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์	รัตนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อ๋อง	สังขพงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร	มีมงคล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดิ์	ภาระราช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์	มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรบรรณ	คล้ายกันต์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสวัชร	นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	ไชยจรรณนิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิดา	สุนารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอุมา	ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ	มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา	ศิลป์ษา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	สินธุ์เขาวัว	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร	ภูนิคม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กสิณ	รังสิกรรพุม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา	ศรีญาณลักษณ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์	พรสิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ	อนุรัตน์านนท์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยณัฐ	โตอ่อน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์	วรรณฤมล กิเยลาไรว่า	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธนิตย์	พุทธพนม	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์งาม	สมกุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสัจจา	วิทย์ศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ประสพชัยชนะ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเสียง	จันทาสี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัตน์ชา	เครือฟู	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปณิศา	คินดี	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวะ	วสุนธราภิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล	มงคลธนวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์	เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจตน์จรรย์	อาจไธสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช	นนท์แสงโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประหยัด	กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา	ศรีสัตยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม	ศิริวุธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์	ศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรวัตร	ลือสัก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทิชัย	ผัสดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาติวี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูไฮดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยุยยุทธ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์พันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวกร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาภิญญ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รพีพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤกษ์ภูงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไวโรจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยุทธ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลยุทธ
อาจารย์ ดร.จรัสวรรณ

อาจารย์ ดร.ธนกฤต
อาจารย์ ดร.นรา
อาจารย์ ดร.สุริยา
อาจารย์ ดร.กุลภัสร์
อาจารย์ ดร.วิเรชา
อาจารย์ ดร.ศักดิ์ดา
อาจารย์ ดร.ทศพร
อาจารย์ ดร.วาปี
อาจารย์ ดร.สาลินี
อาจารย์ ดร.ชวิศ
อาจารย์ ดร.ชูสิทธิ์
อาจารย์ ดร.สิทธิชัย
อาจารย์ ดร.นรงค์
อาจารย์ ดร.อาจารี
อาจารย์ ดร.ไชยา

สุรินทร์
หอมเชียว
สนิ
ดุศลกุล
ราชภักดี
มุกสถาน
ธรรมแสง
สิทธิวงษ์
อัครตฤทธิ
บุญหมื่นไวย
วิชโรภากุล
สง่างาม
เปี่ยมสุวรรณ
กาญจนะ
ศุภระมูล

สุดสมบุรณ์
นันทสำเริง
พรประเสริฐ
อิมโพ
เกชาวี
เกศศรีพงษ์ศา
แสงฉาย
มิ่งงาม
ชัยณรงค์
บุญแข็ง
โกยวานิช

โชติภาววิศ
สมิตถภาพงค์
จิรสถิตสิน
ทองแก้ว
คำจันทร์
คำจันทร์
จุมิม
มโนภินิเวศ
สันติธีรากุล
บุญมี
ป่าไร่
แช่เหล่ม
วิชาผา
แสงเสถียร
โฉมเฉลา

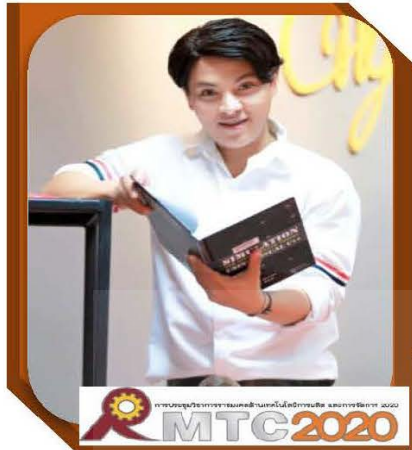
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
(เพชรบุรีวิทยาเขตกรณีน)
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
มหาวิทยาลัยนครพนม

อาจารย์ ดร.สุนิสา
อาจารย์ ดร.โรสมารินทร์
อาจารย์ ดร.พิชานันท์
อาจารย์ ดร.วิษณะชัย
อาจารย์ ดร.พิชญ์
อาจารย์ ดร.กฤษฎา
อาจารย์ ดร.ภาณุเดช
อาจารย์ ดร.กิตติ
อาจารย์ ดร.จิรวัดน์
อาจารย์ ดร.ปริดา
อาจารย์ ดร.อุกฤษฏ์
อาจารย์ ดร.พิชิต
อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์
อาจารย์ ดร.นิตยา
อาจารย์ ดร.รุ่งวสินต์
อาจารย์ ดร.วิทยา
อาจารย์ ดร.ฉัชชัย
อาจารย์ ดร.วรรณนิศา
อาจารย์ ดร.สุกานดา
อาจารย์ ดร.ปัทมิตา
อาจารย์ ดร.วิหวัศ
อาจารย์ ดร.พูนธนะ
อาจารย์ ดร.ชานาญ
อาจารย์ ดร.ผจงจิต
อาจารย์ ดร.ทำนอง
อาจารย์ ดร.วิทยา

คำสุข
สุขเกษม
วงศ์ศิริธร
จุมผา
ทองขาว
เหล็กดี
แสงสีดา
วิโรจรัตน์ภาพิตกาล
วรวิชัย
จิวปัญญา
ธนทรัพย์ทวี
เพ็งสุวรรณ
เถื่อนแก้วสิงห์
ภูงาม
ไกรกลาง
ดาวดอน
พุ่มพวง
นุชคุ้ม
กลินขจร
นาควงษ์
สิงห์สังข์
ศรีสระคู
พูลสวัสดิ์
พิจิตบรรจง
ชิตชอบ
อินทร์สอน

มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์





Keynote Speaker

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

Prof.Dr. Rapeepan Pitakaso

ประวัติการศึกษา :

- Bachelor of Engineering in Industrial Engineering, Ubonratchathani University, Thailand. 2001
- Master of Engineering in Industrial Engineering, Asian Institute of Technology (AIT), Thailand. 2003
- Doctor of Business Administration in Production, Operation and Logistical Management, University of Vienna, Austria, 2005

ประวัติการทำงาน :

- Professor at Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University.
- Head at Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University.

ความเชี่ยวชาญ :

- Logistics and Supply Chain Management
- Transportation / Allocation Problems
- Production Planning and Control
- Metaheuristics
- Optimization
- Constructivist





Keynote Speaker

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.วิไล รังสาดทอง

Prof.Dr. Vilai Rungsardthong

ประวัติการศึกษา :

- Bachelor (Agricultural Chemistry), Chiba University, Japan (1985)
- Master (Agricultural Chemistry), Kyoto University, Japan (1987)
- Doctor (Technical Science) in Postharvest Technology and Food Process Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand (1995)

ประวัติการทำงาน :

- Professor at The Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB).
- Senior Fellowship (PR155739) awarded by the Professional Standards Framework (UKPSF) of UK Higher Education Academy, dated 23 March 2020
- Vice President for Academic Affairs, KMUTNB (2016-2017).
- Consultants for SMEs for many areas such as quality control, product development, productivity improvement (2002-present).
- Committee Member, Thai Society for Biotechnology (1999-2008, 2010-2019)
- Certified SMEs APEC IBIZ business Counselor Certification Program, Department of Industrial Promotion, Ministry of Industry, Thailand
- Reviewers for many national and international journals

ความเชี่ยวชาญ :

Food processing technology ie: extrusion technology, freezing technology, starch chemistry, Food fermentation, industrial microbiology. Flavor and fragrance technology, Bio composite, Bioactive compound, nanoencapsulation, Research, development and innovation projects with many food industries.





Keynote Speaker

กรรมการสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย

ผู้เชี่ยวชาญการเผาผลาญคณะ 16 (GCT)

นายจอมศักดิ์ ภูติรัตน์

Mr.Jomsak Phutirat

ประวัติการศึกษา :

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

ประวัติการทำงาน :

กรรมการสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย

ที่ปรึกษาสมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับจังหวัดจันทบุรี

ผู้ประนีประนอมประจำศาลจังหวัดจันทบุรี

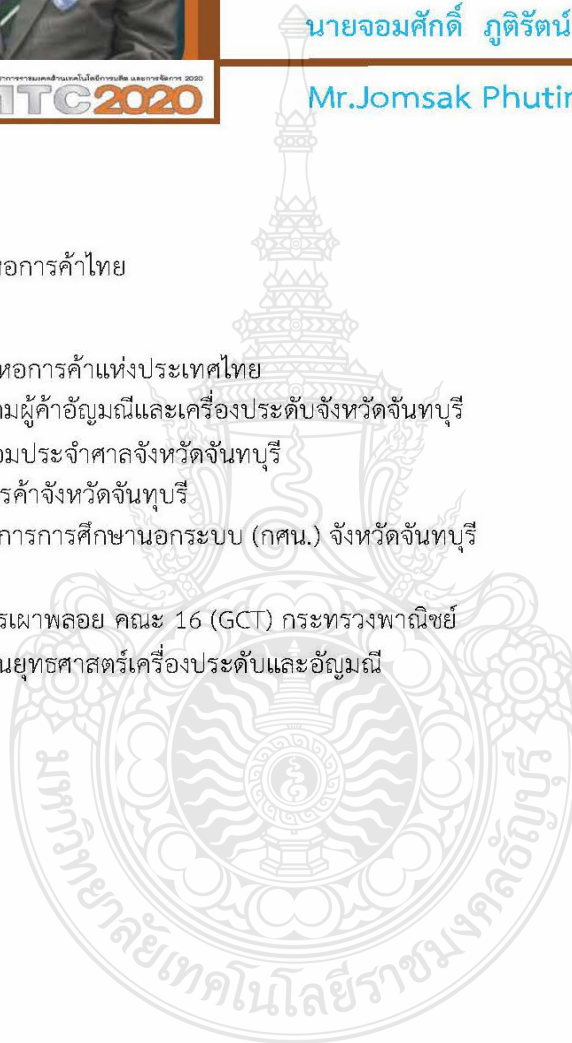
ประธานหอการค้าจังหวัดจันทบุรี

ประธานกรรมการการศึกษานอกระบบ (กศน.) จังหวัดจันทบุรี

ความเชี่ยวชาญ :

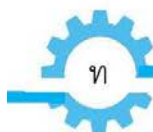
ผู้เชี่ยวชาญการเผาผลาญ คณะ 16 (GCT) กระทรวงพาณิชย์

