



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เรื่อง การหาค่าพารามิเตอร์ในการชุปแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม
เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์
โดย นายสมพล เพชรฤทธิ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมนึก วัฒนศรีกุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราชภูริ์นัย)

กรรมการ

(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

การหาค่าพารามิเตอร์ในการชุปแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม
เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์

นายสมพล เพชรฤทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

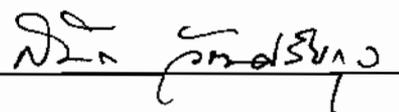
ชื่อ : นายสมพล เพชรฤทธิ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การหาค่าพารามิเตอร์ในการชุบแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้า
ไฮสปีดเกรดพีเอ็มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทาน
ต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์
สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์สมนึก วัฒนศรียกูล
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ในการชุบแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์ วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ของบริษัท Böhler รหัสวัสดุ S390 ผ่านกระบวนการการชุบแข็ง บำบัดเย็นและเจียรไนขึ้นรูปให้เป็นเอ็นมิลล์ เมื่อเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จากกลุ่มตัวอย่างเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาพบว่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 68.4 HRC. สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนและบำบัดเย็นของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรต่างๆ ในการอบชุบเช่น อุณหภูมิชุบแข็ง เวลาในการคงอุณหภูมิ อุณหภูมิในการบำบัดเย็นและขั้นตอนในการบำบัดเย็น จากการศึกษาและทดลองพบว่า การชุบแข็งด้วยอุณหภูมิชุบแข็งในช่วง $1150^{\circ}\text{C} - 1230^{\circ}\text{C}$ เวลาคงอุณหภูมิในช่วง 80 - 150 วินาที ทำการบำบัดเย็นในช่วงอุณหภูมิ -70°C และ -196°C ขั้นตอนในการบำบัดเย็นได้แก่ ทำการบำบัดเย็นก่อนการอบคืนตัว ทำการบำบัดเย็นหลังการอบคืนตัว และไม่มีการบำบัดเย็น มีการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 520°C จำนวน 3 ครั้ง โดยใช้เตาสุญญากาศความแข็งที่ได้อยู่ในช่วง 66.8 - 68.1 HRC. ผลการทดลองการตัดเฉือนเพื่อทดสอบการสึกหรอ พบว่าเงื่อนไขการชุบแข็งที่ก่อให้เกิดการสึกหรอน้อยที่สุดเท่ากับ 0.084 มม. เงื่อนไขที่ใช้คือ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230°C เวลาคงอุณหภูมิชุบคือ 80 วินาที ทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -196°C ก่อนการอบคืนตัว ผลจากการวิจัยพบว่าเอ็นมิลล์มีอายุการใช้งานดีขึ้นและประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอสูงกว่าเอ็นมิลล์นำเข้ามาจากต่างประเทศประมาณ 20 % เมื่อเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์นำเข้ามาจากต่างประเทศ ที่มีประสิทธิภาพด้านการต้านทานต่อการสึกหรอจากการตัดเฉือนที่ดีที่สุด

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 113 หน้า)

คำสำคัญ : การชุบแข็ง, บำบัดเย็น, เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม, เอ็นมิลล์

 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Sompon Pachrit
Thesis Title : Hardening and Cryogenic Treatment Parameters Determination of High Speed Steel PM Grade for End Mill Wear Resistance Property Improvements
Major Field : Production Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Associate Professor Somnuk Watanasriyakul
Associate Professor Dr.Surapol Raadnui
Academic Year : 2006

Abstract

The objective of this research was to study and analyze the parameters of powder metal steels hardening and cryogenic treatment used for producing end mill. The result can be used to improve wear resistance occurred during machining process. Material used in production of powder metal steels end mill was grade S390 Böhler brand. They were hardened, cryogenic treatment and ground into end mill. From this particular research, Imported end mill hardness was approximately 68.4 HRC. It was mainly on improving used heat treatment and cryogenic treatment of various hardening condition such as hardening temperature, cryogenic temperature and holding time. The finding revealed that when hardening temperature was at 1150°C - 1230°C , holding time was at 80 – 150 second, cryogenic temperature was at -70°C and -196°C and tempering temperature was repeated 3 times at 520°C , it made the hardness rose to 66.8 - 68.1 HRC. The process was done within an automatic vacuum furnace. The machining done to test flank wear processed under hardening temperature of 1230°C , holding time of 80 second, cryogenic temperature was at -196°C before tempering process. The minimum flank wear was at 0.084 mm. The tools life was increased about 20 %.

(Total 113 pages)

Keywords : Hardening, Cryogenic Treatment, Powder Metal Steel, End Mill



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความร่วมมือและการช่วยเหลือจากหลายฝ่าย และหลายหน่วยงาน ซึ่งทำให้ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำและ ท่านที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์สมนึก วัฒนศรียกุล รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็น ประโยชน์อย่างยิ่งจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของ คุณณรงค์ สกุลศิริรัตน์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอ็น อาร์ อินดัสตรี จำกัด ซึ่งได้ให้การสนับสนุนเป็นอย่างมาก สำหรับการวิจัยและผลิต เอ็นมิลล์ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรวดี วังศรีษะ สำหรับคำแนะนำในสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนด้านทุนวิจัย ประกอบด้วยหน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางกรรมวิธี ทางความร้อน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัย นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุกๆ คน ในครอบครัวที่เป็นกำลังใจและผู้ช่วยเหลือทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

สมพล เพชรฤทธิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด	5
2.2 หลักการทำงานของเครื่องกัด	5
2.3 การคำนวณงานกัด	11
2.4 ชนิดของมีดกัด	11
2.5 วัสดุเอ็นมิลล์และรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์	13
2.6 อายุการใช้งานและการสึกหรอของเครื่องมือตัด	18
2.7 การวิเคราะห์การตัดเฉือนโลหะ	23
2.8 เหล็กกล้าสำหรับการผลิตเครื่องมือตัด	28
2.9 เหล็กกล้า	30
2.10 เหล็กกล้าเครื่องมือ	32
2.11 แผนภาพสมดุล เหล็ก - คาร์บอน	33
2.12 หลักการชุบแข็งเหล็กกล้า	34
2.13 ขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะชุบแข็ง	37
2.14 โครงสร้างมาร์เทนไซด์	38
2.15 บทบาทของธาตุผสมที่มีผลต่อการชุบแข็ง	43
2.16 บทบาทของธาตุผสมที่มีผลต่อการอบคืนตัว	44
2.17 แผนภาพทีทีที	47
2.18 การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน	49
2.19 การอบคืนตัว	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.20 การชุปแข็งเหล็กกล้าในเตาสุญญากาศ	52
2.21 เตาอบชุบสุญญากาศ	55
2.22 การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	61
3.1 การทดลองการอบชุบด้วยเตาสุญญากาศ	61
3.2 การทดสอบความแข็ง	65
3.3 การทดสอบส่วนผสมทางเคมี	66
3.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค	67
3.5 การตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิต	69
3.6 การทดสอบการดัดเค้น	70
บทที่ 4 ผลของการวิจัย	73
4.1 ผลการทดสอบความแข็งเอ็นมิลล์	73
4.2 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี	76
4.3 ผลการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์	78
4.4 ผลการทดสอบการสึกหรอ	79
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเศษตัด	79
4.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก ก	97
ภาพการบันทึกผลการทำงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็ง	98
ภาคผนวก ข	103
ภาพเศษตัดที่ได้จากการทดลองดัดเค้น	104
ภาคผนวก ค	107
ภาพชิ้นงานทดสอบสำหรับการดัดเค้นวัสดุ SCM 440	108
ภาคผนวก ง	109
ภาพแสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม	112
ประวัติผู้วิจัย	113

สารบัญญัตราสาร

ดาราางที่	หน้า
2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของมิดกััดกับอัตราป้อนต่อฟัน	9
2-2 แสดงข้อกำหนดต่าง ๆ ของเอ็นมิลล์กับการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานแต่ละชนิด	16
2-3 แนวทางการเลือกใช้เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์	17
2-4 แสดงการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้ารอบสูง	29
2-5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูงตามมาตรฐาน AISI	30
3-1 แสดงเงื่อนไขในการชุบแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม	62
3-2 แสดงเงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลอง	70
4-1 แสดงผลการทดสอบความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ	73
4-2 ผลค่าความแข็งของชิ้นงานผ่านการชุบแข็งและบำบัดเย็นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ	74
4-3 ผลการทดสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์	76
4-4 ผลการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ของแต่ละรหัส	78

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 เครื่องกัดในแนวนอน	6
2-2 เครื่องกัดในแนวตั้ง	6
2-3 เครื่องกัด CNC Milling	7
2-4 แสดงการทำงานของเอ็นมิลล์กัดนอนและกัดตั้ง	7
2-5 แสดงวิธีการป้อนกัดตามและป้อนกัดสวน	8
2-6 แสดงลักษณะเปรียบเทียบความหนาและความเรียบผิว	8
2-7 แสดงถึงลักษณะของมุมคมกัดแบบต่าง ๆ	9
2-8 แสดงทิศทางการป้อนชิ้นงานกัด	10
2-9 แสดงลักษณะรูปแบบของมีดกัด	12
2-10 แสดงลักษณะคมตัด	13
2-11 แสดงการกำหนดส่วนต่างๆ บริเวณคมตัดเอ็นมิลล์	15
2-12 ชนิดของการเสีรูปการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าเครื่องรอบสูง	20
2-13 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของคมตัด	21
2-14 กราฟแสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของคมตัด	21
2-15 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบและผิวคายเศษ	22
2-16 แสดงลักษณะการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นของคมตัด	23
2-17 แสดงแบบจำลองของเครื่องมือตัดแบบประนาบมุมฉาก	24
2-18 แสดงแรงที่กระทำบริเวณที่เกิดการตัดเฉือน	25
2-19 แสดงถึงลักษณะการตัดเฉือนของชิ้นงานและคมตัด	26
2-20 แสดงลักษณะของเศษกัด	27
2-21 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้า	31
2-22 ระบบเมทาสเตเบิล เหล็ก – คาร์บอน	33
2-23 กรรมวิธีชุบแข็งเหล็กกล้าวิธีต่างๆ	35
2-24 แสดงอุณหภูมิชุบแข็งสำหรับเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์และเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์	35
2-25 เปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน จากการอบปกติและจากการชุบแข็งขึ้นกับปริมาณคาร์บอน	36
2-26 แสดงเปรียบเทียบระบบของผลึกของเหล็กกล้า	38
2-27 แสดงระบบผลึกของออสเตไนต์ และเฟอร์ไรต์	39
2-28 แสดงการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์เป็นเฟอร์ไรต์	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-29 แสดงตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนที่แทรกอยู่ในออสเตไนต์ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์	40
2-30 แสดงการบิดเบี้ยวของระนาบของโครงสร้างเหล็ก	41
2-31 ขนาดของแลตทิซของมาร์เทนไซต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของคาร์บอน	41
2-32 แสดงลักษณะการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์	42
2-33 แสดงผลที่มีของอบคืนตัวซึ่งให้คุณสมบัติ Secondary Hardening ของธาตุโครเมียม และธาตุโมลิบดีนัม	46
2-34 ชนิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิแบบต่อเนื่อง (Continuous Transformation) เหล็กเกรด 1.2379 มาตรฐาน DIN	47
2-35 ชนิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกงที่ (Isothermal Transformation) เหล็กเกรด 1.2379 มาตรฐาน DIN	48
2-36 อัตราเร็วเย็นตัววิกฤติ (Critical Cooling Rate) ของเหล็กกล้าคาร์บอน ขึ้นกับจำนวนคาร์บอน	49
2-37 แสดงกราฟอุณหภูมิกับเวลาในการชุบแข็ง	50
2-38 เส้นโค้งการอบคืนตัว (Tempering Curve) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ	51
2-39 แสดงลักษณะการทำงานและอุปกรณ์ประกอบของเตาสัญญากาศ	52
2-40 แสดงภาพในของปั๊มสุญญากาศแบบดีฟิวชัน	53
2-41 แสดงภาพในของปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี	54
2-42 แสดงช่วงของความดันสัมพันธ์กับความดันบรรยากาศ	54
2-43 แสดงลักษณะการทำงานและอุปกรณ์ประกอบของเตาสัญญากาศ	55
2-44 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของมาร์เทนไซต์ที่แปรผันกับปริมาณคาร์บอนที่ผสมในเหล็ก	56
2-45 แผนภูมิแสดงปริมาณของออสเตไนต์ตกค้างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิชุบต่างๆ กัน	57
2-46 ตัวอย่างกระบวนการบำบัดเย็นที่สัมผัสกับการอบชุบ	59
3-1 แสดงขนาดชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง	61
3-2 เตาอบสุญญากาศ	63
3-3 การจัดวางชิ้นงานสำหรับการชุบแข็งโดยเตาสัญญากาศ	63
3-4 ลักษณะการจัดเรียงชิ้นงานสำหรับการชุบแข็งโดยเตาสัญญากาศ	64
3-5 กระบวนการบำบัดเย็นเอ็นมิลล์วัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 การผลิตเอ็นมิลล์วัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มด้วยเครื่องเจียไนย	65
3-7 ชิ้นงานเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม	65
3-8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์	66
3-9 เครื่องอิมพัลส์สเปคโตรมิเตอร์	67
3-10 เครื่องตัดชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็น และเครื่องจับยึดชิ้นทดสอบแบบร้อน	68
3-11 เครื่องขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายและขัดมัน	68
3-12 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค	69
3-13 กล้องจุลทรรศน์	69
3-14 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด	70
4-1 แสดงค่าความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ	73
4-2 ผลค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มผ่านการชุบแข็งและบำบัดเย็นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ	75
4-3 แสดงอัตราส่วนผสมของคาร์บอนและโครเมียมในเอ็นมิลล์	76
4-4 แสดงอัตราส่วนผสมของโคบอลต์และโมลิบดีนัมในเอ็นมิลล์	77
4-5 แสดงอัตราส่วนผสมของทังสแตนและวานาเดียมในเอ็นมิลล์	77
4-6 แสดงอัตราส่วนผสมของธาตุผสมในเอ็นมิลล์	78
4-7 เปรียบเทียบระยะการสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ต่างประเทศ	80
4-8 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ต่างประเทศระยะทางการตัดเฉือน 1200 มม.	80
4-9 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มที่ระยะทางการตัด 1200 มม.	81
4-10 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	82
4-11 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	82
4-12 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	83
4-13 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	83
4-14 การสึกหรอที่ผิวหอบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-15 การสีกหรือที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	84
4-16 การสีกหรือที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	85
4-17 การสีกหรือที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.	85
4-18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส YG	86
4-19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส OS	86
4-20 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส HI	87
4-21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส HA	87
4-22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส DO	88
4-23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 3	88
4-24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 12	89
4-25 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส YG ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	89
4-26 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส OS ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	90
4-27 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส HI ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	90
4-28 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส HA ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	91
4-29 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส DO ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	91
4-30 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 3 ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	92
4-31 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 12 ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.	92
ก-1 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสัญญากาศในการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที	98
ก-2 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสัญญากาศในการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที	99
ก-3 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสัญญากาศในการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที	100
ก-4 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสัญญากาศในการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที	101
ข-1 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเฉือน 400 มม.	104
ข-2 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเฉือน 800 มม.	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-3 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเฉือน 1200 มม.	105
ข-4 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเฉือน 400 มม.	105
ข-5 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเฉือน 800 มม.	106
ข-6 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเฉือน 1200 มม.	106
ค-1 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดเฉือนวัสดุ SCM 440 ก่อนและหลังการตัดเฉือน	108
ค-2 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดเฉือนวัสดุ SCM 440 หลังการตัดเฉือน	108
ง-1 แสดงขั้นตอนการอบชุบและอบคืนตัวเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม	110
ง-2 แสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 โดยมีการบำบัดเย็นหลังการอบคืนตัว	111
ง-3 แสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 ไม่มีการบำบัดเย็น	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องมือตัด (Cutting Tool) ที่นำเข้ามาใช้ภายในประเทศนั้น จะมีการนำเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มมาใช้ในการผลิตเป็นเครื่องมือตัดกันมากขึ้น ซึ่งเหล็กกล้าชนิดนี้จะใช้กรรมวิธีการผลิตที่พิเศษคือ การเป่าพ่นน้ำโลหะให้เกิดเป็นเม็ดโลหะขนาดเล็กและทำการให้ความร้อนแก่เม็ดโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ขณะเดียวกันจะให้ความดันเพื่อช่วยในการประสานซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีความละเอียดสูงมาก เมื่อนำเหล็กกล้าดังกล่าวไปผ่านกรรมวิธีการอบชุบต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ จะทำให้ได้คาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งจะมีผลไปถึงค่าความแข็งที่สูงขึ้น การต้านทานต่อการสึกหรอของคมตัดที่ดีมาก ซึ่งเครื่องมือตัดที่ผลิตโดยเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มเป็นที่นิยมมากในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยการนำเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มมาผลิตเป็นเครื่องมือตัด ยังมีการนำมาใช้ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ เนื่องจากเหล็กกล้าชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงรวมถึงการขาดความรู้ความเข้าใจในด้านของกระบวนการอบชุบแข็ง การอบคืนตัวและการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยการชุบเย็น (Sub-zero Treatment) และไม่ได้มีการศึกษาถึงความคุ้มค่าในการผลิตเครื่องมือตัดจากเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มในกรณีการนำไปใช้งาน

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการกำหนดแนวทางของโครงการเพื่อนำไปทำการศึกษาถึงตัวแปรในการอบชุบแข็ง การอบคืนตัวและการชุบเย็น (Sub-zero Treatment) ของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ซึ่งกระบวนการอบชุบที่เหมาะสมจะทำให้คุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น สร้างความคุ้มค่าในการผลิตเครื่องมือตัดจากเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มและเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดที่ผลิตภายในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการอบชุบแข็ง อบคืนตัวและการชุบเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม

1.2.2 เพื่อศึกษาความแตกต่างของอัตราการสึกหรอ ของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ในกระบวนการอบชุบแข็งที่ต่างกัน

1.2.3 เพื่อกำหนดกระบวนการอบชุบแข็งที่เหมาะสม กับจุดประสงค์ในการอบชุบแข็งของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต และคุณสมบัติของวัสดุต้านโลหะวิทยาของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มนำเข้าจากต่างประเทศ คมตัดจำนวน 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm

1.3.2 ศึกษาข้อมูลในการผลิตเอ็นมิลล์ วัสดุเป็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ส่วนผสมทางเคมีคือ ปริมาณ C = 1.6 %, Cr = 4.8 %, Mo = 2%, V = 5 %, W = 10.5 %, Co = 8 % รหัสวัสดุคือ S390 ของบริษัท Böhler

1.3.3 ทำการกำหนดช่วงพารามิเตอร์ในการชุบแข็งและอุณหภูมิในการชุบเย็น โดยทำการชุบแข็งเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มด้วยเตาชุบแข็งสูญญากาศ SCHMETZ รุ่น IU 54/1F 30x45x30 2 R 6 bar รับน้ำหนักไม่เกิน 80 กิโลกรัม ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นสารชุบภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1.3.3.1 อุณหภูมิชุบแข็งที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 1150 °C และ 1230 °C

1.3.3.2 ระยะเวลาคงอุณหภูมิ (Soaking Time) คือช่วงเวลา 80 วินาที และ 150 วินาที

1.3.3.3 อุณหภูมิในการอบคืนตัว (Tempering) ที่ 520 °C ระยะเวลาคงอุณหภูมิ 2 ชั่วโมงเป็นจำนวน 3 ครั้ง

1.3.3.4 อุณหภูมิในการชุบเย็น (Sub-zero Treatment) ที่ -70 °C และ -196 °C และไม่มีการชุบเย็น

1.3.4 ทำการผลิตเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มให้ได้รูปทรงเรขาคณิต ตามขั้นตอนที่กำหนด

1.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดเฉือนด้านการต้านทานต่อการสึกหรอ กับเอ็นมิลล์ประเภทเดียวกันที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต และคุณสมบัติของวัสดุต้านโลหะวิทยาของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มนำเข้าจากต่างประเทศ คมตัดจำนวน 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm

1.4.2 ทดสอบหาประสิทธิภาพการตัดเฉือนด้านการต้านทาน ต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4.3 ศึกษาข้อมูล และกำหนดช่วงพารามิเตอร์เกี่ยวกับการผลิตเอ็นมิลล์จากเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม รหัสวัสดุคือ S390 ของบริษัท Böhler เช่น การชุบแข็ง การการชุบเย็น

1.4.4 นำวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและชุบเย็นไปผลิตเป็นเอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรนัยขึ้นรูปอัตโนมัติ 5 แกนให้ได้รูปทรงเรขาคณิตตามที่กำหนด

1.4.5 ทดสอบการสีกหรือของเอ็นมิลล์ที่มีผลต่ออายุการใช้งาน และการตัดเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ที่ผลิตขึ้นเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4.6 ประเมินผลการทดลองเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์ประเภทเดียวกันที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มเพื่อการผลิตเอ็นมิลล์

1.5.2 ทำให้ทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขนาด และรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ

1.5.3 ทำให้ทราบคุณสมบัติทางกล และทางโลหะวิทยาของวัสดุที่เหมาะสมต่อการผลิตเอ็นมิลล์

1.5.4 เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการต้านทานการสีกหรือ เนื่องจากการตัดเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ที่ทำการผลิตภายในประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ แยกตามรายละเอียดออกเป็นหัวข้อที่สำคัญ ดังนี้

2.1 กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด

การผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องกัด (Milling Machine) เป็นกระบวนการตัดเฉือนเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะต่างๆ กันหลายรูปแบบและหลายลักษณะงาน โดยการหมุนตัดของเครื่องมือตัดแบบหลายคมตัด (Multiple – Tool Cutter) คมตัดแต่ละคมตัดจะปาดผิวงานออกเมื่อเอ็นมิลล์หมุนทำงานในแต่ละรอบการหมุน เนื่องจากว่าชิ้นงานและเอ็นมิลล์สามารถเคลื่อนที่ตัดในทิศทางต่างๆ ได้มากกว่าหนึ่งทิศทางสำหรับการตัดเฉือนแต่ละครั้ง ผิวงานที่เกิดจากการตัดเฉือนสามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ตัด โดยการทำงานของเครื่องกัด ซึ่งมีเทคโนโลยีและรูปทรงเรขาคณิตที่ต่างกัน เอ็นมิลล์แต่ละแบบที่นำมาใช้ในการตัดเฉือนจะแตกต่างกันตามชนิดวัสดุงาน และลักษณะชิ้นงาน ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างงานกัดและงานตัดเฉือนด้วยวิธีการอื่นๆ มีดังนี้

2.1.1 คมตัดหลายๆ คมหมุนสลับการตัดเฉือนผิวงานตลอดเวลาที่ตัดเฉือน

2.1.2 เศษตัด (Chip) ที่ตัดด้วยเอ็นมิลล์จะมีขนาดค่อนข้างเล็ก

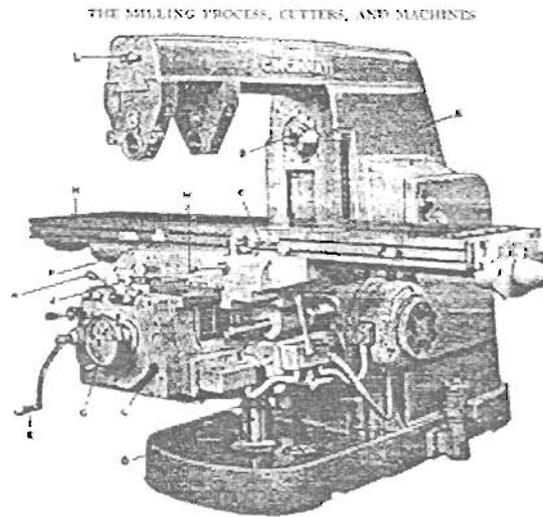
2.1.3 ความหนาเศษตัด (Chip Thickness) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากทิศทางการหมุนและการเคลื่อนที่ตัด

ความหนาเศษตัดเปลี่ยนแปลงในขณะที่คมตัดแต่ละคมตัดกำลังตัดเฉือน เพราะว่าขณะที่คมตัดกำลังตัดเฉือนนั้น มีการป้อนชิ้นงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของโต๊ะจับงาน และชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าหาเอ็นมิลล์ การวัดความหนาเศษตัดจะวัดในแนวรัศมีของเอ็นมิลล์ งานกัดส่วนใหญ่สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่มีความแข็งประมาณ 25 HRC อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าที่มีความแข็ง 35-56 HRC สามารถตัดเฉือนด้วยวิธีกัดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือตัด และคุณภาพของวัสดุ

2.2 หลักการทำงานของเครื่องกัด

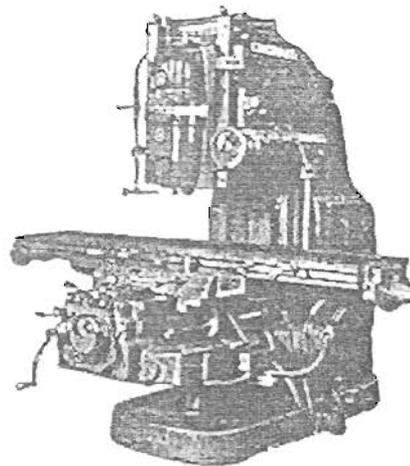
การทำงานของเครื่องกัด ที่ใช้งานโดยทั่วไปมี 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.2.1 เครื่องกัดในแนวนอน (Horizontal Milling Machine) เครื่องกัดชนิดนี้เหมาะสมกับงานกัดทั่วๆ ไป เพลามีกัดเป็นเพลานอน สวมอยู่บนแบร็งที่โคนทั้งสองข้าง วิธีป้อนมีดอาจป้อนด้วยมือหรือป้อนอัตโนมัติ



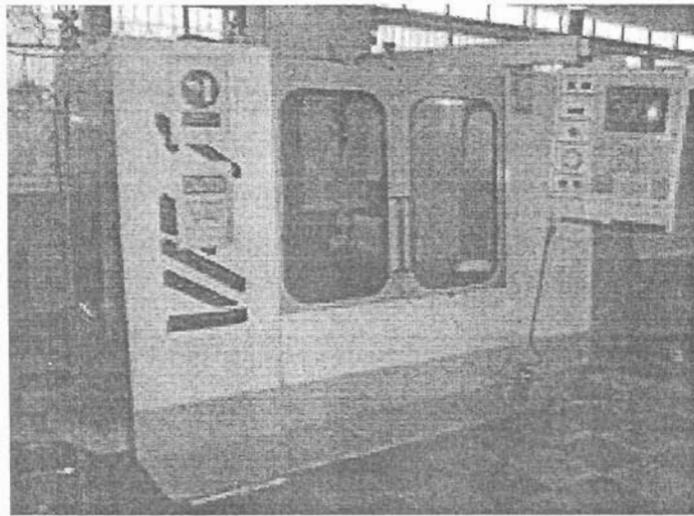
ภาพที่ 2-1 เครื่องกัดในแนวนอน

2.2.2 เครื่องกัดในแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) เครื่องกัดชนิดนี้ใช้กับเครื่องกัดด้วยมีดกัดตั้ง เพลาที่มีจับมีดไว้ในแนวตั้ง หัวเพลานี้หมุนได้เป็นมุมต่างๆ ส่วนประกอบอื่นๆ เหมือนกับเครื่องกัดแนวนอน

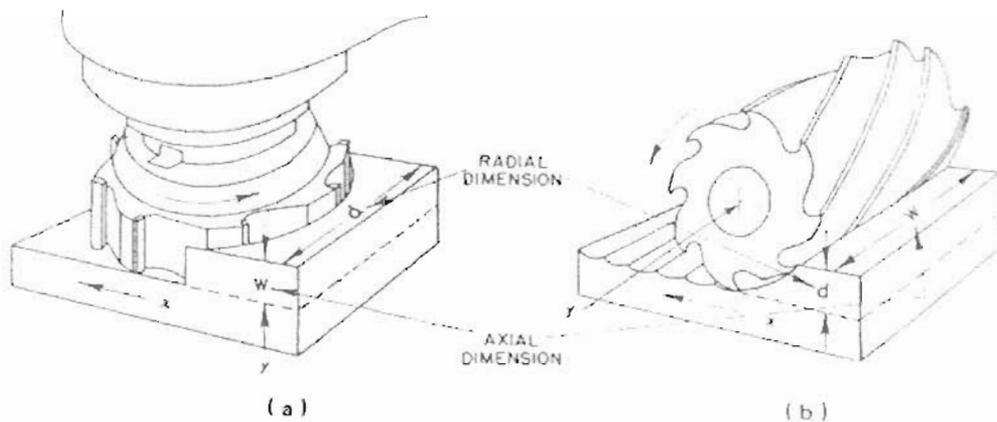


ภาพที่ 2-2 เครื่องกัดในแนวตั้ง

2.2.3 เครื่องกัดชนิดพิเศษ (Special Milling Machine) เป็นเครื่องกัดที่ออกแบบมาสำหรับทำงานในอุตสาหกรรมการผลิตงานจำนวนมาก โดยเฉพาะที่คุ้มกับการลงทุน แต่โดยทั่วไปสถานศึกษาจะเป็นเครื่องฝึกหัด เพื่อให้ทราบถึงการทำงาน สามารถดัดแปลงการทำงานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพที่ดี



ภาพที่ 2-3 เครื่องกัด CNC Milling



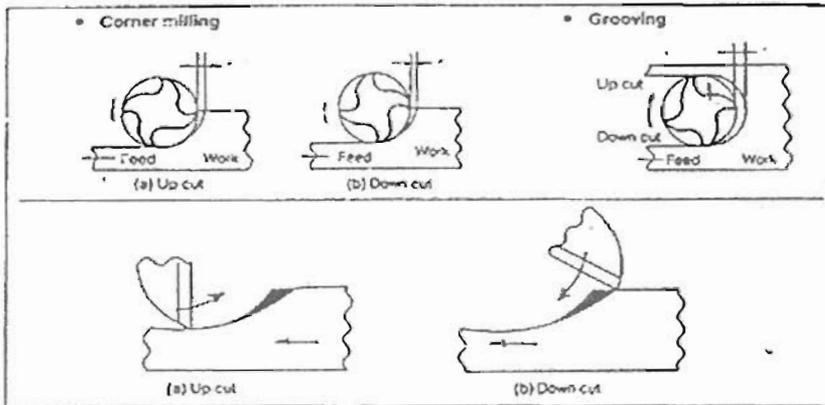
ภาพที่ 2-4 แสดงการทำงานของเอ็นมิลล์กัดนอนและกัดตั้ง

การทำงานของมิลล์กัดนอน คือ มิลล์ที่หมุนกัดด้วยแกนหมุนของมิลล์ขนานกับผิวงาน รูปร่างของมิลล์กัดนอน คมกัดเป็นคมนอนเมื่อหมุนกัดตามแนวเส้นรอบวงได้เศษกัดยาวเป็นเศษงอตามกว้าง เศษกัดหนาไม่เท่ากัน และมักจะกัดผิวได้เป็นรอยลูกคลื่น เพราะคมกัดเดินเข้ากัดเป็นหน้ายาวเกิดแรงกระแทกมาก ส่วนมิลล์กัดตั้งแกนหมุนของมิลล์กัดตั้ง จะต้องตั้งฉากกับผิวงานเสมอขณะกัด แม้ว่ากัดตามแนวเส้นรอบวง แต่จะเดินกัดเป็นฟันๆ ไป เศษกัดหนาคงที่เท่ากันตลอด เนื่องจากไม่มีแรงกระแทกทำให้ผิวงานเรียบ

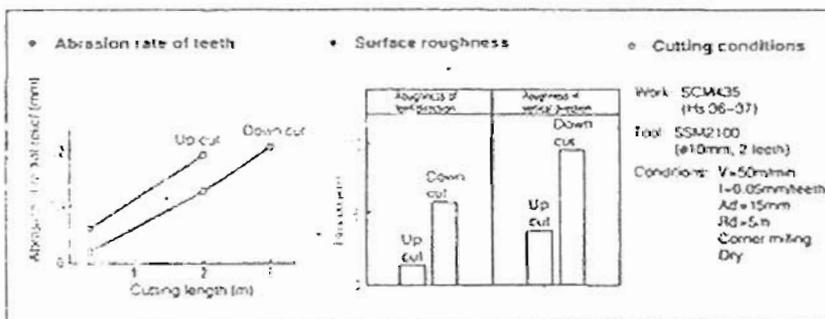
2.2.4 การทำงานของคมมีดกัด การทำงานของเครื่องกัดเมื่อมีดกัดหมุนหนึ่งรอบกับที่จะเกิดการตัดได้ต่อเมื่อป้อนชิ้นงานเข้าหา มีดกัด การป้อนจะใช้การหมุนด้วยล้อมือหมุนหรือการป้อนด้วยกำลังของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ อัตราการป้อนจะต้องเคลื่อนที่ไปอย่างคงที่ตลอดการตัด

ตามปกติมีดกัด (Milling Cutting) จะมีคมตัดมากกว่าหนึ่งคม ดังนั้นในการตัดเฉือนชิ้นงาน คมตัดแต่ละคมจะเริ่มตัดเฉือนจากมากไปหาน้อยหรือจากน้อยไปหามาก ในแต่ละช่วงฟันจะขึ้นอยู่กับทิศทาง การป้อนกัดตามหรือป้อนกัดสวน

ในการปาดผิวหน้ากว้างโดยใช้มีดกัดตั้งขนาดใหญ่สามารถเปลี่ยนคมกัดได้ ขนาดของมีดกัดสามารถเลือกให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงานได้



ภาพที่ 2-5 แสดงวิธีการป้อนกัดตามและป้อนกัดสวน



ภาพที่ 2-6 แสดงลักษณะเปรียบเทียบความหนาและความเรียบผิว

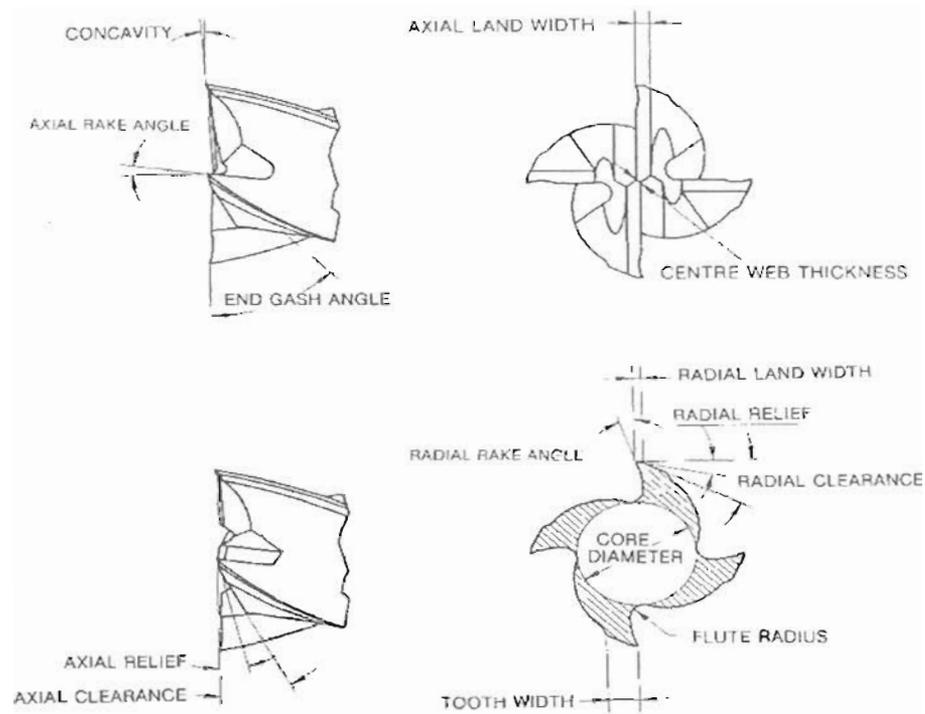
วิธีการป้อนกัดตามมีดนั้น มีดกัดจะกัดเนื้องานจำนวนมากก่อนแล้วค่อยๆ ลดขนาดลงมา ทำให้เศษกัดมันตัวจากขนาดความหนาไปหาส่วนที่บางกว่า แรงที่กระทำกับคมตัดจะเกิดพร้อมๆ กัน 2 แรง คือ แรงในแนวเส้นรอบวง และแรงดันตัดของคมตัด

การป้อนกัดสวนของมีดกัดจะเกิดตัดเฉือนเนื่องจากน้อยไปหามาก ทำให้เศษมันตัวจากมากไปหาน้อยตลอดแรงที่เกิดขึ้นกับคมตัดจะเกิดขึ้น 2 แรง คือ แนวในเส้นรอบวง และแรงที่กระทำกับคมตัด ลักษณะของแรงเช่นนี้ไม่นิยมป้อนกัดลึกมากเพราะจะทำให้งานเคลื่อนที่ได้ง่ายและคมตัดแตกบิ่น แต่ถ้การป้อนกัดลึกมากอัตราการป้อนจะน้อยลงเป็นสัดส่วนต่อกัน

การมันของเศษกัดในแนวตั้ง จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของจำนวนฟันมีดกัด และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางมีดกัด ส่วนความกว้างและความหนาของเศษจะขึ้นอยู่กับระยะของอัตราป้อนในการตัดเฉือน และความลึกในการป้อนการทำงานของมีดกัด ซึ่งประกอบด้วย มุมคมตัด มุมคายและมุมหลบ ความหนาของคมตัดจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของมีดตัด เพื่อจะตัดและดึงเศษวัสดุออกมา

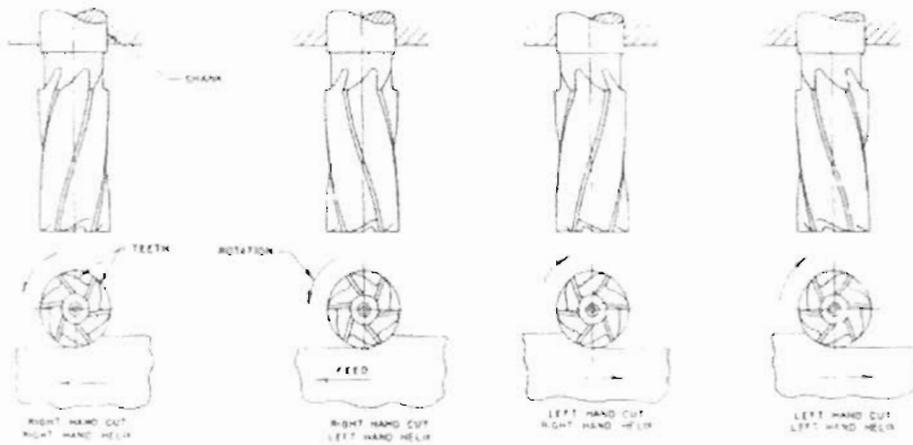
ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัดกับอัตราป้อนต่อฟัน

Ø คมมีดกัด	10	20	30	40	50	60	80	160
อัตราป้อน (f_2) (มม.)	0.5	1	1.5	2	2.5	4	5	6



ภาพที่ 2-7 แสดงถึงลักษณะของมุมคมกัดแบบต่างๆ

ลักษณะของมุมคมตัดของมีดกัดแต่ละฟัน จะมีลักษณะต่างๆ ของคมตัดแบ่งออกเป็น มุมคายเศษ มุมตัดเฉือนและมุมหลบส่วนมุมหลบและมุมตัดเฉือน สำหรับมีดกัดการขึ้นรูปโค้ง ด้านหลังของฟันจะต้องขึ้นรูปหลบ เพื่อลดการเสียดสีที่เกิดการตัดเฉือนขึ้นรูปที่ละฟัน จนครบ จำนวนฟันของมีดกัดที่มีอยู่ส่วนมุมคายเศษนั้นจะเป็นมุมหลบ (Negative) หรือ มุมบวก (Positive) ก็ได้แล้วแต่การออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-8 แสดงทิศทางการป้อนชิ้นงานกัด

การประกอบมีดกัด (Milling Cutting) เข้ากับเฟลา ถ้าประกอบผิดจะทำให้เกิดผลเสียต่อการทำงาน เมื่อเปิดเครื่องทำให้มีดกัดเดินหมุนตัดเนื้องานแต่จะเกิดการสะดุดแตกหัก การเริ่มต้นงานกัดไม่ควรใช้วิธีการกัดแบบกัดตาม ควรใช้วิธีการกัดแบบสวนทางขณะเริ่มกัดชิ้นงาน นอกจากนี้การประกอบมีดเข้ากับเฟลา จะต้องคำนึงถึงระยะห่างมีดกัดกับโครงเครื่อง ถ้ามีความจำเป็นให้ใช้แขนประคอง (Over Arm) เข้าช่วย และลักษณะของคมกัดยังมีบทบาทต่อการประกอบ และทิศทางการหมุนกัด ซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องพิจารณาการประกอบมีดกัดให้เหมาะสม

ในขณะเดียวกัน มีดกัดตั้งก็มีอิทธิพลต่อการกัดเนื้องานตามลักษณะของคมตัดเช่น จะต้องเปิดให้หมุนซ้ายหรือขวา แรงดันที่เกิดขึ้นจะต้องดันเข้าเฟลาเครื่องเสมอ มีดกัดจะไม่หมุนหลุดออกจากเฟลาเครื่อง

แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดเฉือนของมีดกัดจะเกิดในลักษณะต่างๆ ตามลักษณะของคมตัดและทิศทางการหมุนของมีดกัด ในขณะเดียวกันจะมีแรงต้านกลับที่เกิดจากความแข็งและเหนียวของเนื้อวัสดุงาน และแรงต้านกลับนี้จะน้อยกว่าแรงกระทำ จึงเกิดการตัดเฉือนขึ้นได้ คมตัดของมีดกัดจะมีความแข็งแรงและคมพอที่จะตัดเฉือนเนื้องานออกมาได้ ทิศทางการทำงานของมีดกัดนอนแบบกัดตามที่จะทำให้เกิดแรงต่างๆ ที่กระทำกับมีดกัดและเนื้อวัสดุงานในแนวเส้นรอบวงและเฉพาะจุดที่ปลายคมตัด แรงนี้จะเป็นตัวทำให้อายุของคมมีดกัดสั้นลง ซึ่งผู้ผลิตจะต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้วัสดุของมีดกัดให้เหมาะสมกับงาน

2.3 การคำนวณงานกัด

2.3.1 การคำนวณความเร็วรอบของมีดกัด

$$N = \frac{V \times 1000}{\pi \cdot d} \quad (2-1)$$

เมื่อ	N	=	ความเร็วรอบของมีดกัด	รอบ/นาที
	V	=	ความเร็วกัดของมีดกัด	เมตร/นาที
	d	=	ขนาดของมีดกัด	มิลลิเมตร

