

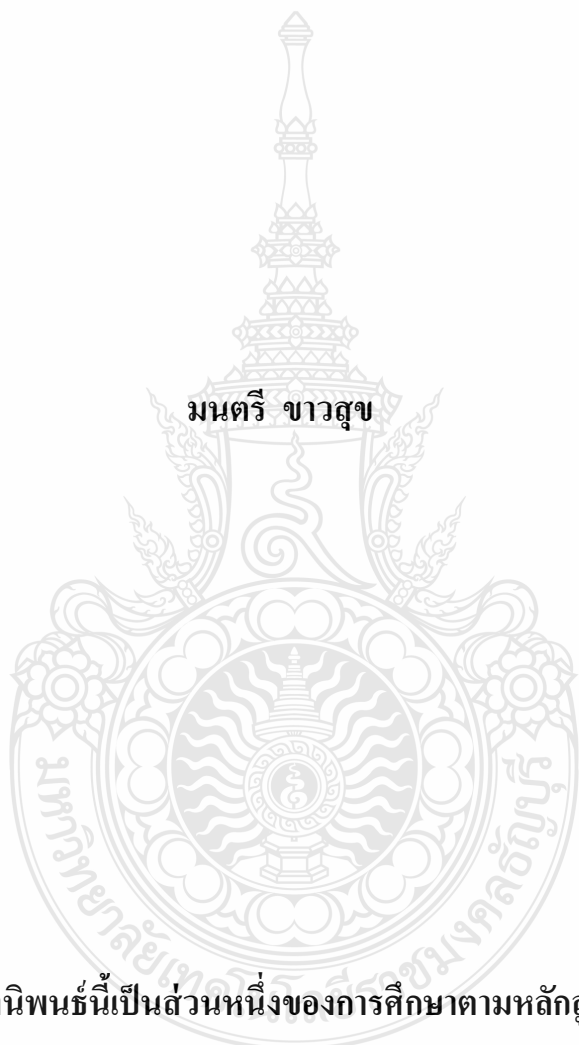
อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งและความเค้นตกค้างผิวในกระบวนการ
กดรีดผิวแข็งด้วยบอล

INFLUENCE OF PARAMETERS ON SURFACE HARDNESS AND
RESIDUAL STRESS OF BALL-BURNISHING PROCESS

มนตรี ชาวสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงและความเค้นตกค้างผิวในกระบวนการ
กดรีดผิวแข็งด้วยบอล



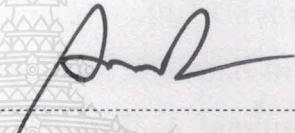
มนตรี ขาวสุข

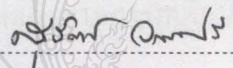
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

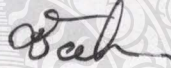
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งและความเค้นตกค้างผิวใน
กระบวนการกรดรีดผิวแข็งด้วยบอล
Influence of Parameters on Surface Hardness and Residual Stress of
Ball-Burnishing Process

ชื่อ – นามสกุล นายมนตรี ขาวสุข
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.-Ing.
ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

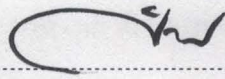

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ วรรณศรี, Ph.D.)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 20 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงผิวและความเค้นตกค้างในกระบวนการการครีตผิวแข็งด้วยบอล
ชื่อ-นามสกุล	นายมนตรี ขาวสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการการครีตผิวแข็งด้วยบอลบนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางคือ SCM-440 ซึ่งค่าความแข็งแรงผิว ค่าความเค้นตกค้าง ค่าความหยาบผิวและโครงสร้างจุลภาคถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา โดยพื้นฐานกระบวนการการครีตผิวแข็งมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวชิ้นงาน รวมถึงความแข็งแรงผิว ความเค้นตกค้าง และความหยาบของพื้นผิวโดยการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเกิดจากการเคลื่อนบอลเซรามิกหมุนบนพื้นผิวที่ต้องการ

การทดลองบอลเซรามิกซิลิกอนไนไตรด์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษา พารามิเตอร์ของกระบวนการนี้ประกอบด้วย แรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิก ระหว่าง 200 ถึง 600 บาร์ และความลึกของการครีตผิวแข็ง ระหว่าง 0.4 ถึง 0.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าทั้งแรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการครีตผิวแข็งเป็นปัจจัยหลักของความแข็งแรงผิวหลังการทดลอง ค่าความแข็งแรงผิวสูงสุดที่ 582 HV ที่แรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และความลึกของการครีตผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งคล้ายคลึงกับการชุบแข็งเหล็ก SCM-440 อย่างไรก็ตามการรวมกันของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการนี้ยังให้ค่าความเค้นตกค้างตามแนวอนมีค่าสูงสุดจนถึง 369.4 MPa สูงกว่าการชุบแข็งเหล็ก SCM-440 ค่าความหยาบผิวเป็นผลกระทบจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการ ที่แรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ และความลึกของการครีตผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร ส่งผลให้คุณภาพพื้นผิวดูดีที่สุดในการศึกษานี้ ในส่วนท้ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการครีตผิวแข็งแสดงให้เห็นพื้นที่ที่หนาแน่นบนพื้นผิวของชิ้นงานได้รับผลจากกระบวนการการอัดตัวของเกรน

คำสำคัญ: การครีตผิวแข็งด้วยบอล ความแข็งแรงผิว ความเค้นตกค้าง

Thesis Title	Influence of Parameters on Surface Hardness and Residual Stress of Ball-Burnishing Process
Name-Surname	Mr. Montri Kawsuk
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr-Ing.
Academic Year	2018

ABSTRACT

The purpose of this research was to investigate the feasibility of a ball-burnishing process on medium carbon steel, namely SCM-440, where a surface hardness, residual stress, surface roughness, and microstructure were used as criteria for this study. Fundamentally, the burnishing process is an operation aimed at improving the quality of a workpiece's surface, including surface hardness, residual stress, and surface roughness, by a plastic deformation generated by a movement of a ceramic ball rolled onto a desired surface.

Experimentally, a silicon nitride ceramic ball with a diameter of 6 mm was used as a tool in this study, while the process parameters, comprised of the burnishing pressure and depth of burnishing, ranged between 200 and 600 bars and 0.4 and 0.6 mm, respectively.

Based on the experimental results, it can be concluded that both burnishing pressure and depth of burnishing were the main effects of the final surface hardness. The highest surface hardness was at 582 HV where the burnishing pressure was 600 bars and the depth was burnishing of 0.5mm, which is similar to a hardened SCM-440. Nevertheless, this combination of the process parameters also provided the highest horizontal residual stress up to 369.4 MPa, which is higher than a hardened SCM-440. Surface roughness was influenced by both process parameters where the burnishing pressure of 200 bars and the depth of burnishing of 0.4 mm provided the best surface quality in this study. Finally, the microstructure of the burnished sample showed the dense area on the surface of the sample effected by a compacting process of grains.

Keywords: ball burnishing surface hardness residual stress

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้จากการช่วยเหลือของผู้มีอุปการะคุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้คำแนะนำในการจัดทำงานเสร็จตามวัตถุประสงค์ และวิทยาลัยเทคนิคชนนาทที่สนับสนุนสถานที่ทำการทดลอง

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ พี่น้อง และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของท่านข้างต้นผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

มนตรี ชาวสุข



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การกัดผิวแข็ง (Burnishing).....	6
2.2 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440	9
2.3 การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test)	11
2.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	17
2.5 พื้นผิวชิ้นงาน (Surface Texture)	18
2.6 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress).....	22
2.7 เทคโนโลยีทางด้าน CNC.....	27
2.8 ทบทวนวรรณกรรม	31
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	36
3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดลองเบื้องต้น	43
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	43
3.5 การวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	49
3.6 การวัดความหยาบผิว	50
3.7 การวัดความเค้นตกค้าง	50
3.8 การวัด โครงสร้างจุลภาค.....	50
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล	50
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
4.1 ค่าความแข็งของผิว.....	52
4.2 ค่าความเค้นตกค้าง.....	65
4.3 ค่าความหยาบผิว.....	68
4.4 โครงสร้างจุลภาคของผลึก.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองค่าความแข็งผิว	90
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองค่าความหยาบผิว	94
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการปรับปรุงความหยาบของพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของ SCM-440 (mass%)	10
ตารางที่ 2.3 ตารางเทียบค่าความแข็ง	15
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องกัดยี่ห้อ FANUC รุ่น V 700.....	38
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ S เทียบกับพารามิเตอร์ความหยาบ (2D).....	41
ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กชัน (XRD) ด้วยเครื่อง Rigaku รุ่น SmarSite Rs	42
ตารางที่ 3.4 แสดงการทดสอบเบื้องต้น.....	43
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมของธาตุต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440 ที่ใช้ในการทดสอบ	44
ตารางที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกัดผิวแข็งชิ้นงาน	46
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM-440 ก่อนการกัดผิวแข็ง	53
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM-440 หลังการกัดผิวแข็ง	54
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร.....	56
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร.....	57
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร.....	58
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 200 บาร์	59
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 400 บาร์	60
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกัดผิวแข็งที่ความลึกของการกัดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 600 บาร์	61

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.9 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็ง ของผิว	63
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของพื้นผิวเหล็ก SCM-440	64
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความกันตกร้าง	67
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440	69
ตารางที่ 4.13 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความ หยาบผิว	75



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการกัดกรีดผิวแข็งด้วยบอล.....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะการกดในการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์	13
รูปที่ 2.3 ลักษณะการกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	14
รูปที่ 2.4 การเรียงตัวของอะตอม	18
รูปที่ 2.5 ลักษณะของพื้นผิว.....	20
รูปที่ 2.6 ค่าความหยาบผิว	21
รูปที่ 2.7 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์	24
รูปที่ 2.8 แสดงการตั้งค่าทางเรขาคณิตของการวัดความเค้นตกค้างของ X-ray (XRD)	27
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องกัด CNC	29
รูปที่ 2.10 แสดงอัตราป้อน	31
รูปที่ 3.1 ขนาดของบอลกรีดผิวแข็งชิ้นงาน	37
รูปที่ 3.2 เครื่องมือกรีดผิวแข็ง	37
รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์(CNC)	38
รูปที่ 3.4 เครื่องปั้มน้ำมัน ไฮดรอลิก	39
รูปที่ 3.5 น้ำมันไฮดรอลิก HLP 68.....	39
รูปที่ 3.6 เครื่อง Matsuzawa Digital Microhardness Tester	40
รูปที่ 3.7 เครื่อง 3D Optical Profiler	40
รูปที่ 3.8 เครื่อง Portable Stress Analyze	41
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์.....	42
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการกรีดผิวแข็ง	44
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของบอลเซรามิก ซิลิกอนไนไตรด์เซรามิก (Si3N4)	45
รูปที่ 3.12 การติดตั้งหัวบอลการกรีดผิวแข็ง	46
รูปที่ 3.13 การจัดยึดชิ้นงาน	47
รูปที่ 3.14 ทิศทางการกรีดผิวแข็งชิ้นงาน.....	47
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการการกรีดผิวแข็ง	48
รูปที่ 3.16 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางของ SCM 440ที่ผ่านการชุบแข็ง.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งผิวของ SCM-440ก่อนการกดรีดผิวแข็ง.....	53
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็ง	55
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน น้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร ...	56
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดัน น้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร ..	57
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่แรงดัน น้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร ..	58
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของ การกดรีดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์	60
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของ การกดรีดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์	61
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของ การกดรีดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์	62
รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลหลักของความลึกของการกดรีดผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งผิว	63
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน.....	65
รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นตกค้างของเหล็ก SCM-440 ก่อนและหลังการกดรีดผิวแข็ง	66
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างอัดของเหล็ก SCM-440	68
รูปที่ 4.13 Topographyและพารามิเตอร์ของพื้นผิวหลังจากการกดรีดผิวแข็ง	74
รูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลหลักของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ และความลึกของการกดรีดผิวแข็ง ที่ ส่งผลต่อความหยาบผิว	76
รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลร่วมของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกดรีดผิวแข็งมี ผลกระทบร่วมกันที่ส่งผลต่อความหยาบผิว.....	77
รูปที่ 4.16 ค่าความหยาบผิวของ เหล็ก SCM-440 (a) กดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 200 \text{ bar}$, $D_b = 0.4 \text{ mm}$ (b) ผ่านการชุบแข็ง	78

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุดภาคของเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านกระบวนการกรดผิวแข็ง.....	80
รูปที่ 4.18 โครงสร้างผลึกของ เหล็ก SCM-440 (a) Base (b)กรดผิวแข็งที่ $P_b = 600 \text{ bar}$, $D_b = 0.4 \text{ mm}$ (c) ผ่านการชุบแข็ง.....	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าจัดเป็นวัสดุหรือวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเหล็กกล้าที่มีอยู่มีมากมายหลายชนิด สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ 3 ประเภท คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ซึ่งเหล็กกล้าแต่ละชนิดนำไปใช้ประโยชน์ในงานแตกต่างกันตามสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป เหล็กทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล (Machinery Steel) เหล็ก SCM-440 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง นำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย สามารถนำไปใช้งานสำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงจำพวก เพลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อก้านพวงมาลัย เพลาล้อก้านสูบ ดอกสว่านเจาะบ่อน้ำมัน เฟืองเครื่องจักรขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนปั้มน้ำ หน้าที่งาน ประแจ ปากกาจับงาน และยังมีใช้ทำชิ้นส่วนรถไฟ แกนกลางเครื่องอัดแรงของแม่แรงไฮดรอลิก สกรู และน็อตของอุตสาหกรรมน้ำมัน รวมทั้งชิ้นส่วนรถยนต์[1] เพลา ล้อก้านสูบ เพลาข้อเหวี่ยง เฟือง เพลา บูชรับเพลา

ในกระบวนการแปรรูปเพื่อให้ชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก SCM-440 มีความแข็งแรงและต้านทานความล้าได้ดี จะทำโดยผ่านกระบวนการชุบแข็ง (Hardening) โดยการชุบแข็งอุณหภูมิ 830-860°C โดยสารชุบ น้ำและน้ำมัน จนทำให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นโครงสร้างมาเทนไนต์ ซึ่งความแข็งหลังอบคืนตัวจะอยู่ในช่วง 55-58 HRC [2] หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งชิ้นงานต้องผ่านกระบวนการปรับผิวให้มีคุณภาพผิวตรงตามมาตรฐาน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[3-5] ได้มีการนำกระบวนการครีตผิวชิ้นงาน (Burnishing) ด้วยลูกกลิ้ง (Roller Burnishing)[6-7] และกระบวนการครีตผิวแข็งด้วยการใช้บอล (Ball Burnishing)[8-11] เป็นวิธีการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานทางกายภาพ เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวโลหะ[12] ความแข็งผิวและความถูกต้องของมิติเหล่านี้เป็นกระบวนการขึ้นรูปเย็นไม่เกี่ยวข้องกับการกำจัดวัสดุ[3,13-14]และทำให้เกิดการแข็งตัวของชิ้นงานขึ้นในระดับหนึ่ง การเปลี่ยนรูปของพลาสติกทำให้ความหยาบของยอดสูงสุดไหลไปสู่จุดต่ำสุด สร้างสภาพผิวชิ้นงานใหม่ ลักษณะของพื้นผิวสุดท้ายจะกลายเป็นส่วนผสมของชิ้นงานผิวแข็งและผลของการครีตเป็นอิทธิพลของแรงปกติ (Normal Force) สมบัติเชิงกลของวัสดุและรูปทรงเรขาคณิตของความหยาบสุดท้ายถูกพิจารณา การใช้ขั้นตอนการกด

รีดผิวแข็งด้วยบอลที่ประสบความสำเร็จต้องมีการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ และความสมบูรณ์ของพื้นผิว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางบอลครีต ความเร็วในการกรัดผิวแข็ง อัตราป้อน ความดันของการกรัดผิวแข็ง เป็นต้น[4] เป้าหมายหลักของกระบวนการรีดผิวแข็งด้วยบอลจึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน ลดความหยาบผิว และเพิ่มความเค้นตกค้าง ในงานนี้วิธีการตอบสนองความแข็งพื้นผิวถูกใช้เพื่อเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ขั้นตอนการกรัดจะใช้กับเครื่องจักรกลแบบเดียวกับที่พื้นผิวถูกขัด โดยการใช้อัลตราโซนิกครีตชิ้นงานทำงานร่วมกับเครื่องจักรซีเอ็นซี (Computer Numerical Control, CNC) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่เที่ยงตรงสูง ความแม่นยำ รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ สามารถผลิตชิ้นงานซ้ำๆ ได้ตลอดโดยมีคุณภาพและมาตรฐานเดียวกัน กระบวนการแปรรูปชิ้นงานใช้เครื่องกัด CNC เป็นตัวควบคุมความเร็ว อัตราป้อน และระยะป้อนลึก ในกรณีนี้บอลจะกลิ้งบนผิวชิ้นงานเพื่อกรัดผิวแข็งโดยดำเนินการบนเครื่องกัด CNC

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปทางกายภาพ เพื่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งผิว (Surface Hardness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ความหยาบผิว (Surface Roughness) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงาน (Microstructure) จากกระบวนการรีดผิวแข็ง ผลจากการศึกษาจะนำไปสู่การพัฒนาการลดน้ำหนักของเหล็ก ลดส่วนผสมของเหล็กที่ผสมแล้วได้ความแข็งไม่พอเมื่อมีการกระแทก ทำให้เกิดการเสีรูป ในปัจจุบันการกรัดผิวแข็งซ้ำแต่ได้คุณภาพสำหรับงานที่ต้องการทั้งความแข็ง ความเค้นตกค้างของชิ้นงาน และความเรียบของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กโดยไม่ต้องอบชุบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการรีดผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440 ด้วยบอลเซรามิก (Ceramic Ball)

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

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

กระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยปัจจัยของ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกดบอล และความลึกของการกัดรีดผิวแข็งซึ่งงาน ส่งผลต่อความแข็งผิว ความเค้นตกค้าง ความหยาบผิว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน SCM-440

1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.4.1 ตัวแปรต้น ประกอบด้วย

- แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) 200, 400 และ 600 บาร์
- ความลึกของการกัดรีดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4, 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร

1.4.2 ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ความแข็งผิว
- ความเค้นตกค้าง
- ความหยาบผิว
- โครงสร้างจุลภาคของผลึก

1.4.3 ตัวแปรควบคุม

- เส้นผ่านศูนย์กลางของบอลเซรามิก (Ceramic Ball Diameter)
- อัตราการป้อน (Feed Rate)
- ความเร็วในการกัดรีดผิวแข็ง (Speed)
- จำนวนของการกัดรีดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) ของบอลเซรามิก

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ที่มุ่งจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งผิว ในกระบวนการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก ร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling) สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440 ที่มีค่าความแข็งที่ไม่ผ่านการชุบ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.5.1 ทดลองใช้กับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามารถปรับความเร็วรอบสูงสุด 3,000 รอบ/นาที
- 1.5.2 ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440 ที่มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 302 HV ขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร พื้นที่ของแนวกัดรีด 25x25 ตารางมิลลิเมตร
- 1.5.3 บอลเซรามิกกัดรีดผิวแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
- 1.5.4 อัตราการป้อน (Feed Rate) 0.1 มิลลิเมตร/นาที
- 1.5.5 ความเร็วในการกัดรีดผิวแข็ง 2000 มิลลิเมตร/นาที
- 1.5.6 การวัดความแข็งด้วยเครื่อง Microhardness Tester
- 1.5.7 การวัดความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่อง 3D Optical Surface Profiler
- 1.5.8 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่อง Portable Stress Analyze
- 1.5.9 การวัดโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.6.1 เหล็กกล้าคาร์บอน SCM-440 หมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Alloy Steel) มีโครเมียมและโมลิบดีนัมผสม
- 1.6.2 กระบวนการกัดรีดผิวแข็ง หมายถึง กระบวนการเพิ่มความแข็งผิว เพิ่มความเค้นตกค้างและ ลดความหยาบผิวโดยใช้บอลกลิ้งไปบนพื้นผิวชิ้นงาน (Burnishing)
- 1.6.3 บอลกัดรีด หมายถึง บอลเซรามิกประกอบด้วยซิลิคอน ไนไตรด์เซรามิก (Si_3N_4) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (Ball-burnishing)
- 1.6.4 แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก หมายถึง แรงดันที่ปั๊มดันน้ำมันไฮดรอลิกผ่านเครื่องกัดรีดผิวแข็ง (Burnishing Pressure)
- 1.6.5 ความลึกของการกัดรีดผิวแข็ง หมายถึง ความลึกในการเคลื่อนที่ของเครื่องรีดผิวเข้าหาในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (Depth of Burnishing)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบความเป็นไปได้ในกระบวนการครีดยผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440 ด้วยบอลเซรามิก (Ceramic Ball)

1.7.2 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งผิว ความเค้นตกค้าง และความหยาบผิว โดยการใช้บอลเซรามิกในการครีดยผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440

1.7.3 นำข้อมูลจากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

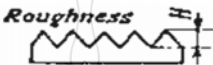


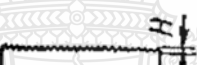

2.1 การกรัดผิวแข็ง (Burnishing)

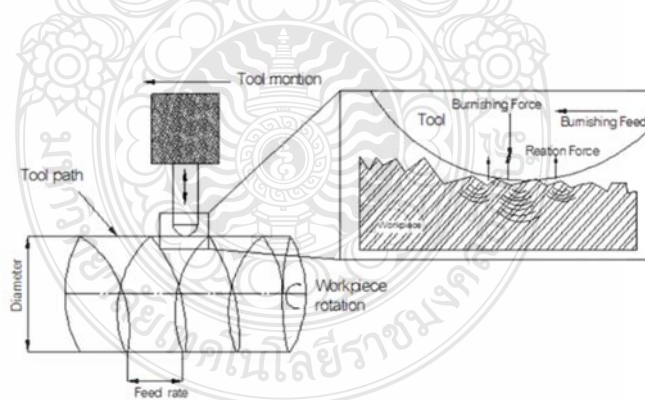
การกรัดผิวแข็งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับปรับปรุงพื้นผิวและสามารถใช้งานได้กับเครื่องกัดประสิทธิภาพสูง ยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้มากกว่ากระบวนการทั่วไป เช่น การขัดแบบพิเศษ (Super Finishing) การขัดพวกกลิ้ง ไอดีโอเลีย (Honing) การเจียรระไน (Grinding) เป็นต้น นอกจากนี้ผิวเคลือบยังทนต่อการสึกหรอสูงและมีอายุความล้า (Fatigue Life) ที่ดีขึ้น การศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอล Deepak et al. [4] พิจารณานิคมของวัสดุ พารามิเตอร์กระบวนการ และน้ำมันหล่อลื่น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้และอายุการใช้งานที่ยาวนานของเครื่องจักร การผลิตชิ้นส่วนไม่เพียงแต่มีความถูกต้องด้านมิติและทางเรขาคณิตแต่ยังมีผิวที่มีความละเอียดสูง การตกแต่งพื้นผิวมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติของชิ้นงานเช่น ความต้านทานการสึกหรอ ความแข็งแรงต่อการล้า ตัวต้านทานแรงล้า ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งวิธีการกลิ้ง การกัดหรือการเจียรระไนที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถเป็นไปตามข้อกำหนด จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความหยาบของพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ

ขั้นตอนการกรัดผิวแข็ง ประกอบด้วยลูกกลิ้งกรัดผิวแข็ง (Roller Burnishing) หรือบอลกรัดผิวแข็ง (Ball Burnishing) โดยการกลิ้งลงในพื้นผิวของชิ้นงานและให้อัตราการเคลื่อนไหวย้อนเหมือนกัน การกรัดผิวแข็งด้วยบอลลงบนพื้นผิวทรงกระบอกแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการดำเนินงานการกรัดผิวแข็งโดยการกลิ้งบอลที่รองรับแรงกระแทก กระบวนการนี้บอลกลิ้งอย่างอิสระ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-12 มิลลิเมตร) ที่มีความแรงพอให้เกิดการเสียรูปส่วนยอดของผิวหน้า บอลสัมผัสกับพื้นผิวที่ต้องการความเงาและกลิ้งอย่างอิสระด้วยแรงเสียดทานขนาดเล็กมาก เช่นเดียวกับการตัดเฉือนทำให้เกิดการเสียรูปพลาสติกบนพื้นผิวทั้งหมด เนื่องจากเป็นเครื่องมือถูกป้อนอย่างต่อเนื่องตามแกนชิ้นงาน เมื่อต้องการใช้ขั้นตอนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่ประสบความสำเร็จ จำเป็นต้องมีการพิจารณาผลของพารามิเตอร์ของการกรัดผิวแข็งและความสมบูรณ์ของพื้นผิว ในระหว่างการกรัดผิวแข็ง ความเค้นตกค้างอัดที่เหลือนบนผิวของชิ้นงาน ดังนั้นความแข็งแรงและความ

ด้านทานการสึกหรอของชั้นผิวเพิ่มขึ้น กระบวนการกดรีดผิวแข็งจะสร้างพื้นผิวที่ราบและแข็ง ช่วยยืดอายุการใช้งานยาวนานกว่าพื้นผิวที่ยังไม่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความหยาบของพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ[4]

Process	Diagram of Resulting Surface	Height of Micro Irregularity (μm)
Precision Turning		1.25-12.50
Grinding		0.90-5.00
Honing		0.13-1.25
Lapping		0.08-0.25
Superfinishing		0.01-0.25



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการกดรีดผิวแข็งด้วยบอล[5]

2.1.1. การกดรีดผิวแข็งด้วยบอล (Ball Burnishing)

ในกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยการกดรีดผิวแข็ง วัสดุที่ใช้สำหรับสร้างเซรามิกบอลประกอบด้วยอลูมินาคาร์ไบด์เซรามิก ซีเมนต์คาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์เซรามิก ซิลิกอนคาร์ไบด์

เซรามิก และเหล็กแบร็ง บอลครีตผิวแข็งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนรูปชั้นผิว สำหรับแรงที่กำหนดจะให้ความดันเฉพาะสูง ความแข็งแกร่งต่อการล้าตัวมากขึ้น ความแข็งจุลภาคและความลึกของชั้นแข็งชั้นงานมากขึ้น เมื่อเทียบกับการกรัดผิวแข็งด้วยลูกกลิ้ง เนื่องจากมีแรงเสียดทานจุดและแรงเสียดทานการกรัดระหว่างบอลและชิ้นงาน บริเวณการเปลี่ยนรูปจะอยู่ติดกับบอลกรัดผิวแข็งบนชิ้นงาน เครื่องมือกรัดยังใช้เพื่อประโยชน์ที่หลากหลาย เพื่อให้ได้พื้นผิวที่ดีมีการปกปิดยาวนานขึ้น ปรับปรุงอายุการสึกหรอ ลดแรงเสียดทาน และช่วยเพิ่มลักษณะความสวยงาม ตัวอย่างเช่น วาล์ว ลูกสูบของถังไฮดรอลิกหรือกระบอกลม อุปกรณ์สนามหญ้าและสวน เพลสำหรับปั๊มเพลทำงานในบushing Bearing Bores และสุขภัณฑ์ [6]

2.1.2. พารามิเตอร์กระบวนการและการวิเคราะห์

Deepak et al. [4] ทำการอธิบายผลกระทบของพารามิเตอร์หลักของกระบวนการกรัดผิวแข็ง ได้แก่ ความดันและแรงของการกรัดผิวแข็ง (Pressure and Normal Force) ความเร็วการกรัดผิวแข็ง (Burnishing Speed) และอัตราการป้อน (Feed Rate) จำนวนของการกรัดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) เส้นผ่าศูนย์กลางบอล (Ball Diameter) สารหล่อลื่น (Lubricant) การกรัดผิวแข็งสามารถควบคุมได้ด้วยพารามิเตอร์ซึ่งเรียกว่าพารามิเตอร์กระบวนการกรัดผิวแข็ง พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันเหล่านี้จำเป็นต้องควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด พารามิเตอร์หลักของกระบวนการกรัดผิวแข็งมีดังนี้

1. ความดันและแรงของการกรัดผิวแข็ง (Pressure and Normal Force) เครื่องมือกรัดผิวแข็งจะถูกกดลงกับชิ้นงานระหว่างการกรัดผิวแข็ง แรงดันที่กระทำโดยใช้เครื่องมือกรัดบนชิ้นงานเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นแรงกรัดผิวแข็งตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ในกระบวนการกรัดผิวแข็งแรงดันเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากค่าความหยาบของพื้นผิวหลังการกรัดผิวแข็งส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงที่เครื่องมืออัดแรงดันลงบนชิ้นงาน แรงที่ต้องใช้ในระหว่างการกรัดจะต้องสูงพอที่จะปรับเปลี่ยนความเรียบของพื้นผิวและวัสดุไหลจากยอดให้ต่ำลง แรงการกรัดผิวแข็งขึ้นอยู่กับจุดคลาก Yield Strength ของผลผลิตของวัสดุ

2. ความเร็วการกรัดผิวแข็ง (Burnishing Speed) ความเร็วการกรัดผิวแข็งที่ชิ้นงานซึ่งหมุนในระหว่างการกรัดผิวแข็งจะขึ้นกับชิ้นงานหรือเครื่องมือกรัด ในการดำเนินการกรัดพื้นผิวแบบแบนเครื่องมือกรัดผิวแข็งจะหมุนและชิ้นงานยังคงนิ่ง ความเร็วในการกรัดผิวแข็ง

ส่งผลต่อความแข็งแรงและมีติของชิ้นงาน ความเร็วการกรัดรีดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที หรือมิลลิเมตร/นาที

3. ความลึกของการกรัดรีดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) จะคล้ายกับความลึกของการตัดการเพิ่มความลึกของการกรัดรีดส่งผลให้แรงการกรัดรีดผิวแข็งเพิ่มขึ้นค่าความหยาบของพื้นผิวลดลง แรงที่จุดนั้นเรียกว่าแรงสูงสุดและความลึกที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ วัสดุที่มีการกรัดรีดผิวแข็ง ความเร็วในการกรัดรีดผิวแข็ง เส้นผ่าศูนย์กลางของบอล อัตราป้อน และความถี่ของการสั่น [8]

4. อัตราการป้อน (Feed Rate) ความเร็วเชิงเส้นที่เครื่องมือป้อนให้กับชิ้นงาน อัตราการป้อนโดยทั่วไปจะวัดเป็น mm/rev ปริมาณพื้นผิวที่ต้องการกำหนดอัตราการป้อน สำหรับการตกแต่งที่สูง อัตราการป้อนควรมีค่าต่ำสุด ดังนั้นอัตราการป้อนควรเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับผิวที่ดีขึ้น

5. จำนวนของการกรัดรีดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) บางครั้งการกรัดรีดจะทำซ้ำในชิ้นงานโดยใช้พารามิเตอร์กระบวนการเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงช่วยเพิ่มความเรียบของผิว จำนวนครั้งของเครื่องมือที่ผ่านอาจเกิดขึ้นหลายครั้งขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการและความแข็งแรงของชิ้นงาน

6. สารหล่อลื่น (Lubricant) การใช้สารหล่อเย็นของเครื่องจักรกลในกระบวนการกรัดรีดผิวแข็งสารหล่อเย็นเป็นฟิล์ม Elasto-hydrodynamic ระหว่างบอลกับพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อหลีกเลี่ยงการเหนียวนำของวัสดุบนลูกเซรามิกและขจัดความร้อนจากการเสียดสี[9] เนื่องจากสภาพผิวแห้งทำให้พื้นผิวไม่เรียบจึงมีการใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมระหว่างการทดสอบทั้งหมดซึ่งเป็นน้ำมันละลายที่ละลายได้ผสมกับน้ำ[5] จากการศึกษางานวิจัยพบว่า สารหล่อลื่นส่วนใหญ่ได้แก่ น้ำมันเครื่อง SAE น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล[4]

2.2 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440

SCM-440 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีความแข็งในช่วง 42-57 HRC ขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนที่ผสม เหล็กเกรดนี้มีความเหนียว ทนแรงดึงสูง ความสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก (Forgeability) แต่ความสามารถในการกลึงไสอยู่ในระดับปานกลาง และความสามารถในการเชื่อม (Weldingability) ต่ำ เพราะความอ่อนแอต่อการแตกของรอยเชื่อม เหมาะสำหรับการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงเหมาะสำหรับทำเพลาล้อก้านสูบ เพลาช้อเหวี่ยง เฟืองเพลานูรับเพลานูรับเพลาล้อรับ แกน

เฟืองขับ ส่วนประกอบของแม่พิมพ์พลาสติก แม่พิมพ์งานเย็น แม่พิมพ์งานร้อน และชิ้นส่วนรถยนต์ทั่วไปและยังนิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถไฟ เพลาคีโรจเจอร์ แกนกลางเครื่องอัดแรงของแม่แรงไฮดรอลิก สกรูและน็อต ของอุตสาหกรรมน้ำมันรวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการความแข็งแรง เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (SCM-440/AISI4140) มีส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.2

คุณลักษณะเด่น (Significant Characteristics) ของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SCM-440 ที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาไม่ค่อสูงมากนัก มีความแข็งแรงสูงมา ด้านทานต่อการสึกหรอมีความต้านทานแรงดึงที่ 800-1,300 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร SCM-440 สามารถผ่านกระบวนการอบชุบโลหะด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ โดยกระบวนการชุบแข็ง (Quenched and Tempered) กระบวนการอบอ่อนและการดึง (Annealed and Cold-drawn) หรือกระบวนการอบปกติ (Normalized) ความแข็งหลังการชุบแข็งอยู่ในช่วง 42-57 HRC

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของ SCM-440 (mass%) [2]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.38-	0.15-	0.60-	<0.03	<0.03	0.90-	0.15-	Max. 0.25	Max. 0.03
0.43	0.35	0.85			1.20	0.30		

2.2.1 สมบัติของธาตุที่ใช้ผสมในเหล็กกล้า SCM-440 มีดังนี้

1. คาร์บอน (Carbon, C) เป็นธาตุที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่นๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก แต่คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

2. ซิลิคอน (Silicon, Si) ปรากฏในเหล็กทุกชนิด ซิลิคอนใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิ่ง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้น

3. แมงกานีส (Manganese, Mn) ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะที่หลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มาก เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนี้ แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

4. โครเมียม (Chromium, Cr) ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่าย เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งแรง ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ

5. โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่นๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

6. นิกเกิล (Nickel, Ni) ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

2.3 การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test)

ความแข็งของวัสดุ คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียดรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึง ความต้านทานต่อการตัด การขีด การขีด และการตัด ดังนั้นความแข็งไม่ใช่คุณสมบัติโดยตรงของวัสดุที่กำหนดได้ ค่าคุณสมบัติความแข็งคือผลของกระบวนการวัดที่กำหนด

การทดสอบความแข็งโดยการเปรียบเทียบมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถให้ข้อมูลตัวเลขที่แม่นยำหรือกำหนดสเกลเฉพาะสำหรับวัสดุและโลหะสมัยใหม่ วิธีโดยปกติเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดจากความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่าง ภาระ (Load) และ

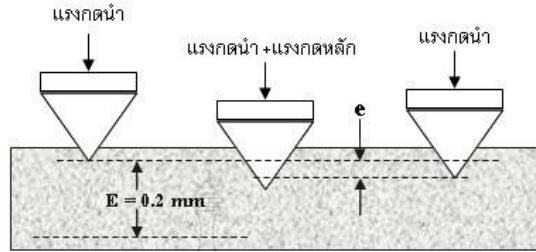
เวลาที่เจาะจง วิธีมาตรฐานหลัก 3 มาตรฐาน สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดของรอยกด คือ ร็อกเวลล์ (Rockwell) บริเนลล์ (Brinell) และวิกเกอร์ (Vickers) ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore, Mohs, Barcol แต่ละวิธีของมาตรฐานได้ถูกแบ่งเป็นสเกล กำหนดโดยภาระที่ใช้และลักษณะของหัวกด ด้วยเหตุผลของการใช้งานและการสอบเทียบ นอกจากนี้การทดสอบความแข็งต้องทำกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือมีระดับความแข็งแตกต่างกันที่พื้นผิวแคบ จึงมีการพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Tester) เพื่อการใช้งาน

2.3.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hard Test)

การทดสอบความแข็งของร็อกเวลล์ สามารถใช้ทดสอบความแข็งของโลหะตั้งแต่อ่อนจนกระทั่งแข็งมากได้ เพราะมีสเกลความแข็งร็อกเวลล์ให้เลือกใช้หลายสเกล แต่ละสเกลก็เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละชนิด โดยใช้หัวกดและขนาดแรงกดทดสอบต่างกัน วิธีทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ประกอบด้วย การกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปกรวยหรือหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง ให้ภาระหัวกดกดวัสดุทดสอบภายใต้ภาระเริ่มต้น 10 กิโลกรัมแรง เมื่อถึงภาวะคงที่ โดยเข็มชี้จะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวกดและยังตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกของรอยกดจากหัวกด ถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งศูนย์ ในขณะที่ให้ภาระเริ่มต้นก็เพิ่มภาระหลักด้วย ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดของรอยกด เมื่อถึงภาวะคงที่อีกครั้ง ภาระหลัก ได้ถูกเอาออก แต่ภาระเริ่มต้นยังคงไว้ การเอาภาระหลักออกส่งผลให้มีการคืนตัวบางส่วน เป็นผลให้ความลึกของรอยกดลดลง การเพิ่มขึ้นความลึกของรอยกดอย่างถาวรเป็นผลจากการเพิ่มและเอาภาระหลักออก

หลักการวัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (Minor Load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ ร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) , ร็อกเวลล์บี (Rockwell – B) และร็อกเวลล์เอ (Rockwell – A) การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120° ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่งและคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่ง

ปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการกดในการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ [15]

ข้อดี เป็นการทดสอบค่าความแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทดสอบวัสดุได้ครอบคลุมเกือบทุกชนิด การทดสอบทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยเพราะสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ สามารถใช้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบบริเนลล์ เพราะหัวกดมีขนาดเล็กกว่า

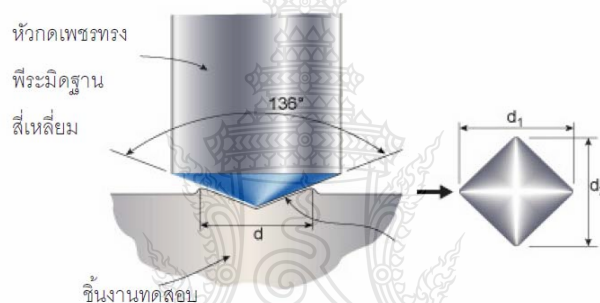
ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะผิวชิ้นงานทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมากเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กและไม่ลึกมาก (รอยกดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วงประมาณ 0.2 – 1 มิลลิเมตร)

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด หรือมีมากพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปทรง
- ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดกับจุดศูนย์กลางรอยกดถัดไปหรือจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรมีระยะไม่น้อยกว่า 3 มม.
- การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซี เหมาะกับการทดสอบวัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบร็อกเวลล์ซีอยู่ในช่วง 20 – 67 HRC
- การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์บี เหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบร็อกเวลล์บีอยู่ในช่วง 35 – 100 HRB

2.3.2 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีระมิดมุม 136° ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 กิโลกรัมแรง โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 10-15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกหนึ่งวินาทีขึ้นกับชนิดของวัสดุ เมื่อหัวกดถูกยกขึ้นรอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมที่หลงเหลือบนผิวหน้าวัสดุ พื้นที่ผิวเอียงของรอยกดจะถูกคำนวณ DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) คือค่าความแข็งวิกเกอร์ เกิดจากผลหารแรงกดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกดหรืออาจแสดงค่าเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็ง คือ HV หรือ VHN ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์[15]

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับ โครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูงสามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกดควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบ บริเนลล์, ร็อกเวลล์ และวิกเกอร์ สามารถเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบในหน่วยอื่นๆ โดยอาศัยตารางเทียบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E140-07 เพื่อความสะดวกในการทดสอบและเปรียบเทียบค่าความแข็ง ในกรณีที่ขึ้นงานผ่านการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางเทียบค่าความแข็ง [16]

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		...	(654)	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 2.3 ตารางเทียบค่าความแข็ง (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 CarbideBall 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		336	336	354
35	67.9		327	327	345
34	67.4		319	319	336
33	66.8		311	311	327
32	66.3		301	301	318
31	65.8		294	294	310
30	65.3		286	286	302
29	64.8		279	279	294
28	64.3		271	271	286
27	63.8		264	264	279
26	63.3		258	258	272
25	62.8		253	253	266
24	62.4		247	247	260
23	62.0		243	243	254
22	61.5		237	237	248
21	61.0		231	231	243

2.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ

กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of Material) คือกระบวนการในการเปลี่ยนแปลง ขนาดลักษณะต่าง ๆ ภายใต้แรงที่มากกระทำต่อวัสดุนั้น เช่น ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) ความเค้นแรงกดหรือความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) ความเค้นแรงดัด (Bending Stress) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ความเค้นแรงบิด (Torsion Stress) เป็นต้น

ประเภทของการเปลี่ยนรูป โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของการเปลี่ยนรูปของโลหะหรือของวัสดุออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปหรือการแปรรูปแบบยืดหยุ่น คือวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำในช่วงหนึ่งที่วัสดุสามารถทนอยู่ได้ โดยเมื่อปลดแรงนั้นออก วัสดุก็จะสามารถกลับคืนรูปให้อยู่ในสภาพเดิมได้

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปหรือการแปรรูปแบบถาวร คือวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจนถึงจุดเกินพิกัดที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพนั้นๆ ได้ จนเกิดการเปลี่ยนแปลง ขนาดและรูปร่างไปอย่างถาวร จนไม่อาจจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูปส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรุนแรง ถึงแม้ว่าจะเอาแรงออกแล้วก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

1. สลิต (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัวหรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเค้นแต่ผลึกก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย

2. ทวินนิ่ง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูปอันเนื่องมาจากระยะหรือแนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกันหรือเหมือนกัน โดยที่ทิศทางในการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

3. ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรงมาจากภายนอกเข้ามากกระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

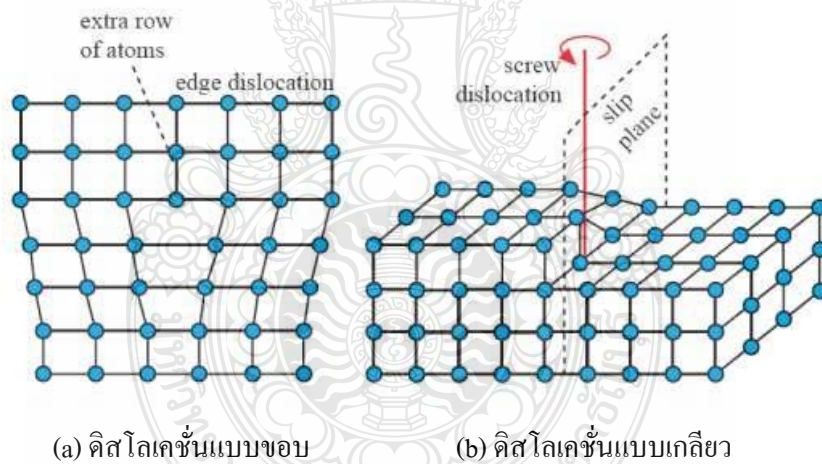
2.4.1 ดิสโลเคชัน(Dislocation)

ดิสโลเคชัน เป็นความบกพร่องที่เกิดจากอนุภาคของ โครงผลึก ณ จุดต่างที่อยู่ในแนวหรือแถว (Row) เดียวกัน ไม่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ความบกพร่องในลักษณะนี้มี 2 แบบ คือ

1. ดิสโลเคชันแบบขอบ (Edge Dislocation) เกิดจากอะตอมไม่อยู่ในแนวหรือแถวในผลึก ซึ่งเกิดจากการมีระนาบเกินจากปกติ ขอบของระนาบจะสิ้นสุดอยู่ในผลึกอันเนื่องมาจากความเครียดอัดรอบๆ และมีความเครียดดึงบริเวณขอบ ดิสโลเคชันเกิดการบิดเบี้ยวในผลึก อะตอมที่อยู่เหนือเส้นดิสโลเคชันจะถูกดึงเข้าหากัน ในขณะที่อะตอมที่อยู่ด้านล่างจะถูกดึงออกจากกัน จึงทำให้ระนาบข้างเส้นดิสโลเคชันและระนาบถัดไปโค้ง ระนาบที่อยู่ห่างจากดิสโลเคชันมากขึ้นจะโค้งน้อยลง จึงมีผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.4 (a)

2. ดิสโลเคชันแบบเกลียว (Screw Dislocation) เกิดจากระนาบของผลึกได้รับความเค้นเฉือน ทำให้ระนาบของผลึกเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นหรือเคลื่อนที่ลง จนทำให้ขอบเขตของผลึกมีแนวเน้นไปตรงกัน แสดงดังรูปที่ 2.4(b)

ดิสโลเคชันที่พบในผลึกจริงไม่ได้เป็นแบบขอบ หรือเกลียวอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่มีลักษณะผสมกันอาจเรียกว่า ดิสโลเคชันแบบผสม (Mixed Dislocation) ซึ่งจะเกิดการผสมทำให้ผลึกบิดเบี้ยว



รูปที่ 2.4 การเรียงตัวของอะตอม [17]

2.5 พื้นผิวชิ้นงาน (Surface Texture)

ในกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีต่างกัน เช่น งานกัด การกลึง และงานเจียรระไน เป็นต้น พื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ จะมีความเรียบและมีคุณภาพผิวที่ดีจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยและผลที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน การมีคุณภาพผิวที่ดีมีผลต่อความสวยงามเมื่อมีการ

ประกอบชิ้นส่วน และความเสียดทานเมื่อต้องมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน ความเรียบของผิวนี้จะมีค่าจำเป็นสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลบางชนิด ในการกำหนดลักษณะของผิวชิ้นงาน ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย และเครื่องมือการผลิต

ลักษณะทั่วไปของพื้นผิวที่ผ่านการแปรรูปจะเกิดการเบี่ยงเบนแบบซ้ำไปซ้ำมา จากผิวในอุดมคติ องค์ประกอบหลักๆ ของสภาพผิว

1. พื้นผิว (Surface) หมายถึงขอบเขตหรือบริเวณที่แยกออกจากส่วนเนื้อวัสดุงาน รูปร่าง และลักษณะผิวงานระบุได้ด้วยการขึ้นรูป (Drawing) หรือคำอธิบายคำจำกัดความ (Descriptive Specifications)

2. รูปร่างผิว (Profile) หมายถึงเส้นที่แสดงลักษณะพื้นผิวงานตลอดภาคหน้าตัดที่ถูกนำมาพิจารณา

3. ความหยาบผิว (Roughness) หมายถึงความผิดปกติของพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต

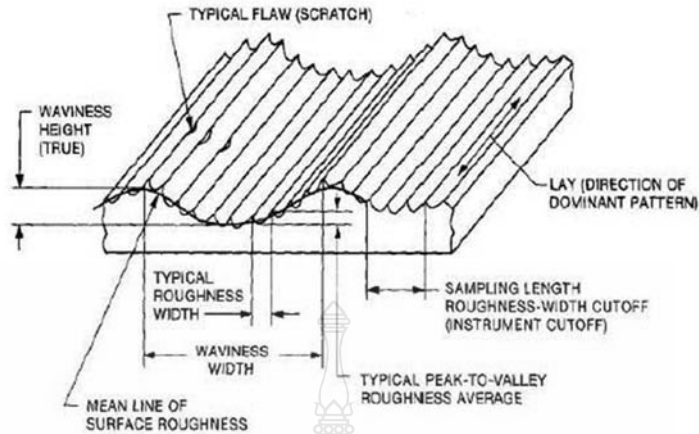
4. คลื่นของผิวงาน (Waviness) หมายถึงความผิดปกติของผิวงานที่มีระยะในการพิจารณากว้างกว่าช่วงความหยาบผิวเกิดขึ้นจากการโก่งตัวของทั้งชิ้นงานและการหลวมคลอนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งการสั่นสะเทือนขณะทำการขึ้นรูป

5. Flaw หมายถึงความผิดปกติของผิวงานที่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวงานเช่น รอยขีดข่วน รอยแตก และรูพรุน เป็นต้น

6. Lay หมายถึงแนวทิศทางของรอยสันส่วนยอดความหยาบของผิวที่ทำการตรวจสอบ

2.5.1 ความหยาบผิวและความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness and Surface Finish)

ความหยาบเป็นผลมาจากความแตกต่างทางด้านจลน์ของกระบวนการตัดตั้งรูปที่ 2.5 ความหยาบของพื้นผิวมีความสำคัญต่อการใช้งานหลายๆอย่าง เช่น แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวการสึกหรอจากการเสียดสี ความสวยงาม (Looks) ความรู้สึกในการสัมผัส (Feels) ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม (Sealing Property) พารามิเตอร์ต่างๆของความหยาบของพื้นผิว Ra, Rz และ Rmax วัดโดยใช้เครื่องทดสอบความหยาบผิวค่าเฉลี่ยของเส้นศูนย์ (C.L.A) หรือค่า Ra คือค่าความหยาบของค่าเฉลี่ยเลขคณิต



รูปที่ 2.5 ลักษณะของพื้นผิว[18]

ข้อดีของการตกแต่งพื้นผิวคือ:

1. พื้นผิวตกแต่งที่ดีเยี่ยมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานที่สัมผัสได้
2. ลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงาน 2 ชิ้น
3. พื้นผิวตกแต่งที่ดีจะส่งผลให้มีความสวยงามมากขึ้นและความสามารถในการรับน้ำหนัก

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดอายุการกัดกร่อนและอายุความล้าของส่วนประกอบ

วิธีการวัดพื้นผิวชิ้นงาน โดยทั่วไป คือการวัดความหยาบผิวที่สามารถถูกกำจัดค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ยแกนตั้งวัดจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด โดยวิธีการเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าความหยาบเฉลี่ยแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (2.1)$$

- เมื่อ R_a = ค่าความหยาบเฉลี่ย
 y = ค่าเบี่ยงเบนแกนตั้งจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด
 L_m = ระยะทางที่เบี่ยงเบนไป

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวงาน

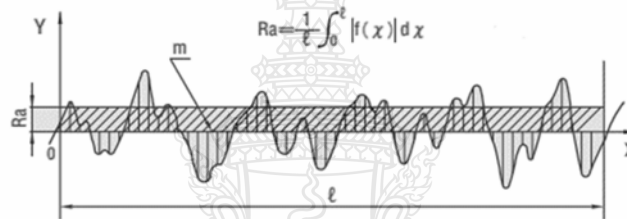
ค่าความหยาบของพื้นผิวมีผลโดยตรงต่อความเงาของผิวชิ้นงาน การประมาณค่าความหยาบมีการกำหนดค่าเป็นตัวเลขและมีวิธี Ten Spot Average Surface Roughness การคำนวณที่ชัดเจนค่าความหยาบที่ใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ค่าความหยาบเฉลี่ย (Average Surface Roughness : R_a) ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Maximum height : R_z) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten Spot Average

Surface Roughness : Rz) ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยแต่ละค่ามีวิธีการวัดดังนี้

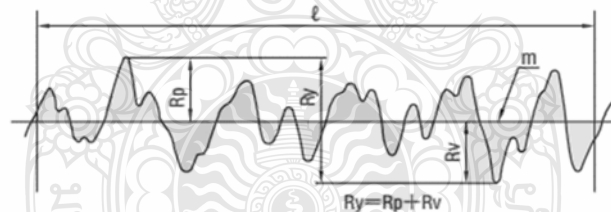
- ความหยาบเฉลี่ย (Average Surface Roughness : Ra) คือ ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตของพื้นที่ยอดแหลมบนเส้นอ้างอิง ค่าแกน x คือค่าเฉลี่ย ค่าแกน y คือ ค่าความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 2.6 (a)

- ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Maximum Height : Ry) คือ ค่าวัดจากจุดสูงสุดไปยังถึงจุดต่ำสุดของผิวงานเทียบกับเส้นอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2.6 (b)

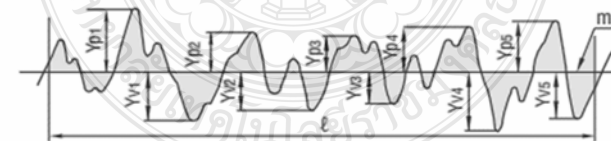
- ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten Spot Average Surface Roughness : Rz) คือ ค่าหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน 5 ช่วงคำนวณค่าความสูงของยอดกราฟบน 5 จุด และล่าง 5 จุดนำค่ามารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 2.6 (c)



(a) Arithmetical average roughness (R_a)



(b) Maximum height (R_y)



$$R_z = \frac{|Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}| + |Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5}|}{5}$$

$Y_{p1}, Y_{p2}, Y_{p3}, Y_{p4}, Y_{p5}$: Heights of the of top five peaks within the sampled portion of reference length l

$Y_{v1}, Y_{v2}, Y_{v3}, Y_{v4}, Y_{v5}$: Heights of the five lowest valleys within the sampled portion of reference length l

(c) Ten-spot average roughness (R_z)

รูปที่ 2.6 ค่าความหยาบผิว [19]

พารามิเตอร์แสดงความหยาบของพื้นผิวและลักษณะอื่นที่ต้องการ การกำหนดลักษณะของพื้นผิวสามารถกำหนดจาก

1. ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต **Ra** (Roughness Value, μm)
2. ค่าความยาว Cut-off Length **L** (mm) สำหรับการวัดค่าความหยาบ
3. วิธีการผลิต (Production Process)
4. แนวการกัดชิ้นงาน (Lay)
5. ค่าเผื่อแนะนำสำหรับการสั่งซื้อหรือเตรียมชิ้นงานเพื่อให้มีเนื้องานพอในการทำกระบวนการต่างๆ (Machining Allowance, mm)

2.6 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

เมื่อโลหะผ่านกระบวนการขึ้นรูป โลหะจะเกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก คือ ความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงาน (Internal Stress) โดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ อาจแบ่งประเภทตามสาเหตุ (เช่น ความไม่สมดุลของความร้อนหรือความยืดหยุ่น) ตามขนาดที่ได้รับ การปรับสมดุลหรือตามวิธีการที่วัดได้ ความเค้นตกค้างเกิดจากแรงกระทำภายนอก เมื่อชิ้นงานรับแรงกระทำภายนอกเกินจุดยืดหยุ่น จะเกิดการเสียรูปแบบถาวรที่ไม่สมมาตรกันในหน้าตัดชิ้นงาน ทำให้บริเวณที่เสียรูปเกิดความเค้นตกค้างจากความไม่สมมาตรของการขยายตัว ยืดตัว หรือหดตัวภายในเนื้อชิ้นงาน หรือความเครียดในช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการมองเห็น ความเค้นตกค้างสามารถเกิดได้จาก 3 สาเหตุ ได้แก่

1. ภาระทางกลภายนอก (Applied Mechanical Load) เช่น กระบวนการขัดผิวด้วยการยิงอนุภาค (Shot Peening) เป็นต้น
2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal Residual Stress) เช่น การบิดเบี้ยวของโครงสร้างวัสดุหลายเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแต่ละเฟสไม่เท่ากัน เป็นต้น
3. การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ (Phase Transformation) ซึ่งปริมาตรหรือโครงสร้างเฟสที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาจจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมจากเฟสข้างเคียงหรือจากสิ่งแวดล้อมอื่นเข้ามาแทรกอยู่ในโครงสร้าง (Physical Absorption) ก็ได้

2.6.1 วิธีการวัดความเค้นตกค้าง

เทคนิคในการตรวจวัดค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงาน หรือโครงสร้างจะไม่สามารถตรวจวัดค่าโดยตรงได้ จึงต้องหาค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีการทางอ้อม โดยอาศัยหลักการ ทฤษฎี อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องสำหรับวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความเค้นตกค้าง มีเทคนิคการวัดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม เทคนิคการวัดสามารถแบ่งออกเป็น การวัดทางกล (Mechanical) การวัดการกระจาย (Diffraction) การวัดสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า (Magnetic and Electrical Field)[20]

การหาค่าความเค้นตกค้าง

1. วิธีวิเคราะห์โลหะแบบทำลายชิ้นงานตัวอย่างได้แก่

- The Hole Drilling Method คือความเค้นตกค้างบริเวณขอบรูเจาะเกิดการคลายตัวเมื่อเจาะหลุมเข้าไปในวัสดุความเค้นตกค้างตรวจสอบโดยเกจ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ผิวกับการคลายความเค้น (Stress Relaxation) หลักที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน วิธีการเจาะหลุมเหมาะกับการวัดความเค้นตกค้างค่อนข้างสม่ำเสมอ และไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าความเค้นตกค้างอยู่ดิ่งๆ

- Curvature การวัดความโค้งงอ มักใช้เพื่อกำหนดความเค้นภายในชั้นเคลือบและผิวเคลือบ การเพิ่ม/ลดชั้นผิวทำให้เกิดความเค้นซึ่งทำให้พื้นผิวโค้งขึ้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงโค้งสะสมสามารถคำนวณรูปแบบที่สอดคล้องกันในความเครียดเป็นฟังก์ชันของความหนา (Deposit Thickness) ความโค้งงอสามารถวัดได้โดยใช้วิธี Contact (เช่น ความหยาบผิว (Profilometer) สเตรนเกจ (Strain Gauge)) หรือไม่มีการสัมผัสโดยตรง (เช่น Video, Laser Scanning, Grids, Double Crystal Diffraction Topology) สามารถวัดความโค้งงอประมาณ 0.1×10^{-1} mm

2. วิธีวิเคราะห์แบบไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่างได้แก่

- The X-ray Diffraction Method เป็นการอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction ; XRD) ที่ตกกระทบหน้าผลึกของวัสดุที่มุมต่างๆ กัน ผลที่ได้จะสามารถหาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง ขนาดผลึก และโครงสร้างผลึก รวมถึงค่าความเค้น XRD ช่วยในการวัดความเค้นบนพื้นผิวหรือใกล้พื้นผิว เป็นเทคนิคที่ลดความผิดพลาด และความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นอย่างลุ่ม แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก หรือผิวไม่เรียบ สำหรับวัสดุผสมอาจต้องระบุเฟสก่อนวิเคราะห์หาความเค้นตกค้าง

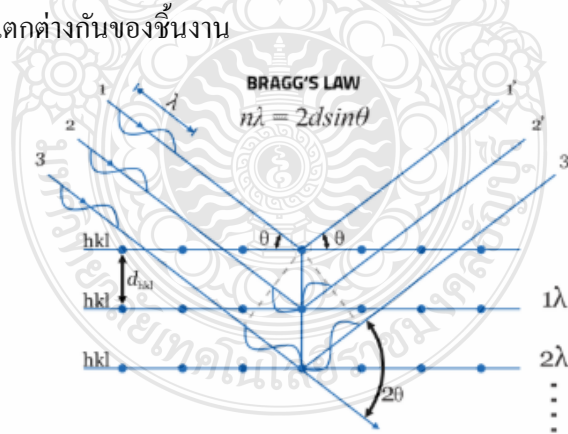
- The Ultrasonic Techniques เป็นเทคนิคที่อาศัยความแปรปรวนจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อแสดงค่าความเค้นที่ตกค้าง ไม่เหมาะกับชิ้นงานบางระดับไมครอน

- The Magnetic Methods อาศัยการทำปฏิกิริยาแม่เหล็ก โดยการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องมือเฉพาะทาง สมบัติความเป็นแม่เหล็กสามารถอธิบายความแตกต่างของความเค้นตกค้างโดยสังเกตสัญญาณจากโครงสร้างและสัญญาณโครงสร้างภายใต้ความเค้น วัสดุต้องมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

2.6.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD

การวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธี X-ray Diffraction ตามมาตรฐาน SAE J784a โดยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยอาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ และมีตัวรับรังสีเลี้ยวเบน เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีในชิ้นงานและสามารถศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของชิ้นงาน โดยการหาค่าความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะใช้ X-ray Diffractometer ยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ โดยมี Detector เป็นตัวรับข้อมูลเพื่อหามุมเลี้ยวเบน และความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนออกมาและ Recorder จะแสดงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบน (2θ) แบบอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนสูงสุดจากผิวหน้าในตำแหน่งที่แตกต่างกันของชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ [20]

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

สมการกฎของแบรกก์(Bragg's Law) ซึ่งสามารถบอกความสัมพันธ์ของ ระยะระหว่างระนาบของโครงสร้างผลึก (Lattice Spacing, d) กับมุมที่เอ็กเลี้ยวเบนจากระนาบใดๆ นั้นของโครงสร้างวัสดุแบบโครงสร้างพหุผลึกแสดงดังสมการที่ (2.2)

