



## รายงานวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดประเภทเอ็นมิลล์ที่ผลิตภายในประเทศด้วย  
กรรมวิธีการชุบเย็นแบบครายโอจีนิก  
(Sub-zero & Cryogenic treatment for mechanical property improvement of  
domestically-produced end mill)

### นักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	หัวหน้าโครงการวิจัย
อาจารย์สิงห์แก้ว ปือกเท็ง	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
อาจารย์คมพันธ์ ชมสมุทร	ผู้ร่วมโครงการวิจัย

รายงานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปี 2549

## รายงานวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดประเภทเอ็นมิลล์ที่ผลิตภายในประเทศด้วย  
กรรมวิธีการชุบเย็นแบบครายโอจินิก

(Sub-zero & Cryogenic treatment for mechanical property improvement of  
domestically-produced end mill)

นักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ หัวหน้าโครงการวิจัย  
อาจารย์สิงห์แก้ว ปือกเท็ง ผู้ร่วมโครงการวิจัย  
อาจารย์คมพันธ์ ชมสมุทร ผู้ร่วมโครงการวิจัย

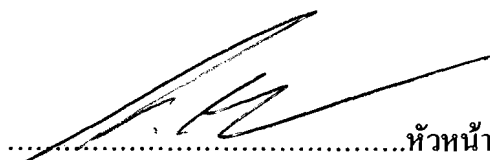
รายงานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
ประจำปี 2549

ชื่อ : สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ สิงห์แก้ว ปิอกเทิง และ คมพันธ์ ชมสมุทร  
 เรื่อง : การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดประเภทเอ็นมิลล์ที่ผลิตภายในประเทศด้วย  
 กรรมวิธีการชุบเย็นแบบครายโอจินิก (Sub-zero & Cryogenic treatment for  
 mechanical property improvement of domestically-produced end mill)  
 สาขาวิชา : วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

#### บทคัดย่อ

การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องมือตัดประเภทเอ็นมิลล์(End mills) และมีคักร้อง (Slot drills) เหล็กกล้าโรบสูง AISI M42 ด้วยการเพิ่มกรรมวิธีการครายโอจินิก (Cryogenic treatment) หลังการอบให้ความร้อนถึงโครงสร้างออสเทนไนท์(Austenite) มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการต้านทานต่อการสึกหรอ ด้วยการออกแบบรูปทรงเรขาคณิต การคายเศษ ภายใต้การปรับปรุงสมบัติของเครื่องมือตัดด้วยความร้อนและความเย็น โดยผลิตเครื่องมือตัดที่มุกายเศษ 8 องศา 12 องศา และ 15 องศา ชุบแข็งที่  $1,210^{\circ}\text{C}$  เย็นตัวต่างกันที่ อุณหภูมิห้อง ประมาณ  $35^{\circ}\text{C}$  ต่ำกว่าศูนย์องศา ที่  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ทั้งหมดอบคืนตัวที่  $535^{\circ}\text{C}$  จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นขึ้นรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์เอ็นมิลล์ ด้วยการเจียรในแบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลสำหรับผลิตเอ็นมิลล์โดยเฉพาะและมีความเที่ยงตรงสูง จากนั้นลดความเค้นที่ผิว ทำการทดสอบการใช้งานตามมาตรฐานการผลิต ผลการทดลองตัดเฉือนชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ปรากฏว่าเครื่องมือตัดที่ผ่านการลดความเค้นบริเวณผิว ความแข็งอยู่ในช่วง 67.7-68.3 HRC ลดลงประมาณ 1 HRC เมื่อเทียบกับไม่ผ่านการลดความเค้นที่ผิว พบว่าเครื่องมือตัดมุกายเศษ 15 องศา แรงเฉือน(Shear force) มากกว่ามุกายเศษ 8 และ 12 องศา ซึ่งไม่เกินไปตามหลักทฤษฎีการเฉือน(Shear) แต่ทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่ามุก 12 และ 8 องศา ตามลำดับ พบว่าการบำบัดเย็นที่  $-196^{\circ}\text{C}$  สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องมือตัดมากกว่าร้อยละ 15 ดังนั้น การชุบเย็นต่ำกว่าศูนย์องศามีแนวโน้มที่ดีต่อการต้านทานการสึกหรอของเครื่องมือตัด หากมีการพัฒนาเทคโนโลยีการชุบเย็น ให้สามารถควบคุมชั้นบรรยากาศของสารชุบเย็นได้ดีขึ้นแล้ว จะทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีคุณภาพสูงขึ้น และผลการวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องมือตัดเหล็กกล้าโรบสูงที่ผลิตในประเทศมีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องมือตัด เอ็นมิลล์ มุกายเศษ การบำบัดเย็น การสึกหรอของคมตัด

  
 .....หัวหน้าโครงการวิจัย

Name : Saharat Wongsrisa , Singkaew Pokteng and Kompan Chomsuntorn

Title : Sub-zero & Cryogenic Treatment for Mechanical Effectiveness Improved by Domestically-Produced End Mills.

### Abstract

Product development of End Mills AISI M42 tool steels products by cryogenics treatments after process by heating system through austenite structure had been conducted in order to increase effectiveness of wear resistance geometry designed in quenching figures, quality of chip flow and improved by the cutting edge with sub-zero and heating system through producing the cutting tools on the rim of rake angle at  $8^{\circ}$  and  $12^{\circ}$  and  $15^{\circ}$  austenite temperature at  $1,210^{\circ}\text{C}$  varied in room with temperatures at  $35^{\circ}\text{C}$  lower –  $70^{\circ}\text{C}$  and  $-196^{\circ}\text{C}$  respectively. The tempering at  $535^{\circ}\text{C}$  had been three time. End Mills figures, then, had been operated by 5 axis CNC grinding machine for the tools. The experiment had been conducted in accordance with the AISI 1045. Such as result revealed that stress relieve of tools. it hardness between 67.7 up to 68.3 HRC and reduced 1 HRC. Having compared with the un-stress relief, it revealed that on the  $15^{\circ}$  rake angle shear force increased  $8^{\circ}$  and  $12^{\circ}$  respectively. The result had denied the Shear theory, however resisted against erosion better than  $12^{\circ}$  and  $8^{\circ}$ . The result revealed that cooling at  $-196^{\circ}\text{C}$  would help increase more 15% of cut effectiveness. Cooling treatment below  $0^{\circ}$  had tended to positively resist the erosion of the out tools. With its development of control of degrees of cooling substance acid, the quality of products would be better increased. Such a result could be based of the development of product lines on highly-qualities cut tools which was domestically produced.



## กิตติกรรมประกาศ

การผลิตผลงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์และเป็นประโยชน์ต่อการผลิตเครื่องมือตัดในประเทศไทยให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ประจำปี 2549 และคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความร่วมมือและการให้ความช่วยเหลือจากหลายหน่วยงาน ได้แก่ ผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการผลิตงานวิจัย

ขอบพระคุณ นายณรงค์ สกุนศิริรัตน์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ทูลพาร์ทโมลด์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านเทคโนโลยีการผลิตเอ็นมิลล์ ได้แก่เครื่องเจียรไนอัตโนมัติ 5 แกน สำหรับผลิตเอ็นมิลล์ รวมถึงวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวัดละเอียด

ขอบพระคุณ รศ. ณรงค์ วรงค์เกียรติกร ผู้อำนวยการ สถาบันไทยเยอรมันด้านการทดลอง ขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีเครื่องจักรกลอัตโนมัติ และอาจารย์ประจำแผนกเครื่องจักรกลอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการผลิตและการตรวจสอบชิ้นงานทดลอง

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และ ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอน ให้ความรู้ ตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน และขอบคุณผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ และมีส่วนผลักดันให้ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คณะนักวิจัย

9 กันยายน 2550

## สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
1.5 เครื่องมือที่ใช้	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ	6
2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กกล้ารอบสูงด้วยกระบวนการทางความร้อน	6
2.3 โครงสร้าง (Structure)	8
2.4 เหล็กกล้าโอบอลด์ความแข็งสูง	11
2.5 การชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูง	18
2.6 การชุบแข็งเหล็กกล้าในเตาสู่ญญากาศ	21
2.7 การชุบแข็งที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าศูนย์องศา	27
2.8 รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์	33
2.9 กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด	36
2.10 หลักการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี การตรวจสอบโครงสร้างและการทดสอบความแข็ง	50
บทที่ 3 การดำเนินการและวิธีการวิจัย	55
3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI และการชุบแข็ง	55
3.2 ศึกษาออกแบบเอ็นมิลล์	62
3.3 ทดสอบประสิทธิภาพการตัดเฉือน	67
3.4 ทดสอบประสิทธิภาพการตัดเฉือน	71
3.5 เก็บบันทึกข้อมูลและผลการทดลอง	87

## สารบัญ(ต่อ)

3.6	วิเคราะห์ผลการทดลอง	88
3.7	สรุปผลการทดลอง	88
บทที่ 4	ผลการทดลอง	89
4.1	เงื่อนไขในการทดสอบ	89
4.2	ผลการทดสอบความแข็ง	89
4.3	ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	91
4.4	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	92
4.5	ผลตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์	96
4.6	ผลการทดสอบการสึกหรอ	99
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	128
5.1	บทนำ	128
5.2	สรุปการทดลอง	128
5.3	ข้อเสนอแนะ	129
	เอกสารอ้างอิง	132
	ภาคผนวก ก. จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข	132
	ภาคผนวก ข. การกำหนดรหัสเอ็นมิลล์ในการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ	134
	ภาคผนวก ค. กราฟการชุบแข็งและผลการบันทึกอุณหภูมิในการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C	136
	ภาคผนวก ง. ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	141
	ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบความแข็ง	144
	ภาคผนวก ฉ. โครงสร้างเหล็กกล้า M42 ชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิและเหล็กกล้า S45C	147
	ภาคผนวก ช. ผลการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์ 2 คมตัด และ 4 คมตัด	153
	ภาคผนวก ซ. ระยะการสึกหรอของเอ็นมิลล์ในแต่ละอุณหภูมิ	163
	ภาคผนวก ฌ. รูปถ่ายคมตัดของเอ็นมิลล์	178
	ภาคผนวก ฎ. ผลการชั่งน้ำหนักเอ็นมิลล์	197
	ภาคผนวก ฏ. ความหนาเศษตัดและความเรียบผิว	202
	ภาคผนวก ฐ. โปรแกรมที่ใช้ในการตัดเฉือน	214
	ภาคผนวก ฑ. เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	216
	ประวัติผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์	228

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินโครงการ	5
ตารางที่ 2.1	ส่วนผสมของเหล็กกล้ากลุ่มโคบอลต์ผสมสูง	12
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติการคงสภาพความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือที่ 540 °C	12
ตารางที่ 2.3	ส่วนผสมของเหล็กกล้ารอบสูง	18
ตารางที่ 2.4	งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต	33
ตารางที่ 2.5	ข้อกำหนดต่างๆของเอ็นมิลล์กับการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานแต่ละชนิด	36
ตารางที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความโตของมิดกัทกับอัตราป้อนต่อฟัน	40
ตารางที่ 2.7	แนวทางการเลือกใช้เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์	46
ตารางที่ 2.8	การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกดและโลหะที่ต้องการทดสอบ	52
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูง S500 ตามมาตรฐานของผู้ผลิต ตราผลิตภัณฑ์ BOHLER	56
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลการชุบแข็ง	56
ตารางที่ 3.3	เวลาในการคงอุณหภูมิในการชุบในโครเจนเหลวและอุณหภูมิที่ใช้ใน การบำบัดเย็น	58
ตารางที่ 3.4	ผลการวัดขนาดเอ็นมิลล์แต่ละรหัสจำนวน 2 คมตัด	63
ตารางที่ 3.5	ผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์แต่ละรหัสจำนวน 4 คมตัด	64
ตารางที่ 3.6	เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ HSS ขนาด 12 มม. ประเภท 2 คมตัด	68
ตารางที่ 3.7	เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ HSS ขนาด 12 มม. ประเภท 4 คมตัด	69
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขในการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 2 คมตัด	89
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขในการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 4 คมตัด	89
ตารางที่ 4.3	ความแข็งที่ผิว	90
ตารางที่ 4.4	ความแข็งที่แกนกลาง	90
ตารางที่ 4.5	ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	91
ตารางที่ 4.6	ผลการวัดรูปทรงทางเรขาคณิตเอ็นมิลล์ 2 คมตัด	97
ตารางที่ 4.7	ผลการวัดรูปทรงทางเรขาคณิตเอ็นมิลล์ 4 คมตัด	98

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงระบบผลึกของเฟอร์ไรท์(B.C.C) และออสเทนไนท์ (F.C.C) ที่อุณหภูมิต่างกัน	7
รูปที่ 2.2 การคงความแข็งของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูงภายใต้ระยะทางตัดเฉือน	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะของเหล็ก-เหล็กกล้าคาร์บอน	8
รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมมูลของเหล็ก คาร์บอน แสดงตำแหน่งส่วนผสมของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์	9
รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของออสเทนไนท์ไปสู่การสร้างแผนภูมิ T.T.T	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างออสเทนไนท์	10
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบความสามารถในการอบคืนตัวของเหล็กกล้ารอบสูง	13
รูปที่ 2.8 กระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้า M42	19
รูปที่ 2.9 ความแข็งหลังการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1200°C ของเหล็กกล้า M42	30
รูปที่ 2.10 ภาพตัดของเตาชุบแข็งสุญญากาศแบบเย็นตั้งด้วยก๊าซความดันสูงพ่นก๊าซจาก 2 ทิศทาง	22
รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของก๊าซในโครเจนในเตาสุญญากาศ	23
รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบการเสีรูปของชิ้นงานซึ่งเย็นตัวจากการเป่าก๊าซด้านบนกับการเป่าก๊าซ 2 ด้านสลับกัน	24
รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบเวลาการให้ความร้อนระหว่างการให้ความร้อนแบบผสม	25
รูปที่ 2.14 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูง	27
รูปที่ 2.15 อุณหภูมิการบำบัดเย็น	29
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบ โครงสร้างเหล็กกล้าที่ผ่านการบำบัดเย็น	30
รูปที่ 2.17 การกำหนดส่วนต่าง ๆ บริเวณคมตัดเอ็นมิลล์	35
รูปที่ 2.18 เครื่องกัด CNC Milling	37
รูปที่ 2.19 การทำงานของเอ็นมิลล์ก้านอนปลดกัดตั้ง	38
รูปที่ 2.20 ลักษณะการตัดเฉือนชิ้นงานของเอ็นมิลล์	38
รูปที่ 2.21 การป้อนกัดตามป้อนกัดสวน	39
รูปที่ 2.22 ลักษณะคมตัดของมีดกัดแบบต่างๆ	40
รูปที่ 2.23 ลักษณะคมกัดแบบต่างๆ	40
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของความร้อนที่ทำให้เกิดการสึกหรอเป็นแอ่ง	43
รูปที่ 2.25 ลักษณะการสึกหรอจากการขัดถูที่ทำให้เกิดการแตกหัก	44