การคำนวณในการตั้งความเร็วรอบการหมุนของมีดกัด ค่าความเร็วรอบในการกัดจะหาได้จากสูตรการคำนวณความเร็วรอบของมีดกัดตามสมการที่ 2-1 ซึ่งค่าความเร็วรอบของมีดกัดจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วกัดของมีดกัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัด

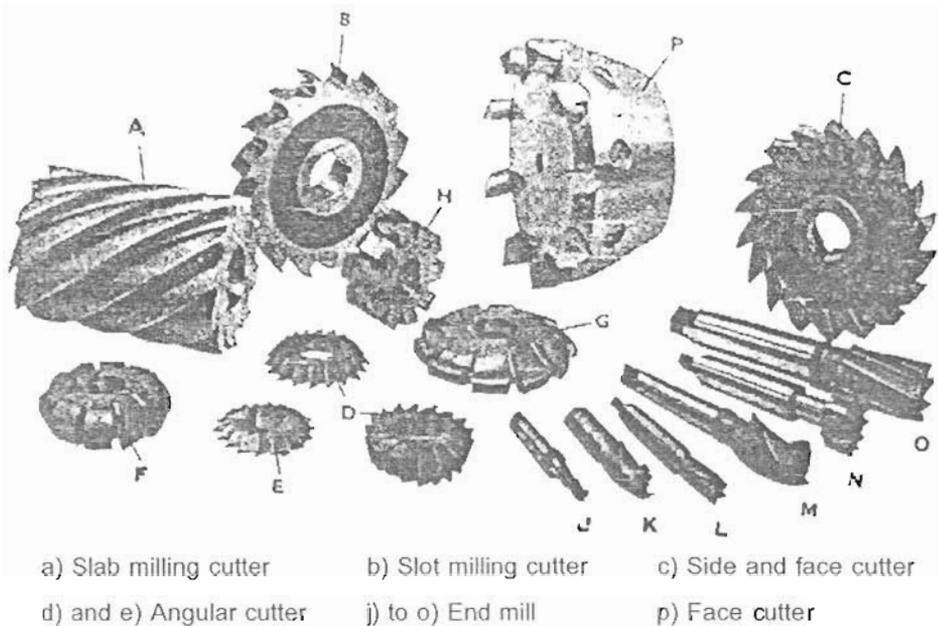
2.3.2 การคำนวณช่วงอัตราป้อนของมีดกัด (V_f)

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2-2)$$

เมื่อ	V_f	=	อัตราป้อน	มิลลิเมตร/นาที
	f_z	=	อัตราป้อนต่อคมตัด	มิลลิเมตร/ฟัน
	Z	=	จำนวนฟันของมีดกัด	
	N	=	ความเร็วรอบ	รอบ/นาที

2.4 ชนิดของมีดกัด

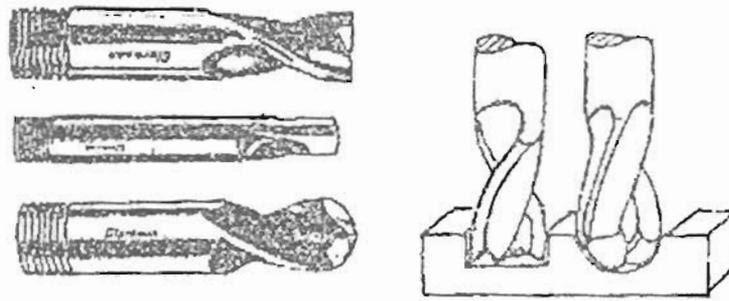
มีดกัดส่วนใหญ่จะจำแนกตามลักษณะของการทำงานของเครื่องกัด แบ่งออกเป็น 2 แบบ เครื่องกัดในแนวนอน มีดกัดจะสวมอยู่กับเพลลาทำให้มีรูสวมตรงกลาง (Hole Cutter) และเครื่องกัดในแนวตั้งมีดกัดจะมีลักษณะเป็นก้าน (Shank Cutter) จับยึดกับหัวจับ



ภาพที่ 2-9 แสดงลักษณะรูปแบบของมิลด์กัด

มิลด์กัดแบบมีก้านสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบคือ แบบก้านแท่งตัน และแบบสวม ประกอบกับชุดหัวจับมิลด์ มิลด์กัดแบบมีก้านสามารถใช้กับเครื่องกัดนอนได้เช่นเดียวกัน โดยถอดเพลาจับมิลด์หมุนออกแล้วใช้ชุดจับหัวมิลด์ที่มีก้านเรียวยาวตามมาตรฐานเรียวยาวของเครื่องสวมเข้าไปในรูเพลาแล้วยึดติดให้แน่น มิลด์กัดแบบมีก้านสามารถแบ่งออกหลายชนิด ดังนี้ มิลด์กัด (End Mill) มิลด์กัดฟันสองคม (Slot Drill) มิลด์กัดร่องตัวที (Tee Slot Cutter) เป็นต้น

มิลด์กัดฟันสองคม ลักษณะทั่วไปคล้ายดอกสว่านมากกว่ามิลด์กัด มีวัตถุประสงค์สำหรับใช้กัดร่องลิ้ม (Key Way) โดยเฉพาะร่องลิ้มจะมีขนาดพิทช์ P9 ซึ่งเป็นพิทช์ลบ ตัว Slot Drill เองจึงมีพิทช์เป็นลบ คือ e8 ลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งของ Slot Drill คือ มีคมถึงจุดศูนย์กลางที่เรียกว่า Center Cutting เพื่อที่สามารถกินลึกได้เท่าที่ต้องการในครั้งเดียวที่เรียกว่า Plunge Feed เพราะร่องลิ้มจะต้องมีพิทช์เป็นลบดังที่กล่าวแล้ว การกัดจะต้องเดินครั้งเดียว หากเดินกลับไปมาหลายครั้งจะทำให้ร่องลิ้มหลวม หากลิ้มหลวมกับร่องแล้วเมื่อใส่ลิ้มเข้าไปในร่องแล้ว ลิ้มอาจจะหลุดและจะทำให้ทั้งร่องและลิ้มชำรุดเสียหายได้ เอ็นมิลล์ 4 คม อาจจะมีมากกว่า 4 คม ได้ตามความโต เป็นมิลด์กัดที่ใช้กัดงานทั่วไปเช่นที่ไม่กำหนดค่าพิทช์ของงาน เช่น การกัดร่องทั่วไป การกัดขอบ (Profile Milling) การกัดหลุมในชิ้นงาน (Pocket Milling) แต่เดิมเอ็นมิลล์จะมีรูยันศูนย์กลาง (Center Drill Hole) เพื่อยันศูนย์กลางในกระบวนการผลิตและรอยเว้า (End Recess) ที่หน้าตัดเพื่อคั่นคมไม่ให้บรรจบกันตรงจุดศูนย์กลาง เพื่อให้การลับคมที่ด้านปลายง่ายขึ้น ลักษณะดังกล่าวทำให้เอ็นมิลล์ไม่สามารถกินลึกแบบ Plunge Feed ได้เพราะจะติดเนื้อวัสดุที่ไม่ถูกตัดตรงจุดศูนย์กลางอัดติดในรูยันศูนย์กลาง ต้องป้อนงานไปทางด้านข้างเพื่อให้เนื้อวัสดุตรงจุดศูนย์กลางถูกตัดออกไปก่อนจึงจะกินลึกต่อไปได้อีกขนาดพิทช์ของ End Mill คือ k10



ภาพที่ 2-10 แสดงลักษณะคมตัด

มีดกัดฟันสองคมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ คมตัดบิดเอียง (Helical Fluter) ใช้งานเหมือนกับเอ็นมิลล์และใช้กัดร่องลึ้มขนาดที่ใช้ 2-50 มม. คมตัดยาว (Straight Fluter) ใช้ตัดโลหะค่อนข้างแข็งและบรอนซ์ เพราะมีคมตัดแข็งแรงมากและใช้กัดร่องลึ้มขนาดใช้งาน 2-40 มม. คมตัดปลายโค้งมน (Ball End Mill) ใช้ตัดร่องส่วนลึกโค้งมน มีลักษณะเป็นปลายรูปครึ่งวงกลมในงานแม่พิมพ์ขนาดใช้งาน 3-38 มม.

2.5 วัสดุเอ็นมิลล์และรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

วัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานทั่วไป มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตทั้งระบบ วัสดุเครื่องมือตัดและรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือตัดที่เลือกใช้สำหรับการตัดเฉือน มีความสัมพันธ์กับวัสดุชิ้นงาน กลศาสตร์การตัดเฉือนและเครื่องมือกล วัสดุเครื่องมือตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดเฉือนมีส่วนสำคัญและสอดคล้องกันสองส่วน คือ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการสึกหรอเนื่องจากการขัดขีด (Abrasive) และความต้านทานต่อการแตกร้าว (Resistance to Brittle Fracture) ในปัจจุบันมีการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้ความเปราะน้อยลง และทำให้มีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวัสดุสำหรับการผลิตเครื่องมือตัดอย่างต่อเนื่อง ทั้งที่เป็นเหล็กกล้ารอบสูง (HSS) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และไททาเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide) ซึ่งเป็นการผลิตเครื่องมือตัดจากวัสดุทั้งชิ้น (Solid Tools) การผลิตเอ็นมิลล์สำหรับการตัดเฉือนมีการศึกษาและวิจัยโดยตลอดและในปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนามากขึ้น

2.5.1 แนวทางการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เอ็นมิลล์สำหรับงานกัดโดยทั่วไป การกัดเฉือนโลหะชนิดต่างๆ การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์จะต้องพิจารณาจากตัวแปรต่างๆ เช่น วัสดุชิ้นงาน วัสดุเอ็นมิลล์ คุณภาพชิ้นงานที่ทำการผลิตอัตราปริมาณการตัดเฉือน เงื่อนไขการตัดเฉือน การกำหนดขนาดของเอ็นมิลล์ รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เช่น มุมคายเศษ มุมเฉียงและมุมหลบ เป็นต้น มุมคายเศษของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง จะอยู่ในช่วง 8-20 องศา มุมเฉียงอยู่ในช่วง 25-35 องศา มุมหลบแนวรัศมีอยู่ในช่วง 5-20 องศา

มุมหลบปลายมีดอยู่ในช่วง 3-7 องศา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนและเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการผลิตจะมีหลายลักษณะ เช่น เอ็นมิลล์ประเภทที่มีด้ามตรง (Straight Shank) และด้ามเรียว (Taper Shank) จำนวนคมตัดของเอ็นมิลล์ (Number Tooth of End Mill) สามารถออกแบบและผลิตหลายๆ แบบตั้งแต่คมตัดเดี่ยว (Single Point Tool) และหลายๆ คมตัด (Multiple Teeth) ได้กำหนดให้เอ็นมิลล์ที่มีมุมเฉียง (Helix Angle) เท่ากับ 30 องศา สามารถคำนวณหาจำนวนคมตัดของเอ็นมิลล์ที่ใช้ตัดเฉือนเหล็กกล้าทั่วไป ดังสมการที่ 2-4

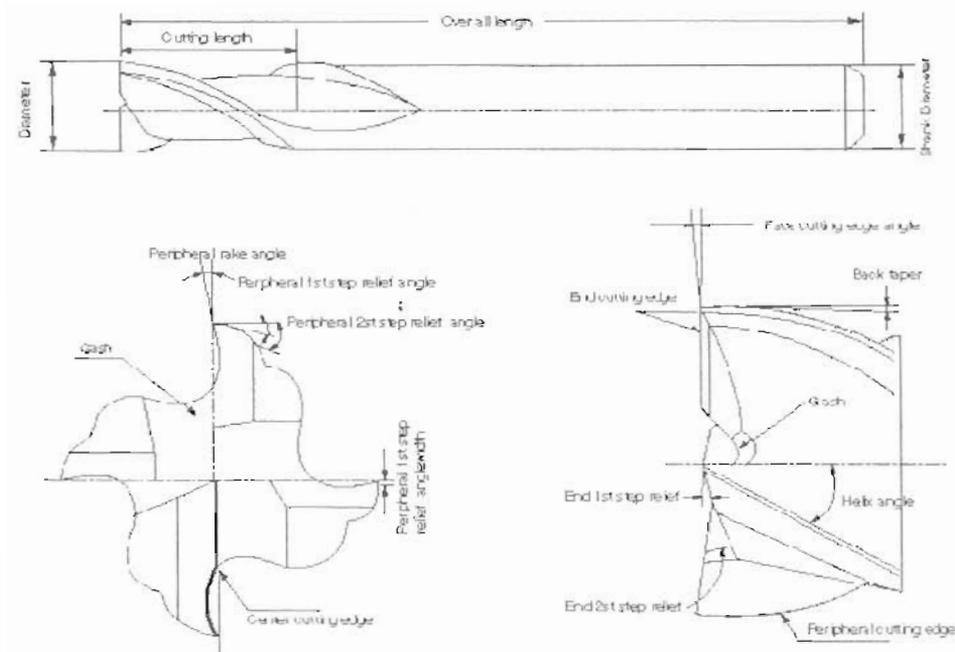
$$Z = \sqrt{D} \quad (2-4)$$

Z = จำนวนคมตัด

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็นมิลล์

การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง สำหรับการตัดเฉือนวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นโลหะกลุ่มเหล็กและไม่ใช่เหล็กมีรายละเอียดในส่วนต่างๆ บริเวณคมตัดตามรูปทรงเรขาคณิตดังแสดงในภาพที่ 2-11 พร้อมรายละเอียดในตารางที่ 2-2 ส่วนที่สำคัญนอกเหนือจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็นมิลล์ และความยาวช่วงคมตัดแล้วขนาดต่างๆ บริเวณคมตัดมีผลต่อประสิทธิภาพการตัดเฉือน ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่

1. มุมคายเศษในแนวรัศมี (Radial Rake Angle)
2. มุมคายเศษในแนวแกน (Axial Rake Angle)
3. มุมหลบเศษในแนวรัศมี (Radial Relief Angle)
4. มุมหลบเศษในแนวแกน (Axial Relief Angle)
5. มุมเอียงของคมตัดด้านปลายมีด (End Cutting Edge Concavity Angle)
6. มุมหลบหลักในแนวรัศมี (Primary Relief Angle)
7. มุมหลบรองในแนวรัศมี หรือมุมหลบ (Secondary Relief Angle)



ภาพที่ 2-11 แสดงการกำหนดส่วนต่างๆ บริเวณคมตัดเอ็นมิลล์

รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.6-102 มม. (1/16-4 นิ้ว) ขนาดที่ต่างไปจากที่กำหนด มีการนำมาใช้เหมือนกันแต่เป็นกรณีพิเศษโดยขึ้นอยู่กับอุตสาหกรรมการผลิตและลักษณะการตัดเฉือนแต่ละแบบ เอ็นมิลล์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 50 มิลลิเมตร โดยปกติจะผลิตจากเหล็กเครื่องทั้งชิ้น (Solid Tool Steels) แต่ถ้าเอ็นมิลล์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร จะผลิตเป็นแผ่นคมมีดชิ้นเล็กๆ (Insert) เพื่อประกอบเข้ากับด้ามมีด (Holder) สามารถทำได้ทั้งเหล็กกล้ารอบสูงและคาร์ไบด์เอ็นมิลล์ โดยปกติจะกำหนดมุมคายเศษจาก 0 องศาขึ้นไปเป็นมุมบวก (Positive) และมุมคายเศษในแนวแกนจะกำหนดเป็นมุมบวกเช่นกัน ในที่นี้มุมคายเศษในแนวแกนจะมีค่าเท่ากับมุมเฉียงหรือมุมเกลียว การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหลบมุมฟรี และมุมคายเศษ การกำหนดรายละเอียดในส่วนต่างๆ ของเอ็นมิลล์นั้น ขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้งานในแต่ละลักษณะการตัดเฉือนตามแต่ละเงื่อนไข เช่น วัสดุชิ้นงานที่ต่างกัน เป็นต้น การกำหนดขอบเขตงานต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปการออกแบบลักษณะของเอ็นมิลล์ต้องกำหนดทิศทางกรไหลของเศษตัด และหาค่าต่ำสุดที่แน่นอนไว้สำหรับการตัดเฉือนด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน การกำหนดร่องฟัน (Flute) ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบเอ็นมิลล์ เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2-2 แสดงข้อกำหนดต่างๆ ของเอ็นมิลล์กับการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานแต่ละชนิด

วัสดุชิ้นงาน	ความแข็ง ชิ้นงาน (HB)	มุมเอียง (องศา)	มุมคาย เศษ (องศา)	มุมหลบ ปลายมีด (องศา)	มุมหลบ แนวแกน (องศา)	มุมหลบ แนวรัศมี (องศา)
เหล็กเหนียว เหล็กกล้า คาร์บอนปานกลาง	85 ถึง 325	30	10 ถึง 20	3	3 ถึง 7	A
เหล็กกล้าผสม		30		3	3 ถึง 7	A
เหล็กกล้าเครื่องมือ	25 ถึง 56	30	10 ถึง 20	3	3 ถึง 7	A
HRC						
เหล็กกล้าไร้สนิม	135 ถึง 425	30		3	3 ถึง 7	A
เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อ						
เหนียว	100 ถึง 400	30		3	3 ถึง 7	A
อลูมิเนียม	30 ถึง 150	30 ถึง 45	15 ถึง 20	5	8 ถึง 12	B
ทองแดงผสม	40 ถึง 200	30	10 ถึง 20	5	8 ถึง 12	B
แมกนีเซียมผสม	40 ถึง 90	30 ถึง 45	15 ถึง 20	5	8 ถึง 12	B
ไททาเนียมผสม	110 ถึง 440	30	10	3	8 ถึง 12	B
มุมคายเศษแนวรัศมีของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง						
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	6	10	12	16	25	
A	12	11	10	9	8	
B	15	13	13	12	10	

2.5.2 ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) ความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงอายุการใช้งานของคมตัดที่สามารถตัดเฉือน และการคงรูปของคมตัดได้นาน การเสียหายของคมตัดจะทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง เครื่องมือตัดจะใช้งานต่อไปไม่ได้เมื่อชิ้นงานที่ผลิต ผลิตออกมาไม่อยู่ในพิสัยความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ เช่น ขนาดและผิวงาน เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับความสามารถในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ ประกอบด้วยเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เงื่อนไขในการตัดเฉือน ความเหมาะสมในการตัดเฉือนวัสดุงาน

ตารางที่ 2-3 แนวทางการเลือกใช้เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์

วัสดุชิ้นงาน (Materials)	เงื่อนไข (Condition)	ความลึก (Depth of cut) (มม.)	ความเร็วตัด (Speed) (ม. / นาที)	อัตราป้อน (มม. / ฟัน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)				
				10	12	18	25-50	
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง								
1030 1042	อบอ่อน	0.5	37	0.025	0.075	0.102	0.102	
1033 1043	(Annealed)							
1035 1044		1.5	27	0.05	0.102	0.13	0.130	
1037 1045		Dia./4	24	0.025	0.075	0.102	0.102	
1038 1046		Dia./2	15	0.025	0.050	0.075	0.075	
1039 1050								
1053 1055								
1525 1526								
1527								
เหล็กกล้าคาร์บอนผสม								
1330 4135	อบปกติ	0.5	26	0.018	0.038	0.075	0.102	
1335 4137	(Normalized)							
4027 4427		Dia./4	17	0.018	0.038	0.075	0.102	
4028 4626		Dia./2	15	0.013	0.025	0.05	0.075	
4032 5130								
4037 5132								
4130 5135								

2.5.3 การทดสอบการตัดเฉือน (Cutting Test) การทดสอบการตัดเฉือนโดยทั่วไป จะกำหนดการทดสอบให้เป็นไปตามเงื่อนไขการตัดเฉือนสำหรับการผลิตในงานอุตสาหกรรมจริง ซึ่งประกอบด้วย วัสดุชิ้นงาน เครื่องจักร ความเร็วตัด ความเร็วป้อน ความลึกในการตัดเฉือน และอื่นๆ ผลการตัดเฉือนที่ได้รับคือ คมตัดจะเกิดการสึกหรอและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางหรือเวลาในการตัดเฉือนมากขึ้น ผลเสียหายของคมตัดจะทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปและผิวงานมีความหยาบมากขึ้น รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัดและเงื่อนไขในการตัดเฉือนมีผลต่ออายุการใช้งานและการสึกหรอของเครื่องมือตัดตัวอย่าง เช่น ถ้าทำการทดสอบเหล็กกล้าอบสูงเกรด A ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าอบสูงเกรด B โดยพิจารณาส่วนต่างๆ ดังนี้ รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด คุณภาพของวัสดุทดสอบและคุณสมบัติทางโลหะวิทยา ทดสอบคุณสมบัติทางกล และทดสอบการตัดเฉือนภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมือนกัน เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ A และวัสดุ B แต่ความเร็วตัดและความเร็วป้อน ความลึกในการตัด จำนวนคมตัดและอุณหภูมิในการตัดคงที่และอยู่ภายใต้เงื่อนไขในการตัดเฉือนที่เหมือนกันการทดสอบการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดอาจจะใช้วิธี การตรวจสอบ

ระยะการสึกหรอของคมตัดหลังการตัดเฉือนชิ้นงานเมื่อระยะทางหรือเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งควรตรวจสอบในช่วงระยะทางในการตัดต่าง ๆ เพื่อเป็นการศึกษาสภาวะการตัดเฉือนและแนวโน้มของการเกิดการสึกหรอได้อย่างเหมาะสม

2.6 อายุการใช้งานและการสึกหรอของเครื่องมือตัด

การออกแบบเครื่องมือตัดให้มีรูปทรงทางเรขาคณิตของคมตัดที่ถูกต้องเหมาะสม เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอายุการใช้งาน และประสิทธิภาพของวัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือน ซึ่งนับได้ว่าเป็นมีความสำคัญมากกว่าการตัดเฉือนด้วยวิธีอื่น ในการใช้เครื่องมือตัดจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลับคมของเครื่องมือตัดให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงก่อนนำไปใช้งานในการตัดเฉือน จำเป็นที่จะต้องลับมุมต่างๆ ของเครื่องมือตัดก่อน แต่ถ้าเป็นวัสดุเครื่องมือตัดจำพวกคาร์ไบด์ (Carbide) และเซรามิก (Ceramic) ที่ผ่านการผลิตด้วยกรรมวิธีซินเตอริง (Sintering) จะขึ้นรูปเครื่องมือตัดสำหรับใช้งานให้อยู่ในรูปของเม็ดมีดอินเสิร์ต (Insert) ซึ่งไม่สามารถนำมาลับคมของเครื่องมือตัดได้ จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบมุมต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

2.6.1 สาเหตุสำคัญที่ทำให้เครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอ ในการทำงานทางด้านอุตสาหกรรม การผลิตที่จำเป็นต้องใช้วัสดุเครื่องมือตัดในการตัดเฉือนโลหะ โดยส่วนมากแล้วระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานจะส่งผลให้เครื่องมือเริ่มเกิดการเสียรูป แตกหัก หรือเกิดการสึกหรอจนทำให้เครื่องมือตัดชิ้นนั้นๆ ไม่สามารถทำการตัดเฉือนชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนในขณะการตัดเฉือน เนื่องจากคมของเครื่องมือเกิดการสึกหรอ ส่งผลให้ขนาดและผิวงานสำเร็จเปลี่ยนแปลงจากค่าพิถีพิถันที่กำหนด ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการตัดเฉือนจะต้องคอยสังเกตและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นในขณะทำการตัดเฉือน เพื่อเปลี่ยนวัสดุเครื่องมือตัดเมื่อหมดอายุการใช้งานก่อนที่จะเกิดการเสียหาย

2.6.1.1 การเสียรูป (Plastic deformation) ของเครื่องมือตัดภายใต้ความร้อน จะเกิดการเสียรูปอย่างถาวรของเครื่องมือตัดภายใต้ความเค้นกด การเสียรูปของเครื่องมือตัดบริเวณขอบคมตัด จะต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัติต่อการสึกหรอ การเสียรูปของเครื่องมือตัดไม่ใช่กระบวนการที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอที่ทำให้เนื้อวัสดุเครื่องมือตัดหลุดออกไป แต่การเสียรูปจะเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงความเค้น และความร้อนสะสมที่เพิ่มขึ้นในบริเวณที่วัสดุเกิดการไหลผ่านผิวคายเศษกลายเป็นเศษตัด ซึ่งจะมีส่วนในการเร่งกระบวนการสึกหรอของคมตัดส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดลดลง โดยปกติแล้วการเสียรูปไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณของคมตัดเท่านั้น การเสียรูปอย่างถาวรของคมตัดจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคมตัด (Nose) โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของมุมปลายมีด หรือรัศมีนปลายมีด (Nose Radius) ที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป การสึกหรอหรือการเสียรูปในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ปฏิกิริยาถูกลูโซ่ ความเค้น และความร้อนในขณะตัดเฉือนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เครื่องตัดเหล็กกล้า

รอบสูงเสียหายจนอาจจะทำให้วัสดุเครื่องมือตัดแตกหักเสียหาย เนื่องจากในบริเวณที่รับความเค้นและความร้อนสะสมมากๆ จะทำให้คุณสมบัติทางด้านความเหนียวของวัสดุเครื่องมือตัดลดลง แนวโน้มที่จะทำให้วัสดุเครื่องมือเกิดการเสียหาย หรือเสียรูปร่างอย่างถาวรขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของวัสดุที่มาทำการตัดเฉือน ถ้าวัสดุงานมีค่าความแข็งสูงก็จะส่งผลต่อการสึกหรอและเสียรูปของเครื่องมือตัดได้ง่าย ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุของเครื่องมือตัดเหล็กกล้ารอบสูง สำหรับใช้ในการตัดเฉือน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำหนดค่าความแข็งสูงสุดของชิ้นงานที่สามารถตัดเฉือนได้ และจะต้องตัดเฉือนด้วยสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น ตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดที่เหมาะสม และมีการหล่อเย็นขณะตัดเฉือน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง จะสามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่มีความแข็งได้ไม่เกิน 350 – 450 HV

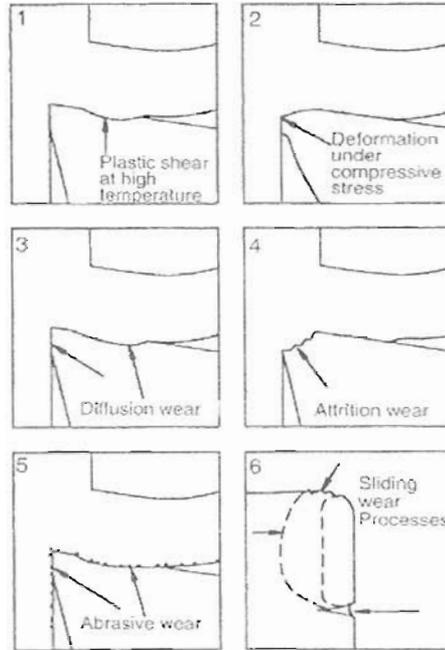
2.6.1.2 การสึกหรอแบบแพร่ซึม (Diffusion Wear) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเครื่องมือตัดด้วยเงื่อนไขการตัดเฉือนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน เป็นการแสดงถึงลักษณะของการเกิดการแพร่ซึมที่มีขึ้นระหว่างการสัมผัสของชิ้นงาน (เศษตัด) กับผิวคายเศษของเครื่องมือตัด เมื่อทำการตัดเฉือนเป็นระยะเวลานานจะทำให้ลักษณะของการแพร่ซึมนี้เกิดขึ้นเป็นการสึกหรอได้ เนื่องจากว่าบริเวณผิวคายเศษของเครื่องมือตัดได้รับความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้บริเวณผิวดังกล่าวอ่อนตัวลง อะตอมของวัสดุจึงสามารถทำปฏิกิริยากับผิวของเครื่องมือตัดส่งผลให้เกิดชั้นผิววัสดุงานหลอมติดกับผิวคายเศษของเครื่องมือตัด ทำให้คุณสมบัติทางด้านความแข็งของเครื่องมือตัดเปลี่ยนไป

2.6.1.3 การสึกหรอแบบขูดถูที่ทำให้เกิดจากการแตกหัก (Attrition Wear) การสึกหรอในลักษณะนี้ จะไม่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดและอุณหภูมิขณะตัดเฉือนต่ำ รวมไปถึงการสึกหรอแบบแพร่ซึม แต่จะเกิดการสึกหรอในลักษณะของการพอกของเศษตัดที่ปลายมีด (Built-up Edge) และมีการสัมผัสของเศษตัดแบบไม่ต่อเนื่องซ้ำๆ กันในตำแหน่งเดิม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการขูดถูบริเวณปลายมีดของคมตัดในลักษณะกระแทก ทำให้ปลายมีดเกิดการแตกหัก

2.6.1.4 การสึกหรอที่เกิดจากการขัดสี (Abrasive Wear) การสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการขัดสีสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง จะเกิดขึ้นจากการตัดเฉือนวัสดุที่มีความแข็ง โดยอนุภาคอะตอมของวัสดุงานมีความแข็งมากกว่าโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของวัสดุเครื่องมือตัด จึงทำให้อนุภาคที่แข็งของวัสดุงานขัดสีผิวคายเศษ และขอบคมตัดของเครื่องมือโดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กของวัสดุงานจะอยู่ในรูปของคาร์ไบด์ที่มีความแข็ง ซึ่งสามารถพบการสึกหรอแบบขูดถูนี้จากวัสดุจำพวกเหล็กหล่อโลหะผสมนิกเกิล ผลของการสึกหรอจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคมตัด (Flank Wear) และบริเวณผิวคายเศษ (Rack Wear)

2.6.1.5 การสึกหรอภายใต้สภาวะการสั่นไถลของเศษตัด การสึกหรอภายใต้สภาวะการสั่นไถลจะเกิดขึ้นกับเศษตัดพอกที่ปลายมีด จึงทำให้พื้นที่สัมผัสของเศษตัดกับผิวคายเศษเกิดขึ้นในบริเวณถัดจากพื้นที่ที่มีการพอกของเศษตัด และส่งผลการสั่นไถลของพื้นที่

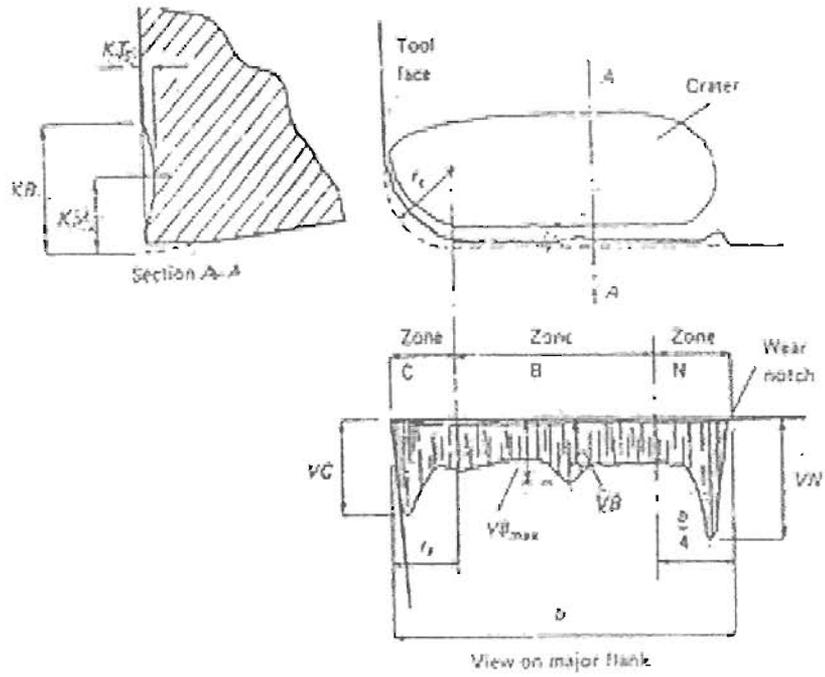
สัมผัสนี้จะทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวคายเศษ และผิวหน้าของเครื่องมือตัดเหล็กกล้ารอบสูงเป็นร่องลึก การป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการสึกหรอดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารหล่อเย็นในขณะตัดเฉือนโลหะ



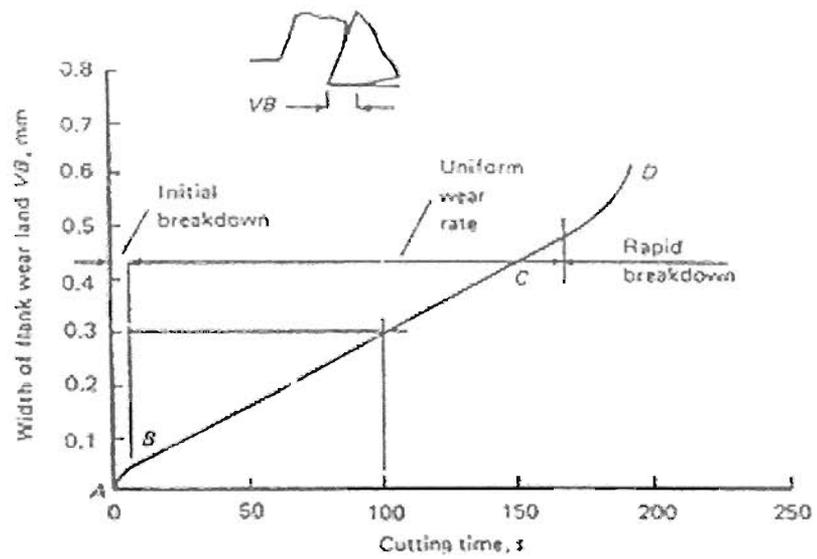
ภาพที่ 2-12 ชนิดของการเสียรูปการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าเครื่องรอบสูง

2.6.2 การสึกหรอของเครื่องมือตัด สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

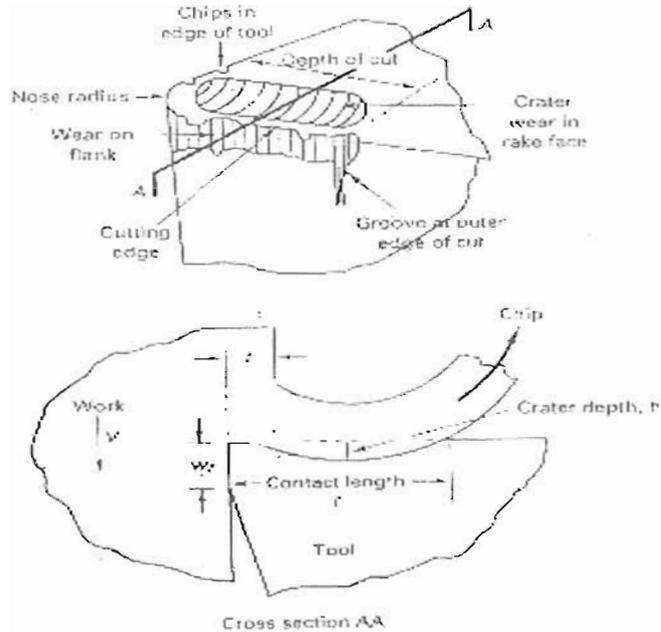
2.6.2.1 การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank Wear) สาเหตุเกิดจากผิวหลบของเครื่องมือตัดเกิดการขัดสีกับชิ้นงานขณะตัดเฉือน การสึกหรอในกรณีนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด การเลือกใช้ความเร็วตัดและความเร็วป้อน การสึกหรอที่ผิวหลบจะเพิ่มขึ้นถ้าเงื่อนไขการตัดเฉือนไม่เหมาะสม การสึกหรอที่ผิวหลบของเครื่องมือตัดสามารถตรวจสอบได้ด้วยการวัดความกว้างของการสึกหรอ (VB) เมื่อเวลาในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นหรือระยะทางในการตัดเฉือนมากขึ้นการสึกหรอจะมากขึ้นดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-13 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของคมตัด



ภาพที่ 2-14 กราฟแสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของคมตัด

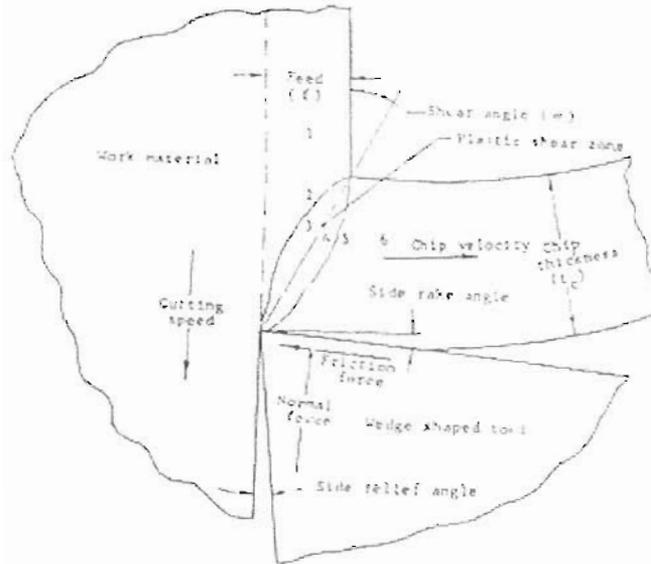


ภาพที่ 2-15 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบและผิวคายเศษ

2.6.2.2 การสึกหรอที่ผิวคายเศษ (Crater Wear) เป็นการสึกหรอเนื่องจากหลาย ๆ สาเหตุประกอบกัน องค์ประกอบที่สำคัญทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวคายเศษประกอบด้วย การขูดขีด (Abrasion) การยึดติด (Adhesion) และการแพร่ (Diffusion) การสึกหรอที่ผิวคายเศษเกิดจากการเสียดสีของเศษตัดกับผิวคายเศษทำให้เกิดอุณหภูมิและการเสียดทานเพิ่มขึ้น ลักษณะการสึกหรอเนื่องจากสาเหตุการเสียดทานดังแสดงในภาพที่ 2-15 ซึ่งจะแสดงลักษณะของการสึกหรอที่ผิวคายเศษมีลักษณะเป็นแอ่ง (Crater) และจะเกิดขึ้นห่างจากขอบของคมตัด (Cutting Edge) เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะส่งผลให้ขอบตัดมีค่าความแข็งแรงลดลง เนื่องจากปริมาณความร้อนสะสมแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนทำให้ผิวคายเศษ และผิวหลบของเครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเศษตัดและชิ้นงานในขณะที่ทำการตัด เศษตัดจะเคลื่อนที่ออกจากบริเวณการตัดอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานจะเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวหลบทำให้เกิดการเสียดทานจากการสัมผัสของทั้งสองส่วนจะมากขึ้น อุณหภูมิการตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุ ส่งผลให้เกิดการสึกหรอตามมา สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเคลื่อนที่และการเสียดทาน การเกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตมาก เงื่อนไขการตัดเฉือนส่งผลให้เกิดการสึกหรอประกอบด้วย ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ความเร็วตัด (Cutting Velocity) และอัตราป้อน (Feed Rate) เป็นต้น ดังนั้นก่อนการตัดเฉือนจำเป็นต้องพิจารณาถึงวัสดุที่จะทำการตัดเฉือนด้วย จึงมีการผลิตเครื่องมือตัดหลายรูปแบบเพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการเลือกชนิดของวัสดุเครื่องมือตัดที่เหมาะสมและชนิดของการหล่อเย็น (Cutting Fluid) เป็นต้น

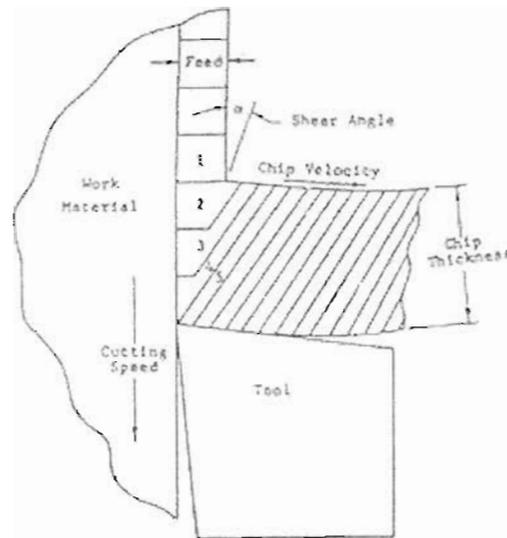
2.7 การวิเคราะห์การตัดเฉือนโลหะ (Shear Analysis of Metal Cutting)

ในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน การวิเคราะห์เศษตัดที่ตัดออกมาซึ่งงานแสดงให้เห็นว่า เศษตัดแสดงออกถึงสภาวะที่แตกต่างกันของความเค้น เศษตัดที่ถูกตัดออกจากชิ้นงานจะเคลื่อนตัวจาก Unstrained State และเพิ่มขึ้นถึงจุด Yield Point และเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะ Plastic Deformation ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรตามแรงเฉือน ดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 แสดงลักษณะการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นของคมตัด

ผลรวมของแรงที่กระทำต่อเศษตัดสามารถแยกได้ 2 แรง คือ แรงที่กระทำบนเศษในทิศทางตั้งฉากกับผิวเครื่องมือและแรงตั้งฉากกับระนาบแรงเฉือน จากจุดที่ 1 แสดงถึงชิ้นงานในสภาวะไม่มีแรงเค้นจนถึงจุดที่ 2 ซึ่งชิ้นงานเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่จุด Elastic limit-Plastic Deformation และเมื่อตัดเฉือนถึงจุดที่ 3 และจุดที่ 4 ใน Plastic Shear Zone ชิ้นงานเกิดแรงเค้นจนถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นเศษเศษ และในระหว่างการไหลจะเกิดการเสียดสีทำให้วัสดุต้องรับแรงมากขึ้น จุดที่ 5 แสดงให้เห็นเศษตัดไหลออกมาจากบริเวณแรงเฉือน และจุดนี้เศษตัดจะมีความแข็งแรงมาก เครื่องมือตัดจะใช้แรงมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิบริเวณที่ทำการตัดเฉือนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของเครื่องมือตัด เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของเศษตัดบนชิ้นงาน นอกจากนี้เศษตัดมีความหนา มากกว่าอัตราป้อน และเมื่อพิจารณาถึง จุดที่ 6 จะพบว่าเศษตัดเคลื่อนที่จากปลายมีดกัดไปตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ซึ่งตรงจุดนี้ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของวัสดุ ดังนั้นเศษตัดจะมีความแข็งแรงมาก และทำให้ต้องใช้แรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความยืดหยุ่นและความเหนียวของเศษตัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณของวัสดุที่ไม่ถูกตัด