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.2)$$

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

การวัดระยะระหว่างระนาบที่เปลี่ยนแปลงไป ความเครียดระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นในระนาบผลึกแสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot\theta \Delta\theta \quad (2.3)$$

- เมื่อ d_0 = ค่าระยะระหว่างระนาบอะตอมในผลึกในภาวะปราศจากความเค้น
 λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

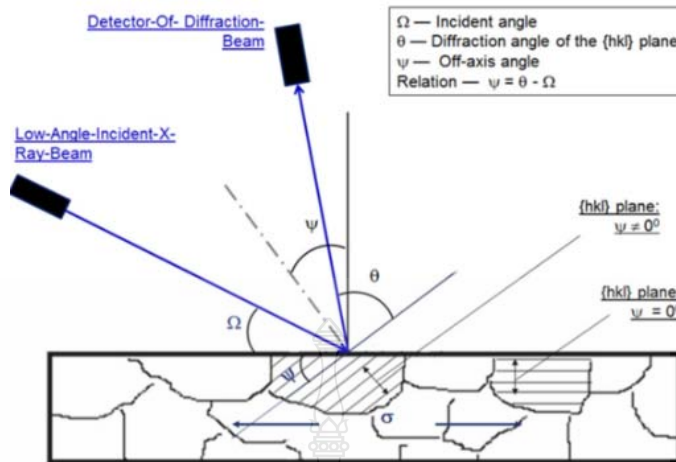
2.6.3 เทคนิค $\sin^2\psi$

ความเค้นตัก้างที่มีขนาดสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานและอยู่ในระนาบของชิ้นงาน หากมีแรงกระทำสูงพอทำให้เกรนของชิ้นงานถูกบีบ(ความเค้นอัด) หรือยืดออก(ความเค้นดึง) ในทิศทางกับระนาบของชิ้นงาน เมื่อเม็ดผลึกถูกบีบหรือยืดในทิศทางกับระนาบของชิ้นงาน ขนาดของเกรนในแนวตั้งฉากกับระนาบของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่น หรือเกิดความเครียด

ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบชั้นงาน สำหรับเกรนซึ่งหันระนาบ (hkl) ขนานกับระนาบของชั้นงานค่า D-spacing ของระนาบ (hkl) จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลความเค้นในระนาบชั้นงาน ค่ามุมแบรกก์สำหรับระนาบ (hkl) เปลี่ยนไป การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้การกวาดแบบ 2θ ตามปกติ จะพบว่าพีคการเลี้ยวเบนจากระนาบมีการเลื่อนตำแหน่งไป เมื่อเทียบกับพีคเดียวกันที่ไม่มีมีความเค้นตกค้าง ถ้ามีความเค้นดึง พีคจะเลื่อนไปทางขวา กรณีความเค้นอัด พีคจะเลื่อนไปทางซ้าย (มุม 2θ ลดลง) เนื่องจาก d_{hkl} เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า d_{hkl} กับความเค้น สามารถหาขนาดความเค้นได้จากการวัดการเลื่อนของพีค (Peak Shift) ได้ [21] เทคนิค $\sin^2\psi$ เป็นที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดความเค้นตกค้างสม่ำเสมอในระนาบชั้นงาน รูปที่ 2.8 แสดงผังการทำงานของ XRD เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า D-spacing ของระนาบ (hkl) ของเกรนที่หันระนาบขนานกับระนาบของชั้นงานเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเกรนที่หันระนาบทำมุม ψ กับระนาบของชั้นงาน ก็จะได้ผลกระทบ (เกิดความเครียด) จากความเค้นตกค้าง แต่ความเครียดที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน ขึ้นกับมุมระหว่างระนาบ (hkl) กับ แนวของความเค้น เมื่อทำการวัดมุม ψ ต่างๆ กับระนาบชั้นงาน ก็สามารถคำนวณความเค้นตกค้างในระนาบได้ สมการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง โดยวิธี $\sin^2\psi$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$d_{\psi}^{hkl} = d_{\psi=0}^{hkl} + \left(\frac{1+\nu_c}{E_c}\right) d_o^{hkl} \sigma_i \sin^2 \psi \quad (2.4)$$

- เมื่อ d_o^{hkl} = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) เมื่อไม่มีมีความเค้น
- $d_{\psi=0}^{hkl}$ = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) ของเกรนที่หันระนาบขนาน ($\psi=0$) กับระนาบของชั้นงานและอยู่ภายใต้ความเค้น σ_i
- d_{ψ}^{hkl} = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) ของเกรนที่หันระนาบทำมุม ψ กับระนาบของชั้นงาน และอยู่ภายใต้ความเค้นตามในระนาบของชั้นงาน σ_i
- E_c = ค่า Young Modulus ของชั้นงาน
- ν_c = ค่า Poisson ratio ของชั้นงาน



รูปที่ 2.8 แสดงการตั้งค่าทางเรขาคณิตของการวัดความเค้นตกค้างของ X-ray (XRD) [22]

2.6.4 ขั้นตอนของเทคนิค $\sin^2\psi$

- 1) เลือกพิกัดการเลี้ยวเบนของระนาบ (hkl) ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ถ้าเลือกใช้ระนาบที่มีมุมแบรกก์ขนาดใหญ่ จะช่วยให้ช่วงของมุม ψ กว้างขึ้น
- 2) หมุนตัวอย่างทำมุมกับรังสีเอ็กซ์ตกกระทบ $\psi = A$ องศา
- 3) กวาดหัววัดแบบ $\theta-2\theta$ ช่วง $\theta = \theta_{hkl} \pm \Delta\theta$ เมื่อ θ_{hkl} เป็นมุมแบรกก์สำหรับระนาบ(hkl) และให้ $\Delta\theta \approx 10^\circ$
- 4) หาค่า d_{ψ}^{hkl} จากพิกที่ได้ในข้อที่ 3
- 5) ทำซ้ำในข้อ 2) ถึง 4) เปลี่ยนมุม ψ เพื่อให้ได้ค่า $\sin^2\psi$ อยู่ระหว่าง 0-0.5 ใช้ค่ามุม ψ เป็นลบด้วยเพื่อให้ได้ข้อมูลมาจากเกรนหลายๆค่า
- 6) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง d_{ψ}^{hkl} กับ $\sin^2\psi$ กับ slope คือ $\left(\frac{1+\nu_c}{E_c}\right) d_o^{hkl} \sigma_i$ ซึ่งนำไปหา σ_i ได้ถ้าทราบค่า d_o^{hkl}

2.7 เทคโนโลยีทางด้าน CNC

เครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ เครื่องจักรกลที่ใช้ผลิต หรือขึ้นรูปชิ้นงานที่มีมาตรฐานสูง ทำงานโดยการโปรแกรมคำสั่งเข้าไปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้มีหลายภาษา ส่วนมากใช้งานโลหะที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง การควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี ในขั้นตอน

ต่างๆ อย่างอัตโนมัติ แทนการใช้แรงงานคนควบคุมเครื่อง หลักการทำงานของเครื่องจักรกลส่วนของการควบคุมเครื่องจักรแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

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

Computer Numerical Control (CNC) แปลว่าการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นเทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ ได้แก่ เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Lathe) เครื่องเจียรไน (Grinding) EDM และอื่นๆ

2.7.1 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

ระบบควบคุมของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC) จะได้รับคำสั่งให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีทำงานด้วยภาษาที่ระบบควบคุมเข้าใจดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนโปรแกรมเข้าไปในระบบควบคุมเมื่อระบบควบคุมอ่าน โปรแกรมที่ป้อนเข้าไปจะนำไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงานโดยอาศัยมอเตอร์ป้อน (Feed Motor) เพื่อให้แท่นเคลื่อนเคลื่อนที่ได้ตามที่ต้องการ เช่น เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Machine) ก็จะมีมอเตอร์ในการเคลื่อนที่อยู่ที่ 2 ตัว หรือเครื่องกัดซีเอ็นซีก็จะมีมอเตอร์ป้อน 3 ตัว เมื่อระบบควบคุมอ่าน โปรแกรมจะเปลี่ยนรหัส โปรแกรมให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อไปควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน โดยการส่งสัญญาณผ่านภาคขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive Amplified) และส่งสัญญาณต่อไปยังมอเตอร์ป้อนแนวแกนที่ต้องการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด ความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่นเคลื่อนที่จะต้องกำหนดให้ระบบควบคุมรู้ โดยระบบควบคุมซีเอ็นซี (CNC) จะทำงานร่วมกับระบบวัดขนาด (Measuring System) ซึ่งประกอบด้วยสเกลแนวตรง (Linear Scale) มีจำนวนเท่ากับจำนวนแนวแกนในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกล โดยส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะทางที่แท่นเคลื่อนเคลื่อนที่กลับไปยังระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมรู้ว่าแท่นเคลื่อนเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าใดทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างและรูปทรงให้มีขนาดตามที่ต้องการ โดยเครื่องจักรซีเอ็นซีแต่ละแบบแต่ละรุ่นจะมีลักษณะเฉพาะและการประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันออกไป ข้อดีของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ

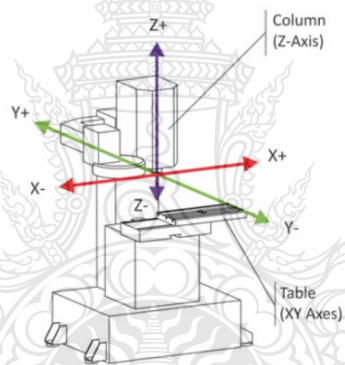
1. เครื่องซีเอ็นซี ได้รับการปรับปรุงให้มีการทำงานอัตโนมัติทำให้ลดแรงงานของผู้ควบคุมในการผลิตชิ้นงานลงอีกทั้งคุณภาพของชิ้นงานเท่ากันทุกชิ้น เนื่องจากเป็นการสั่งงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในเครื่องจักร ทำให้งานที่ได้เกิดความผิดพลาดได้น้อยมากๆ หรือแทบไม่มีผิดพลาด

2. ความละเอียดและความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงานสามารถผลิตงานออกมาได้อย่างรวดเร็ว และใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย ประหยัดพื้นที่ในการเก็บชิ้นงาน

3. ความยืดหยุ่นในการทำงาน เนื่องจากเครื่องจักรกลเหล่านี้ทำงานตาม โปรแกรม สามารถทำงานได้ดีแม้ว่าชิ้นงานจะมีความยากและซับซ้อนสูง ช่วยลดเวลาในการตรวจสอบคุณภาพ ของชิ้นงาน เมื่อ โปรแกรมประมวลผลและทำการผลิตชิ้นงานแล้ว สามารถเรียกโปรแกรมนำกลับมา ใช้ใหม่ในครั้งต่อไป

แกนและทิศทางเครื่องกัดซีเอ็นซี

เครื่องกัด CNC ประกอบด้วย แกนแกน X แกน Y และแกน Z การนำไปใช้งานเป็นงานกัด แบบ 3 มิติ โดยแกน X เป็นแกนที่ทำให้โต๊ะงาน(Table) เคลื่อนที่ตัดขวางแนวแกนของสปินเดิล ส่วนแกน Y จะเป็นแกนที่ทำให้โต๊ะงานเคลื่อนที่ เข้า-ออกในแนวตั้งฉากหรือตัดขวางกับแกน X ส่วนแกน Z จะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ขึ้น-ลงของสปินเดิล เพื่อให้สามารถกัดงานแบบ 3 มิติได้แสดงดัง รูปที่ 2.9 ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการผลิตพัฒนาขึ้น เครื่องกัด CNC สามารถทำงานมากกว่า 3 แกน (4 หรือ 5 แกน)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องกัด CNC [23]

2.7.2 พารามิเตอร์สำหรับงานกัด

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

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed, v_c) หมายถึง ความยาวของเนื้อโลหะที่ถูกตัดผ่านปลายคม ตัดภายในระยะเวลา 1 นาที ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที ซึ่งในการตัดเฉือนวัสดุชนิดต่างๆ จะต้องมี ความแข็งกว่าชิ้นงาน ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วตัด คือ วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด วัสดุชิ้นงานหากมีความแข็ง มากความเร็วตัดจะต่ำ ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนลึกมากความเร็วตัดจะลดลง อัตรา ป้อนถ้าป้อนตัดละเอียดความเร็วจะมาก การจับยึดชิ้นงานในการจัดยึดชิ้นงานที่ดีจะช่วยให้ความเร็ว

ในการตัดเพิ่มขึ้น ความสามารถและสภาพเครื่องจักร ถ้ามีกำลังขับสูงจะให้ความเร็วตัดที่สูง ความเร็วตัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-5)

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2-5)$$

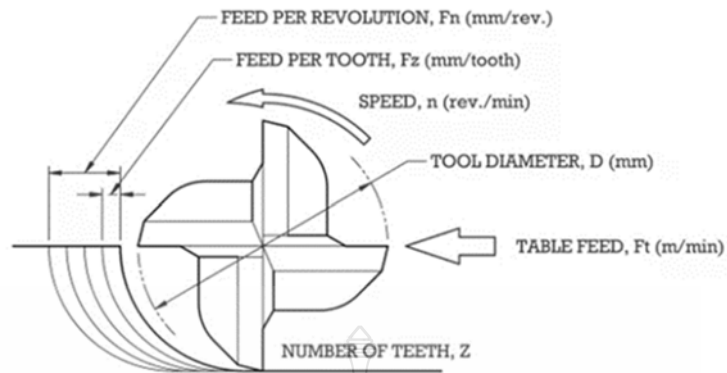
เมื่อ v_c = ความเร็วตัด (m/min)
 D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องมือ (mm)
 n = ความเร็วรอบของมีดกัด (min/rev)

2. อัตราป้อน (Feed Rate) อัตราป้อนตัด หมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน มีความสำคัญในการกำหนดคุณภาพผิวของชิ้นงาน อัตราป้อนมีหน่วยเป็น เมตร/นาทีหรือ m/rev โดยทั่วไปอัตราป้อนในเครื่องจักรแบ่งออกเป็น 3 แบบแสดงดังรูปที่ 2.10 คือ

- 1) อัตราป้อนของ โต๊ะงานหรือความเร็ว โต๊ะงาน (Table Feed, f_t) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาทีโดยอัตราป้อนต่อฟันที่ว่าจะเป็นจำนวนคมตัดที่กัดงานจริง (Effective Teeth)
 - 2) อัตราป้อนต่อรอบ (Feed per Revolution, f_r) มีหน่วยเป็น mm/rev
 - 3) อัตราป้อนต่อฟัน (Feed per Tooth, f_z) มีหน่วยเป็น mm/tooth
- สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$f = n \times f_z \times v_c \quad (2-6)$$

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



รูปที่ 2.10 แสดงอัตราป้อน [24]

3. ความลึกของการกัดหรือ ความกว้างของการตัดเฉือน (Depth of Cut) หมายถึง ระยะทางที่คมของเครื่องมือยังลึกเข้าไปในชิ้นงาน ในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร การกำหนดความลึกของการตัดเฉือนต้องพิจารณา 2 ส่วน คือแรงม้าในการขับเพลاجับ เครื่องมือตัด หรือชิ้นงานกับความแรงของเครื่องมือกัด ความลึกในการกัดมีผลต่อเวลาในการทำงาน แต่มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดตัดน้อยกว่า

2.8 ทบทวนวรรณกรรม

Liviu Luca et al.[10] การกัดรีดผิวแข็งเป็นวิธีการตกแต่งชิ้นงานโดยไม่เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ (Chipless) ซึ่งใช้เครื่องแบบลูกกลิ้งรีดคดกับชิ้นงานเพื่อให้เกิดการเสีรูปลาสติกของชั้นผิว การพัฒนาล่าสุดทำให้การกัดรีดผิวแข็งของชิ้นส่วนเหล็กที่ทนความร้อนได้ความแข็งถึง 65 HRC คุณสมบัติของการกัดรีดผิวแข็ง ได้แก่ ความหยาบที่ดี (เทียบเท่ากับการเจียร) รวมทั้งการปรับปรุงลักษณะทางกลของพื้นผิว (ความแข็งแรงต่อการล้าตัว (Fatigue Strength) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) และอัตราส่วนแบร์ริง (Bearing Ratio)) เนื่องจากการใช้ความเค้นอัดในชั้นผิว อิทธิพลของพารามิเตอร์การกัดรีดผิวแข็ง เมื่อมีความหยาบผิวสำหรับส่วนประกอบเหล็กที่แข็ง (64 HRC) ผลของพารามิเตอร์การกัดรีดผิวแข็งต่อความหยาบผิวขั้นสุดท้าย Hydrostatic เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้สร้างแรงสัมผัส โดยความดันของของไหลที่ตัวจับบอล เหล็กชุบแข็งถูกใช้ พารามิเตอร์แสดงความสัมพันธ์กับความดันไฮดรอลิก การป้อนและความเร็วในการกัดรีดผิวแข็ง และรัศมีจมูกมีด (Nose Radius) ผลการทดลองแสดงให้เห็นอิทธิพลของแรงกดคั่นในกระบวนการ มีอิทธิพลที่สำคัญของความหยาบผิวเดิมหลังจาก Hard Turning พบว่ามีเงื่อนไขในการรับความหยาบผิวในช่วงของการปด (0.5 μm)

L.N. Lo'pez de Lacall et al. [9] ได้ศึกษาการใช้กระบวนการกัดผิวแข็งด้วยบอลเพื่อปรับปรุงคุณภาพขั้นสุดท้ายของเครื่องมือขึ้นรูป (Moulds and Dies) กระบวนการนี้จะเปลี่ยนความหยาบผิวของพื้นผิวที่ผ่านการกัดผิวด้วย Ball-end เพื่อบรรลุความต้องการด้านการตกแต่ง สำหรับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการขึ้นรูปด้าย การกัดผิวแข็งด้วยบอลสามารถใช้งานได้ง่ายในแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ เช่นเดียวกับที่ใช้สำหรับงานกัด ด้วยวิธีนี้เป็นการลดทั้งเวลาการรอคอย (Lead Times) และต้นทุนการผลิตอย่างมาก ทั้งกระบวนการกัดผิวแข็งและพารามิเตอร์หลักๆ จะนำมาพิจารณาโดยคำนึงถึงอิทธิพลของการตกแต่ง ความสมบูรณ์ของพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากมีผลของความเรียบของพื้นผิวของกระบวนการ และการขึ้นรูปแบบเย็น ตัวอย่างของวัสดุที่แตกต่างกัน เมื่อเศษถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวงานใหม่ (Machined Surfaces) และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีการอธิบายค่าความหยาบผิวของพื้นผิวสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว ข้อสรุปสำคัญ คือ การใช้รัศมีขนาดใหญ่ของความลึกของการตัดเฉือนในการทำงาน Ball-end Milling พร้อมกับความลึกของรัศมีเล็กๆ ในระหว่างการกัดผิวแข็งอาจทำให้เกิดความหยาบสุดท้ายที่ยอมรับได้ประหยัดเวลาในการผลิตได้มาก สำหรับผลการทดสอบความหยาบผิวที่ดีที่สุดเกิดการกัดผิวแข็งของบอลทำไปตามทิศทางป้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางป้อนริด ความลึกของผิว ด้านรัศมีที่ต่ำลงจะทำให้ความหยาบลดลง ความดันสูงสุด 20 MPa นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพสูงสุดสำหรับวัสดุ 35-55 HRC ในวัสดุอ่อน (< 35 HRC) แรงดันจาก 15 MPa ทำให้ลดความหยาบผิวลงอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีที่ใช้วัสดุที่แข็งกว่า 50 HRC ความดันมากกว่า 20 MPa อาจไม่สามารถลดความหยาบได้มากพอ การตรวจสอบความเค้นอัดเป็นสถานะพื้นผิวขั้นสุดท้ายหลังการกัดผิวแข็งไม่ได้เป็นลักษณะสำคัญในแม่พิมพ์และด้าย แต่อาจมีความสำคัญกับวัสดุอื่นๆ ไม่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างจุลภาคเกิดจากชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กและความเสี่ยงจากความล้าควรน้อยลงหรืออย่างน้อยเหมือนกับชิ้นงานที่ไม่ได้กัดผิวแข็งคุณภาพของ Ball Milling และการกัดผิวแข็งความลึกของแนวรัศมีของการตัดโดยทั่วไปของความหยาบผิว (a_r 0.6-0.9 มม.) อาจเพียงพอถ้าใช้การกัดผิวแข็งที่ถูกต้องหลังจากนั้น (a_r 0.05-0.1 มม.) แต่การกัดผิวแข็งจะถูกใช้ที่การป้อนสูงสุด (15 m/min) แทนการกัด 1-2 mm / min การประยุกต์ใช้ในการกัดผิวแข็งของด้ายสำหรับชิ้นส่วนหลังคาของรถช่วยลดเวลาและการกัดผิวแข็งด้วยบอลสามารถแก้ปัญหาที่เป็นไปได้สำหรับการขัดขั้นพิเศษของแม่พิมพ์และด้าย

Pavan Kumar and Purohit G K [11] ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือกัดผิวแข็ง การแปรรูปโลหะ ในปัจจุบันมีความสนใจความเค้นตกค้างแบบอัดในส่วนประกอบต่างๆในกระบวนการผลิต วิธีการทั่วไปของกระบวนการตกแต่ง ได้แก่ การเจียรระไน การเจาะขึ้นรูปใช้เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นส่วนโลหะ แต่ขั้นตอนการกัดผิวแข็งซึ่งมีบทบาทเหมือนกันในกระบวนการตกแต่งมีข้อดี

หลายอย่างที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษาเกี่ยวกับประเด็นการออกแบบและการพัฒนาเครื่องมือในการครีตผิวแข็งด้วยบอล โดยการเลือกวัสดุขนาดและการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการและเครื่องมือให้ใช้งานง่าย ใช้เวลาน้อยกับค่าใช้จ่ายต่ำ เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในงานนี้สามารถใช้กับเครื่องกลึง ตัวเล็อกนี้จะเพิ่มความยืดหยุ่นของเครื่องมือและช่วยให้เราสามารถดำเนินการได้ เครื่องมือครีตที่ออกแบบมาประกอบด้วยส่วนที่เป็น Ball Holder, Square Casing, lock pins และ Threaded lock Support และ Spring การออกแบบเครื่องมือทำขึ้น โดยคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่จะเลือกและควบคุมในงาน ผลการทดลองจะดำเนินการ โดยคำนึงถึงความเร็ว การป้อน แรง และจำนวนรอบที่ผ่าน และผลของพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ค่าความหยาบผิว และค่าความแข็ง พบว่า 1) ความมันเงาเหมือนพื้นผิวผ่านการตกแต่ง 2) ความสม่ำเสมอของมิติ/ความสามารถในการทำซ้ำได้ 3) การดำเนินการ Single Pass 4) การเพิ่มในความแข็งพื้นผิว และ 5) ลดการทำงานซ้ำและการปฏิเสธชิ้นงาน

A. Rodriguez et al. [12] การครีตผิวแข็งผิวด้วยบอลลึก (Deep Ball-burnishing) เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวทางกลสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพ และคุณภาพของเพลอาหมุน เมื่อเทคนิคนี้ถูกนำมา รวมกัน และใช้หลังจากการกลึงแบบเดิม กระบวนการที่เกิดขึ้นจะทำได้อย่างรวดเร็ว ง่าย และคุ้มค่า สามารถใช้ร่วมกับเครื่องกลึงและการกลึงในสายการผลิต อิทธิพลของการครีตผิวแข็งลึก กระบวนการนี้ทำให้พื้นผิวที่ดี มีความเค้นตกค้างอัดสูง และการเพิ่มความแข็งของชิ้นผิว การแปรผันของความเร็วในการครีตผิวแข็ง แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบและความแข็งของชิ้นงาน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำการครีตผิวแข็งโดยใช้ความเร็วสูงสุดที่เครื่องรองรับได้เพื่อลดเวลาในการประมวลผล ความดันของการครีตผิวแข็งเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการนี้ ความดันกดสูงเพิ่มความแข็งผิว แต่ถ้าความดันสูงเกินไป บอลเซรามิกอาจสร้างเส้นลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน ส่งผลให้ผิวหน้าหยาบผิวขึ้น ด้วยวิธีนี้การประมาณค่าความดันในการครีตผิวแข็งที่ดีที่สุดเป็นประเด็นสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ อัตราการป้อนครีตต่อการหมุนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มผลผลิต การวิเคราะห์เวลาและอัตราการป้อนกลึงที่เหมาะสม เพื่อลดเวลาของกระบวนการ การวัดความเค้นตกค้าง โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction แสดงให้เห็นว่าความเค้นอัดถูกนำมาใช้ในส่วนประกอบ ความเค้นตกค้างเหล่านี้จะเกิดขึ้นที่ความลึกประมาณ 1 มิลลิเมตร การครีตผิวแข็งช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นส่วนกลึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคนี้ช่วยเพิ่มคุณภาพผิว (ถึง 0.3 ไมโครเมตร) เพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน (ถึง 60% Brinell) และความเค้นตกค้างอัด ซึ่งเหมาะสำหรับการยึดความล้าของชิ้นงานและเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นส่วน

Tao Zhang et al. [13] ศึกษาการทดลองและทฤษฎีการกรัดผิวแข็งของ Aerospace Alloy การกรัดผิวแข็งเป็นที่รู้จักกันว่ามีประสิทธิภาพมากสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวที่การผลิต งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การหาแบบจำลองที่คาดการณ์ความหยาบของพื้นผิวและความเค้นตกค้างตามข้อมูลการทดลองพื้นผิวที่ราบรื่นของวัสดุการบินและอวกาศที่ปรับเปลี่ยนโดยการกรัดผิวแข็งด้วยบอล มีอิทธิพลสำคัญของพารามิเตอร์กระบวนการเกี่ยวกับความหยาบของผิวและความเค้นสูงสุดแบบจำลอง Second-order Empirical ที่เกี่ยวข้องกับความดัน ความเร็ว และการป้อน ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการทำนายความหยาบของผิวซึ่งสามารถใช้ได้ เมื่อเทียบกับผลการทดลองแรงดันเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความเค้นตกค้างแบบอัด อย่างไรก็ตามแบบจำลองเอมไพริคัลมีความเข้ากันกับผลการทดลอง การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การกรัดผิวแข็งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้: 1) ผลกระทบที่สำคัญของพารามิเตอร์กระบวนการถูกสร้างขึ้นเมื่อความหยาบของผิวหน้าซึ่งรวมถึงความดันที่สูงขึ้นจะทำให้พื้นผิวหยาบ ในขณะที่การป้อนลดความหยาบของพื้นผิวลงเล็กน้อยจากระดับปานกลาง การเพิ่มขึ้นของป้อนจะเพิ่มความหยาบของผิว ผลกระทบที่สำคัญของความเร็วควรคำนึงถึงทั้งในระดับต่ำหรือสูง แต่อิทธิพลของความหยาบของพื้นผิวที่หมุนไม่มีนัยสำคัญ 2) แบบจำลองเอมไพริคัลของลำดับที่สองมีค่าที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง 3) การกรัดผิวแข็งจะเปลี่ยนความเค้นตกค้างในการรับแรงดึงให้เหลือน้อยลง ซึ่งความดันเป็นปัจจัยสำคัญแบบจำลอง การทำนายที่มีผลไม่ถูกต้องเมื่อพิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของความเค้นตกค้าง

N. M. Qureshi et al. [14] ทำการวิเคราะห์ผลของกระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยลูกกลิ้ง (Roller) และบอล (Ball) ต่อความหยาบของพื้นผิวเหล็ก EN8 เป็นการศึกษาเชิงทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกรัดผิวในวัสดุในงานอุตสาหกรรมการตกแต่งพื้นผิวต่างๆ เช่น lapping, honing เป็นต้น ซึ่งเป็นการกำจัดวัสดุออกจากผิวในการทดลองนี้กระบวนการกรัดผิวแข็งด้วยบอลและลูกกลิ้งซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกใช้กับพารามิเตอร์การกลิ้งที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ผิวที่ต้องการ การทดลองดำเนินการในเครื่อง CNC สำหรับ EN8 โดยใช้วิธี Taguchi กำหนดพารามิเตอร์เครื่องจักรที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวเสร็จสิ้นในการทดลองนี้ความเร็วในป้อน ความลึกการเจาะ และจำนวนครั้งของการผ่าน ปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมดจะได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธี Taguchi ผลจากการทดลองพบว่า การกรัดผิวแข็งด้วยลูกกลิ้งที่ความเร็ว 800 rpm อัตราป้อน 0.05 mm/rev ความลึกการเจาะ 0.4 mm และจำนวนครั้งของการผ่าน 4 รอบ เป็นค่าที่เหมาะสม และ สำหรับการกรัดผิวแข็งด้วยบอล ความเร็ว 500 rpm อัตราป้อน 0.3 mm/rev ความลึกการเจาะ 0.3 mm และ จำนวนครั้งของการผ่าน 4 รอบ เป็นค่าที่เหมาะสม

Lars Hiegemann et al. [25] ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อทำนายความหยาบของพื้นผิวที่ถูกรีดผิวแข็ง โดยทำการออกแบบสำหรับกระบวนการรีดผิวแข็งด้วยบอลของพื้นผิวที่เคลือบโดยไม่ต้องใช้การทดสอบเบื้องต้น แบบจำลองแสดงความเป็นไปได้ที่จะทำนายความหยาบหลังจากการรีดร้อนเคลือบผิวและวัสดุที่ใช้ด้วยเหตุนี้สมการที่ใช้ในการศึกษาได้จาก Hiegemann et al. (2015) ค่าความหยาบก่อนการรีดผิวแข็งด้วยบอลและความดันสัมผัสภายใต้บอลขณะรีดกำหนดการทดลองกำหนดความหยาบในกึ่งกลางของแท่นรีดสามารถวิเคราะห์ได้จากการพัฒนาแบบจำลองที่ขึ้น Rolling Track ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการทดลองรีด สำหรับการออกแบบของกระบวนการรีดผิวแข็งด้วยบอลการกำหนดความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลมและค่าความแข็ง Brinell จำเป็นต้องใช้สำหรับการรีดผิวแข็งด้วยลูกกลมของพื้นผิวและไม่เพียงแต่ One Rolling Track ระยะห่างระหว่าง Rolling Track จะเพิ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลแบบจำลองนี้สอดคล้องกับการทดลองสำหรับ leveling สูงสุดในช่วงกลางของการติดตาม One Rolling Track ในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการทดลองกับแบบจำลองอยู่ระหว่าง 2.8% ถึง 9.4% เท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการปรับระดับพื้นผิวรวมของพื้นผิวทั้งหมดด้วยในพื้นที่ทำงานที่เหมาะสมสามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองกับแบบจำลองได้ 8.9% เพื่อให้การทำนายความหยาบเป็นไปอย่างแม่นยำสำหรับวัสดุที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับเครื่องมือกลึง (เส้นผ่านศูนย์กลางลูกที่แตกต่างกัน) จะสังเกตว่าแบบจำลองสามารถใช้ได้นอกจากการศึกษานิติพลของตัวแปรทุกตัวด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับความหยาบลดลงมากหลังจากการรีดผิวแข็ง