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.26	แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบ	45
รูปที่ 2.27	ลักษณะของเศษตัด	47
รูปที่ 2.28	แบบจำลองของเครื่องมือตัดแบบระนาบมุมฉาก	48
รูปที่ 2.29	แรงที่กระทำบนเศษตัด	49
รูปที่ 2.30	ลักษณะการตัดเฉือน	49
รูปที่ 2.31	หลักการทำงานของเครื่องอิมัลชันสเปคโตมิเตอร์	51
รูปที่ 3.1	แผนภูมิขั้นตอนดำเนินการทดลอง	53
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัท(แบบเดิม)	55
รูปที่ 3.3	ลักษณะชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง	57
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการชุบแข็งในการทดลอง	59
รูปที่ 3.5	แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 35 °C	60
รูปที่ 3.6	แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งและการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C	61
รูปที่ 3.7	แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งและการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -196 °C	61
รูปที่ 3.8	มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด	62
รูปที่ 3.9	มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด	64
รูปที่ 3.10	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์	66
รูปที่ 3.11	ขั้นตอนการชุบแข็ง	67
รูปที่ 3.12	แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งที่ผิวชิ้นงาน	70
รูปที่ 3.13	แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งแกนกลางชิ้นงาน	70
รูปที่ 3.14	การทดสอบความแข็งที่ผิว	71
รูปที่ 3.15	การอัคเบเคอไลท์	72
รูปที่ 3.16	การขัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้าง	72
รูปที่ 3.17	การกัดพกรดเพื่อตรวจสอบ โครงสร้าง	73
รูปที่ 3.18	การตรวจสอบ โครงสร้าง	73
รูปที่ 3.19	การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	74
รูปที่ 3.20	ลักษณะชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป (Pre-Machine)	74
รูปที่ 3.21	การวางชิ้นงานในการชุบแข็ง	75
รูปที่ 3.22	การนำชิ้นงานเข้าเตาอบชุบสุญญากาศ	75
รูปที่ 3.23	การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535 °C	76
รูปที่ 3.24	การบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C	76

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.25	การบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ $-196^{\circ}\text{C}$	77
รูปที่ 3.26	ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น	77
รูปที่ 3.27	การทดสอบความแข็งที่แกนกลางชิ้นงาน	78
รูปที่ 3.28	การเจียรไนชิ้นรูปเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ด้วยเครื่อง A	78
รูปที่ 3.29	การเจียรไนชิ้นรูปเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ด้วยเครื่อง B	79
รูปที่ 3.30	แสดงลักษณะของล้อหินเจียรไนสำหรับชิ้นรูปเอ็นมิลล์	79
รูปที่ 3.31	เอ็นมิลล์ 2 คมตัด	80
รูปที่ 3.32	เอ็นมิลล์ 4 คมตัด	80
รูปที่ 3.33	มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์	81
รูปที่ 3.34	มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์(ต่อ)	81
รูปที่ 3.35	มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์(ต่อ)	82
รูปที่ 3.36	การตรวจสอบมุมและขนาดเอ็นมิลล์	82
รูปที่ 3.37	การประกอบเอ็นมิลล์ในทดสอบการตัดเฉือน	83
รูปที่ 3.38	แสดงการตัดเฉือนของ CNC Milling	83
รูปที่ 3.39	เส้นทางการตัดเฉือนในการทดสอบ	84
รูปที่ 3.40	การซั่งน้ำหนักรูปเอ็นมิลล์	85
รูปที่ 3.41	ระยะการวัดการสึกหรอ	85
รูปที่ 3.42	วัดการสึกหรอโดยเครื่อง Measuring Microscope	86
รูปที่ 3.43	ตรวจสอบการสึกหรอโดยการถ่ายภาพคมตัด	86
รูปที่ 3.44	การวัดความหนาเศษตัดกำลังขยาย 40 เท่า	87
รูปที่ 3.45	การวัดขนาดเศษตัด	82
รูปที่ 4.1	ความแข็งที่ผิวของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ	90
รูปที่ 4.2	ความแข็งแกนกลางเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ	91
รูปที่ 4.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ก่อนการชุบแข็ง	92
รูปที่ 4.4	โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ $35^{\circ}\text{C}$	93
รูปที่ 4.5	โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ $-70^{\circ}\text{C}$	94
รูปที่ 4.6	โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็น ณ อุณหภูมิ $-196^{\circ}\text{C}$	95
รูปที่ 4.7	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 1045	96
รูปที่ 4.8	มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์ 2 คมตัด	97
รูปที่ 4.9	มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์ 4 คมตัด	98





## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.28	ตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70°	109
รูปที่ 4.29	เศษตัดและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C	109
รูปที่ 4.30	คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C	110
รูปที่ 4.31	เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70°C	110
รูปที่ 4.32	ตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C	111
รูปที่ 4.33	เศษตัดและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C	111
รูปที่ 4.34	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35° C	114
รูปที่ 4.35	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C	115
รูปที่ 4.36	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -196° C	116
รูปที่ 4.37	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัดที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C	117
รูปที่ 4.38	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C	118
รูปที่ 4.39	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -196°C	119
รูปที่ 4.40	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการเย็นตัว ในแต่ละ อุณหภูมิ	120
รูปที่ 4.41	กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัดที่ผ่านการเย็นตัว ในแต่ละ อุณหภูมิ	121
รูปที่ 4.42	กราฟเปรียบเทียบขนาดเศษตัดของเอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการชุบแข็ง ในแต่ละอุณหภูมิ	124
รูปที่ 4.43	กราฟเปรียบเทียบขนาดเศษตัดของเอ็นมิลล์ 4 คมตัดที่ผ่านการชุบแข็ง ในแต่ละ อุณหภูมิ	125

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบมุมเฉือนของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการชุบแข็ง ในแต่ละอุณหภูมิ	126
รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบมุมเฉือนของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการชุบแข็ง ในแต่ละอุณหภูมิ	127



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

อุตสาหกรรมการผลิตขั้นพื้นฐานในประเทศมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ ในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน การขึ้นรูปโลหะและ อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ฉะนั้นพื้นฐานการผลิตโดยเฉพาะ เครื่องมือตัดจึงมีความจำเป็นในกระบวนการผลิต ซึ่งมีอยู่หลายลักษณะหลายรูปแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการผลิต เครื่องมือตัดที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steels) ยังเป็นที่ นิยมอยู่มากในอุตสาหกรรม จากการค้นคว้างานวิจัยของต่างประเทศได้กล่าวว่าการทำกระบวนการ ครายโอจินิก (Cryogenics) จะทำให้วัสดุที่ผ่านกระบวนการครายโอจินิก มีคุณสมบัติด้านทาน การสึกหรอดีขึ้นและเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุได้

บริษัท เอ็น อาร์ อิน คัสตรี จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดประเภท เอ็นมิลล์ ดอกสว่าน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง คาร์ไบด์และเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยผลิต เอ็นมิลล์จากเหล็กกล้ารอบสูง S600 และ S500 ตามมาตรฐาน ผู้ผลิตเหล็กตราผลิตภัณฑ์ BOHLER ซึ่งเทียบเท่ากับเหล็กกล้ารอบสูง M2 และ M42 ตามมาตรฐาน AISI ตามลำดับ ซึ่งบริษัท สหมิตร เครื่องกล จำกัด (มหาชน) เป็นตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย โดยเอ็นมิลล์ที่ผลิตส่วนใหญ่ผลิต จากเหล็กกล้ารอบสูง M42 และกระบวนการอบชุบแข็งของบริษัท เอ็น อาร์ อิน คัสตรี จำกัด ยังไม่มีการนำกระบวนการ Cryogenics มาใช้ในการผลิตจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการ Cryogenics เพื่อนำมาปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กกล้ารอบสูง M42 ให้ยืดอายุการใช้งานของเอ็นมิลล์และเพิ่ม ประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์ขึ้น โดยบริษัท เอ็น อาร์ อิน คัสตรี จำกัด ให้ การสนับสนุนวัสดุในการทดลอง เครื่องจักรในการผลิตและการขึ้นรูปเอ็นมิลล์ตลอดจนอุปกรณ์ ต่างๆในการดำเนินโครงการ

ผลการทดลองสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องมือ ต่างๆ และอุปกรณ์อื่นๆ ประเภทเหล็กกล้ารอบสูง เช่น สว่าน มีดกัด ไบมีด และไบเลื่อย เป็นต้น เพื่อการผลิตและเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของ เอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง

### 1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1. วัสดุสำหรับผลิตเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้า High Speed M42 ตามมาตรฐาน AISI ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 80 มม.
2. ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผลิตเอ็นมิลล์ M42 ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)
3. การเย็นตัวจากอุณหภูมิ Austenite เป็นตัวด้วยก๊าซไนโตรเจนความดันไม่น้อยกว่า 4.5 บาร์
4. ทำการ Stabilize เลืออุณหภูมิ 3 ตัวแปร คือ
  - 1) ทำการ Stabilize ณ อุณหภูมิ 35°C อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535°C จำนวน 3 ครั้ง
  - 2) ทำการ Stabilize ณ อุณหภูมิ -70°C อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535°C จำนวน 3 ครั้ง
  - 3) ทำการ Stabilize ณ อุณหภูมิ -196°C อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535°C จำนวน 3 ครั้ง
5. ขึ้นรูปเอ็นมิลล์ตามมาตรฐานสากล โดยใช้ข้อมูลเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและตามมาตรฐานบริษัท เอ็น อาร์ อิน คัสตรี จำกัด เป็นบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์ผลิตเอ็นมิลล์ 2 และ 4 คมตัด มีรูปทรงเรขาคณิต ดังนี้
  - เอ็นมิลล์ 2 คมตัด
    - มุมคายเศษ 29°33°
    - มุมเฉียง (Helix Angle) 15°32°
  - เอ็นมิลล์ 4 คมตัด
    - มุมคายเศษ 8°
    - มุมเฉียง (Helix Angle) 29°
6. ทดสอบการตัดเฉือนเหล็ก 1045 ตามมาตรฐาน AISI ไม่ใช่สารหล่อเย็น (Dry Cut)
7. เงื่อนไขการตัดเฉือนเหล็ก 1045
  - เอ็นมิลล์ 2 คมตัด
 

- ความเร็วตัด (Cutting Speed)	28	ม./นาที
- ความเร็วป้อน (Feed Velocity)	97	มม./นาที
- ความลึกตัดเฉือน (Depth of cut)	3.0	มม
- ความเร็วรอบ (Revolution)	695	Rpm/min
  - เอ็นมิลล์ 4 คมตัด
 

- ความเร็วตัด (Cutting Speed)	25	ม./นาที
- ความเร็วป้อน (Feed Velocity)	100	มม./นาที
- ความลึกตัดเฉือน (Depth of cut)	3.0	มม.
- ความเร็วรอบ (Revolution)	665	Rpm/min
8. ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ตรวจสอบการสึกหรอทุกๆ ระยะ 1000 มม.

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษารวบรวมข้อมูลการผลิตเอ็นมิลล์และการชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. วัสดุเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI
- 2) ศึกษากระบวนการบำบัดเย็น(Cryogenics)
- 3) กำหนดเงื่อนไขในการชุบแข็งและกระบวนการบำบัดเย็น
- 4) ชุบแข็งวัสดุที่จะนำไปผลิตเอ็นมิลล์
- 5) ทำการชุบแข็งและบำบัดเย็น
- 6) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็นไปทำการผลิตเอ็นมิลล์ 2 และ 4 คมตัด
- 7) ทดสอบเอ็นมิลล์ที่ผลิตในด้านต่างๆประกอบ
  - ความแข็ง
  - โครงสร้างจุลภาค
  - ส่วนผสมทางเคมี
  - ทดสอบการตัดเฉือน
- 8) เปรียบเทียบผลการทดลองแต่ละอุณหภูมิในการ Stabilize
- 9) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

- 1) ความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็น อาร์ อิน คัสตรี จำกัด ในด้านเครื่องในการผลิตการตรวจสอบทั้งกระบวนการประกอบด้วย
  - เครื่องเจียรในอัตร โนมัติ 5 แกน (5-Axis CNC Grinding Machine) จำนวน 2 เครื่อง
  - เครื่อง Profile Projector กำลังขยาย 50X ความละเอียด 1/10000 มม.
  - เครื่องเจียรไนไร้ศูนย์กลาง
  - ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 1/100 มม.
  - เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด 1/100 มม.
  - วัสดุเหล็กกล้ารอบสูง M42 เพื่อการทดลอง จำนวน 30 ชิ้น
- 2) ความอนุเคราะห์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประกอบด้วย
  - เตาอบชุบสุญญากาศ (Vacuum Furnace) ยี่ห้อ SCHMETZ ขนาดความจุของเตา 200 กิโลกรัม ความดัน 5-7 bar ทำงานด้วยระบบควบคุมอัตร โนมัติ
  - เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Emission Spectrometer)
  - เครื่องทดสอบความแข็ง (Rock Well Hardness Test, HRC)
  - เครื่องตรวจสอบโครงสร้างโลหะ (Microscope)
  - เครื่องกลึงและเครื่องกัดอัตร โนมัติ (CNC-Milling Machine)