ผู้เชี่ยวชาญด้านยุทธศาสตร์เครื่องประดับและอัญมณี



สารบัญ

	หน้า
Article of Keynote Speaker จำนวน 2 บทความ	
Optimization in Agricultural Industry	2
Prof. Dr. Rapeepan Pitakaso	
งานวิจัยและนวัตกรรมเพื่อการเพิ่มมูลค่าการผลิตผลทางการเกษตรอย่างยั่งยืน	6
ศาสตราจารย์ ดร.วิไล ริงสาตทอง	
Production and Operations Management (POM) จำนวน 45 บทความ	
POM103 การลดของเสียในกระบวนการเย็บเบาะรถยนต์ กรณีศึกษา: บริษัทผลิตเบาะรถยนต์	10
ศรินยา ประทีปชนะชัย และกิม พรประเสริฐ	
POM104 การลดรอบเวลาการผลิตชุดเลื่อนกระจกไฟฟ้ารถยนต์ กรณีศึกษา: บริษัท ABC	17
กิม พรประเสริฐ, ยุทธณรงค์ จงจันทร์, ศรินยา ประทีปชนะชัย, เขกสรร สิงห์ธนู และธนัช มั่นมงคล	
POM105 การปรับปรุงกระบวนการประกอบแกนบังคับพวงมาลัยรถยนต์ กรณีศึกษา: บริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	23
เขกสรร สิงห์ธนู, กิม พรประเสริฐ, สุรพงษ์ แก่นมณี, ยุทธณรงค์ จงจันทร์ และวีระพล ทับทิมดี	
POM106 การลดของเสียในกระบวนการเชื่อมชิ้นส่วนโครงรถจักรยานยนต์ กรณีศึกษา : บริษัทตัวอย่าง	29
ศรินยา ประทีปชนะชัย, เมธี พรหมศิลา, ยุทธณรงค์ จงจันทร์, กิ่งกาญจน์ กิตติสุนทรโรภาส, ณัฐพงศ์ สุวรรณกุล และจตุพล พิสิษฐ์ศักดิ์	
POM107 การเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิตชุดตัดกั๊วแทรกขนาดกลางด้วยเทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิต	35
วราวิทย์ สงวนพันธ์, นันทพันธ์ กนกศิริจรัชยา, ยุทธณรงค์ จงจันทร์ และเขกสรร สิงห์ธนู	
POM108 การลดของเสียในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป	42
ไลกิตา จรดเด่น, ธยาภิรมย์, จุฑามาศ ทองคำ, รณิดา พรรณราย และอัสมา คนหวัง	
POM109 การปรับปรุงกระบวนการประกอบตั้บลูกปืนเข้ากับห้องเครื่องรถจักรยานยนต์	48
กรณีศึกษา: บริษัทตัวอย่าง	
จิตติสันต์ เมฆสุวรรณ, อันยากรณ์ อินตา และกิ่งกาญจน์ กิตติสุนทรโรภาส	
POM110 การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตปะเก็นเครื่องยนต์อเนกประสงค์	54
กรณีศึกษา: บริษัทตัวอย่าง	
ณัฐธิดา คู่คิด, เขษรฐา หวันทา, เกียรติศักดิ์ ตำนประจำ และธนัช มั่นมงคล	
POM111 ลดความสูญเสียในกระบวนการเชื่อมแหวนทองแดง กรณีศึกษา :	59
งานซ่อมตั้ถังรถยนต์	
อภิวัฒน์ งามสง่า, ธนิตต์ มีทรัพย์ทอง, ธนกร สำราญสุข และปวีรบรรต นาสวาสดี	
POM112 การลดความสูญเสียเปล้าในการลำเลียงรถยนต์ขึ้นบนเทรลเลอร์ กรณีศึกษา :	65
บริษัทขนส่งรถยนต์	
ชนิษฐา หวันทา, พันชนะ สืบประทานกุล และสุทธิดา การะเวก	



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
POM113	การลดข้อบกพร่องในการทำงานซ้ำโดยเทคนิคลีน ภัทรภา จ้อยพจน์, ธยา ภิรมย์, นฤมล นวบุญ, วิภาวรรณ เส็งทัน และสุภาวดี ศิลากษ	71
POM114	การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยางปูพื้นรถยนต์ กรณีศึกษา: บริษัทตัวอย่าง อนัญญา จระเข้, อมลณัช พรหมงาม, ภาณพงค์ พุ่มพุกษา และยุทธธรรมรงค์ จงจันทร์	78
POM115	การลดปัญหาในกระบวนการประกอบชุดจ่ายไฟรถจักรยานยนต์ กรณีศึกษา: บริษัท ตัวอย่าง วนัสนันท์ เงินจัตุรัส, เมธัส อีนาลา, ขจรเกียรติ ตาสมกุล และเมธี พรหมศิลา	84
POM117	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในแผนกเย็บโดยประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรม อุตสาหกรรม ธยา ภิรมย์, โสภิตา จรเด่น, ชมภูนุช เพชรรัตน์, ศิริวิญญา หนูคำ และณัฐกฤตา ทศกุล	89
POM118	การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเนยแข็งด้วยเทคนิค การศึกษางาน ชัยวัฒน์ กิตติเดชา และอภิชาติ ชัยกลาง	97
POM119	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วสำหรับขึ้นรูปกระสวนงาน หล่อ สมหมาย สารมาท, พีรพันธ์ บางพาน, วรเชษฐ์ หวานเสียง และสรวิฑูร เขาวการกุล	103
POM120	การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำเสาวรสด้วยเทคนิค ECRS หฤทัยรัตน์ จันทะคาด, อำนาจ คำบุญ, วรพจน์ ศิริรักษ์, ชัชชัย สีตา และธีรวัฒน์ ผุสดี	108
POM121	การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดในกระบวนการหาแนวศูนย์ของเครื่อง จุฬาลักษณ์ ดวงกานา, ประสาท ภูบัวม, สุรเชษฐ์ เลื่อนแก้วสิงห์ และวิเชียร นิยมชวานา	113
POM122	การลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตโดยใช้วิธีการศึกษางาน: กรณีศึกษาสถาน ประกอบการผลิตถ่านอัดแท่ง ณัฐพล ศิริรักษ์ และ อมรรรัตน์ ปิ่นชัยมูล	119
POM123	การปรับปรุงกระบวนการผลิตขนมเป็ญี่ด้วยเทคนิค ECRS สำหรับการลดความสูญเสีย เปล่า พีรวัตร ลือสัก, วรพจน์ ศิริรักษ์, ชัชชัย สีตา และอวยพร ตะวัน	124
POM124	การปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบคุณภาพชิ้นส่วนรถยนต์ สุรพงษ์ แก่นมณี, ยิ่งยศ ทิพย์ศิริราช, เกียรติศักดิ์ พระเนตร, ชัชวาล นิมโรธรรม และจันทร์ศิริ พลอยงาม	129
POM125	การพัฒนาศักยภาพการผลิตกลุ่มผู้ประกอบการ OTOP โดยพัฒนารูปแบบ ผลิตภัณฑ์ใหม่ต่อยอดจากผลิตภัณฑ์เดิมชุดรับแขกกระเบื้องปากบาน ภัทรพงศ์ เกิดลาภี, วิษณุ แผงเมือง, สุวันชัย สินโพธิ์ และสินมหัต ฝ้ายลุย	135

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
POM127	การเพิ่มมูลค่าแห่งจำนนสำหรับหลัง: กรณีศึกษา สถานประกอบการ SME ช.เกษตรพืชผล อ.โกสัมพินคร จ.กำแพงเพชร ชัยนต์ คำบรรลือ และนรุฒม์ คล้ายเคลื่อน	140
POM128	การเพิ่มค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการเคลือบผิวหน้าตัวนำ ด้วยทอง	146
POM129	การลดเวลาในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์: กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วน ยานยนต์	152
POM130	การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปมีด	158
POM134	การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์บรรจุภัณฑ์ ชาคริต วินิจธรรม, เดชาวัฒน์ บุญเรือง, บัณฑุ สุธาโพชนิ, ประหยัด กองสุข และวุฒิไกร จันทร์ขามเรียน	163
POM135	การปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตสายพานรถยนต์ ด้วยเทคนิคการศึกษางาน และการออกแบบผังโรงงาน	170
POM136	ศึกษาคุณสมบัติทางกลของส่วนผสมระหว่างพลาสติกใหม่กับพลาสติก รีไซเคิล	176
POM137	ระบบตรวจจับและควบคุมสายพานลำเลียงเพื่อลดการสูญเสียในกระบวนการบรรจุ ท่อ	186
POM138	การลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ผงซักฟอกด้วยการใช้เทคนิค ECRS	190
POM139	การจัดกลุ่มการผลิตและการใช้หลักการศึกษางานลดความสูญเสียเปล่า สำหรับบริษัทผลิตชุดสายไฟรถยนต์	197
POM140	การลดความสูญเสียเปล่าของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการบิน และ อากาศยาน กรณีศึกษา บริษัท เอบีซี จำกัด	205
POM143	การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายการประกอบ ชุดสายไฟ	211

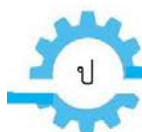


สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
POM144	การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตสถานีงานทากาวกระจกหน้ารถยนต์ กรณีศึกษาโรงงานประกอบรถยนต์ วิเรชา คำจันทร์, อธิวัฒน์ ธีร์วัชรมงคล และศักดิ์ดา คำจันทร์	217
POM145	การประยุกต์ใช้หลักการควบคุมด้วยการมองเห็น โดยการจัดทำปฏิทินเฟิร์มแวร์วัน หมดอายุยา กรณีศึกษาโรงพยาบาลในจังหวัดสกลนคร ศักดิ์ดา คำจันทร์, วรัญญา ฤทธิธรรม และวิเรชา คำจันทร์	222
POM146	การศึกษาโครงการก่อสร้างห้องสะอาดด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการประเมินผล และทบทวนโครงการ/เส้นทางวิกฤต กรณีศึกษาโรงงานประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ บุญสิน นาดอนคู่ และนพดล ศรีพุทธา	227
POM148	การปรับปรุงสมดุลสายการประกอบให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า กรณีศึกษา บริษัท ผลิตภัณฑ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ศักดิ์ดา คำจันทร์, ระพีพัฒน์ พิมพ์มีลาย, อรสา แสนดี และวิเรชา คำจันทร์	234
POM149	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต กรณีศึกษาโรงงานผลิต ขนมปัง วิเรชา คำจันทร์, สาวิตรี เปลี่ยนมิ่ง และศักดิ์ดา คำจันทร์	240
POM150	การใช้เทคนิคการศึกษางานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเครื่องแก้ว นทีชัย ผัสดี และพุดสายัน นราพิณิจ	245
POM151	การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน กรณีศึกษา โรงงานเพชรรุ่งเรือง ส.อุตสาหกรรมยาง ยงยุทธ ดุลยกุล, เดช เหมือนขาว, ชัยยุทธ มิ่งาม และศุภชัย ชัยณรงค์	252
POM152	การศึกษาเวลามาตรฐานโดยใช้ระบบ MTM กรณีศึกษา : แบบหล่อ สุภาพร แสนกุล, กรกนก วรหาญ, อูมาพร กัสสุภา, ปริชญ์วัตร ทินบุตร, วิรัช ชินพลอย, สำเภา โยธี และกิตติพล ชาวงาม	259
POM153	การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ด้วยเทคนิคการออกแบบ การทดลอง ระพี กาญจนะ, วรญา วัฒนจิตศิริ และสุรัตน์ ตรียานพงศ์	265
POM154	การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานภายในคลังสินค้าของบริษัทผู้ผลิตกล่อง กระดาษลูกฟูก: กรณีศึกษา สุรัตน์ ตรียานพงศ์, วรญา วัฒนจิตศิริ และระพี กาญจนะ	271
POM155	การลดเวลาสูญเสียเนื่องจากเครื่องจักรขัดข้องในกระบวนการผลิตฝาพลาสติก วรญา วัฒนจิตศิริ, สุรัตน์ ตรียานพงศ์ และระพี กาญจนะ	278
Manufacturing Engineering (MFE) จำนวน 64 บทความ		
MFE101	การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง ปวิวรรต นาสวาสดี, อมรรัตน์ พรประเสริฐ, สุทธิดา การะเวก, ชัชวาล นิมิตรธรรม และนรินทร์ กุลนภาดล	285
MFE102	พาราเมตริกโปรแกรมกัดปาดพื้นผิวชิ้นงานแบบทางเดียวและสลับไปมา จตุพร ใจดำรง	292