ผลจากการทบทวนวรรณกรรมแสดงให้เห็นถึงวิธีการรีดผิวแข็งด้วยบอลเป็นการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานทั้งทางกายภาพ และทางกล สำหรับกระบวนการรีดผิวแข็งด้วยบอลส่งผลกระทบต่อระดับพื้นผิวหยาบ ค่าความแข็งของพื้นผิว และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความดัน ความเร็วของเครื่องมือ อัตราป้อน ความลึกในการรีด และ จำนวนครั้งของการรีด และสารหล่อลื่น ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน ลดความหยาบผิว และเพิ่มความเค้นตกค้างอัดเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับการยึดความล้าของชิ้นงานและเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นส่วน และการรีดผิวแข็งที่สภาวะที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มผลผลิต และเพื่อลดเวลาของกระบวนการ ในส่วนของเครื่องมือและวิธีการในการวิเคราะห์ผลของความแข็ง ความหยาบผิว ความเค้นตกค้าง และโครงสร้างจุลภาคของผลึก จำเป็นต้องใช้วิธีการที่สอดคล้องกับชนิดของวัสดุ

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง ที่มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งของผิวชิ้นงาน เพิ่มความเค้นตกค้างและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก วัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน SCM-440 มีลักษณะเป็น Low Alloy Steel ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) ในการกัดที่ความเร็วสูง เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง และบรรลุตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอน วิธีการดำเนินงานตามลำดับ ดังนี้

- 3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.3 การทดลองเบื้องต้น
- 3.4 ขั้นตอนการทดลองและการเก็บข้อมูล
- 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย การกำหนดตัวแปรและขอบเขตของการแก้ปัญหาอย่างละเอียด เพื่อการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก โดยการพิจารณาแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการกัดด้วยบอล และความลึกของผิวที่ใช้ในการกัดเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (SCM-440/AISI4140) เป็นชิ้นงานในการทดสอบกระบวนการกัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก (Ball-burnishing) เพื่อหาค่าความแข็งผิวที่กัดกริด ค่าความเค้นตกค้าง ค่าความหยาบผิว และการวัดโครงสร้างจุลภาคของผลึก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

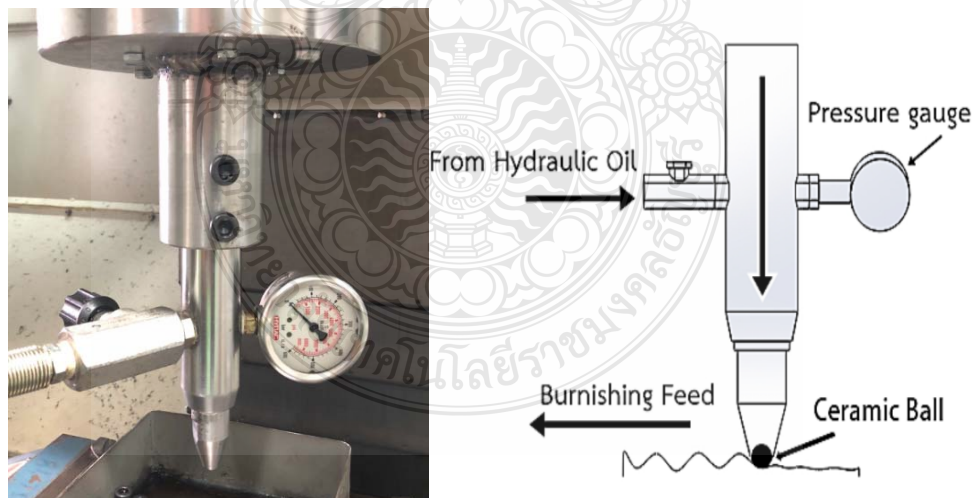
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ในการศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลที่ต้องการ มีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลองหลายชนิด เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลองที่ให้ค่าแม่นยำจนเสร็จสิ้นกระบวนการ ได้แก่

3.2.1 บอลเซรามิก

การกรัดผิวแข็งด้วยบอล (Ball Burnishing) เป็นบอลเซรามิกประกอบด้วย ซิลิกอนไนไตรด์เซรามิก(Si_3N_4) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรแสดงดังรูป 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงเครื่องมือการกรัดที่ประกอบด้วยเกจวัดค่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก



รูปที่ 3.1 ขนาดของบอลกรัดผิวแข็งใช้งาน



รูปที่ 3.2 เครื่องมือกรัดผิวแข็ง

3.2.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี

ในงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการกัดครีตผิวแข็งด้วยบอลเซรามิคโดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์(CNC) เพื่อให้ค่าที่ถูกต้องในการทดลอง เครื่องยี่ห้อ FANUC รุ่น V 700 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องกัดแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าระยะป้อนลึก และความเร็วรอบหรือค่าความเร็วตัดต่างๆ ที่ใช้ในการกัดครีตผิวแข็งและติดตั้งเครื่องมือที่ใช้จับบอลครีตผิวแข็งเข้าในหัวของเครื่องกัดได้ โดยสามารถปรับตั้งค่าความเร็วรอบได้สูงถึง 3,000 รอบ/นาที ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์(CNC)

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องกัดยี่ห้อ FANUC รุ่น V 700

Modal	V 700
Rated power	15 kva
Power supply	220 V 50 Hz
Full load current	50 A
Machine weight	3,690 kg
Pneumatic pressure	>5.5 bar
Spindle speed range	10,000 min

3.2.3 เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก

เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก แสดงดังรูปที่ 3.4 ความสามารถเครื่องสร้างความดันสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหลของปั้มที่สูงประมาณ 1.4 ลิตร/นาที จำนวนรอบของปั้มที่ทำได้ประมาณ 1,420 รอบต่อนาที ปริมาตรบรรจุ 30 ลิตร แรงดันไฟฟ้า 230/400 โวลต์ ใช้น้ำมันไฮดรอลิก (HLP 68) แสดงดังรูปที่ 3.5 เป็นน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมชนิดผสมสารป้องกันการสึกหรอ ที่ช่วยปกป้องอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องจักรได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไฮดรอลิกใช้ได้ยาวนานและใช้กับระบบไฮดรอลิกทั่วไปที่ต้องการ



รูปที่ 3.4 เครื่องปั้มน้ำมันไฮดรอลิก



รูปที่ 3.5 น้ำมันไฮดรอลิก HLP 68

3.2.4 เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์ (Vickers Micro Hardness Tester)

การวัดค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Matsuzawa Digital Microhardness Tester รุ่น MXT70 สามารถวัดค่าความแข็งภายในครั้งเดียวได้ทั้ง 2 ระบบ คือ แบบวิกเกอร์และรีดเวลล์ สเกล C (Rockwell Scale C) การวัดค่าความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 ทั้งก่อนและหลังจากกระบวนการครีตผิวแข็ง ใช้การวัดแบบวิกเกอร์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tadahisa Akasawa et al [25] แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยเลือกขนาดแรงกด 100 กรัม และเวลาในการกดทดสอบ 10 วินาที



รูปที่ 3.6 เครื่อง Matsuzawa Digital Microhardness Tester

3.2.5 เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Test)

การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a (S_a) ของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการกัดรีดผิวแข็ง ทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบดิจิทัล 3D Optical Profiler ยี่ห้อ BRUKER แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง 3D Optical Profiler

การวัดความหยาบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิค Coherence Scanning Interferometry (CSI) ในการวัดจะใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบบรอดแบนด์และรวมเทคนิคการสแกนแบบแนวตั้ง (แกน z) ด้วยเทคนิคออปติคอลลเมตริกซ์เพื่อให้ได้การวัดพื้นผิวแบบสามมิติ พารามิเตอร์ของแกน S ที่ขยายจากพารามิเตอร์ความหยาบ (2D) ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 แสดงพารามิเตอร์ของการวัดพื้นผิวแบบ 3D กับค่าความหยาบผิว พารามิเตอร์ S ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับช่วงของพารามิเตอร์วัสดุที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO 25178[26]

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ R (2D) เทียบกับพารามิเตอร์ความหยาบ S (3D)

ความหยาบ (2D)	พารามิเตอร์ (3D)	ลักษณะ
Ra	Sa	Arithmetical mean height (μm)
Rq	Sq	Root mean square length of the scale limited surface (μm)
Rp	Sp	Maximum peak height (μm)
Rv	Sv	Maximum pit depth (μm)
Rz	Sz	Maximum height of the scale limited surface (μm)
Rsk	Ssk	Skewness of the scale limited surface
Rku	Sku	Kurtosis of the scale limited surface

3.2.6 เครื่องวัดค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

การหาค่าความเค้นที่ผิวชิ้นงานด้วยการใช้เทคนิคทางรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ด้วยเครื่อง Rigaku รุ่น SmarSite Rs หัววัดมีขนาดความกว้าง 114 มิลลิเมตร ความยาว 248 มิลลิเมตร และความสูง 111 มิลลิเมตร และน้ำหนัก 3 กิโลกรัม คุณลักษณะเฉพาะในการวัดแสดงดังตารางที่ 3.3 ใช้หลอดรังสีเอ็กซ์เป็น Cr ระยะห่างจากกล้อง 45 มิลลิเมตร ฉายรังสีให้แพร่กระจายเป็นบริเวณ 1.00 มิลลิเมตร โดยกำหนดตำแหน่งในการยิงรังสีเอ็กซ์ที่มุม 35.2 องศา ช่วยในการวัดความเค้นตกค้างของผิว เพื่อหาค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานก่อนและหลังการกัดรีดผิวแข็งด้วยบอล แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง Portable Stress Analyze

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ด้วยเครื่อง Rigakui รุ่น SmarSite Rs

X-ray tube	Cr
Tube voltage, tube current	30 kV-1.7mA
Measurement diffraction	α -Fe211
Collimator diameter	1 mm
Young' s modulus	210000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Exposure time	60 sec

3.2.7 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

การวิเคราะห์ภาพพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เครื่อง Olympus รุ่น BHM ดังรูปที่ 3.9 เป็นอุปกรณ์ในการตรวจโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SCM-440 ก่อน และหลักการกัดรีดผิวแข็ง ซึ่งสามารถดูงานละเอียดระดับไมโครเมตรของพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษา ลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะรูปร่าง ลวดลายเป็นผิวชิ้นงานตลอดจนขนาดของชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์

3.3. การทดสอบเบืองตัน

การทดลองเบืองตันใช้ตัวแปรอิสระ คือ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Pump Pressure) และความลึกของการกรัดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) โดยการเตรียมชิ้นงานจำนวน 18 ชิ้นการกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่ความดัน 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 2 ระดับ คือ 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร ทำการทดสอบเบืองตันดังตารางที่ 3.4 กำหนดให้อัตราการป้อน (Feed Rate) เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร/นาที จำนวนของการกรัดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) 10 ครั้ง

การทดลองเบืองตันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยทำการศึกษาของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกรัดผิวแข็งเพื่อหาค่า ความแข็งผิว ความหยาบผิว และความเค้นตกค้าง และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งประกอบด้วย

1. การกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกที่ความดัน 200, 400 และ 600 บาร์
2. ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 2 ระดับ คือ 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.4 แสดงการทดสอบเบืองตัน

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

3.4 การออกแบบการทดลอง

3.4.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440 มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมของธาตุต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440 ที่ใช้ในการทดสอบ

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.42	0.20	0.72	0.02	0.01	0.97	0.18	0.01	0.02

จากรูปที่ 3.10 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SCM-440 ที่ตัดให้มีขนาด กว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตรและหนา 10 มิลลิเมตร นำเหล็ก SCM-440 ไปกัดตกแต่งหน้าด้วย เครื่องกัดซีเอ็นซีให้มีขนาด 10 มิลลิเมตร ทั้งสองด้าน

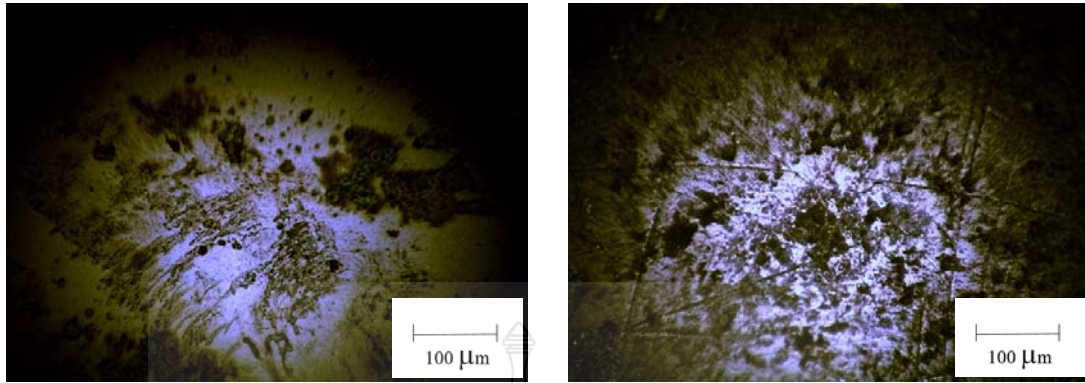


รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการการกัดผิวแข็ง

3.4.2 ทดสอบบอลเซรามิก

บอลเซรามิกที่ใช้ในการกัดรีดผิวแข็งประกอบด้วยซิลิคอนไนไตรด์เซรามิก (Si_3N_4) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลเครื่อง Officine Galileo Milano Hardness Tester ค่าความแข็งของบอลเซรามิกก่อนใช้งานมีค่า 79 HRC

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของบอลเซรามิกก่อนและหลังการกัดรีดผิวแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าบอลเซรามิกที่ผ่านกระบวนการกัดรีดผิวแข็ง พื้นผิวชิ้นงานมีลอกจาก การเสียดสี



(a) Ball-unburnished

(b) Ball-burnished

รูปที่ 3.11 โครงสร้างของบอลเซรามิก ซิลิคอนไนไตรด์เซรามิก (Si_3N_4)

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองจะศึกษา พารามิเตอร์ของการกรัดผิวแข็งด้วยบอล แสดงดังตารางที่ 3.6 การทดลองจะเป็นทำการกรัดผิวแข็งชิ้นงานด้วยบอลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

1. ชิ้นงาน SCM 440 ที่ไม่ผ่านการรีดผิวแข็ง
2. ชิ้นงาน SCM 440 ที่ผ่านการชุบแข็ง
3. การกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่ความดัน 200, 400 และ 600 บาร์
4. ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 3 ระดับคือ 0.4, 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร

โดยทดลอง 33 ชิ้นในการกรัดชิ้นงานด้วยบอลร่วมกับเครื่อง CNC Milling โดยตั้งค่า CNC Milling ด้วยอัตราป้อน 2000 มิลลิเมตร/นาที และ อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตร/นาที จำนวนของการกรัดผิวแข็งผ่าน(Number of Passes) 10 ครั้ง ขั้นตอนการทดลองได้ดำเนินการตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการครีตผิวแข็งชิ้นงาน

Hydraulic Pump Pressure (Bar)	Depth of Burnishing (mm)	Test 1	Test 2	Test 3
200	0.4	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.6	x	x	x
400	0.4	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.6	x	x	x
600	0.4	x	x	x
	0.5	x	x	x
	0.6	x	x	x

1. ติดตั้งหัวบอลการครีตผิวแข็งเข้ากับป้อนมีดของเครื่องกัดซีเอ็นซีและติดตั้งเกจวัดความดันน้ำมันไฮดรอลิกที่หัวเครื่องการครีตผิวแข็งดังรูปที่ 3.12



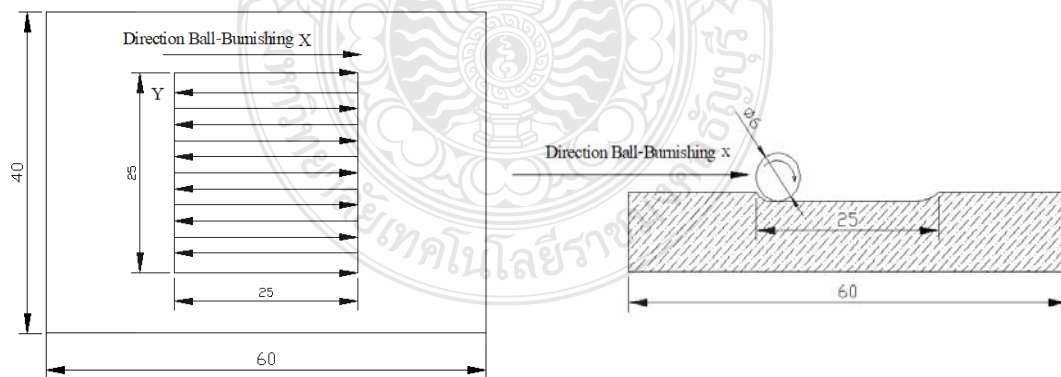
รูปที่ 3.12 การติดตั้งหัวบอลการครีตผิวแข็ง

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมมา 1 ชิ้น ทำการจับยึดกับบล็อกที่เตรียมไว้สำหรับจับยึดชิ้นงานในการกัดครีด้วยบอลเซรามิก แสดงดังรูปที่ 3.13



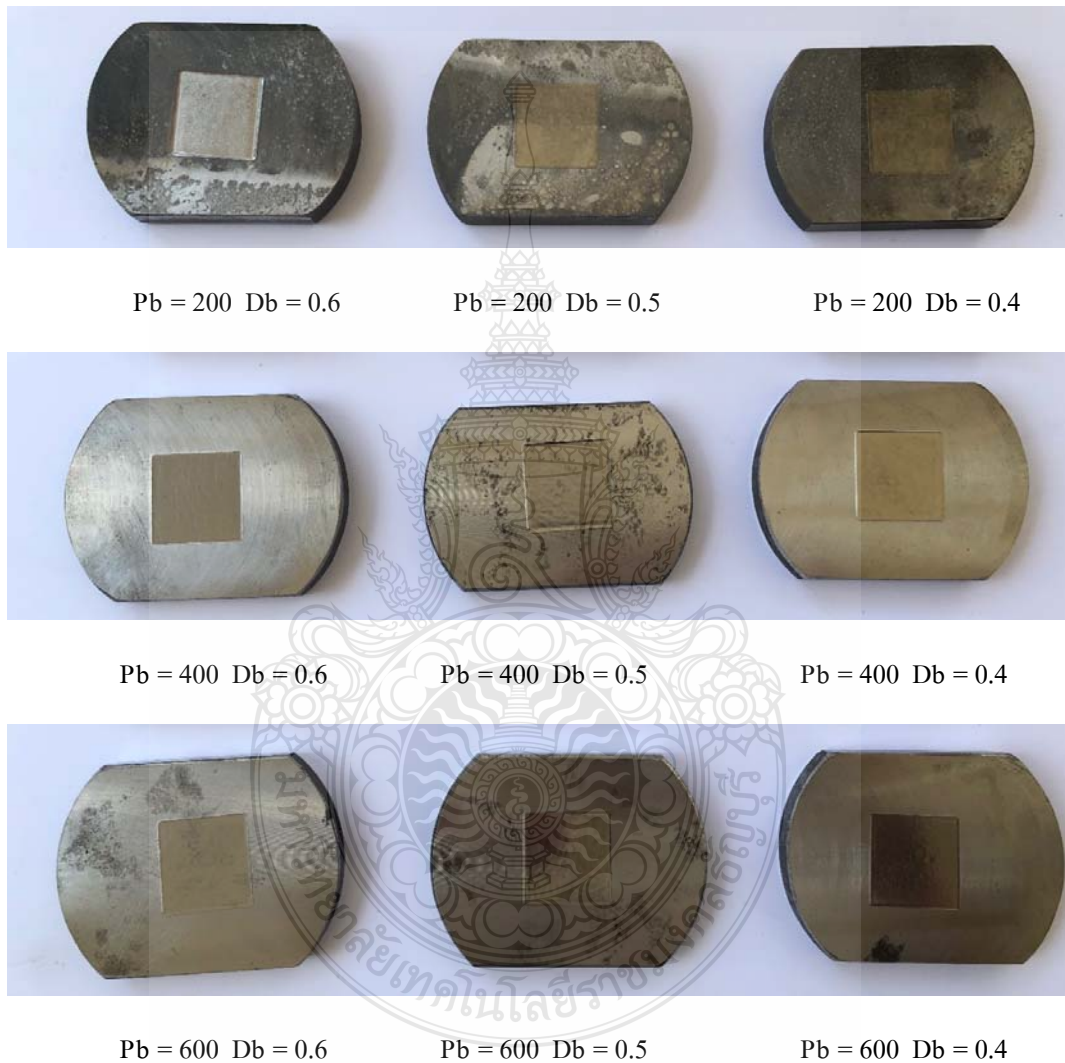
รูปที่ 3.13 การจับยึดชิ้นงาน

3. ทำการกัดด้วยบอลครีผิวแข็ง ลงบนชิ้นงานไปทางแกน X แล้ววนไปในแนวแกน Y ให้ได้พื้นที่ 25x25 ตารางมิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ทิศทางการครีผิวแข็งชิ้นงาน

4. ทำการป้อนค่าความลึก ค่าความดันบีมน้ำมันไฮดรอลิกตามระดับตัวแปรที่กำหนด โดยความเร็วรอบในการกรัดผิวแข็งคงที่ เมื่อเสร็จสิ้นการกรัดผิวแข็งชิ้นงานให้กลับไปทำตามตัวแปรที่กำหนดไว้โดยดำเนินตามข้อ 1 – 4 จนครบทำการทดลอง 3 ซ้ำ รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง

3.4.4 การเตรียมชิ้นงานชุบแข็ง

ในการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางของ SCM-440 นำชิ้นงานเข้าสู่เตาความร้อน ปิดฝาเตา ตั้งอุณหภูมิอบเพิ่มจาก 0 °C จนถึง 845 °C ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมงและทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เมื่อได้กำหนดแล้วนำชิ้นงานออกจากเตาอบเพื่อไปแช่ในน้ำมันให้เย็นตัวโดยเร็ว ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางของ SCM 440 ที่ผ่านการชุบแข็ง

3.5 การวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

การวัดค่าความแข็งผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์เครื่อง Matsuzawa Digital Microhardness Tester รุ่น MXT70 ใช้แรงกดเพื่อวัดค่าความแข็งขนาด 100 กรัมแรง เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยจะทำการวัดชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งด้วยบอลลี่สภาวะต่างๆ ในการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นงานด้วย Vickers Micro Hardness Tester ทำการวัดโดยการแบ่งพื้นผิวเป็นส่วนๆ จากนั้นทำการจำนวน 9 จุดและนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย

3.6 การวัดความหยาบผิว

การวัดความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่อง 3D Optical Profiler ยี่ห้อ BRUKER ทำการวัด โดยการแบ่งพื้นผิวเป็นส่วนๆ จากนั้นทำการวัดค่าความเรียบผิวได้ แต่ละจุดจำนวน 4 จุดและนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย

3.7 การวัดความเค้นตกค้าง

การวัดค่าความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงานทั้งก่อนการกดรีดผิวแข็ง และภายหลังจากการกดรีดผิวแข็ง ด้วยบอล โดยการวัดความเค้นตกค้างบนผิวหรือใกล้พื้นผิว ด้วยเครื่องมือวัด Portable Stress Analyzer รุ่น SmartSite RS ยี่ห้อ RigaKu โดยใช้หลักการ X-ray Diffraction

3.8 การวัดโครงสร้างจุลภาค

การใช้กล้องจุลทรรศน์ เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลึก ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อตรวจสอบทำโดยการนำชิ้นมาที่ผ่านการทดสอบ แล้วนำไปขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ และผงขัดจนได้ผิวหน้าที่มีลักษณะเหมือนผิวหน้ากระจก หลังจากนั้นทำการขัดละเอียดด้วยผงอลูมิน่า ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกรด Nitral 2% เพื่อให้สามารถมองเห็นโครงสร้างในพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงาน

3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

3.9.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไข เทียบกับ ความแข็งผิวของ SCM-440 ไม่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง และเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 ที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อหาเงื่อนไขของการกดรีดที่ทำให้ความแข็งผิวสูงสุด

3.9.2 เปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไข เทียบกับ ความเค้นตกค้างผิวของ SCM-440 ไม่ผ่านการกดรีดผิวแข็ง และเทียบค่าความเค้นตกค้างผิวของ SCM 440 ที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อหาเงื่อนไขของการกดรีดผิวแข็งที่ทำให้ความเค้นตกค้างมากที่สุด

3.9.3 เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไข เทียบกับ ความหยาบผิวของ SCM-440 ไม่ผ่านการครีตผิวแข็ง และเทียบค่าความหยาบผิวของ SCM-440 ที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อหาเงื่อนไขของการการครีตผิวแข็งที่ทำให้ความหยาบผิวน้อยที่สุด

3.9.4 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวัดของแต่ละเงื่อนไข เทียบกับ ความโครงสร้างจุลภาคของ SCM-440 ไม่ผ่านการครีตผิวแข็ง และเทียบโครงสร้างจุลภาคของ SCM-440 ที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อหาเงื่อนไขของการครีตผิวแข็ง ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปทางกายภาพ เพื่อการเพิ่มความแข็งผิว (Surface Hardness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ลดความหยาบผิว (Surface Roughness) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคผลึกของพื้นผิวชิ้นงานจากกระบวนการกัดผิวแข็ง ด้วยบอลเชรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ในกระบวนการกัดผิวแข็งของเหล็ก SCM-440 ตัวแปรต้นในการศึกษาประกอบด้วยแรงดันป้อนน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกัดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร ใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 33 ชิ้น โดยมีอัตราการป้อน (Feed Rate) 0.1 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วในการกัด 2000 มิลลิเมตร/นาที จำนวนของการกัดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) 10 ครั้งและใช้น้ำมันไฮดรอลิก HLP 68 ผลจากการศึกษาจะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานสำหรับงานที่ต้องการทั้งความแข็งและความเรียบของพื้นผิว ความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น

4.1 ค่าความแข็งของผิว

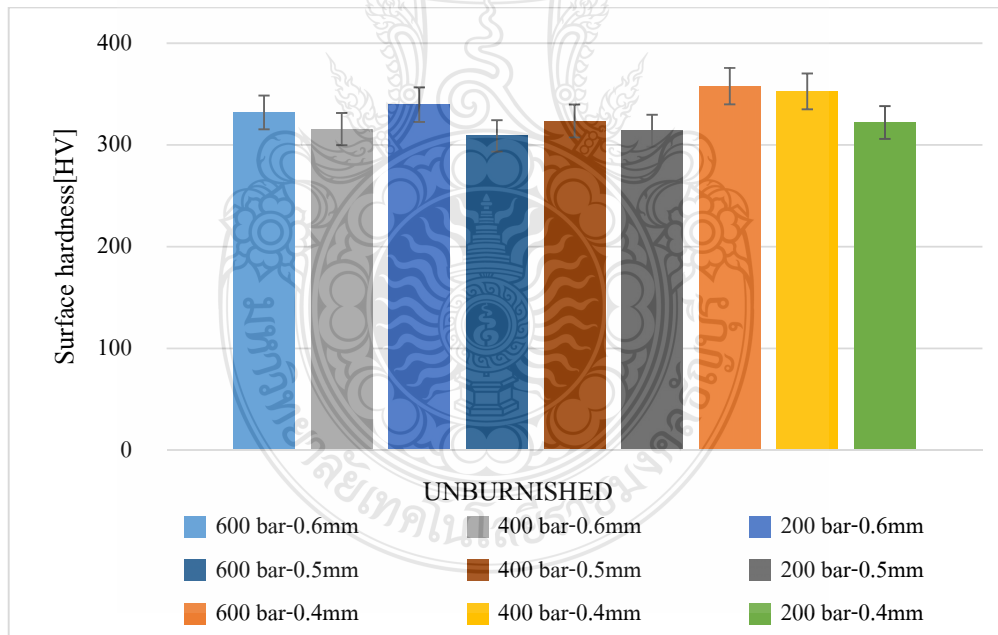
ในการดำเนินงานการทดลองการกัดผิวแข็งเหล็ก SCM-440 ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) ในการกดบอลกัดผิวแข็ง 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกัดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตรเพื่อหาความแข็งผิว ด้วยเครื่อง Matsuzawa Digital Microhardness Tester รุ่น MXT70 ใช้ในการวัดหาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ โดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

4.1.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของผิว SCM-440 ก่อนและหลังการกัดผิวแข็ง

การวัดค่าความแข็งผิวโดยชิ้นงานเป็นเหล็ก SCM-440 ก่อนการกัดผิวแข็ง การทดสอบค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (HV) ของเหล็ก SCM-440 แสดงค่าชิ้นงานที่ได้ก่อนการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM-440 ก่อนการรีดผิวแข็ง

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
200	0.4	322
	0.5	314
	0.6	340
400	0.4	353
	0.5	324
	0.6	316
600	0.4	358
	0.5	309
	0.6	332