- 3) ความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ประกอบด้วย
  - เครื่อง Measuring Microscope กำลังขยาย 50X ความละเอียด 1/1000 มม.
  - เครื่อง Profile Projector กำลังขยาย 50X ความละเอียด 1/1000 มม.
  - กล้องถ่ายรูปกำลังขยาย 60 เท่า
- 4) ความอนุเคราะห์จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ
  - เครื่องตรวจสอบความเรียบผิว (Surface Roughness Tester)
  - เเทอร์โมมิเตอร์ที่สามารถวัดอุณหภูมิติดลบได้ -200 °C
  - เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 1/10000 กรัม
  - เครื่องกลึงและเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC)
  - ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 1/100 มม.
  - เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด 0.02 มม.
- 5) วัสดุชิ้นงาน (Work Material) เพื่อทดสอบการตัดเฉือน S45C เทียบเท่ากับมาตรฐาน JIS

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

- 1) ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของผลิตเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัท
- 2) ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่เหมาะสมในการบำบัดเย็นที่มีผลต่อคุณภาพด้านการต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI
- 3) เกิดการเรียนรู้ขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ในกระบวนการผลิตจริงของบริษัทผู้ผลิตที่ให้การสนับสนุน
- 4) เกิดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง
- 5) ได้ทราบถึงคุณสมบัติทางโลหะวิทยา และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูง M42 เพื่อผลิตเอ็นมิลล์
- 6) เป็นข้อมูลพื้นฐานนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องมือต่างๆ และอุปกรณ์อื่นๆ
- 7) บริษัทสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ได้ในอนาคต
- 8) นักศึกษาสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ และ ผู้ที่มีความสนใจในด้านนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการทดลองและศึกษาต่อไป

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินโครงการ									
	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	
1. รวบรวมข้อมูลทางวิชาการ	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
2. วิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบ รูปทรงเรขาคณิตและการตรวจสอบ		Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
3. วิเคราะห์ข้อมูลการชุบแข็ง การชุบที่อุณหภูมิ ต่ำกว่าศูนย์องศา Cryogenics และการทดสอบ			Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
4. กำหนดตัวแปรในการชุบแข็ง, การชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา				Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
5. เตรียมงาน เครื่องมือ วัสดุทดสอบ				Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
6. ชุบแข็ง และชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา ตรวจสอบและวัดผล					Plan	Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
7. ผลิตเอ็นมิลล์ และตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิต						Plan	Plan	Plan	Plan	Plan
8. ทดสอบการตัดเฉือน							Plan	Plan	Plan	Plan
9. ตรวจสอบการสึกหรอ รวบรวมข้อมูล และเปรียบเทียบผลการทดลอง							Plan	Plan	Plan	Plan
10. วิเคราะห์สรุปการดำเนินโครงการ								Plan	Plan	Plan
11. ส่งผลงานการดำเนินโครงการ									Plan	Plan

Plan  Action

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ แยกตามรายละเอียด ออกเป็นหัวข้อที่สำคัญ ดังนี้

### 2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสม โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล วาเนเดียม โคบอลต์ และไทเทเนียม เกินกว่า 5% และมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.8-2.2% ธาตุประสมเหล่านี้สามารถเพิ่มคุณสมบัติพิเศษ ให้กับเหล็กกล้าเครื่องมือ เช่น มีค่าความแข็งที่ 200-218 HB

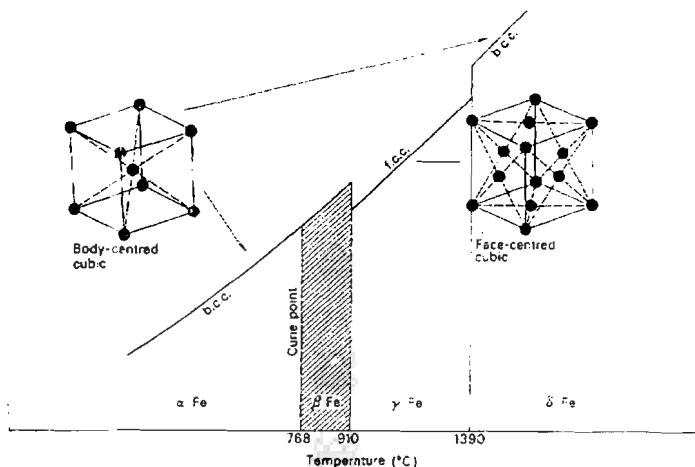
การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ ตามมาตรฐาน AISI สามารถแบ่งได้ 7 ประเภท ตาม ลักษณะการใช้งาน ปริมาณของธาตุประสมและลักษณะของการชุบแข็ง ได้ดังนี้

- 2.1.1 เหล็กกล้า High Speed Tool Steels ที่ค่าความแข็ง 65 HRC และคาร์บอนที่ 0.7-0.8%
- 2.1.2 เหล็กกล้า Hot-working Tool Steels ที่ค่าความแข็ง 55 HRC และคาร์บอนที่ 0.4%
- 2.1.3 เหล็กกล้า Cold-working Tool Steels ที่ค่าความแข็ง 60 HRC และคาร์บอนที่ 1.0%
- 2.1.4 เหล็กกล้า Water-hardening Tool Steels ที่ค่าความแข็ง 63 HRC และคาร์บอนที่ 1.0%
- 2.1.5 เหล็กกล้า Shock-resistant Tool Steels ที่ค่าความแข็ง 50 HRC และคาร์บอนที่ 0.5%
- 2.1.6 เหล็กกล้า Mold Steels ที่ค่าความแข็งประมาณ 40 HRC และคาร์บอนที่ 0.4%
- 2.1.7 เหล็กกล้า Low-alloy Tool Steels ที่ค่าความแข็งประมาณ 45 HRC และคาร์บอนที่ 0.7 %

### 2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กกล้ารอบสูงด้วยกระบวนการทางความร้อน

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็ก โดยการนำเหล็กไปผ่านกระบวนการอบ ชุบด้วยความร้อน เพื่อให้ได้คุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน เหล็กเป็น โลหะที่มีคุณสมบัติ พิเศษคือ มีระบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิห้องเหล็กจะมีระบบ ผลึกเป็น B.C.C. (Body centered Cubic) ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 910 °C เหล็กจะมีระบบผลึกเป็น F.C.C (Face Centered Cubic) และเมื่ออุณหภูมิสูงระหว่าง 1390 – 1534 °C เหล็กจะมีระบบผลึกกลับมาเป็น B.C.C ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุสำคัญที่สามารถละลายได้ในเหล็ก



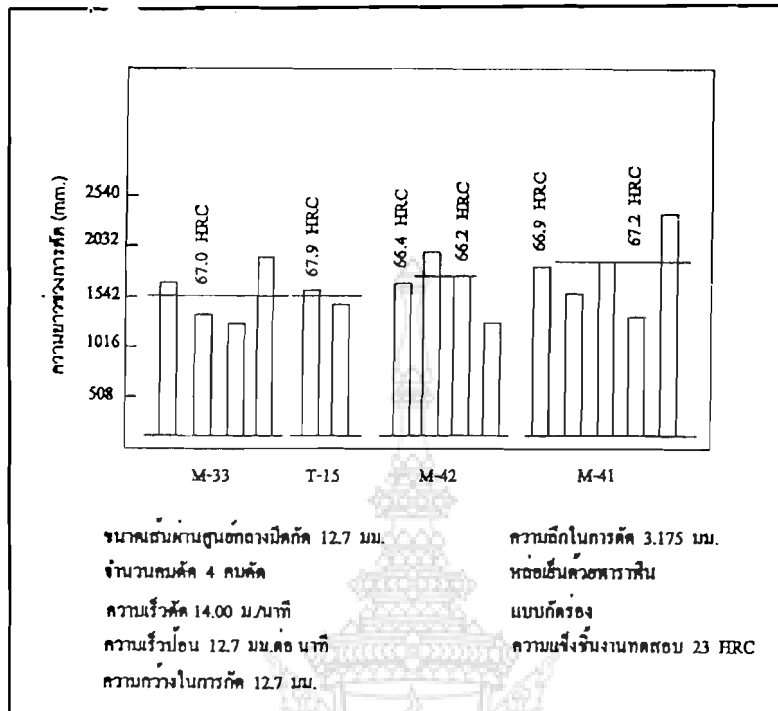


รูปที่ 2.1 แสดงระบบผลึกของเฟอร์ไรท์ (B C C) และออสเทนไนท์ (F C C) ที่อุณหภูมิต่างกัน [14]

คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้ารอบสูงสำหรับผลิตเครื่องมือตัด ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการผลิตและการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน การคงสภาพเนื่องจากการใช้งานและเหมาะสมต่อการตัดเฉือน โดยพิจารณากรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ให้ได้มาซึ่งความแข็งที่เหมาะสมและความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าเมื่อนำไปใช้งานในการตัดเฉือน เป็นคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการผลิตเครื่องมือตัดชนิดต่างๆ โลหะวิทยาของเครื่องมือตัด เงื่อนไขในการชุบเหล็กกล้าเครื่องมือประกอบด้วยส่วนผสมทางเคมี การเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์และการสลายของคาร์ไบด์ (Dissolved of Carbide) เมื่อเหล็กกล้าผ่านการอบให้ความร้อน โครงสร้างเฟอร์ไรต์และซีเมนต์ไคต์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์บางส่วน เกิดการกระจายของคาร์ไบด์และโครงสร้าง BCC (Body-Centered Cubic) จะเปลี่ยนเป็น FCC (Face-Centered Cubic) หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทนไนท์กลายเป็นมาร์เทนไซต์ การสลายของคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นภายใต้เวลา การเปลี่ยนแปลงนี้ โครงสร้างส่วนใหญ่กลายเป็นมาร์เทนไซต์หลังจากการชุบแข็งแล้วแต่ยังไม่ได้อบคืนตัวมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นจะมีความแข็งมากแต่คุณสมบัติด้านความเหนียวมีน้อย ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานหรือผลิตเป็นชิ้นงานใดๆ เพราะจะเกิดการแตกหักได้ง่าย ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานและมีความเหนียวมากขึ้น จึงจำเป็นต้องลดความเค้นภายในและเพิ่มความเหนียวในขณะที่ความแข็งลดลงเล็กน้อย ความแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมากเกินไปหลังจากผลิตเป็นเครื่องมือตัดแล้ว และเมื่อนำไปใช้งานสามารถทำการตัดเฉือนชิ้นงานได้ดีขึ้น

เหล็กกล้ารอบสูงสำหรับผลิตเป็นเครื่องมือตัด โดยทั่วไปคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับกระบวนการตัดเฉือนมี 3 ข้อดังนี้

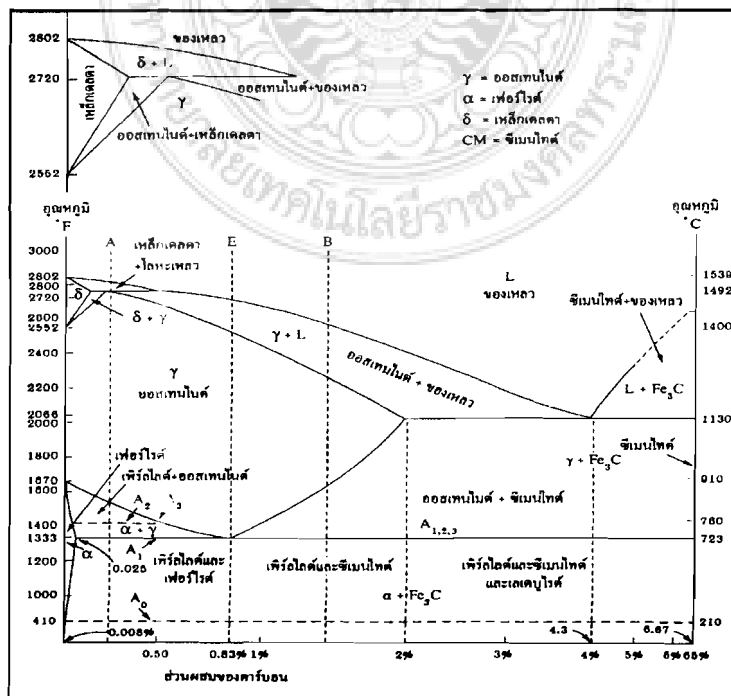
- 1) ความต้านทานการสึกหรอขณะตัดเฉือน
- 2) คงความแข็งที่อุณหภูมิสูงขณะตัดเฉือนชิ้นงาน
- 3) คงความเหนียวในสภาวะความแข็งมีความคงทนไม่แตกหักง่าย



รูปที่ 2.2 การคงความแข็งของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูงภายใต้ระยะทางการตัดเฉือน [1]

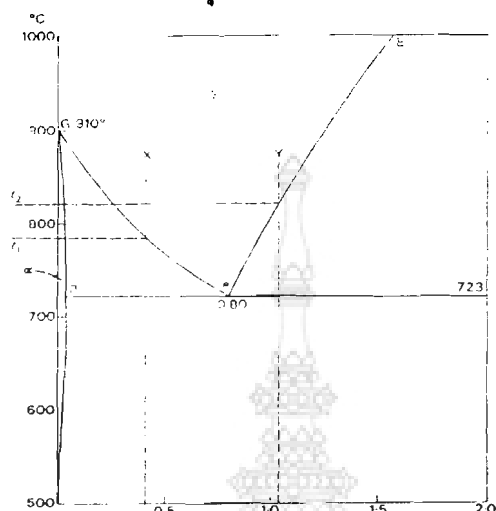
### 2.3 โครงสร้าง (Structure)

ในการศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็ก และ โครงสร้างของเหล็ก จากแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-เหล็กคาร์บอนดังรูปที่ 2.3