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
MFE103	การออกแบบและสร้างเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กระบบนิวแมติกส์แบบป้อนเส้นพลาสติก วัชรินทร์ สิทธิเจริญ, อนันต์ วงษ์จันทร์, ศุภชัย อัครานรากุล, ธนาธรณ์ พิบูลย์, พงศ์ตะวัน มีเพียร และรัฐพงษ์ ไชยยา	297
MFE104	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตในกระบวนการเจาะรูวัสดุเหล็ก SKD11 ศักดิ์นรา สุวรรณบำรุง, กรรณิการ์ ชัยมี, พิจิตรา หล้ามนตรี และปรเมศวร์ เบ้าวรรณ	302
MFE105	การศึกษาอิทธิพลของวิธีการหล่อเย็นที่มีผลต่องานกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มนุษย์ เทพกิจอารีกุล, พรชิตา โพธิ์กล้า, สิริญญาภรณ์ ถานกางสุ่ย และปรเมศวร์ เบ้าวรรณ	309
MFE106	บทบาทของการผลิตโดยอาศัยคอมพิวเตอร์แบบบูรณาการในปัจจุบัน ปภากร พิทยขวาล, พิพัฒน์ วงสวาท และวริศรา ภูถมนาค	316
MFE107	อิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยไมโครตาย ภาสพิรุห์ วัชรศรีสำเร็จ, สันญา คำจริง และพัชระ กัญจนกาญจน์	322
MFE108	การออกแบบและสร้างเครื่องคอกไข่(ต้นแบบ) วัชรกรร ชัยวัฒน์พิพัฒน์, กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์, กำพล ตาอ้าย, เกียรติศักดิ์ ศรีพิงค์ และณัฐพล ไชยวารินทร์	328
MFE109	เครื่องล้างลาดเพาะกล้าต้นข้าว คำรณ แก้วผัด, ภาคภูมิ จารุภูมิ และมนวิภา อารีพันธุ์	337
MFE110	อิทธิพลของสารกระตุ้นซึ่งคอกไข่กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตต่อการเกิดฟองในยางธรรมชาติ อโณทัย ผลสุวรรณ และศิริชัย ต่อสกุล	347
MFE111	การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ตีขึ้นรูปร้อนด้วยกระบวนการกัด วัชรินทร์ มีสุขมาก, พิชัย จันทร์มีณี, ศุภวัฒน์ ชูวารี และกมลพงศ์ แจ่มกมล	354
MFE112	การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการแปรรูปเหล็กในกระบวนการฮีตเท็มที่มีผลต่อความแม่นยำด้านพิกัดรูปทรง โดยการปรับปรุงระบบการไหลเวียนของสารไดอเล็กตริก ศุภวัฒน์ ชูวารี, กมลพงศ์ แจ่มกมล และพิชัย จันทร์มีณี	361
MFE113	การศึกษาตำแหน่งทางเข้าที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในกระบวนการฉีดแม่พิมพ์พลาสติก นพวิษณุ วสันต์บังงิม, วุฒิพงศ์ ก่อมขุนทด และศิริพงษ์ เกวียนโคกกรวด	368
MFE114	การวิเคราะห์คุณสมบัติของแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อการยุบตัวของพลาสติกพอร์โฟไรไฟลีน กรณีศึกษา ชิ้นงานทดสอบ ASTM D638 Type I ASTM D256 ASTM D790 จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, เมธี สุวีชาเชิดชู, ปกรณ์ สกฤตวันเศรษฐ์, ภาณุพงษ์ จันทร์ทรง, นพวิษณุ วสันต์บังงิม, อมรศักดิ์ มาใหญ่ และมานิซ ริทินโย	376



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
MFE115	ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและพัฒนาการความเสียหายในระหว่างกระบวนการ ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ	383
MFE116	อิทธิพลของตัวแปรในการผลิตผงโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการ Gas Atomization : กรณีศึกษา นราธิภัส บุตรชา, สุรเชษฐ์ ช้อนกลิ่น, สุรินทร์ มณีศรี, วิทยา ดาวดอน และสุรัตน์ วรรณศรี	390
MFE117	ประสิทธิภาพของจำนวนครั้งในการนำสารขัดที่กลับมาใช้ใหม่ตัดวัสดุ เทพลอนด้วยกระบวนการแรงดันน้ำสูง รุ่งवंสน์ ไกรกลาง, สุรพจน์ วัชโรภากุล, สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ, เมที สุขซี และฉกาจ เชื้อดี	396
MFE118	ประสิทธิภาพของการใช้สารกัดกร่อนผ่านการใช้งานแล้ว ตัดอลูมิเนียมเกรด A1100 ด้วยน้ำแรงดันสูง สุรพจน์ วัชโรภากุล, เมที สุขซี, รุ่งवंสน์ ไกรกลาง, สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ และฉกาจ เชื้อดี	403
MFE121	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ กรณีศึกษาของบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ รวินท์ธนัตถ์ ทิพย์เสนา, ภูมินันท์ นามพุดธา, ชลลดา อำพันธ์ทองศิริ, ทวิสุข สงวนวงษ์ และอมรเทพ อินสอน	409
MFE122	การปรับปรุงเพิ่มกำลังการผลิตด้วยการลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิต ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยหลักการเทคนิคการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง พัชระ กัญจนกาญจน์, รวินท์ธนัตถ์ ทิพย์เสนา, อัมรินทร์ แบ่งส่วน, เปรมฤทัย เล็กประดิษฐ์ และอภิวัฒน์ วุฒิ	415
MFE124	การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อลดเวลาในแก้ปัญหาการผลิตของเครื่องกลึง อัตโนมัติ เฉลิม ขุนเอียด, รวินท์ธนัตถ์ ทิพย์เสนา, ยศนนท์ ด้อยจัตุรัส, พิศณุ จิตตะระ และธนโชติ ไร่ไธสง	421
MFE125	การสร้างชุดอุปกรณ์ลับคมตัดดอกกัด (End Mill) บนเครื่องกลึงขนาดเล็ก วิษณุ แพงเมือง, พิษณุ สิ้นโพธิ์, ภัทรพงศ์ เกิดลาภี, ภาณุวัฒน์ จันทร์มาก และนิรันดร์ พรหมเกษ	426
MFE126	อิทธิพลของอัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ PTFE จากกรรมวิธีอัดขึ้นรูปร้อนด้วยไมล สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ, ฉกาจ เชื้อดี, สุรพจน์ วัชโรภากุล, รุ่งवंสน์ ไกรกลาง, เมที สุขซี, วิทยา ดาวดอน และสุรัตน์ วรรณศรี	432
MFE127	การพัฒนาพารามเมตริกโปรแกรมกัดปาดพื้นผิวชิ้นงานแบบควบคุมระดับความลึก การกัด จตุพร ใจดำรง	439
MFE128	การทดลองเพื่อยืนยันความหนาของรูน้าทางบนเครื่องมือพิเศษสำหรับ ผลิตเกลียวนอกด้วยอุปกรณ์ทำเกลียวนอกทั่วไป ปรีชา ช่างยิ้ม	445

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
MFE130	การศึกษาปัจจัยและสมบัติของแผ่นอัดผนังเบาสำหรับการต้านทานแผ่นดินไหว วรพจน์ ศิริรักษ์, พีรวัตร ลือสีก, อำนวย คำบุญ และ ชัชชัย สีตา	449
MFE131	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 ด้วยกระบวนการเชื่อมพลาสมา ชูไฮดี สนิ, วิทยา ศิริคุณ, เดช เหมือนขาว, ชัยยุทธ มิ่งาม, เทวพันธ์ เรืองเกิด และชาญวิทย์ ลิมประดิษฐ์	455
MFE132	อิทธิพลของอัตราการใช้สารกัดกร่อนที่มีผลต่อการตัด วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยน้ำแรงดันสูง เมที สุขชี, สุรศักดิ์ มะณีโตปะน้ำ, รุ่งวสันต์ ไกรกลาง, สุรพจน์ วัชโรภาส และฉกาจ เชื้อดี	461
MFE133	การขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมโดยใช้แม่พิมพ์รีดผนังบาง อนุวัฒน์ แสงบุญเรือง, เซษฐ อุทธิยัง และสุวิษ มาเทศน์	469
MFE134	การพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling โดยใช้วัสดุ โพรสโพฟิสิ่นรีไซเคิลเปรียบเทียบกับวัสดุโพรสโพฟิสิ่น รัชพัฒย์ ศาสตร์สูงเนิน, กัมปนาท ถ่ายสูงเนิน, อมรศักดิ์ มาใหญ่, มาโนช ริทินโย และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	476
MFE135	การศึกษาความสามารถการรับภาระของระบบทดสอบสภาวะการทำงานของ ดาวเทียมวิจัยอวกาศด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สุรชัย ผ่องอำไพ, สำเร็จ ดวงนิล, เตนชาย บำรุงเกาะ, นพวิรัช วสันต์บั้งมี และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	482
MFE136	การเพิ่มความสามารถกระบวนการประกอบเคลือบสายเบรก ด้วยเทคนิค การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ พิชญา อู่สำหงาน, รัชพัฒย์ ศาสตร์สูงเนิน, นพวิรัช วสันต์บั้งมี, สำเร็จ ดวงนิล, สกลกวี ปรามภูเหล็ก และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	488
MFE137	การศึกษากระบวนการขัดผิวแม่พิมพ์ระดับปี ศุภชัย อัครนรากุล และธีรวัฒน์ แสงภาค	497
MFE138	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นส่วนแม่พิมพ์จากกระบวนการกัด ขึ้นรูป ธีรวัฒน์ แสงภาค, ศุภชัย อัครนรากุล, อติเรก ชัยนวกุล และพิเชษฐ ใควตระกูล	503
MFE139	การออกแบบเครื่องมือสำหรับบันทึกการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับ การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักร สุวรรณภูมิ หลักหิน, อุกฤษฏ์ จนทรัพย์ทวี และปริญญ เมฆฉาย	510
MFE140	การปรับปรุงกระบวนการเคลือบยาสีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต: กรณีศึกษา บริษัท บีดีไอ กรู๊ป จำกัด นัฐกานต์ เกิดสวัสดิ์, พิพัฒน์ บุญคง, ภาคภูมิ โจชมพู และปรีดา จิวปัญญา	515
MFE141	การสร้างหลุมกักเก็บน้ำมันขนาดเล็กบนพื้นผิวเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง ด้วยกระบวนการเลเซอร์ วิทยา ดาวดอน, วิบูลย์ ตั้งโรตมนกุล, และสุรินทร์ มณีศรี, ชัยวัฒน์ วัฒนะกุล, สุทัศน์ ยอดเพชร และสุรศักดิ์ มะณีโตปะน้ำ	521