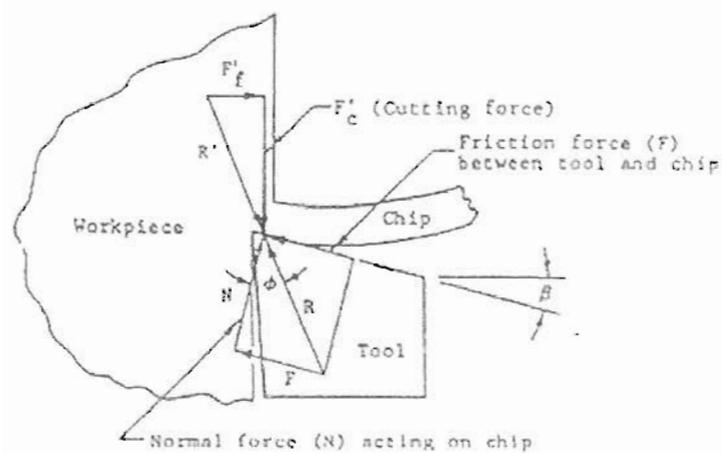


ภาพที่ 2-17 แสดงแบบจำลองของเครื่องมือตัดแบบระนาบมุมฉาก

ลักษณะรูปร่างของการตัดเฉือนในระนาบมุมฉาก (Orthogonal Tool) ซึ่งขอบตัดจะตั้งฉากกับทิศทางการตัด จะทำให้ภาคตัดของเศษตัดไม่ได้อยู่ในรูปของสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากว่าเศษตัดจะถูกบังคับทิศทางไหลด้วยผิวคายเศษ จึงทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่นเดียวกับรูปร่างของเศษตัดที่เคลื่อนที่ออกไปทางด้านข้าง ซึ่งความกว้างสูงสุดของเศษตัดที่ได้จะมีค่าเท่ากับระยะป้อนลึก โดยปกติเศษที่ได้จากการตัดจะมีลักษณะมันเรียบ และไหลตัวออกทางด้านข้าง จึงพบว่าผิวด้านบนของเศษมีความขรุขระเสมอ

การเปลี่ยนรูปของเศษจะทำให้เกิดการอัดตัวของผิวเครื่องมือกับตัวเศษ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแรงเสียดทาน ดังนั้นแรงที่ต้องใช้ในการตัดโลหะจะต้องสามารถเอาชนะทั้งแรงเฉือนและแรงเสียดทาน ในแบบจำลองของการตัดในรูปแบบนี้จะกำหนดให้เครื่องมือถูกยึดนิ่งในขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ไม่ว่าในทิศทางใด โดยสถานะของความเค้นก่อนและหลังระนาบเฉือนจะเป็นการไหลแบบพลาสติกที่ซับซ้อนของโลหะเสมอ ระนาบเฉียง ϕ ถูกกำหนดโดยมุมคาย (Rake Angle) ของเครื่องมือและโดยแรงเสียดทานระหว่างเศษผิวหน้าของเครื่องมือ แรงที่กระทำบนเศษได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-18 ดังลำดับต่อไปนี้

- N = แรงที่กระทำบนเศษในทิศทางตั้งฉากกับผิวเครื่องมือ
- F = ความต้านทานจากแรงเสียดทานจากการที่เครื่องมือทำให้เกิดแรง N กับเศษ โดยจะกระทำที่ตัวเศษขณะที่มันเคลื่อนไปตามผิวหน้าของเครื่องมือ
- F_t = แรงในแนวตั้งหรือแนวสัมผัสที่ยึดเครื่องมือตัดไว้กับชิ้นงาน
- F_c = แรงในแนวนอนหรือแรงของการตัด

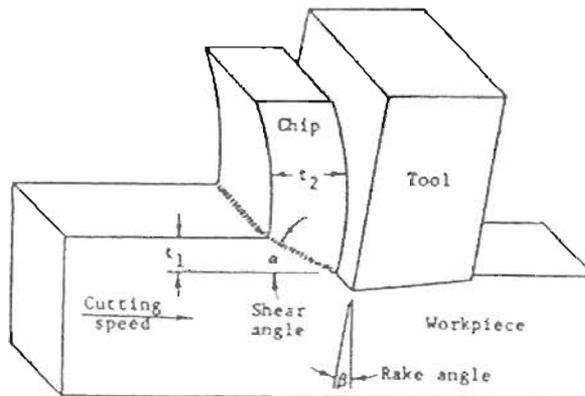


ภาพที่ 2-18 แสดงแรงที่กระทำบริเวณที่เกิดการตัดเฉือน

แรงเฉือนของมุมระนาบเฉือน เป็นผลมาจากแรงเสียดทานของเศษที่มีต่อผิวหน้าของเครื่องมือโดยแรงเสียดทานนี้จะเปลี่ยนไปตามความเรียบและความคมของเครื่องมือ การใช้สารหล่อเย็น วัสดุใช้ทำเครื่องมือและชิ้นงาน อัตราเร็วของการตัดรวมทั้งรูปร่างของเครื่องมือ แรงเสียดทานจะมีค่าสูงที่เกิดขึ้นกับการตัดเศษตัดขนาดใหญ่และมีค่ามุมเฉือนต่ำ ในขณะที่จะมีค่าต่ำเมื่อทำการตัดเศษตัดขนาดเล็กลงและมุมแปรกลับทงในข้างต้น โดยประสิทธิภาพการตัดเศษจะแปรผกผันกับแรงเสียดทาน

โดยทั่วไปแล้ว ค่าเฉลี่ยความหนาของเศษตัดเป็นตัวแปรที่สำคัญ เศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือนส่วนใหญ่แล้วสังเกตว่ามีความบาง เนื่องจากอัตราป้อนในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงกำหนดความหนาของเศษตัดเศษตัด (t_2) มีค่าเท่ากับอัตราป้อน ดังแสดงในภาพที่ 2-18 เพราะฉะนั้นจะสามารถให้ค่าจำกัดความของอัตราส่วนของเศษตัดก่อนตัดและหลังตัดว่า $ra = t_2 / t_1$ โดยที่ $ra < 1$ ความหนาของเศษตัดไม่ถูกกำหนดโดยเครื่องมือตัดหรือความเหนียวของโลหะ แต่จะกำหนดได้ด้วยอัตราป้อนและระยะป้อนลึก

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาอยู่เสมอนั้นคือ อัตราส่วนของเศษตัด (ra) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.5 นอกจากนี้ ความหนาของเศษตัดยังสัมพันธ์กับมุมคายเศษ (Rake Angle) และมุมเฉือน (Shear Plan Angle) ระนาบเฉือนจะเกิดขึ้นโดยทำมุมระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน และระนาบเฉือนจากขอบของเครื่องมือตัดเมื่อเศษได้ไหลผ่านผิวคายเศษ



ภาพที่ 2-19 แสดงถึงลักษณะการตัดเฉือนของชิ้นงานและคมตัด

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{ra \times \cos \beta}{1 - (ra \times \sin \beta)} \right) \quad (2-5)$$

$$ra = \frac{f}{t}$$

เมื่อ f = อัตราป้อนต่อคมตัด มิลลิเมตร/ฟัน
 t = ความหนาเศษตัดเฉลี่ย มิลลิเมตร
 β = มุมคายของมีดกัด
 Ra = อัตราส่วนของเศษตัด

2.7.1 เศษตัดที่กระทำบนผิวของเครื่องมือตัด รูปแบบของเศษตัดที่กระทำที่ผิวของมีดตัดจะเป็นการเคลื่อนที่ไหลผ่านของเศษตัดที่เคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษ ซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction Force) ขึ้นระหว่างเศษตัดและผิวคายเศษของมีดตัด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อคุณภาพของผิวงานที่ได้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของเศษตัด ในการทดลองหาความเสียดทานจากการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่ามีความเกี่ยวข้องกับแรงที่กระทำที่คมมีดตัด แรงเสียดทานที่กล่าวถึงในทางวิศวกรรมเครื่องกล เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2-6)$$

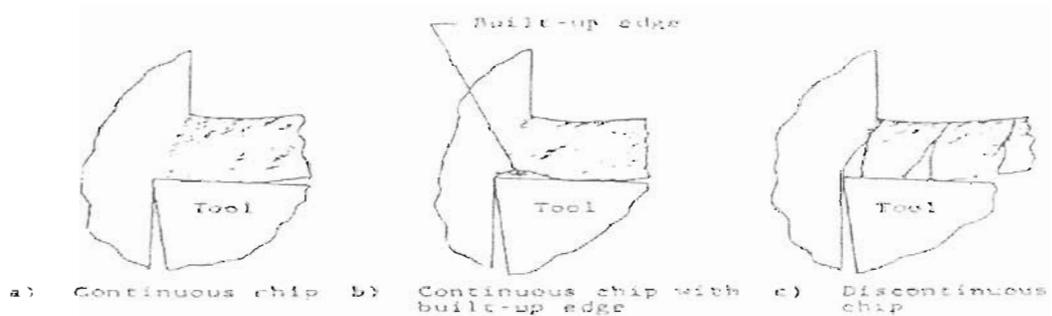
F = แรงเสียดทาน

N = แรงกระทำที่มีดในทิศทางตั้งฉากกับแรงเสียดทาน

จากสมการที่ 2-6 สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานถูกกำหนดที่ผิวหน้าในงานตัดโลหะ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผิวสัมผัสของคมมีด ดังนั้นเป็นผลมาจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นต่อกันระหว่างเศษตัดกับผิวมีดตัด อัตราป้อนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เศษตัดออกมากเกินไป ซึ่งมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอุณหภูมิของเศษตัดก็มีผลเช่นกัน เมื่อมีการใช้ค่าความเร็วรอบต่ำโดยการเคลื่อนที่ปกติ

2.7.2 ลักษณะของเศษกัด (Chip Formation) เครื่องจักรที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตมีความสำคัญต่อค่าดัชนีทางเศรษฐศาสตร์ เช่น อัตราการผลิตต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต้นทุนต่อหน่วย อัตราผลกำไรต่อหน่วยเวลา ทำให้มีผลการศึกษาต่างๆ ที่ครอบคลุมเกี่ยวกับการตัดเฉือน ซึ่งเป็นองค์ประกอบต่อการตัดสินใจ เช่น ความเร็วตัด ความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น ซึ่งล้วนมีผลต่อการตัดสินใจเปลี่ยนเครื่องมือตัดของผู้ผลิต

ภายใต้ความแตกต่างของเงื่อนไขการตัดเฉือนต่างๆ เช่น ความลึกของการกัด วัสดุชิ้นงาน มุมคาย สามารถจำแนกชนิดของเศษตัดได้ 3 ประเภท คือ เศษตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous) เศษตัดแบบต่อเนื่องซึ่งเกิดการหลอมละลาย (Build-up-edge) และเศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous)



ภาพที่ 2-20 แสดงลักษณะของเศษกัด

เศษตัดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2-20 (a) พบได้จากการตัดปาดวัสดุเหนียวที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ เช่น อลูมิเนียมและทองแดง จะทำให้ผิวสำเร็จมีคุณภาพดีกว่า เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่องและทำให้เครื่องมือมีอายุการใช้งานนาน

เศษตัดแบบต่อเนื่องเกิดการหลอมละลาย ดังแสดงในภาพที่ 2-20 (b) เป็นเศษตัดจากการตัดปาดวัสดุเหนียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงมาก ซึ่งลักษณะนี้ขณะทำการตัดจะมีการก่อตัวของโลหะขึ้นที่ด้านหน้าของขอบตัด และสำหรับวัสดุบางชนิดอาจมีการเชื่อมขึ้นที่บนจุดตัดของเครื่องมือได้ โดยบริเวณที่มีลักษณะดังกล่าวเรียกว่าขอบก่อนูน (Build-up-edge) หรือ BUE เมื่อการตัดดำเนินต่อไปแนวทางการไหลของเศษตัดจะมีทิศทางไปตามขอบก่อนูน

และหน้าของเครื่องมือตัด ส่วนขอบก่อนจะเกิดการแยกตัวออกเป็นระยะจากนั้นจะหลุดออกไปพร้อมกับเศษตัดหรือฝังด่วนผิวหน้าของมีดกัด เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ความเรียบของผิวหน้าไม่สม่ำเสมอ เช่น เศษตัดแบบต่อเนื่อง BUE จะก่อตัวขึ้นอย่างสม่ำเสมอระหว่างการตัด และจะมีผลให้มุมคายเปลี่ยนแปลงไปบ้างอย่างไรก็ตามขนาดของ BUE จะลดลงโดยการเพิ่มอัตราเร็วตัด ลดความหนาของเศษตัด หรือเพิ่มมุมคาย เมื่อขนาดของ BUE ลดลงทำให้ผิวสำเร็จมีคุณภาพดีขึ้น ทว่าการเพิ่มหรือลดตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ยังไม่สามารถขจัด BUE ได้หมดสิ้นในวัสดุเหนียวบางประเภท

เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2-20 (c) พบได้จากการตัดปาดวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อและทองเหลือง โดยในการปฏิบัติจะได้คมตัดเรียบในขณะที่เศษตัดไม่เป็นระเบียบผิวสำเร็จที่ได้ปานกลางและอายุการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างยาวนาน ซึ่งปกติแล้วความเสียหายของมีดจะเป็นผลจากการขัดสีบนผิวหน้าสัมผัสของเครื่องมือ อย่างไรก็ตามเศษตัดนี้อาจพบได้ในวัสดุเหนียวที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงซึ่งจะแสดงถึงสภาพการตัดที่ไม่เหมาะสม

2.8 เหล็กกล้าสำหรับการผลิตเครื่องมือตัด

เหล็กกล้าสำหรับผลิตเครื่องมือตัดมีหลายชนิด การเลือกใช้เครื่องมือตัดที่ผลิตจากวัสดุใดขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงาน รูปทรงเรขาคณิต ลักษณะของงานที่จะทำการผลิต พิกัดความคลาดเคลื่อนและความละเอียดของงาน เครื่องจักรกลและเงื่อนไขในการตัดเนื้อ เป็นต้น วัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้โดยทั่วไปประกอบด้วยชนิดต่างๆ ดังนี้

1. เหล็กกล้าเครื่องมือคาร์บอนสูง (High Carbon Tool Steels)
2. เหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steels)
3. คาร์ไบด์ (Carbide)
4. เซรามิกส์ (Ceramics)

เครื่องมือตัดในกลุ่มวัสดุประเภทเหล็กกล้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศส่วนใหญ่ ได้แก่ เหล็กกล้ารอบสูง ซึ่งสามารถแบ่งตามส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้ารอบสูงทังสเตนผสมหลัก (Tungsten High Speed Steels) เหล็กกล้ารอบสูงโมลิบดีนัมผสมหลัก (Molybdenum High Speed Steels) และเหล็กกล้ารอบสูงนอกเหนือจากธาตุผสมหลักทั้งสองแล้วจะเพิ่มในอัตราส่วนโคบอลต์ผสมสูง (High Speed Steel Containing Cobalt)

ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐาน AISI ของเหล็กกล้ารอบสูงซึ่งกำหนดเบอร์ต่างๆ ตามมาตรฐานสากลเหล็กกล้ารอบสูงจะผสมทังสเตนเป็นหลัก เช่น T1, T2 และอื่นๆ ซึ่งมีความคงทนใกล้เคียงกับเหล็กกล้ารอบสูงที่ผสมโมลิบดีนัมเป็นหลัก เช่น M1, M2, M3, M7 และ M10 เป็นต้น เหล็กกล้ารอบสูงที่ผสมทังสเตนเป็นหลัก การอบชุบจะทำได้ง่ายกว่าเหล็กกล้ารอบสูงผสมโมลิบดีนัม แต่เหล็กกล้ารอบสูงผสมโมลิบดีนัม สำหรับการผลิตแล้วมีการนำมาใช้งานแพร่หลายมากกว่าชนิดผสมทังสเตนเป็นหลัก ในทางปฏิบัติสามารถชุบแข็งเหล็กกล้ากลุ่มทังสเตนและโมลิบดีนัม

ให้มีความแข็งได้ 64-70 HRC สามารถตัดเฉือนเหล็กกล้าที่มีความแข็งถึง 350 HB เหล็กกล้ารอบสูงที่ผสมธาตุโคบอลต์ ประมาณ 5-12°C จะทำให้การคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น (Hot Hardness) และการต้านทานการสึกหรอดีขึ้นเหล็กกล้ารอบสูงชนิดที่ผสมโคบอลต์ สามารถตัดเฉือนงานที่มีความแข็งมากกว่า 350 HB และสามารถชุบแข็งได้ถึง 70 HRC ความแข็งที่เหมาะสมกับการใช้งานควรอยู่ในช่วง 66-68 HRC ถ้าความแข็งมากกว่า 68 HRC จะมีแนวโน้มไปสู่ความเปราะและเกิดการแตกหัก เมื่อนำไปใช้งานหลังจากผลิตให้เป็นเครื่องมือตัด เช่น เอ็นมิลล์ เป็นต้น

การแบ่งกลุ่มเหล็กกล้ารอบสูง เป็นการแบ่งโดยพิจารณาตามส่วนผสมทางเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งมีหมายเลขตามมาตรฐาน AISI ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 แสดงการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้ารอบสูงตามมาตรฐาน AISI

ชนิดของเหล็กกล้า	รหัสของเหล็กกล้ารอบสูง					
เหล็กกล้ารอบสูงทั่วไป	M1	M2	M3	M4	M7	M10
เหล็กกล้ารอบสูงทั้งสแตน	T1	T2	T4	T5	T6	Y15
เหล็กกล้ารอบสูงผสมโมลิบดีนัม	M33	M41	M42	M43	M44	M46

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูงโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ หลายชนิด ประกอบด้วย คาร์บอน ทั้งสแตน โมลิบดีนัม โครเมียม วาเนเดียม และโคบอลต์ เป็นต้น ส่วนผสมของธาตุต่างๆ ตามมาตรฐาน AISI แสดงในตารางที่ 2-5 เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าเหล็กกล้ากลุ่มผสมทั้งสแตนเป็นหลัก มีส่วนผสมของทั้งสแตนในช่วง 4.5-18% และส่วนใหญ่ไม่มีส่วนผสมของโมลิบดีนัมเลย สำหรับเหล็กกล้ากลุ่มโมลิบดีนัมผสมหลักมีส่วนผสมของโมลิบดีนัมในช่วง 3.75-9.5% และมีทั้งสแตนผสมในช่วง 1.50-8.25% สำหรับธาตุโคบอลต์ ถ้าผสมในเหล็กกล้าทั้งสองกลุ่มจะอยู่ในช่วง 5-12%

คุณสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัดแต่ละชนิด เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจาก 0 - 760°C ค่าความแข็งจะลดลง และลดลงค่อนข้างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 540°C ซึ่งเหล็กกล้ารอบสูงผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นจะทำให้สามารถคงค่าความแข็งได้ดีขึ้นในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 540°C

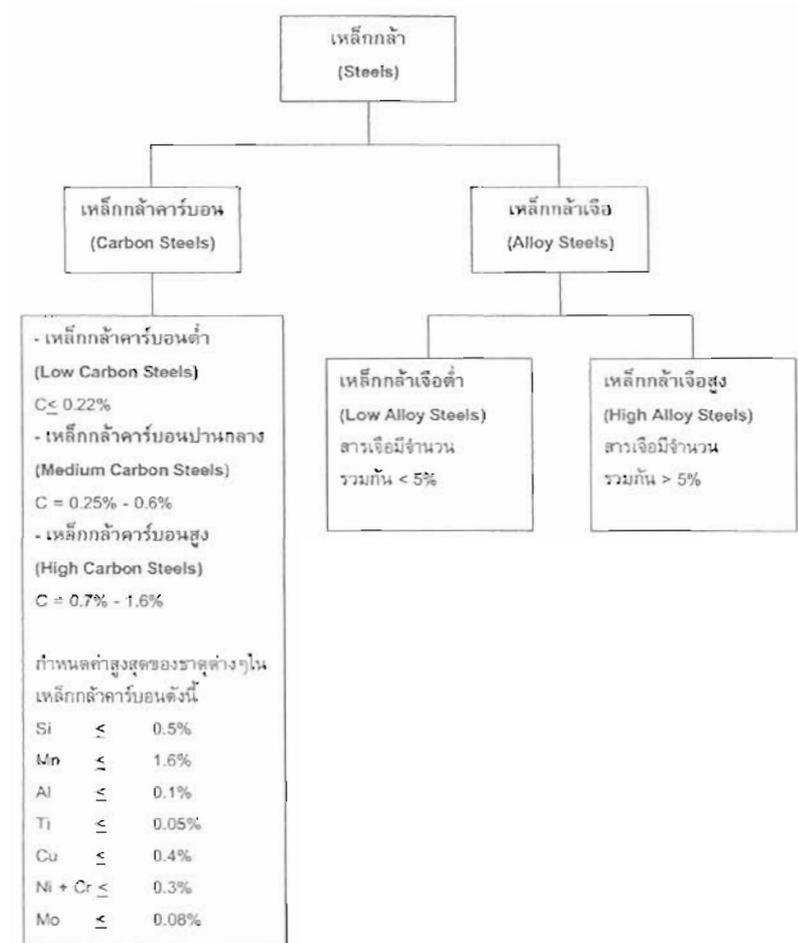
ตารางที่ 2-5 แสดงเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูงตามมาตรฐาน AISI และเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 Böhler

มาตรฐาน (AISI)	คาร์บอน (C)	ทังสเตน (W)	โมลิบดีนัม (Mo)	โครเมียม (Cr)	วานาเดียม (V)	โคบอลต์ (Co)
T1	0.75	18.00	-	4.00	1.00	-
T2	0.85	18.00	-	4.00	2.00	-
T4	0.75	18.00	-	4.00	1.00	-
T5	0.80	18.00	-	4.25	2.00	-
T6	0.80	4.50	-	4.50	1.75	-
T15	1.50	12.00	-	4.50	5.00	-
M2	0.85	6.00	5.00	4.00	2.00	-
M3	1.20	6.00	5.00	4.00	3.00	-
M4	1.30	5.50	4.50	4.00	4.00	-
M36	0.85	6.00	5.00	4.00	2.00	8.25
M41	1.10	6.75	3.75	4.25	2.00	5.00
M42	1.10	1.50	9.50	3.75	1.15	8.25
M43	1.20	2.75	8.00	3.75	1.60	8.25
M44	1.15	5.25	6.50	4.25	2.00	12.00
M45	1.25	8.25	5.00	4.25	1.60	5.50
M46	1.25	2.00	8.25	4.00	3.20	8.25
S390	1.25	10.45	1.78	4.59	4.49	7.26

2.9 เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้า หมายถึง เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ต่ำกว่า 2% นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน, แมงกานีส, กำมะถัน และฟอสฟอรัส เป็นต้น

เหล็กกล้า สามารถแบ่งได้เป็นสองพวกใหญ่ๆ คือเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) และเหล็กกล้าเจือ (Alloy Steels)



ภาพที่ 2-21 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้า

2.9.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก มีธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่บ้าง ปริมาณไม่มากนัก ความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอน ได้มาจากอิทธิพลของคาร์บอน ซึ่งผสมยิ่งมาก ความแข็งแรงจะสูงขึ้น แต่ความเหนียวจะลดลง ความเปราะสูงมากขึ้น คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้า สามารถอยู่ในรูปต่างๆ ดังนี้คือ

2.9.1.1 อยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ คือแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งจะพบแต่เฉพาะในเหล็กหล่อสีเทา

2.9.1.2 อยู่ในรูปของสารประกอบ คือ Fe_3C ซึ่งเรียกทางเคมีว่าเหล็กคาร์ไบด์ (Iron Carbide) แต่ทางโลหะวิทยาเรียกว่า ซีเมนไทต์ (Cementite) ซึ่งจะพบในเหล็กกล้า และในเหล็กหล่อสีเทา

2.9.1.3 โดยการแทรกตัวอยู่ในแลตทิซของเหล็กเป็นผลึกผสม (Mixed Crystal)

เหล็กกล้าคาร์บอนนี้มีราคาถูก มีข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งการที่เหล็กมีคาร์บอนผสมอยู่ มีผลทำให้จุดแข็งตัวของเหล็กลดลง และการแข็งตัวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แน่นอนตามจำนวน ส่วนผสมของคาร์บอน ตามแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ (Fe - C) เป็นแผนภาพที่แสดง ลักษณะการเย็นตัว และโครงสร้างจุลภาคต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ, เหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

2.9.2 เหล็กกล้าเจือ (Alloy Steels) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม, นิกเกิล, โมลิบดีนัม, วาเนเดียม และโคบอล เป็นต้น การผสมธาตุต่างๆ ลงไปใน เหล็กกล้าเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติหลายๆ ด้านของเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้เหล็กกล้า มีราคาสูงขึ้นก็ตาม จุดประสงค์ของการผสมสารเจือลงในเหล็กกล้ามีหลายประการ คือ

- 2.9.2.1 เพิ่มคุณสมบัติด้านการชุบแข็ง
- 2.9.2.2 ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ และที่อุณหภูมิสูง
- 2.9.2.3 เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ จากการเสียดสี
- 2.9.2.4 เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก
- 2.9.2.5 เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน
- 2.9.2.6 ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

2.10 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels)

เหล็กกล้าเครื่องมือ มีความแข็งและทนการสึกกร่อนได้ดี ซึ่งได้มาจากคาร์ไบด์ที่อยู่ภายใน โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นเครื่องมือสำหรับการตัด (Cutting Tools) หรือใช้ทำแม่พิมพ์ขึ้นรูป ใช้ในงานต้องทนต่อการเสียดสี ทนต่อการสึก ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง ก่อนใช้งาน ต้องมีการชุบแข็ง แบ่งเป็นประเภทตามการใช้งานดังนี้

1. เหล็กกล้าคาร์บอนเครื่องมือ (Carbon Tool Steels)
2. เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steels)
3. เหล็กกล้างานเย็น (Cold Work Tool Steels)
4. เหล็กกล้างานร้อน (Hot Work Tool Steels)

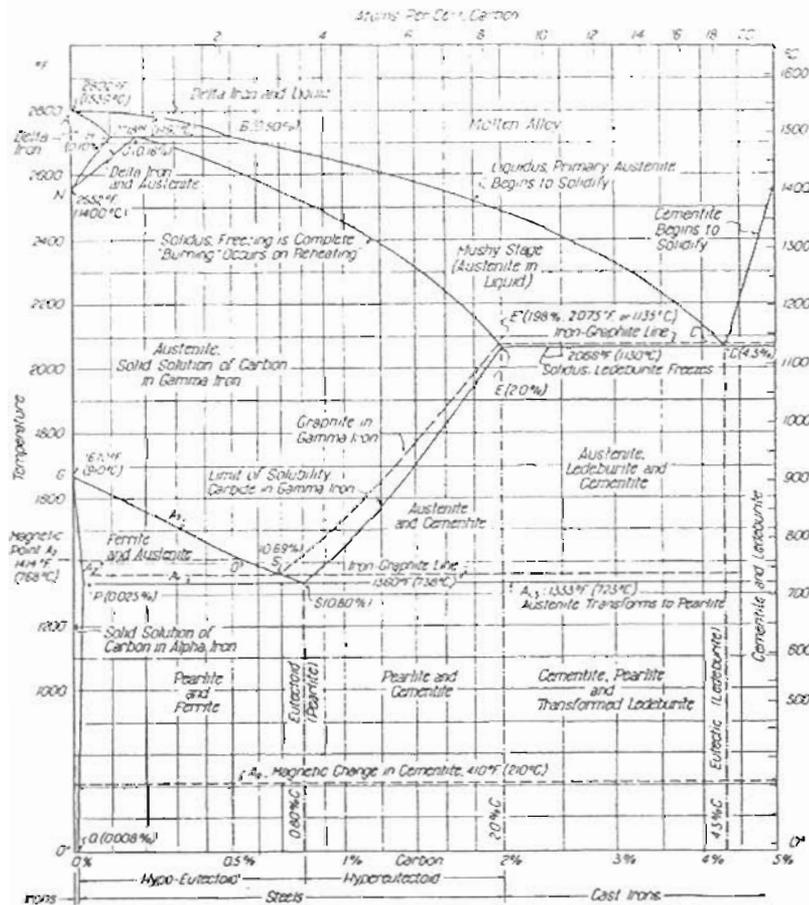
เหล็กกล้างานเย็น (Cold Work Tool Steels) มีส่วนมากผสมคาร์บอนตั้งแต่ปานกลาง 0.4% จนถึงกว่า 2% สารเจือหลักคือโครเมียมตั้งแต่ไม่ถึง 1% จนถึง 12% โครเมียมทำหน้าที่ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านชุบแข็ง และรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์ สารเจืออื่นๆ ได้แก่ โมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) วาเนเดียม (V) ทังสแตน (W) เป็นต้น

เหล็กกล้าชนิดนี้เหมาะกับการทำเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัด ไม่เหมาะกับการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิสูง การเสียรูปจากการชุบแข็งต่ำเนื่องจากมีความสามารถชุบแข็ง (Hardenability) สูง ไม่จำเป็นต้องเย็นตัวเร็วมากขณะชุบแข็ง ความแข็งที่ใช้งานส่วนใหญ่อยู่ที่ 58 – 61 HRC

2.11 แผนภาพสมดุล เหล็ก - คาร์บอน (Iron Carbon Diagram)

แผนภาพสมดุลเหล็ก - คาร์บอน เป็นแผนภาพที่แสดงให้เห็นถึงเฟสชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กกับคาร์บอนผสมกันที่ คาร์บอนเปอร์เซ็นต์ต่างๆ โดยมีเงื่อนไขว่าการเย็นตัวต้องเป็นไปอย่างช้าๆ แผนภาพนี้นับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำกรรมวิธีทางความร้อนเหล็กผสมคาร์บอน เพราะจะทำให้สามารถรู้ถึงชนิดของเกรนที่อุณหภูมิและคาร์บอนเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดอุณหภูมิในการทำกรรมวิธีทางความร้อนได้

แผนภาพสมดุลเหล็ก - คาร์บอน มีอยู่ 2 ระบบคือ ระบบเมทาสเตเบิล (Fe - Fe₃C Diagram) กับระบบสเตเบิล (Fe - C Diagram) ในระบบสเตเบิลคาร์บอนในเหล็กจะอยู่ในรูปของแกรไฟต์ (Graphite) ส่วนระบบเมทาสเตเบิล คาร์บอนในเหล็กจะอยู่ในลักษณะสารประกอบ Fe₃C และในทั้งสองระบบคาร์บอนสามารถเข้าไปละลายแทรกแลททิซเป็นผลึกผสมทั้ง α - ผลึกผสม (α - Mixed Crystal) และ γ - ผลึกผสม (γ - Mixed Crystal) ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะระบบเมทาสเตเบิล เนื่องจากคาร์บอนอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ (Fe₃C) ซึ่งพบในเหล็กกล้า (Steels) ส่วนกรณีที่คาร์บอนอยู่ในรูปของแกรไฟต์ จะพบในเหล็กหล่อ (Cast Iron)



ภาพที่ 2-22 ระบบเมทาสเตเบิล เหล็ก - คาร์บอน (Metastable System Iron - Carbon Diagram)

เกรนที่เกิดขึ้นในแผ่นภาพสมดุข มีดังนี้

1. ออสเตไนต์ (Austenite) หรือ γ - ผล็กผสม (γ - Mixed Crystal) มีการเรียงตัวแบบ FCC โดยคาร์บอนสามารถละลายเข้าไปผสมในแลททิซได้สูงสุด 2.06% ที่อุณหภูมิ 1147 °C เกรนชนิดนี้สามารถพบได้ตั้งแต่อุณหภูมิสูงกว่า 723 °C ขึ้นไป

2. ซีเมนไทต์ (Cementite) หรือเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) มีการเรียงตัวของอะตอมซับซ้อนมาก และมีความแข็งสูง ซีเมนไทต์มีหลายประเภท คือ ซีเมนไทต์ขั้นแรก (Primary Cementite) ซีเมนไทต์ขั้นสอง (Secondary Cementite) และซีเมนไทต์ขั้นสาม (Tertiary Cementite) นอกจากนั้นซีเมนไทต์ ยังอยู่ในเกรนของลีดบูไรต์ และเพียร์ไลต์ (Pearlite) แต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์เหมือนกัน แต่เมื่อรวมกันเป็นเกรนชนิดต่างๆ แล้ว ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติทางเชิงกลแตกต่างกัน จุดหลอมละลายของซีเมนไทต์ ไม่สามารถหาจุดที่แน่นอนได้ เพราะมันจะสลายตัวเป็นเหล็ก และคาร์บอนก่อนที่จะถึงจุดหลอมเหลว ซึ่งจะเห็นได้จากเส้นหลอมละลายในแผ่นภาพบริเวณที่มี $\text{C} > 4.3\%$ จะเป็นเส้นประ

3. ลีดบูไรต์ (Ledeburite) เป็นยูเทกติก (Eutectic) ของการผสมระบบนี้ ซึ่งอยู่ที่ $\text{C} = 4.3\%$ เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวก็จะเกิดโครงสร้างจุลภาคลีดบูไรต์ ซึ่งประกอบด้วย Fe_3C และ γ - ผล็กผสม γ - ผล็กผสมหรือออสเตไนต์ นี้ประกอบไปด้วย γ - Fe ที่มี C ละลายอยู่ 2.06% เมื่ออุณหภูมิลดลง ซีเมนไทต์ขั้นสอง จะแยกตัวออกจากออสเตไนต์ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 723°C ออสเตไนต์ จะกลายเป็นเกรนเพียร์ไลต์ (Pearlite) แต่ซีเมนไทต์ยังคงสภาพเดิมอยู่

4. เฟอร์ไรต์ (Ferrite) คือ α - ผล็กผสม ซึ่งหมายถึง คาร์บอนผสมอยู่ใน α - Fe แต่จำนวนคาร์บอนที่สามารถผสมใน α - Fe มีน้อยมาก คือสูงสุด 0.02% ที่อุณหภูมิ 723 °C ซึ่งเกือบเรียกได้ว่าเป็นเหล็กบริสุทธิ์

5. เพียร์ไลต์ (Pearlite) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 723°C ออสเตไนต์จะกลายเป็นเพียร์ไลต์ ซึ่งเป็นเกรนที่มีการเรียงตัวแบบยูเทกตอยด์ (Eutectoid) ประกอบด้วย ซีเมนไทต์ และเฟอร์ไรต์ เป็นชั้นสลับกัน

2.12 หลักการชุบแข็งเหล็กกล้า

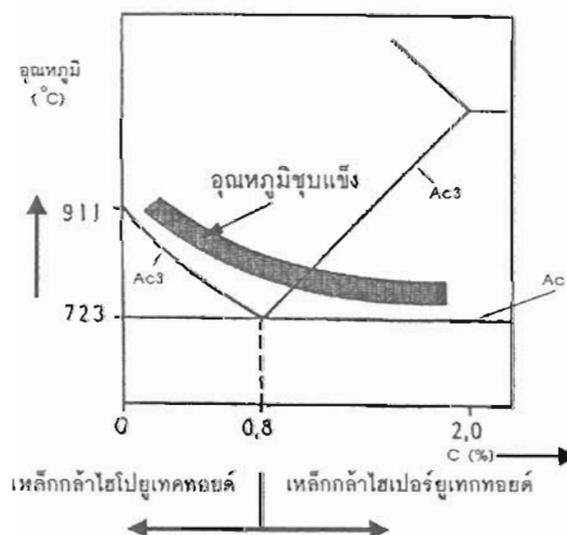
การชุบแข็งเหล็กกล้าในที่นี้หมายถึง การให้ความร้อนกระทำต่อเหล็ก เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างภายในของเหล็กกล้า ทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีกรรมวิธีต่างๆ หลายวิธี

หลักการในการชุบแข็งเหล็กกล้า คือ การทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างจาก BCC กลายเป็น FCC โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% หรือที่เรียกว่าเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ แต่สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% หรือเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ ให้ความร้อนแก่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 อุณหภูมิที่ใช้

ในการชุบแข็งควรอยู่เหนือเส้นดังกล่าว ประมาณ 50°C จากนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวลง ซึ่งความเร็วในการเย็นตัวจะต้องมากพอที่จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเกรนมาร์เทนไซต์



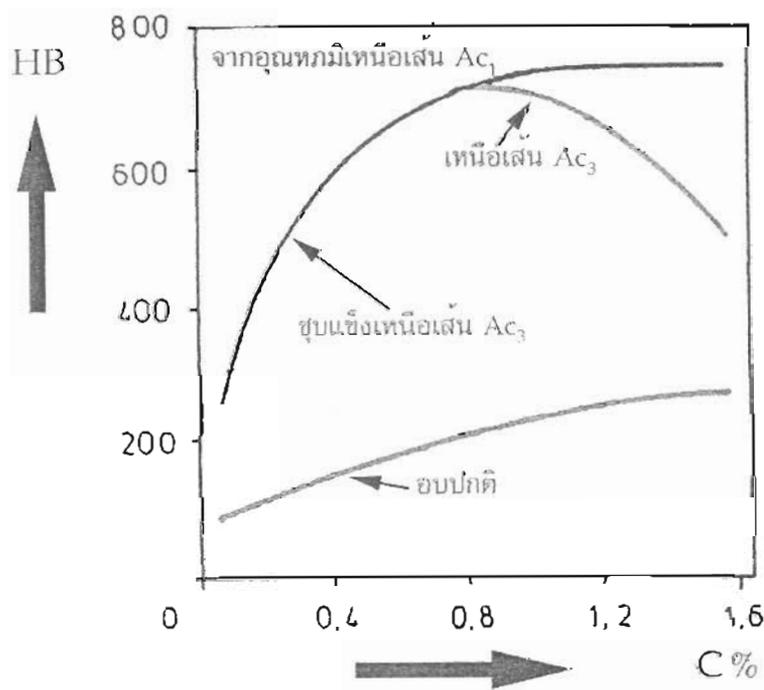
ภาพที่ 2-23 กรรมวิธีชุบแข็งเหล็กกล้าวิธีต่างๆ



ภาพที่ 2-24 แสดงอุณหภูมิชุบแข็งสำหรับเหล็กกล้าไฮโปยูเทคทอยด์ และเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคทอยด์

เหตุที่อุณหภูมิชุบแข็งของเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์อยู่แค่เหนือเส้น Ac_1 ประมาณ 50°C นั้น เนื่องจากเหล็กกล้าชนิดนี้มีจำนวนคาร์บอนสูง ถ้าใช้อุณหภูมิชุบแข็งเหนือเส้น Ac_3 หรือ Ac_m หลังจากการทำให้เย็นตัว จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งไม่สูงเท่าที่ควร เพราะจะเกิดเกรนที่เรียกว่า รีเทนออสเตไนต์ (Retained Austenite) หลงเหลืออยู่มาก นอกจากนั้นการใช้ อุณหภูมิในการชุบแข็งสูง จะมีผลให้ได้เกรนมาร์เทนไซต์ที่หยาบ ซึ่งจะเป็นผลให้ได้ความแข็ง ไม่มากเท่าที่ควร

การอบชุบแข็งเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 จะทำให้ได้ เกรนมาร์เทนไซต์ ซึ่งเกิดจากเกรนออสเตไนต์ ที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.9% จะทำให้เกิดรีเทนออสเตไนต์น้อยกว่า เพราะเกรนออสเตไนต์กลายเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายกว่า คาร์บอนที่เหลือจะกลายเป็นซีเมนไทต์ ความแข็งประมาณ 700 HB ซึ่งมีความแข็งใกล้เคียงกับ เกรนมาร์เทนไซต์ (550-600 HB) แต่มีความเปราะมากกว่า



ภาพที่ 2-25 เปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน จากการอบปกติ และจากการชุบแข็งขึ้นกับปริมาณคาร์บอน

การใช้อุณหภูมิชุบแข็งต่ำเกินไป รวมทั้งการใช้เวลาคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิชุบแข็งสั้นเกินไป จะทำให้เหล็กคาร์ไบด์ที่เหลืออยู่นี้ เป็นแกนผลึกสำหรับเกรนเพียร์ไลต์ แทนที่จะกลายเป็นเกรนมาร์เทนไซต์ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งสูงเกินไป หรือใช้เวลาคงอุณหภูมินานเกินไป จะเป็นผลให้ได้เกรนมาร์เทนไซต์หยาบ และมีผลให้ชิ้นงานมีความเปราะมากขึ้น

ถ้าชุบแข็งเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์จากอุณหภูมิระหว่างเส้น Ac_3 และ Ac_1 จะทำให้เกรนบางส่วนยังคงสภาพเป็นเฟอร์ไรต์อยู่ และทำให้เหล็กที่ชุบแข็งมีความแข็งไม่สม่ำเสมอ บางจุดในเนื้อเหล็กจะอ่อน และบางจุดจะแข็งมาก

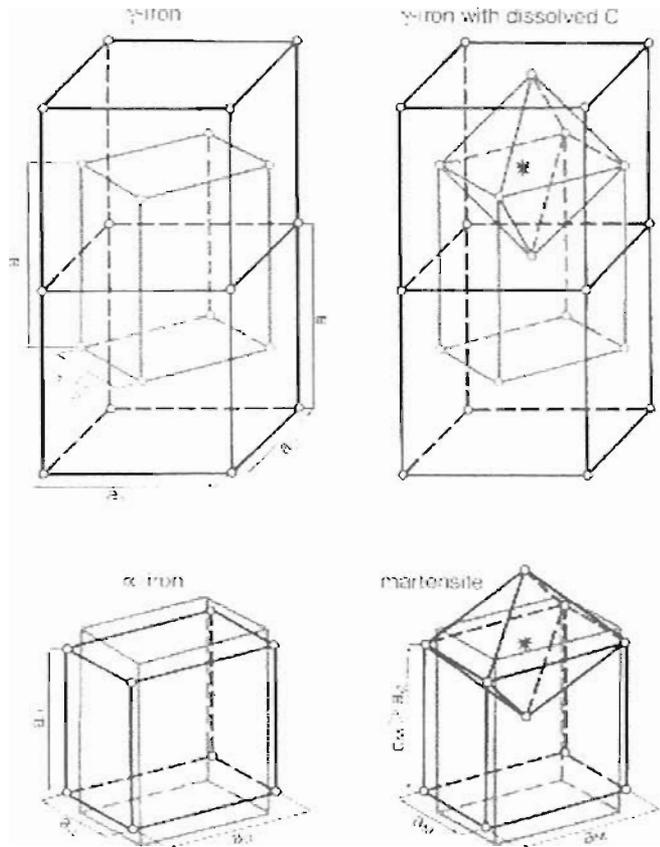
2.13 ขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะชุบแข็ง

ในการชุบแข็งการเย็นตัวของเหล็กกล้า จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว สิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างขบวนการ คือ