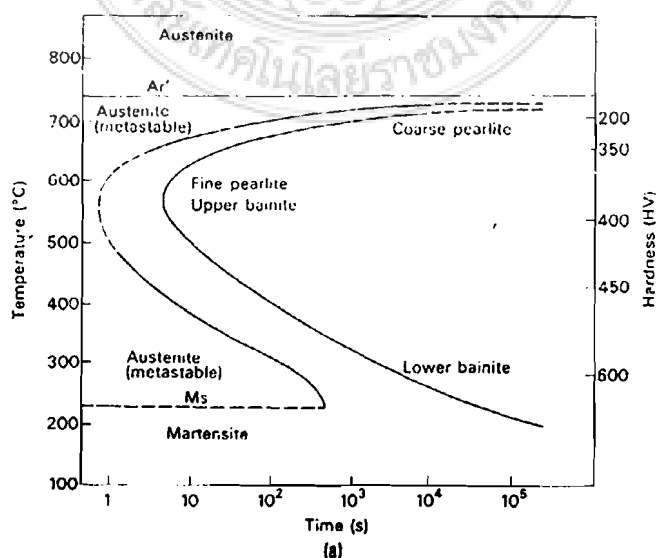
รูปที่ 2.3 ลักษณะแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-เหล็กคาร์บอน [3]

แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์บอน (Iron-carbon equilibrium diagram) โครงสร้างผลึกของโลหะไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ที่เกิดขึ้นในแผนภาพสมดุล มีดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน แสดงตำแหน่งส่วนผสมของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ [14]

สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.83 % (Hyper eutectoid) ซึ่งสมมติมีส่วนผสมคาร์บอน  $Y\%$  การเย็นตัวในสภาวะสมดุล จะทำให้เกิดนิวเคลียสของซีเมนไตต์ที่อุณหภูมิ  $t_2$  นิวเคลียสของซีเมนไตต์จะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์จะปรากฏว่า ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนลดลงตามเส้นกราฟ  $E_c$  เมื่อเทียบระหว่างเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ และเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ปรากฏว่าเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ใช้เวลาในการเผาให้เป็น ออสเทนไนต์ (Austenitize) สั้นกว่า ทั้งนี้เพราะเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนมาก ซึ่งจะทำให้มีปริมาณเพรไลต์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่สูงทำให้มีปริมาณขอบเกรนระหว่างเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์จำนวนมากกำเนิดนิวเคลียสของออสเทนไนต์ได้ง่าย

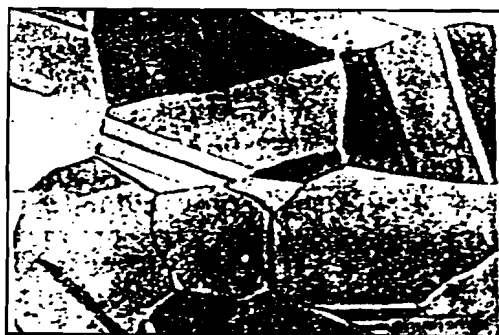


รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของออสเทนไนต์ไปสู่การสร้างแผนภูมิ T.T.T [14]

จากแผนภูมิ T.T.T (Time - Temperature - Transformation Diagram) ของเหล็กกล้าผสมยูเทคตอยด์จะปรากฏเส้นที่ลากผ่าน  $t_s$  เป็นเส้นที่แสดงค่าเวลาที่เริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนต์ และเส้นที่ลากผ่าน  $t_f$  เป็นเส้นที่แสดงค่าเวลาที่สิ้นสุดการเปลี่ยนในระหว่างเส้นเริ่มต้นและเส้นที่สิ้นสุดอาจจะมีเส้นที่มีแสดงการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนต์ ปริมาณ 50% ซึ่งทั่วไปจะใช้เส้นประ พื้นที่ทางด้านหน้าของเส้นเริ่มการเปลี่ยนแปลงกับเส้นแกนตั้งจะเป็นอาณาเขตของออสเทนไนต์ที่อยู่ในลักษณะไม่มีความเสถียรภาพ (unstable) คือพร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงพื้นที่ทางด้านหลังของเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นอาณาเขตของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงแล้วซึ่งมีหลายประเภทเริ่มตั้งแต่โครงสร้างเพรไลต์ชนิดหยาบ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิใกล้อุณหภูมิยูเทคตอยด์เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงลดต่ำลงเพรไลต์จะเป็นชนิดละเอียดจนกระทั่งถึงบริเวณเส้นกราฟที่งอโค้ง (Nose) จะได้โครงสร้างที่เป็นเบนไนต์ลักษณะขนนกและเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่ำลงมาอยู่ระหว่าง  $400^{\circ}\text{C}$  -  $300^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์จะเป็นลักษณะที่มีการแพร่ซึมของอะตอมและมีการเกิดนิวเคลียส เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเกิดที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$ ) การแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนและการกำเนิดนิวเคลียสไม่สามารถเกิดขึ้นได้ โครงสร้างที่ได้จะเป็นมาร์เทนไซต์ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดมาร์เทนไซต์จะกำหนดให้เป็นเส้น  $M_s$  ซึ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น  $M_s$  จะมีโครงสร้างของมาร์เทนไซต์เกิดขึ้น โดยลำดับและจะมีลักษณะโครงสร้างของออสเทนไนต์เหลือเนื่องจากเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ไม่ได้ซึ่งเรียกว่าออสเทนไนต์เหลือค้างซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่ปรากฏเส้น  $M_f$  เส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์

### 2.3.1 ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือ เหล็กเกรมม่า (Gamma Iron) ( $\gamma$ )

มีเหล็กและคาร์บอนรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารละลายแข็ง ระบบผลึกแบบ F.C.C. ดังรูปที่ 2.6 โดยคาร์บอนสามารถละลายเข้าไปผสมในเกรน หรือผลึกได้ มีส่วนผสมคาร์บอนมากที่สุด 1.7% C ณ อุณหภูมิ  $1130^{\circ}\text{C}$  มีคุณสมบัติอ่อนและเหนียว ออสเทนไนต์นั้นโดยทั่วไปจะไม่พบว่าเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเป็นเหล็กเครื่องมือ จะพบออสเทนไนต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องเสมอ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างออสเทนไนต์ [3]

### 2.3.2 มาร์เทนไซต์ (Martensite transformation)

เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (ferrite) ที่มีปริมาณคาร์บอนละลายปนอยู่มากกว่าที่ควรจะเป็นที่ระดับอุณหภูมิห้อง สภาวะที่ ferrite ชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าที่ควรเป็นผลมาจากการที่ออสเทนไนท์ถูกทำให้ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจากระดับอุณหภูมิออสเทนไนท์ลงสู่อุณหภูมิห้อง มาร์เทนไซต์นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะการลดอุณหภูมิของออสเทนไนท์เท่านั้น ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิดังกล่าวทำให้คาร์บอนที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับ Austenite ไม่สามารถแพร่ออกจากออสเทนไนท์ ในขณะที่ถูกลดอุณหภูมิลงได้ทัน ในขณะที่เดียวกันอะตอมของเหล็กที่เป็นออสเทนไนท์ ซึ่งจับตัวกันด้วยระบบผลึก FCC เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการจับตัวอะตอมเป็น BCC หรือ ferrite ซึ่งปกติจะมีคาร์บอนละลายปนเป็นเนื้อเดียวกับ ferrite ได้ในปริมาณเพียง 0.025% เท่านั้น การลดลงอย่างรวดเร็วมากของ ออสเทนไนท์เป็นผลทำให้คาร์บอนทั้งหมดที่ละลายปนในออสเทนไนท์ยังคงแทรกฝังใน ferrite หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจับตัวอะตอม สภาวะที่เฟอร์ไรต์ที่มีปริมาณคาร์บอนละลายปนอยู่มากกว่าปกตินี้เรียกว่าเกิด สภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (super saturated solid solution) ที่ระดับอุณหภูมิออสเทนไนท์ อะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวระหว่างแกนของอะตอมเหล็ก ดังนั้นการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิออสเทนไนท์จะมีผลทำให้อะตอมของคาร์บอนดังกล่าวไม่สามารถแพร่ออกจากระบบของผลึกออสเทนไนท์ในขณะที่กำลังเปลี่ยนแปลงเป็นเฟอร์ไรต์ได้ทัน ดังนั้นเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีคาร์บอนมากกว่าปกติ อะตอมเหล่านั้นจะถ่าง Space lattice ของเฟอร์ไรต์ให้กว้างออกเป็น body center tetragonal (B C C) ซึ่งเป็นรูปแบบผลึกของ มาร์เทนไซต์

### 2.4 เหล็กกล้าโคบอลต์ความแข็งสูง ( High-Hardness Cobalt steels )

มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นการเพิ่มธาตุโคบอลต์มากขึ้นประมาณ 5-12 % เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของเหล็กกล้ารอบสูงในด้านต่างๆให้สูงขึ้นและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานหลังจากชุบแข็งและผลิตเป็นเครื่องมือตัด ความแข็งที่ได้จะอยู่ในช่วง 68-70 HRC ซึ่งเป็นผลการวิจัย ผ่านการศึกษาและทดลองจากนักวิจัยต่างประเทศ หลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟจะมีความแข็งและ โครงสร้างที่เหมาะสม ซึ่งต้องพิจารณาส่วนต่างๆประกอบ ได้แก่ ความแข็งของชิ้นงานที่จะทำการตัดเฉือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำให้มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งจะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางการตัดเฉือนได้ดีขึ้นในอุณหภูมิที่สูงกว่า เนื่องจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัดและเศษตัด กราฟการอบคืนตัว (Tempering Curve) ของเหล็กกล้าโคบอลต์ความแข็งสูงแสดงในรูปที่ 2.7 ภายใต้งี้อุ่นใจในการอบชุบ จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งที่เปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยในระหว่างช่วงอุณหภูมิทำการอบคืนตัวจะสามารถทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 69-70 HRC โดยใช้อุณหภูมิอบคืนตัวในช่วง 510-540°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการอบคืนตัวเหล็กกล้ารอบสูงผสมโคบอลต์จะต้องทำการอบคืนตัวอย่างน้อย 3-4 ครั้ง เป็นอย่างน้อย

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของเหล็กกล้ากลุ่มโคบอลต์ความแข็งสูง

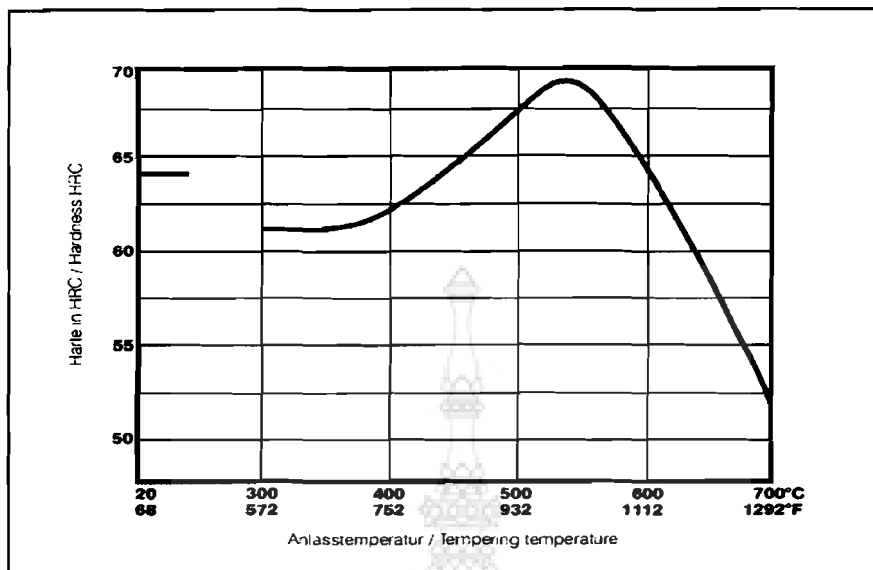
มาตรฐาน (AISI)	คาร์บอน (C)	ทังสเตน (W)	โมลิบดีนัม (Mo)	โครเมียม (Cr)	วานาเดียม (V)	โคบอลต์ (Co)
M41	1.1	6.75	3.75	4.25	2	5
M42	1.1	1.5	9.5	3.75	1.15	8.25
M43	1.2	2.75	8	3.75	1.6	8.25
M44	1.15	5.25	6.5	4.25	2	12
M45	1.25	8.25	5	4.25	1.6	5.5
M46	1.25	2	8.25	4	3.2	8.25

เงื่อนไขการอบคืนตัวนี้จะต้องทำเครื่องมือตัดที่ผลิตมีความแข็งแรงและคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น แต่ความเหนียวในสภาวะความแข็งลดลง สำหรับเครื่องมือประเภท เอ็นมิลล์ มีดตัด สว่าน ตีแปและเครื่องมือตัดอื่นๆ

การคงความเหนียวในขณะที่ยังคงสภาวะความแข็ง เป็นสิ่งที่จำเป็นและต้องการสำหรับงานต่างๆ ไปความแข็งที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 66-68 HRC ในตารางที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งที่อุณหภูมิของ M42 กับ T15 ซึ่งเป็นกลุ่มเหล็กกล้าอบสูงและ M42 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าอบสูงทั่วไปทำการตัดเฉือนจนอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 540°C ปรากฏว่าเหล็กกล้า M42 คงความแข็งได้ดีกว่า มีความแข็งมากกว่า T15 เท่ากับ 4HRC และมากกว่า M2 เท่ากับ 7HRC ถือว่าเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัติคงความแข็งที่อุณหภูมิขึ้นได้ดี ในทางปฏิบัติสามารถทำการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งและอุณหภูมิสูงกว่า T15 และ M2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติการคงสภาพความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือที่ 540°C

วัสดุเอ็นมิลล์	ความแข็ง (Vickers)	ความแข็ง (HRC)
M42	655	58
T15	575	54
M2	525	51



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบความสามารถในการอบคืนตัวของเหล็กกล้าอบสูง [12]