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
MFE142	การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปยางผสม พีซีดี อ่อนปรางค์, อัครพงษ์ ตูลย์จิตราภรณ์ และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ	529
MFE143	การพัฒนาเครื่องบดกลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตร่าสำหรับ โรงสีข้าวสหกรณ์การเกษตร วิทยา อินทร์สอน, ปัทมาพร ท่อชู, กฤษณเดช ราษีทอง และอรลัดดา เจือจันทร์	536
MFE145	การศึกษาความเป็นไปได้ของการตัดครีบบนชิ้นงานยางด้วยคมตัดพั่นซ์กับด้าย บดินเดช จูมมณี และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ	545
MFE146	ศึกษาอิทธิพลความแข็งผิวและการเกิดความเค้นตกค้างที่ผิวของกระบวนการกดรีด ผิวแข็งด้วยเซรามิคบอลในเหล็ก SKD11 อัครวัฒน์ ไบกว้าง และศิริชัย ต่อสกุล	551
MFE147	อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องต่อความเครียด ความเรียบผิว และสมบัติ ทางกลของอลูมิเนียมผสม AL5052 เกียรติพงษ์ อ่อนบัตร, สุรียา ประสมทอง และ ศิริชัย ต่อสกุล	557
MFE148	ทบทวนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดโลหะด้วยลวด ปฏากกร พิทยชวล และณัฐมน พิไลวงศ์	564
MFE149	การประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว และการสึกหรอของเม็ดเม็ดในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์, จุฬาลักษณ์ โรจนานกุล, ชาตรี หอมเขียว และอภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า	570
MFE150	การพัฒนาเครื่องสาวไหมและการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับ การบวนการสาวไหม อมรศักดิ์ มาใหญ่, มาโนช วิทินโย และจิตต์วัฒน์ นิธิกาญจนธาร	579
MFE151	การศึกษาลักษณะความเสียหายพื้นผิวเหล็กกล้าแผ่นรีดร้อน ณัฐพล ศรีดำ, พิชัย จันทรมณี และชาญ ถนัดงาน	585
MFE152	ผลกระทบการเจียรในวัสดุเหล็กกล้า SCM4 เคลือบ WC-Co ด้วยล้อยหินเจียรใน Resin Bond เอกชัย รอดพิสา, พิชัย จันทรมณี, กมลพงศ์ แจ่มกมล และชาญ ถนัดงาน	593
MFE153	การปรับปรุงกระบวนการผลิตถังลมเบรกชนิดเหล็กกล้าด้วยการใช้เทคนิค ECRS ชัยวิชิต แก้วประดิษฐ์, รัตติกรณ์ เสาร์แดน, ไพบุลย์ หาญมนต์ และชาญ ถนัดงาน	600
MFE154	การศึกษาค่าความผิดพลาดชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีเลเซอร์สแกนเนอร์ อมเรศ กัมปา, พิชัย จันทรมณี, กฤษณะ อ่วมนุสนธ์ และปิยะพงษ์ คำคุณ	611
MFE155	การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ฉกาจ เชื้อดี, รุ่งวสันต์ ไกรกลาง, สุรพจน์ วัชรโรภากุล, สุรศักดิ์ มะลิโตปะนะ และเมที สุขชี	620
MFE156	พฤติกรรมการสึกหรอของล้อยางตีนตะขาบตามมาตรฐาน ASTM G65 ปริญญา ศรีสัตยกุล, ศุภภัทร ศิลาลอย, มานิตย์ อิมาทา และธิดาธิป ทารชุมพล	625

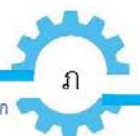
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
MFE157	การลดต้นทุนงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันชุดเครื่องสูบน้ำดับเพลิง ภาคฯ แสงสีดา, กัสสร อนุสนธิ์พรเพิ่ม, พิษณุ ทองขาว และกฤษฎา เล็กดี	631
MFE158	การพัฒนาเครื่องจักรอัตโนมัติไร้โอเลตเลเซอร์ในกระบวนการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ สุธรรม ศิวาวุช, วุฒิโชติ อนุสนธิ์พรเพิ่ม, ณภัทร อินทนนท์ และชาติริ ยิ้มสุด	637
MFE159	อิทธิพลพารามิเตอร์ต่อความถี่รบกวนและสลิคส์ด้วยเลเซอร์ของเหล็กกล้า ไร้สนิม 304	646
MFE160	ไอริส มณีสาย, นันทิยา เชื้อชัยนาท, สมเกียรติ เต็มสุข และชาติริ ยิ้มสุด การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการหั่นเส้นใยยาสูบ ชัยยุทธ มิ่งาม, ศุภชัย ชัยณรงค์, ยงยุทธ ดุลยกุล, เดช เหมือนขาว, นิพนธ์ มณีโชติ และชูไฮต์ สนิ	652
MFE161	การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการย้อมสีกระดาษ ศุภชัย ชัยณรงค์, ชัยยุทธ มิ่งาม, ผจจจิต พิจิตบรรจง, ชานานู พูลสวัสดิ์ และนิพนธ์ มณีโชติ	659
MFE162	การออกแบบเชิงพัฒนาระบบการซ่อมล้อแม็กซ์ กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด ที.ซี แม็กซ์ แอนด์ พลาส ธนพล สมบัติ, สุวิทย์ ธรรมแสง, ดนัย สอนสุภาพ, ชนาธิป กาลจักร, สมชาย ม้วนโคกสูง, จีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ, ณรงค์ สุระศรี, ณัฐวุฒิ ปัญญาดี และวโร เตโช	666
MFE163	การออกแบบและพัฒนาระบบการผลิตเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว กรณีศึกษา บริษัท ช้างทอง อินเตอร์เทรด จำกัด ดนัย สอนสุภาพ, จีรวุฒิ ศรีพันธ์, ชาติสมชาย ม้วนโคกสูง, สุวิทย์ ธรรมแสง, ชนาธิป กาลจักร และธนพล สมบัติ	673
MFE164	การออกแบบเชิงพัฒนาระบบการควบคุมคุณภาพเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว กรณีศึกษา: บริษัท ช้างทอง จำกัด สุวิทย์ ธรรมแสง, สมชาย ม้วนโคกสูง, จีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ, ชนาธิป กาลจักร, ดนัย สอนสุภาพ และธนพล สมบัติ	678
MFE165	การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปเส้นพลาสติกสำหรับงานพิมพ์สามมิติจาก พลาสติกกรีไซเคิล ศุภเอก ประมูลมาก, จีรวุฒิ ใจอู่, พลภัทร ทิพย์บุญศรี และอนินท์ มีมนต์	683
MFE166	การพัฒนาและสร้างชุดอัดรีดสำหรับอัดรีดขึ้นรูปขนมขบเคี้ยวจาก ข้าวไรซ์เบอร์รี่ บุญส่ง จงกลณี, มนทิพย์ ล้อสุริยนต์, ศุภเอก ประมูลมาก, พลภัทร ทิพย์บุญศรี และอนินท์ มีมนต์	690
MFE167	การออกแบบและสร้างเครื่องสำหรับขึ้นรูปเม็ดมะขามแก้วด้วยการใช้ ระบบปั่นแบบสามสกรู ศุภเอก ประมูลมาก, มนทิพย์ ล้อสุริยนต์, อภิรักษ์ มโนสุจริตธรรม, ณัฐกรณ์ บัวอ่อน, ฤตพร โพธิ์ไพจิตร, ศักดา ปลิดดอก และอนินท์ มีมนต์	697



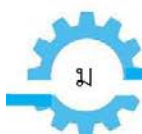
สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
MFE168	การพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องบรรจุและปิดผนึกสำหรับสร้างบรรจุภัณฑ์พลาสติกของผงปุ๋ยรสถาบเหนือ	703
	จิรวัดน์ ใจอู่, ศุภเอก ประมุขมาก, วัลลภ ผ่องใส, วิหวัธ ศรีภา, สมชาย ทองโสภ, ศักดา ปลิดดอก และอนินท์ มีมนต์	
MFE169	ออกแบบและสร้างเครื่องขุดเกล็ดปลาแป๊ะก๊ง	710
	พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์, ชวลิต อินปัญญา และศิริชัย ต่อสกุล	
Material Science and Application (MSA) จำนวน 26 บทความ		
MSA103	การเคลือบผิววัสดุโลหะโดยใช้ขยะเทอร์โมพลาสติก	715
	ชัชชัย สีตา, พีรวัตร ลือสีก และวราภรณ์ ศิริรักษ์	
MSA104	ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ต่อค่าความแข็งแบบวิกเกอร์และค่าคงที่ไดอเล็กทริกของเซรามิกสทรอนเนียมไอรอนไนโอเบต	721
	รตบงกช แสนจุ่ม, ศิริจันทร์ ตาใจ, ยິงยศ ทิพย์ศรีราช และสุธาทิพย์ ทองเล่ม	
MSA105	ผลของตัวแปรการผลิตต่อโครงสร้างเฟส ค่าคงที่ไดอเล็กทริก และค่าความแข็งระดับจุลภาคของเซรามิก $(1-x)[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.8}\text{K}_{0.2})_{0.5}]\text{TiO}_3\text{-xSrTiO}_3$	727
	รตบงกช แสนจุ่ม และฉัตรชัย เครืออินทร์	
MSA106	การศึกษาผลกระทบของโครงสร้างผลึกโลหะต่อการทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	732
	ณัฐศักดิ์ สุวรรณนที และฤทธิชัย เกาเนียม	
MSA107	การศึกษาสมบัติคลื่นเสียงเพื่อผลิตแท่งสอบเทียบมาตรฐานต้นแบบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง	738
	ฤทธิชัย เกาเนียม, สุธรรม ศิวาวุธ, อธิยุทธ กาญจนแสงทอง และจิระศักดิ์ ธาระจักร์	
MSA108	สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมกับฟางข้าว	744
	จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, ภัทธกัญญ์ ฤทธิรุ่ง, สรศักดิ์ ปลั่งทิมา, สันญา หมีกุระ, นพพิชญ์ วสันต์บั้งมี, วรณนิตา นุชคุ้ม และมานิช จิตินโย	
MSA109	การศึกษาวัสดุชิ้นส่วนใบมีดปาดและปืนผสมของเครื่องผสมอาหารที่เอ็มอาร์	750
	แบบแกนแนวอนนโดยการใช่วิศวกรรมย้อนรอย	
	วิทยา ดาวดอน, สุรเชษฐ์ ช้อนกลิน, สุรัตน์ วรรณศรี, นรารักษ์ บุตรชา และรุ่งวสันต์ ไกรกลาง	
MSA110	อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งของใบมีดตัดหญ้าแบบสายสะพายที่ขึ้นรูปจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแล้วชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอไรซิง	757
	ธนศักดิ์ รัตนพทพิบูล, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, สมบัติ น้อยมิ่ง, อมรศักดิ์ มาใหญ่ และวราภรณ์ หอมจะบก	
MSA111	ประสิทธิภาพของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่เลื่อนไถลบนเหล็กกล้าไร้สนิม	762
	SUS304 BA	
	ณัฐชานันท์ อังสุเศรษฐี และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำราญ	
MSA112	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เก้าอี้กลายเป็นส่วนผสมสำหรับการผลิตบล็อก	768
	ประสาน	
	พิชิตชัย เรือน้อย, ฐิติ หมอรักษา และชนากา พิเศษ	