1. การแพร่ (Diffusion) ของคาร์บอน เนื่องจากในขบวนการชุบแข็งต้องให้คาร์บอนมีการแพร่หรือการเคลื่อนตัว เข้าไปอยู่ในแลตทิซของเหล็ก ซึ่งต้องใช้เวลาในการแพร่ที่อุณหภูมิสูง คาร์บอนสามารถแพร่ได้ง่าย แต่ถ้าเหล็กกล้าเย็นตัวอย่างเร็ว จะทำให้คาร์บอนมีเวลาในการแพร่น้อยลงหรือกล่าวโดยทั่วไปว่า ความสามารถในการแพร่คาร์บอนจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง

2. การเปลี่ยนโครงสร้างของแลตทิซเหล็ก ระยะทางของอะตอมที่จะต้องเคลื่อนตัว ในการเปลี่ยนแลตทิซจาก FCC ไปเป็น BCC นั้น มีระยะทางน้อยมาก เมื่อเหล็กเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนโครงสร้าง เหล็กกล้าก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ แม้ว่าเหล็กจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วก็ตาม

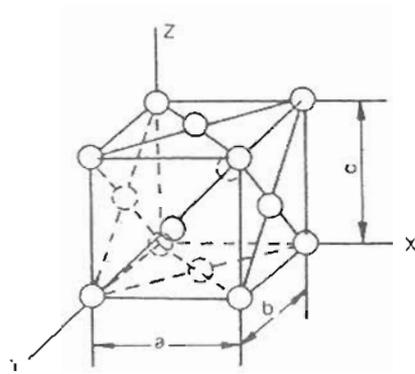
ในกรณีที่เหล็กกล้าถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เช่น ในการชุบแข็ง การแพร่ของคาร์บอนออกจากภายในแลตทิซของเหล็ก เป็นไปได้ยาก แต่การเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมเหล็กจาก FCC ไปเป็น BCC เป็นไปได้ เพราะอะตอมไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางมาก จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างแม้ว่าจะมีอะตอมคาร์บอนยังคงอยู่ภายใน และเป็นเหตุให้เกรนที่ได้ไม่กลายเป็นเฟอร์ไรต์อย่างที่เคยเป็น เนื่องจากมีอะตอมคาร์บอนแทรกตัวอยู่ จึงเป็นแลตทิซที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น เกรนที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งมีความต้านแรงดึงและความแข็งสูง แต่เปราะมากขึ้น



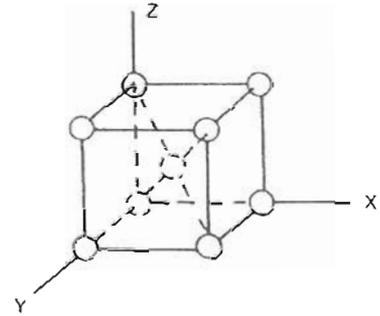
ภาพที่ 2-26 แสดงเปรียบเทียบระบบของผลึกของเหล็กกล้า ผลึกของออสเตไนต์ FCC (บน) และผลึกเฟอร์ไรต์ BCC กับ ผลึกมาร์เทนไซต์ BCT (ล่าง)

2.14 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite)

โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการทำให้ออสเตไนต์เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำมันหรือชุบน้ำเกลือ (10% NaCl) เรียกโครงสร้างนี้ตามชื่อของผู้ค้นคว้าเรื่องนี้คือ A.Marten เนื่องจากการทำให้ออสเตไนต์เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อะตอมของคาร์บอนไม่มีโอกาสเคลื่อนไหวจะอยู่กับที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเรียงตัวของอะตอมของเหล็กเกิดลักษณะบิดเบี้ยว (Deformation) อันเป็นสาเหตุที่ทำให้มาร์เทนไซต์มีความแข็งสูง ปริมาณของคาร์บอนจะเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์ (เราอาจเรียกมาร์เทนไซต์ได้ว่าเป็นโครงสร้างไม่สมดุล Non Equilibrium หรือ Supersaturated Ferrite เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าที่เฟอร์ไรต์จะมีได้) เพื่อความเข้าใจในเรื่องนี้จะต้องอาศัยภาพแสดงตำแหน่งของคาร์บอนในยูนิตเซลล์ของเหล็กออสเตไนต์และในเฟอร์ไรต์



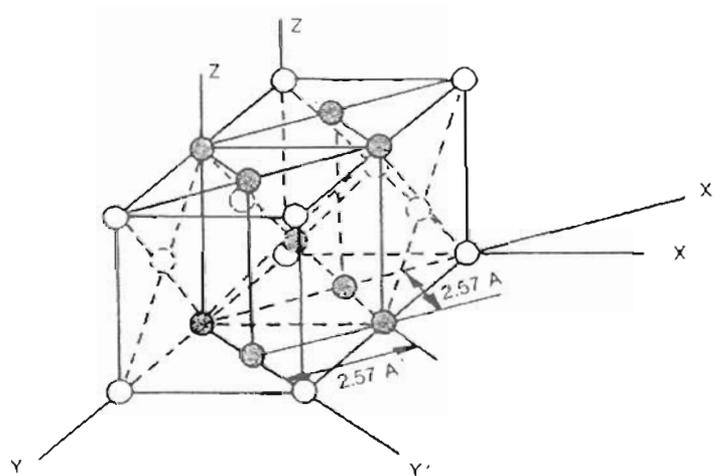
ออสเตไนต์ (γ) ระบบ Face centered cubic
 $a = b = c = 3.64 \text{ \AA}$ (หรือ 3.571 \AA)



เฟอร์ไรต์ (α) ระบบ Body centered cubic
 $a = b = c = 2.86 \text{ \AA}$

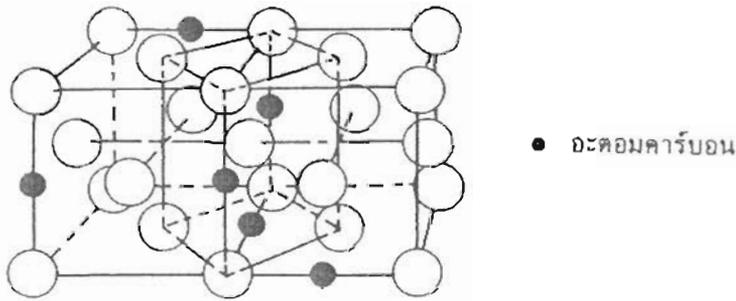
ภาพที่ 2-27 แสดงระบบผลึกของออสเตไนต์ และเฟอร์ไรต์

การเปลี่ยนระบบผลึกจากออสเตไนต์ (FCC) ไปเป็นเฟอร์ไรต์ (BCC) นั้น จะพบว่า อะตอมของเหล็กไม่ได้มีการเคลื่อนไหวในระยะทางมากมายอะไร เพียงแต่เคลื่อนที่ให้ระยะตาม แกน X และ Y ให้ยาวเพิ่มขึ้นจาก 2.57 \AA ไปเป็น 2.86 \AA และเปลี่ยนแกน X และ Y ไปเป็น X' และ Y' ส่วนระยะห่างระหว่างอะตอมตามแกน Z จะมีการเคลื่อนไหวมาก กล่าวคือต้อง หดระยะให้สั้นลงจาก 3.64 \AA มาเป็น 2.86 \AA ดังภาพแสดง โดยการนำเอา 2 ยูนิทเซลล์ ของเหล็กออสเตไนต์มาแสดง และกลุ่มอะตอมตรงกลางจะเป็นยูนิทเซลล์ที่จะเปลี่ยนไปเป็น เหล็กเฟอร์ไรต์



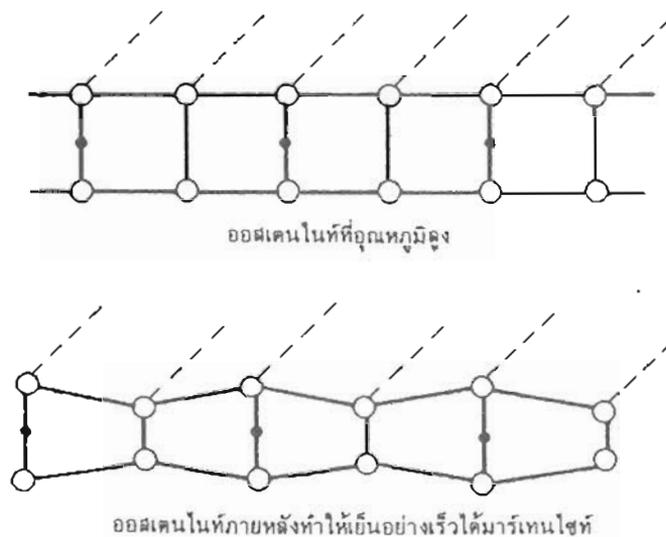
ภาพที่ 2-28 แสดงการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์เป็นเฟอร์ไรต์

จากภาพที่ 2-28 อะตอมที่เขียนสีดำเข้มจะมีลักษณะที่จะเปลี่ยนไปเป็น BCC เพียงแต่ว่าอะตอมตามแกน X' และ Y' ขยายตัวให้ได้ 2.86 \AA และอะตอมตามแกน Z หดตัวให้ลงมาเหลือ 2.86 \AA ตามความเป็นจริงในเหล็กออสเตไนต์จะยอมให้อะตอมคาร์บอนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมของเหล็ก (เหล็ก = 2.52 \AA คาร์บอน = 1.54 \AA) ดังนั้นอะตอมของคาร์บอนจะละลายได้ในเหล็กออสเตไนต์ในแบบแทรกตามที่ว่าง (Interstitial Solid Solution) ซึ่งในระบบ FCC ที่ว่างที่อะตอมคาร์บอนแทรกอยู่ได้จะเป็นบริเวณตามขอบของยูนิทเซลล์



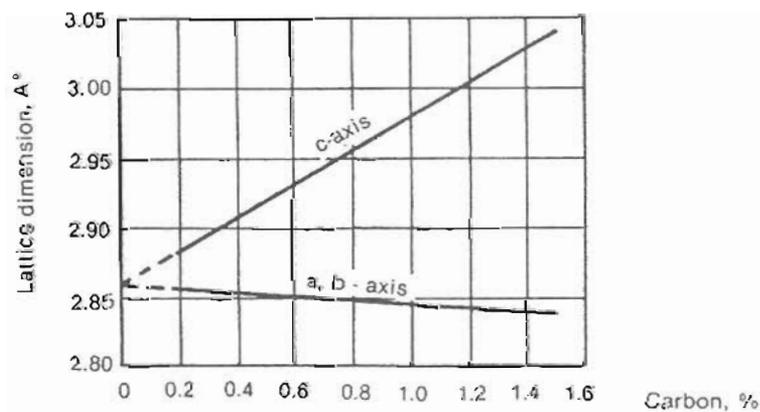
ภาพที่ 2-29 แสดงตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนที่แทรกอยู่ในออสเตไนต์ ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์

ในขณะที่ทำให้ออสเตไนต์เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนอะตอมของคาร์บอนไม่มีเวลาที่จะแยกตัวออกมาได้ทันจึงเป็นสาเหตุให้อะตอมของเหล็กตามแกน Z ที่มีอะตอมคาร์บอนแทรกตัวอยู่หดตัวลงมาไม่ได้ ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอมที่ประกอบกันเป็น Plane (Crystallographic Plane) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เฟลนบิดเบี้ยวนี้เคลื่อนไหว (Slip) ได้ยากขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกกระทำจึงทำให้โครงสร้างลักษณะเช่นนี้มีความแข็ง อากการบิดเบี้ยวของ Plane นี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนเป็นสำคัญ สมมติเรามองภาพของ Plane จากภาพด้านหน้า (Side View) เราจะเห็นลักษณะโค้งไปมาตามตำแหน่งของคาร์บอนที่แทรกอยู่



ภาพที่ 2-30 แสดงการบิดเบี้ยวของระนาบของโครงสร้างเหล็ก

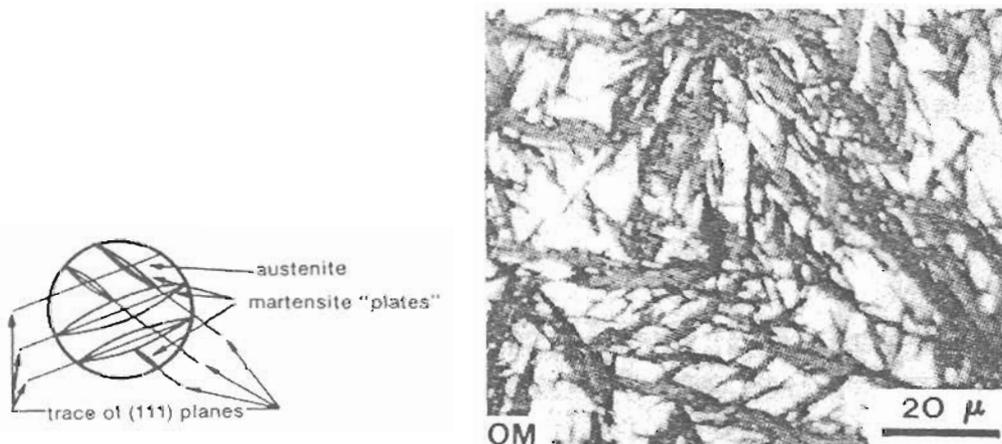
จากลักษณะดังกล่าวจะได้ระบบผลึกของมาร์เทนไซต์เป็น Tetragonal ($a=b \neq c$) เพื่อเป็นการยืนยันในเรื่องนี้ ได้มีการศึกษาโดยการวัดพารามิเตอร์ของ a , b และ c ของมาร์เทนไซต์ ที่ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน โดยหลักของ X-ray Diffraction จะได้ค่า a , b เท่ากัน แต่จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนค่า c นั้น จะเปลี่ยนแปลงมากตามปริมาณของคาร์บอนในเหล็ก ดังภาพแสดง



ภาพที่ 2-31 ขนาดของแลททิซของมาร์เทนไซต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของคาร์บอน

จะเห็นได้ว่าความแข็งของมาร์เทนไซต์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้ค่าพารามิเตอร์ c เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ค่า $\%C$ เปลี่ยนไปมากเท่าใด การบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอมที่ประกอบกันเป็น Plane ก็จะไปมากเท่านั้น ความต้านทานต่อแรงภายนอกก็จะสูงขึ้น จุลโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ที่ปรากฏจากการขยายด้วยกล้องไมโครสโคป จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูปเข็มแหลม (Needle-Like Pattern) และมีส่วนแยกแขนงเล็กๆ ออกไปจนเต็มเนื้อที่ ยกเว้นในกรณีที่มีออสเตไนต์ บางส่วนไม่มีโอกาสเปลี่ยนแปลง (Retained Austenite) จะเห็นเป็นสีขาวจากการส่องดูภาพขยาย การเกิดลักษณะของมาร์เทนไซต์ที่มีรูปเป็นเข็มนี้ ส่วนใหญ่จากคำอธิบายจะกล่าวถึงลักษณะของเพลท (Plates) ที่วิ่งในทิศทางของเพลน (111) เข้าสู่ภายในของเกรนออสเตไนต์ และมีการแตกแขนงออกไป แต่ยังคงรักษาทิศทางเดิมคือตามเพลน (111) การเกิดของมาร์เทนไซต์ยังไม่มี การพิสูจน์ยืนยันได้ว่า เป็นการเกิดโดยการให้กำเนิดนิวเคลียสและขยายตัว เช่นเดียวกับ เฟอร์ไรต์, เบไนต์ เพราะอัตราความเร็วของการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์สูงมาก

มาร์เทนไซต์นอกจากจะมีลักษณะเป็นเพลนแล้ว ยังมีอีกประเภทหนึ่งที่เกิดในเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ มาร์เทนไซต์จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งเรียกว่า Lath Martensite เป็นลักษณะของโครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวอย่างหนาแน่นของดิสโลเคชัน (High Dislocation Density) จะสามารถศึกษารายละเอียดได้เฉพาะกับกำลังขยายสูงๆ โดยการศึกษาผ่านกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปชนิดลำแสงอิเล็กตรอนผ่าน



ภาพที่ 2-32 แสดงลักษณะการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์

2.15 บทบาทของธาตุผสมที่มีผลต่อการชุบแข็ง

ในการชุบแข็งเหล็กผสมมีสิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาสองประการดังนี้คือ

1. ความแข็งภายหลังการชุบแข็ง ผลจากการทดลองวัดความแข็งภายหลังจากการชุบแข็งเหล็ก 0.02%C 10%Cr ได้ความแข็ง 35 HRC แต่เหล็ก 0.35%C ไม่ผสมโครเมียม ภายหลังการชุบแข็งได้ความแข็ง 50 HRC จะเห็นได้ชัดว่าธาตุที่ผสมในเหล็กไม่มีบทบาทมากนัก ในการเพิ่มความแข็งให้กับมาร์เทนไซต์ ธาตุคาร์บอนจะให้ผลต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์เด่นชัดกว่าธาตุผสม ทั้งนี้เพราะคาร์บอนจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม (Lattice Deformation) ได้ดีกว่าธาตุผสม

ธาตุผสมที่อยู่ในประเภทรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ จะมีผลต่อความแข็งอยู่บ้างก็เฉพาะที่เกิดคาร์ไบด์และไม่ละลายตัวขณะที่เผาที่อุณหภูมิสูง (Non Dissolved) เมื่อกระจัดกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จะมีบทบาททางด้านต้านทานต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน (Wear Resistance) ทำให้การสึกหรอน้อยลง แต่คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะไปมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป ธาตุที่สำคัญได้แก่ ทังสแตน, วาเนเดียม และโมลิบดีนัม ซึ่งคาร์ไบด์ของธาตุเหล่านี้มีเสถียรภาพสูง ในการชุบแข็งเหล็กที่มีธาตุเหล่านี้ผสมจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1300°C จึงจะละลายตัว

2. ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) จากที่เคยกล่าวมาแล้ว ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ที่สำคัญคือ

2.1 เกรนของออสเตไนต์ เหล็กจะมีความสามารถในการชุบแข็งสูงควรจะมีออสเตไนต์เกรนโต เพราะบริเวณรอบเกรนของออสเตไนต์จะเป็นบริเวณที่ช่วยให้การเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นซีเมนไทต์และเฟอร์ไรต์ได้ดี เพราะเป็นบริเวณที่มีความเสถียรต่ำ กล่าวคือกลุ่มอะตอมจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นถ้าออสเตไนต์มีขนาดเกรนเล็กบริเวณรอบเกรนจะมีมาก ธาตุที่ให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง เช่น วาเนเดียมคาร์ไบด์ หรือทังสแตนคาร์ไบด์ จะเป็นตัวป้องกันการขยายตัวของเกรนออสเตไนต์จึงมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง

2.2 พวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (Non Dissolved Carbide) เป็นอีกแฟคเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง เพราะพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะกระจัดกระจายอยู่ในออสเตไนต์ และพร้อมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นซีเมนไทต์ และ เฟอร์ไรต์ ในขณะที่ชุบเหล็กโอกาสที่จะให้มาร์เทนไซต์จะน้อยลงทำให้ความแข็งที่จะได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำกว่าที่ควรจะได้

นอกจากพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว จะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งแล้ว พวกสารมลทินที่อยู่ในรูปของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งไม่ละลายตัวเช่นเดียวกัน ในช่วงอุณหภูมิออสเตไนต์ จะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกับพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว

2.3 ความสม่ำเสมอของออสเตไนต์ มีความสำคัญต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกัน

ในการชุบแข็งเหล็ก จะต้องถูกเผาทำให้อ่อนจนได้โครงสร้างออสเตไนต์อย่างสม่ำเสมอ ถ้าออสเตไนต์ขาดความสม่ำเสมอ เป็นต้นว่ามีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจับตัวกันอยู่เป็นกลุ่มก้อน จะทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปจากบริเวณอื่น เพราะการเคลื่อนไหวของธาตุผสมโดยทั่วไปจะช้า ยิ่งบริเวณที่มีผลึกของคาร์ไบด์ขนาดโตการเคลื่อนที่ของอะตอมของธาตุผสมจะต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล ซึ่งจะต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้นธาตุผสมในโครงสร้างของออสเตไนต์จะไม่สม่ำเสมอ และการขยายตัวของเกรนออสเตไนต์จะไม่เท่ากันตลอด เพราะการขยายตัวของออสเตไนต์จะเกิดขึ้นเมื่อคาร์ไบด์ละลายตัวหมดแล้ว ดังนั้นบริเวณใดที่ไม่มีคาร์ไบด์ เกรนของออสเตไนต์จะขยายตัวได้เร็วกว่าบริเวณที่มีคาร์ไบด์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ขนาดของเกรนออสเตไนต์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้ภายหลังจากการชุบแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดีของเหล็กชุบแข็ง

2.16 บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการอบคืนตัว (Tempering)

การอบคืนตัวจะกระทำภายหลังการชุบแข็ง ความมุ่งหมายก็เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิออสเตไนต์จนถึงอุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะเหล็กภายหลังการชุบจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูงแต่จะเปราะแตกง่ายทำให้เป็นอันตรายในขณะนำไปใช้งาน แต่การอบคืนตัวจะทำให้ความแข็งลดลงมากน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาการอบคืนตัว ดังได้กล่าวมาแล้วในเรื่องของการอบคืนตัวเหล็กกล้าคาร์บอน บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการอบคืนตัวโดยทั่วไปจะมีผลในการต่อต้านการลดความแข็ง คือทำให้ความแข็งลดลงในอัตราที่ช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ทั้งนี้ยกเว้นธาตุผสมที่มีอยู่ในกลุ่มไม่รวมตัวกับคาร์บอน เช่น นิเกิล, ซิลิกอน และรวมถึงแมงกานีสในขอบเขตอันหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลในการต่อต้านการลดความแข็งในขณะทำการอบคืนตัวน้อยมาก

สำหรับธาตุผสมที่สามารถรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ในหลายรูปแบบ เช่น โครเมียม, โมลิบดีนัม, ทังสแตน และ วาเนเดียม จะมีผลทำให้การต้านการลดความแข็งอย่างเด่นชัด ยังมีปริมาณของธาตุผสมเหล่านี้สูงผลในด้านนี้ยิ่งชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 °C นอกจากจะไม่ลดความแข็งแล้วยังมีส่วนทำให้ความแข็งกลับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Secondary Hardening

Secondary Hardening จะเกิดขึ้นเฉพาะกับเหล็กผสมที่มีธาตุโครเมียม, โมลิบดีนัม, ทังสแตน และวาเนเดียมเป็นส่วนใหญ่ จากการศึกษาเหล็ก 0.35% C ผสมโครเมียมปริมาณต่างๆ กัน เริ่มตั้งแต่ 0.5%, 2%, 4% และ 12% เมื่อนำมาอบคืนตัวภายหลังการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ กัน วัดความแข็งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ทำการอบคืนตัว เมื่อนำมาพล็อตกราฟปรากฏว่าเหล็กที่ผสมโครเมียม 0.5% เส้นกราฟจะเริ่มแยกสูงขึ้นจากเส้นกราฟเปรียบเทียบกับเหล็กที่ไม่ผสมโครเมียมเลย ยิ่งปริมาณโครเมียมสูงขึ้นจะสังเกตเห็นการเกิด Secondary

Hardening ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเหล็กผสมโครเมียม 12% จะปรากฏผลของการเกิด Secondary Hardening ได้ชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 °C

จากการศึกษาด้วยกล้องขยายที่มีกำลังขยายสูง (Electron Microscope) พบว่าในขณะที่ทำการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดการตกผลึก (Precipitation) ของคาร์ไบด์ระหว่างธาตุผสมกับคาร์บอนเกิดในลักษณะที่ละเอียดมาก (Embryo) และกระจุกกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ ทำให้มีส่วนเกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอมใน Space Lattice ได้มากมายภายในโครงสร้าง ผลที่เกิดขึ้นก็คือเหล็กจะมีความแข็งสูงขึ้น ส่วนคุณสมบัติทนแรงกระแทกอาจจะมีส่วนลดลง (Temper Brittleness)

เหตุที่ปรากฏการณ์ Secondary Hardening เกิดเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 °C เพราะอุณหภูมิในช่วงนี้อัตราการเคลื่อนไหวในลักษณะแพร่ซึม (Diffusion) ของอะตอมของธาตุจะเป็นไปได้ดี ทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างธาตุผสมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ แต่การเคลื่อนไหวของอะตอมของธาตุผสมจะเป็นไปได้ในระยะสั้นๆ ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มีลักษณะละเอียดจนไม่สามารถจะมองเห็นได้ด้วยกล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยายต่ำๆ

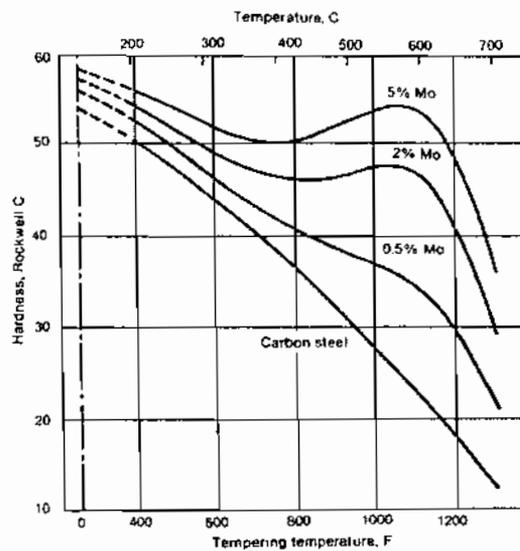
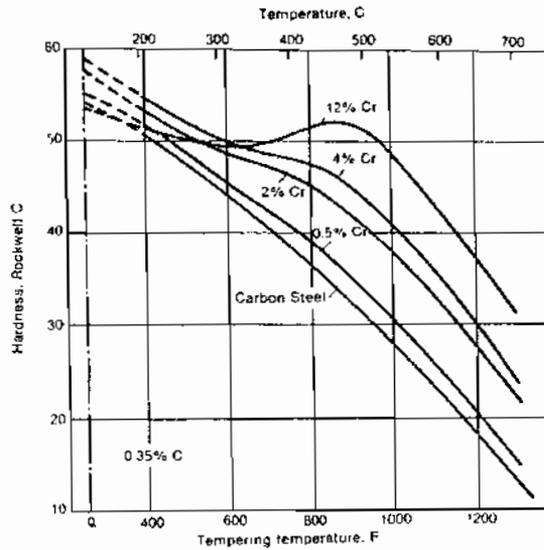
เมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C ความแข็งที่ได้จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากจะเกิดการรวมตัวและขยายตัวเป็นเกรนโตของคาร์ไบด์ ลักษณะการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอมจะค่อยๆ หดตัว ความแข็งของเหล็กจึงลดลงโดยลำดับขั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิถึงความแข็งยิ่งลดลง

จากภาพแสดงให้เห็นการเกิด Secondary Hardening ได้ชัดเจนสำหรับเหล็ก 0.35% C เมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นที่ 2% และจะเห็นชัดเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มเป็น 12% จะให้ความแข็งสูงเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวอยู่ระหว่าง 400 - 500 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งจะลดลง จากภาพมีสิ่งที่น่าสนใจเกิดอยู่ 2 ประการคือ

ประการแรก จะสังเกตเห็นว่าความแข็งของเหล็กภายหลังการชุบไม่สูงขึ้นมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กที่ไม่ได้ผสมโครเมียม ทั้งนี้เพราะความแข็งของเหล็กที่ได้ภายหลังการชุบส่วนใหญ่จะเป็นผลจากคาร์บอนที่ให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ ไม่ใช่ผลจากธาตุผสม

ประการที่สอง จะสังเกตพบว่าเหล็กที่ผสมโครเมียมสูงถึง 12% ความแข็งที่ได้ภายหลังจากการชุบแข็งจะต่ำกว่าความแข็งที่ได้จากเหล็กที่ไม่ผสมโครเมียม เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณโครเมียมที่มีอยู่สูงทำให้โครเมียมสามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง (Complex Carbide) เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงในช่วงที่เป็นออสเตไนต์ก่อนการชุบแข็งคาร์ไบด์จำนวนหนึ่งจะไม่สลายตัวหมด ทำให้ปริมาณของคาร์บอนที่ละลายในออสเตไนต์มีปริมาณน้อยลงกว่า 0.35% C เป็นเหตุให้เมื่อชุบแข็งจึงได้ความแข็งต่ำกว่า เพราะมาร์เทนไซต์ที่ได้มีคาร์บอนต่ำ ในกรณีเช่นนี้ถ้าต้องการให้ได้ความแข็งสูงภายหลังการชุบแข็งจะต้องเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้เหล็กให้สูงกว่า 0.35% C

สำหรับผลของธาตุอื่นๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ Secondary Hardening เช่น โมลิบดีนัม และ วาเนเดียม จะให้ผลในลักษณะคล้ายคลึงกับโครเมียม เพียงแต่ปริมาณที่จะทำให้เกิด Secondary Hardening จะน้อยกว่าโครเมียมมาก เช่น โมลิบดีนัมเพียง 0.5% และ วาเนเดียมเพียงปริมาณ 0.27% ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary Hardening



ภาพที่ 2-33 แสดงผลที่มีของอบคืนตัวซึ่งให้คุณสมบัติ Secondary Hardening ของธาตุโครเมียม (บน) และธาตุโมลิบดีนัม (ล่าง)

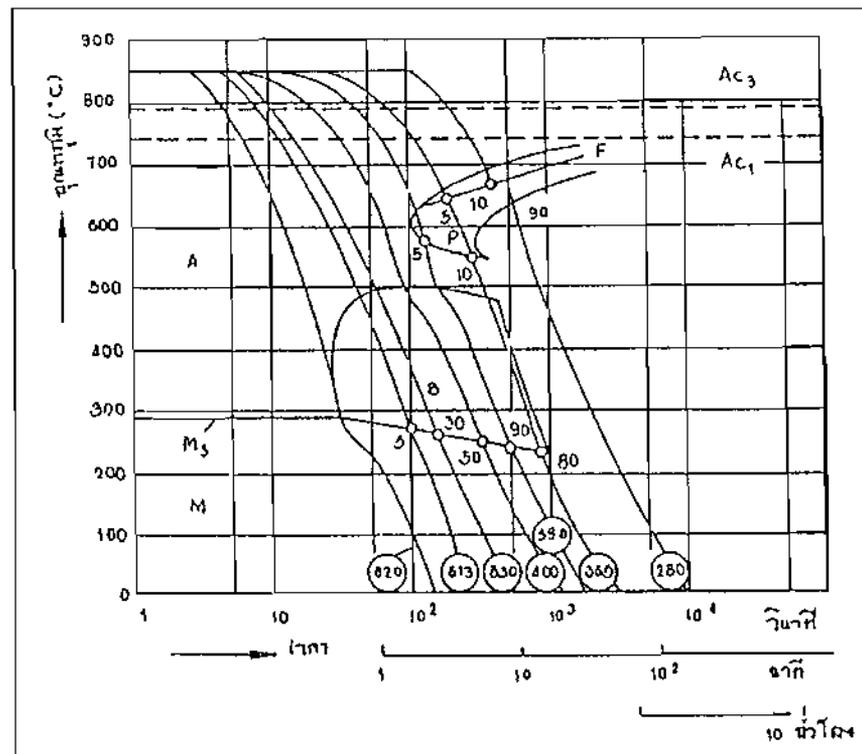
2.17 แผ่นภาพทีทีที (TTT – Diagram)

แผ่นภาพทีทีที ย่อมาจาก Time-Temperature-Transformation เป็นแผ่นภาพซึ่งแสดงจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้าขึ้นกับเวลา

การใช้แผ่นภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ เพื่อดูชนิดเกรนของเหล็กกล้านั้น ไม่สามารถใช้กับกรณีที่มีการเย็นตัวของเหล็กกล้าเป็นไปอย่างรวดเร็วจากบริเวณออสเตไนต์ เช่นในกรณีของการชุบแข็ง ดังนั้นจึงได้มีการคิดแผ่นภาพทีทีทีขึ้นมา เพื่อให้สามารถทราบถึงชนิดของเกรนของเหล็ก ในกรณีที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว แผ่นภาพทีทีทีมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ

1. ชนิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิแบบต่อเนื่อง (Continuous Transformation)

แผ่นภาพชนิดนี้จะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติต่อการชุบแข็งเช่น การหาค่าความแข็งของเหล็กกล้าจากการชุบแข็ง อุณหภูมิชุบแข็ง ซึ่งเป็นจุดเริ่มการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง เส้นการเย็นตัวช้าสุดเป็นเส้นที่เย็นตัวเร็วสุดและเส้นขวาสุดเป็นเส้นที่เย็นตัวช้าสุด จำนวนเปอร์เซ็นต์ของเกรนแต่ละชนิด แสดงให้เห็นบริเวณจุดตัดของเส้นโค้งกับเส้นเย็นตัว เส้นเย็นตัวช้าสุดจะเกิดแต่เกรนมาร์เทนไซต์ แต่มีบางส่วนเป็นรีเทนออสเตไนต์



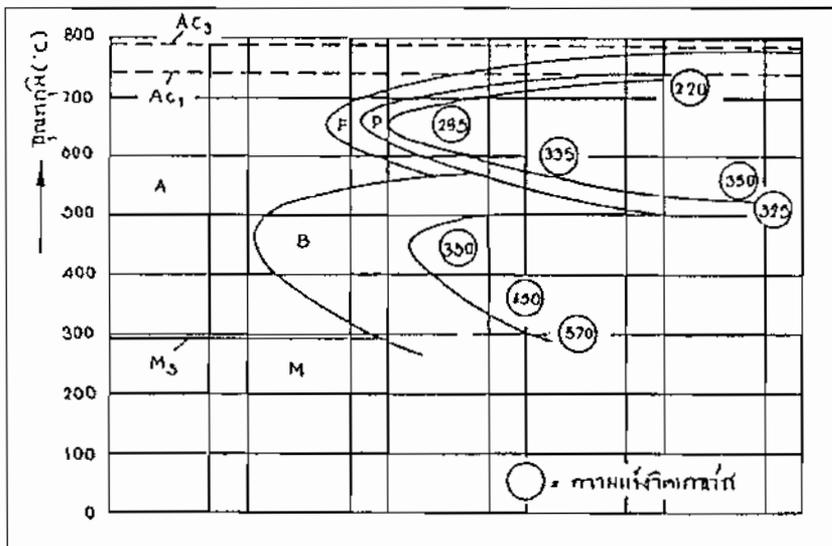
ภาพที่ 2-34 ชนิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิแบบต่อเนื่อง (Continuous Transformation)

เหล็กเกรด 1.2379 มาตรฐาน DIN

2. ชนิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation)

แผ่นภาพนี้ใช้ในกรณีที่การเย็นตัวของออสเตไนต์เป็นไปด้วยความเร็วแต่อุณหภูมิที่ลดลงนี้ยังไม่ถึงเส้นเริ่มเปลี่ยนเป็นเกรนมาร์เทนไซต์ M_s จึงทำให้เกรนออสเตไนต์คงสภาพอยู่ช่วงแรกหลังจากที่เวลาผ่านไปจนพบกับเส้นโค้งเส้นแรก ซึ่งเป็นเส้นเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างก็จะเริ่มเกิดโครงสร้างชนิดใหม่ขึ้น ซึ่งจะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นกับระดับอุณหภูมิที่หยุดไว้ โครงสร้างนี้จะเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่คงอุณหภูมินั้นและจะสิ้นสุดการเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อเวลาผ่านไปจนตัดกับเส้นโค้งที่สอง ซึ่งเป็นเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนโครงสร้าง

ในกรณีที่มีการเย็นตัวผ่านเส้น M_s ลงมา โครงสร้างจะเปลี่ยนจากออสเตไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ทันที ซึ่งหมายถึง การหยุดของอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการควบคุมโครงสร้างในกรณีนี้ จึงไม่ใช้การเย็นตัวชนิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ จำนวนมาร์เทนไซต์จะเพิ่มขึ้นได้ก็แต่การทำให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2-35 ชนิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation)
 เหล็กเกรด 1.2379 มาตรฐาน DIN

สำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำให้ได้มาร์เทนไซต์ 100% เพราะจะเกิดรีเทนออสเตไนต์จำนวนหนึ่ง ซึ่งแม้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิต่ำแล้วก็ตาม ก็ยังคงสภาพเป็นออสเตไนต์อยู่ ออสเตไนต์ประเภทนี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้ ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไปอีกจนถึงเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนมาร์เทนไซต์ ซึ่งเส้น M_f อาจอยู่ต่ำกว่า $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้

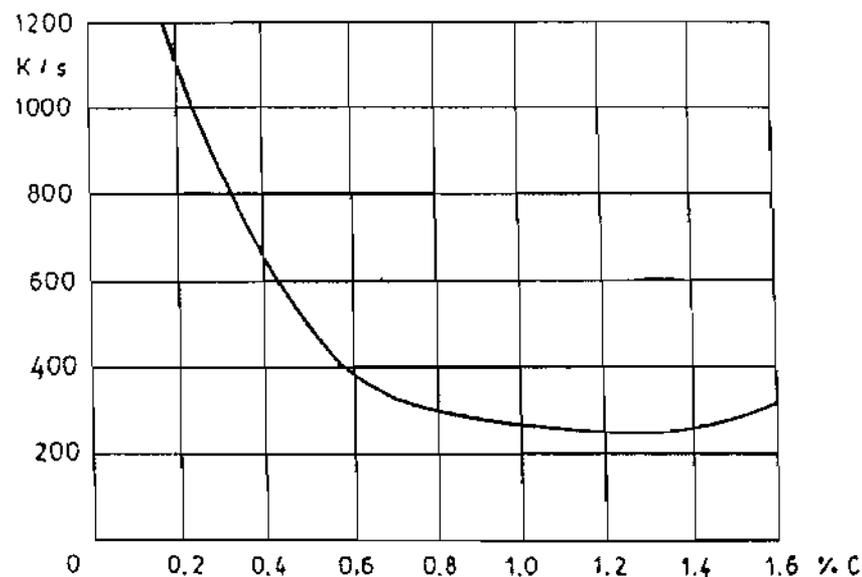
แผ่นภาพที่ 7 ที่ 7 ชนิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ ใช้ประโยชน์ในการบอกถึงชนิดของเกรนของเหล็ก เมื่อการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กกล้าเป็นแบบ ให้อุณหภูมิต่ำที่เหนือเส้น M_s

เช่น การชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอริง การชุบแข็งแบบออสเทมเปอริงและยังสามารถช่วยกำหนดอุณหภูมิอุ่นขึ้นงาน (Preheat) สำหรับงานเชื่อมได้ด้วย

แผ่นภาพที่ที่ที่ ทั้งสองชนิดนี้ จะใช้ได้กับอุณหภูมิชุบแข็ง ตามที่กำหนดในแผ่นภาพเท่านั้น ถ้าอุณหภูมิชุบแข็งสูงกว่าที่แสดงในแผ่นภาพเส้นโค้งทั้งหมดจะต้องเลื่อนไปทางขวาและในทางขวาและในทางตรงข้าม ถ้าอุณหภูมิชุบแข็งต่ำกว่าในแผ่นภาพ เส้นโค้งจะเลื่อนไปทางซ้าย นอกจากนี้ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อตำแหน่งของเส้นโค้งต่างๆ คือ ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแต่ละชนิดเช่น ถ้ามีคาร์บอนหรือสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นโค้งหรือปลายจุ่มของเบไนต์เลื่อนไปทางขวาของแผ่นภาพ ฉะนั้นเหล็กกล้าแต่ละชนิดจึงต้องมีแผ่นภาพที่ที่ที่ เฉพาะของเหล็กกล้าชนิดนั้น

2.18 การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน (Full Hardening)

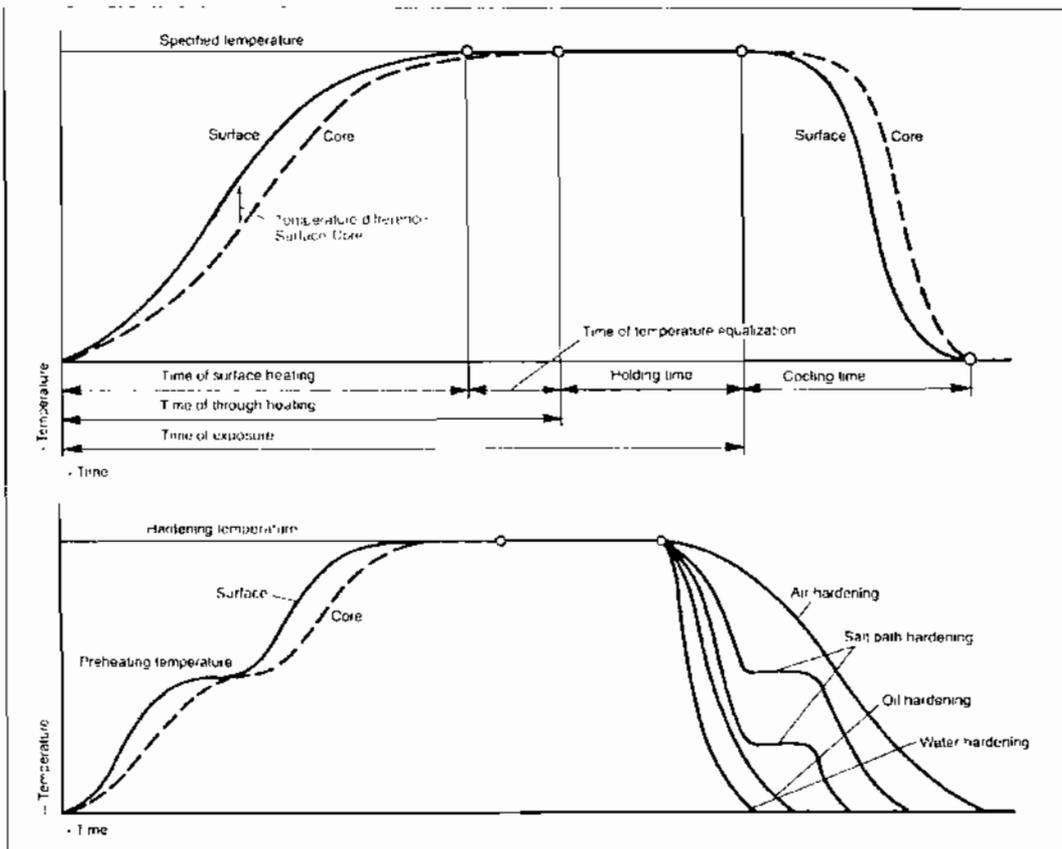
เหล็กกล้าจะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง และคงอุณหภูมิไว้จนกระทั่งความร้อนกระจายทั่วชิ้นงานและเกรนของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็นออสเตไนต์ จากนั้นชิ้นงานจึงถูกจุ่มชุบ (Quenching) ลงในสารชุบ ซึ่งอาจจะเป็นน้ำ น้ำมัน หรืออากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้า ถ้าการเย็นตัวของเหล็กกล้าขณะชุบสูงกว่าอัตราเร็วเย็นตัววิกฤติ (Critical Cooling Rate) ของเหล็กนั้น จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าสามารถเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้