การมีคุณสมบัติด้านความเหนียวของเหล็กกล้าโคบอลต์ผสมสูง จะมีความแตกต่างกันในแต่ละเกรด เหล็กกล้าอบสูง M41 และ M42 มีคุณสมบัติการคงความเหนียวที่สภาวะการคงความแข็งสูงมากกว่าเกรดอื่นๆ แต่จะมีความต้านทานต่อการสึกหรอลดลงเล็กน้อย การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของเหล็กกล้าอบสูงมีขั้นตอนการชุบหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเป็นเครื่องมือตัดเพื่อให้สามารถใช้งานในการตัดเฉือนอย่างเหมาะสม เครื่องมือตัดจะมีคุณภาพดี อายุการใช้งานยาวหรือสั้นมีผลมาจากกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนและการขึ้นรูปเป็นสำคัญ

การอบชุบเหล็กกล้าอบสูงทั่วไปตัวแปรต่างๆ ในการอบชุบ ได้แก่ อุณหภูมิชุบแข็ง เวลาในการคงอุณหภูมิ การเย็นตัวและการอบคืนตัว ขึ้นอยู่กับเหล็กกล้าแต่ละชนิด ในขั้นตอนการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม การเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนดังกล่าวนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานการอุ่นชิ้นงานเพื่อป้องกันการแตกร้าวและการบิดงอ เนื่องจากอุณหภูมิของชิ้นงานที่ผิวและแกนกลางแตกต่างกัน เนื่องจากว่าต้องใช้เวลาในการที่จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิออสเทนไนท์ในการอุ่นชิ้นงานจะทำการเพิ่มอุณหภูมิถึงระดับหนึ่ง แล้วคงอุณหภูมิไว้ในเวลาหนึ่งก่อนที่จะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีก เพื่อเป็นการปรับสภาพการนำความร้อนที่สม่ำเสมอและให้อุณหภูมิของชิ้นงานเข้าใกล้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนท์ หลังจากนั้นจึงจะเพิ่มอุณหภูมิให้เป็นออสเทนไนท์ในเวลาที่ยาวรวดเร็วเพื่อเป็นการรักษาสภาพการเป็นออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์และเหมาะสม การอุ่นชิ้นงานก่อนอุณหภูมิออสเทนไนท์ในเตาอบจะต้องทำต่อเนื่องกันด้วยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ แก่ชิ้นงานภายในเตาจนถึงอุณหภูมิประมาณ 450-600 °C เมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นถึงจุดนี้จะต้องคงอุณหภูมิไว้ในช่วงเวลาหนึ่งประมาณ 30-90 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นงานหลังจากนั้นทำการอุ่นขึ้นที่สองด้วยการเพิ่มอุณหภูมิแก่ชิ้นงานโดยใช้เวลาเร็วกว่าการให้อุณหภูมิในอันดับแรกจนถึงช่วงอุณหภูมิ 700-850 °C เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดแล้วคงอุณหภูมิไว้ในช่วงเวลาหนึ่งประมาณ 30-45 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน หลังจากนั้นในขั้นตอนที่สามเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นงานก่อนข้างรวดเร็วกว่าขั้นตอนที่สองจนชิ้นงานมีความร้อนถึงอุณหภูมิช่วง 950-1100 °C แล้วคงอุณหภูมิไว้ระดับหนึ่งโดยขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นงานเช่นกัน หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ 100 % ในช่วงอุณหภูมิชุบแข็งจะได้โครงสร้างออสเทนไนท์ที่เหมาะสม การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าด้วยความร้อนในทางปฏิบัติจะต้องทำให้เกิดการสลายของคาร์ไบด์ให้มากที่สุด การสลายได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิชุบแข็ง เวลาคงที่ของอุณหภูมิชุบแข็งและความเร็วในการเย็นตัว

การเย็นตัวอย่างรวดเร็วมักจะเกิดปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากเวลาที่สั้นทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และจะต้องรักษาความแข็งหลังชุบแข็งของเหล็กกล้ารอบสูงจะให้อุณหภูมิประมาณ 200 °C (Ms) อัตราความเร็วในการเย็นตัวจะต้องทำให้เกิดการก่อตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่หยุดชะงัก โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีลักษณะการอัดอเนก ต่ำกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ การขยายตัวเกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การขยายตัวในช่วงการกลายสภาพเป็นมาร์เทนไซต์ก่อให้เกิดความเค้นสูงและเกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวรภายหลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว คุณสมบัติที่สำคัญและจำเป็นในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ คือ

1) ไม่เกิดการแพร่ขึ้น ใน โครงสร้าง รวมทั้งส่วนผสมทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของออสเทนไนท์จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไปโดยฉับพลัน

2) การเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ จะเกิดขึ้น ในระหว่างช่วงของการเย็นตัวเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับอัตราอุณหภูมิในลักษณะแบบต่อเนื่องการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เรียกว่า Continuous Transformation และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบคงที่ ซึ่งเรียกการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้ว่า Isothermal Transformation

3) การก่อตัวโครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่หยุดชะงัก แม้จะเปลี่ยนอัตราความเร็วในการเย็นตัวก็จะไม่เปลี่ยนระดับอุณหภูมิ MS (Martensite Start) ช่วงอุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์ของโลหะผสมหนึ่งๆจะคงค่า ไม่สามารถทำให้ต่ำลงโดยการเปลี่ยนอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $M_s$  ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีเท่านั้น

อุณหภูมิชุบแข็งหลังจากอุ่นชิ้นงานและผ่านขั้นตอนการปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงานภายใต้กระบวนการที่ควบคุมอย่างถูกต้องแล้วขั้นตอนการอบให้ได้โครงสร้างออสเทนไนท์ที่เหมาะสม สำหรับเหล็กกล้ารอบสูง M42 อุณหภูมิชุบแข็งอยู่ในช่วง 1170-1230 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขบวนการอบชุบเนื่องจากการควบคุมกระบวนการอบชุบของแต่ละแบบมีตัวแปรและเงื่อนไขในการปฏิบัติงานแตกต่างกัน ทั้งนี้จำเป็นต้องควบคุมการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง



และควบคุมสถานการณ์เปลี่ยนแปลงออสเทนไนต์ ให้เหมาะสมก่อนการชุบแข็งด้วยสารชุบ โครงสร้างของเหล็กกล้ารอบสูงที่ผ่านกระบวนการอบชุบมาแล้วสามารถแบ่งชนิดของคาร์ไบด์ (Carbides) ได้ 3 ชนิดหลักๆ คือ  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  และ MC เป็นคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในเมตริกของเฟอร์ไรท์ โดย M แทนอะตอมของโลหะ . C แทนอะตอมของคาร์ไบด์

คาร์ไบด์ทั้ง 3 ชนิดมีเหล็กกล้าในกลุ่มต่างๆ ดังนี้

$M_{23}C_6$  เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ( Chromium Carbide )

$M_6C$  เป็นโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ ( Molybdenum Carbide )

MC เป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ ( Vanadium Carbide )

คาร์ไบด์ 3 ชนิดนี้จะเกิดขึ้นในช่วงการสลายตัวของอุณหภูมิในระหว่างการชุบแข็ง คาร์ไบด์เหล่านี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงและมีผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้างที่เหมาะสมหลังจากอบคืนตัว ถ้าพิจารณาโครงสร้างหลังการอบชุบเหล็กกล้ารอบสูง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ จะพบว่ามีการเกิดคาร์ไบด์ หรือ โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ ด้วย ในระหว่างการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิชุบแข็งโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิวิกฤต ( ที่อุณหภูมิประมาณ  $800^{\circ}C$  ) มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในขั้นตอนนี้ เริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก เฟอร์ไรท์ ถึง ออสเทนไนท์ และไม่เกิดสนามแม่เหล็กในลำดับต่อมาคาร์ไบด์เริ่มสลายในสารสลายภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดการกระจายของคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ในออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}C$  และขึ้นอยู่กับเวลาที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}C$  จะแพร่เป็นเฟสทั้งหมดจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า  $M_6C$  คาร์ไบด์จะเกิดการสลายมากขึ้นทีละน้อยๆ และจะเพิ่มขึ้นอีกที่อุณหภูมิเหนือ  $1150^{\circ}C$  จะได้ MC ที่มีความแข็งแรงมาก การสลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $1200^{\circ}C$  เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทั้งสแตน โมลิบดีนัม วานาเดียม และโครเมียมที่อยู่ในออสเทนไนท์ ซึ่งเป็นคาร์ไบด์  $M_6C$  การสลายของ MC คาร์ไบด์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเหนือ  $1200^{\circ}C$  ที่อุณหภูมิชุบแข็ง การทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มากขึ้น สลายเข้าไปในเกรนที่เกิดขึ้นใหม่ จุดนี้จะได้เมตริกของออสเทนไนท์ คงที่และการสลายของคาร์ไบด์ จะเกิดขึ้นมากที่สุดเหล็กกล้ารอบสูงทุกชนิด

ปริมาณการไม่สลายของคาร์ไบด์ (Undissolved Carbide) จะตกค้างประมาณ 7-12 % หลังจากการคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิชุบแข็ง ช่วงเวลาคงอุณหภูมิจำเป็นต่อการทำให้อัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้ถึงอุณหภูมิห้อง โครงสร้างออสเทนไนท์ประมาณ 70-80% จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ขณะเดียวกันถ้าให้เย็นตัวลงมาหยุดที่อุณหภูมิหนึ่งมีค่าออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained austenite) 20-30% ความแข็งแรงจะมีค่าประมาณ 65 HRC หรือมากกว่า

1) การให้ความร้อน (Heating) เหล็กกล้ารอบสูงมีค่านำความร้อนค่อนข้างต่ำ เครื่องมือตัดที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูงควรจะทำให้แข็งได้โดยอยู่ในขั้นตอนการให้ความร้อน ถ้าเครื่องมือตัดที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างซับซ้อนการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง ในขั้นตอนการเริ่มให้

ความร้อนช่วงแรกจะยุ่งยากเพราะอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานกับแกนกลางไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อการบิคมหรือการแตกร้าวคั้งนั้น การผลิตเครื่องมือตัดจากเหล็กกล้ารอบสูง ควรจะทำการอุ่นชิ้นงานก่อนที่จะให้อุณหภูมิถึงช่วงอุณหภูมิชุบแข็ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ

2) การอุ่นชิ้นงานในขั้นตอนที่ 1 (First Preheating) โดยปกติเริ่มอุ่นชิ้นงานในเตาที่มีอากาศหมุนเวียนที่อุณหภูมิ 300-400°C และคงอุณหภูมิไว้จนกระทั่งชิ้นงานมีความร้อนเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน

3) การอุ่นชิ้นงานในขั้นที่ 2 (Second Preheating) ต่อจากขั้นตอนแรกชิ้นงานจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิในบ่อเกลือเหลวซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 840-860 °C แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 8-9 นาที ต่อ ความหนาชิ้นงาน 1 เซนติเมตร

4) การอุ่นชิ้นงานในขั้นตอนที่ 3 (Third Preheating) จะทำเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้นที่อุณหภูมิ 1050-1100 °C ซึ่งมีประโยชน์ต่อกระบวนการชุบแข็งเพราะว่าจะช่วยลดเวลาในการชุบแข็ง โดยเป็นการพัฒนาให้ดีขึ้นในเรื่องของความเหนียว การทนต่อแรงกระแทก ของเครื่องมือตัดถ้านำการอุ่นชิ้นงานในขั้นที่ 3 มาใช้ แล้วคงอุณหภูมิที่ขั้นตอนนี้ จะเท่ากับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิชุบหลังจากการอุ่นชิ้นงานแล้วจะนำไปสู่ขั้นตอนการให้ความร้อนขั้นสุดท้ายและชุบในสารชุบ

5) อุณหภูมิชุบแข็งและเวลาในการคงอุณหภูมิชุบแข็ง (Holding Time) อุณหภูมิชุบแข็งสำหรับเหล็กกล้าโมลิบดีนัม ใช้อุณหภูมิระหว่าง 1170-1250 °C และสำหรับเหล็กกล้าทั้งสแตนเลสใช้อุณหภูมิระหว่าง 1250 -1300 °C การคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิชุบแข็ง ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็กกล้าและขนาดของเครื่องมือ หลังจากทีเครื่องมือได้รับอุณหภูมิถึงอุณหภูมิชุบแข็งตามที่กำหนดแล้ว คงอุณหภูมิที่อุณหภูมินี้ก่อนเพื่อให้เกิดการสลายของ คาร์ไบด์ อย่างเพียงพอในที่นี้ปริมาณคาร์ไบด์ที่สลายอย่างเหมาะสมจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ถ้าใช้เวลาน้อยหรือนานเกินไปจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเนื่องจากขนาดและรูปร่างและการสลายของคาร์ไบด์ ถ้าเวลาการคงอุณหภูมินานเกินไปจะทำให้เกิดความแข็งไม่สม่ำเสมอ ปริมาณของคาร์ไบด์จำนวนมากสลายและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิดเกรน โต คั้งนั้นจึงมีการคงความเหนียวในสภาวะของแข็งค่าหรือความเหนียวลดลง และเป็นอันตรายต่อการเกิดการแตกร้าว

6) การชุบแข็ง (Quenching) ภายหลังจากทีเครื่องมือได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง ในเวลาที่ถูกต้องหรือเหมาะสมแล้ว การทำงานขั้นต่อไปคือการชุบ โดยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ออสเทนไนต์ เปลี่ยนแปลงมาเป็น มาร์เทนไซต์ อย่างสมบูรณ์ การชุบเหล็กกล้ารอบสูงสามารถทำได้ 4 วิธี

- ชุบด้วยอากาศ ใช้กับชิ้นงานบาง ๆ
- ชุบด้วยน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 60°C
- ชุบด้วยเตาเกลือ หรือทำมาร์เทมเปอร์ริง ( Martempering )
- ชุบด้วยไนโตรเจน ภายใต้อุณหภูมิในเตาสัญญากาศ

การอบชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ (Sub - Zero Treatment) กรรมวิธีนี้ทำภายหลังการชุบแข็ง ชิ้นงานขนาดใหญ่หรือชิ้นงานที่ซับซ้อนจะเกิดออสเทนไนท์ตกค้างและสามารถทำให้เปลี่ยนมาเป็น มาร์เทนไซต์ ได้เกือบทั้งหมด โดยทำให้เย็นตัวในเวลาต่อเนื่องกัน จากการชุบในสารชุบจากอุณหภูมิ ชุบแข็งถูกทำให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องและชุบในไนโตรเจนเหลว ในอุณหภูมิ ตั้งแต่  $-70^{\circ}\text{C}$  เป็นอย่างน้อย การเปลี่ยนแปลงของ ออสเทนไนท์ ตกค้าง โดยวิธีการทำ Sub-Zero