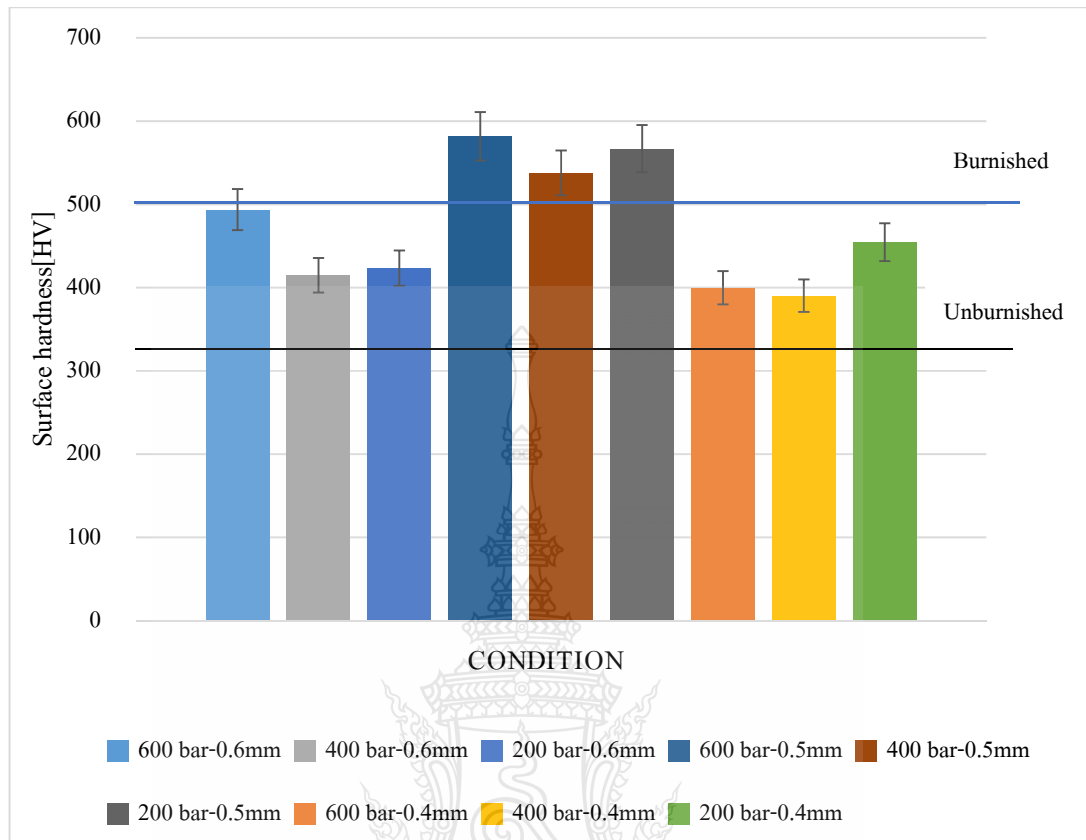
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งผิวของ SCM-440 ก่อนการกดรีดผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองค่าความแข็งผิวของ SCM-440 ก่อนการกรัดผิวแข็ง ชิ้นงานทั้งหมดมีความแข็งของผิวเฉลี่ย 329.8 ± 16.36 HV

การวัดค่าความแข็งผิวโดยชิ้นงานเป็นเหล็ก SCM-440 หลังการกรัดผิวแข็ง การทดลองกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) ในการกดบอลกรัดผิวแข็ง 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร การทดสอบค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (HV) ของเหล็ก SCM-440 แสดงค่าชิ้นงานที่ได้ก่อนการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรัดผิวแข็ง

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกรัดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)
200	0.4	455
	0.5	567
	0.6	423
400	0.4	390
	0.5	538
	0.6	415
600	0.4	400
	0.5	582
	0.6	494



รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของการทดลองความแข็งผิว SCM-440 ที่ผ่านการกรดผิวแข็ง ผลการทดลองค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิว ซึ่งงานทั้งหมดมีความแข็งของผิวจากการทดลองเฉลี่ย 504.6 ± 77.97 HV ซึ่งมีค่าความแข็งของผิวมากกว่าเหล็ก SCM-440 ก่อนการกรดผิวแข็ง

4.1.2. การวิเคราะห์แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิกที่ส่งผลต่อความแข็งผิวเฉลี่ยของ SCM-440 ที่ผ่านการกรดผิวแข็ง

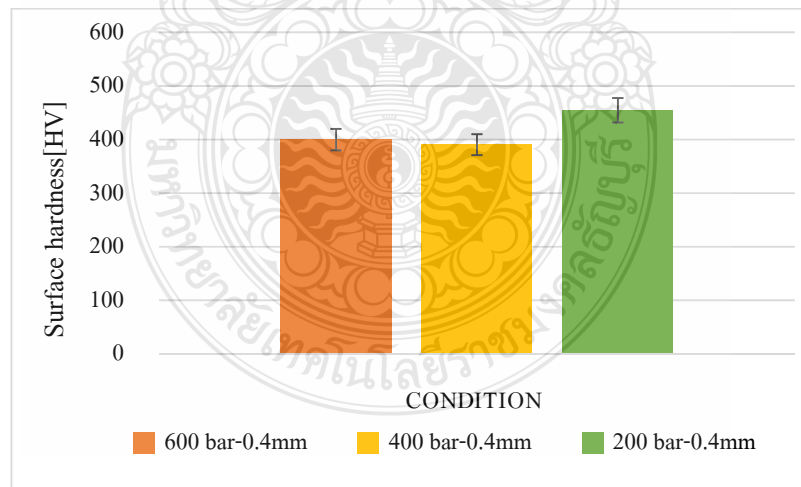
จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของผิวของเหล็ก SCM-440 ในสถานะที่มีการเปลี่ยนของแรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรดผิวแข็งคงที่

4.1.2.1 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะแรงดัน 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 18-38% และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 455 ± 14.1 HV ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร

ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (HV)
0.4	200	455
	400	390
	600	400



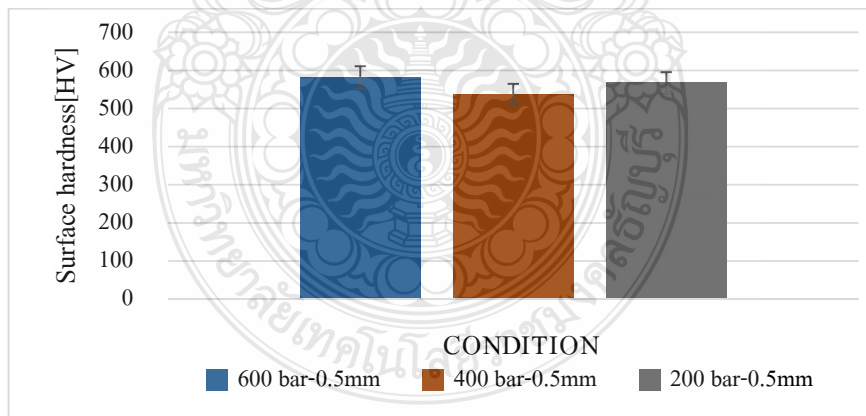
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร

4.1.2.2 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการรีดผิวแข็งสภาวะแรงดัน 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งงานที่ผ่านการรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 27-72% และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 582 ± 9.2 HV ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร

ความลึกของการรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (HV)
0.5	200	567
	400	538
	600	582



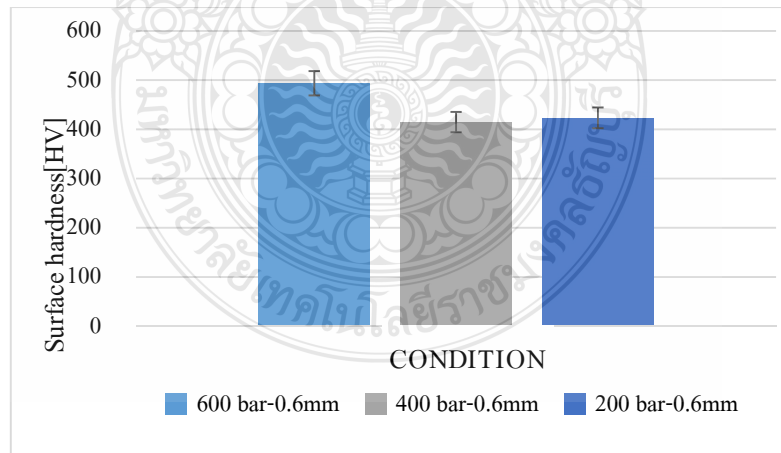
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร

4.1.2.3 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะแรงดัน 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร ซึ่งงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 26-50% และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 494 ± 45.8 HV ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกดรีดผิวแข็งที่สภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร

ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (HV)
0.6	200	423
	400	415
	600	494



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 400 และ 600 บาร์ ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแตกต่าง ที่ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200 บาร์ มีค่าความแข็งผิวสูง และที่ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่ 600 บาร์ มีค่าความแข็งผิวสูง พบว่าค่าความแข็งสูง เมื่อความลึกของการกริดผิวแข็งลดจาก 0.4 ถึง 0.5 มิลลิเมตร และความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.6 มิลลิเมตรทุกแรงดันพบว่า ค่าความแข็งผิวลดลงด้วย ความลึกที่เหมาะสมสำหรับการกริดผิวแข็งคือ 0.5 มิลลิเมตร

4.1.3. การวิเคราะห์ความลึกของการกริดผิวแข็งส่งผลต่อความแข็งของผิวเฉลี่ยของ SCM-440 ที่ผ่านการกริดผิวแข็ง

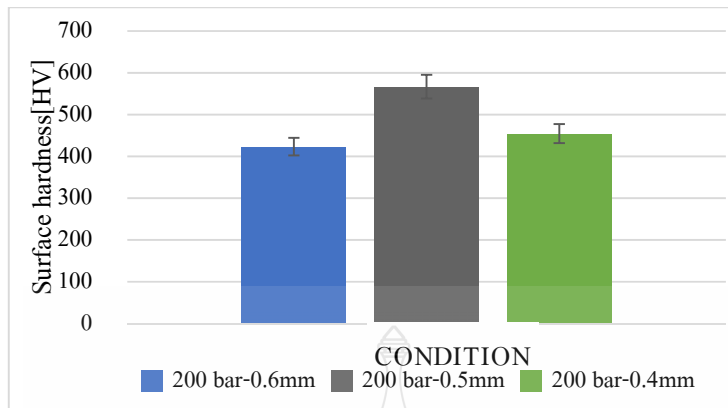
จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของผิวของเหล็ก SCM-440 ในสถานะที่มีการเปลี่ยนของความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกคงที่

4.1.3.1 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกริดผิวแข็งสถานะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และ ชิ้นงานที่ผ่านการกริดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 28-72% และที่ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 567 ± 53.0 HV ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกริดผิวแข็งที่ความลึกของการกริดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกริดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)
200	0.4	455
	0.5	567
	0.6	423



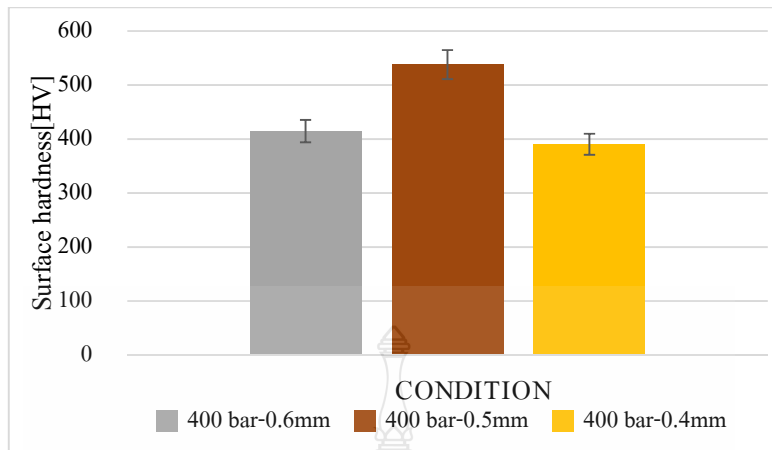
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์

4.1.3.2 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิวแข็งสภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์ ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และ ชิ้นงานที่ผ่านการกรดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 18-63% และที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 538 ± 65.0 HV ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรดผิวแข็งที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกรดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)
400	0.4	390
	0.5	538
	0.6	415



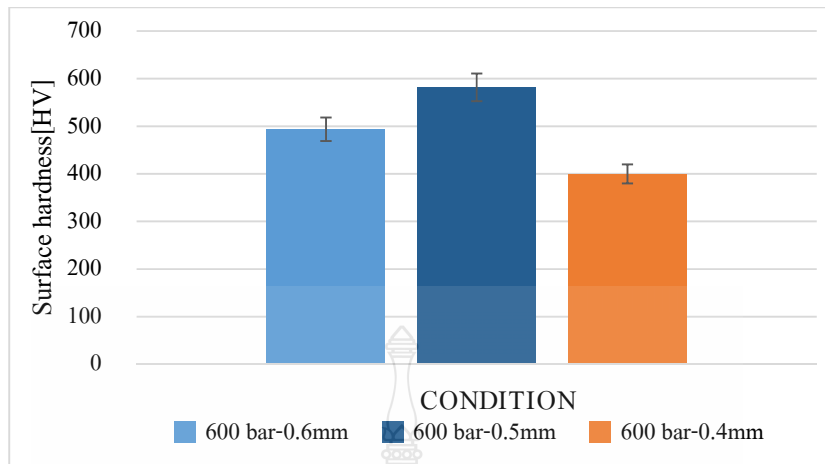
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 400 บาร์

4.1.3.3 ผลการทดลองค่าความแข็งของผิวที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4, 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์

จากรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกรดผิวแข็งสภาวะแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร และ ชิ้นงานที่ผ่านการกรดผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ประมาณ 21-50% และที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 582 ± 9.2 HV ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรดผิวแข็งที่ความลึกของการกรดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกรดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)
600	0.4	400
	0.5	582
	0.6	494



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็งสภาวะที่ความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์

การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการกดรีดผิวแข็ง ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ ให้ค่าความแข็งสูงสุด และความลึกของการกดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 582 ± 9.2 HV และที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกเพิ่มขึ้นค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความลึก 0.4 มิลลิเมตร เนื่องจากการทดลองที่แรงดันต่ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันไฮดรอลิกที่หัวกดรีดออกมาเป็นจำนวนน้อยส่งผลให้เกิดการเสียดสี[9] ผลของความแข็งของผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเกิดจากการใช้แรงดันสูงกับพื้นผิวของเหล็ก ซึ่งเป็นความแข็งที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความหนาของชั้น โลหะเกิดขึ้นหลังจากการบีบอัดของพื้นผิวจะมากขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น แรงดันที่เหมาะสมจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกดรีดผิวแข็ง[12]

4.1.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 ในสภาวะการกดรีดผิวแข็ง

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีส่งผลต่อความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 จากตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งผิว ได้จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างความแข็งผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกดรีดผิวแข็งในแต่ละสภาวะ

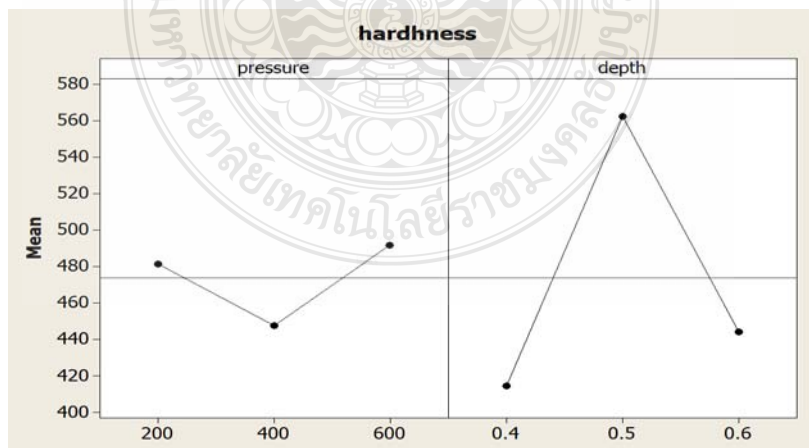
ตารางที่ 4.9 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งของผิว

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressure	2	9544	9544	4772	2.60	0.102
Depth	2	109652	109652	54826	29.86	0.000*
Pressure*depth	4	11894	11894	2974	1.62	0.213
Error	18	33051	33051	1836		
Total	26	164142				

S = 42.8507 R-Sq = 79.86% R-Sq(adj) = 70.91%

เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวคือ ความลึกของการกรัดผิวแข็ง ที่ค่า P-Value ของปัจจัย Depth = 0.000 < (0.05) ซึ่งส่งผลร่วมกันต่อความแข็งของผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effect) ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวคือ ความลึกของการกรัดผิวแข็งผ่านการกรัดผิวแข็ง รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของค่าความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการกรัดผิวแข็ง พบว่าค่าแรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิกที่ 600 บาร์ ค่าความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.5 มิลลิเมตรจะทำให้ความแข็งผิวชิ้นงานมีค่ามากที่สุด คือ 582 ± 9.2 HV



รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลหลักของความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งผิว

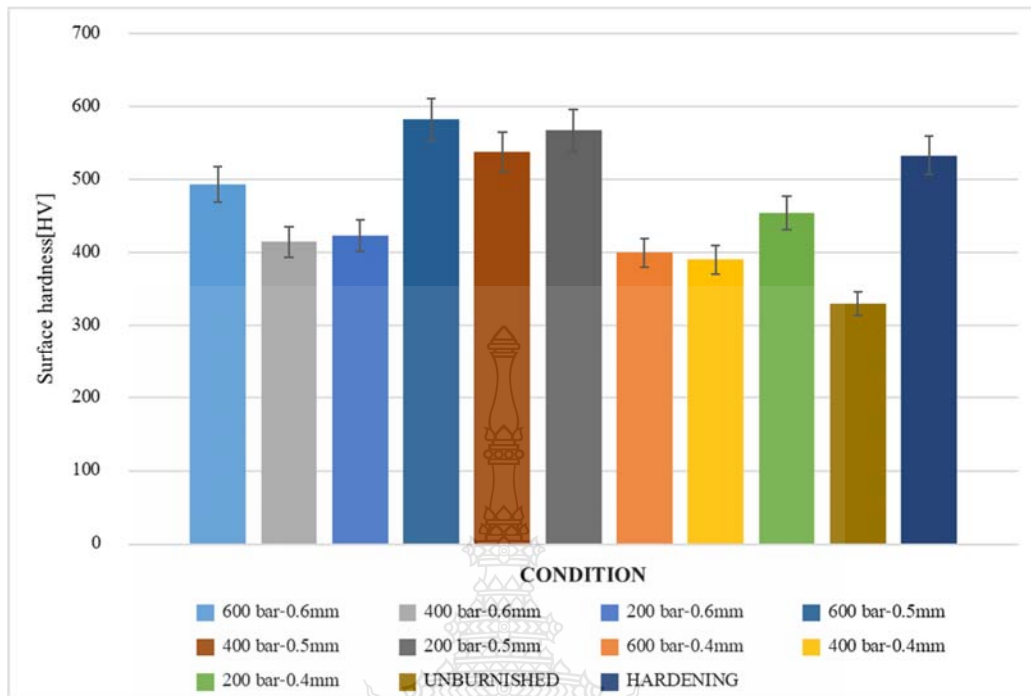
4.1.5 ผลของการทดลองความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440

จากงานวิจัยของ พิรพงษ์ กาศูริยะ [27] ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวงานของการกลึงเหล็กกล้าชุบแข็ง เกรด SCM-440 พบว่า เหล็ก SCM-440 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ในกระบวนการแปรรูปเพื่อให้ชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งและต้านทานความล้าได้ดีโดยผ่านกระบวนการชุบแข็ง ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่เหล็กจนเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างและทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการปรับผิวชิ้นงานให้มีคุณภาพผิวตามมาตรฐาน ในกระบวนการแปรรูปเหล็ก SCM-440 ด้วยการชุบแข็งจำเป็นต้องใช้เวลาในกระบวนการชุบแข็ง 2-3 ชั่วโมง และต้องใช้เตาอบความร้อนในการชุบแข็งที่มาก เมื่อเทียบกับกระบวนการครีตผิวแข็ง ผลการทดลองค่าความแข็งผิวของ SCM-440 หลังการครีตผิวแข็งพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการครีตผิวแข็งสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ และพบว่าที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และความลึกของการครีตผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด 582 ± 9.2 HV

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของผิวเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการครีตผิวแข็ง กับเหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง ความแตกต่างระหว่างความแข็งผิวของเหล็ก แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของพื้นผิวเหล็ก SCM-440

สภาวะ	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
เหล็กก่อนการทดสอบ (Unburnished)	329.8
เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง (Hardening)	533
แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก 600 บาร์ และ ความลึกของการครีตผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร (Burnished)	582



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน

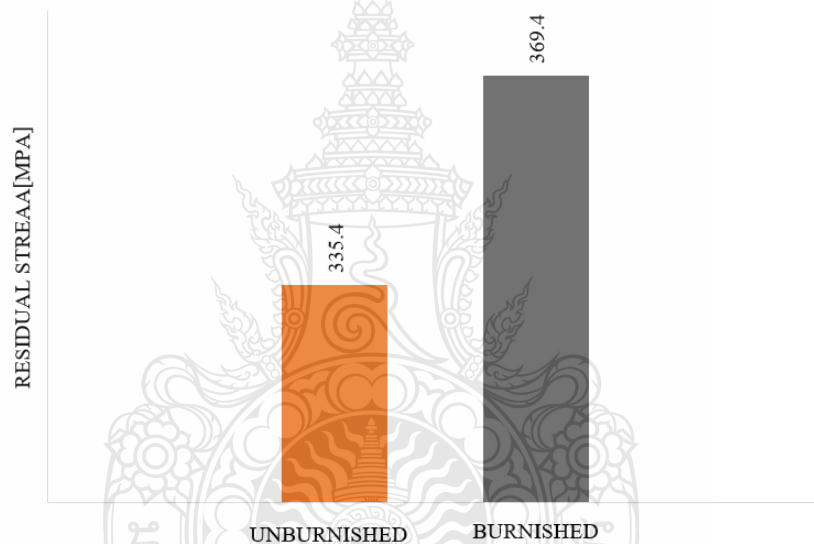
จากรูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งผิวของชิ้นงานในสภาวะชิ้นงานที่ก่อนการทดสอบ การกรัดผิวแข็ง และการชุบแข็ง แสดงความแตกต่างของความแข็งเฉลี่ยของพื้นผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ และพบว่าเหล็กที่ผ่านชุบแข็ง และการกรัดผิวแข็งมีความแข็งผิวไม่ต่างกัน และที่กระบวนการกรัดผิวแข็ง แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีความแข็งผิวมากที่สุด 582 ± 9.2 HV

4.2 ค่าความเค้นตกค้าง

การสร้างความเค้นตกค้างขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ความผิดปกติของพลาสติกที่ไม่เป็นรูปแบบอันเกิดจากกลไกและความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ [19] การเปลี่ยนรูปพลาสติกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานระหว่างการกรัดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของความเค้นตกค้าง การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ใช้สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง บนพื้นผิวของ SCM-440 ความแตกต่างของความเค้นตกค้างบนพื้นผิวที่ผ่านการกรัดผิวแข็งแล้วแสดงในตารางที่

4.11

ค่าความเค้นตกค้างในทางเดียวกับการรีดผิวแข็ง (Horizontal : X) เพิ่มขึ้นเป็น 369.4 MPa อาจเป็นเพราะการอัดตัวของผลึก สภาวะที่เหมาะสมของการกรดรีดผิวแข็งที่สุดคือ แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และ ความลึกของการกรดรีดผิว 0.5 มิลลิเมตร ความเค้นตกค้างมีความสำคัญขึ้นอยู่กับทิศทางกรดรีดผิวแข็ง[24] จากข้อมูลจะพบว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นค่าความเค้นตกค้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตรที่แต่ละแรงดัน จะให้ค่าความเค้นตกค้างอัดสูง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งผิว เพื่อให้ได้ค่าความแข็งผิวที่ดีและความเค้นตกค้างของอัดเป็นตัวแปรสำคัญในการปรับปรุงความล้าและความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นตกค้างของเหล็ก SCM-440 ก่อนและหลังการกรดรีดผิวแข็ง

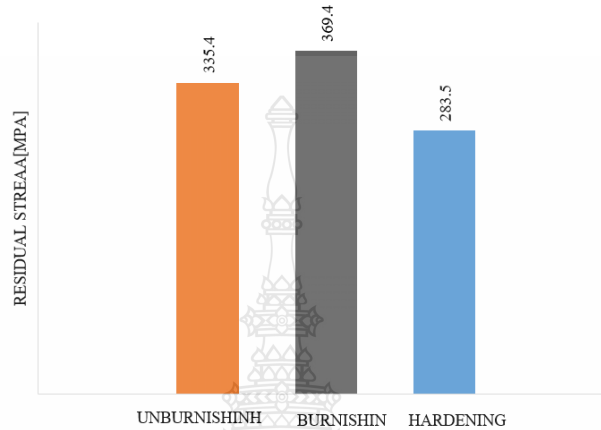
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความเค้นตกค้าง

แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Point	X (MPa)	Y (MPa)
200	0.4	Unburnished	-384.7±18.1	333.3±14.6
		Surface	-215.8±13.1	-749.8±20.9
	0.5	Unburnished	-206.3±15.2	141.3±9.0
		Surface	-366.7±15.3	-992.0±19.1
	0.6	Unburnished	7.2±10.8	39.8±9.4
		Surface	-350.1±6.2	-729±13.2
400	0.4	Unburnished	-107.1±17.6	185.0±22.8
		Surface	-209.1±2.8	-447.5±37
	0.5	Unburnished	109.4±18.0	362.1±15.6
		Surface	-342.3±12	-815.1±19.8
	0.6	Unburnished	296.4±16.1	451.1±16.9
		Surface	-340.4±5.6	-693.1±9.9
600	0.4	Unburnished	-372.5±24.9	499.1±10.7
		Surface	-273.3±3.6	-638.1±12.7
	0.5	Unburnished	-335.4±22.1	22±21.1
		Surface	-369.4±15.7	-787.4±17.1
	0.6	Unburnished	162.3±12.4	234.9±9.3
		Surface	-343.8±7.1	-711.2±8.2

4.2.1 ผลของการทดลองความเค้นตกค้างของเหล็ก SCM-440

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างของความเค้นตกค้างที่เฉลี่ยของพื้นผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบ ชิ้นงานชุบแข็ง และชิ้นงานที่กดรีดผิวแข็ง โดยชิ้นงานก่อนการทดสอบมีค่าความเค้นตกค้างอัด 335.4 MPa ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมีความเค้นตกค้างอัด 283.5 MPa และ

สภาวะที่เหมาะสมของการรีดผิวแข็งที่สุดคือ แรงดันบีมน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และ ความลึกของการกรัดรีดผิว 0.5 มิลลิเมตร ค่าความเค้นตกค้างอัด 369.4 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งผิวของชิ้นงานเมื่อมีค่าความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างอัดของเหล็ก SCM-440

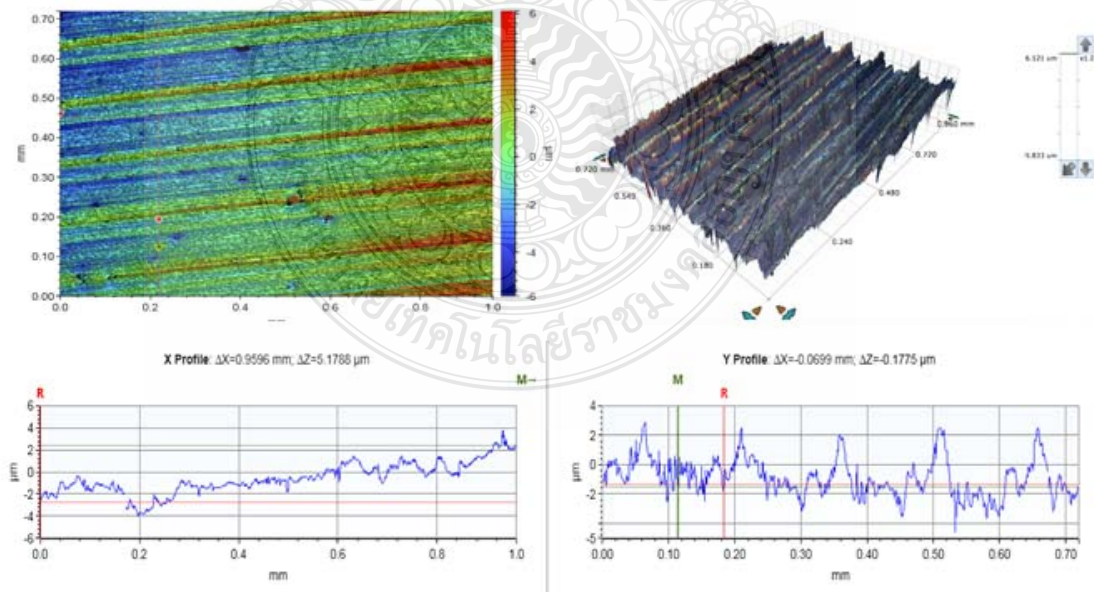
4.3 ค่าความหยาบผิว

การทดลองการกรัดรีดผิวแข็งเหล็ก SCM-440 ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) ในการกดบอลกรัดรีดผิวแข็ง 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดรีดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4, 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตรเพื่อหาความหยาบผิว ด้วยเครื่องมือที่ใช้วัดความหยาบผิวแบบดิจิทัล 3D Optical Profiler ยี่ห้อ BRUKER การวัดความหยาบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิค Coherence Scanning Interferometry (CSI) ในการวัดจะใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบบรอดแบนด์และรวมเทคนิคการสแกนแบบแนวตั้ง (แกน z) ด้วยเทคนิคออปติคอลเมตริกซ์เพื่อให้ได้การวัดพื้นผิวแบบสามมิติ พารามิเตอร์ $Ra(Sa)$, $Rq(Sp)$, $Rv(Sv)$, $Rz(Sz)$, $Rsk(Ssk)$, $Rku(Sku)$ สอดคล้องกับ ISO 25178 [27]

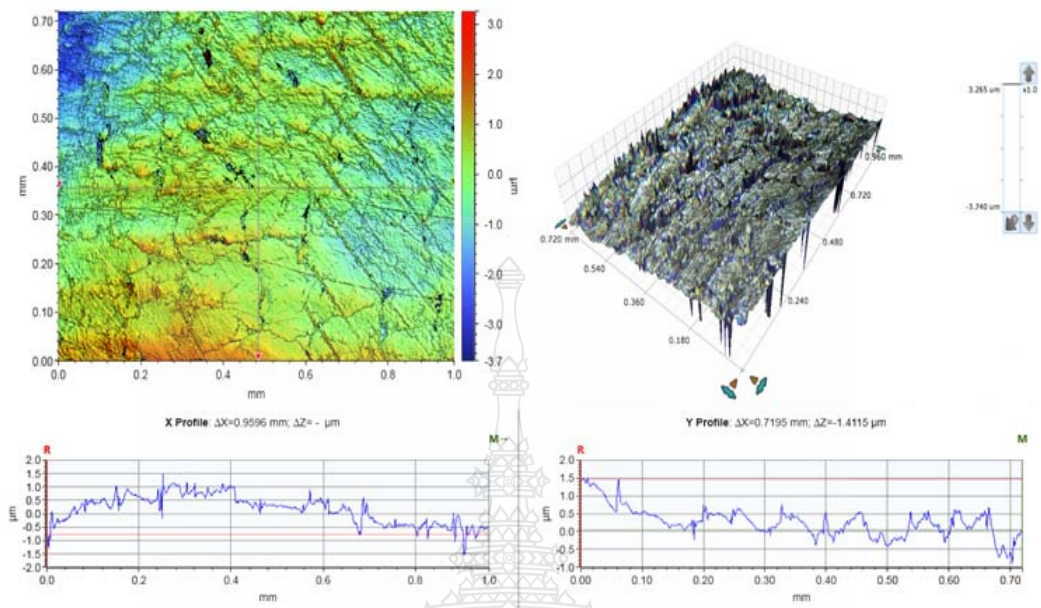
จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการทดลองกรัดรีดผิวแข็งด้วยบอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) ในการกดบอลกรัดรีดผิวแข็ง 200 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการรีดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440