ภาพที่ 2-36 อัตราเร็วเย็นตัววิกฤติ (Critical Cooling Rate) ของเหล็กกล้าคาร์บอน ขึ้นกับจำนวนคาร์บอน

อัตราเย็นตัววิกฤต CCR ของเหล็กกล้าแต่ละชนิดขึ้นกับปริมาณคาร์บอน และสารเจือที่ผสมในเหล็กกล้าแต่ละชนิดเป็นหลัก โดยเฉพาะปริมาณคาร์บอนเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่า CCR จะลดลง สารเจือหลักที่มีผลให้ค่า CCR ลดลง เช่น โครเมียม นิกเกิล แมงกานีส และ โมลิบดีนัม เป็นต้น ซึ่งค่า CCR มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดความเร็วในการเย็นตัวขณะชุบแข็ง ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารชุบ

สำหรับการเลือกใช้อุณหภูมิชุบแข็งนั้น ขึ้นอยู่กับประเภทของเหล็กกล้า เช่น เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ ($C < 0.8\%$) อุณหภูมิชุบแข็งจะอยู่เหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนเหล็กกล้าเจืออื่น ส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิชุบแข็งสูงกว่านี้ ซึ่งผู้ผลิตเหล็กจะเป็นผู้แนะนำอุณหภูมิชุบแข็งที่เหมาะสมให้

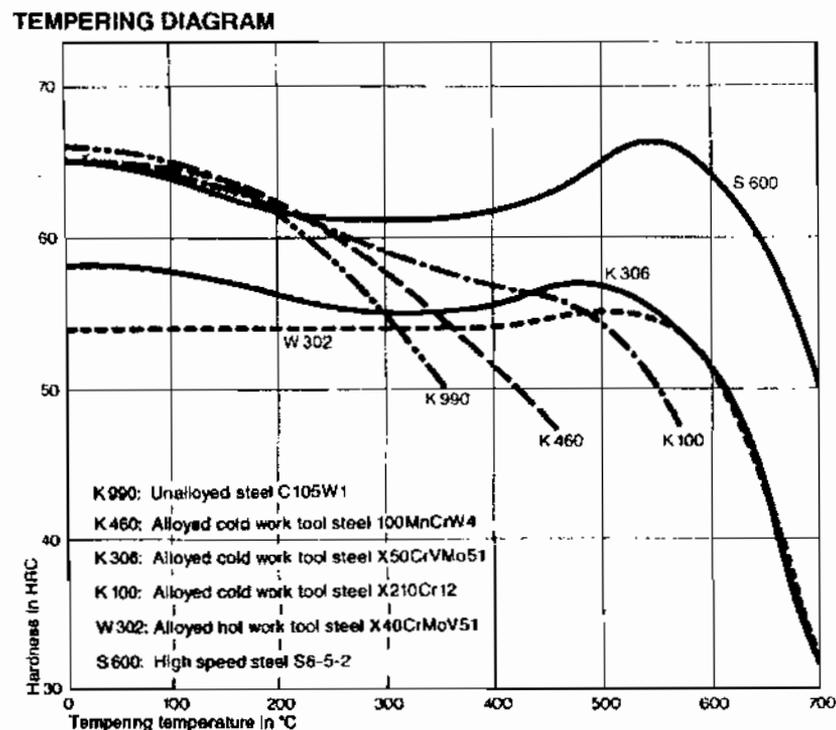


ภาพที่ 2-37 แสดงกราฟอุณหภูมิกับเวลาในการชุบแข็ง

2.19 การอบคืนตัว (Tempering)

หลังจากการชุบแข็งแล้ว เกรนของเหล็กส่วนใหญ่จะกลายเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ก็มีความเปราะมากเช่นกัน และเมื่อนำชิ้นงานไปใช้งาน ก็แตกหักได้ง่าย

นอกจากนั้นภายในชิ้นงานยังมีความเค้นสูง ซึ่งเกิดจากการที่ชิ้นงานเย็นตัวไม่เท่ากันตลอดหน้าตัด และการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ก็มีส่วนทำให้เกิดความเค้นภายในด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดความเค้นภายในนี้ ซึ่งทำได้โดยการนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิใต้เส้น A_{c1} โดยที่การเลือกใช้อุณหภูมิขึ้นอยู่กับค่าความแข็งที่ต้องการ โดยทั่วไปความแข็งมักจะลดลงหลังจากการอบ เพราะคาร์บอนในมาร์เทนไซต์จะแยกตัวออก กลายเป็นคาร์ไบด์ ลักษณะเป็นก้อนกลม ชิ้นงานจะถูกปล่อยให้เย็นตัวลงช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นภายในอีก ขณะเดียวกันมีเหล็กกล้าบางกลุ่ม เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือ เมื่อทำการอบคืนตัวสามารถเกิดมีความแข็งเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแข็งตัวครั้งที่ 2 (Secondary Hardening) สืบเนื่องจากหลังจากชุบมีโครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างมาก เมื่อทำการอบคืนตัวจะส่งผลให้ออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ทำให้เหล็กกล้ากลุ่มนี้ต้องอบคืนตัวอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยครั้งที่สองเป็นการลดความเค้นของมาร์เทนไซต์ที่เกิดใหม่ตกค้างมาก เมื่อทำการอบคืนตัวจะส่งผลให้ออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ทำให้เหล็กกล้ากลุ่มนี้ต้องอบคืนตัวอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยครั้งที่สองเป็นการลดความเค้นของมาร์เทนไซต์ที่เกิดใหม่



ภาพที่ 2-38 เส้นโค้งการอบคืนตัว (Tempering Curve) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ

2.20 การชุบแข็งเหล็กกล้าในเตาสัญญากาศ

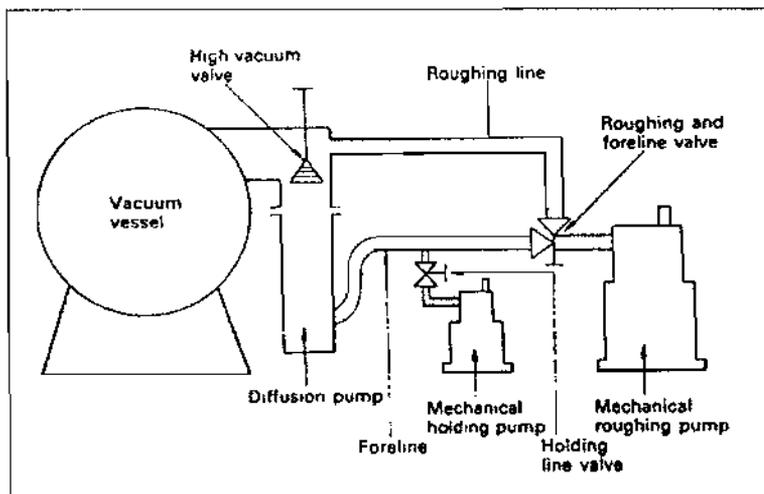
เป็นวิธีป้องกันผิวที่ได้ผลดีมาก โดยเฉพาะเหมาะกับการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งทำให้เครื่องมือที่ผลิตมีคุณภาพดีขึ้น แต่เตามีราคาสูงมาก

ในปัจจุบันนอกจากกล่าวได้ว่า การชุบแข็งเหล็กกล้าในเตาสัญญากาศเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ข้อดีที่สำคัญคือ มีการเสีรูปต่ำ และคุณภาพผิวของชิ้นงานดีเนื่องจากผิวไม่เกิดการเสียหายจากออกไซด์ การให้ความร้อนในเตาสัญญากาศต่อชิ้นงาน จะเป็นลักษณะที่ไม่รวดเร็วและทั่วถึงกัน จึงเป็นการลดความเสี่ยงการเสีรูปได้

บรรยากาศสุญญากาศ

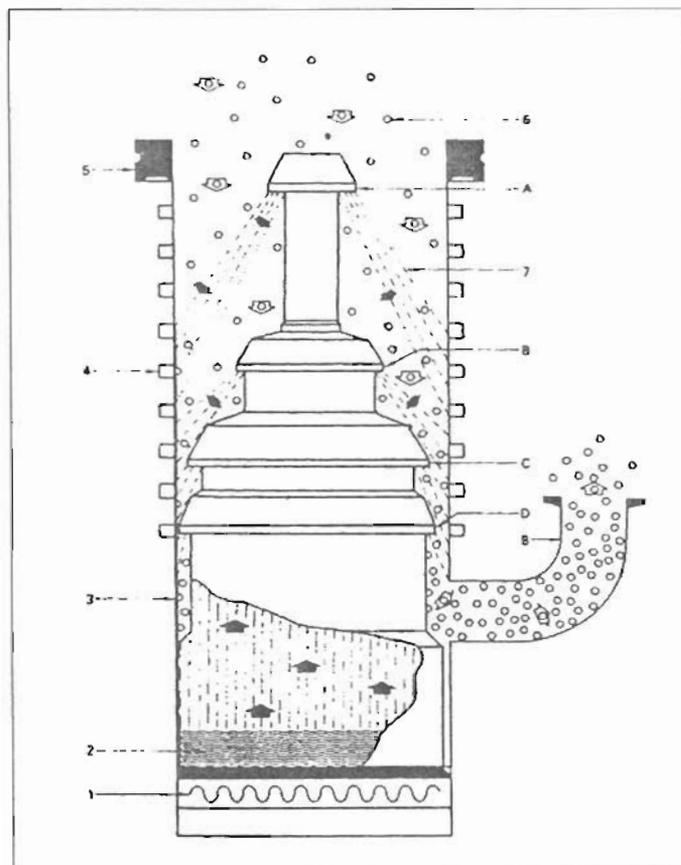
การควบคุมบรรยากาศภายในเตาอบชุบที่เป็นสุญญากาศ จัดเป็นบรรยากาศของการอบชุบโลหะที่ดีที่สุด ผลของการอบชุบจะปลอดภัยจากออกไซด์และการสูญเสียคาร์บอน กล่าวได้ว่า ผิวของเหล็กก่อนการอบชุบและหลังการอบชุบแทบจะไม่มีข้อแตกต่างเลย ข้อเสียของการควบคุมบรรยากาศให้เป็นสุญญากาศมีอยู่คือ อุปกรณ์เตา และการควบคุมตลอดจนค่าใช้จ่ายในการทำงานจะสูงมากเมื่อเทียบกับบรรยากาศชนิดอื่นๆ ดังนั้นการอบชุบด้วยสุญญากาศจึงมีความเหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าประเภทเครื่องมือ เช่น เหล็กกล้าความเร็วสูงที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำในขนาดต่างๆ ส่วนใหญ่เตาอบชุบสุญญากาศจะมีราคาแพง และมีขนาดไม่ใหญ่โตมากนัก

อุปกรณ์ที่สำคัญของเตาอบชุบความร้อนสุญญากาศ จะประกอบด้วยตัวเตา (Vacuum Vessel) ซึ่งจะใช้ระบบให้ความร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (Heating Element) ตัวเตาจะมีท่อดูดอากาศติดกับปั๊มดูดแก๊สชนิดดิฟฟิวชัน (Oil Diffusion) และจากปั๊มสุญญากาศดิฟฟิวชันจะต่อไปยังปั๊มสุญญากาศเชิงกล (Mechanical Pump) อีกชั้นหนึ่งซึ่งอาจจะมีปั๊มดูดอากาศเชิงกลชุดเดียวหรือ 2 ชุด



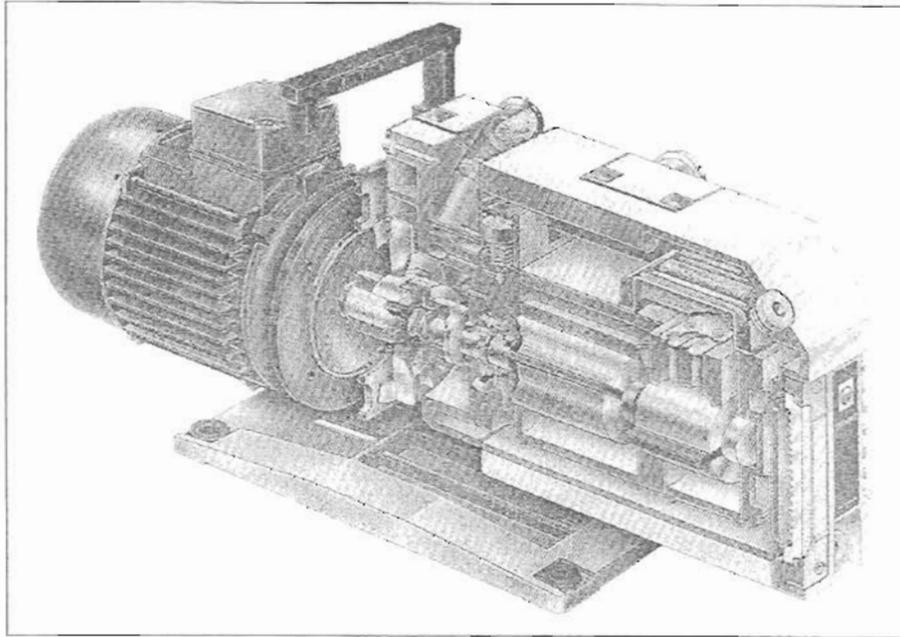
ภาพที่ 2-39 แสดงลักษณะการทำงานและอุปกรณ์ประกอบของเตาสัญญากาศ

หลักการทำงานของปั๊มดูดอากาศดีฟิวชัน จะเป็นปั๊มดูดอากาศที่ทำให้เกิดสุญญากาศได้มากกว่าปั๊มดูดอากาศเมคคานิคการทำงานจะใช้การต้มน้ำมัน (ประเภทโมเลกุลใหญ่) ให้กลายเป็นไอด้วยเครื่องต้มไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C ไอน้ำมันจะระเหยขึ้นทางตอนบนของคอลัมน์และผ่านหัวฉีด (Nozzles) หลายๆตัวและเป็นชั้นๆ ด้วยความเร็วสูง (Supersonic Speed) ทำให้เกิดแรงดูดอากาศผ่านลงมาทางด้านล่างที่มีท่อลมออกและต่อไปยังปั๊มดูดอากาศเมคคานิคส่วนไอน้ำมันเมื่อถูกฉีดเป็นฝอย จะไปกระทบกับผนังของตัวปั๊มซึ่งมีขดลวดที่มีน้ำเย็นพันอยู่ด้านนอกไอน้ำมันจะกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวไหลกลับลงมาอยู่ในหม้อต้ม และกลับเป็นไอลอยขึ้นไปอีก



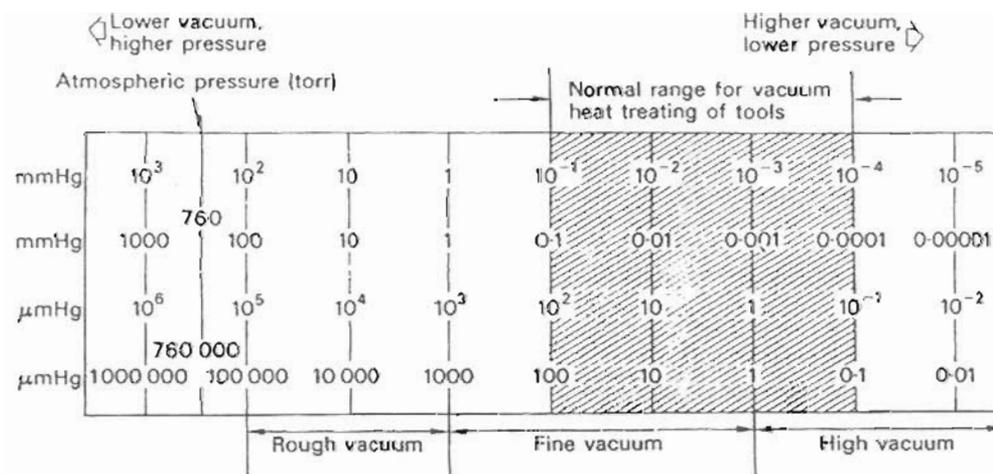
ภาพที่ 2-40 แสดงภาพในของปั๊มสุญญากาศแบบดีฟิวชัน

สำหรับปั๊มดูดอากาศเมคคานิคที่ใช้จะเป็นแบบโรตารี (Rotary Pump) ซึ่งประกอบด้วยใบพัดหมุนอยู่ในห้องจำกัด โดยใบพัดจะยึดติดได้เพื่อให้สัมผัสกับภายในของตัวปั๊ม จะมีช่องทางให้อากาศเข้าและถูกกวาดออกไปอีกด้านหนึ่งสู่บรรยากาศภายนอก อีกแบบหนึ่งของปั๊มดูดอากาศเมคคานิคที่ใช้กันจะเป็นแบบใบพัด (Rotor) สองตัวหมุนในลักษณะสัมผัสกันจะดูดอากาศเข้าทางด้านหนึ่งและอัดออกไปอีกทางหนึ่ง เป็นลักษณะของปั๊มดูดอากาศที่เรียกว่า Rootes Pump



ภาพที่ 2-41 แสดงภาพในของปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี

จากการทำงานร่วมกันของปั๊มดูดอากาศเมคคานิค และดิฟฟิวชั่น จะสามารถดูดอากาศภายในเตาให้เป็นสุญญากาศได้มากถึง 10^{-4} Torr ($1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr}$) ซึ่งเป็นสุญญากาศที่การอบชุบจะไม่ปรากฏการเป็นสนิมของเหล็กกล้าภายหลังการอบชุบ ปกติในการอบชุบเหล็กกล้าด้วยเตาสุญญากาศจะกระทำได้ผลดีอยู่ระหว่างสุญญากาศ $10^{-1} - 10^{-4}$ Torr ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ



ภาพที่ 2-42 แสดงช่วงของความดันสัมพันธ์กับความดันบรรยากาศ

2.21 เตาอบชุบสุญญากาศ

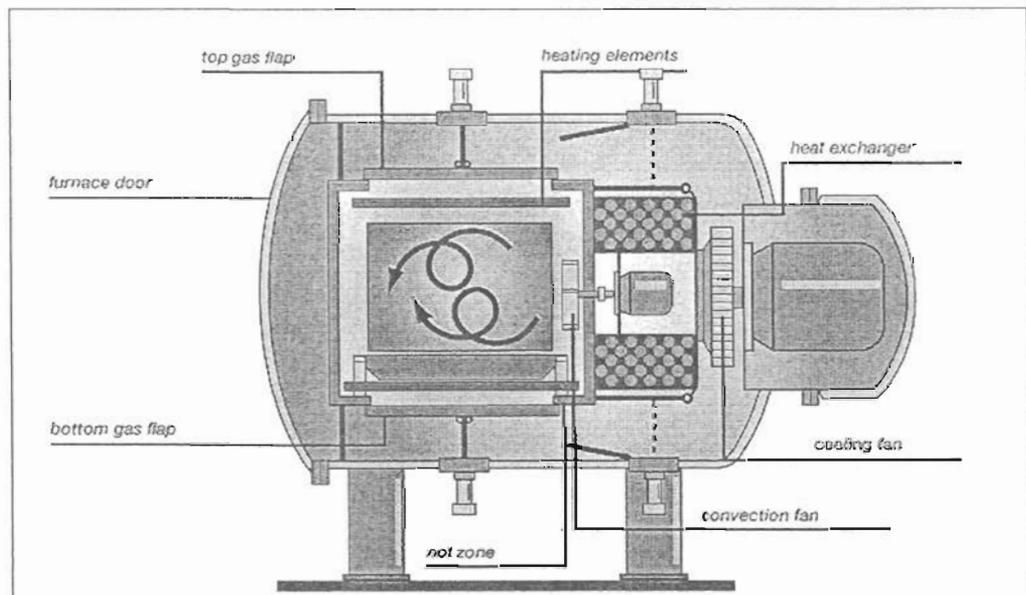
ในการอบชุบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1000 °C ถึง 1300 °C จะมีปัญหาในเรื่องการสูญเสียโลหะผสมบางตัวที่มีจุดกลายเป็นไอที่อุณหภูมิในช่วงนี้ เช่น แมงกานีส เพราะแมงกานีสที่อุณหภูมิ 800 °C และความดัน 10^{-4} Torr เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสีย สำหรับธาตุอื่นๆ ไม่สู้จะมีปัญหาในด้านการสูญเสียขณะอบชุบภายในเตาสุญญากาศ

การชุบแข็ง (Hardening) สำหรับเตาสุญญากาศจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สชุบ ซึ่งแน่นอนควรเป็นแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ปราศจากออกซิเจนหรือไอน้ำมิฉะนั้นจะเกิดผิวเป็นออกไซด์

แก๊สชุบที่จะทำให้อัตราการเย็นตัวสูงที่สุดคือ แก๊สไฮโดรเจน แต่จะไม่นิยมใช้เพราะอาจเกิดการระเบิดได้ง่าย ถ้าจะใช้ต้องมีอุปกรณ์นิรภัยที่จะช่วยควบคุมการระเบิด

แก๊สชุบที่มีอัตราการดึงความร้อนดีรองจากไฮโดรเจนคือ แก๊สฮีเลียม ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นแก๊สสำหรับชุบแข็ง แต่เนื่องจากราคาแพง จึงไม่นิยม

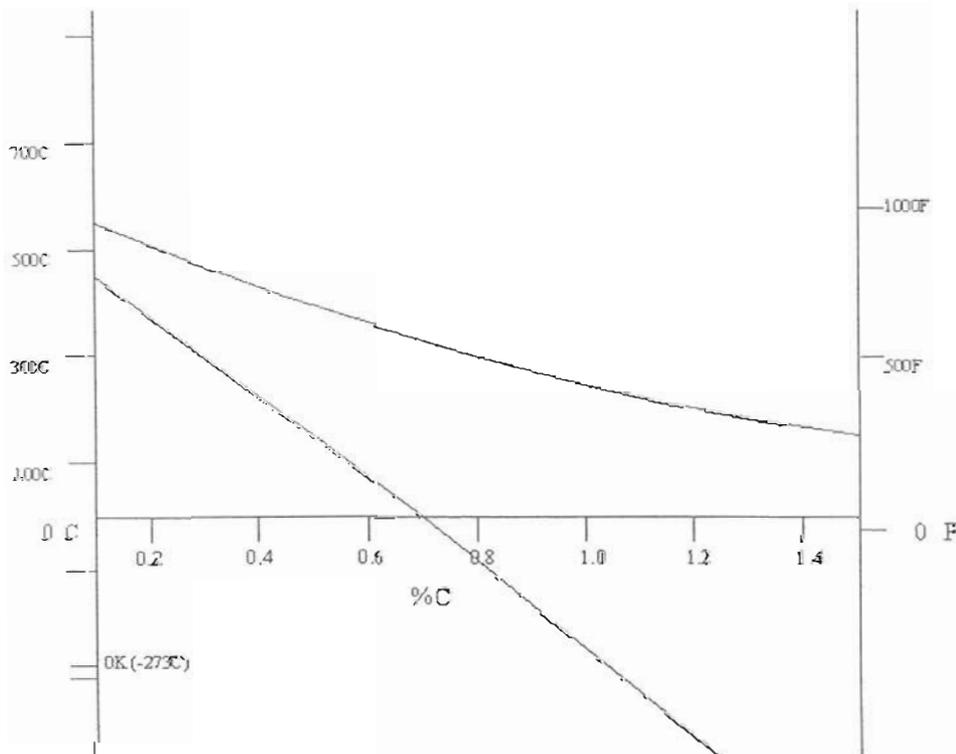
เตาอบชุบสุญญากาศที่ออกแบบสำหรับการชุบด้วยน้ำมัน จะต้องออกแบบเป็นพิเศษ โดยจะต้องมีฝาปิดเป็นชั้นๆ เพื่อความสะดวกในการเผาภายในบรรยากาศสุญญากาศและนำเอาชิ้นงานออกจากเตามาชุบในน้ำมันในอ่างอีกด้านหนึ่ง ส่วนที่จะบรรจุชิ้นงานอบชุบเข้าเตาสุญญากาศเตาสำหรับเผาภายใต้สุญญากาศ และอ่างน้ำมันรวมทั้งกลไกในการเอาชิ้นงานลงชุบในน้ำมันจะถูกสร้างให้อยู่ภายใต้ตัวเตาเดียวกันเป็นไปในลักษณะที่เรียกว่า Integrated Quench Vacuum Furnace



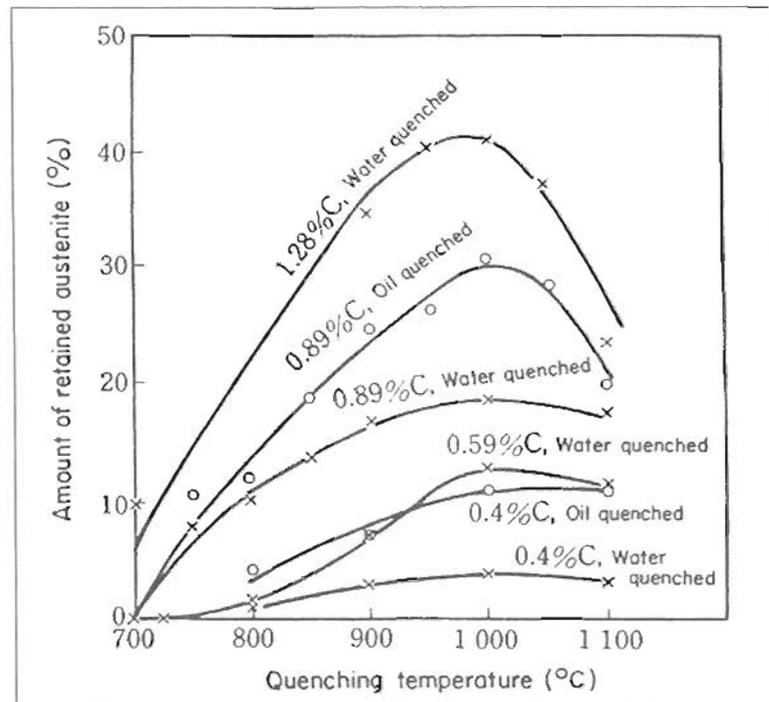
ภาพที่ 2-43 แสดงลักษณะการทำงานและอุปกรณ์ประกอบของเตาสุญญากาศ

2.22 การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา

การชุบแข็งที่ต่ำกว่าศูนย์องศา บางทีจะใช้คำว่า Stabilization ซึ่งมีความหมายถึง การทำให้เหล็กคงรูป และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยการทำให้ออสเตไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ให้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะเหล็กกล้าเครื่องมือ ส่วนใหญ่ผสมธาตุต่างๆ ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีผลในการลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจาก ออสเตไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งเขียนย่อว่า M_s ให้ลดต่ำลงและเส้นที่บ่งบอกจุดสิ้นสุด การเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์ (M_f) จะต่ำกว่า $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นภายหลังจากการชุบแข็งเหล็กกล้า จากอุณหภูมิออสเตไนต์ในสารชุบที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ยังมีออสเตไนต์ตกค้างอยู่จำนวนหนึ่ง มากน้อยขึ้นอยู่กับ ปริมาณของธาตุผสมในเหล็กกล้า, อุณหภูมิชุบของออสเตไนต์ และอัตราการเย็นตัว



ภาพที่ 2-24 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของมาร์เทนไซต์ที่แปรผัน กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมในเหล็ก



ภาพที่ 2-45 แผนภูมิแสดงปริมาณของออสเตไนต์ตกค้างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิชุบต่างๆ กัน

โดยหลักการทั่วไปแล้วเราต้องการออสเตไนต์เหลือค้างภายหลังการชุบแข็ง โดยเหตุผล 2 ประการที่สำคัญคือ

1. ออสเตไนต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำ ถ้าภายหลังการชุบแข็งมีออสเตไนต์เหลือค้างในปริมาณสูง ทำให้ความแข็งของเหล็กจะยิ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็น
2. ออสเตไนต์เหลือค้าง มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ เมื่อถูกแรงกดหรือดึง ในขณะที่ใช้งาน ซึ่งโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของออสเตไนต์จะมีปริมาตรจำเพาะต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อมจะมีผลโดยตรงกับขนาดของชิ้นงาน กล่าวคือ มีการขยายตัว ซึ่งแน่นอนในสภาพของแข็งและที่อุณหภูมิห้องจะก่อให้เกิดความเครียดขึ้นกับเหล็ก อันเป็นผลทำให้เกิดการแตกร้าว เกิดความเสียหายเพราะอายุการใช้งานของเครื่องมือจะสั้นลง

ในกรณีสมมติว่า เราไม่ทำการชุบแข็งที่ต่ำกว่า 0°C เพื่อลดปริมาณของออสเตไนต์ตกค้างไปสู่สภาพที่สมดุลได้ แต่ต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงในช่วง $500 - 600^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแน่นอนความแข็งอาจจะลดลงได้มาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดจะเกิดขึ้นได้มากในช่วงนี้ ทำให้เกิดความเครียดในเหล็กสูง จะต้องทำการอบคืนตัวหลายครั้ง เพื่อลดความเครียดเป็นขั้นเป็นตอน ถ้าเป็นเหล็กที่ไม่ให้คุณสมบัติ Secondary hardening จะไม่เกิดปัญหา เพราะในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งจะสูงขึ้น แต่ถ้าเป็นเหล็กกล้าที่ไม่ให้คุณสมบัติ Secondary hardening จะมีผลต่อความแข็งสุดท้ายภายหลังการอบคืนตัว

จากการทดลองวัดขนาดของเหล็กกล้าภายหลังการชุบแข็ง และการเปลี่ยนแปลงขนาด ภายหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ของเหล็กกล้าเครื่องมือสูง ปรากฏการเปลี่ยนแปลง ขนาดดังนี้

ขณะอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำระหว่าง 100 - 450 °C ขนาดของเหล็กจะหดตัวเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์ไปสู่สภาวะกึ่งสมดุล (Tempered Martensite) อีกลักษณะหนึ่ง พอถึงอุณหภูมิ 450 - 600 °C จะปรากฏมีการขยายตัวอย่างมาก เพราะ การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์เหลือค้างไปสู่สภาวะกึ่งสมดุล และหลังจากนั้นจะกลับมีขนาดลดลง อย่างรวดเร็ว เมื่ออบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์กึ่งสมดุล และออสเตไนต์เหลือค้างที่เปลี่ยนไปจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุลคือ เฟอไรต์ และ ซีเมนไทต์หรือคาร์ไบด์

กระบวนการบำบัดเย็นสามารถเพิ่มการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ มาเป็นมาร์เทนไซต์ มากขึ้นในการชุบแข็ง ทำให้ความเค้นตกค้างที่เกิดจากงานหล่อและงานตัดปาดผิวให้ดีขึ้น และ ช่วยในการเรียงตัวของเกรนให้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น ซึ่งยังกระทำได้ผลกับกระบวนการอบชุบ พร้อมกับ ไม่เป็นอุปสรรคในการลำดับการอบชุบ กระทำได้ที่ลำดับขั้นเบื้องต้นของกระบวนการชุบแข็ง วิธีการนี้ไม่มีผลต่อผิวของชิ้นงาน และที่สำคัญคือยังปลอดภัยกับธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้ ก๊าซได้หลายชนิด คือ อากาศ, ออกซิเจน, ไนโตรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจน, สารประกอบคาร์บอนอื่นๆ และก๊าซเฉื่อย Argon, Helium เป็นต้น (ฮีเลียมเหลว อุณหภูมิ - 268 °C ไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิ - 196 °C) หรือ สารชุบซึ่งมีทั้งการใช้ น้ำแข็งแห้ง (Solid Carbon Dioxide หรือ Dry Ice)

ตัวอย่างชื่อสากลที่หมายถึงกระบวนการบำบัดเย็น

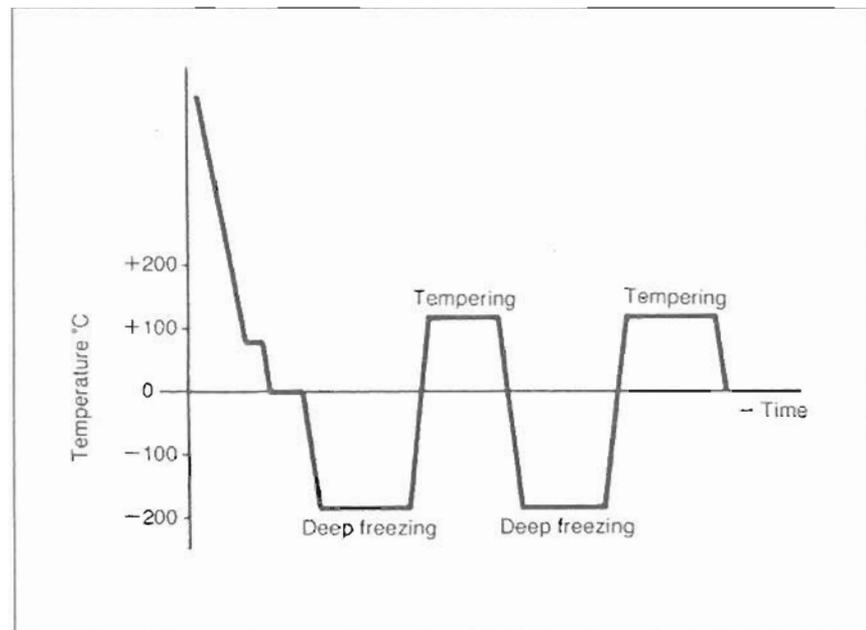
1. Subzero
2. Cold Treatment
3. Cryogenic Treatment
4. Freeze Tempering
5. Deep Cryogenic process
6. Low Temperature

ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในช่วงของการผลิต จะมีผลต่อช่วงยืดหยุ่น และช่วงพลาสติก ของวัสดุ ในงานชุบแข็ง จะเกิดความเค้นตกค้าง เนื่องจากความหนาของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ส่งผลถึงค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องทำการคลายความเค้น ในงานเจียรนัย จะเกิดแรงกด และความเค้นขึ้นอยู่ความแรงในการป้อน ซึ่งความเค้นตกค้างจะเกิดเฉพาะที่ พื้นผิวของชิ้นงาน ความเค้นนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอได้ ในงานเชื่อม ความเค้นตกค้าง ที่เกิดมีความสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของการหล่อเหลวในบ่อน้ำโลหะ และสัมพันธ์ กับความหนา เพราะฉะนั้นต้องทำการให้ความร้อนก่อนงานเชื่อม จะได้ผล 2 อย่าง คือ

การคลายความเค้นตกค้าง และปรับปรุงคุณสมบัติทางโครงสร้าง ในกรณีการแตกร้อน จำเป็นต้องคลายความเค้นก่อนนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง

Cold Treatment อยู่ที่อุณหภูมิ - 84 °C (- 120 °F) และ Cryogenic Treatment อยู่ที่อุณหภูมิ - 196 °C (- 320 °F) กระบวนการต้องกระทำโดยทันที หลีกเลี่ยงชุบแข็ง หรือก่อนการอบคืนตัว เมื่อชิ้นงานเย็นตัวถึงอุณหภูมิของสารชุบ หรือจากอุณหภูมียืนตัวถึงอุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่เป็นโพรง หรือ รู เป็นจุดที่สามารถเกิดการแตกร้าได้ เพราะฉะนั้น ชิ้นงานที่ต้องผ่านกระบวนการนี้ ต้องมีความเชื่อมั่นของชนิดเหล็กและการออกแบบ เช่น รู, มุม และการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด เป็นต้น เพราะจุดต่างๆ จะเกิดการรวมของความเค้น ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการแตกร้าได้สูง ต้องควบคุมอัตราการเย็นตัวไม่สูงเกินไป แล้วต้องอบคืนตัวทันที และห้ามทิ้งระยะเวลาไว้นาน เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้า

การอบคืนตัว ต้องทำการอบทันทีหลังจากทำการกระบวนการเย็นตัว และต้องใช้เวลาในการอบนานเพียงพอ การอบคืนตัวสามารถประยุกต์ทำสลับกับการบำบัดเย็นได้



ภาพที่ 2-46 ตัวอย่างกระบวนการบำบัดเย็นที่สัมพันธ์กับการอบชุบ

กระบวนการนี้จะทำกับชิ้นงานต้องการความเที่ยงตรง หรือมีความสำคัญมากๆ บางครั้งอาจต้องทำการบำบัดเย็นหลายๆ ครั้ง และอบคืนตัวหลายๆ ครั้งได้ (Multiple Freeze Temper Cycles) ในการประยุกต์กระบวนการบำบัดเย็น กับการอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือ เพื่อเพิ่มความสามารถความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ แต่ละวัสดุจะสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอไม่เท่ากัน

ค่าความแข็ง จะเป็นตัวบ่งบอกปริมาณออสเตไนต์ตกค้างที่เปลี่ยนมาจากมาร์เทนไซต์ แต่อย่างไรก็ตามผลของการเย็นตัวเข้าไปข้างในชิ้นงาน จะทำให้เปราะ และแตกง่ายได้ง่าย เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Thermal Shock) แล้วจะมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro crack)

ลักษณะเด่นของกรรมวิธีทั้งหมด

1. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งหมด จะทำเมื่อวัสดุถึงอุณหภูมิเย็นตัว
2. การเกิดของมาร์เทนไซต์จะค่อนข้างหักล้าง กับการหดตัวในตอนแรกของการเย็นตัว
3. ในตอนเริ่มต้น ต้องควบคุมอัตราการเย็นตัว และต้องยืดหยุ่นได้
4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การขยายตัวข้างในแกนกลางสมดุลกับผิวนอก
5. การเย็นตัวต้องทั่วถึงกันทั้งชิ้น
6. ที่ผิวต้องไม่ทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่ำ
7. สามารถบรรจุชิ้นงานที่ผ่านมาหลายกระบวนการ และแตกต่างขนาด ต่างชนิดลงในกระบวนการเย็นตัวในเวลาเดียวกันได้

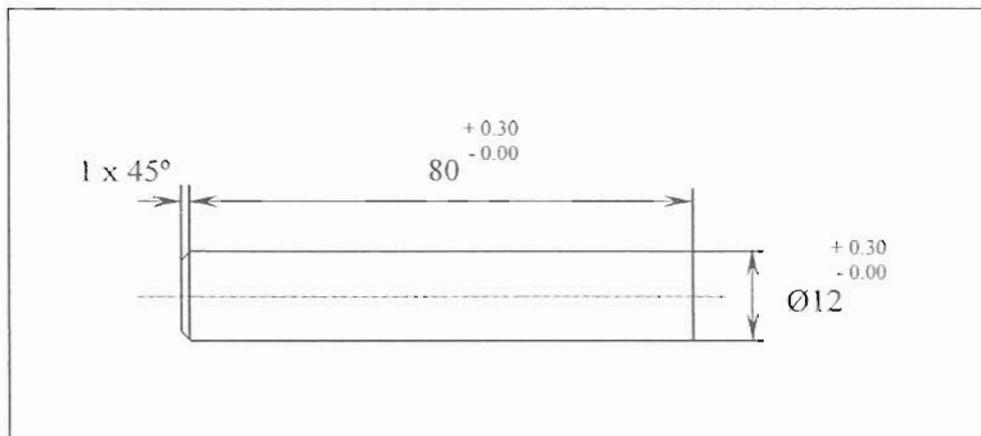
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ตามขั้นตอนการดำเนินงานที่กำหนด ส่วนสำคัญของการทดลองในการวิจัย คือ การกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือวิธีการอบชุบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุด้วยความร้อนและการชุบเย็นภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และการทดสอบด้านการตัดเฉือนภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อการเปรียบเทียบผลการทดลองแต่ละเงื่อนไข

3.1 การทดลองการอบชุบด้วยเตาสัญญากาศ

ชิ้นงานที่จะทำการชุบแข็ง จะต้องเตรียมชิ้นงานด้วยการกลึงปาดหน้าพร้อมกับเจียรในผิวกลมตามขนาดดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แสดงขนาดชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง

ชิ้นงานที่จะทำการชุบแข็งรวมทั้งหมด 60 ชิ้น โดยทำการชุบแข็งภายใต้เงื่อนไขในการชุบ 20 เงื่อนไข ตามกำหนดตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยกำหนดวิธีการทดลองการชุบแข็งในเตาสัญญากาศ

การกำหนดตัวแปรสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขในการทดลอง การอบชุบชิ้นงานประกอบด้วยเงื่อนไขของตัวแปรไว้ดังนี้

1. อุณหภูมิในการชุบแข็งที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 1150 °C และ 1230 °C
2. ระยะเวลาคงอุณหภูมิ (Soaking Time) คือช่วงเวลา 80 วินาที และ 150 วินาที

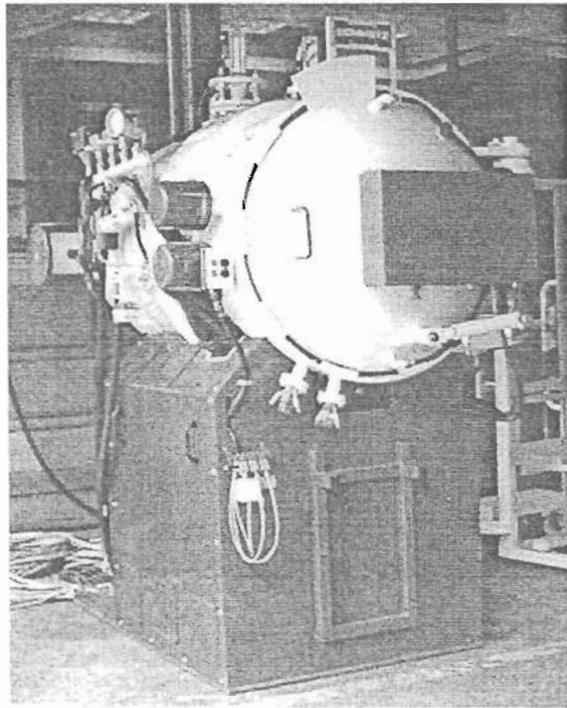
3. อุณหภูมิในการอบคืนตัว (Tempering) ที่ 520°C ระยะเวลาคงอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง

4. อุณหภูมิในการชุบเย็น (Sub-zero Treatment) ที่ -70°C และ -196°C ใช้เวลา 20 ชม. และไม่มีการชุบเย็น