7) การอบคืนตัวเหล็กกล้าอบสูง การอบคืนตัวเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่อง จากการปฏิบัติ การทำให้เย็นตัวของ การชุบ โลหะซึ่งเป็นการอบชุบในขั้นสุดท้ายของกระบวนการชุบแข็ง ไม่ว่าจะเป็น ความแข็งแรง การคงความเหนียวในสภาวะความแข็งและความเสถียรภาพของเครื่องมือตัดขึ้นอยู่ กับขบวนการอบคืนตัว โครงสร้างของเหล็กกล้าอบสูงหลังจากผ่านกระบวนการอบชุบแล้วคาร์ไบด์ จะไม่สลายตัวปริมาณ 6 - 12 % ออสเทนไนท์ไม่เป็นเปลี่ยนแปลง 15-30% มาร์เทนไซต์หลังจาก การอบคืนตัวแล้วเกิดขึ้นประมาณ 60-80% ทำให้มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ คือมีความเปราะและมีดิซัน งานไม่เสถียรภาพ (Dimensionally unstable) การอบคืนตัวจะทำให้เหล็กกล้ามีความเค้นภายในดิซัน ไม่แตกหักง่ายและลดความไม่คงตัว ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการคงความแข็งการทำให้เหล็กกล้า อบสูงเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ การกำหนดระยะเวลา ในการคงอุณหภูมิที่ต่ำเป็นข้อกำหนดที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดในการเลือกใช้อุณหภูมิและ การควบคุมอุณหภูมิขึ้นอยู่กัชนิดของเหล็กกล้า ดังนั้นการอบคืนตัวในครั้งแรกขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ และเวลาอุณหภูมิการอบคืนตัวที่ต่ำกว่า ต้องกำหนดเวลาในการคงอุณหภูมินานกว่าปกติ การอบ คืนตัวโดยทั่วไปอุณหภูมิในการให้ความร้อนเหล็กกล้าอยู่ในช่วง  $510-580^{\circ}\text{C}$  เมื่อให้ความร้อนใน การอบคืนตัวครั้งต่อไปที่อุณหภูมิ  $600-620^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เกิด Constitutes ทำให้คงความแข็งที่ อุณหภูมิสูงดิซันแต่จะเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่า คืออุณหภูมิการอบคืนตัวที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง  $510-565^{\circ}\text{C}$  การกำหนดวัฏจักรการอบคืนตัว ครั้งแรกจะเป็นการลดความเค้นของ โครงสร้าง มาร์เทนไซด์หลังการชุบแข็งและออสเทนไนท์ตกค้างจะเกิดการเปลี่ยนแปลง การอบคืนตัวและ การลดความเค้นของมาร์เทนไซด์ที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วจะทำให้เกิด โครงสร้างที่เหมาะสม ต่อการนำไปใช้งานมากขึ้น การให้ความร้อนและการคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิลบคืนตัวจึงมีความจำเป็น การกำหนดเงื่อนไขในการคงอุณหภูมิลบคืนตัวเป็นสิ่งที่ทำให้ออสเทนไนท์ ตกค้างเปลี่ยน ไปเป็น มาร์เทนไซด์ใหม่ (New Martensite) ในขณะที่ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิห้อง การก่อตัวของมาร์เทนไซด์ใหม่จะเกิดอย่างสมบูรณ์ โดยการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและความเค้น ภายในจะลดลงเมื่อทำการอบคืนตัว

#### 2.4.1 คุณสมบัติของธาตุผสมในเหล็กกล้า

2.4.1.1 คาร์บอน มีจุดหลอมเหลวประมาณ  $3500^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างขณะเป็นของแข็ง Amorphous Hexagonal Cubic ขนาดรัศมีของอะตอม  $0.71\text{\AA} - 0.77\text{\AA}$  เปอร์เซนต์ของคาร์บอนเพิ่ม

ขึ้นทำให้คุณสมบัติในการรับแรงทางกลและคุณสมบัติในด้านความแข็งของเหล็กดีขึ้น แต่จะทำให้คุณสมบัติของการยึดตัว การเปลี่ยนรูป การเชื่อมและการตัดของเหล็กลดลง

2.4.1.2 โครเมียม มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1455 °C โครงสร้างเป็นของแข็งอยู่ในรูปของ F.C.C ขนาดรัศมีอะตอม 1.245 Å มีผลต่อคุณสมบัติในการยึดตัวของเหล็กลดลง แต่ทำให้ การชุบแข็งดีขึ้นลดความเปราะของเหล็กได้ดีและเพิ่มความเหนียวแก่เหล็กมากขึ้น

2.4.1.3 วานาเดียม มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1735 °C โครงสร้างเป็นของแข็งอยู่ในรูปของ BCC ขนาดรัศมีอะตอม 1.316 Å ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนดีขึ้นและเป็นตัวลดความร้อนเมื่อความร้อนมากเกินไปทำให้อายุการใช้งานนานและคงความคมของคมตัด

2.4.1.4 โมลิบดีนัม มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 2625 °C โครงสร้างเป็นของแข็งอยู่ในรูปของ BCC ขนาดรัศมีอะตอม 1.36 Å ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงและ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วยทำให้เหล็กทนความร้อน ทำให้เหล็กที่ผสมเกิด โครงสร้างแบบคาร์ไบด์ และทนต่อการผุกร่อน

2.4.1.5 ทังสแตน มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 3410 °C โครงสร้างเป็นของแข็งอยู่ในรูปของ BCC ขนาดรัศมีอะตอม 1.369 Å ให้คุณสมบัติความแข็งแรงดีขึ้นและอายุการใช้งานของคมตัดเพิ่มขึ้น

2.4.1.6 โคบอลต์ มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1495 °C โครงสร้างเป็นของแข็งอยู่ในรูปของ H.C.P ขนาดรัศมีอะตอม 1.248 Å ให้คุณสมบัติความแข็งแรงดีขึ้นและทำให้เกิด โครงสร้างแบบคาร์ไบด์

## 2.5 การชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูง [1]

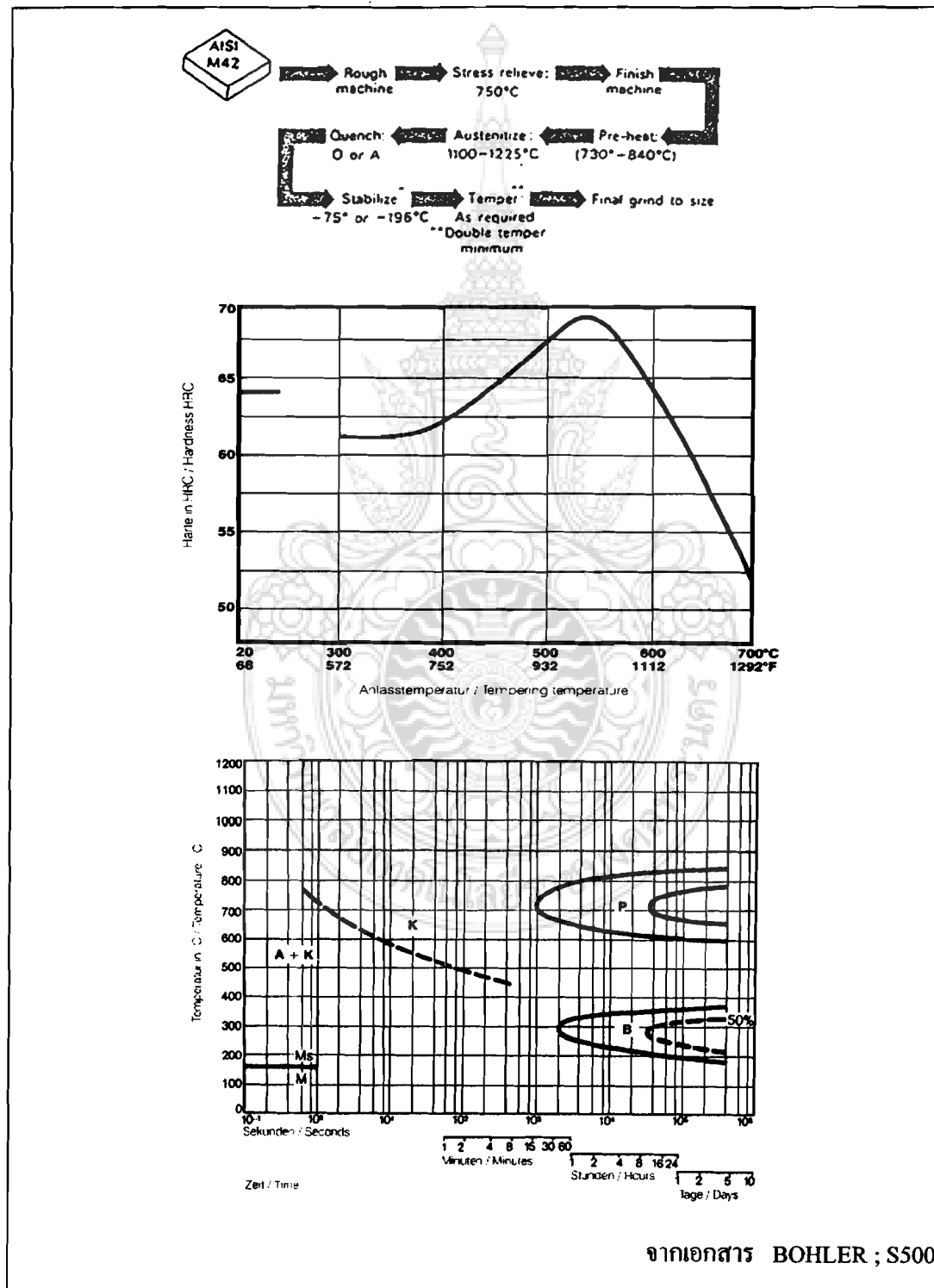
การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้ารอบสูง ตามมาตรฐาน AISI เบอร์ M42 สำหรับการผลิตเอ็นมิลล์มีกระบวนการอบชุบหลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเตาอบและอุปกรณ์ประกอบการอบชุบ โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนจะทำงานคล้ายๆ กัน ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) กำหนดธาตุหลักเป็นช่วง ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมของเหล็กกล้ารอบสูง

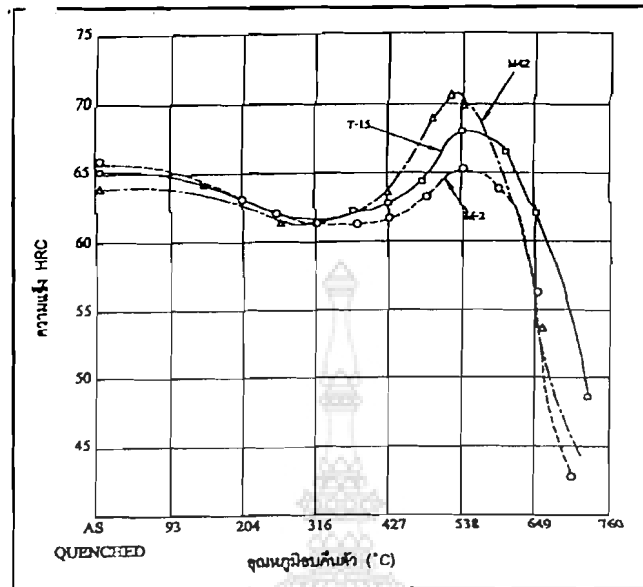
ธาตุ	คาร์บอน	โครเมียม	โมลิบดีนัม	วานาเดียม	ทังสแตน	โคบอลต์	แมงกานีส	ซิลิกอน
ส่วนผสม (น้ำหนัก%)	1.05–1.15	3.5–4.25	9-10	0.95–1.35	1.15–1.85	7.75–8.75	0.15–0.4	0.15–0.5

เหล็กกล้ารอบสูงชนิดนี้เป็นเหล็กกล้ากลุ่มผสมคาร์บอนสูงและผสมโคบอลต์สูง สามารถทำให้ความแข็งหลังการอบชุบได้ถึง 70 HRC มีความสามารถในการตัดเฉือนได้ดี ตัดเฉือนงานที่เศษตัดเฉือนมากๆ ได้ดีกว่าเหล็กกล้ารอบสูงกลุ่มโคบอลต์ชนิดอื่นๆ มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง

ได้ดีกว่า การผสม โมลิบดีนัมถึง 9.50 % จะช่วยให้คุณสมบัติการตัดเฉือนได้สูงขึ้น ทำให้การคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงดีขึ้นอย่างไรก็ตามถ้าเลือกใช้อุณหภูมิออสเทนไนท์ที่ต่ำกว่าในการอบชุบจะทำให้ความแข็งต่ำลงและเพิ่มคุณสมบัติด้านต้านทานการกระแทกแต่ความสามารถในการตัดเฉือนปานกลาง



รูปที่ 2.8 กระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้า M42 [12]



รูปที่ 2.9 ความแข็งหลังจากการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1200°C ของเหล็กกล้า M42 [1]

การอบเพื่อให้โครงสร้างสม่ำเสมอ (Annealing) การอบเพื่อให้โครงสร้างสม่ำเสมอโดยให้ความร้อนช่วง 870 - 900°C จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กและใช้อุณหภูมิมากกว่าถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จะต้องมีการบรรจุหรือการเตรียมชิ้นงาน ขั้นตอนในการปฏิบัติในการอบชุบ ถ้าทำการอบในเตาอบสูญญากาศจะเป็นการป้องกันปัญหาที่จะเกิดตามมาได้มาก เช่น การเกิดออกไซด์ การได้โครงสร้างที่สม่ำเสมอ การบิดงอ การแตกร้าว เป็นต้น หลังจากให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วคงอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง ต่อความหนาชิ้นงาน 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในเตาถึง 650 °C หลังจากนั้นให้เย็นตัวด้วยอัตราความเร็วคงที่และไม่ให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งขั้นสุดท้ายความแข็งที่ต้องการอบประมาณ 235-269 HB