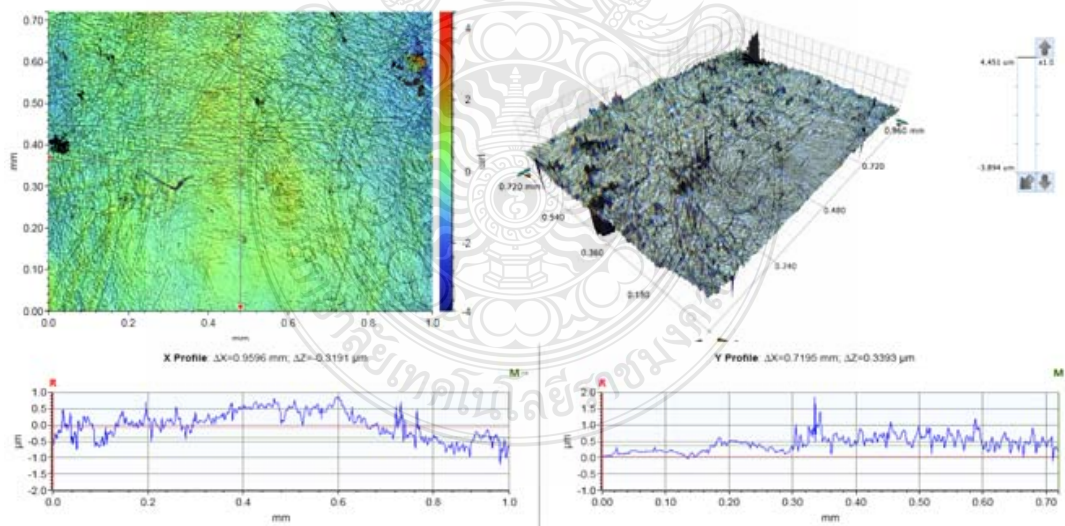
แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกัดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
		Ra(Sa) (μm)	Rq(Sq) (μm)	Rp(Sp) (μm)	Rv(Sv) (μm)	Rz(Sz) (μm)	Rsk(Ssk)	Rku(Sku)
Unburnished		1.40	1.67	5.51	-6.46	11.98	0.12	2.70
200	0.4	0.46	3.73	0.61	-3.97	8.45	-0.15	3.91
	0.5	0.59	3.19	0.77	-6.72	10.62	-0.88	4.65
	0.6	0.66	3.13	0.81	-3.36	6.48	0.03	2.49
400	0.4	1.18	5.98	1.47	-6.26	12.29	0.58	3.81
	0.5	0.73	4.67	1.18	-4.81	9.52	0.28	3.91
	0.6	0.67	4.74	0.86	-4.57	9.31	-0.28	4.02
600	0.4	1.34	10.35	1.77	-8.18	18.54	0.72	5.29
	0.5	0.83	4.13	1.00	-5.16	9.89	-0.24	3.55
	0.6	0.82	4.71	1.02	-4.36	9.08	-0.43	3.16



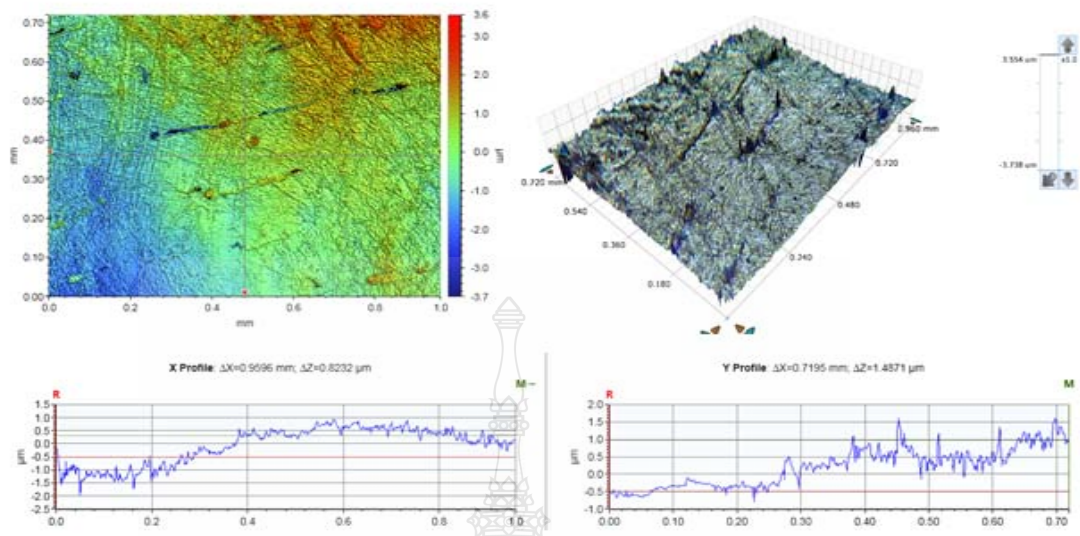
(a) Unburnished – SCM-440



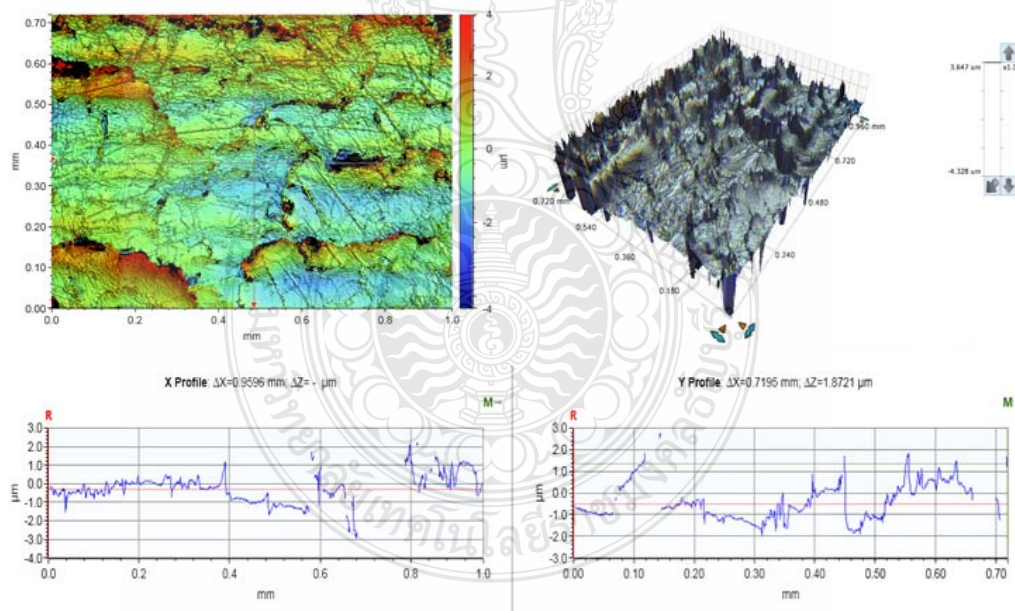
(a) $P_b = 200$ bar, $D_b = 0.4$ mm



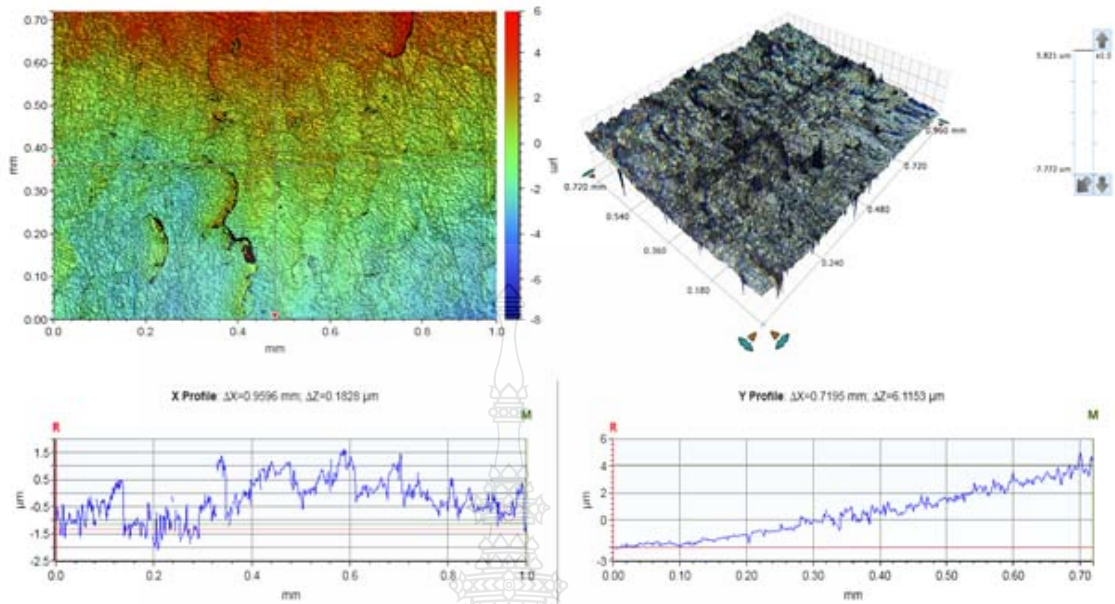
(b) $P_b = 200$ bar, $D_b = 0.5$ mm



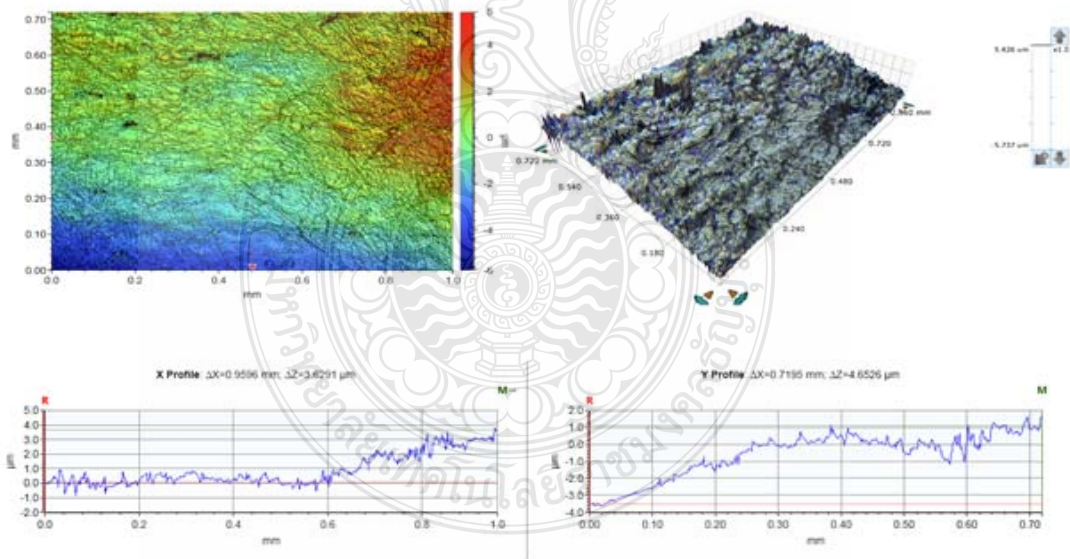
(c) $P_b = 200$ bar, $D_b = 0.6$ mm



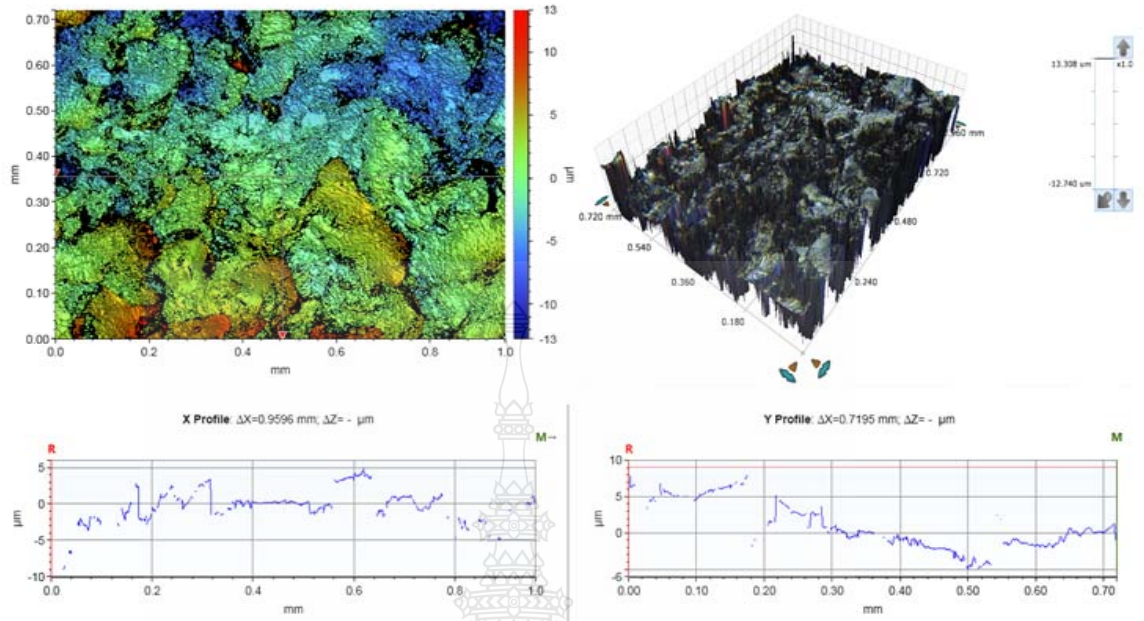
(d) $P_b = 400$ bar, $D_b = 0.4$ mm



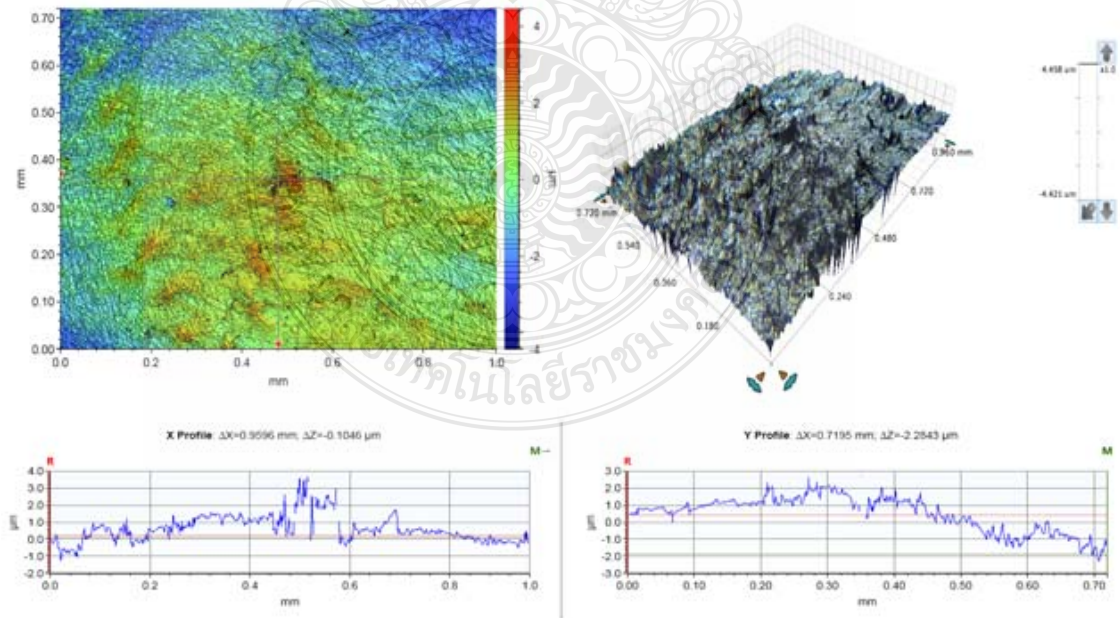
(e) $P_b = 400$ bar, $D_b = 0.5$ mm



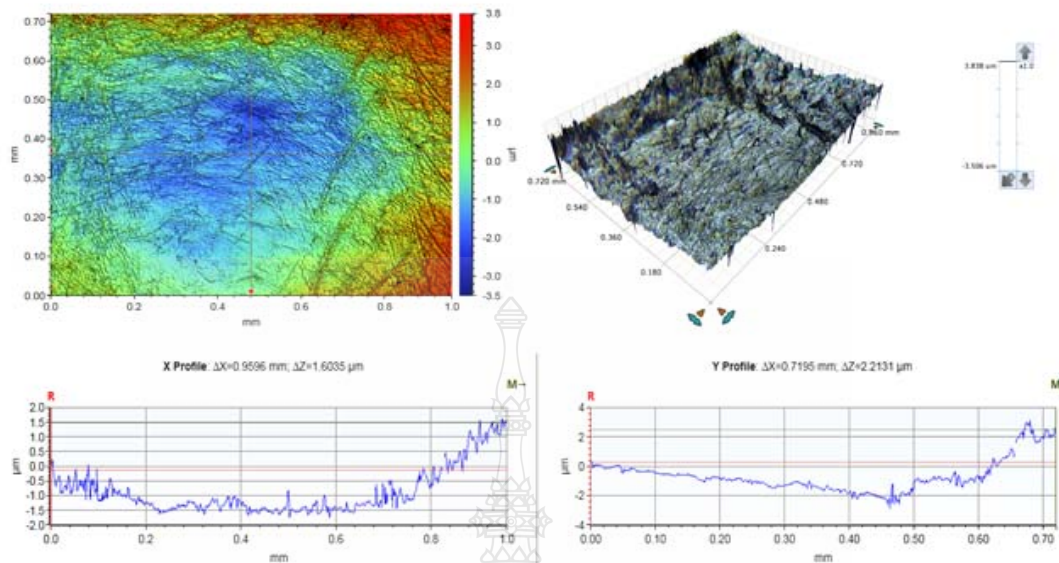
(f) $P_b = 400$ bar, $D_b = 0.6$ mm



(g) $P_b = 600$ bar, $D_b = 0.4$ mm



(i) $P_b = 600$ bar, $D_b = 0.5$ mm



(j) $P_b = 600 \text{ bar}$, $D_b = 0.6 \text{ mm}$

รูปที่ 4.13 Topography และพารามิเตอร์ของพื้นผิวหลังจากการกรัดผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการทดลองการกรัดผิวแข็งด้วยบอลจากการวิเคราะห์ของภาพพื้นผิว ผลมาจากความสูงของพื้นผิวที่ยังไม่ได้กรัดผิวแข็งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดความสูงที่สุด $R_a (S_a) = 1.40 \mu\text{m}$, $R_p (S_p) = 5.51 \mu\text{m}$ และ $R_z (S_z) = 11.98 \mu\text{m}$ จากการวิเคราะห์ของภาพพื้นผิวของเหล็ก SCM-440 หลังการกรัดผิวแข็ง พบว่าค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการกรัดผิวแข็ง ได้รับค่าพารามิเตอร์ช่วงกว้างดังต่อไปนี้: $R_a (S_a) = 0.46\text{-}0.134 \mu\text{m}$, $R_p (S_p) = 0.61\text{-}1.77 \mu\text{m}$ และ $R_z (S_z) = 6.48\text{-}18.54 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามค่าความสูงที่ยิ่งใหญ่ที่สุด ($R_a (S_a) = 1.18\text{-}1.34 \mu\text{m}$) สอดคล้องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลเซรามิก (6 มม.) หลังการกรัดผิวแข็ง ค่าพารามิเตอร์ต่อไปนี้ที่อธิบายถึงรูปร่างของการกระจายระยะวัดจากแกน x ขนานกับแกน y (Ordinate Distribution) $R_{sk} (S_{sk}) = -0.43\text{-}0.58 \mu\text{m}$ และ $R_{ku} (S_{ku}) = 2.49\text{-}5.29 \mu\text{m}$ ค่าแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่กรัดผิวในส่วนใหญ่ลดค่า $R_a (S_a)$ ลงเมื่อเทียบกับพื้นผิวปกติ ($R_a (S_a) = 1.40 \mu\text{m}$) ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เชิงพื้นที่ $R_a (S_a)$ และไม่พบพารามิเตอร์แอมพลิจูดความหนาแน่นของจุดสูงสุดยอดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตัดเฉือนหลังการทดลองการกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกดบอลกรัดผิวแข็ง 200, 400 และ 600 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.4, 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อไปนี้อธิบายรูปร่าง

โดยทั่วไปการกรัดผิวแข็งด้วยบอลจะทำให้ความสูงของพื้นผิวลดลง การกรัดผิวแข็งช่วงของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดที่ดีที่สุด $Ra (Sa) = 0.46 \mu\text{m}$, $Rp (Sp) = 0.61 \mu\text{m}$ $Rz (Sz) = 8.45 \mu\text{m}$ ที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ในการกดบอลกรัดผิวแข็ง 200 บาร์ และความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตร

4.3.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีส่งผลต่อความหยาบผิวของเหล็ก SCM-440 ในสภาวะการกรัดผิวแข็ง

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีส่งผลต่อความหยาบผิวของเหล็ก SCM-440 จากตารางที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความหยาบผิว ได้จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งในแต่ละสภาวะ

ตารางที่ 4.13 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความหยาบผิว

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pressure	2	1.262	1.262	0.631	17.77	0.000*
Depth	2	0.884	0.884	0.442	12.45	0.000*
Pressure*Depth	4	1.031	1.030	0.257	7.26	0.001*
Error	18	0.629	0.639	0.035		
Total	26	3.817				

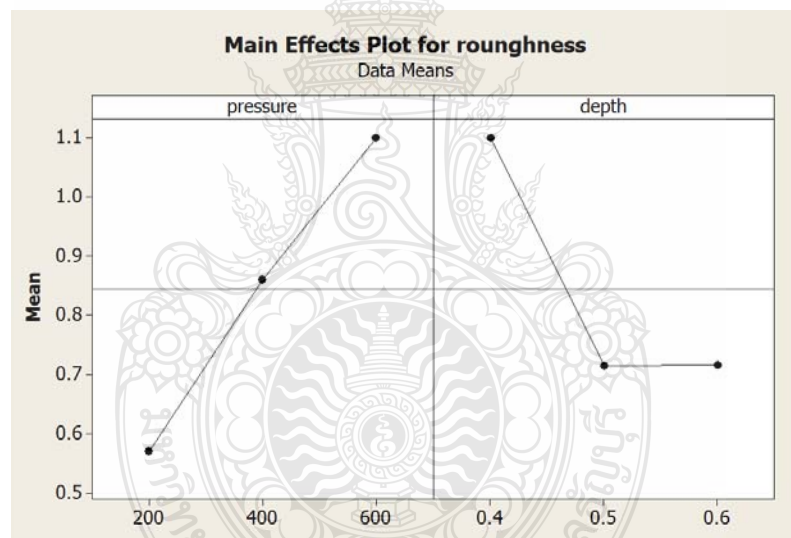
S = 0.188 R-Sq = 83.25% R-Sq(adj) = 75.81%

เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวคือ แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก ความลึกของการกรัดผิวแข็ง ค่า P-Value ของปัจจัย Pressure และ Depth = 0.000 < (0.05) อิทธิพลร่วม(Interaction Effect)ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานคือ แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกรัดผิวแข็งมีผลกระทบบรร่วมกัน ที่ค่า P-Value ของปัจจัย Pressure*Depth = 0.001 < (0.05) ซึ่งส่งผลร่วมกันต่อความหยาบของผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

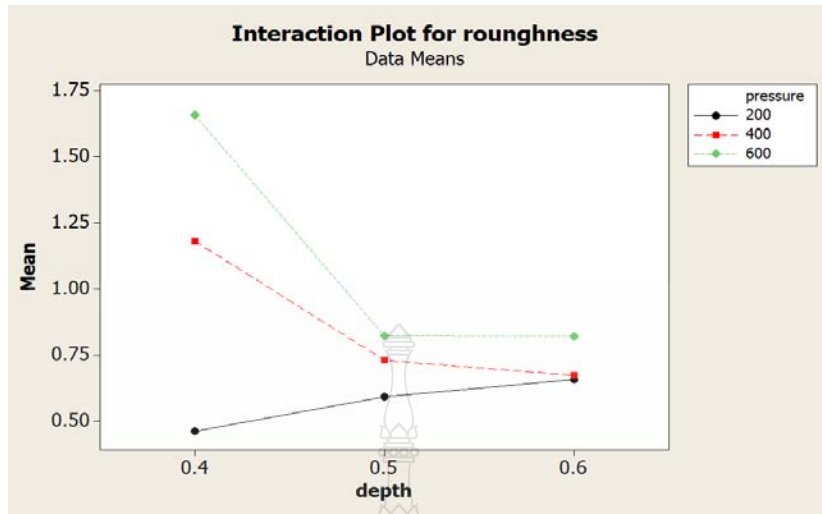
ผลวิเคราะห์อิทธิพลหลัก ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวคือ แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก ความลึกของการกรัดผิวแข็ง รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอิทธิพลหลักจะเห็นได้ว่าที่แรงดัน

ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกที่ 200 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็งที่ 0.4 มิลลิเมตร จะให้ค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดที่ดีที่สุด $Ra (Sa) = 0.46\mu m$

ผลการวิเคราะห์ของอิทธิพลปัจจัยร่วมจะเห็นได้ว่าแรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกรัดผิวแข็งมีผลกระทบร่วมกัน เมื่อแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Arithmetical mean height: $Ra (Sa)$ มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.15 การเพิ่มแรงดันที่ใช้เพิ่มจำนวนของการเสียดสีพลาสติกโดยช่วยลดความสูงของความหยาบผิว [29] ในส่วนผลกระทบของความลึกของการกรัดผิวแข็งเมื่อเพิ่มความลึกของการกรัดผิวแข็ง ที่แรงดัน 400 และ 600 บาร์ ในส่วนแรงดัน 200 บาร์ พบว่าความลึกของการกรัดผิวแข็งเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันในการกรัดผิวแข็งน้อย ส่งผลให้ขาดน้ำมันหล่อลื่นจึงทำให้เกิดการกรัดผิวแข็งแบบขัดสไลด์ (Sliding Burnishing) เห็นได้ว่าแรงดันที่สูงขึ้นจะเพิ่มความหยาบของพื้นผิว



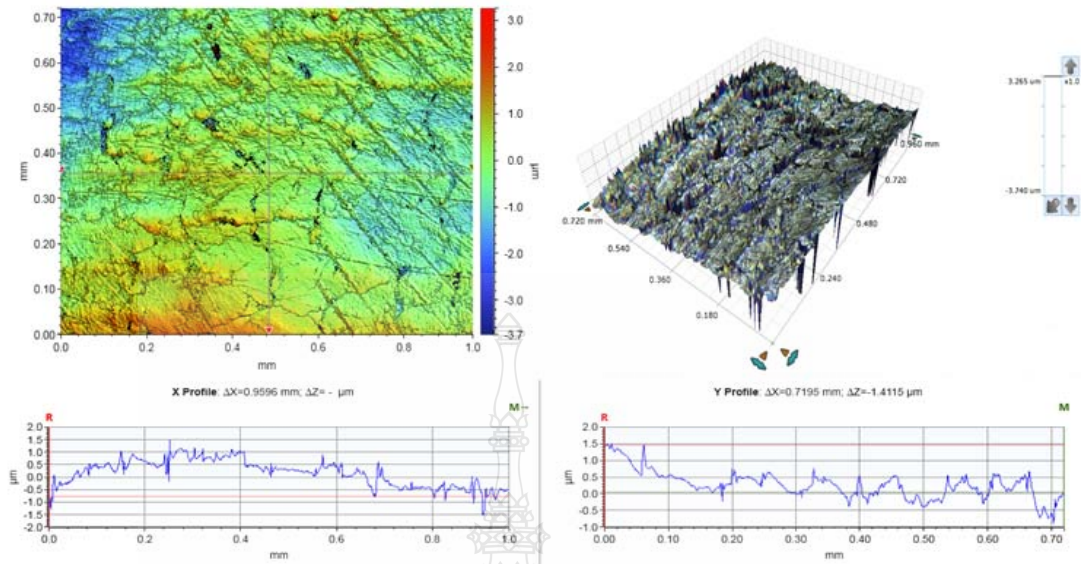
รูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลหลักของแรงดันปั๊ม น้ำมันไฮดรอลิก และความลึกของการกรัดผิวแข็ง ที่ส่งผลต่อความหยาบผิว



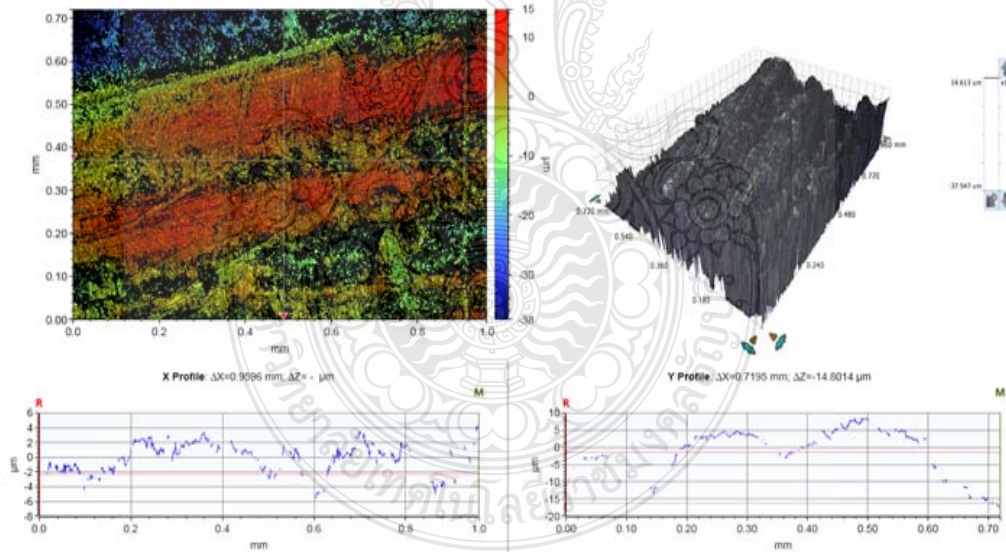
รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลร่วมของแรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกรัดผิวแข็งมีผลกระทบต่อความหยาบผิว