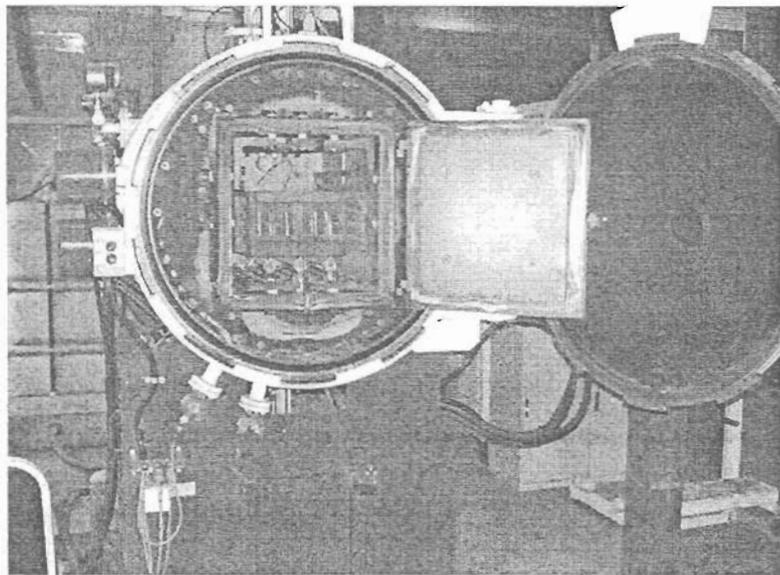
เงื่อนไขสำหรับการชุบแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงเงื่อนไขในการชุบแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม

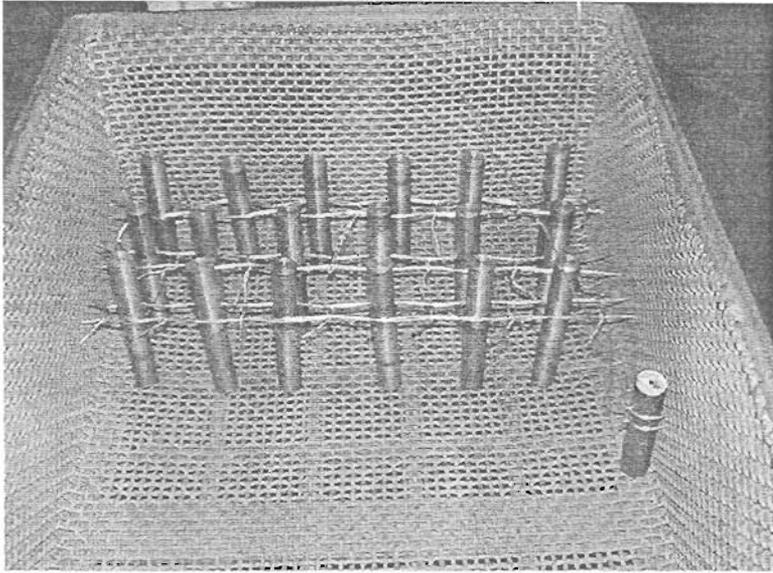
เงื่อนไข	อุณหภูมิชุบแข็ง $^{\circ}\text{C}$	เวลาคงอุณหภูมิ ชุบแข็ง (วินาที)	ขั้นตอน การบำบัดเย็น	อุณหภูมิ การชุบเย็น $^{\circ}\text{C}$
1	1150	80	ก่อนการอบคืนตัว	-70
2	1150	80	ก่อนการอบคืนตัว	-196
3	1150	80	หลังการอบคืนตัว	-70
4	1150	80	หลังการอบคืนตัว	-196
5	1150	80	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น
6	1150	150	ก่อนการอบคืนตัว	-70
7	1150	150	ก่อนการอบคืนตัว	-196
8	1150	150	หลังการอบคืนตัว	-70
9	1150	150	หลังการอบคืนตัว	-196
10	1150	150	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น
11	1230	80	ก่อนการอบคืนตัว	-70
12	1230	80	ก่อนการอบคืนตัว	-196
13	1230	80	หลังการอบคืนตัว	-70
14	1230	80	หลังการอบคืนตัว	-196
15	1230	80	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น
16	1230	150	ก่อนการอบคืนตัว	-70
17	1230	150	ก่อนการอบคืนตัว	-196
18	1230	150	หลังการอบคืนตัว	-70
19	1230	150	หลังการอบคืนตัว	-196
20	1230	150	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น



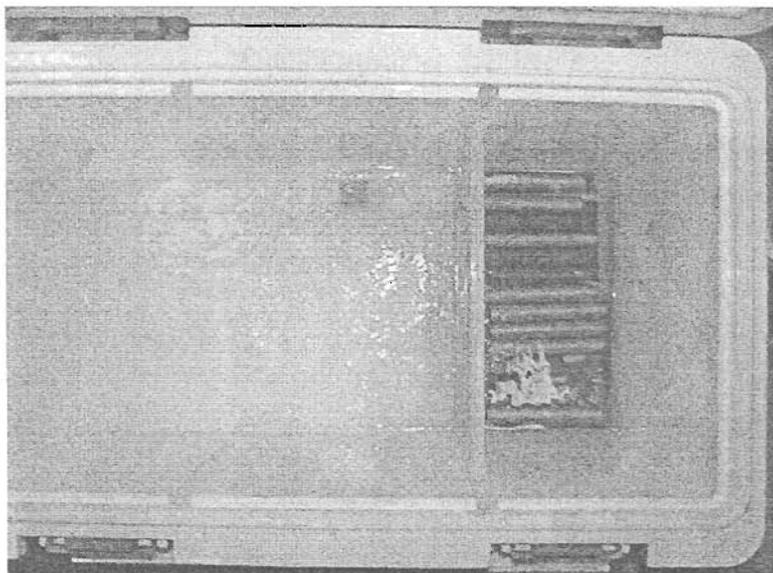
ภาพที่ 3-2 เตอบสูญญากาศ



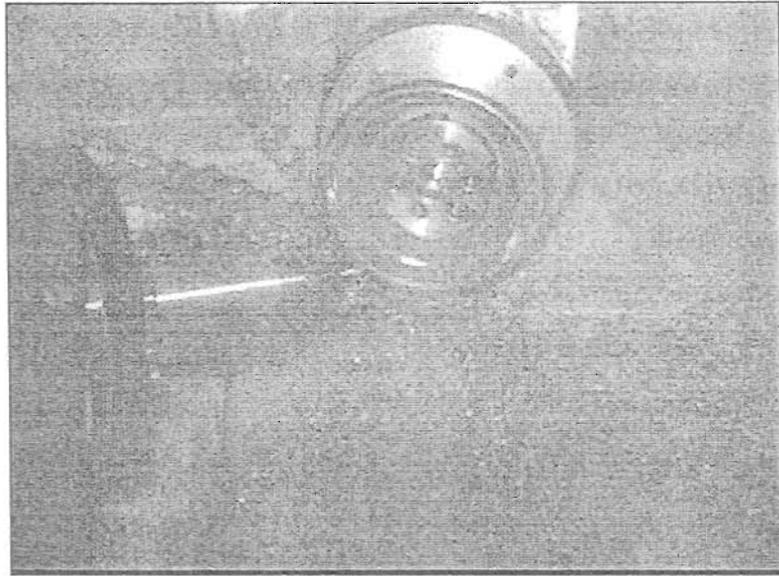
ภาพที่ 3-3 การจัดวางชิ้นงานสำหรับการชุบแข็งโดยเตาสุญญากาศ



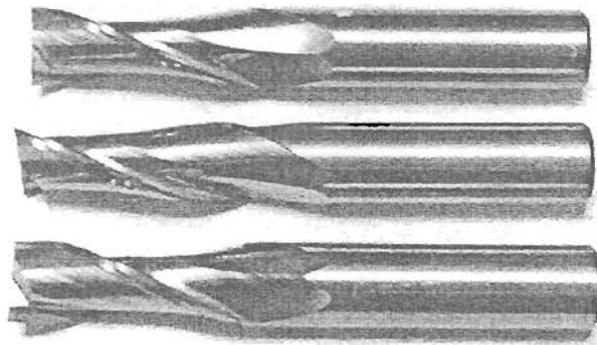
ภาพที่ 3-4 ลักษณะการจัดเรียงชิ้นงานสำหรับการชุบแข็งโดยเตาสถูญญากาศ



ภาพที่ 3-5 กระบวนการบำบัดเย็นเอ็นมิลล์วัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม



ภาพที่ 3-6 การผลิตเอ็นมิลล์วัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มด้วยเครื่องเจียไน้



ภาพที่ 3-7 ชิ้นงานเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม

3.2 การทดสอบความแข็ง

หลังจากการชุบแข็งแล้วนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบความแข็งที่ผิวงาน โดยกำหนดจุดทดสอบขึ้นละ 3 จุด ที่ผิวโค้งตามความยาวของชิ้นงาน นำผลการทดสอบที่ได้รวมกันแล้วนำค่าเฉลี่ยบวกกับค่าชดเชยจึงจะได้ผลการทดสอบค่าความแข็งที่ถูกต้อง

วัตถุประสงค์ของการทดสอบ เพื่อทำการหาค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการชุบแข็งทั้ง 20 เงื่อนไข และทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กตัวอย่างภายใต้การชุบแข็งที่แตกต่างกันและเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กตัวอย่างที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลสเกลซี (Rock well Hardness Scale C: HRC) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งมีดังนี้

1. เครื่องทดสอบความแข็งแบบ HRC
2. หัวกดเพชรรูปกรวยมีมุม 120 องศา



ภาพที่ 3-8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

3.3 การทดสอบส่วนผสมทางเคมี

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและเหล็กกล้าที่ทำการวิจัย การทดสอบโดยใช้วิธี Emission Spectrometer ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่ได้ เป็นค่าอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนัก ซึ่งจะตรวจสอบปริมาณของธาตุต่างๆ ดังนี้ เหล็ก คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วานาเดียม ทังสเทนและโคบอลต์



ภาพที่ 3-9 เครื่องอีมิชันสเปกโตรมิเตอร์

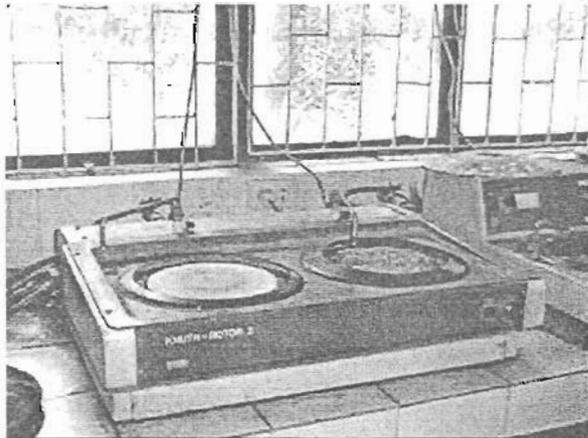
3.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจสอบการกระจายของคาร์ไบด์ และวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเมตริกของมาร์เทนไซต์โดยการวิเคราะห์โครงสร้างก่อนการชุบแข็ง และวิเคราะห์โครงสร้างหลังการชุบแข็งรวมทั้งเปรียบเทียบกับมีดกัดที่ผลิตจากต่างประเทศ

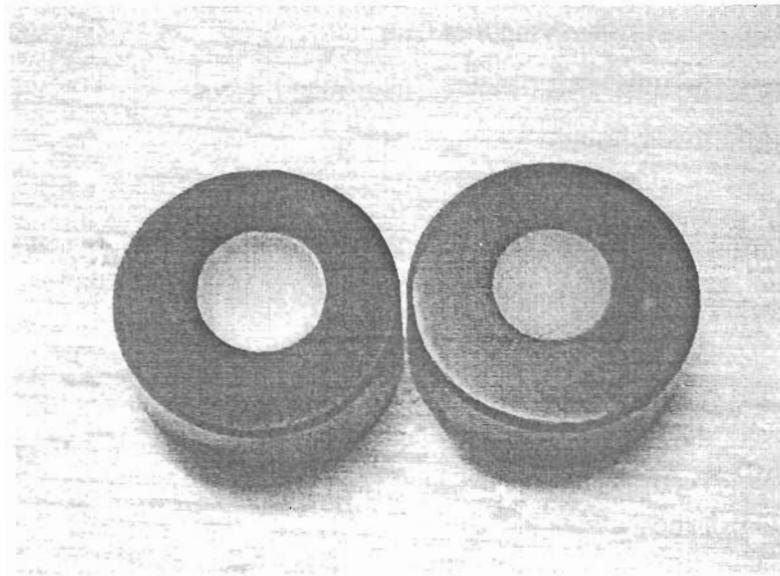
วิธีการในการตัดชิ้นทดสอบจะทำการตัดขนานกับพื้นที่หน้าตัดวงกลม หนาประมาณ 10 มม. ซึ่งชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กไม่สามารถจับยึดได้สะดวก จึงนำไปทำตัวเรือนโดยอัดด้วยเบเกอร์ไลต์ ความร้อนประมาณ 150 ถึง 170 °C หลังจากนั้นนำชิ้นงานทำการขัดด้วยกระดาษทรายโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ตามลำดับ ตั้งแต่ เบอร์ 220 ถึง เบอร์ 2000 และขัดเงาด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ลูมิน่าเหลวช่วยในการขัดจนหมดรอยขีดข่วน หลังจากนั้นทำการล้างน้ำและแอลกอฮอล์ กัดด้วยกรดไนตริก 3 % เจือจางด้วยเมทานอล และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ พร้อมถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบเป็นการวิเคราะห์ขนาดคาร์ไบด์ การพิจารณา ลักษณะการกระจายของคาร์ไบด์ ซึ่งอาจมีผลต่อคุณภาพของมีดกัดในการตัดเฉือนของชิ้นงาน



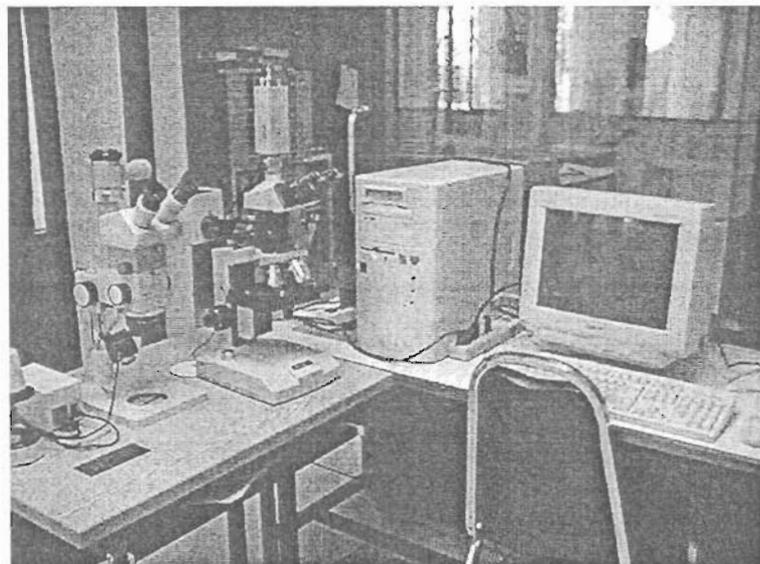
ภาพที่ 3-10 เครื่องตัดชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็น และเครื่องจับยึดชิ้นทดสอบแบบร้อน



ภาพที่ 3-11 เครื่องขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายและขัดมัน



ภาพที่ 3-12 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 3-13 กล้องจุลทรรศน์

3.5 การตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิต

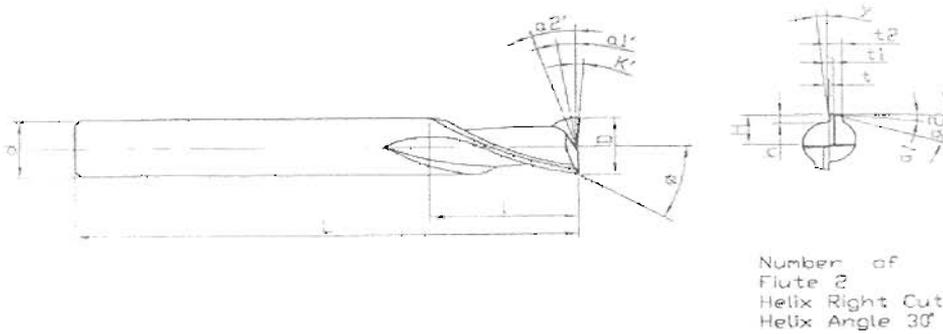
วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เพื่อตรวจสอบมุมต่างๆ ของเอ็นมิลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. จำนวน 2 คมตัด ขนาดของเอ็นมิลล์ที่ต้องการตรวจสอบได้แก่

D = ขนาดความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter of End Mill)

L = ความยาวทั้งหมดของเอ็นมิลล์ (Overall Length)

- l = ความยาวของคมตัด (Length of Cut)
 γ = มุมคายเศษในแนวรัศมี (Radius Rake Angle)
 ϕ = มุมเฉียง (Helix Angle)

รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด สำหรับศึกษาทางรูปทรงเรขาคณิต และ ออกแบบในการผลิตเอ็นมิลล์ประกอบด้วยส่วนๆ ดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

3.6 การทดสอบการตัดเฉือน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือน คือ เพื่อทดสอบการสึกหรอของคมตัดของเอ็นมิลล์นำเข้าจากต่างประเทศ รวมถึงเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยเงื่อนไขการอบชุบทั้ง 20 เงื่อนไข ตามรูปทรงทางเรขาคณิตตามกำหนดซึ่งการทดสอบเงื่อนไขในการตัดเฉือนจะใช้เงื่อนไขการตัดเฉือนตามเอ็นมิลล์ต่างประเทศ ค่าความสึกหรอต่ำที่สุดมาใช้ในการทดสอบตามตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงเงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	รหัสชิ้นงาน	ความเร็วรอบ n (rev/min)	ความเร็วป้อน Vf (mm/min)	ความเร็วตัด Vc (m/min)
1	HI	380	40	14.3
2	OS	315	38	11.8
3	HA	470	56	17.7
4	YG	450	54	16.9
5	DO	665	86	25
6	Material Böhler (S390)	380	40	14.3

ตามตารางที่ 3-2 สามารถกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มได้คือ ความเร็วตัด 14.3 เมตร/นาที ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ความเร็วป้อน 40 มม./นาที ความลึกในการตัดเฉือน 3.0 มม. ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้า SCM440 ทำการอบชุบ และอบคืนตัว ค่าความแข็งอยู่ที่ 30 HRC. การทดสอบการตัดเฉือน ใช้โปรแกรมการตัดเฉือนอัตโนมัติ ใช้ระยะทางในการตัดเฉือน 1200 มม. โดยแบ่งการตัดเฉือน ออกเป็น 3 ครั้งๆ ละ 400 มม. เมื่อสิ้นสุดการตัดเฉือนแต่ละครั้ง โปรแกรมจะหยุดการทำงาน และเคลื่อนที่ออกจากงาน การวัดค่าความสึกหรอของเอ็นมิลล์จะทำการวัดทุกครั้งของการตัดเฉือน ตั้งแต่รอบแรกถึงรอบสุดท้าย เท่ากับทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง ทุกๆระยะการตัดเฉือน 400 มม. จนครบระยะทางทั้งหมด 1200 มม. สำหรับการวัดค่าความสึกหรอของเอ็นมิลล์ จะแบ่งระยะการวัด จากปลายมีดกัดถึงช่วงกัตงานลึก 3.0 มม. แบ่งออกเป็น 6 ช่วงๆ ละ 0.5 มม. ทำการวัด การสึกหรอที่ผิวหลบทั้ง 2 คมตัดของเอ็นมิลล์ หลังจากนั้นนำผลการวัดไปทำการวิเคราะห์ และ เปรียบเทียบระหว่างเอ็นมิลล์นำเข้าจากต่างประเทศ กับเอ็นมิลล์ที่ทำการชุบแข็งภายใต้เงื่อนไข ที่แตกต่างกัน

บทที่ 4

ผลของการวิจัย

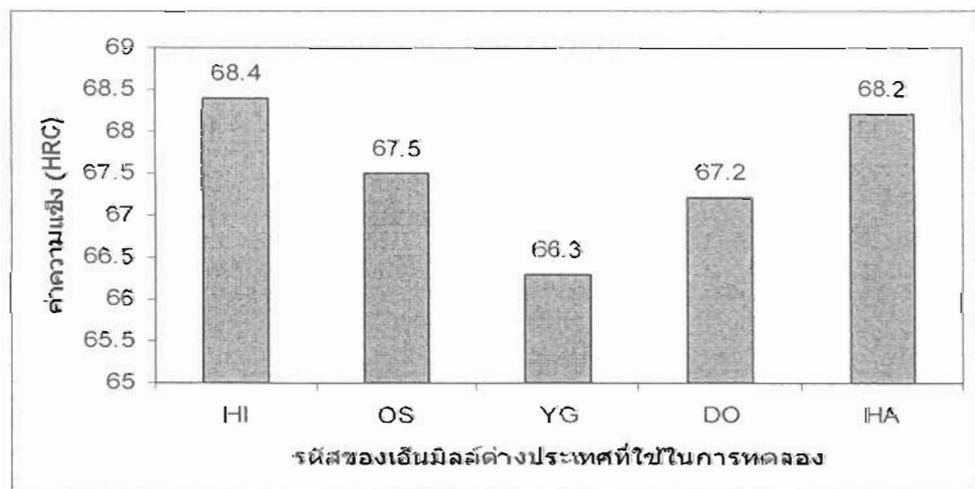
4.1 ผลการทดสอบความแข็งเอ็นมิลล์

การทดสอบความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม นำเข้าจากต่างประเทศจำนวน 5 ยี่ห้อ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกันกับเอ็นมิลล์ที่ผลิตสำหรับงานวิจัย กำหนดจำนวนชั้นทดสอบ 3 ชั้นทดสอบ โดยกำหนดจุดทดสอบชั้นละ 3 จุด ค่าความแข็งที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศอยู่ในช่วง 66.3 ถึง 68.4 HRC

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ

ลำดับ	รหัสชิ้นงาน	ความแข็ง (HRC)
1	HI	68.4
2	OS	67.5
3	HA	66.3
4	YG	67.2
5	DO	68.2

ผลการทดสอบเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศความแข็งอยู่ในช่วง 66.3 ถึง 68.4 HRC ความแข็งสูงสุดคือ เอ็นมิลล์รหัส HI ผลิตจากประเทศ ญี่ปุ่น และผลการทดสอบที่ได้ค่าความแข็งต่ำสุดคือ เอ็นมิลล์รหัส YG ผลิตจากประเทศ เกาหลี

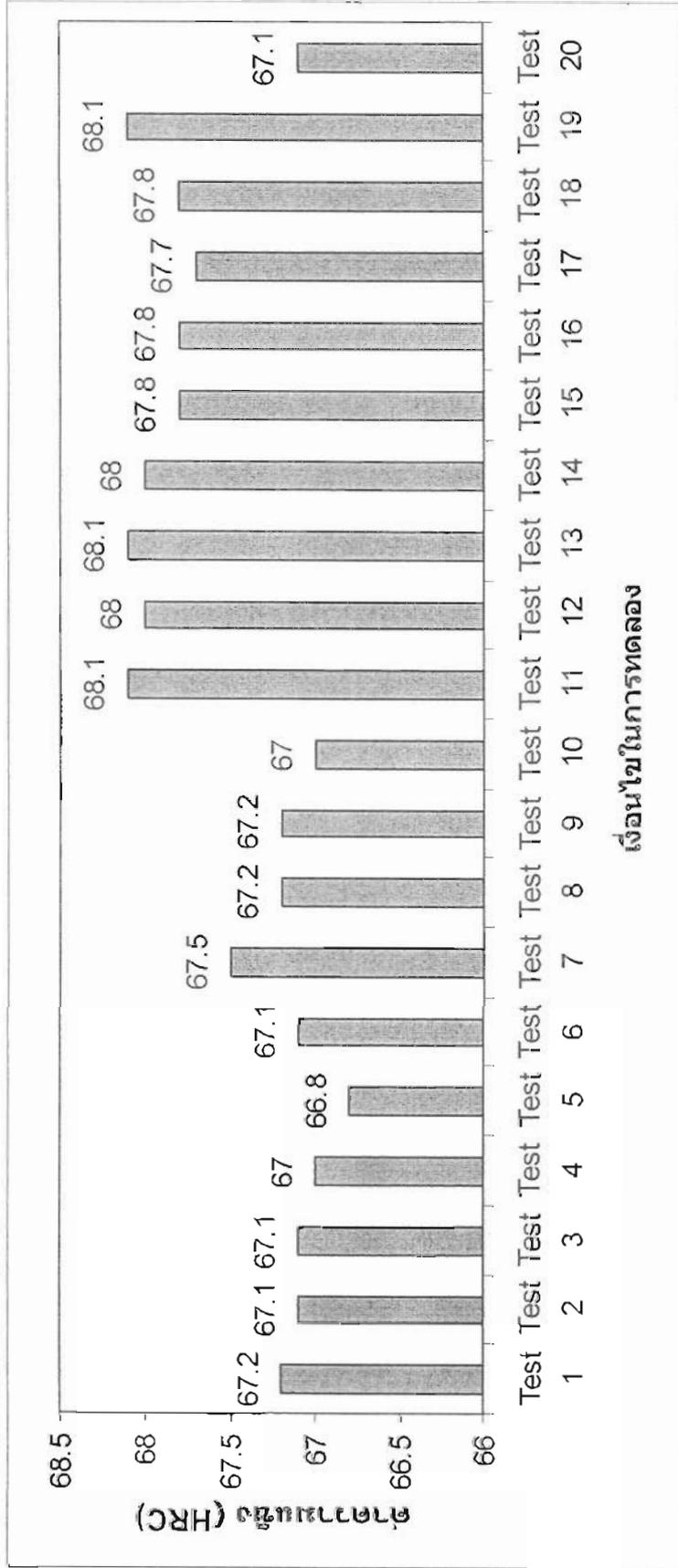


ภาพที่ 4-1 แสดงค่าความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ

สำหรับค่าความแข็งของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มที่ผลิตภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ได้ค่าความแข็งตามตารางที่ 4-2 อุณหภูมิชุบแข็งที่สูงที่ 150 °C ให้ค่าความแข็งที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ที่ 80 °C ในขณะที่เดียวกันเวลาในการคงอุณหภูมิที่ 150 วินาที ให้ค่าความแข็งลดน้อยลง ผลการทดลองปรากฏว่าได้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 66.8 - 68.1 HRC โดยค่าความแข็งส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองทั้ง 20 เงื่อนไข มีค่ามากกว่า 67 HRC ทำการเปรียบเทียบความแข็งที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลค่าความแข็งของชิ้นงานผ่านการชุบแข็งและบำบัดเย็นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไข	อุณหภูมิชุบแข็ง °C	เวลาคงอุณหภูมิชุบแข็ง (วินาที)	ขั้นตอนการบำบัดเย็น	อุณหภูมิการชุบเย็น °C	ค่าความแข็ง (HRC.)
1	1150	80	ก่อนการอบคืนตัว	- 70	67.2
2	1150	80	ก่อนการอบคืนตัว	-196	67.1
3	1150	80	หลังการอบคืนตัว	-70	67.1
4	1150	80	หลังการอบคืนตัว	-196	67
5	1150	80	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น	66.8
6	1150	150	ก่อนการอบคืนตัว	- 70	67.1
7	1150	150	ก่อนการอบคืนตัว	-196	67.5
8	1150	150	หลังการอบคืนตัว	-70	67.2
9	1150	150	หลังการอบคืนตัว	-196	67.2
10	1150	150	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น	67
11	1230	80	ก่อนการอบคืนตัว	- 70	68.1
12	1230	80	ก่อนการอบคืนตัว	-196	68
13	1230	80	หลังการอบคืนตัว	-70	68.1
14	1230	80	หลังการอบคืนตัว	-196	68
15	1230	80	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น	67.8
16	1230	150	ก่อนการอบคืนตัว	- 70	67.8
17	1230	150	ก่อนการอบคืนตัว	-196	67.7
18	1230	150	หลังการอบคืนตัว	-70	67.8
19	1230	150	หลังการอบคืนตัว	-196	68.1
20	1230	150	ไม่มีการบำบัดเย็น	ไม่มีการบำบัดเย็น	67.1



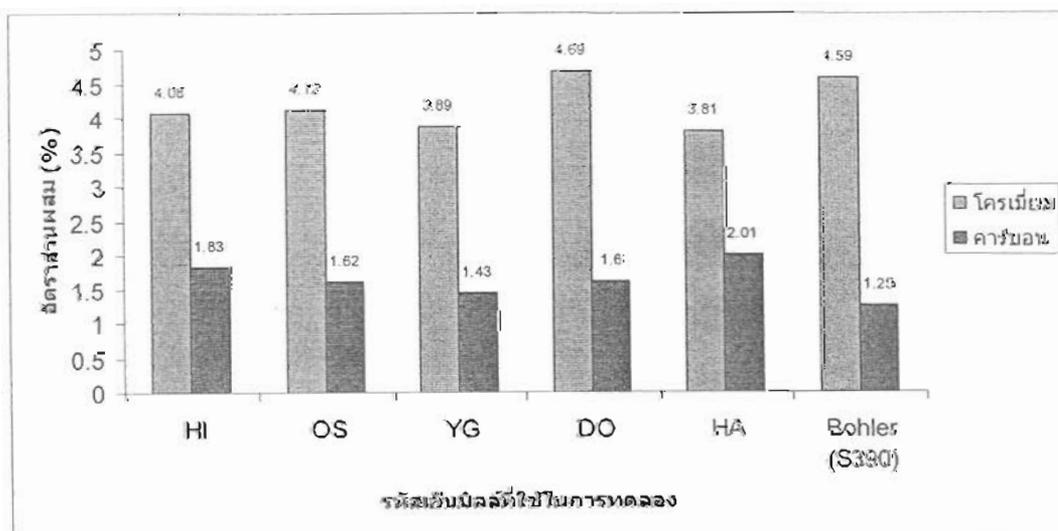
ภาพที่ 4-2 ผลค่าความถี่ของคลื่นงานหลักกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 ผ่านการชุบแข็งและบำบัดเย็นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

4.2 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี

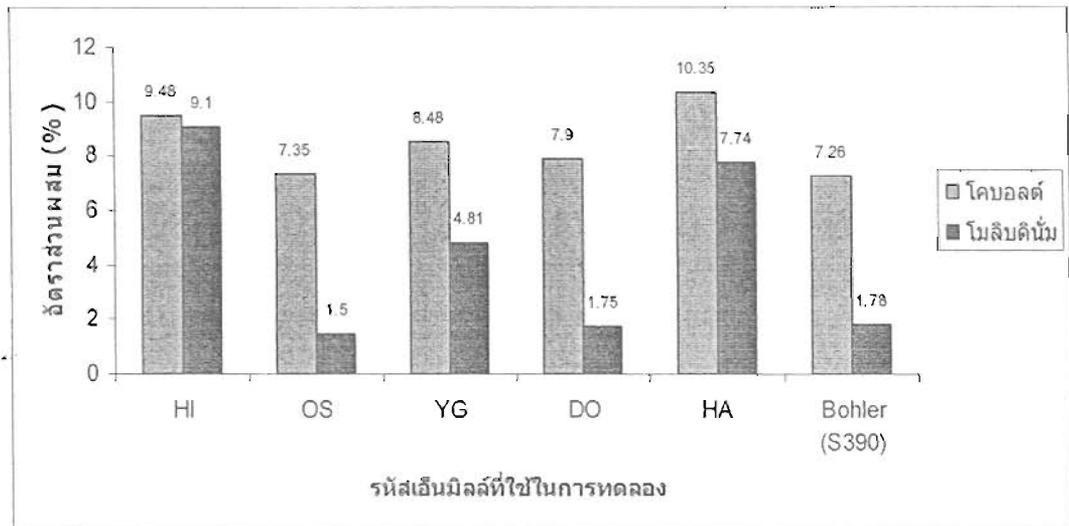
ส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศ และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มที่ใช้ในการทดลอง ได้กำหนดการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอ เนื่องจากการตัดเฉือน ผลการทดสอบและวิเคราะห์ธาตุผสมปรากฏว่า เอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 6 รหัสการทดลอง มีอัตราส่วนผสมของธาตุผสมที่ไม่ใช่ธาตุเหล็กอยู่ในประมาณสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 รหัสการทดลอง และแนวโน้มของการมีธาตุผสมที่ไม่ใช่เหล็กในปริมาณที่มากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพความต้านทานต่อการสึกหรอจากการตัดเฉือนสูงเพิ่มขึ้น สำหรับประมาณธาตุผสมในวัสดุ เช่น คาร์บอน โครเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม ทั้งสแตนเลสและวานาเดียม จะแสดงการเปรียบเทียบปริมาณในภาพที่ 4-2 ถึง 4-5

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์

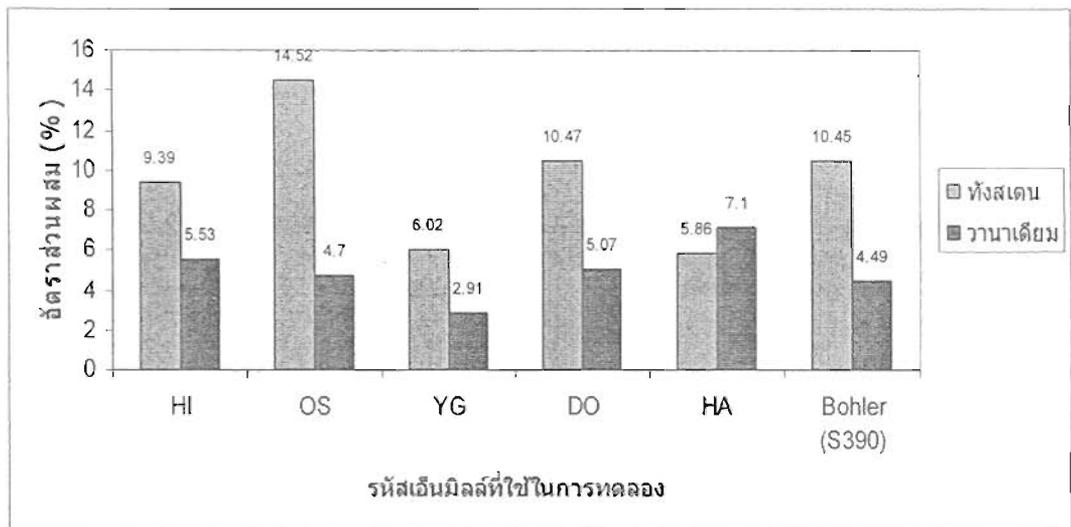
รหัสในการทดลอง	ปริมาณส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Cr	Mo	V	W	Co
HI	1.83	4.08	9.1	5.53	9.39	9.48
OS	1.62	4.12	1.5	4.7	14.52	7.53
HA	2.01	3.84	7.74	7.1	5.86	10.35
YG	1.43	3.89	4.81	2.91	6.02	8.48
DO	1.6	4.69	1.75	5.07	10.47	7.9
Böhler S390	1.25	4.59	1.78	4.49	10.45	7.26



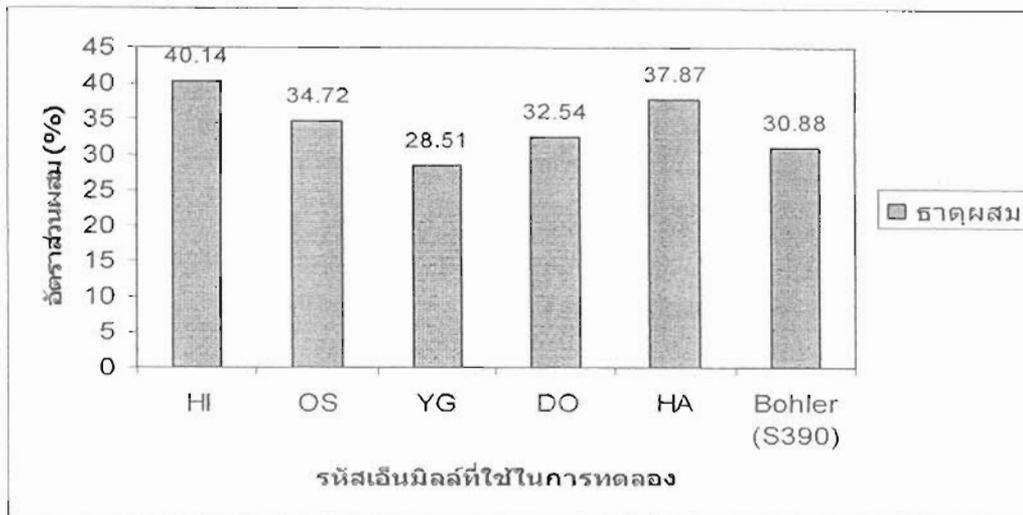
ภาพที่ 4-3 แสดงอัตราส่วนผสมของคาร์บอนและโครเมียมในเอ็นมิลล์



ภาพที่ 4-4 แสดงอัตราส่วนผสมของโคบอลต์และโมลิบดีนัมในเอ็นนิรรมลล์



ภาพที่ 4-5 แสดงอัตราส่วนผสมของทังสเดนและวานาเดียมในเอ็นนิรรมลล์



ภาพที่ 4-6 แสดงอัตราส่วนผสมของธาตุผสมในเอ็นมิลล์

4.3 ผลการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

ผลการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิต ของเอ็นมิลล์ที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ มีขนาดต่างๆ ในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ของแต่ละรหัส

ลำดับ	รหัสในการทดลอง	มุมคายเศษ γ	มุมเอียง ϕ
1	HI	17.47	30
2	OS	14.47	30
3	HA	18.66	30
4	YG	14.30	30
5	DO	18.21	30
6	Material Böhler (S390)	17.47	30

จากการวัดขนาดต่างๆ ของเอ็นมิลล์ที่นำเข้าจากต่างประเทศจำนวน 5 ยี่ห้อ นำผลที่วัดได้ ทำการประมวลผลทางสถิติโดยพิจารณาในส่วนสำคัญๆ ได้แก่มุมคายเศษ มุมเอียงของคมตัด ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า ค่าของมุมคายเศษอยู่ในช่วง 14.3 ถึง 18.66 องศา โดยกำหนดขนาด สำหรับการวิจัย คือ มุมคายเศษเท่ากับ 17.47 องศา มุมเอียงของสันคมตัด 30 องศา ในส่วนของ เอ็นมิลล์ที่ผลิตขึ้นเพื่อการทดลอง หลังจากทำการชุบแข็งแล้วจะทำการเจียรไนขึ้นรูปให้เป็น เอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรไนอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม CNC ทุกขั้นตอนเพื่อให้ได้ ขนาดและมุมต่างๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนด จนกระทั่งผลิตเสร็จขั้นตอนสุดท้าย หลังจากผลิต

เป็นเอ็นมิลล์เรียบร้อยแล้วนำเอ็นมิลล์ที่ผลิตได้ไปตรวจสอบขนาด และมุมต่างๆ ด้วยเครื่องมือวัดละเอียด เช่นเดียวกับการวัดขนาดและมุมต่างๆ ของเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เมื่อทำการตรวจสอบขนาดต่างๆ ของเอ็นมิลล์ได้ขนาดตามที่กำหนดสำหรับการวิจัย จึงนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

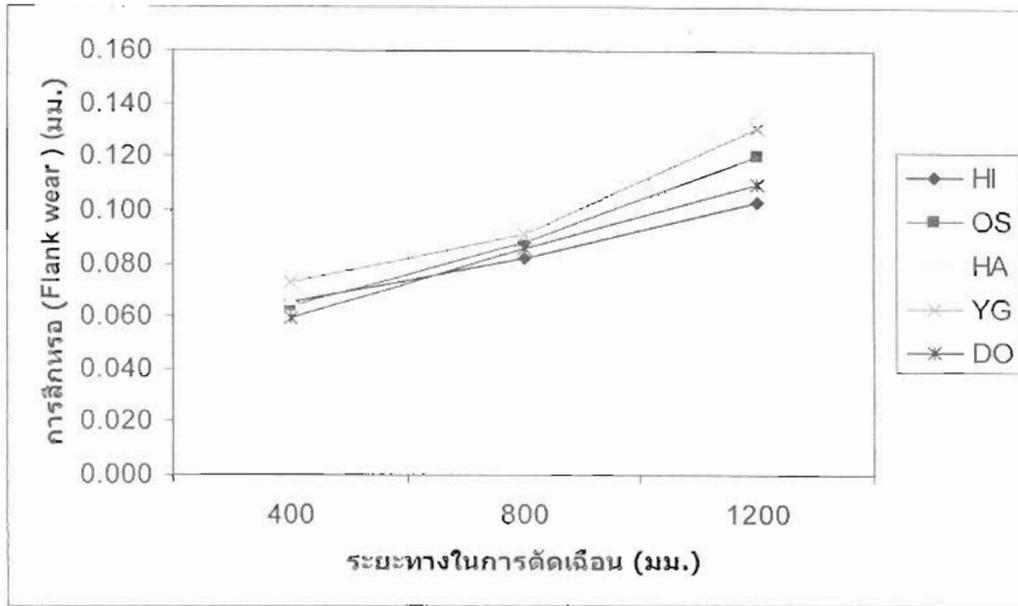
4.4 ผลการทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอที่ผิวหลบสำหรับเอ็นมิลล์จากต่างประเทศผลปรากฏว่า เอ็นมิลล์ที่มีการสึกหรอมากที่สุด คือ รหัส YG ระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมีค่าเท่ากับ 0.137 มม. รหัสที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดคือ HI ระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมีค่าเท่ากับ 0.103 มม. ส่วนเอ็นมิลล์ที่ชุบแข็งและทำการผลิตขึ้นใช้สำหรับวิจัยนั้น เจือไนที่มีการสึกหรอมากที่สุดคือ เจือไนที่ 3 ระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมีค่าเท่ากับ 0.12 มม. โดยมีเจือไนในการชุบแข็งและบำบัดเย็น คือ อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1150°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 80 วินาที ทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70°C หลังทำการอบคืนตัว และในส่วนของเอ็นมิลล์ที่ชุบแข็งและทำการผลิตขึ้นใช้สำหรับวิจัย เจือไนที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดคือ เจือไนที่ 12 ระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมีค่าเท่ากับ 0.84 มม. โดยมีเจือไนในการชุบแข็งและบำบัดเย็น คือ อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1230°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 80 วินาที ทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -196°C ก่อนทำการอบคืนตัว