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
MSA113	ผลของเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิโพรพิลีน จุฑามาศ กอดสะอาด, วีราภรณ์ ผิวสะอาด และสมหมาย ผิวสะอาด	773
MSA115	การผลิตแผ่นประกอบจากเศษกระดาษเหลือใช้จากงานหัตถกรรมในชุมชนทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มิ่งาม	779
MSA116	การปรับปรุงคุณภาพใบมีดลับอ้อยด้วยการเชื่อมพอกผิวแข็ง กานต์ วิรุณพันธ์, พิบูลย์ เครือคำอ้าย, ธนาวิทย์ สายเปลี่ยน และจุมพล ชัยประเดิมศักดิ์	786
MSA117	ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีต่อการสกัด ยูเรเนียมจากน้ำทะเล สุรบดินทร์ อุตมั่ง และวริภรณ์ รัตน์สสัย	798
MSA118	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5083 ที่ผ่านกระบวนการหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง รอมฎอน บุระพา, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และจักรนรินทร์ อัตรทอง	804
MSA119	การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของการนำกลับไปใช้ใหม่ของวัสดุคอมโพสิต เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ปฏิภาณ อัดยั้ง, ศิวกิต ลาภอุทัยกาญจน์, กฤษนันท์ ผิวงาม, พรรณทิวา มณีฉาย และณที ศรีสวัสดิ์	811
MSA120	การย่อยสลายสารอินทรีย์มลพิษโดยใช้วัสดุนาโนโมลิตินมออกไซด์ที่เจือด้วย รูทีเนียม จิจิยา ศูนย์กลาง, อัญญารัตน์ พงษ์ตัน และวิวันธชา เครือฟู	819
MSA121	ตัวตรวจจับเอทานอลประสิทธิภาพสูงโดยใช้อุณหภูมิในโมลิตินมออกไซด์ อัญญารัตน์ พงษ์ตัน, ทิมพรรณ เลี้ยงถนนอม, อังคณา อินปิ่น และวิวันธชา เครือฟู	825
MSA122	อนุภาคผสมขนาดนาโนของทินออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์: ลักษณะพื้นฐาน วิทยาและสมบัติของฟิล์มตรวจจับ ทิมทัศน์รัตน์ มุ่งการ, ทิมพรรณ เลี้ยงถนนอม และวิวันธชา เครือฟู	830
MSA123	การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อแรงกดและแรงบิด ในกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทานกับวัสดุอัลูมิเนียมอัลลอย 6061-1 ธงชัย เพ็งจันทร์ และศิริชัย ต่อสกุล	835
MSA124	การศึกษาประสิทธิภาพการกัดด้วยไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดทองแดงต่างชนิดใน ชิ้นงานเหล็กกล้างานเย็น K110 นพวิชญ์ คงคาทะนะ และชัยยะ ปราณิตพลกรัง	841
MSA125	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเชื่อมประสานในโครงสร้างจุลภาคและผลของกรดกัด ชิ้นลายของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 และ AISI 4140 ในกระบวนการตีขึ้นรูป มีดตลับ กฤษ ฐนรัชชา, ขวนันท์ ทองโยธี, คณินนิตย์ จัปใจเหมาะ และบุญส่ง ฤทธิ์ตา	846
MSA126	การพัฒนาความเป็นฉนวนกันเสียงและสมบัติการหน่วงการติดไฟของเอทิลีนไวไนล แอซิเตด เข็มทัต เขียวหวาน และฉันททิพ สกุลเขมฤทัย	852



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
MSA127	857
MSA128	863
MSA129	869
Supply Chain and Logistics (SCL) จำนวน 21 บทความ	
SCL101	876
SCL102	881
SCL103	886
SCL104	892
SCL105	900
SCL106	907
SCL107	913
SCL109	919

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
SCL110	การวิเคราะห์ปัญหาการขาดทุนของบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้แผนผังก้างปลา สันติพงศ์ จิโรจน์กุลกิจ	926
SCL112	การเลือกสถานที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าโดยประยุกต์ใช้หลักการปรับหน่วยเชิง เส้นตรง กรณีศึกษา โรงงานผลิตกระดาษคราฟต์ บัณฑิตา ภูทรัพย์มี โปณะทอง, ศิวพร สุกสี, อรทัย จำปาโต และสุภาพร เกตุพันธ์	932
SCL113	แนวทางการพัฒนาโซ่อุปทานน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นในช่วงสถานการณ์การระบาดของ ของโรคติดต่อเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กรณีศึกษา บริษัท สุรวิภาอมร อินเตอร์ฟู้ด จำกัด ชัยวรพงศ์ ชูแก้ว, พชรชัย ชูแก้ว, สุธิดา ทับทิมศรี, วัชนะชัย จูมมา, สิริวดี ไทยสมัคร และกัลยากร สุทธิพงษ์	938
SCL114	การเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์ กรณีศึกษา ร้านไม้ราชพฤกษ์ สุธิดา ทับทิมศรี, นราธิป บุญประสม, ชัยวรพงศ์ ชูแก้ว, พชรชัย ชูแก้ว, เจตน์จรรย์ อาจใสธง, และศศิวิมล เปียหมั่นไวย	945
SCL119	การเพิ่มประสิทธิภาพระบบซัพพลายเชนด้วยระบบการผลิตแบบโตโยต้า มานะ ชาวเงิน	951
SCL120	โอกาสและความก้าวหน้าในสายงานโลจิสติกส์ในไทย มานะ ชาวเงิน	957
SCL121	การจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสมเพื่อลดระยะทาง กรณีศึกษาน้ำดื่ม บ้านโนนบุรี นัฐพงษ์ จัตจำง, ทานอง ชิตชอบ, จุฑามาศ พวงประยงค์ และวัชนะชัย จูมมา	963
SCL122	การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และระบบบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเลือกเส้นทางขนส่งที่เหมาะสม กรณีศึกษาธุรกิจ ให้บริการผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ทองจวน คุณพุทธิณี, จิรวัดน์ ณ พัทลุง และพันธุ์เคช นนท์แสงโรจน์	971
SCL123	การกำหนดปัจจัยสำคัญในการเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์อาหารด้วยกระบวนการลำดับชั้น เชิงวิเคราะห์ พิชิตชัย เรือน้อย และระพี กาญจนะ	979
SCL126	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดสมรรถนะการดำเนินงานคลังสินค้าทางการแพทย์ประเภท เวชภัณฑ์ที่ไม่ใช่ยา : การทบทวนวรรณกรรม อนิศา หนูทวี	986
SCL127	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจประยุกต์ใช้ศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าในเขตเมือง ประเทศฝรั่งเศส กรณีศึกษา ศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าในเขตเมืองขนาดย่อย เมืองแซงต์ เอเตียน กัญญารัตน์ นิมตระกูล	992
SCL128	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและการลดความสูญเสียในกระบวนการตัดเย็บเสื้อผ้า สำเร็จรูป สมศักดิ์ แก้วพลอย, วลัยลักษณ์ กาญจนเสถียร และวัชนะชัย จูมมา	998



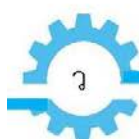
สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
SCL129	การเลือกสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางขนส่งของผู้ขายยางพาราที่เหมาะสม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมศักดิ์ แก้วพลอย, สุจิตรา แก้วพลอย และวัชระชัย จูมผา	1003
Industrial Education (IED) จำนวน 9 บทความ		
IED102	การปรับปรุงกระบวนการเจาะรูเพื่อตรวจสอบชิ้นส่วนชุดบังคับพวงมาลัย กรณีศึกษา : บริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ธนัช มั่นมงคล, ศิวะ พงษ์สระพัง, จริยา แผลงนอก และอมรรรัตน์ พรประเสริฐ	1010
IED104	การส่งเสริมทักษะการแก้โจทย์ปัญหาของผู้เรียนอาชีวศึกษา เรื่องระบบแรง รายวิชาการศาสตร์เครื่องมือกล โดยใช้เทคนิคการแก้ปัญหาของโพลยา ทิพย์ทิยา อินทร์ทิพย์	1016
IED106	ชุดสาธิตแนวเชื่อมมีกร่วมกับเครื่องตัดโลหะด้วยแก๊สอเนกประสงค์ แมน โป้ทย่อม, สมชาย โป้ทย่อม, ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมมาคจาด, พินิจ บุญเยี่ยม, ธงชัย เครือมือ และเกริกชัย มีหนู	1021
IED107	การหาจำนวนโรงสีข้าวและพื้นที่จัดตั้งโรงสีข้าวที่เหมาะสมในจังหวัดสกลนคร ฉัตรวิมล หลงทอง และวิเรชา คำจันทร์	1027
IED109	<i>การลดของเสียจากปัญหาการซบเซาที่ไม่ติด กรณีศึกษา บริษัทผลิตชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ในจังหวัดขอนแก่น</i> วิเรชา คำจันทร์, สุธรีนุช ไวยพันธ์ และศักดิ์ดา คำจันทร์	1033
IED110	การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเพื่อส่งเสริมทักษะการอ่านค่า ของเวอร์เนียคาลิปเปอร์ ไกรลาศ ตอนชัย, พิพัฒน์ หมั่นเป็ง และมนตรี แก้วอยู่	1038
IED111	การออกแบบและสร้างเตาหลอมอลูมิเนียมโดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมมาคจาด, แมน พิภพทอง, สมชาย โป้ทย่อม, นิติกร หลีชัย และดวงรัตน์ ทองคำ	1043
IED112	การพัฒนากระบวนการเรียนรู้โดยใช้รูปแบบสะเต็มศึกษาของนักเรียนระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิชาเขียนแบบเทคนิคเบื้องต้น เรื่องการเขียนแบบภาพฉาย มุมที่ 1 ณัชชา ขุนศิริมา และสุปรียา ศิริพัฒนกุลขจร	1048
IED113	การศึกษาศักยภาพการท่องเที่ยวชุมชนกลุ่มเบญจรงค์บ้านดอนไถ่ จังหวัดสมุทรสาคร ด้วยเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศผ่านระบบอินเตอร์เน็ต วิเชษฐ หลดพา, วชิรธร จันทร์ชมภู, พัฒน์โกศล หนูสมแก้ว และอิวรา จันทร์ชมภู	1055
Other Related Fields (ORF) จำนวน 48 บทความ		
ORF105	การประเมินความเสี่ยงในงานเชื่อมไฟฟ้าด้วยวิธีทางกายศาสตร์ ปัญญา วินทะไชย, ศุภฤกษ์ ศรีหาวงศ์, อภิศักดิ์ หาญพิชาญชัย และอรอุมา เมื่อกสีสุข	1062
ORF106	การศึกษารูปแบบการพยากรณ์เพื่อช่วยวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับ เครื่องกัด CNC ขนาดเล็ก ปริมประภา จุลลาบุตตี, วัทธัญ เนตรสง่า และโชตินรินทร์ ทิริยศิลป์	1067