4.3.2 ผลของการทดลองความหยาบผิวของเหล็ก SCM-440

จากข้อมูลในการวิเคราะห์ห้ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของเหล็ก SCM-400 หลังการกรัดผิวแข็งและการอบชุบ ค่าความแตกต่างของความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อชิ้นงานที่ผ่านการกรัดผิวแข็งที่แรงดันน้ำมันไฮดรอลิก 200 บาร์ ความลึกของการกรัดผิวแข็ง 0.4 มิลลิเมตรจะให้ค่า $Ra (Sa) = 0.46 \mu m$, $Rp (Sp) = 0.61 \mu m$ และ $Rz (Sz) = 8.45 \mu m$ ซึ่งเป็นค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ จะให้ค่า $Ra (Sa) = 2.48 \mu m$, $Rp (Sp) = 9.02 \mu m$ และ $Rz (Sz) = 20.50 \mu m$ จะเห็นได้ว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการกรัดผิวแข็งจะมีค่าความหยาบผิวลดลงและมีความแข็งผิวเพิ่มขึ้น



(a) $P_b = 200 \text{ bar}$, $D_b = 0.4 \text{ mm}$

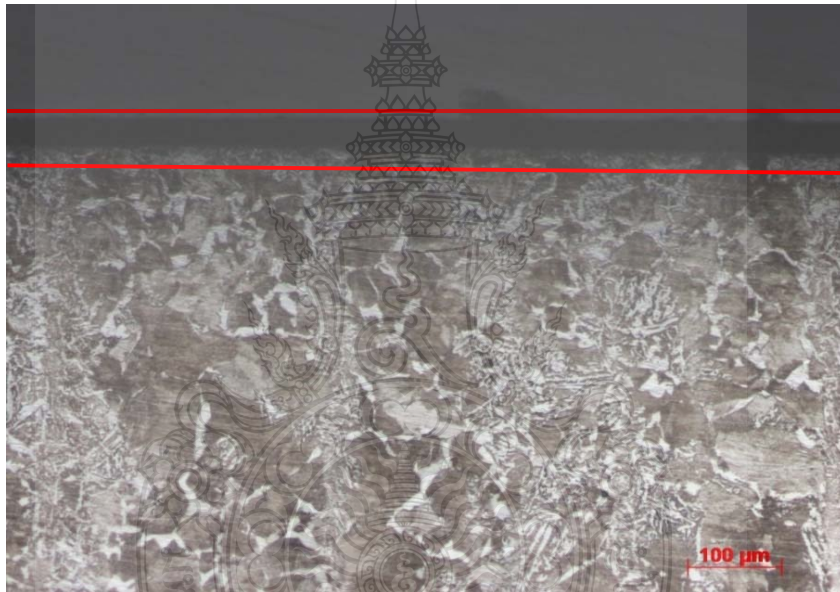


(b) Pre-heated

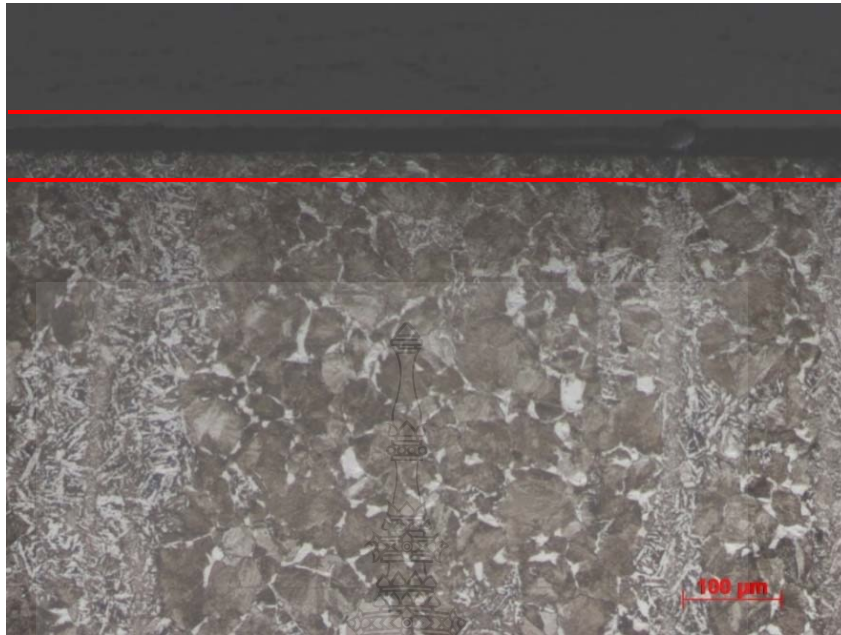
รูปที่ 4.16 ค่าความหยาบผิวของ เหล็ก SCM-440 (a) กัดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 200 \text{ bar}$, $D_b = 0.4 \text{ mm}$ (b) ผ่านการชุบแข็ง

4.4 โครงสร้างจุลภาคของผลึก

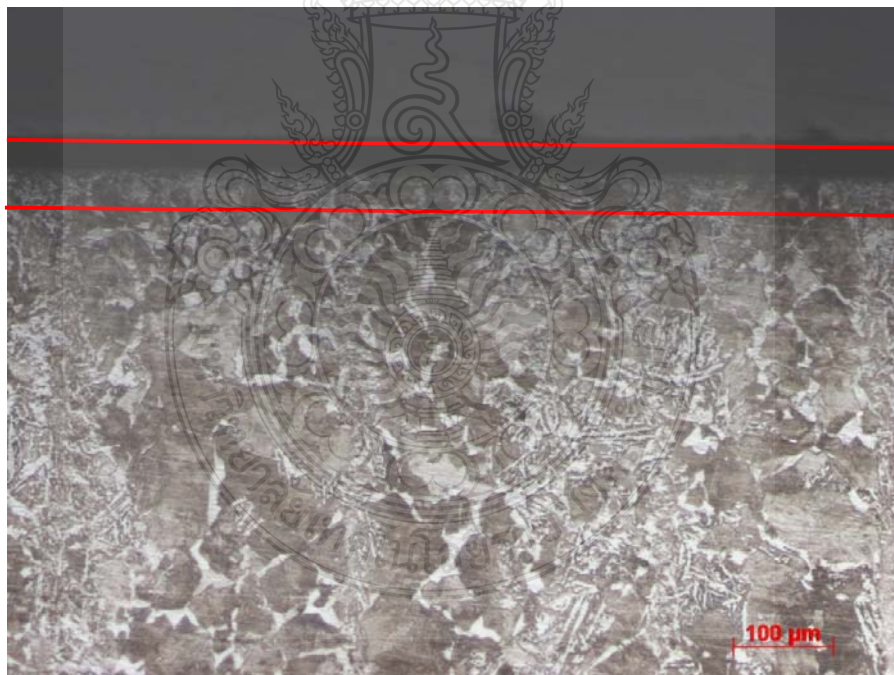
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SCM-440 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยจะพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก หลังการกรดรีดผิวแข็ง จากรูปที่ 4.17 พบว่า เหล็ก SCM-440 ที่ผ่านกระบวนการกรดรีดผิวแข็งมีโครงสร้างจุลภาคเกิดการอัดตัว ซึ่งเกิดการดิสโลเคชันแบบขอบ (Edge Dislocation) เกิดการบิดเบี้ยวในผลึก จากรูปจะเป็นเกรนที่มีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น และลักษณะของเกรนที่เล็กลง แต่ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างได้สำหรับสภาวะการกรดรีดผิวแข็งที่ต่างกัน [30]



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



(b) $P_b = 400$ bar $D_b = 0.5$ mm

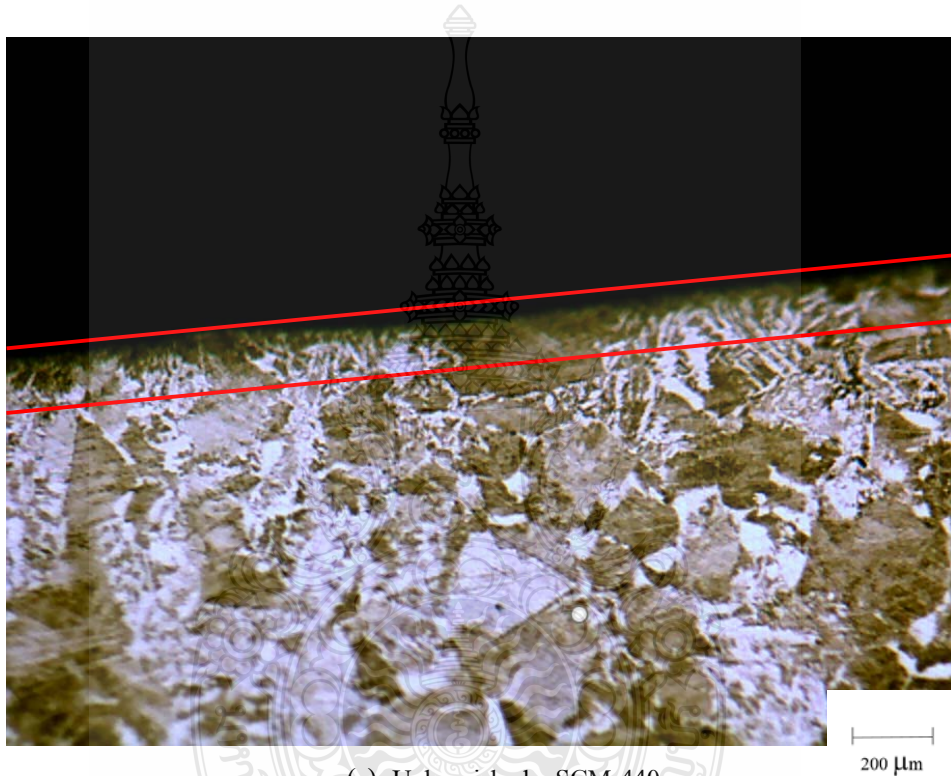


(c) $P_b = 200$ bar $D_b = 0.5$ mm

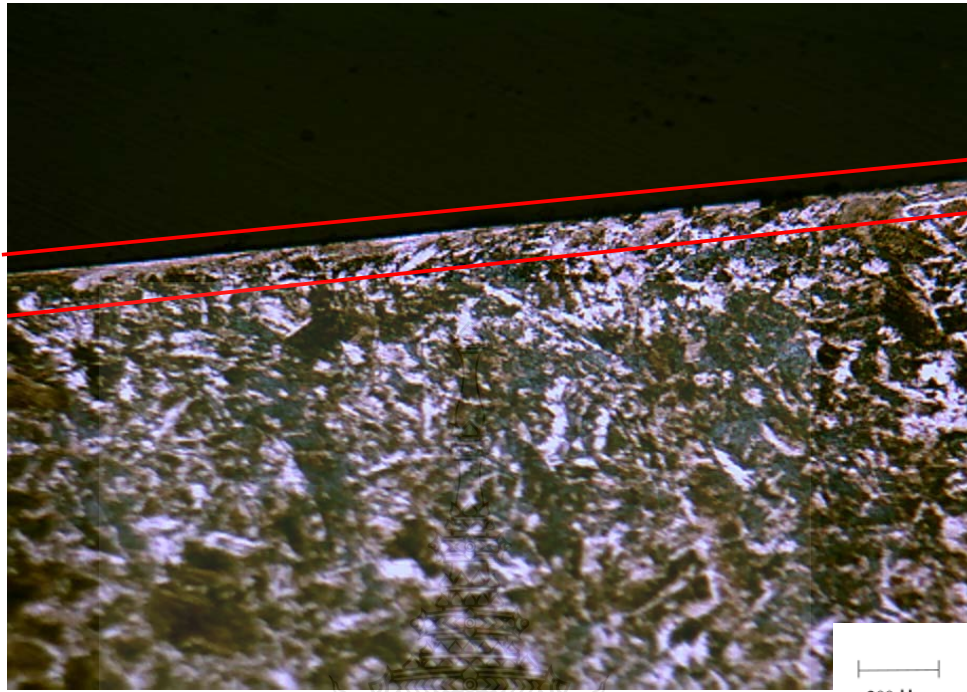
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านกระบวนการครีตผิวแข็ง

4.4.1 ผลของการทดลองโครงสร้างจุลภาคของผลึกของเหล็ก SCM-440

จากการศึกษาพฤติกรรมการครีดยึดผิวแข็ง และการอบชุบเหล็ก SCM-440 โดยการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เหล็กที่ผ่านกระบวนการครีดยึดผิวแข็งจะเกิดการอัดตัวของเกรนในบริเวณที่ทำการครีดยึดผิวแข็ง เมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนการครีดยึดผิวแข็ง และ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนภายใน แสดงดังรูปที่ 4.18



(a) Unburnished – SCM-440



(b) $P_b = 600$ bar, $D_b = 0.5$ mm



(c) Hardening

รูปที่ 4.18 โครงสร้างผลึกของ เหล็ก SCM-440 (a) Base (b)กดรีดผิวแข็งที่ $P_b = 600$ bar, $D_b = 0.4$ mm (c) ผ่านการชุบแข็ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการกรดรีดผิวแข็ง หาค่าของความแข็งผิว (Surface Hardness) ความหยาบผิว (Surface Roughness) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และ โครงสร้างจุลภาคของผลึก (Microstructure) กระบวนการกรดรีดผิวแข็ง (Ball-burnishing) เป็นการปรับปรุงพื้นผิวแข็งด้วยบอลที่รวดเร็วและคุ้มค่า ในกระบวนการองค์ประกอบการเสียรูปพลาสติก คือ ลูกบอลเซรามิกแข็งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เซรามิกซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ในการกรดรีดผิวใช้ดันกำลังปั๊มแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก (Burnishing Pressure) 200 400 และ 600 บาร์ ค่าความลึกของการกรดรีดผิวแข็ง (Depth of Burnishing) 0.4 0.5 และ 0.6 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SCM-440 สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1. การวิเคราะห์ค่าความแข็งผิวบนพื้นผิวของเหล็ก SCM-440 ค่าความแข็งผิวของเหล็ก มีค่าเฉลี่ยประมาณ 329.8 ± 16.36 HV และหลังการกรดรีดผิวแข็งด้วยบอลเซรามิก ที่แรงดันปัมน้ำมันไฮดรอลิกความแข็งผิวที่ 600 บาร์ ความลึกของการกรดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มความแข็งผิวสูงสุดที่ 582 ± 9.2 HV ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความแข็งผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือค่าความลึกของการกรดรีดผิวแข็ง ($P\text{-Value} = 0.000 < \alpha = 0.05$) ค่าความแข็งผิวบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับ เหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการอบชุบแข็ง ค่าความแข็งผิวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.2. การวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้างที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานในระหว่างการกรดรีดผิวแข็ง เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) การวัดค่าความเครียดบนพื้นผิวที่ผ่านการกรดรีดผิวแข็งเป็นการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างที่เกิดจากแรงอัดในแนวนอนบนพื้นผิว ค่าความเค้นตกค้างของแรงอัดเพิ่มขึ้นถึง 369.4 MPa เกิดจากการอัดตัวของผลึก สภาวะที่เหมาะสมของการรีดผิวแข็งที่สุด คือ แรงดันปัมน้ำมันไฮดรอลิก 600 บาร์ และ ความลึกของการกรดรีดผิวแข็ง 0.5 มิลลิเมตรซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเค้นตกค้างอัดของเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการอบชุบแข็ง

5.1.3 การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวการโดยใช้เทคนิค Coherence Scanning Interferometry (CSI) การกรัดผิวแข็งด้วยบอลที่มีค่าความสูงของรูปร่างค่าความหยาบผิวที่สุดค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูด $S_a = 1.40\mu\text{m}$, $S_p = 5.51\mu\text{m}$ และ $S_z = 11.98\mu\text{m}$ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ โดยทั่วไปหลังจากผ่านกระบวนการกรัดผิวแข็งจะทำให้ความสูงของพื้นผิวลดลงช่วงของค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดที่ดีที่สุด $S_a = 0.46\mu\text{m}$, $S_p = 0.61\mu\text{m}$ $S_z = 8.45\mu\text{m}$ ที่แรงดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิกในการกดบอลกรัดผิวแข็ง 200 บาร์ ค่าความลึกของการกรัดผิวแข็งอยู่ที่ 0.4 มิลลิเมตร ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวคือ ความดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิก (P-Value =0.000 < $\alpha=0.05$) ความลึกของการกรัดผิวแข็ง (P-Value =0.000 < $\alpha=0.05$) อิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของชิ้นงานคือ ความดันปั้มน้ำมันไฮดรอลิกและความลึกของการกรัดผิวแข็งมีผลกระทบร่วมกัน(P-Value =0.001 < $\alpha=0.05$) เมื่อเทียบกับเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการอบชุบแข็งจะให้ค่า $S_a = 2.48\mu\text{m}$, $S_p = 9.02\mu\text{m}$ และ $S_z = 20.50\mu\text{m}$ ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกรัดผิวแข็งจะให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำ

5.1.4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการกรัดผิวแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาพของเหล็กพบว่าบริเวณที่ผ่านการกรัดผิวแข็งจะเกิดการอัดตัวของเกรน มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีการกรัดผิวแข็งเมื่อเทียบกับเหล็ก SCM-440 ที่ผ่านการอบชุบแข็งจะเกิดการเปลี่ยนเฟส

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ เพื่อในการวิเคราะห์ผลครอบคลุมมากยิ่งขึ้น เช่น ความเร็วการกรัดผิวแข็ง (Burnishing Speed) อัตราการป้อน (Feed Rate) จำนวนของการกรัดผิวแข็งผ่าน (Number of Passes) และสารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] SCM440 คุณสมบัติและการใช้งาน, บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด (**online**), 2561, Available: www.bssteel.co.th/product-detail-SCM440.php (31 กรกฎาคม 2561).
- [2] SCM440 H เหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้างานอะไหล่, Jutha Wan Metal. (**online**), 2561, Available: www.juthawan.co.th/product-item/scm-440-h/ (18 มิถุนายน 2561)
- [3] Khalid. S. Rababa and Mayas Mohammad Al-mahasne, “Effect of Roller Burnishing on the Mechanical Behavior and Surface Quality of O1 Alloy Steel,” **Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, vol. 3(3), 2011, pp. 227-233, Available: Maxwell Scientific Organization (3 April 2018).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] 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)

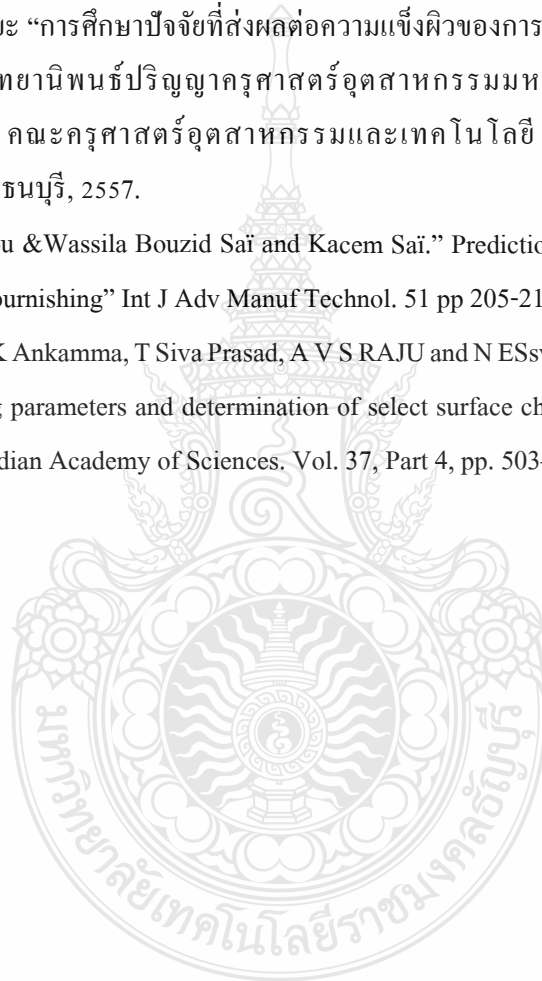
- [9] L.N. Lo'pez de Lacalle, A. Lamikiz, J. Mun'oa and J.A. Sa'nchez, "Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing," **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, 2005, pp.1659–1668, Available: Elsevier Ltd (12 February 2018).
- [10] Liviu Luca, SorinNeagu-Ventzel and IoanMarinescu, "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).
- [11] 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).
- [12] A. Rodríguez, 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).
- [13] 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).
- [14] 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.
- [15] การวัดความแข็ง, การอบชุบทางความร้อนของ โลหะ (**online**), 2561, Available: http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html 1) มีฤณายน (2561)
- [16] Surface Texture & Machining Symbols, @R.Jerz (**online**), 2518, Available: user.engineering.uiowa. ed/~mie032/lectures/17-surface_roughness_and_machining_symbols_full. pdf. (31 January 2018).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] How do eclogites deform in subduction and collision zones? An Alpine study (**online**), 2562, Available: https://www.researchgate.net/publication/270761961_How_do_eclogites_deform_in_subduction_and_collision_zones_An_Alpine_study pdf. (11 มีนาคม 2562).
- [18] Surface Roughness, JIS B (**online**), 2018, Available: us.misumi-ec.com/pdf/press/us_12e_pr1257.pdf (11 January 2018).
- [19] 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.
- [20] X-ray diffraction, Veqter (**online**), 2018, Available: veqter.co.uk/residual-stress-measurement/x-ray-diffraction (16 March 2018).
- [21] ธนุสิทธิ์ นุรินทร์ประโคน “การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เชิงปฏิบัติ” เอกสารประกอบการสอนภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (21 มีนาคม 2561)
- [22] Quanshun Luo and Shicai Yang,” Uncertainty of the X-ray Diffraction (XRD) $\sin^2 \Psi$ Technique in Measuring Residual Stresses of Physical Vapor Deposition (PVD) Hard Coatings”, **Coatings**, vol.7(8), pp.128-146. Available: Sheffield Hallam University (13 May 2018).
- [23] แกนของเครื่องจักร, iitgroup (**online**), 2018, Available: [iitgroup.in.th/ราคาเครื่องจักร โรงงาน-แกนของเครื่องจักร.261](http://iitgroup.in.th/ราคาเครื่องจักรโรงงาน-แกนของเครื่องจักร.261) (30 March 2018).
- [24] การคำนวณหาความเร็วรอบ Speed และอัตราป้อน Feed, Design Engineer Life, (**online**), 2018, Available: designengineerlife.com/2015/07/speed-and-feed-defining (30 March 2018).
- [25] 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.
- [26] Tadahisa Akasawa, Ikuo Fukuda, Kenji Nakamura and Takio Tanaka. “Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel” *Journal of Materials Processing Technology* vol.153–154, pp. 48–53, 2004.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] I. O. Aver'yanovaa, D. Yu. Bogomolovb, and V. V. Poroshin. "ISO 25178 Standard for Three-Dimensional Parametric Assessment of Surface Texture" *Russian Engineering Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 513–516, 2017.
- [28] พีรพงษ์ การสุริยะ "การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งผิวของการกลึงเหล็กกล้าชุบแข็ง เกรด SCM 440" วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2557.
- [29] Afef Bougharriou &Wassila Bouzid Saï and Kacem Saï." Prediction of surface characteristics obtained by burnishing" *Int J Adv Manuf Technol*. 51 pp 205-215, 2010.
- [30] Ravindra Babu, K Ankamma, T Siva Prasad, A V S RAJU and N ESswara Prasad. "Optimization of burnishing parameters and determination of select surface characteristics in engineering materials" *Indian Academy of Sciences*. Vol. 37, Part 4, pp. 503–520, 2012.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองค่าความแข็งผิว



ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 ก่อนการกัดรีดผิวแข็ง

ตัวอย่างที่	แรงค้ำน้ำมันไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการกัดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)		
			Test 1	Test 2	Test 3
1	200	0.4	319	342	305
	200	0.5	321	303	318
	200	0.6	336	313	370
2	400	0.4	364	368	326
	400	0.5	311	306	354
	400	0.6	310	313	324
3	600	0.4	386	343	345
	600	0.5	299	299	329
	600	0.6	303	336	357



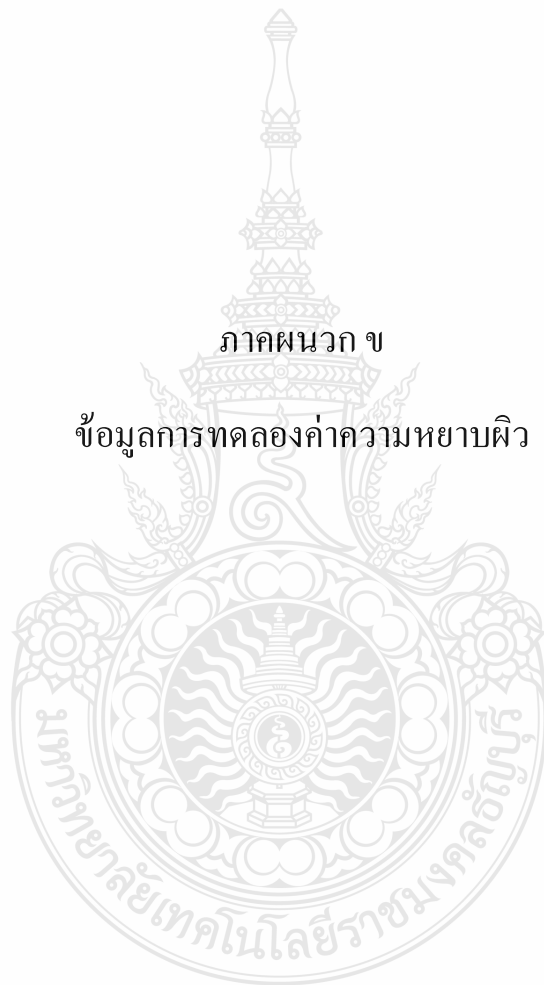
ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 หลังการรีดผิวแข็ง

ตัวอย่างที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)								
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9
1	200	0.4	459.8	456.2	347.4	494.6	484.9	448.8	404.6	376.1	454.5
	200	0.5	691.1	517.7	758.6	588.2	724.3	626.8	619.5	693.3	492.6
	200	0.6	366.7	411.5	285.0	304.6	443.4	550.7	550.7	324.6	366.7
2	200	0.4	429.0	471.8	507.3	337.2	439.8	459.8	488.0	510.0	532.8
	200	0.5	365.0	465.7	538.0	623.8	651.7	500.5	545.5	454.5	575.6
	200	0.6	611.0	510.7	447.6	453.3	521.8	430.6	428.6	451.6	536.5
3	200	0.4	457.4	409.5	462.3	414.5	463.9	458.7	475.3	505.3	523.2
	200	0.5	741.0	599.4	587.3	563.0	484.9	524.0	465.7	419.1	490.7
	200	0.6	394.6	368.0	327.0	350.5	352.5	368.8	389.7	426.4	457.4
1	400	0.4	530.6	359.8	412.0	489.4	381.4	310.7	348.2	317.4	381.6
	400	0.5	553.2	452.8	493.9	569.9	458.6	497.9	507.3	439.3	456.8
	400	0.6	392.3	426.4	437.1	488.1	510.9	485.1	410.6	454.5	414.0
2	400	0.4	379.6	380.4	379.2	323.4	440.9	355.2	381.4	378.3	380.1
	400	0.5	603.8	579.7	594.2	663.7	532.8	691.1	686.8	737.8	505.3
	400	0.6	314.7	322.8	417.6	391.8	375.2	412.0	403.7	440.9	401.3
3	400	0.4	375.2	342.0	384.5	374.8	608.3	447.1	369.7	403.7	304.3
	400	0.5	479.2	495.9	581.4	421.7	447.1	609.2	503.9	458.6	500.5
	400	0.6	388.1	398.9	454.5	406.1	393.7	502.6	406.1	396.5	354.0

ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบค่าความแข็งผิวของเหล็ก SCM-440 หลังการรีดผิวแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่างที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็ง (HV)								
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9
1	600	0.4	310.1	464.5	330.6	335.7	505.3	304.3	471.1	483.6	300.2
	600	0.5	573.1	543.2	500.5	578.1	668.9	637.9	619.5	598.5	620.1
	600	0.6	465.7	420.1	442.0	458.6	752.3	630.4	724.3	391.4	463.9
2	600	0.4	419.1	414.0	538.0	475.7	314.0	429.0	522.7	313.0	381.4
	600	0.5	611.0	522.7	490.7	602.0	797.3	602.0	585.2	430.6	575.6
	600	0.6	316.4	452.8	380.5	415.5	782.9	825.1	646.7	430.1	416.6
3	600	0.4	497.9	317.7	313.7	314.0	427.7	435.5	414.0	372.6	389.6
	600	0.5	603.8	457.4	572.3	600.3	544.7	550.9	617.3	623.8	581.4
	600	0.6	390.3	397.9	402.2	507.3	362.5	517.0	450.5	408.1	477.3





ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองค่าความหยาบผิว

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 ก่อนการกดรีดผิวแข็ง

ตัวอย่าง ที่	แรงดันน้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึกของการ กดรีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
			Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	200	0.4	3.92	20.10	1.96	-20.63	40.73	-0.481	3.412
	200	0.5	6.02	17.82	7.32	-21.30	39.12	0.084	2.378
	200	0.6	4.46	12.50	5.56	-23.47	35.67	-0.545	2.998
2	400	0.4	0.55	2.66	0.69	-3.53	6.19	-0.343	2.679
	400	0.5	0.53	2.95	0.66	-2.48	5.43	0.026	3.205
	400	0.6	1.21	3.72	1.44	-5.21	8.93	-0.303	3.492
3	600	0.4	0.63	3.38	0.78	-2.84	6.22	-1.403	5.282
	600	0.5	7.21	26.30	8.71	-26.17	52.48	-0.018	2.326
	600	0.6	3.66	10.50	4.73	-23.97	34.47	-0.992	4.467



ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรวดผิวแข็ง

ตัวอย่าง ที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Test	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
				Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	200	0.4	1	0.84	12.63	1.32	-5.48	18.10	0.811	3.674
	200	0.4	2	0.40	3.67	0.52	-4.10	7.77	0.151	4.79
	200	0.4	3	0.59	5.51	0.75	-3.90	9.42	-0.66	3.69
	200	0.4	4	0.41	3.05	0.53	-3.42	6.47	-0.417	4.033
2	200	0.4	1	0.35	3.37	0.45	-2.93	6.30	0.062	4.054
	200	0.4	2	0.35	3.23	0.44	-2.77	5.99	-0.137	3.004
	200	0.4	3	0.36	3.04	0.45	-3.88	6.91	0.16	3.189
	200	0.4	4	0.43	3.99	0.59	-4.07	8.07	-0.821	6.091
3	200	0.4	1	0.44	3.03	0.55	-4.85	7.88	0.161	3.233
	200	0.4	2	0.44	3.58	0.56	-5.54	9.12	-0.409	3.956
	200	0.4	3	0.47	5.16	0.60	-3.42	8.58	-0.23	3.572
	200	0.4	4	0.48	3.43	0.61	-3.32	6.75	-0.413	3.613
4	200	0.5	1	0.89	3.84	1.11	-5.08	8.92	-0.029	2.851
	200	0.5	2	0.48	4.11	0.88	-21.72	25.83	-0.859	6.022
	200	0.5	3	0.38	4.63	0.49	-8.63	13.26	-0.445	5.737
	200	0.5	4	0.80	3.41	0.95	-3.34	6.75	0.204	2.254
5	200	0.5	1	0.57	4.90	0.79	-6.60	11.49	-0.629	8.426
	200	0.5	2	0.54	6.83	0.74	-6.65	13.51	0.173	8.793
	200	0.5	3	0.36	4.39	0.46	-3.57	7.95	-0.039	4.694
	200	0.5	4	0.68	3.82	0.84	-5.81	9.63	0.062	5.018
6	200	0.5	1	0.79	5.01	0.97	-4.78	9.80	0.811	3.674
	200	0.5	2	0.44	2.62	0.58	-4.81	7.43	-0.21	3.94
	200	0.5	3	0.63	2.47	0.75	-3.88	6.35	-0.277	2.411
	200	0.5	4	0.54	3.78	0.66	-5.79	6.56	-0.262	3.362

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรวดผิวแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Test	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
				Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	200	0.6	1	0.66	4.02	0.84	-5.57	9.59	0.302	3.245
	200	0.6	2	0.66	3.49	0.85	-3.07	6.57	0.449	3.447
	200	0.6	3	0.76	2.35	0.89	-1.44	3.79	0.655	2.195
	200	0.6	4	0.55	2.66	0.69	-3.53	6.19	-0.559	3.357
2	200	0.6	1	0.53	2.95	0.66	-2.48	5.43	-0.114	2.778
	200	0.6	2	1.21	3.72	1.44	-5.21	8.93	-0.63	2.436
	200	0.6	3	0.63	3.38	0.78	-2.84	6.22	-0.101	2.535
	200	0.6	4	0.67	3.76	0.85	-4.83	8.59	0.086	3.348
3	200	0.6	1	0.55	2.88	0.71	-2.79	5.66	0.111	3.114
	200	0.6	2	0.33	2.27	0.42	-1.89	4.16	0.454	3.385
	200	0.6	3	0.63	3.31	0.79	-3.00	6.30	0.258	2.766
	200	0.6	4	0.68	2.75	0.83	-3.65	6.39	-0.585	2.698
4	400	0.4	1	1.19	2.93	1.33	-4.39	7.32	-0.119	1.674
	400	0.4	2	0.63	5.19	0.85	-5.58	10.77	0.96	5.842
	400	0.4	3	0.64	5.06	0.84	-4.48	9.54	0.973	5.276
	400	0.4	4	0.80	5.09	1.04	-6.00	11.09	0.719	4.124
5	400	0.4	1	0.80	6.31	1.08	-6.21	12.53	1.033	5.625
	400	0.4	2	2.05	7.01	2.42	-5.25	12.26	0.046	2.074
	400	0.4	3	1.38	5.17	1.69	-6.89	12.06	0.247	2.606
	400	0.4	4	1.36	7.85	1.68	-8.20	16.01	0.122	3.077
6	400	0.4	1	1.41	6.99	1.73	-7.51	14.61	0.365	2.797
	400	0.4	2	1.37	4.88	1.66	-6.84	11.71	0.12	2.573
	400	0.4	3	1.18	6.25	1.57	-5.92	12.17	1.17	3.957
	400	0.4	4	1.31	9.57	1.75	-7.87	17.43	1.327	6.12

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรวดผิวแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Test	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
				Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	400	0.5	1	0.27	3.40	0.35	-0.76	4.16	1.223	5.196
	400	0.5	2	0.38	4.44	0.50	-1.91	6.35	1.223	5.987
	400	0.5	3	0.51	3.21	0.64	-2.50	5.71	0.289	3.14
	400	0.5	4	0.49	3.89	0.64	-4.15	8.04	-0.312	4.126
2	400	0.5	1	0.61	50.52	0.78	-5.83	10.90	-0.135	3.642
	400	0.5	2	1.23	4.56	4.56	-8.16	12.72	-0.469	2.829
	400	0.5	3	1.08	5.40	1.37	-4.55	9.95	1.087	3.686
	400	0.5	4	0.50	4.78	0.64	-5.12	9.90	0.072	3.747
3	400	0.5	1	0.57	6.83	0.72	-6.31	13.14	0.161	3.899
	400	0.5	2	0.87	4.71	1.12	-3.41	8.12	0.896	3.891
	400	0.5	3	1.70	5.54	2.08	-7.51	13.05	-0.49	2.762
	400	0.5	4	0.58	4.64	0.76	-7.50	12.14	-0.148	3.994
4	400	0.6	1	0.61	4.25	0.78	-3.78	8.03	0.614	3.859
	400	0.6	2	0.79	5.07	1.01	-5.20	10.27	-0.72	4.405
	400	0.6	3	0.45	3.58	0.58	-2.31	5.89	0.555	3.856
	400	0.6	4	0.51	4.69	0.70	-4.97	9.65	-0.987	6.801
5	400	0.6	1	0.67	5.86	0.85	-4.12	9.98	-0.205	3.563
	400	0.6	2	0.85	6.06	1.09	-5.51	11.57	-0.991	3.853
	400	0.6	3	0.60	4.68	0.74	-4.67	9.35	-0.19	3.047
	400	0.6	4	0.91	3.94	1.15	-5.68	9.63	-0.604	3.678
6	400	0.6	1	0.70	4.53	0.86	-3.24	7.76	-0.005	2.651
	400	0.6	2	0.69	3.11	0.92	-5.36	8.47	-0.835	4.95
	400	0.6	3	0.78	4.52	0.96	-4.46	8.98	-0.573	3.266
	400	0.6	4	0.51	6.56	0.64	-5.58	12.14	0.574	4.311

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกรวดผิวแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Test	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
				Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	600	0.4	1	0.85	4.78	1.00	-4.75	9.53	0.249	2.526
	600	0.4	2	2.83	17.45	3.77	-14.42	31.87	0.506	4.174
	600	0.4	3	1.84	13.73	2.65	-13.21	26.94	1.102	6.845
	600	0.4	4	2.21	9.89	2.61	-9.97	19.86	0.595	2.289
2	600	0.4	1	1.09	5.17	1.42	-8.85	14.02	0.392	3.524
	600	0.4	2	1.66	7.15	2.03	-7.49	14.63	0.24	2.452
	600	0.4	3	1.39	13.95	1.80	-6.52	20.57	1.168	5.969
	600	0.4	4	1.18	14.36	1.73	-9.60	23.96	1.39	11.17
3	600	0.4	1	1.84	14.37	2.37	-10.21	24.57	0.726	3.622
	600	0.4	2	1.38	13.30	1.76	-6.85	20.15	0.475	4.536
	600	0.4	3	1.82	16.39	2.03	-5.41	21.80	-0.085	2.452
	600	0.4	4	1.78	11.22	2.40	-9.84	21.07	0.92	5.46
4	600	0.5	1	0.84	3.69	0.71	-4.42	8.11	-0.30	4.24
	600	0.5	2	1.27	7.59	1.58	-4.87	12.46	0.36	2.95
	600	0.5	3	0.66	3.86	0.84	-4.70	8.56	-0.32	3.72
	600	0.5	4	0.57	3.33	0.72	-5.31	8.64	-0.28	3.40
5	600	0.5	1	0.64	4.40	0.82	-4.10	8.50	-0.43	3.71
	600	0.5	2	0.81	5.34	1.04	-4.98	10.32	-0.95	3.77
	600	0.5	3	1.11	3.23	1.32	-6.77	10.00	-0.63	2.47
	600	0.5	4	1.21	4.80	1.48	-7.30	12.11	-0.66	3.57
6	600	0.5	1	0.74	3.80	0.91	-4.63	8.43	-0.79	3.31
	600	0.5	2	0.70	4.50	0.88	-4.36	8.85	-0.38	3.15
	600	0.5	3	0.57	4.36	0.74	-4.12	8.48	0.82	4.17
	600	0.5	4	0.79	7.93	1.01	-6.33	14.26	0.72	4.14

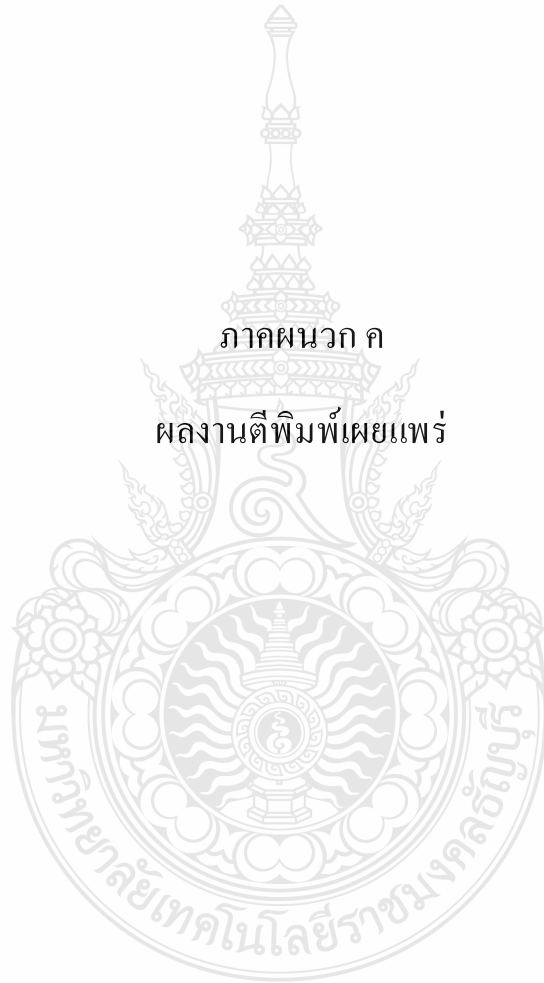
ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ SCM 440 หลังการกดรีดผิวแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	แรงดัน น้ำมัน ไฮดรอลิก (บาร์)	ความลึก ของการกด รีดผิวแข็ง (มิลลิเมตร)	Test	พารามิเตอร์ความหยาบผิว						
				Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	600	0.6	1	1.02	3.79	1.21	-4.40	8.19	-0.25	2.17
	600	0.6	2	0.59	3.59	0.73	-3.22	6.81	0.47	3.08
	600	0.6	3	1.23	4.46	1.45	-6.29	10.74	-0.40	2.49
	600	0.6	4	0.65	4.39	0.80	-3.63	8.02	0.06	2.79
2	600	0.6	1	0.75	5.73	0.94	-4.03	9.76	-0.68	3.32
	600	0.6	2	0.54	5.11	0.72	-3.85	8.96	-3.85	4.20
	600	0.6	3	0.97	5.71	1.22	-3.98	9.69	0.28	2.93
	600	0.6	4	0.68	4.00	0.90	-4.64	8.65	-0.60	4.33
3	600	0.6	1	0.85	6.00	1.04	-4.67	10.67	-0.43	2.83
	600	0.6	2	0.88	4.00	1.05	-3.65	7.65	0.14	2.30
	600	0.6	3	0.94	5.79	1.23	-7.13	12.93	-0.41	4.62
	600	0.6	4	0.79	3.99	0.97	-2.85	6.83	0.55	2.81



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





STISWB 2018
Abstract Book of
the 10th International Conference on Science,
Technology and Innovation for Sustainable Well-Being 2018



"Moving Towards Smart and Sustainable Technologies"

11th – 13th July, 2018

Don Chan Palace Hotel & Convention

Vientiane, Lao PDR.

Organized by:

The Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon



Surface Improvement of SCM 440 by the Ball-burnishing Technique

Montri Kawsuk*

Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi
Patumtani, Thailand
e-mail montri.k@mail.rmUTT.ac.th

Sirichai Torsakul

Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi
Patumtani, Thailand
e-mail sirichai.to@en.rmUTT.ac.th

Abstract—The objective of this research was to develop a new ball-burnishing tool integrated with a CNC milling, to improve the surface roughness, hardness, and residual stress of the material used in the present study, the Low-alloy steel SCM 440. The surface burnishing parameters for the ball-burnishing tool were determined after conducting the experimental methods. Based on the experimental results, the adequate combination of the process parameters was as follows, the burnishing pressure constantly from 200 to 600 bars, when machining using a low depth of cut 0.5 and 0.6 mm/rev, the velocity of 2 m/min, fluid as lubricant hydraulic oil (HLP 68). The quality of the surface roughness was studied. The final quality was similar to grinding, even reaching 0.349 μm Ra on average by using the adequate burnishing parameters. Corresponding to a before surface and to the same surface after being burnished with two different burnishing depth, roughness parameters improved about 75% when burnishing was applied. The burnishing surface hardness was increased to HV 586 on average.

Keywords: ball-burnishing; surface roughness; surface hardness; SCM440

I. INTRODUCTION

Mechanical surface treatments have been widely used to improve the physical-mechanical properties of metallic components [1–3]. As a consequence of plastic deformations, compressive residual stress states, work hardening, microstructural alterations and a favorable roughness are produced; improving the fatigue strength and wear resistance [4,5]. Ball burnishing and Roller (also known as surface plastic deformation processes) are methods for improving metal surface finishing, surface hardness and dimensional accuracy [6–9]. Ball-burnishing is a rapid, simple and cost-effective mechanical surface treatment. In the process, the deformation element is the hard ball. As ball acts as a tool in deformation the surface layer, for the given normal force it gives high specific pressure, more fatigue strength, micro hardness & depth of work hardening layer as compared to ball burnishing. The materials used for the ball are alumina carbide-ceramic, cemented carbide, silicon nitride ceramic, silicon carbide ceramic and bearing steel. Burnishing tools are also now widely applied in nonautomotive applications for a variety of benefits; to produce better and longer lasting seal surfaces; to improve

wear life; to reduce friction and noise levels in running parts; and to enhance cosmetic appearance. Examples include valves, pistons of hydraulic or pneumatic cylinders, lawn and garden equipment components, shafts for pumps, shafts running in bushings, bearing bores, components of plastic molds, cold mold, hot work and general auto parts [10].

Parameters that have an influence on the ball burnishing process are; the normal burnishing force (measured at the hydraulic installation by the fluid pressure), the burnishing feed, prior hard turning feed, burnishing speed, prior hard turning insert nose radius and lubrication. Original roughness is also expected to exert an important effect. Other interesting data are; surface hardness, microhardness underneath the burnished surface and microstructure photographs.

II. THE BASIS OF HYDROSTATIC BALL-BURNISHING

The principle of the ball-burnishing tool is shown in Fig. 1. It is based on the hydrostatic principle [11]. The pressure is supplied by a hydraulic pump, which feeds on its own coolant tank and is capable of pumping at a pressure of 600 bar. The hydraulic pump is placed next to the machine where is mounted the burnishing equipment. The key element is a ceramic ball pressed against the surface of the workpiece so that crushes the surface roughness peaks. This material exhibits silicon nitride (Si_3N_4) ceramic with a diameter of 6mm. The ceramic ball is entirely supported by the fluid, freely rotating on the workpiece surface.

In the hydrostatic technology, the normal force depends only on the pump pressure.

This setup has several advantages, as follows [12]:

- the normal force is constant, proportional to the fluid pressure; the process is then consistent and easy to reproduce;
- the ball can rotate freely in any direction; this prevents any sliding contact with the workpiece;
- the tool can be installed on a regular or CNC milling, as shown in Fig. 2; burnishing can be thus carried out with the workpiece in the same clamped position as the previous operation;
- the tool has a long life and it is easy to maintain.



The burnishing technique can be used on cylindrical surfaces, flat surfaces, profiled surfaces, conical surfaces, zones of sharp section changes, etc.

III. EXPERIMENTAL DESIGN

The material used in the present study was the Low-alloy steel SCM 440, the chemical composition of which was given in Table 1. The material was heat-treated steel, with hardness 42-57 HRC.[13] The alloy steel contained moderate amounts of carbon (0.40%). It also contained chrome / molybdenum. SCM440 was used in thermal-refining or induction-hardening treatment for the automotive industry.

Table 1. Chemical composition of SCM 440 steel (mass%).

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0.41	0.30	0.07	1.10	0.20	1.5

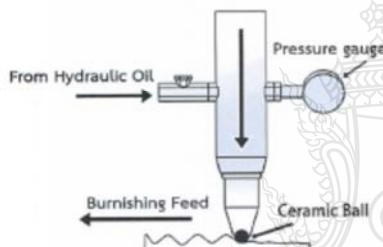


Fig. 1. Principle schema of ball burnishing

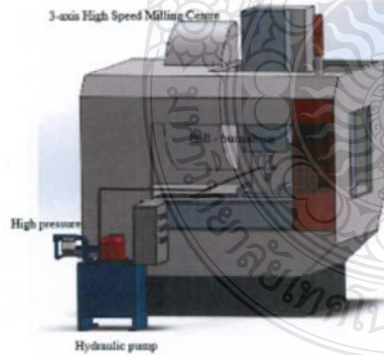


Fig. 2. Ball burnishing placed on the milling machine

To prepare the specimens, a face milling process had to be carried out. In this work, a CNC milling insert was used. All the burnishing tests Hydraulic oil HLP 68 were high-performance hydraulic oil with optimal anti-wear properties (AW-Additives) and high load capacity of the lubrication film. The process

variables for ball-burnishing were the burnishing pressure (P_b) and the burnishing depth (a_e).

The studies determined the burnishing parameters influencing on surface roughness and residual stress. Each specimen was initially size turned on a length of 60 mm width 40 mm and a thickness of 10 mm and then divided into several regions, each of them with different burnishing parameters. Some region was left without burnishing for initial surface roughness measurement.

- Surface roughness was measured using the 3D Optical Profiler from BRUKER.
- Surface hardness was measured using a Vickers hardness test method. The Vickers hardness test method also referred to as a micro hardness test method mostly used for small parts, thin sections, or case depth work.
- The plastic deformation produced on the part surface during ball burnishing causes a significant alteration of the residual stress state. X-ray diffraction (XRD) techniques were used for the residual stress measurement. XRD allows to measure the stress field on the surface or close to the surface.

The studies examined the surface improvement which was obtained from burnishing parameters. Three test parts were analyzed; surface hardness, surface roughness and residual stresses were measured. In Table 2, the parameters used for each test part were shown.

Table 2. Experimental of the burnishing tests

Input parameter	Test 1	Test 2	Test 3
Burnishing pressure (bar)	200	400	600
Burnishing depth (mm)	0.5, 0.6	0.5, 0.6	0.5, 0.6

IV. ANALYSIS OF THE SURFACE QUALITY

The goal of the research is to give the manufacturer a set of options in term of burnishing parameters and original hardness in order to obtain a target hardness of 412 HV (42 HRC) after burnishing.

A. Surface hardness

The direct effect of burnishing parameters on surface hardness, the initial surface hardness of the test specimen is about HV 312.5 on average. After finishing the experiments with SCM440, Fig. 3 illustrates the surface hardness on the nine areas have been measured and averaged by the Vickers microhardness test instrument, Model MXT-70. The burnishing pressure variation in hardness reveals that the surface hardness increases with the increased burnishing pressure constantly from 200 to 600 bars. Further increase of burnishing depth results in the decrease of surface hardness. The surface hardness is increased to HV 58.6 on average, possibly, due to the squeezing of the grain boundary.

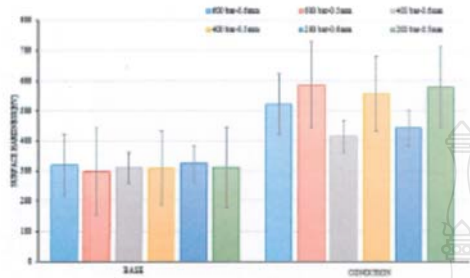


Fig. 3. Measured surface hardness on the burnished surface

B. Surface roughness

Measuring roughness surface topography using coherence scanning interferometry (CSI), CSI is a non-contacting measurement technique. It uses a broadband light source and combines vertical (z-axis) scanning techniques with optical interferometry techniques, to achieve a three-dimensional (3D) surface measurement. The core *S* parameters expanded from the roughness (2D) parameter are identified in Table 3. As previously explained for the profile parameters, the range of the real parameters available to the user will be dependent on the CSI instrument manufacturer. *S* parameters have also been developed as analogies to the range of material ratio parameters defined in ISO 4287

Table 3. 3D parameter expanded from the roughness (2D) parameter

3D Parameter	2D Roughness	Description	Typical Units
S_a	Ra	Arithmetical mean height	μm
S_q	Rq	Root mean square length of the scale limited surface	μm
S_p	Rp	Maximum peak height	μm
S_v	Rv	Maximum pit depth	μm
S_z	Rz	Maximum height of the scale limited surface	μm
S_{sk}	Rsk	Skewness of the scale limited surface	
S_{ku}	Rku	Kurtosis of the scale limited surface	

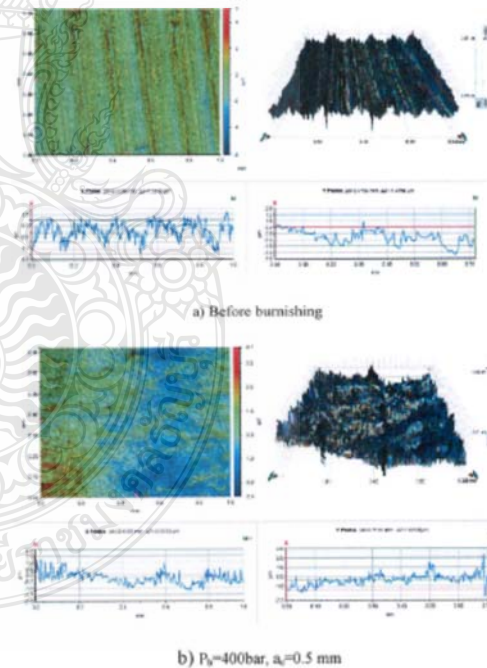
A set of tests was carried out in order to check the relation between roughness and the burnishing pressure (P_b) and burnishing depth (a_c). Table 4, the values of roughness for several external pressures are gathered, for different depths of burnishing of the CNC milling. Burnishing was always performed at feed 2m/min.

At the view of results, the first conclusion is that the higher the pressure, the lower the mean roughness, but there is little difference between case 400 and 600 bars. As a conclusion, at 400 bar the final roughness results are better, can be obtained when machining using a high depth of cut (0.6 mm) than when using a low depth of cut (0.5 mm).

Table 4. Main pump pressure, roughness parameter, burnishing depth

Burnishing parameter	Burnishing depth (mm)	Roughness parameter						
		Ra (Qm)	Rq (Qm)	Rp (Qm)	Rv (Qm)	Rz (Qm)	Rsk (Qm)	
Before		1.355	1.674	5.515	-4.464	11.977	0.120	2.702
200 bar	0.6	0.588	0.735	3.916	-2.711	8.027	0.498	2.782
	0.5	0.438	0.640	4.000	-3.489	13.489	2.532	51.497
400 bar	0.6	0.352	0.747	4.308	-4.044	8.442	0.135	4.733
	0.5	0.349	0.454	3.707	-3.493	5.250	1.100	5.370
600 bar	0.6	0.874	1.049	4.057	-4.384	8.441	0.051	2.430
	0.5	0.653	0.762	4.617	-4.927	9.444	0.154	5.576

The quality of the surface roughness was studied. The surface topography before and after burnishing is presented, a complete analysis of the surface characteristics is addressed. After burnishing, the roughness reduction is more than an order of magnitude. The final quality is similar to grinding, even reaching $0.349 \mu\text{m}$ Ra. Topographies are shown in Fig. 4(a), Fig. 4(b) and Fig. 4(c); corresponding to a before surface and to the same surface after being burnished with two different burnishing depth. Roughness parameters improved about 75% when burnishing is applied.



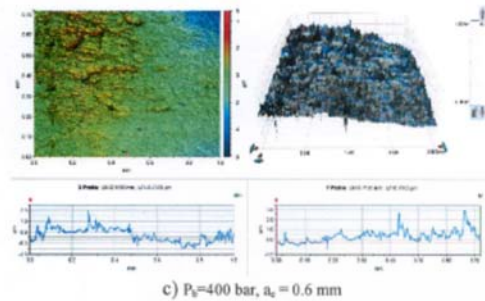


Fig. 4. 2D and 3D Topographies and roughness profiles (a) before burnishing (b) after burnishing operation ($P_b=400\text{bar}$, $a_r=0.5\text{ mm}$) (c) after burnishing operation ($P_b=400\text{ bar}$, $a_r = 0.6\text{ mm}$).

C. Compressive residual stresses

The plastic deformation produced on the part surface during ball burnishing causes a significant alteration of the residual stress state. It is well known that the generation of residual stress depends upon the interplay of many factors such as inhomogeneous plastic deformation induced by mechanical and thermal events associated with the process [10]. X-ray diffraction (XRD) techniques are used for the residual stress measurement. XRD allows measuring the stress field on burnishing surface. The variation of the compressive residual stress on the burnished surface has been measured by an X-ray diffractometer is shown in table 5. The horizontal compressive residual stress on the burnished surface was increased up to 369 MPa, possibly, due to the modification of the microstructure. The residual stresses have a significant dependence on the burnishing direction. [14]

To achieve a good surface hardness and the compressive residual stresses, are the keys for a remarkable improvement of the fatigue life and wear resistance of the burnishing components, the optimum condition could be $P_b=600\text{ bar}$; $a_r=0.5\text{ mm}$, as shown in Fig. 5.

Table 5. Residual stress value

Sample	Point	X	Y
200 bar-0.5 mm	Base	-206.3±15.2	141.3±9.0
	Surface	-366.7±15.3	-992.0±19.1
200 bar-0.6 mm	Base	7.2±10.8	39.8±9.4
	Surface	-350.1±6.2	-729±13.2
400 bar-0.5 mm	Base	109.4±18.0	362.1±15.6
	Surface	-342.3±12	-815.1±19.8
400 bar-0.6 mm	Base	296.4±16.1	451.1±16.9
	Surface	-340.4±5.6	-693.1±9.9
600 bar-0.5 mm	Base	-335.4±22.1	22±21.1
	Surface	-369.4±15.7	-787.4±17.1
600 bar-0.6 mm	Base	162.3±12.4	234.9±9.3
	Surface	-343.8±7.1	-711.2±8.2

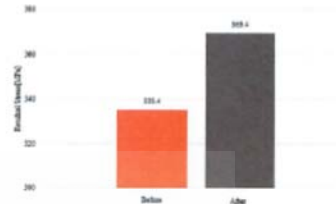


Fig. 5. Variation of the compressive residual stress on the burnished surface.

V. CONCLUSIONS

A ball burnishing tool integrated with a CNC milling was developed to improve the surface roughness, hardness, and residual stress of the material used in the present study, the Low-alloy steel SCM 440. The surface burnishing parameters for the ball-burnishing tool were determined after conducting the experimental methods. The burnishing pressure constantly from 200 to 600 bars, when machining using a burnishing depth 0.5 and 0.6 mm., the velocity of 2 m/min., the fluid as lubricant hydraulic oil (HLP 68) were used. The quality of the surface roughness was studied. The final quality was similar to grinding, even reaching $0.349\text{ }\mu\text{m Ra}$ on average, using the adequate burnishing parameters, corresponding to a before surface and to the same surface after being burnished with two different burnishing depth, roughness parameters improved about 75% when burnishing was applied. The burnishing surface hardness was increased to HV 586 on average, possibly due to the squeezing of the grain boundary. X-ray diffraction (XRD) techniques were used for the residual stress measurement. The horizontal compressive residual stress on the burnished surface was increased up to 369 MPa.

References

- [1] W. Zhuang, and B. Wicks, "Mechanical Surface Treatment Technologies for Gas Turbine Engine Components," ASME J. Eng. Gas Turbines Power 125, 2003, pp.1021-1025.
- [2] V. Schulze, "Modern Mechanical Surface Treatment," Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [3] E. Maawad, H.-G. Brokmeyer, L. Wagner, Y. Sano, Ch. Genzel, "Investigation on the surface and near-surface characteristics of Ti-2.5Cu after various mechanical surface treatments," Surf. Coat. Technol. 205, 2011, pp.3644-3650.
- [4] M. Korzynski, A. Pacana, J. Cwanek, "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing," Surf. Coat. Technol. 203, 2009, pp.1670-1675.
- [5] M. Korzynski, A. Dzierwa, A. Pacana, J. Cwanek, "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing," Surf. Coat. Technol. 204, 2009, pp.1670-1676.
- [6] Yung-Chang Yen, "Modelling of metal cutting and ball burnishing prediction of tool wear and surface properties," PhD Thesis, the Ohio State University, 2004.
- [7] F. Klocke, and J. Liermann, "Roller burnishing of hard turned surfaces, International," J. of Machine Tools and Manufacture 38, 1996, pp.419-423.
- [8] M.H. El-Axir, and M.M. El-Khabeery, "Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials," Journal of Materials Processing Technology., 132 (1-3), 2003, pp.82-89.



- [9] A. Mahmood Hassan. "The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals," *Journal of Materials Processing Technology*, 72 (3), 1997, pp.385-391.
- [10] Deepak Mahajan, and Ravindra Tajane. "A Review on Ball Burnishing Process," *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 3, Issue 4, April 2013, pp. 1-8.
- [11] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Muñoa, J.A. Sánchez. "Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing" *Int. J. Mach. Tool Manu.* 45, 2005, pp.1659-1668.
- [12] Liviu Luca, Sorin Neagu-Ventzel, and Ioan Marinescu. "Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels," *Precision Engineering*, 29, 2005, pp.253-256.
- [13] SCM440 www.tandemmetal.com [online]
- [14] Peirong Zhang, and Zhanqiang Liu. "Effect of sequential turning and burnishing on the surface integrity of Cr-Ni-based stainless steel formed by laser cladding process," *Surface & Coatings Technology*, 276, 2015, pp. 327-335.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายมนตรี ขาวสุข
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2521
ที่อยู่	29 หมู่ที่ 20 ตำบลประสุข อำเภอม่วง จังหวัดนครราชสีมา 30270
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(เทคโนโลยีการผลิต) มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขต ปราจีนบุรี ถึงปัจจุบัน
เบอร์ โทรศัพท์	08-57097-7884
อีเมล	montri.k@mail.rmutt.ac.th