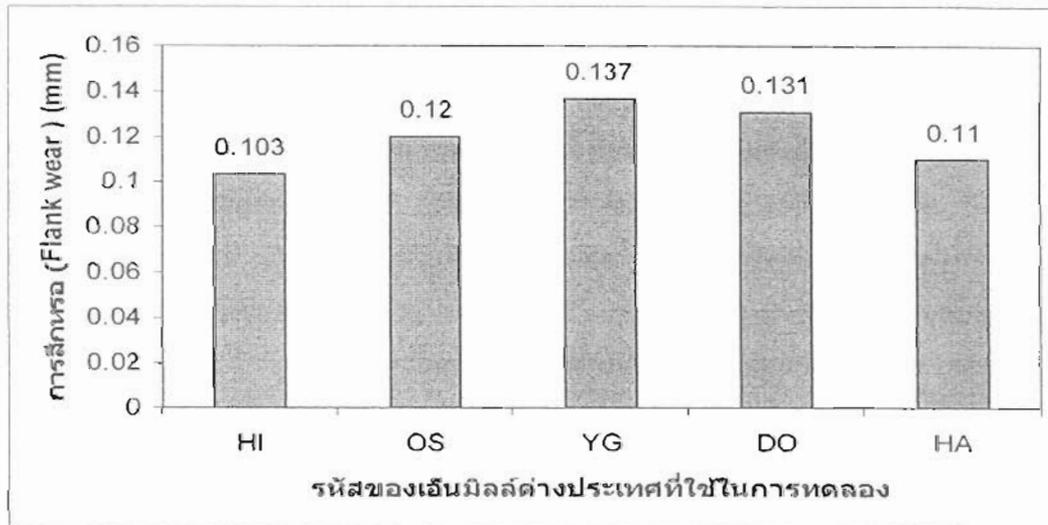
ผลการทดลองการตัดเฉือน ปรากฏว่าเอ็นมิลล์ที่ชุบด้วยอุณหภูมิสูงกว่า คืออุณหภูมิ 1230°C ระยะการสึกหรอโดยเฉลี่ยจะน้อยกว่าการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1150°C และเวลาในการคงอุณหภูมิที่ 80 วินาที จะได้ระยะการสึกหรอที่น้อยกว่า เวลาในคงอุณหภูมิที่ 150 วินาที สำหรับเจือไนในการชุบเย็นปรากฏว่าการชุบเย็นที่อุณหภูมิ -196°C จะได้ระยะการสึกหรอโดยเฉลี่ยจะน้อยกว่าการชุบเย็นที่อุณหภูมิ -70°C และการชุบเย็นก่อนการอบคืนตัวจะได้ระยะการสึกหรอโดยเฉลี่ยจะน้อยกว่าการชุบเย็นหลังการอบคืนตัว

4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเศษตัด

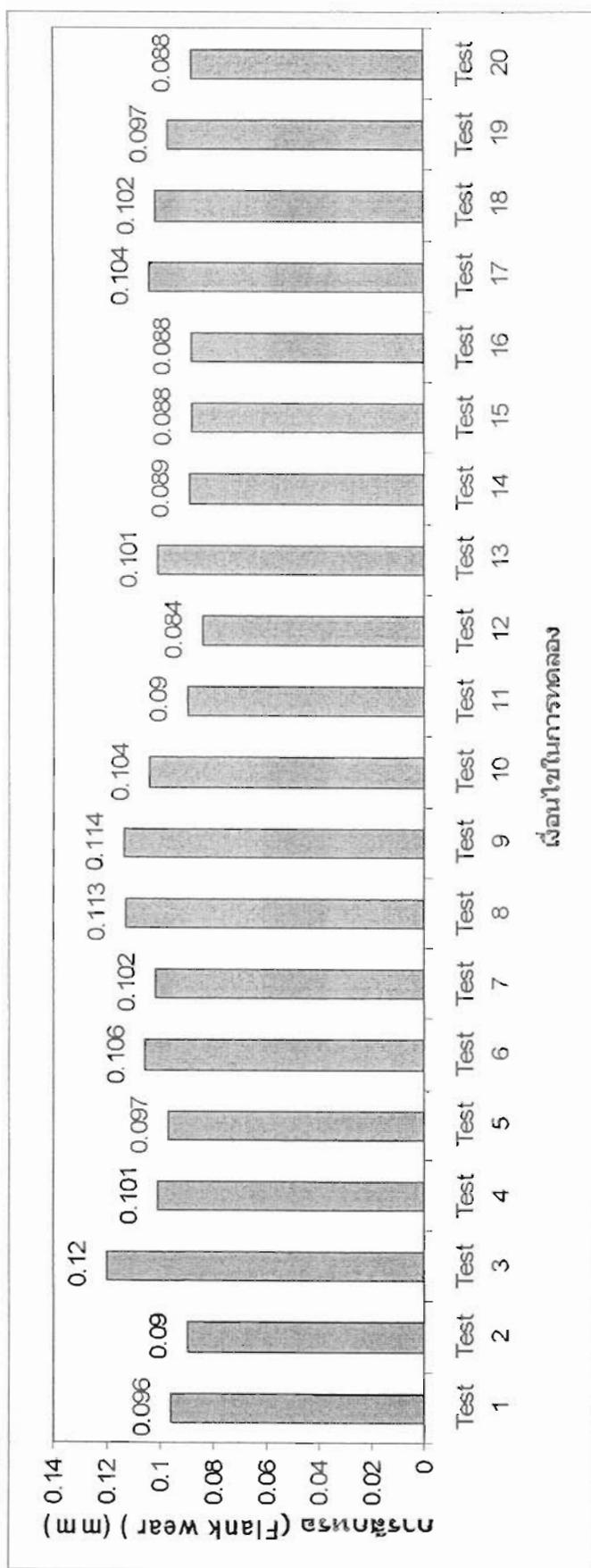
ผลการวิเคราะห์ลักษณะเศษตัดที่ได้จากการทดสอบ โดยการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์จากต่างประเทศ และเอ็นมิลล์ที่ผลิตขึ้นเพื่องานวิจัยพบว่า ลักษณะเศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี จะได้ลักษณะเศษตัดที่มีขนาดเข้าหากันค่อนข้างน้อยกว่าเศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำกว่า และสีที่เกิดขึ้นสำหรับเศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี จะเป็นสีที่เกิดขึ้นสำหรับเหล็กที่ผ่านความร้อนน้อยกว่าเศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำกว่า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี จะเกิดความร้อนระหว่างการตัดเฉือนน้อยกว่าเศษตัดที่ได้จากเอ็นมิลล์ที่มีคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำกว่า



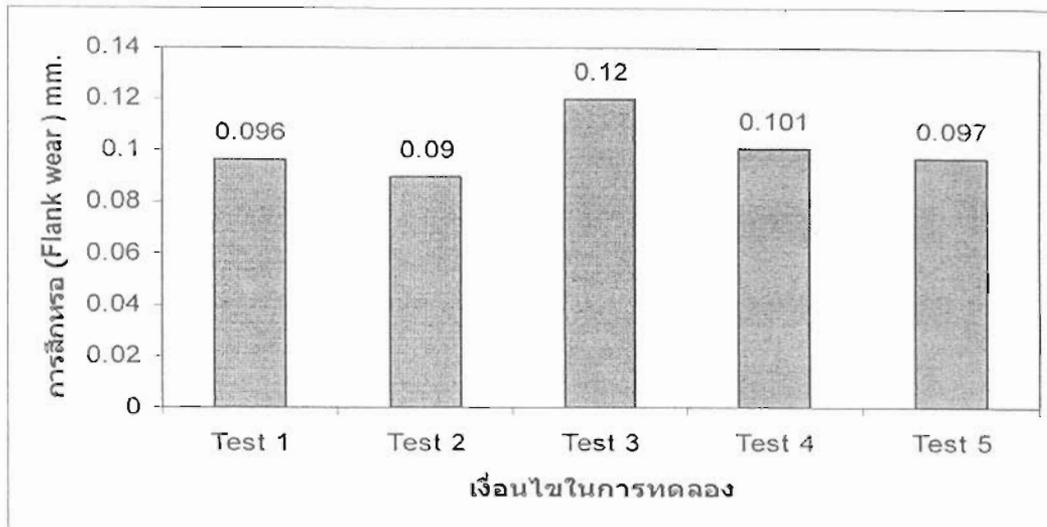
ภาพที่ 4-7 เปรียบเทียบระยะการสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ต่างประเทศ



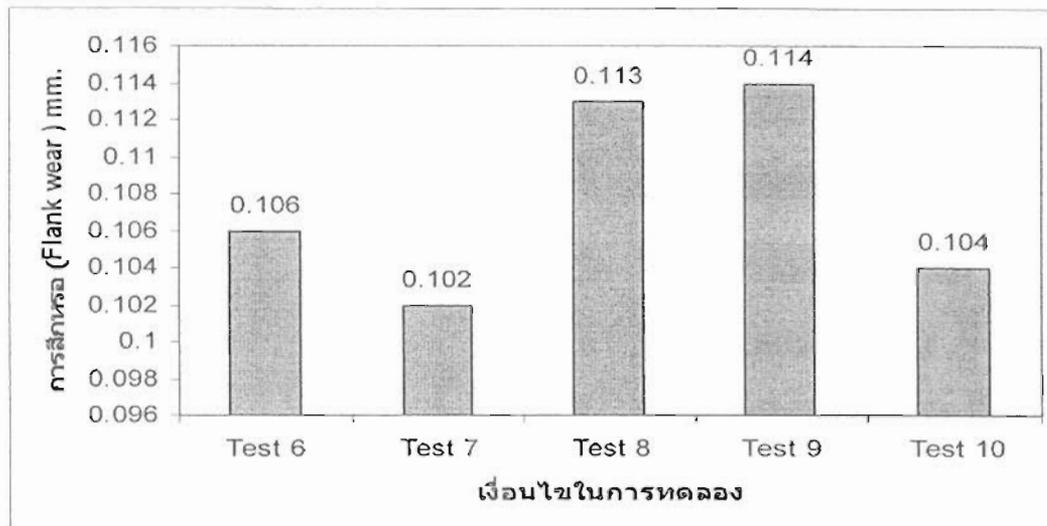
ภาพที่ 4-8 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ต่างประเทศระยะทางการตัดเฉือน 1200 มม.



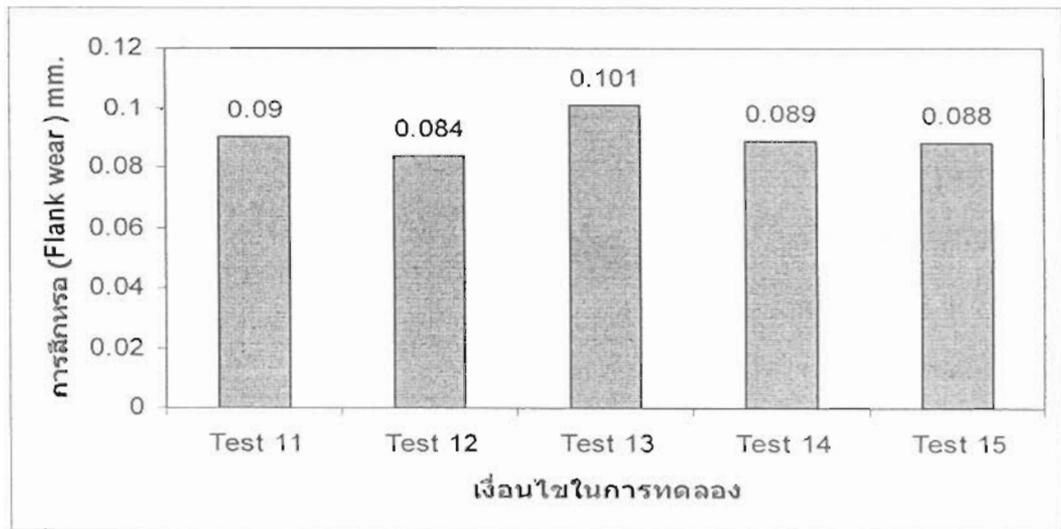
ภาพที่ 4-9 การสึกหรอที่ผิวของเอ็นมิลล์เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 Böhler ที่ระยะทางการตัด 1200 มม.



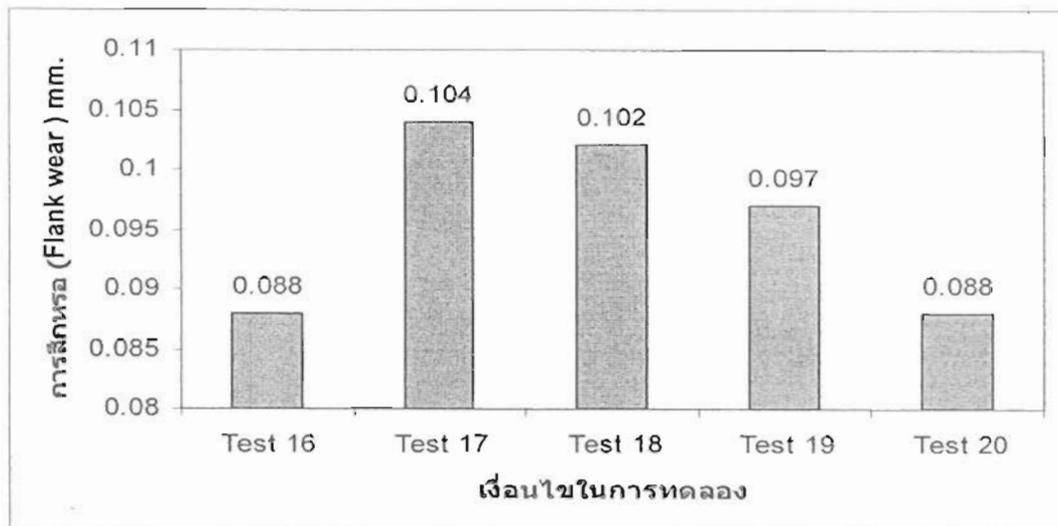
ภาพที่ 4-10 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อูณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C
เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



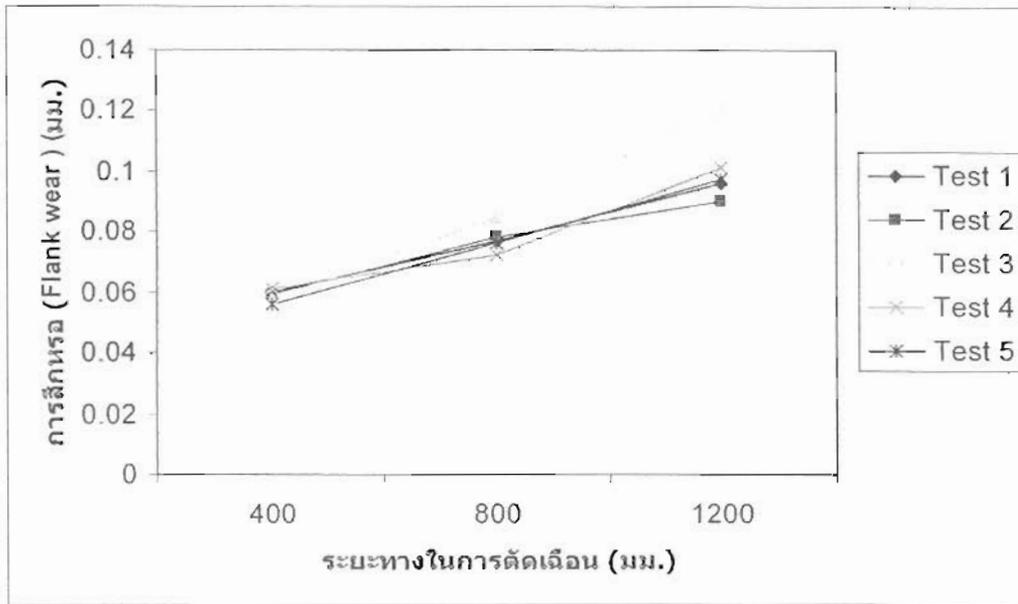
ภาพที่ 4-11 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อูณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C
เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



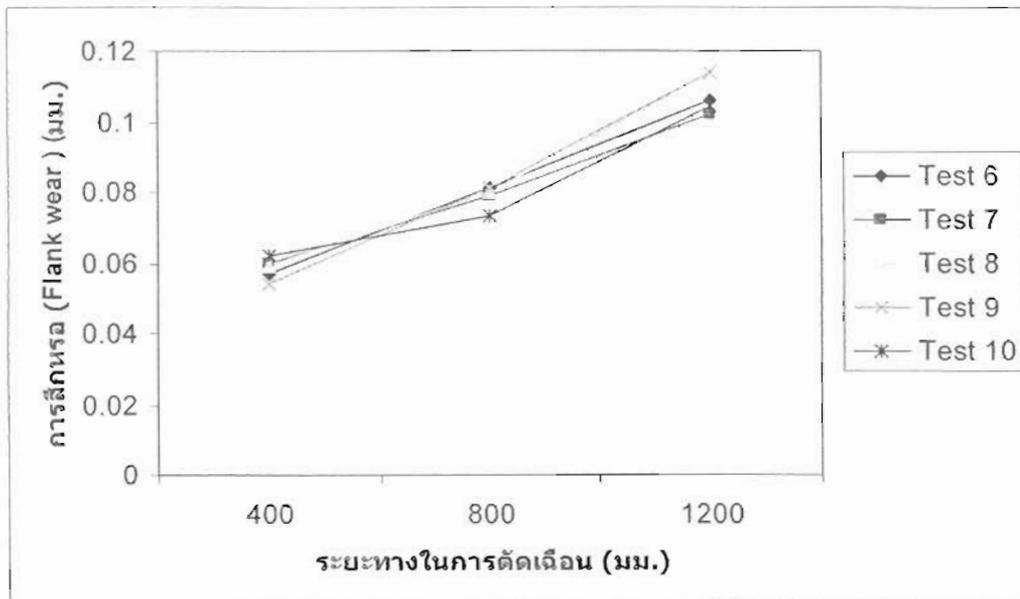
ภาพที่ 4-12 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C
เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



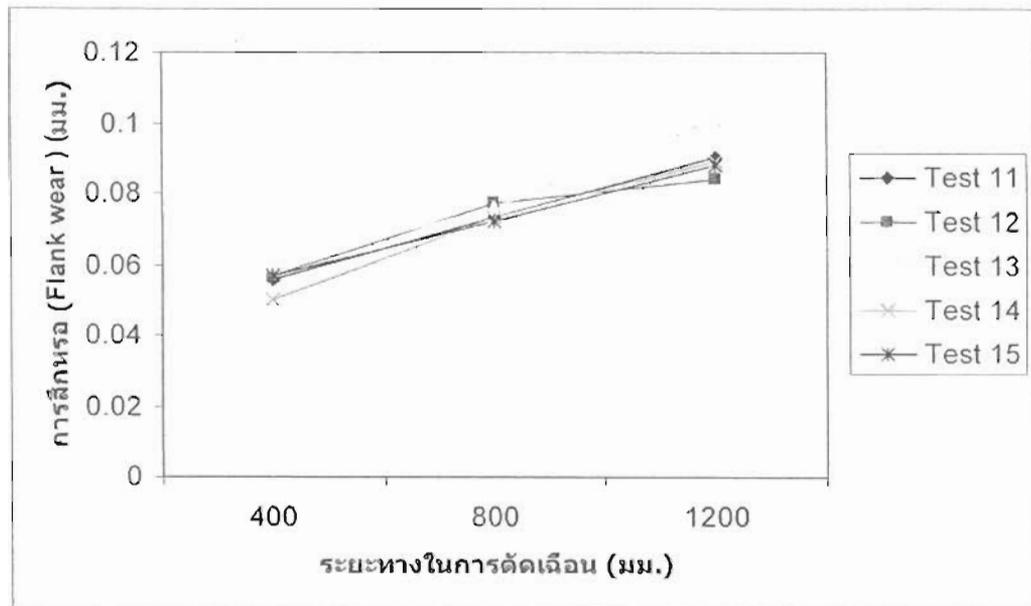
ภาพที่ 4-13 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C
เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



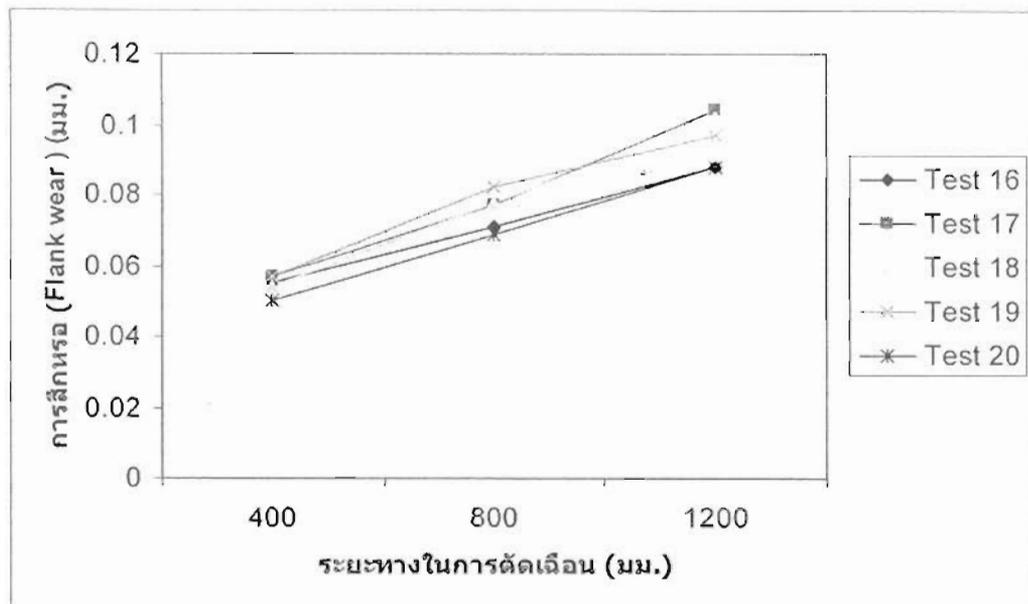
ภาพที่ 4-14 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



ภาพที่ 4-15 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อุณหภูมิชุบแข็ง 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



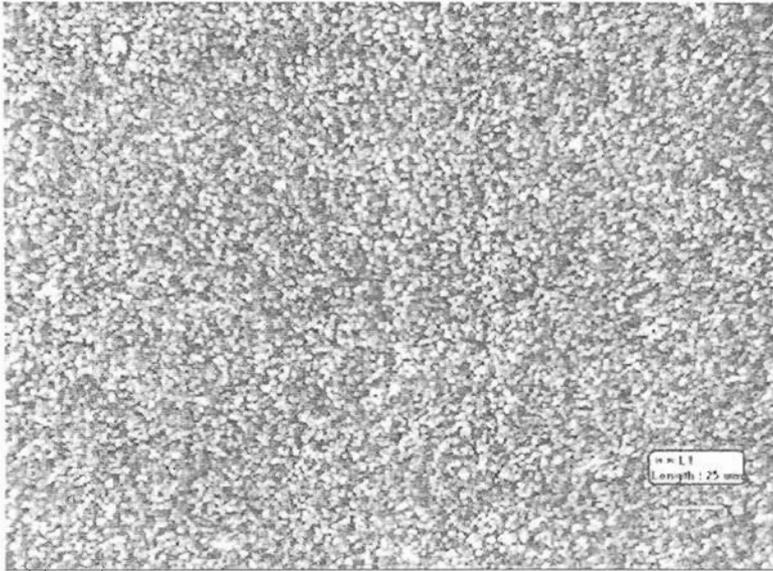
ภาพที่ 4-16 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อูณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.



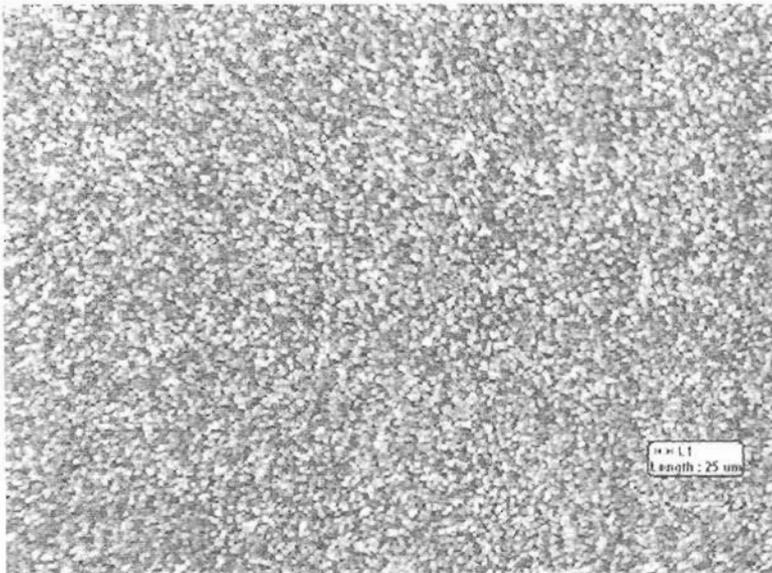
ภาพที่ 4-17 การสึกหรอที่ผิวหลบของเอ็นมิลล์ อูณหภูมิชุบแข็ง 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที ระยะทางการตัด 1200 มม.

4.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

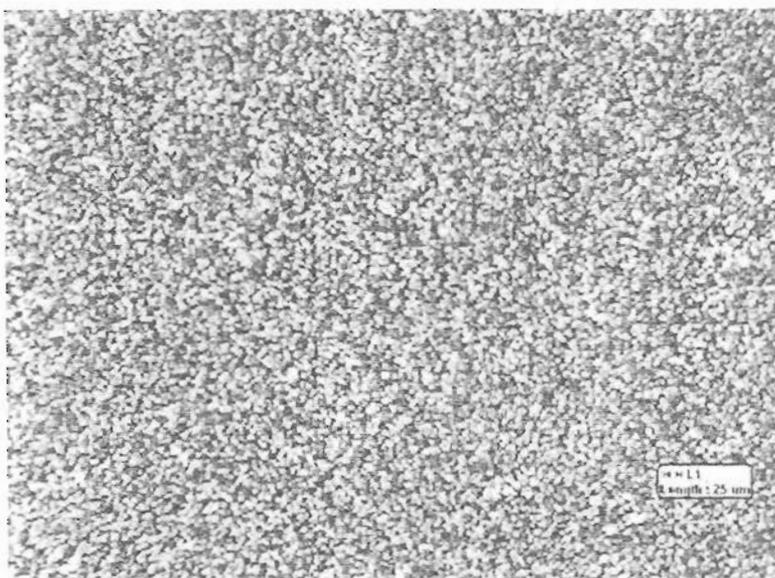
ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ของเอ็นมิลล์ตัวอย่างนำเข้าจากต่างประเทศ และเอ็นมิลล์ที่มีผลผลิตสำหรับการวิจัย ส่วนใหญ่มีโครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ และมีความละเอียดแตกต่างกัน ภายในโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีคาร์ไบด์กระจายแทรกอยู่ทั่วไป



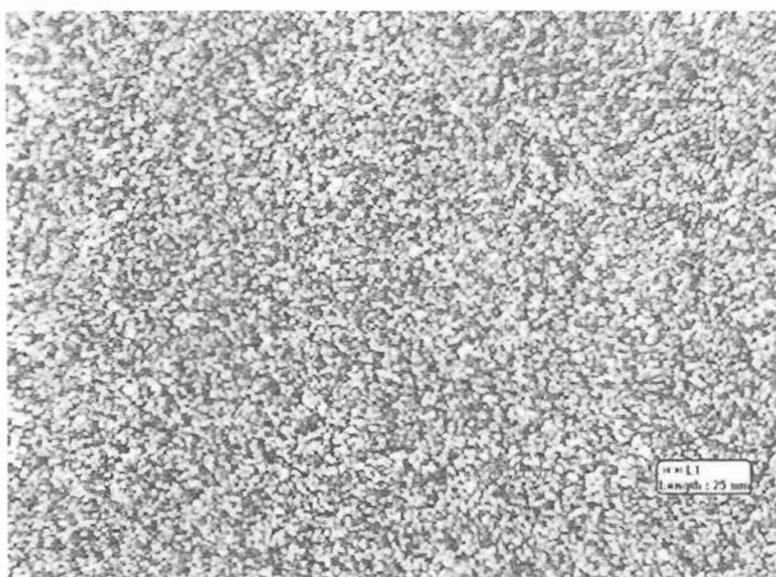
ภาพที่ 4-18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส YG



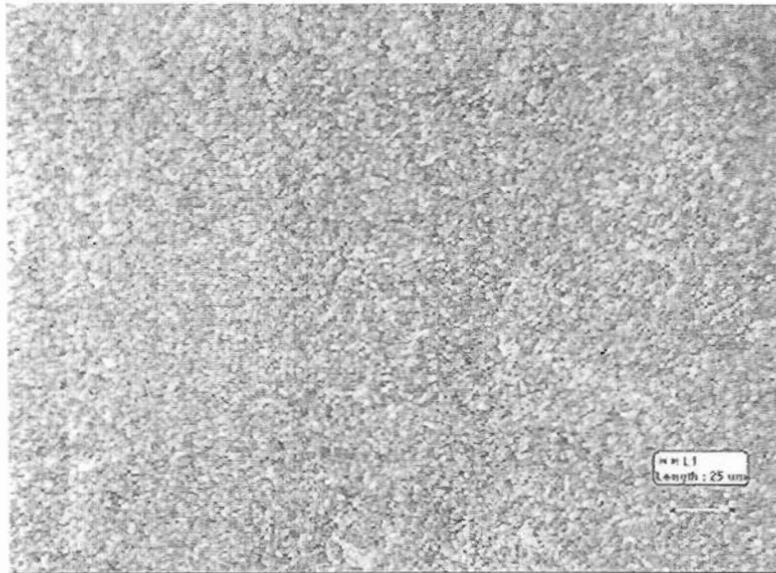
ภาพที่ 4-19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์รหัส OS



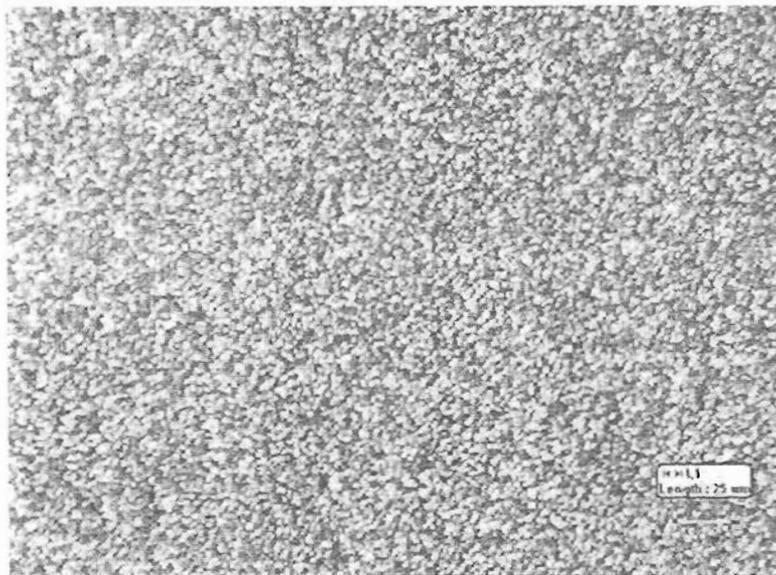
ภาพที่ 4-20 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นามิลล์รหัส HI



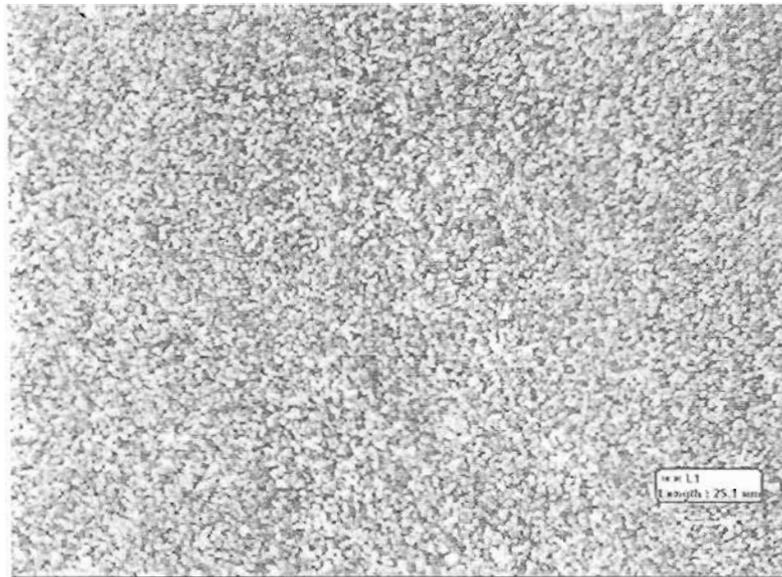
ภาพที่ 4-21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นามิลล์รหัส HA



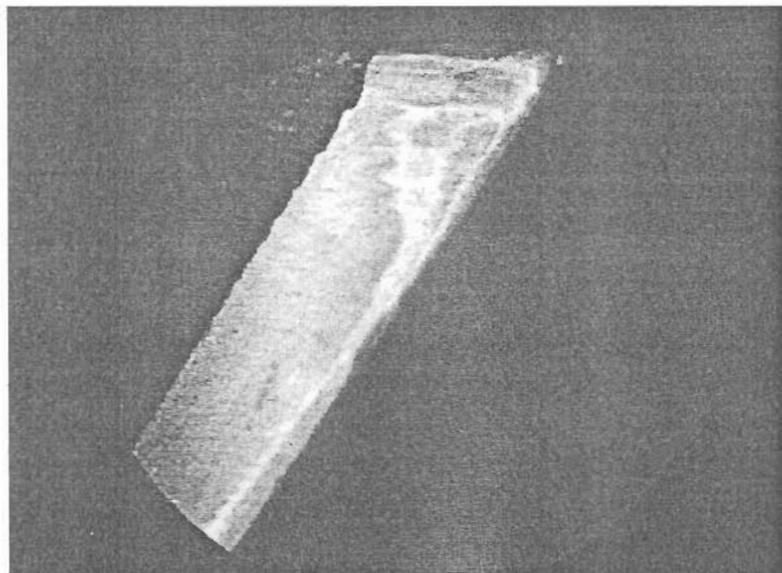
ภาพที่ 4-22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมัลชันรหัส DO



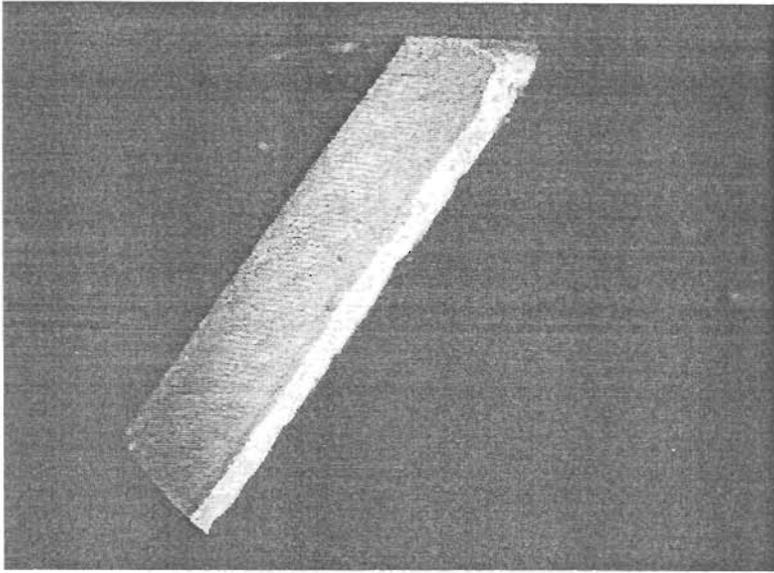
ภาพที่ 4-23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมัลชัน เงื่อนไขที่ 3



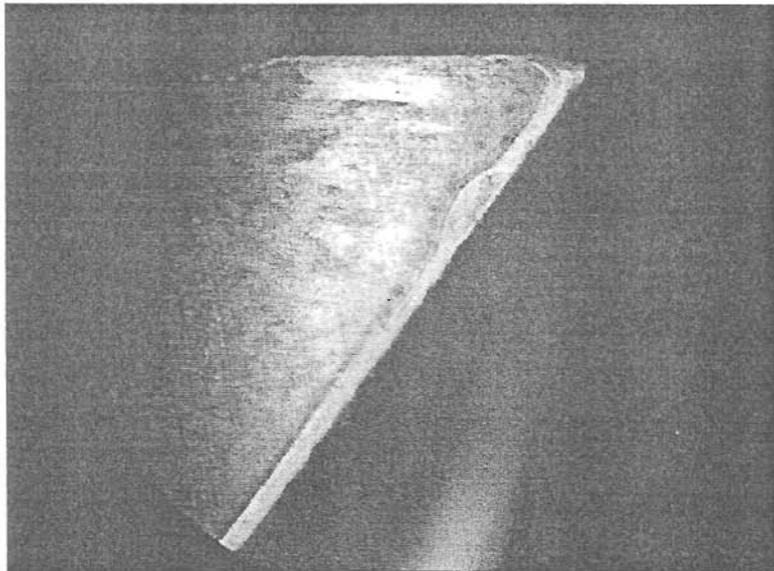
ภาพที่ 4-24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเอ็นมิลล์ เจือนไซที่ 12



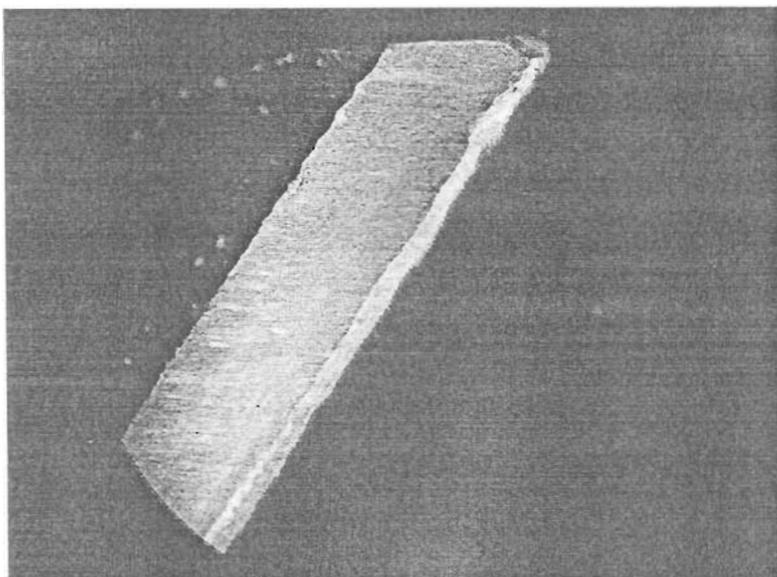
ภาพที่ 4-25 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส YG ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.



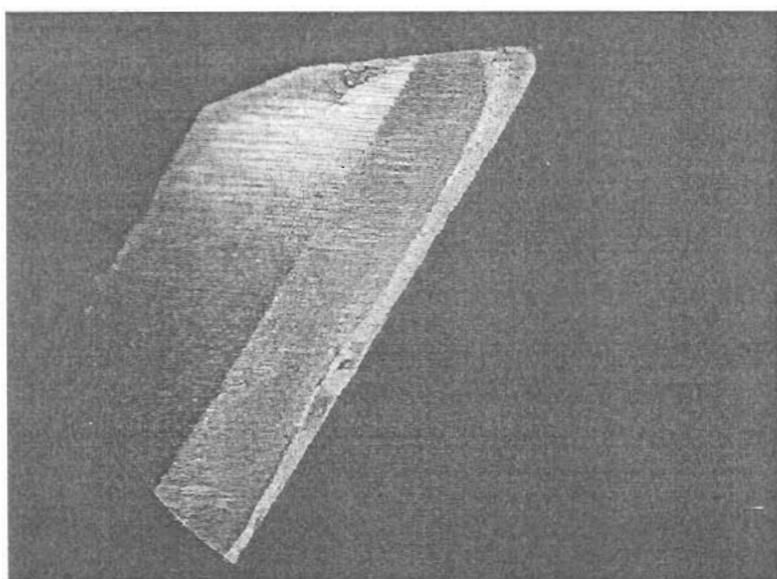
ภาพที่ 4-26 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส OS ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.



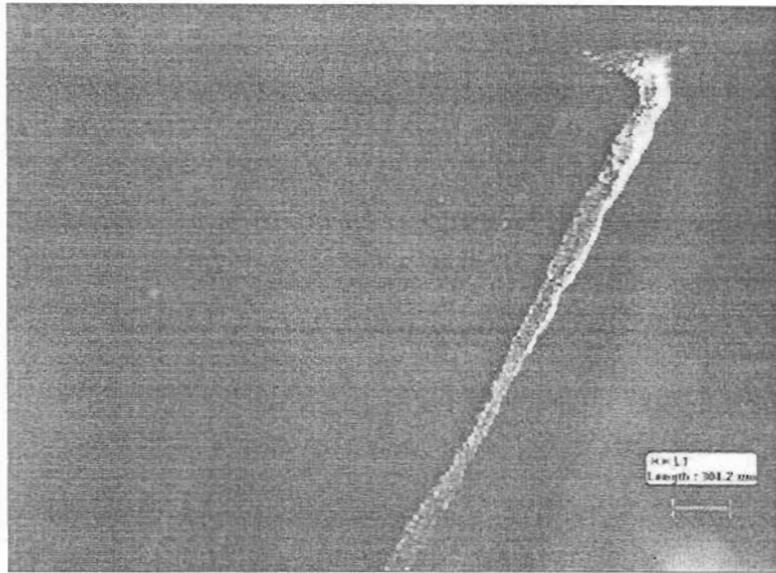
ภาพที่ 4-27 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส HI ผ่านการตัดเฉือนระยะทาง 1200 มม.



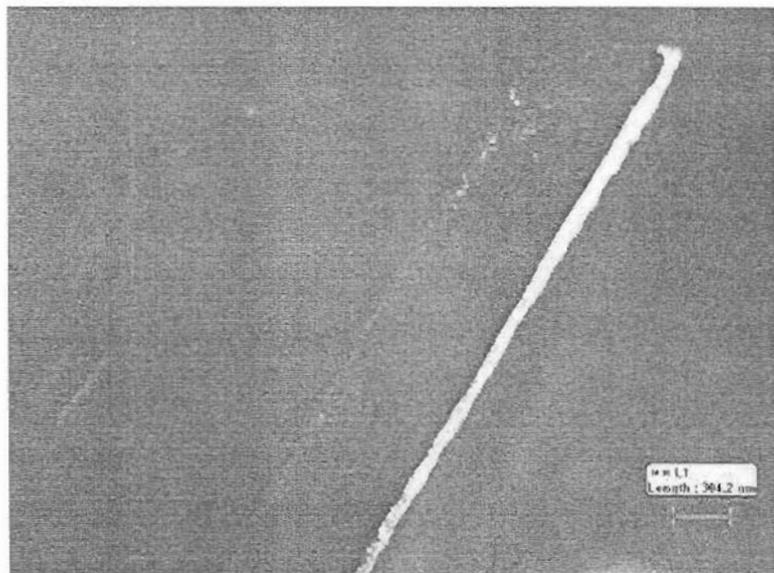
ภาพที่ 4-28 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส HA ผ่านการตัดเจือระยะทาง 1200 มม.



ภาพที่ 4-29 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์รหัส DO ผ่านการตัดเจือระยะทาง 1200 มม.



ภาพที่ 4-30 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 3 ผ่านการตัดเจ็อนระยะทาง 1200 มม.