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ORF108	การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้าแบบรัทมีจักรกฤษณ์ เคลือบวัง	1072
ORF109	การออกแบบ พัฒนาและสร้างเครื่องคว่ำกาแฟเพื่อการเพิ่มมูลค่าผลผลิตของชุมชนแมน ด้อยแพร่, กิรติ วุฒิจารี และอำนาจ เลิศปัญญาธิกุล	1077
ORF110	การพัฒนาเครื่องผลิตกาแฟกะลาเพื่อการประหยัดน้ำในกระบวนการผลิตแมน ด้อยแพร่ และวรเชษฐ์ หวานเสียง	1084
ORF111	การหาแนวทางการปฏิบัติงานในชิ้นงานซีแคลมป์ของนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต ชั้นปีที่ 1 โดยประยุกต์หลักการ ECRS	1089
ORF112	การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับการตัดสินใจคัดเลือกผู้กู้กองทุนเงินกู้ยืมเพื่อการศึกษารายใหม่	1094
ORF113	การปรับปรุงขั้นตอนการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานกรณีศึกษา บริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์	1099
ORF114	การลดปัญหาของเสียจากเม็ดฝุ่นในกระบวนการพ่นสีกันชนท้ายรถยนต์	1103
ORF115	พฤติกรรมการใช้พลังงานของพนักงานในสำนักงานโรงงานผลิตอุปกรณ์ทางการเกษตร	1109
ORF116	การศึกษาค่าความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตรถเข็นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าในโรงพยาบาล: กรณีศึกษาจังหวัดปราจีนบุรี	1117
ORF117	ระบบตัดแสงยาอัตโนมัติ	1124
ORF118	การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องตรวจจับอาการเป็นสัดโดยการกดทับของโคนมเมื่อใช้ Force Sensing Resistor (FSR) และ สเตรนเกจ	1129
ORF119	ผลของการเคลือบผิวด้วยกลูโคแมนแนนและกรดซิดริกต่อคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาของมะม่วงตัดแต่ง	1136
ORF120	การหาแนวทางการลดของเสียโดยการใช้ QC 7 Tools: กรณีศึกษา กระบวนการพ่นสีกลุ่มบริษัท บีดีไอ	1143



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ORF121	ผลของอายุการเก็บรักษาต่อคุณภาพทางกายภาพ-เคมีของผลิตภัณฑ์ ผงปรุงรสจากใบหม่อน นิตยา ภูงาม, อมรกานต์ มงคล, อรลิตา เจือจันทร์ และพรรณทิพย์ สิทธิสังข์	1148
ORF122	การคัดแยกขนาดมาตรฐานคุณภาพมังคุดด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ และ โครงข่ายประสาทเทียม เอกชัย เพชรทอง, ธวัชวงศ์ เปรมมิตร, ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช, วชิรธร จันทรขมภู และสุจิตรา ทิพย์ศรีราช	1153
ORF123	Effect of Hot-Water Treatments on Postharvest Chilling Injury Symptom in Jicama Tuberos Root Atitaya Duangsuphan, Ching-Chang Shiesh and Huey-Ling Lin	1159
ORF124	การสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามมิติเพื่อลดระยะเวลาการคอกของผู้ป่วยใน ชั่วโมงเร่งด่วน กรณีศึกษาแผนกเวชระเบียน โรงพยาบาลสามพราน พีระพงษ์ คชเดือน, วทีญญ อยุ่ทับโพธิ์ และคณน สุจารี	1167
ORF125	การศึกษาระบบให้น้ำอัตโนมัติกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการเกษตร ศราวุธ จันทรกลาง, สุรัตน์ สุภา, ณกรณ์ เมตตาจิตต์ และไพโรจน์ พุทธิรักษา	1174
ORF126	เครื่องอบแห้งสับประรดด้วยลมร้อน ร้อยทิศ ญาติเจริญ, สุรพงษ์ โชทอง และอัครพงษ์ สภาวรินทร์	1181
ORF127	ฟาร์มไก่อัจฉริยะด้วยระบบควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ วชิรธร จันทรขมภู, วัชรกร ปันธุ์รัตน์, สุจิตรา ทิพย์ศรีราช, ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช และพันธุ์เดช นนท์แสงโรจน์	1187
ORF129	การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจเลือกที่จอดรถของลูกค้า กาญจนวรรณ วินิจพิทยากุล	1193
ORF130	การพัฒนาชุดปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ (Test Kits) ของ เฟรชวิลส์ ฟาร์ม กฤตยชล ทองธรรมสถิต, วันทนา รอดประเสริฐ และภานุพงศ์ อุปพุทธา	1198
ORF131	การสร้างโรงอบแห้งยางแผ่นดิบพลังงานแสงอาทิตย์กับตัวรับรังสีอาทิตย์ แบบพาราโบลิค สมมาตร ศรีประเทือง, ฐิติ หมอรักษา, นรภัทร สีตะวัน, สหรัฐ ุลบลม, ณัฐพล คงสุข และสิริวรรณ ต่วงพูล	1204
ORF132	เครื่องล้างและคัดขนาดมะนาวแบบกึ่งอัตโนมัติ ชาญณรงค์ ชุสย, ไกรสร รวยป้อม และบุญฤทธิ์ บัวระบัติ	1210
ORF133	กิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส และความสามารถในการสลาย สีของโกเรตของสารสกัดหยาบเปลือกแตงโม ฐิติกร พรหมบรรจง, ธนากรณ์ คำสุด, สุวรรณา ผลใหม่, เปรมจิต ร่องสวัสดิ์, บัณฑิตา ภูทร์พรมิ โปณะทอง, ศิริวรรณ ปานเมือง และเชมเม็กการ์ ไข่มพัตร	1215
ORF134	ผลของปริมาณหมักปุ๋ยและผงปุ๋ยสดต่อลักษณะทางกายภาพ เคมี และประสาท สัมผัสของข้าวเหนียวหมักปุ๋ย สุรียพร บุญนา และธนะวัฒน์ ณะวรรโณ	1222
ORF135	การบูรณาการภูมิปัญญาท้องถิ่นการนวดแผนไทยเพื่อการพัฒนาเก้าอี้นวดเพื่อ สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ : กรณีศึกษาเสขวิสดุชะลามาพะพร้าว ฉัญญพัทธ์ วัฒนจิรพันธ์, ยิ่งยง รุ่งฟ้า และณรงค์ ชัยสังเคราะห์	1228



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ORF136	การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้สำหรับหัวพันไฟโดยใช้สนามแม่เหล็กถาวร ไพฑูรย์ ช้อนพุดชา, วทีญญ รอดประพัฒน์ และธนิต สวัสดิ์เสวี	1233
ORF137	การแปลงเชิงอนุพันธ์เพื่อการประมาณค่าอนุกรมเทย์เลอร์สำหรับฟังก์ชัน ไม่เชิงเส้น กมลภัสสร มั่นศิลป์	1239
ORF138	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการสื่อสารภายในองค์กรและประสิทธิภาพ การสื่อสารภายในองค์กร กรณีศึกษาศูนย์การค้า ฟิวเจอร์ พาร์ค รังสิต อัครพันธ์ สายจีน และอภิสิทธิ์ ตั้งเกียรติศิลป์	1244
ORF139	ศึกษาประสิทธิภาพการบริหารจัดการกองทุนหมู่บ้านและชุมชนอย่างยั่งยืน กรณีศึกษา กองทุนหมู่บ้าน ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี อัญญาพัทธ์ วัฒนจิรพันธุ์ และจงจิต ลีอ่อนรัมย์	1252
ORF140	ความสามารถในการจัดทำบัญชีและความอยู่รอดของผู้ประกอบการตลาดนัด UBI มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วลัยลักษณ์ กาญจนเสถียร, จุไรรัตน์ ทองบุญชู, ประสิทธิ์ รุ่งเรือง, กมลชนก ฝูอินทร์ และวัชระชัย จุมผา	1257
ORF141	ศึกษาความต้องการพัฒนาความรู้ทางวิชาชีพบัญชีของผู้ประกอบวิชาชีพ การบัญชีในจังหวัดสงขลาและพัทลุง วลัยลักษณ์ กาญจนเสถียร และวัชระชัย จุมผา	1262
ORF142	การจำลองการใช้เครื่องควบคุมการให้สารละลายทางหลอดเลือดดำให้เพียงพอต่อ ผู้ป่วยโรคมะเร็งในโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นรา สมัตถภาพงศ์ และธฤติ หมอรักษา	1266
ORF143	การออกแบบและสร้างเครื่องเตรียมแปลงปลูกผัก วรชัย มั่นศิลป์, แพน ดูนขุนทด และธราธา ศักดาเดช	1273
ORF144	การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดซื้อเวชภัณฑ์ โดยการนำระบบการผลิตแบบสิ้นมา ประยุกต์ใช้ กรณีศึกษา : การจัดซื้อเวชภัณฑ์ลักษณะ Consignment โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ ศิริพร จันทร์หอม และกล้าหาญ ณ น่าน	1280
ORF145	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการตัดหญ้าเนเปียร์ กรณีศึกษา เครื่องตัดหญ้าเนเปียร์ แบบ 1 หัวตัด ชนาธิป กาลจักร, สมชาย ม้วนโคกสูง, สุวิทย์ ธรรมแสง, อีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ, दनัย สอนสุภาพ และอนพล สมบัติ	1286
ORF146	การออกแบบเชิงพัฒนารถเข็นวีลแบบแฮร์ปรับย่น กรณีศึกษา บริษัท แอมเมท เอ็นจิเนียริง จำกัด อีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ, สมชาย ม้วนโคกสูง, สุวิทย์ ธรรมแสง, ชนาธิป กาลจักร, दनัย สอนสุภาพ, อนพล สมบัติ, เชษฐา ศรีประเสริฐ และอภิปัตย์ ชาวไฉสง	1291
ORF147	การออกแบบเชิงพัฒนารถเข็นเปลนอนผู้ป่วยชนิด 4 ล้อ กรณีศึกษา บริษัท แอมเมท เอ็นจิเนียริง จำกัด สมชาย ม้วนโคกสูง, อีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ, สุวิทย์ ธรรมแสง, ชนาธิป กาลจักร, दनัย สอนสุภาพ, อนพล สมบัติ, กอบเกียรติ นาทรม และวัชรินทร์ สายสมยา	1298



สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ORF148	วงจรรองความถี่แบบ 3 อินพุต 1 เอาต์พุต โดยใช้ CCCCTAs ที่ควบคุมด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ โอกาส รักษาบุญ, ศักดิ์สิทธิ์ สุ่มมาตย์, ศุภิสรา คำบุตตา, ศุภกิจ วงศ์ปัจฉิม และนิติพัฒน์ พิสุทธิพงศ์	1305
ORF149	การศึกษาความผิดปกติของระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อของพนักงาน กรณีศึกษา กลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากกะลามะพร้าว ตำบลชัยบุรี อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง อภิชล ทองมั่ง กำนันต๊าว, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล, ชัยวัฒน์ ชิงชาสิทธิ์ และโสธญา ส่งอำไพ	1310
ORF150	การบำรุงรักษาวิมลแบบทุกคนมีส่วนร่วมด้วยระบบเว็บไซต์แจ้งซ่อมแผนก คอมพิวเตอร์ผ่านแอปพลิเคชันแอนดรอยด์และเทคโนโลยีภาพคิวอาร์โค้ด วชิรธร จันทร์ชมภู, ปิยะวัฒน์ ตรัสสรณวาทีน และยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช	1316
ORF151	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มกึ่งอัตโนมัติ แบบ 2 หัวจ่าย เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร์ และชวลิต อินปัญญา	1324
ORF152	ชุดทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการเกษตร ประหยัด กองสุข, อนิวัต คุฎคราช, และธนากร แสงทอง	1329
ORF153	แอปพลิเคชันตรวจข้อสอบโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ คนภร ศวรรตีกุล, วุฒิมัทธ หนุยอด และกษนิภา เสริมสัย	1335





การประชุมวิชาการราชมณฑลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
3-4 กันยายน 2563 โรงแรม เคที แกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี

รหัสบทความ MFE-146

ศึกษาอิทธิพลความแข็งผิวและการเกิดความเค้นตกค้างที่ผิวของกระบวนการกรัดผิวแข็ง ด้วยเซรามิคบอลในเหล็ก SKD11

Analytical Surface Hardness and Residual Stress for Burnishing Process Ceramic Ball SKD11 Steel

อัศววัฒน์ ไบกว้าง^{1*} และศิริชัย ต่อสกุล²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: arkharawat_b@mail.mutt.ac.th*

Arkharawat Baikwang ^{1*} Sirichai Torsakul²

¹ Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thunyaburi

E-mail: arkharawat_b@mail.mutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ในกรรมวิธีการกรัดพื้นผิวแข็งซึ่งเป็นวิธีการนำเม็ดลูกบอลเซรามิกขนาด 8 มิลลิเมตร ทำการกรัดลงบนพื้นผิวเหล็ก SKD11 ที่มีค่าความแข็งสภาพจำหน่าย Annealed 296 HV MIN จากการศึกษาวิเคราะห์ของการทดลองการกรัดพื้นผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่ใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Ball Burnishing Pressure) กรัดผิวแข็งที่ 200, 400, และ 600 บาร์ และความลึกในการกรัดพื้นผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ค่าความแข็งผิว 543.26 HV ที่แรงดัน 600 และความลึก 0.3 มิลลิเมตร สอดคล้องกับค่าความเค้นตกค้าง 481.4 MPa ที่แรงดัน 600 บาร์และความลึก 0.3 มิลลิเมตร จึงได้ว่าเมื่อค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นตกค้างจะเพิ่มมากขึ้นด้วย

คำสำคัญ : การกรัดพื้นผิวแข็ง, แรงดันกรัดผิวแข็ง, ความลึกกรัดพื้นผิว, ค่าความแข็งผิว, ความเค้นตกค้าง

Abstract

In the burnishing process, which is how the grain size 8 mm ceramic ball to press down on the surface of steel SKD11 with hardness supplied Annealed 296 HV MIN. The analysis of trials of burnishing with the ceramic ball at the burnishing pressure pressing hard surface at 200, 400, and 600 bars and depth of burnishing 0.3, 0.5 and 0.7 millimeters. Surface hardness 543.26 HV pressure of 600 and a depth of 0.3 mm corresponds to the residual stress of 481.4 MPa at a pressure of 600 bar and a depth of 0.3 mm, so that when the hardness increasing the residual stress is increased.



Keywords : Burnishing, burnishing pressure, depth of Burnishing, surface hardness, residual stress

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กมีบทบาทสำคัญต่าง ๆ อย่างกว้างขวางในประเทศและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยจากมีความสามารถใน การหล่อขึ้นรูปตามงานที่มีความซับซ้อนได้ง่าย ด้านทานการกัดกร่อน ทนต่อการสึกหรอ มีความแข็งและความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะเหล็กกล้าผสมสูงกระบวนการครีตพื้นผิวแข็งดังแสดงในรูปที่ 1 ขึ้นอยู่กับเครื่องมือการครีตพื้นผิวแข็ง(บอลหรือลูกกลิ้ง) กลิ้งกับพื้นผิวของชิ้นงาน [1] การทำงานของบอลครีตพื้นผิวแข็งเกิดขึ้นเมื่อจุดสัมผัสผิวของวัสดุชิ้นงาน [2] ด้วยวิธีนี้แรงอัดจะกดลงไปบนเหล็ก SKD 11 เกิดความเค้นตกค้างขึ้นในชั้นผิวทำให้มีการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลหลายอย่าง การครีตพื้นผิวแข็งสามารถปรับปรุงทั้งความแข็งแรงของพื้นผิวและความหยาบผิว การเพิ่มความแข็งแรงให้กับพื้นผิวส่วนใหญ่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงความต้านทานความล้าภายใต้แรงการครีต[3]การครีตพื้นผิวแข็งในเหล็ก SKD 11 สำหรับเหล็กชุบแข็งถูกนำไปใช้กับวัสดุที่ค่าความแข็งมากกว่า 55 HRC โดยปกติการปรับปรุงสมบัติจะเป็นการดำเนินการหลังจากการกัด ความหยาบผิว และความต้านทานความล้าภายใต้แรงการครีต จากเครื่องกัดสามารถใช้งานได้และพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลในกระบวนการคือ: แรงครีต ลูกบอลครีต ความลึกในการครีต ซึ่งใช้ในกระบวนการครีตพื้นผิวแข็งของเหล็ก SKD11

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลความแข็งผิวและการเกิดความเค้นตกค้างที่ผิวของกระบวนการครีตผิวแข็งด้วยเซรามิคบอลในเหล็ก SKD 11

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเหล็ก SKD11

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือเหล็กกล้าคาร์บอนสูงผสมโครเมียมสูง SKD11 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็ก SKD11

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.5	0.03	0.40	12.00	1.00	0.90

คุณสมบัติการใช้งาน มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก ชุบแข็งได้ลึกมาก มีความเหนียวแกร่งพอใช้ มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก สามารถชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้ รักษาคมตัดให้มีอายุการใช้งานได้ยาวนาน ด้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี เกิดการบิดงอเล็กน้อยหลังชุบแข็ง สามารถทำไนโตรดิ่งได้ สามารถชุบเคลือบผิวแบบ PVD ที่เหล็ก การชุบแข็ง (Hardening) ชุบแข็งอุณหภูมิ 1000C-1040C สารชุบ น้ำมัน อากาศ อุณหภูมิอบคืนตัว 100C-600C ความแข็งหลัง อบคืนตัวของเหล็กSKD11 50-60 HRC การนำไปใช้งาน SKD11 นิยมใช้ทำแม่พิมพ์งานเย็นอย่างกว้างขวาง แม่พิมพ์แบงก์ (Blanking) แม่พิมพ์บีบ (Pressing) แม่พิมพ์ดัด (Bending) แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป (Drawing) แม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปเย็น (Cold Extrusion) แม่พิมพ์สำหรับงานทริมมิง (Trimming) งานบีบเหรียญ (Coining) และยังสามารถใช้ทำลูกรีด และแม่พิมพ์สำหรับรีดเกลียว ไบรด์ตัดเฉือนโลหะและพลาสติก และแม่พิมพ์ที่มีความทนต่อการสึกหรอสูง ค่าความแข็งสภาพจำหน่าย Annealed 296 HV MIN [4]

2.2 กระบวนการครีตพื้นผิวแข็ง (Burnishing Process)

จากรูปที่ 1 แสดงกระบวนการครีตพื้นผิวแข็งด้วยบอล ในกระบวนการองค์ประกอบของการเปลี่ยนรูปเป็นลูกทรงกลมแข็ง วัสดุที่ใช้สำหรับสร้างลูกทรงกลม ได้แก่ ซิลิคอนไนไตรด์เซรามิค ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนรูปชั้นผิว



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอล[5]

กลไกที่เกี่ยวข้องของงานกระบวนการกรัดพื้นผิวแข็งด้วยบอล ได้แก่ แรงดันที่ใช้ในการกรัดพื้นผิวแข็ง ความเร็วที่ใช้ในการกรัดพื้นผิวแข็ง ความลึก อัตราป้อน จำนวนครั้งที่ผ่านการกรัดพื้นผิวแข็ง และสารหล่อลื่น จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Deepak et al.[6]

2.3 ค่าความแข็งผิว (hardness)