การอบเพื่อลดความเค้นภายใน (Stress Relieving) เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C -675°C และคงอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง ต่อความหนา 1 นิ้ว ให้เย็นตัวในอากาศ การชุบแข็ง ต้องทำการให้อุณหภูมิชิ้นงาน 2 ช่วงด้วยการให้ความร้อนในเตาเดียวกันที่อุณหภูมิช่วง 730°C -845°C และที่อุณหภูมิช่วง 845°C -870°C การเตรียมชิ้นงานโดยการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิหนึ่งแล้วคงอุณหภูมินั้นไว้เพื่อให้ความร้อนที่แกนกลางเท่ากับผิวชิ้นงานก่อนจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีกการให้ความร้อนลักษณะเช่นนี้จะไม่ทำให้งานเกิด Thermal Shock ในระหว่างการอุ่นเตรียมชิ้นงานก่อนที่ จะได้รับอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิต่อสแตนไนท์เมื่อทำตามขั้นตอนทั้ง 2 ช่วง แล้วชิ้นงาน จะได้รับอุณหภูมิอย่างเหมาะสม มีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งเวลาในการให้อุณหภูมิและเวลาในการคงอุณหภูมิจนถึงออสเทนไนท์ ในขั้นตอนก่อนที่จะได้โครงสร้างออสเทนไนท์ต้องอุ่นชิ้นงานด้วยการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจากช่วงอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิต่อสแตนไนท์ ชิ้นงานทั้งส่วนผิวนอกและแกนกลางหรือทั่วทั้งชิ้นงานจะต้องควบคุมอุณหภูมิก่อนออสเทนไนท์

กลายเป็นมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ในเวลาเดียวกันนั้นเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากการเริ่มต้นการแปรสภาพโครงสร้างออสเทนไนท์ในช่วงเวลาในการคงอุณหภูมิขณะที่เป็นออสเทนไนท์ เนื่องจากการใช้เวลาเป็นเกณฑ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การสลายของคาร์ไบด์ การจัดรูปของคาร์ไบด์ให้สม่ำเสมอและผลต่อขนาดของคาร์ไบด์ ซึ่งจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมรวมทั้งการรักษาระยะเวลาไม่ให้คาร์บอนเกิดการแพร่ในสารละลาย ถ้าเวลาในการคงอุณหภูมินานเกินไปจะส่งผลกระทบต่อขนาดและการกระจายไม่สม่ำเสมอ และในขณะเดียวกันก็จะทำให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม อุณหภูมิที่ต้องควบคุมให้ชิ้นงานมีความร้อนถึงออสเทนไนท์อยู่ในช่วง 1170-1230°C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเตา ในกระบวนการให้ความร้อนและการชุบแข็งในสารชุบแต่ละชนิด

การเสถียรภาพที่เหมาะสมหลังการชุบแข็ง (Stability) การกระทำในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการชุบ (Quenching) เป็นการลดความเค้น (Stress Relieve) โดยการอบที่อุณหภูมิช่วง 150 - 160°C หลังจากชุบแข็งให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ (-79 ถึง -196°C) แต่ในขั้นตอนนี้ทำหลังจากชิ้นงานอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

การอบคืนตัว หลังจากการชุบแข็งและการลดความเค้นเป็นการเพิ่มคุณสมบัติที่เหมาะสมให้เครื่องมือตัดหรือเอ็นมิลล์ที่จะทำการผลิต มีอายุการใช้งานมากขึ้น โดยการอบเหล็กกล้าจนถึงอุณหภูมิช่วง 520 - 550°C คงอุณหภูมิอย่างน้อย 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิและอบคืนตัวอย่างน้อย 3 ครั้ง (Third Tempering) หรือมากกว่า ความแข็งที่เหมาะสมหลังการอบคืนตัวอยู่ในช่วง 65 - 70 HRC

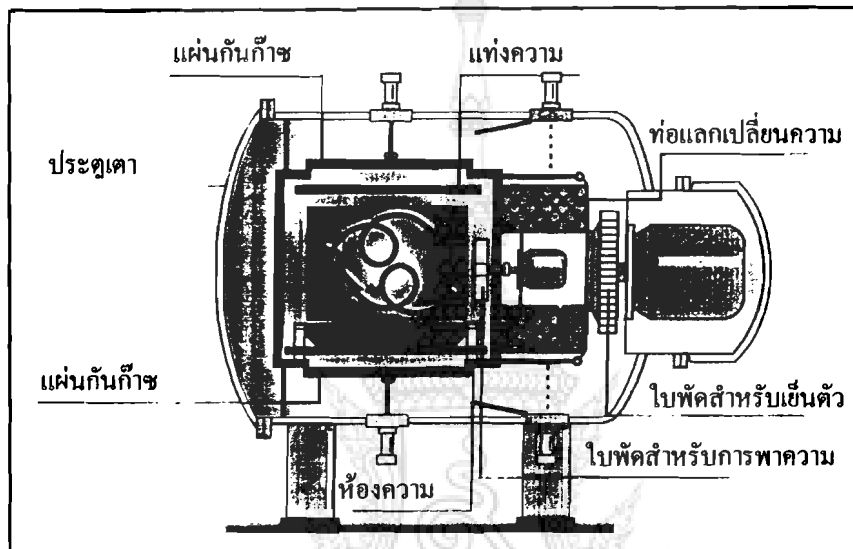
## 2.6 การชุบแข็งเหล็กกล้าในเตาสุญญากาศ [2]

เป็นวิธีป้องกันผิวที่ได้ผลดีมาก โดยเฉพาะเหมาะกับการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือตัดเตาสุญญากาศมีราคาสูงมาก ปัจจุบันมีผู้ให้บริการด้านการชุบแข็งนำเข้าเตาสุญญากาศมาใช้ในประเทศจำนวนมากพอสมควร ทำให้ผู้ผลิตเครื่องมือต่างๆ สามารถส่งชิ้นงานเพื่อรับบริการชุบแข็งยังศูนย์บริการชุบแข็ง ซึ่งทำให้เครื่องมือที่ผลิตมีคุณภาพดีขึ้น ในปัจจุบันอาจกล่าวได้ว่า การชุบแข็งเหล็กกล้าในเตาสุญญากาศเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งข้อดีที่สำคัญคือมีการเสีรูปด้าและค่าใช้จ่ายในการตัดเฉือนภายหลังมีน้อยกว่าเนื่องจากผิวไม่เสียหายจากออกไซด์การให้ความร้อนในเตาสุญญากาศต่อชิ้นงานจะเป็นลักษณะที่ไม่รวดเร็วจึงเป็นการลดความเสี่ยงการเสีรูปด้าได้ตั้งแต่ต้น

การเย็นตัวโดยการใช้อากาศในโตรเจนฉีดอัดเข้าไปในเตาด้วยความดัน 1 - 10 bar จะสามารถทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดได้ ชนิดของเหล็กกล้าที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเตาสุญญากาศควรเป็นเหล็กกล้าที่มีความสามารถชุบแข็งสูง (High Hardenability) ซึ่งหมายถึงมีค่าอัตราเย็นตัววิกฤต (CCR) ต่ำ ซึ่งส่วนมากเป็นเหล็กกล้าเจือสูง (High Alloy Steels) เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) เหล็กกล้าโรบสูง (High Speed Steels) เหล็กกล้าทำวาล์ว (Valve Steels) และเหล็กกล้าไร้สนิมแข็ง (Martensitic Stainless) เป็นต้น

### 2.6.1 หลักการทำงานของเตาสัญญากาศ

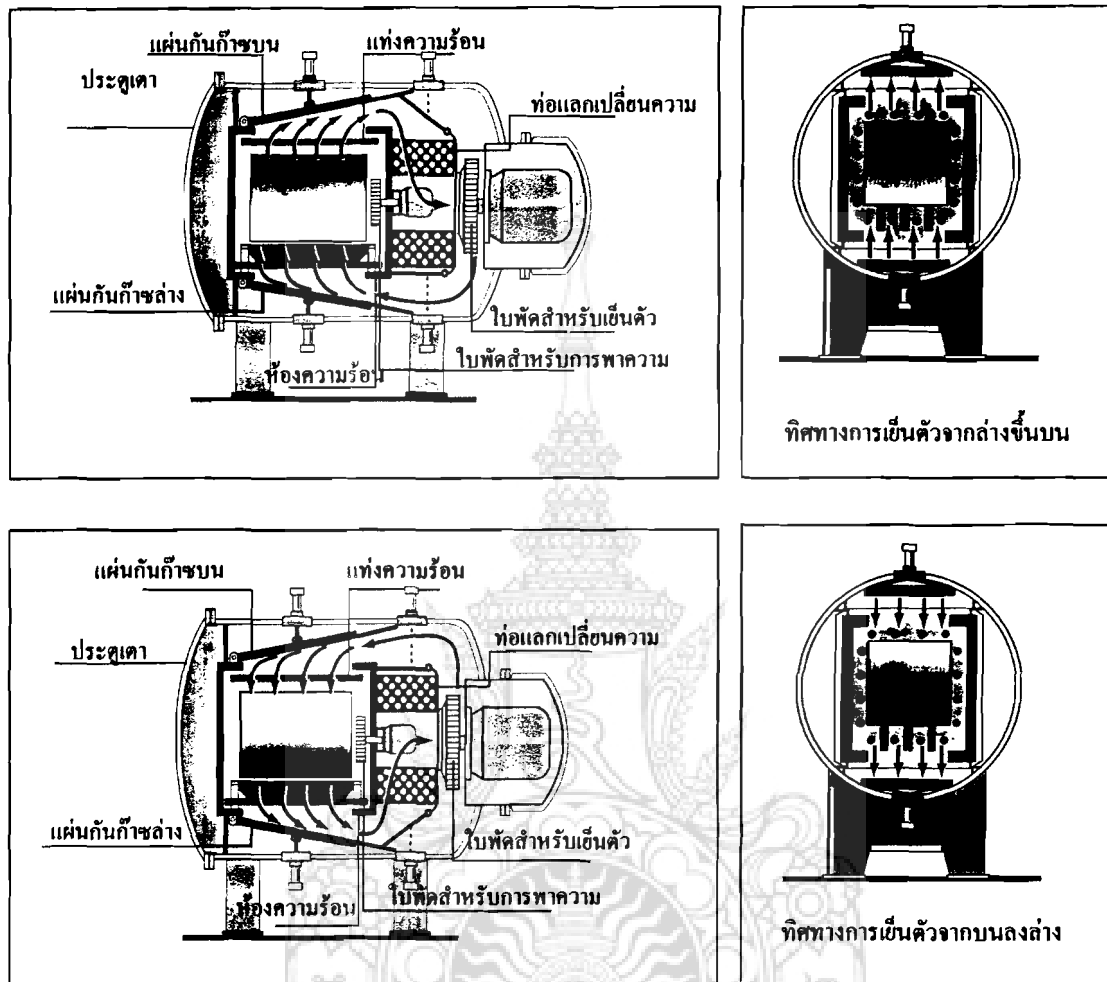
การพัฒนาเตาสัญญากาศให้มีการเย็นตัวด้วยก๊าซไนโตรเจนความดันสูงทำให้สามารถให้การเย็นตัวได้สูงขึ้นและสามารถครอบคลุมชนิดของเหล็กกล้าได้มากขึ้นด้วย ความเร็วในการเย็นตัวที่ทำได้ใกล้เคียงกับการชุบในบ่อเกลือ



รูปที่ 2.10 ภาพหน้าตัดของเตาชุบแข็งแบบสุญญากาศ แบบเย็นตัวด้วยก๊าซ ความดันสูงพ่นก๊าซจาก 2 ทิศทาง (Schmetz System – Futur 2 R)

ในรูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของเตาสัญญากาศ เตาสัญญากาศถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นถังกลมทรงกระบอก มีทั้งอยู่ในแนวนอนและแนวตั้ง ทำด้วยเหล็กกล้ามักเป็นผนังมักจะเป็นสองชั้น เพื่อให้มีน้ำหล่อเย็นตลอดระยะเวลาทำงานภายในเตาจะเป็นห้องให้ความร้อน ซึ่งออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอกแล้วแต่ความเหมาะสมของชิ้นงาน ห้องให้ความร้อนนี้จะมีฉนวนกันโดยรอบ และมีแท่งให้ความร้อน (Heater) ซึ่งมักทำด้วยแท่งกราไฟต์นอกจากนั้นยังมีใบพัดกวนเพื่อช่วยให้เกิดระบบการพาความร้อน (Convection) ในช่วงให้ความร้อนในช่วงแรกการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวเร็ว (Quenching) หลังจากที่ได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง แล้วทำได้โดยการฉีดก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนเข้าไปในเตาโดยสามารถปรับความดันก๊าซตั้งแต่ 1 ถึง 10 bar โดยยิ่งความดันก๊าซมาก ยิ่งทำให้ความเร็วในการเย็นตัวมากขึ้น ซึ่งการกำหนดความดันที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดของเหล็กกล้า ความหนาของชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานในเตาและค่าความแข็งที่ต้องการ นอกจากนั้นความเร็วในการเคลื่อนตัวของก๊าซและชนิดของก๊าซก็เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดความเร็วในการเย็นตัว โดยทั่วไปนิยมใช้ก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากมีราคาถูก แต่ก็มีการใช้ ก๊าซอาร์กอน ฮีเลียมและไฮโดรเจน แต่ไม่ค่อยแพร่หลายในงานชุบแข็ง เนื่องจากมีราคาสูงมาก





รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของก๊าซไนโตรเจนในเตาสู่ญากาศ