ภาพที่ 4-31 แสดงคมตัดเอ็นมิลล์ เจ็อนไซที่ 12 ผ่านการตัดเจ็อนระยะทาง 1200 มม.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยได้ทำการทดสอบเอ็นมิลล์ที่ผลิตโดยใช้เหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม สำหรับตัดเฉือนชิ้นงานประเภทเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ผลจากการตรวจสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ตัวอย่างที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศจำนวน 5 ยี่ห้อ ปรากฏว่ามุมคายเศษส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 14 – 18 องศา มุมเฉียงอยู่ที่ 30 องศา ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีพบว่าส่วนผสมของวัสดุส่วนใหญ่มีธาตุผสมอยู่ในปริมาณที่สูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 รหัส การทดลอง และแนวโน้มของการมีธาตุผสมในปริมาณที่มาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพความต้านทานต่อการสึกหรอจากการตัดเฉือนสูงเพิ่มขึ้น ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเอ็นมิลล์ตัวอย่างนำเข้าจากต่างประเทศส่วนใหญ่มีโครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ และมีความละเอียดแตกต่างกัน ภายในโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีคาร์ไบด์กระจายแทรกอยู่ทั่วไป ผลการทดสอบความแข็งของเอ็นมิลล์ตัวอย่างที่นำเข้าจากต่างประเทศ ปรากฏว่าความแข็งต่ำสุดได้แก่ เอ็นมิลล์รหัส YG ค่าความแข็งเท่ากับ 66.3 HRC ส่วนค่าความแข็งสูงสุดคือ รหัส HI ค่าความแข็งเท่ากับ 68.4 HRC และเอ็นมิลล์ตัวอย่างนำเข้าทั้งหมด มีความแข็งมากกว่า 66 HRC เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอโดยการตัดเฉือน ปรากฏว่าเอ็นมิลล์ รหัส HI ระยะการสึกหรอที่ผิวหลบเท่ากับ 0.103 มม. น้อยกว่าเอ็นมิลล์ยี่ห้ออื่นๆ สำหรับเอ็นมิลล์รหัส YG มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบเท่ากับ 0.137 มม. มากกว่าเอ็นมิลล์ยี่ห้ออื่นๆ จากการทดสอบเอ็นมิลล์ตัวอย่างที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ สรุปได้ว่าเอ็นมิลล์ที่มีความแข็งมากกว่าจะเกิดการสึกหรอน้อยกว่าเมื่อนำไปทำการตัดเฉือนชิ้นงาน ผลการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม ทำการชุบแข็งและบำบัดเย็นภายใต้ข้อกำหนดของตัวแปรต่างๆ ปรากฏว่าความแข็งที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 66.8 – 68.1 HRC และหลังจากทำการทดลองตัดเฉือนแล้วผลการทดลอง ปรากฏว่าระยะการสึกหรออยู่ในช่วง 0.84 – 0.12 มม. เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างความแข็งและระยะสึกหรอของเอ็นมิลล์ โดยเฉลี่ยพบว่าเอ็นมิลล์ที่เกิดการสึกหรอน้อยกว่า จะมีความแข็งมากกว่า สำหรับระยะการสึกหรอที่น้อยที่สุดของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มคือ 0.84 มม. โดยการชุบแข็งที่อุณหภูมิเท่ากับ 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิเท่ากับ 80 วินาที และทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -196 °C ก่อนการอบคืนตัว ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบเกี่ยวกับอุณหภูมิชุบแข็งพบว่าการใช้อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1150 °C จะทำให้ความแข็งน้อยกว่าอุณหภูมิชุบแข็งที่ 1230 °C และเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ ปรากฏว่าการใช้ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิที่ 80 วินาที จะให้ผลทางด้านความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่าการคงอุณหภูมิ

ที่ 150 วินาที และการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -196°C ก่อนการอบคืนตัวจะทำให้ผลทางด้านความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านกรรมวิธีการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70°C และสูงกว่าเอ็นมิลล์ที่ไม่ผ่านกรรมวิธีการบำบัดเย็น

ดังนั้นจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า เอ็นมิลล์ที่ทำการทดลองมีประสิทธิภาพมากขึ้นทั้งในด้านความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอเมื่อเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์นำเข้าจากต่างประเทศ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพด้านการต้านทานต่อการสึกหรอเนื่องจากการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นประมาณ 20 % เมื่อเปรียบเทียบกับเอ็นมิลล์นำเข้าจากต่างประเทศที่มีประสิทธิภาพด้านการต้านทานต่อการสึกหรอเนื่องจากการตัดเฉือนที่ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัย การอบชุบและการผลิตเอ็นมิลล์ภายใต้เงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ ในการชุบแข็งเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม จากการดำเนินการวิจัยนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ในส่วนของการหาประสิทธิภาพของเอ็นมิลล์ในด้านคุณสมบัติทางกลและการตัดเฉือนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งผลการวิจัยสามารถนำไปประกอบเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการทดลองในด้านต่างๆ ต่อไปได้ เช่น การวิเคราะห์อัตราส่วนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็มในเชิงลึก การวิเคราะห์คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ได้จากการกัด อัตราการใช้พลังงานในการตัดเฉือน เป็นต้น การศึกษาในเชิงลึกมากขึ้น จะเป็นการพัฒนาคุณภาพเครื่องมือตัดในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือตัดในประเทศไทยอย่างต่อเนื่องต่อไป

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

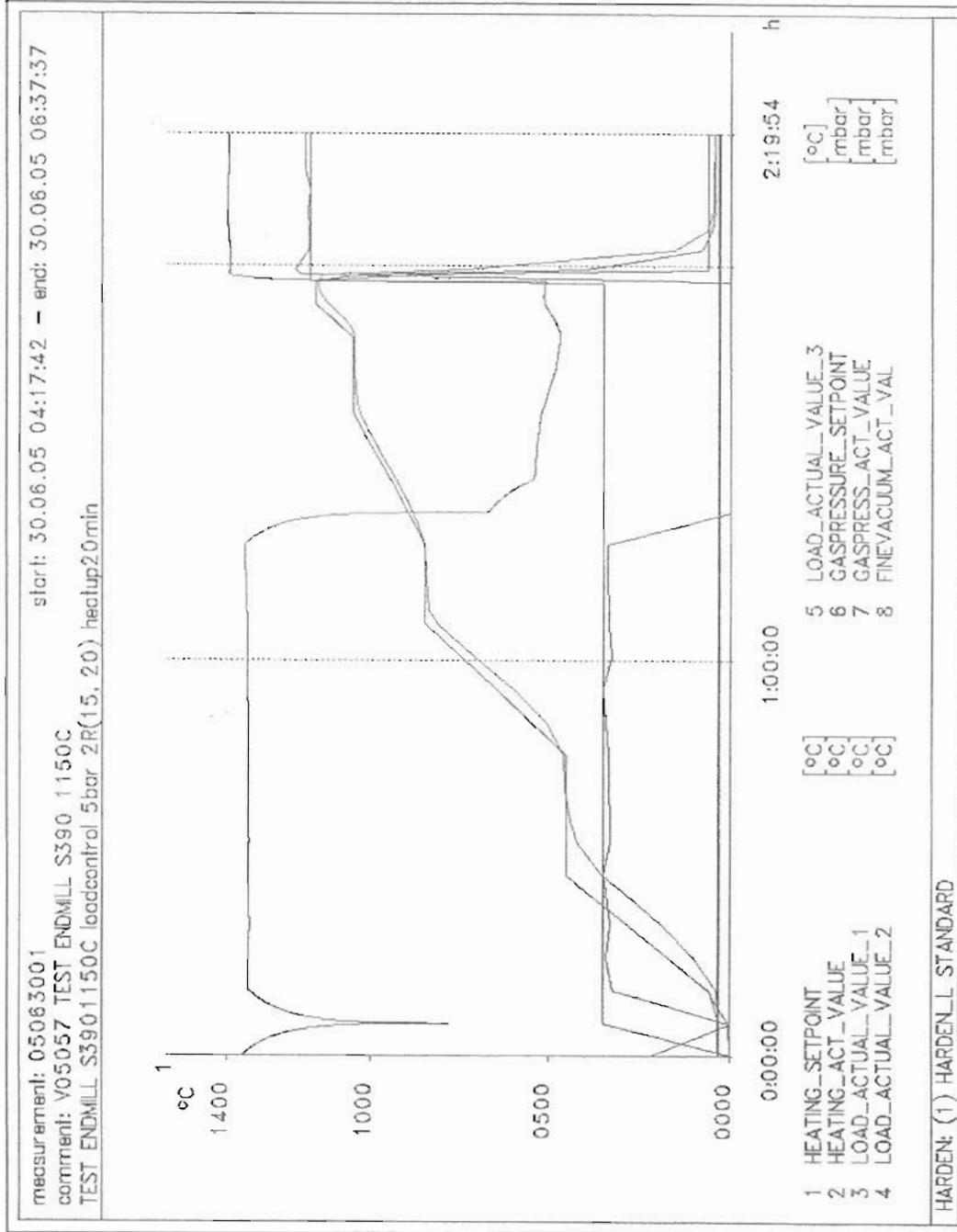
- มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543.
- _____. เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539.
- ศิริพร ดาวพิเศษ. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.
- สมนึก วัฒนศรีกุล. การชุบแข็งเหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.
- _____. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538.
- _____. เอกสารการสอนวิชา หลักการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.
- สุรพล ราชภูร์น้อย. วิศวกรรมการบำรุงรักษา. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2545
- _____. เอกสารการสอนวิชา วิศวกรรมการหล่อลื่น. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

ภาษาอังกฤษ

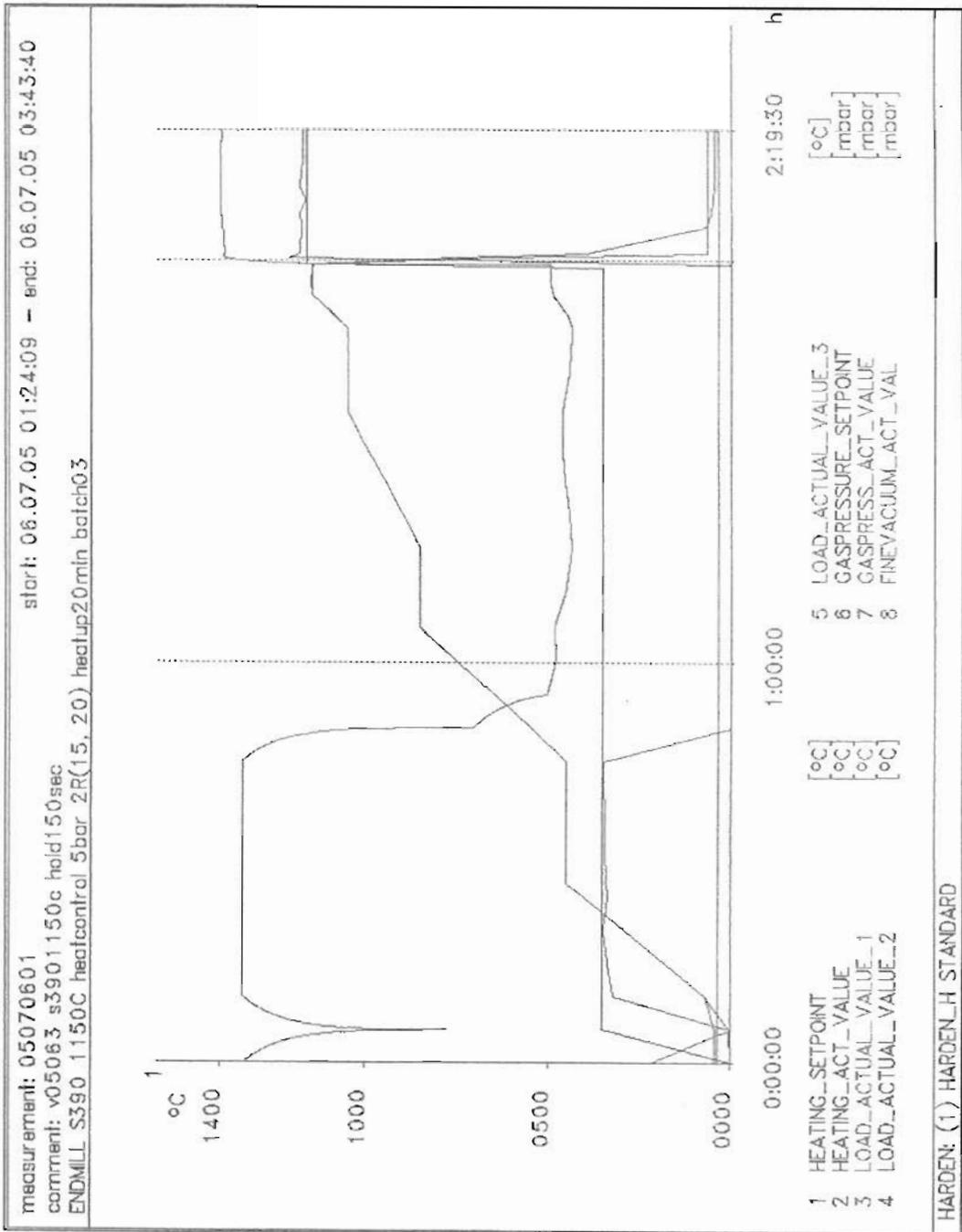
- A. Molinari. "Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels." **Journal of Materials Processing Technology**. 118 (2001) : 350-355.
- Bohler. **Bohler Shop Service, A practical guide to successful processing of special steels**. Bohler Gesellschaft M.B.H, 2000.
- Dennis J. Kamody. "Using Deep Cryogenics to Advantage." **Advanced Materials and Processes**. 154 (1998) : 215 -218.
- Harry Chandler. **Heat treater 's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1998.
- Joseph R. David and ASM International Handbook Committee: **ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating**. 4th ed. Ohio: ASM International, 1991.

ภาคผนวก ก

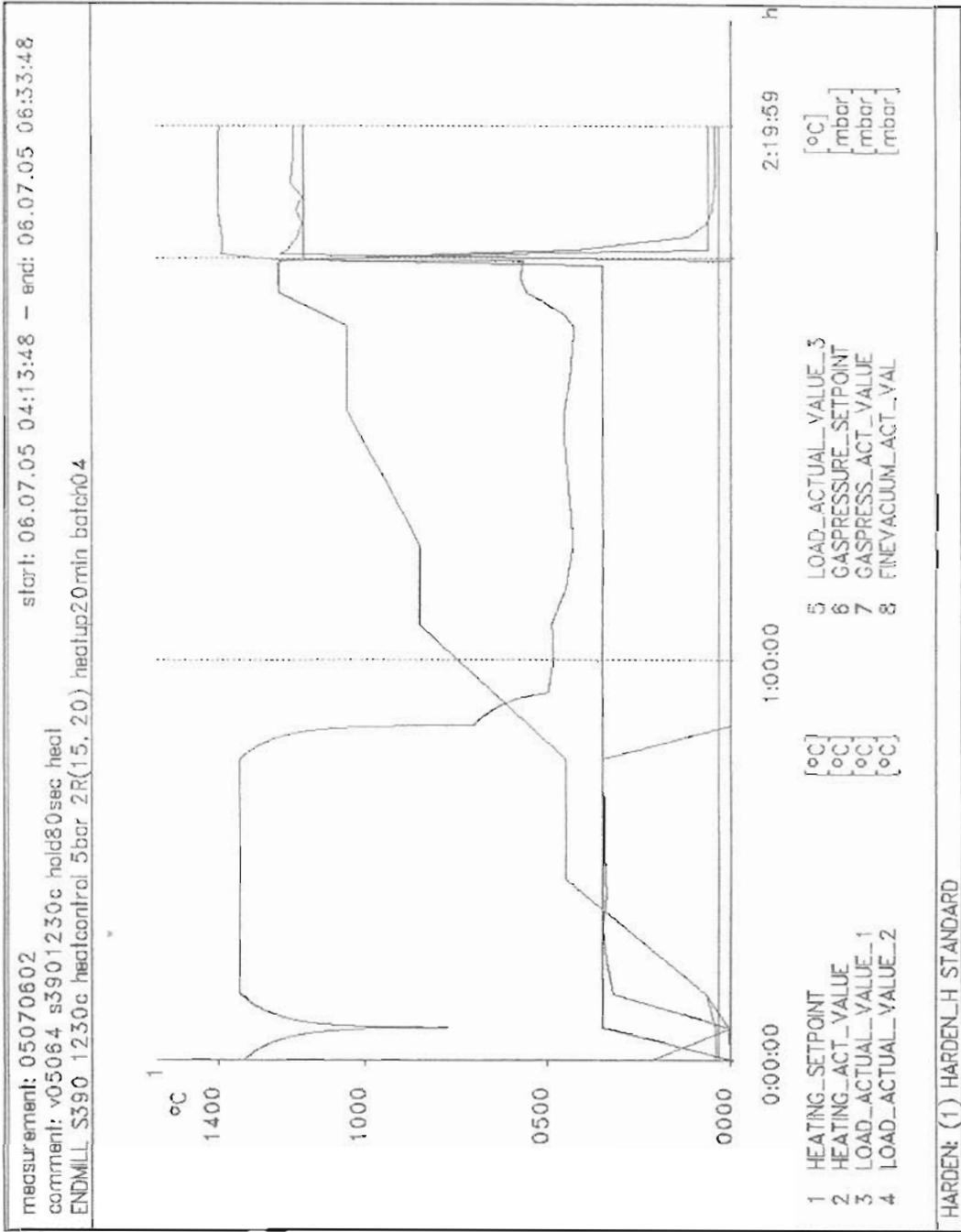
ภาพการบันทึกผลการดำเนินงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็ง



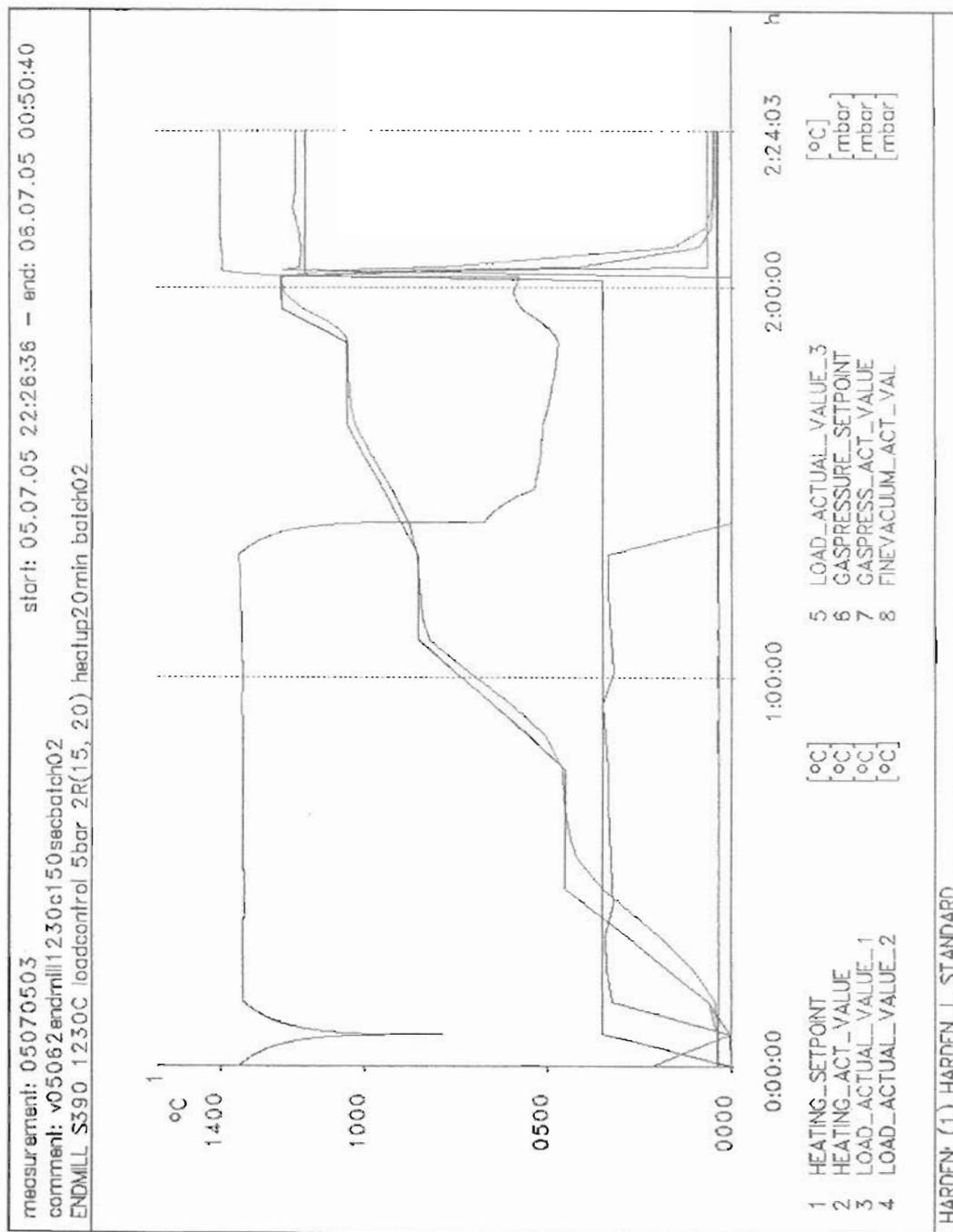
ภาพที่ ก-1 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80



ภาพที่ ก-2 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที



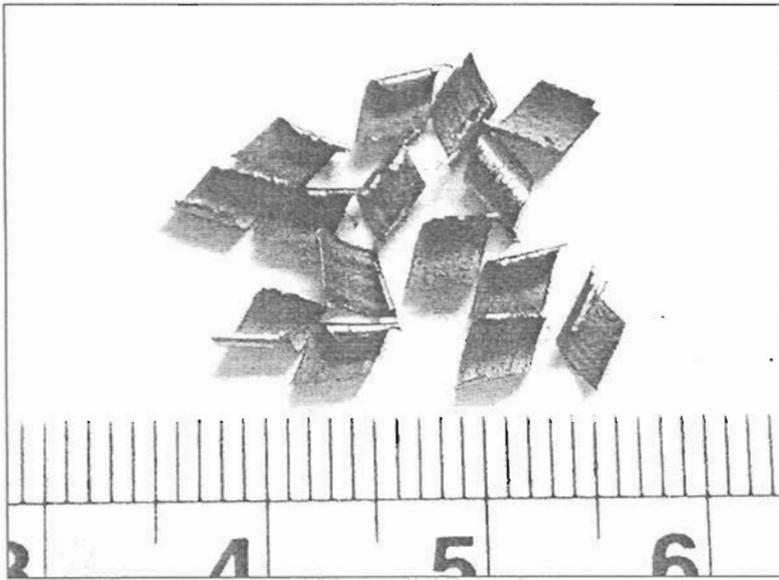
ภาพที่ ก-3 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 80 วินาที



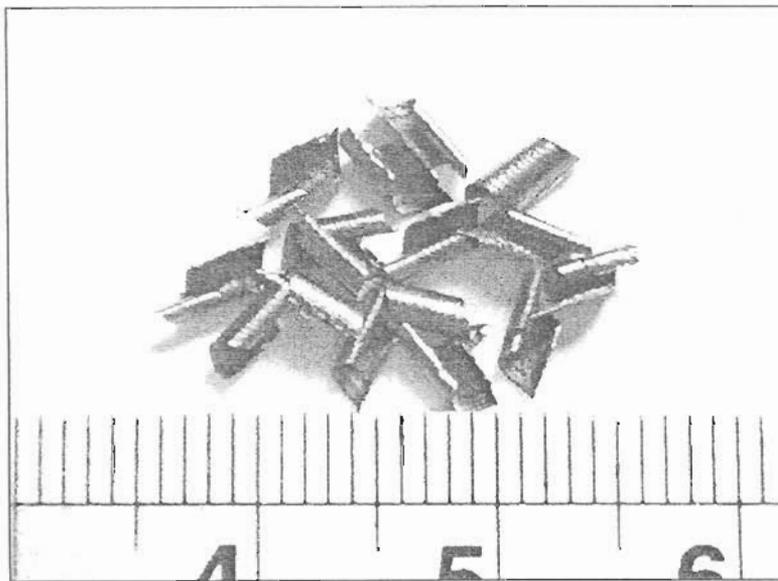
ภาพที่ ก-4 แสดงการบันทึกผลการทำงานของเตาสุญญากาศในการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1230 °C เวลาคงอุณหภูมิ 150 วินาที

ภาคผนวก ข

ภาพเศษตัดที่ได้จากการทดลองตัดเงื่อนไข



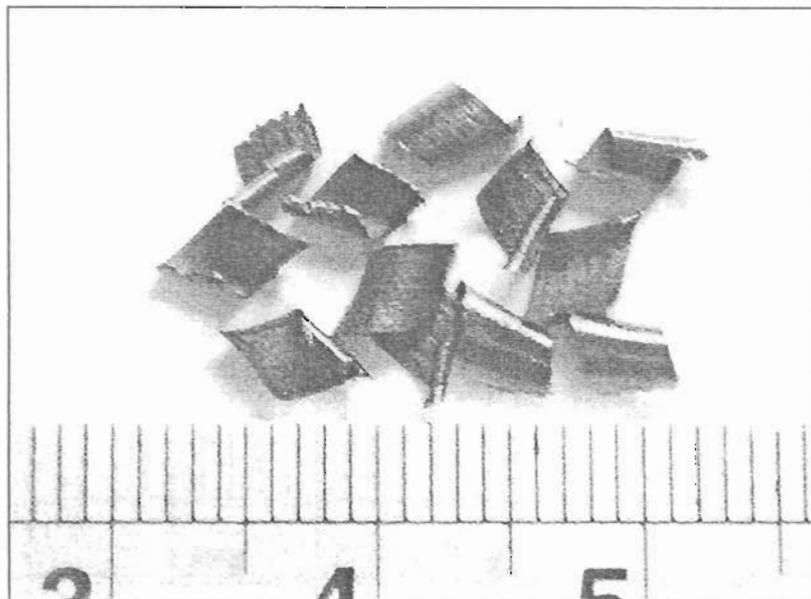
ภาพที่ ข-1 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเฉือน 400 มม.



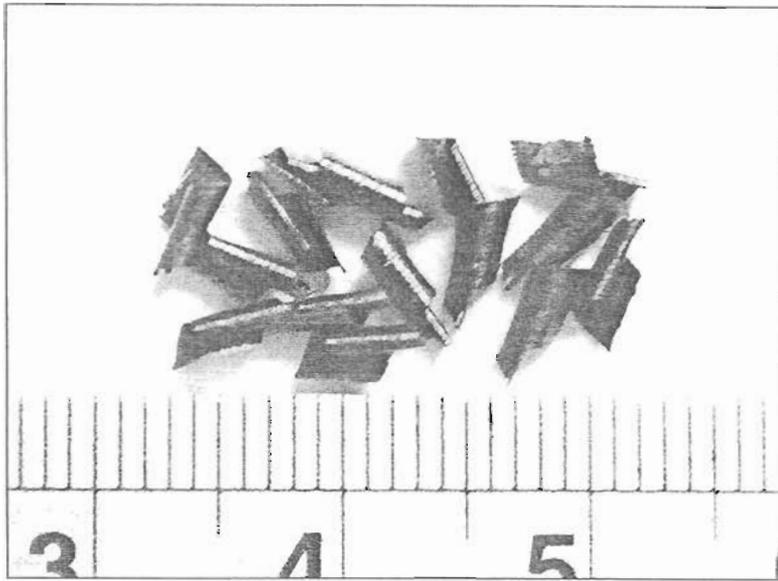
ภาพที่ ข-2 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเฉือน 800 มม.



ภาพที่ ข-3 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส HI ระยะการตัดเจือ 1200 มม.



ภาพที่ ข-4 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเจือ 400 มม.



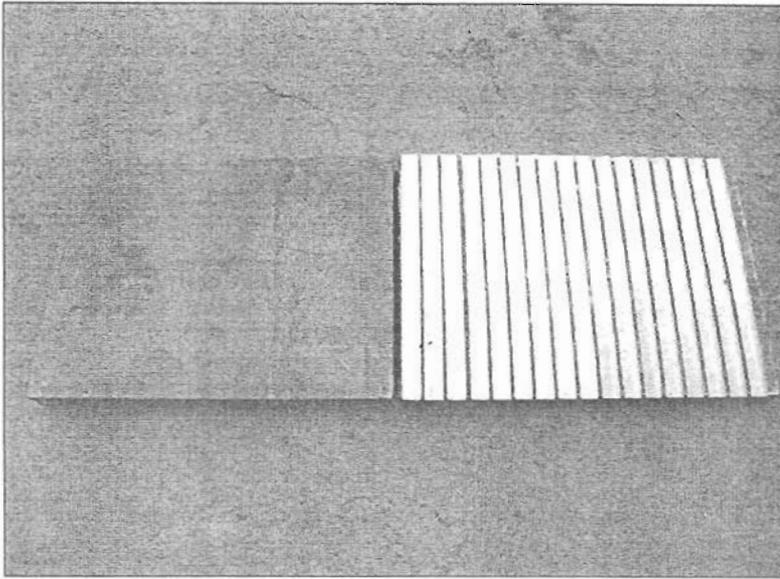
ภาพที่ ข-5 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเฉือน 800 มม.



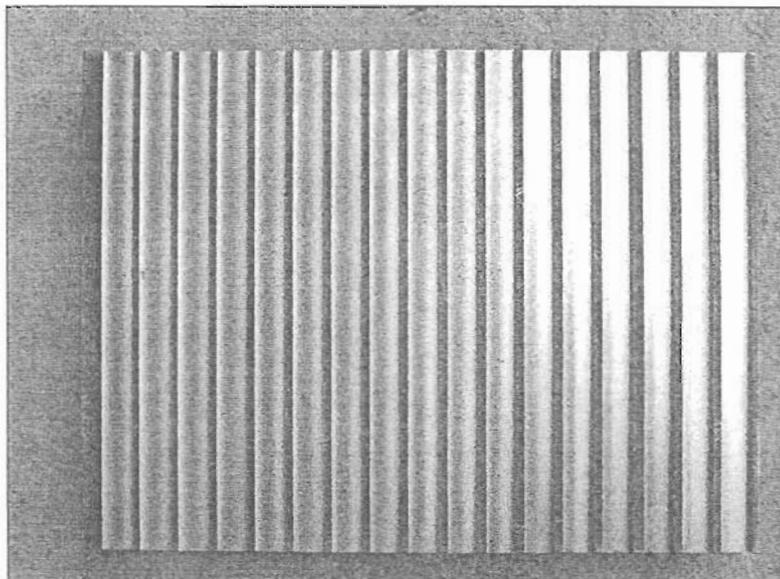
ภาพที่ ข-6 แสดงภาพเศษกัดเอ็นมิลล์รหัส YG ระยะการตัดเฉือน 1200 มม.

ภาคผนวก ก

ภาพชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดเงื่อนไขวัสดุ SCM 440



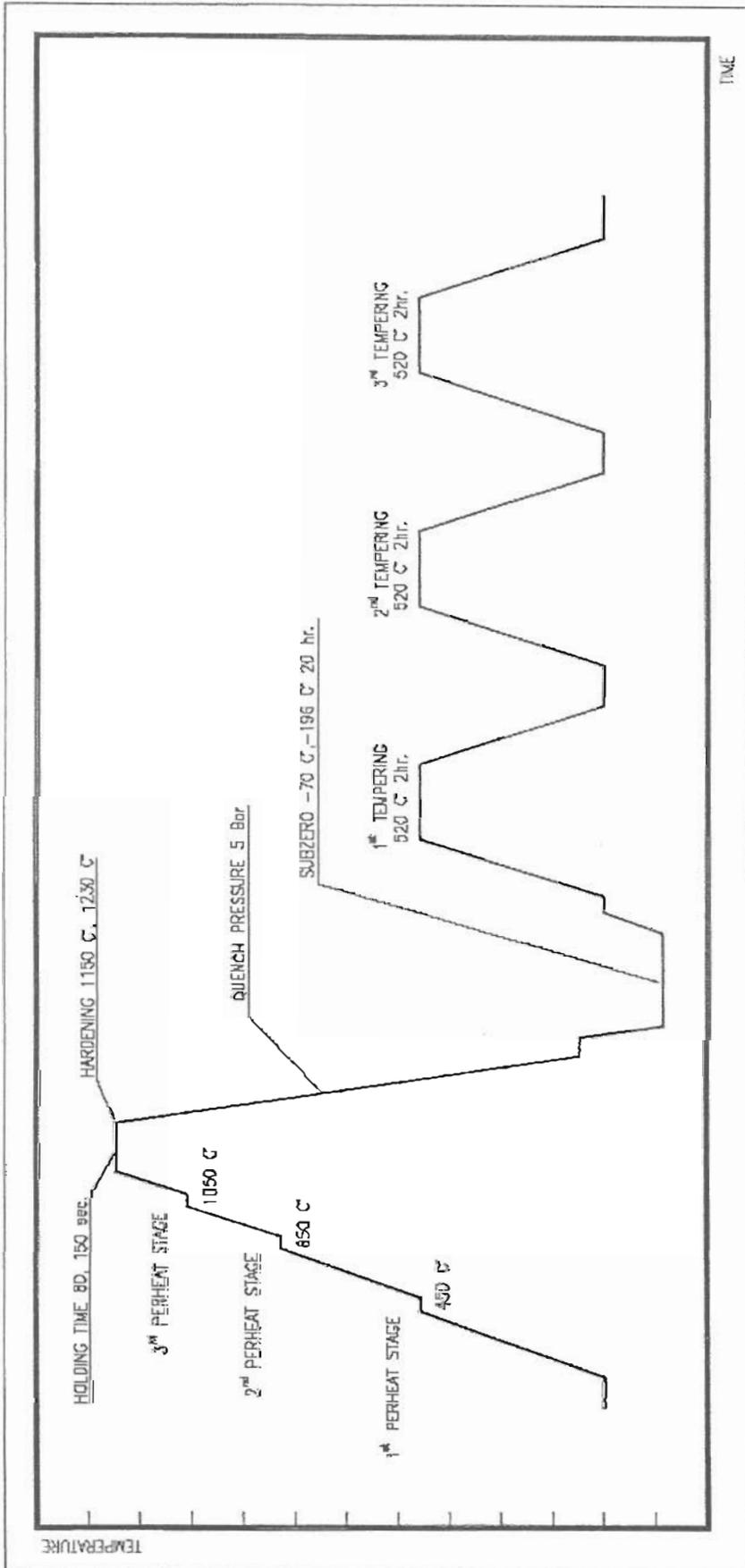
ภาพที่ ค-1 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดเฉือนวัสดุ SCM 440 ก่อนและหลังการตัดเฉือน



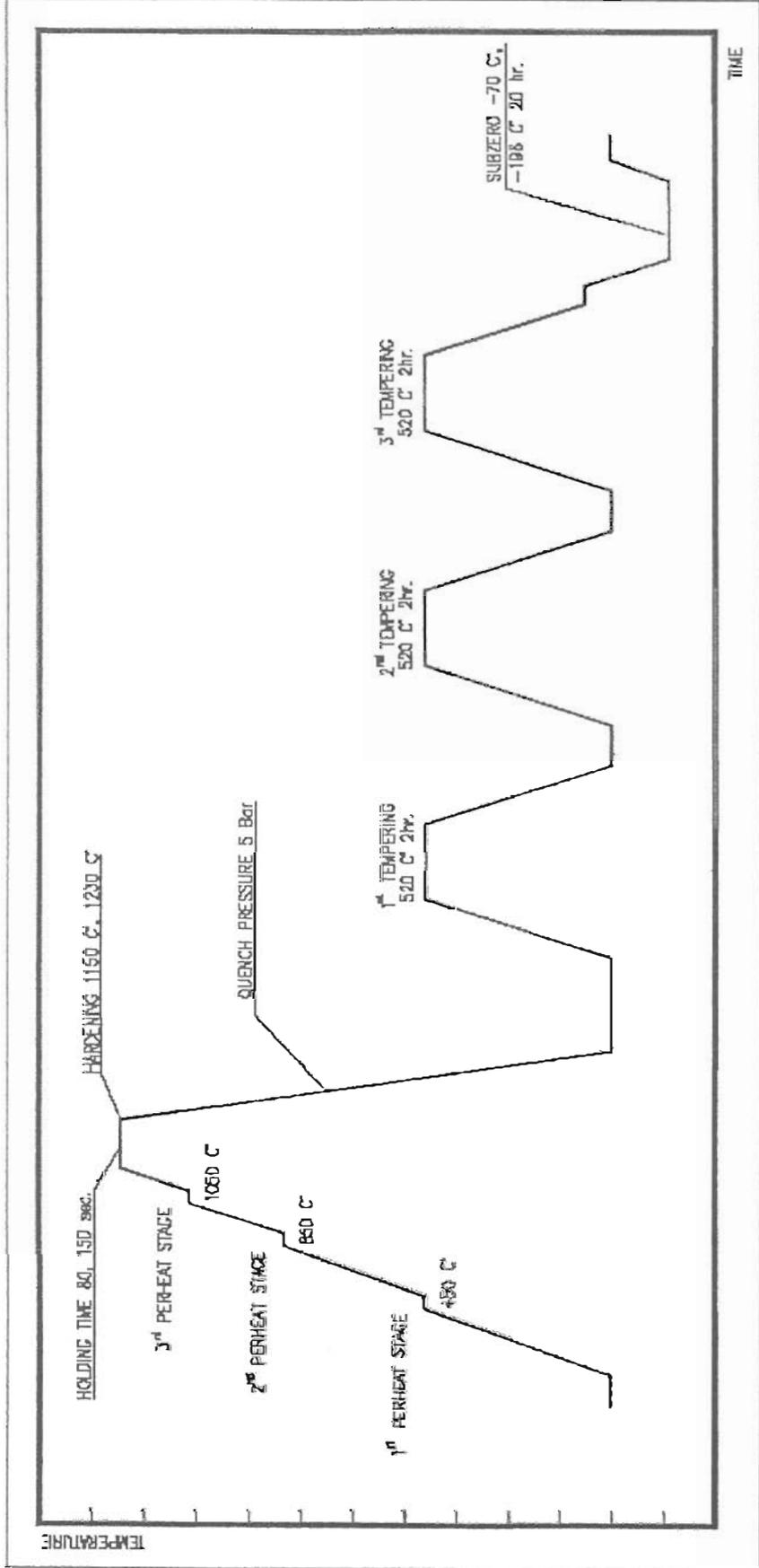
ภาพที่ ค-2 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดเฉือนวัสดุ SCM 440 หลังการตัดเฉือน

ภาคผนวก ง

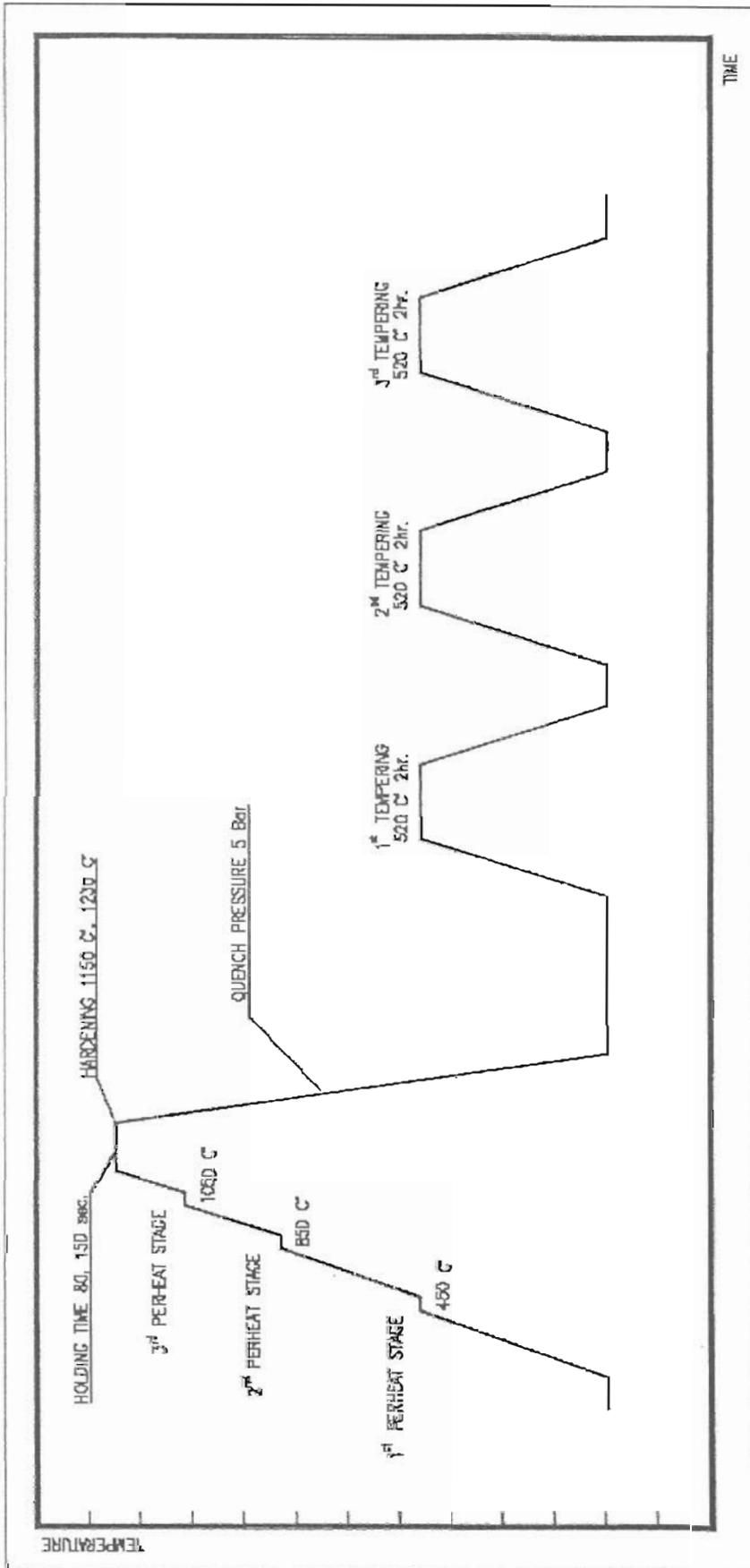
ภาพแสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม



ภาพที่ ง-1 แสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 โดยมีการบำบัดเย็นก่อนการอบคืนตัว



ภาพที่ ง-2 แสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าสเต็ปิตเกรดพีเอ็ม S390 โดยมีการบำบัดเย็นหลังการอบเป็นต้น



ภาพที่ ง-3 แสดงขั้นตอนการอบชุบเหล็กกล้าไฮสปีดเกรดพีเอ็ม S390 ไม่มีการนำบัตเย็น

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายสมพล เพชรฤทธิ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การหาค่าพารามิเตอร์ในการชุปแข็งและบำบัดเย็นเหล็กกล้าไฮสปีด
เกรดพีเอ็มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์
สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2522 ภูมิลำเนาเดิม จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2543