ความแข็ง คือคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุ คือ ความต้านทานต่อแรงกด การทดสอบความแข็งโดยการวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ เลือกใช้การทดสอบแบบ Micro Hardness Test Vickers เป็นการวัดความแข็งโลหะโดยใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม เทคนิคนี้เป็นการพัฒนามาจากการทดสอบแบบ Brinell เพื่อลดปัญหาของความถูกต้องในการวัดและเหมาะสมกับการวัดค่าความแข็งที่ไม่ลึก หัวกดที่ใช้ในวิธีการนี้ คือ เพชร ซึ่งมีรูปร่างเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีมุมระหว่างผิวหน้าด้านตรงข้ามกันเท่ากับ 136 องศา แรงกดที่ใช้อยู่ระหว่าง 1 กรัม - 100 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลาทดสอบประมาณ 10-15 วินาที รอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กในระดับไมครอนจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการช่วยคำนวณความแข็ง ค่า ความแข็ง ที่ได้จะแสดงออกมาดังเช่น 800 HV/10 ซึ่งหมายถึง มีค่า ความแข็ง Vickers 800 และใช้แรงกด 10 กิโลกรัม ค่าความแข็งที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ผลที่ชัดเจนและเป็นรูปแบบมากกว่า

วิธีการอื่นๆ และสามารถใช้ทดสอบวัสดุได้อย่างหลากหลาย ทั้งที่มีองค์ประกอบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ[7]

2.4 ความเค้นตกค้าง (Residual stress)

ความเค้นตกค้างผิวในงานกรัดผิวแข็งความเค้นตกค้าง (Residual stress) คือ ความเค้น (Stress) ที่เหลืออยู่ในวัสดุแข็งเกร็งหลังจากได้รับแรงจากภายนอกมากระทำ และการได้รับแรงนั้นสิ้นสุดลง ความเค้นตกค้างเป็นสิ่งที่ต้องการและไม่ต้องการ ขึ้นอยู่กับสถานการณ์ เช่น การทำเคาะเพื่อคลายตัว (peening) เป็นการสร้างความเค้นกด เข้าสู่ชิ้นงานโลหะ เช่น ชิ้นส่วนกังหันเครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึง หรือกรณีกระจกหน้าของสมาร์ตโฟน จะช่วยทำให้กระจกมีความแข็งแรง และต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนได้ดีขึ้น ในทางกลับกัน ความเค้นตกค้างสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของงานก่อสร้าง สิ่งปลูกสร้าง หรือเครื่องจักร ได้เนื่องจาก ทำให้ความสามารถในการรับภาระแรงลดลง[8]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือเหล็กกล้าคาร์บอนสูงผสมโครเมียมสูง SKD11

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ มีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลายชนิด เครื่องมือหลักที่ใช้ในทดลองที่ให้ค่าแม่นยำจนถึงระดับกระบวนการ ได้แก่

3.2.1 เครื่องกัด

ในงานวิจัยเลือกใช้เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) ยี่ห้อ FIRST รุ่น V700 ดังรูปที่ 2



การประชุมวิชาการราชชมภรณ์ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
3-4 กันยายน 2563 โรงแรม เคที แกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี



รูปที่ 2 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC)

3.2.2. บอลครีตผิวแข็ง

บอลครีตผิวแข็งใช้บอลเซรามิก si3n4 ขนาด 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บอลครีตผิวแข็ง

3.2.3. ปั๊มแรงดัน

ปั๊มแรงดันที่ใช้คือปั๊มไฮดรอลิกแรงดันสูง ความเร็วรอบปั๊ม 1,420 รอบต่อนาที สร้างแรงดันได้ถึง 700 บาร์ ปริมาตรบรรจุน้ำมัน 30 ลิตร แรงดันไฟฟ้า 230/400 โวลต์



รูปที่ 4 ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกแรงดันสูง

3.2.4. เครื่องวัดค่าความแข็ง

เครื่องวัดค่าความแข็ง Micro Hardness tester Vicker ยี่ห้อ Innovatest สเกล 100 กรัม



รูปที่ 5 เครื่องวัดค่าความแข็ง

3.2.5 เครื่องวัดค่าความเค้นตกค้าง

เครื่องเอกซ์เรย์วัดค่าความเค้นตกค้างชนิดเคลื่อนที่ รุ่น μ -X360s



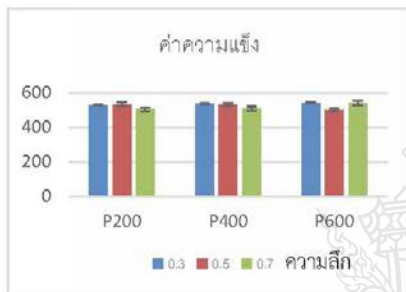
รูปที่ 6 เครื่องวัดค่าความเค้นตกค้าง



4. อภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของค่าความแข็งผิว (hardness)

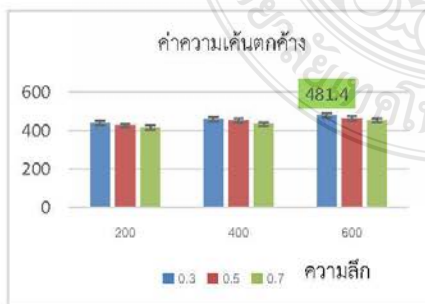
จากการทดลองกรดรีดพื้นผิวแข็งเหล็ก SKD11 โดยใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกดันลูกบอลเซรามิก ขนาด 8 มิลลิเมตร (Burnishing Pressure) กรดรีดพื้นผิวที่ 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรดรีดพื้นผิว (Depth of Burnishing) 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความแข็งพื้นผิวและความเค้นตกค้าง



รูปกราฟที่ 1 กราฟแสดงค่าความแข็งพื้นผิวเปรียบเทียบ

จากรูปกราฟที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งพื้นผิวชิ้นงานจากการทดลองกรดรีดด้วยบอลเซรามิก จากการวิเคราะห์ค่าความแข็งที่ถูกกดด้วยระดับความลึกที่มากขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มของความแข็งลดลงจากค่าความลึกในการกดที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มากขึ้นก็มีผลทำให้ค่าความแข็งพื้นผิวเพิ่มขึ้นโดยค่าแรงดันน้ำมันที่ใช้คือ 200, 400, และ 600 บาร์

4.2 ความเค้นตกค้าง (Residual stress)



รูปกราฟที่ 2 กราฟแสดงค่าความเค้นตกค้างเปรียบเทียบ

จากรูปกราฟที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยค่าความเค้นตกค้างที่เกิดจากการกรดรีดพื้นผิวแข็งด้วยบอล เซรามิก จากการวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้าง 543.26 ที่ถูกกดด้วยระดับความลึกที่มากขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มของความแข็งลดลงจากค่าความลึกในการกดที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มากขึ้นก็มีผลทำให้ค่าความเค้นตกค้างที่ชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้นโดยค่าแรงดันน้ำมันที่ใช้คือ 200, 400, และ 600 บาร์[8]

5. สรุป

จากการทดลองกรรมวิธีการกรดรีดพื้นผิวแข็งด้วยการใช้ลูกบอลเซรามิกดันด้วยน้ำมันไฮดรอลิกแรงดันสูง กรดรีดลงพื้นผิวเหล็ก SKD11 ที่มีค่าความแข็งสภาพจำหน่าย Annealed 296 HV MIN จากการวิเคราะห์ของการทดลองการกรดรีดพื้นผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่ใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Ball Burnishing Pressure) กรดรีดผิวแข็งที่ 200, 400, และ 600 บาร์ และความลึกในการกรดรีดพื้นผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร ค่าความแข็ง 543.26 HV ที่แรงดัน 600 และความลึก 0.3 มิลลิเมตร สอดคล้องกับค่าความเค้นตกค้าง 481.4 MPa ที่แรงดัน 600 และความลึก 0.3 มิลลิเมตร จึงได้ว่าเมื่อความแข็งเพิ่มขึ้นค่าความเค้นตกค้างจะเพิ่มมากขึ้นด้วย[7]

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.A.Ibrahim, S.M.Abd Rabbo, and A.A.Ebied, "Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy



- logic,” Journal of materials processing technology, vol 209, (2009), pp. 2428–2435.
- [2] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Mun˜oa and J.A. Sa´nchez, “Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, (2005), pp.1659–1668.
- [3] SKD11 คุณสมบัติและการใช้งาน, บริษัท กรุงเทพ เหล็กกล้า จำกัด(online), 2561, Available: www.juthawan.co.th/product-item/skd-11/ (18 มกราคม 2563).
- [4] N. H. Loh and S. C. Tam, “Effects of ball burnishing parameters on surface finish A literature survey and discussion,” Precision Engineering, vol. 10(4), (1988), pp.215-220.
- [5] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Mun˜oa and J.A. Sa´nchez, “Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, (2005), pp.1659–1668.
- [6] Deepak Mahajan and Ravindra Tajane, “A Review on Ball Burnishing Process,” International Journal of Scientific and Research Publications, vol 3(4), (2013), pp. 1-8.
- [7] การวัดค่าความแข็งของวัสดุ, (online), 2563, http://hardnessmeter.blogspot.com/2015/09/blog-post_30.html (22 พฤษภาคม 2563)
- [8] ความเค้นตกค้าง (online), 2563, <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B8%81%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%87> (22 พฤษภาคม 2563)



การประชุมวิชาการรณรงคสถานเทคโนโลยีการผลิต และการจัดการ 2020 ครั้งที่ 5
RMTC 2020
The 5 Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2020
Production Technology and Management for Improving Smart Farming

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ขอมอบเกียรติบัตรเพื่อรับรองวามผลงานวิจัย

MFE146 : ศึกษาอิทธิพลความแข็งแรงและการเกิดความเค้นตกค้างที่ผิวของกระบวนการทรีตผิวแข็งด้วยเซรามิคบอลในเหล็ก SKD11

โดย

อัครวัฒน์ ไบกว้าง และศิริชัย ดอสกุล

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและได้นำเสนอผลงานประเภท Oral Presentation

ในการประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ 2020

(Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2020 : RMTC2020) ครั้งที่ 5

ระหว่างวันที่ 3 - 4 กันยายน 2563 ณ โรงแรมเคพีแกรนด์ จังหวัดจันทบุรี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช นนท์แสงโรจน์)
รองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ ประมงค)
คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร





ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล	นายอัศววัฒน์ ไบกว้าง
วัน เดือน ปีเกิด	26 กรกฎาคม 2515
ที่อยู่	103/1 หมู่ 9 ตำบลท่าผา อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม แขนงเขียนแบบออกแบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
ประสบการณ์การทำงาน	ช่างเทคนิคผู้ช่วย ฝ่ายวิศวกรรมและเทคนิค บริษัท นวโลหะไทย จำกัด พ.ศ. 2533 - 2536 ช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักร บริษัท วายเคเค (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2542 - 2543 หัวหน้าแผนกวางแผนผลิตแม่พิมพ์ทริมมิ่ง ฝ่ายสร้างแม่พิมพ์และอุปกรณ์ บริษัท ซัมมิท ออโตซีท อินดัสตรี จำกัด พ.ศ. 2545 - 2548 ครู วิทยาลัยเทคนิคลำปาง พ.ศ. 2550 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	086-114-8179
อีเมล	arkharawat_b@mail.rmutt.ac.th