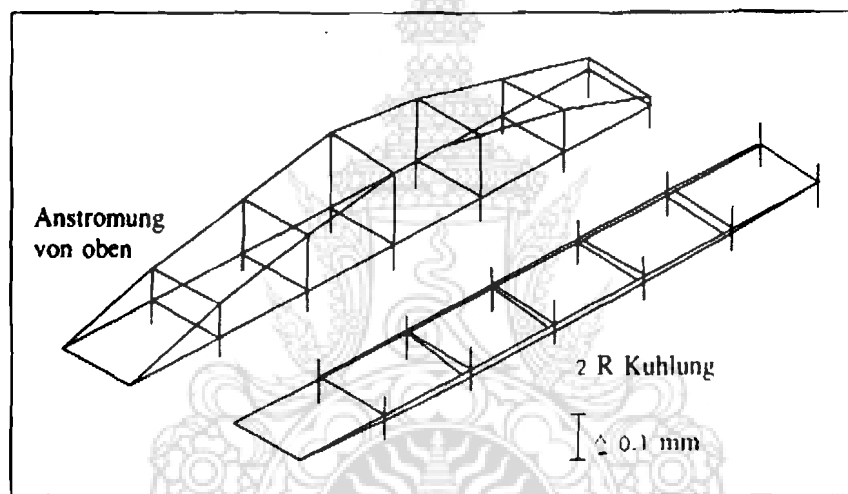
บน : ไนโตรเจนเคลื่อนจากล่างขึ้นบนผ่านชิ้นงานร้อนแล้วจึงผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิ

ล่าง : ไนโตรเจนถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางจากบนลงล่าง

ในรูปที่ 2.11 หลักการการชุบ (Quenching) เกิดขึ้นได้โดยมีไบพัตหมุน ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาดใหญ่บังคับให้ก๊าซไนโตรเจนภายในเตาเคลื่อนที่ผ่านไปบนชิ้นงานร้อน และเมื่อก๊าซไนโตรเจนผ่านชิ้นงานแล้วจะร้อนขึ้น จำเป็นต้องทำให้เย็นลงโดยการวิ่งผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีน้ำหล่อเย็นอยู่ภายในท่อและก๊าซไนโตรเจนซึ่งถูกทำให้เย็นแล้วก็จะถูกพัดลงบนชิ้นงานอีกจนกระทั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าเส้น  $M_s$  เพื่อให้การเสีรูปของชิ้นงานชุบมีน้อย จึงมีการพัฒนาทิศทางของการเป่าก๊าซสู่ชิ้นงาน โดยสลับทิศทางจากด้านบนสู่ด้านล่าง หรือระหว่างด้านซ้ายกับด้านขวา ทำให้สามารถควบคุมการเสีรูปของชิ้นงานให้น้อยลงอย่างมาก

การสลับทิศทางของก๊าซที่วิ่งผ่านชิ้นงานขณะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจะช่วยลดการเสีกรูปในชิ้นงานชุบแข็งได้ความเร็วของก๊าซที่เป่าเข้าไปในชิ้นงานยังสามารถที่จะปรับค่าได้ตั้งแต่ช้าจนให้ความเร็วการเย็นตัวเทียบได้กับการชุบแข็งในบ่อเกลือซึ่งยังสามารถปรับให้เข้ากับขนาดและรูปร่างของชิ้นงานได้อีกด้วยจากค่าความดันของก๊าซ

ในรูปที่ 2.12 ผลการทดลองเปรียบเทียบการเสีกรูปของชิ้นงาน ระหว่างการพ่นก๊าซจากทิศทางเดียวกับการพ่นการสลับกัน 2 ทิศทาง ซึ่งการพ่นก๊าซสลับกัน 2 ทิศทางจะให้การเสีกรูปน้อยกว่าทิศทางเดียวประมาณ 10 เท่า ในการสลับทิศทางในทางปฏิบัติสามารถกำหนดเวลาได้เช่น ทุกๆ 10 วินาที ให้มีการเปลี่ยนทิศทาง เป็นต้น



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบการเสีกรูปของชิ้นงานซึ่งเย็นตัวจากการเป่าก๊าซด้านบนกับการเป่าก๊าซจาก 2 ด้าน สลับกัน

ค่าใช้จ่ายในการอบชุบในเตาสู่ญญากาศแต่ก่อนจัดว่าสูง เนื่องจากว่าต้องใช้เวลายาวนานมาก เพราะการให้ความร้อนชิ้นงานเป็นการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสี แต่ปัจจุบันเตาสู่ญญากาศได้พัฒนาเป็นการให้ความร้อนแบบผสม โดยในช่วงต้นเป็นการพาความร้อน (Convection) และในช่วงอุณหภูมิสูงเป็นการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ทำให้เวลาในการอบชุบลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการอบชุบต่ำลง

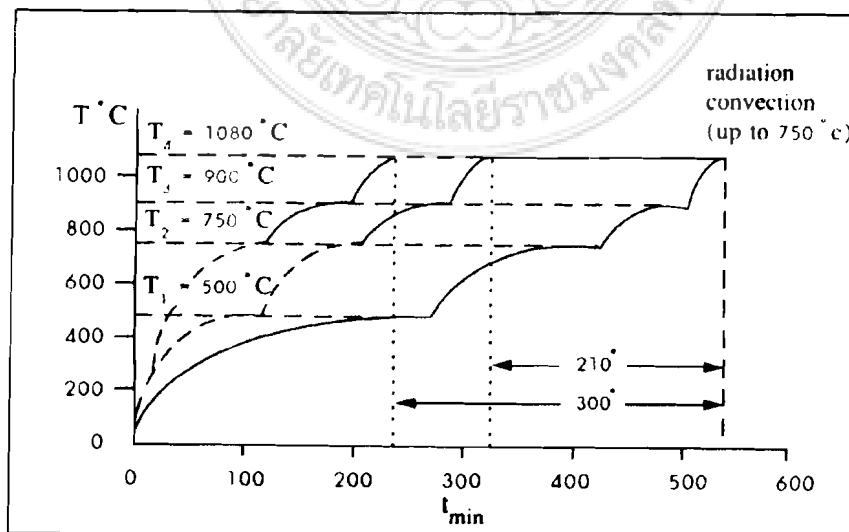
ในทางปฏิบัติทำได้โดยหลังจากใส่ชิ้นงานชุบเข้าไปในเตาและปิดฝาเตาสนิท ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) จะทำการดูดอากาศออกจากเตาจนเป็นสุญญากาศ แต่ก่อนที่จะทำการให้ความร้อนกับชิ้นงานจะมีการเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในเตาประมาณ 0.5 - 1 bar เตาจึงทำการให้ความร้อนโดยมีไบพัดหมุนในห้องให้ความร้อน เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนภายในไหลเวียนนำความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (เตาสู่ญญากาศสมัยแรกๆ) แต่ที่อุณหภูมิสูง (>750 °C) การแผ่รังสีความร้อนสามารถเข้าสู่ชิ้นงานได้เร็ว

กว่าการพาความร้อน ดังนั้นเมื่อเตาให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  ด้วยการพาความร้อน แล้วหลังจากนั้นก๊าซไนโตรเจนจะถูกดูดออกเพื่อให้ภายในเตาเป็นสภาพสุญญากาศอีกครั้งหนึ่งแล้วจึงให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในลักษณะแผ่รังสีความร้อน จนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง

ในรูปที่ 2.13 เป็นการเปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงอุณหภูมิชุบกับการให้ความร้อนแบบผสม โดยการพาความร้อนในช่วงต้นและที่อุณหภูมิสูง ด้วยการแผ่รังสีความร้อน พบว่าสามารถประหยัดเวลาได้ไม่น้อยกว่า 300 นาที ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการชุบแข็งได้อย่างมาก นอกจากนี้พบว่าการพาความร้อนทำให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับแกนกลางของชิ้นงานน้อยกว่าการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างแกนกลางกับผิวชิ้นงานน้อยมีผลดีต่อการเกิดความเค้นต่ำขณะให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

ในเตาชุบแข็งแบบสุญญากาศสมัยใหม่ ซึ่งใช้ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอร์ริงได้ (Martempering) ซึ่งจะทำให้การเสีรูปร่างของชิ้นงานชุบแข็งมีน้อยมาก เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนมีราคาแพง และเป็นการลดการเสี่ยงการเกิดการแตกร้าวจากการชุบแข็งได้มาก

การชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอร์ริงในเตาสุญญากาศทำได้โดยการฝังสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ไว้ที่แกนกลางชิ้นงาน 1 จุดและที่บริเวณได้ผิวชิ้นงานอีก 1 จุด (อาจใช้แท่งเหล็กอื่นที่ไม่ใช่ชิ้นงานจริง แต่ความหนาใกล้เคียงกับชิ้นงาน) ขณะที่ชิ้นงานชุบถูกพ่นด้วยก๊าซไนโตรเจน คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมเตา จะรู้ถึงอุณหภูมิที่ลดลงของผิวและแกนกลางของชิ้นงาน เมื่อผิวได้รับอุณหภูมิจนถึงเหนือเส้น  $M_s$  ประมาณ  $50^{\circ}\text{C}$  ก็จะหยุดการพ่นก๊าซเพื่อรอให้อุณหภูมิแกนกลางเท่ากับผิว หลังจากนั้น ชิ้นงานจึงถูกพ่นด้วยไนโตรเจน เพื่อให้อุณหภูมิลดต่ำกว่าเส้น  $M_s$  และเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบเวลาในการให้ความร้อนระหว่างการให้ความร้อนแบบผสม (การพา + การแผ่รังสีความร้อน) กับการแผ่รังสีความร้อน

### 2.6.2 ข้อดีของการชุบแข็งด้วยเตาสัญญากาศ คือ

- 1) การเปลี่ยนแปลงขนาดและการเสียรูปทรงมีน้อย
- 2) ผิวงานสะอาด (Bright) หลังการชุบแข็ง
- 3) มีความเค้นตกค้างในชิ้นงานน้อย
- 4) ได้ความแข็งและโครงสร้างที่สม่ำเสมอ
- 5) ใช้ก๊าซความดันสูงในการชุบทำให้สามารถชุบแข็งเหล็กกล้าได้หลากหลายชนิด
- 6) ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ทำงานอย่างอัตโนมัติ มีการเก็บข้อมูลในการทำงานอย่างมีระบบ และแม่นยำ

ข้อเสียของเตาชุบแข็งแบบสุญญากาศ คือต้นทุนของเตามีราคาสูงมาก ถ้ามีปริมาณงานไม่มากพอก็ไม่คุ้มกับการลงทุนนอกจากนั้นเหล็กกล้าที่สามารถชุบได้ต้องเป็นเหล็กกล้าที่มีค่าอัตราเย็นตัววิกฤตต่ำซึ่งมักเป็นกลุ่มเหล็กกล้าเจือสูง

เตาชุบแข็งแบบสุญญากาศส่วนใหญ่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยสร้างโปรแกรมการชุบแข็งที่ต้องการไว้ในคอมพิวเตอร์ เตาจะทำงานไปตามโปรแกรมที่กำหนดตั้งแต่ให้ความร้อนเป็นตัว และอบคืนตัวตามจำนวนครั้ง และอุณหภูมิที่ต้องการอย่างอัตโนมัติ พร้อมกับมีการบันทึกการทำงานด้วยเครื่องบันทึกแบบกระดาษ ทำให้สามารถตรวจสอบการทำงานที่ผ่านมาได้ ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบการประกันคุณภาพ

## 2.7 การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา (Cryogenics Treatment)

โครงสร้างภายหลังการชุบแข็งจะปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยเหลือออสเทนไนต์ตกค้างอีกจำนวนหนึ่งซึ่งลักษณะเช่นนี้เหล็กจะเกิดความเครียดได้มากถ้านำไปใช้งานเพราะจะเกิดการแตกหักได้ง่าย ปัญหาที่สำคัญในขั้นตอนนี้ก็คือนำการลดปริมาณของออสเทนไนต์เหลือค้ำให้น้อยที่สุดหรือหมดไป โดยการใช้วิธีการชุบที่ต่ำกว่าศูนย์องศา (Cryogenics treatment) และทำการอบคืนตัวต่อไปเพื่อลดปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้ำ

การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา (Cryogenics Treatment) หรือบางที่เรียกว่า Stabilization จะทำโดยการจุ่มลงในอากาศเหลว (Liquid air) หรือในสารรีฟริจิแรนท์ที่อุณหภูมิต่ำระหว่าง  $-79^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-196^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นกรรมวิธีของ British Oxygen Company โดยการใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นเป็นตัวดึงความร้อนจากสารชุบ การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา ควรที่จะทำการอบคืนตัวที่  $150^{\circ}\text{C}$  ก่อนเพื่อทำการลดความเครียดที่เกิดจากการชุบขั้นแรก

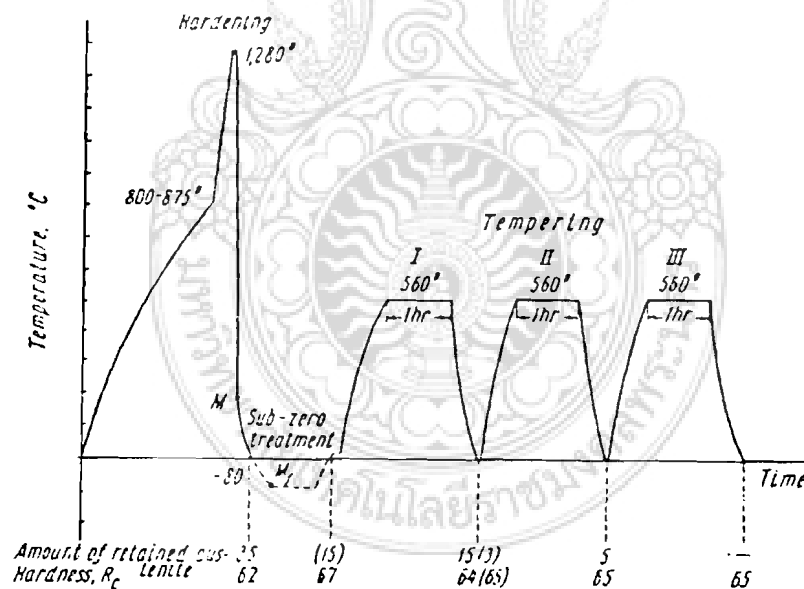
ขั้นตอนของการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา ซึ่งมีความหมายถึงการทำให้เหล็กคงรูปและมีขนาดที่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมาก โดยการทำให้ออสเทนไนต์เหลือค้ำเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ให้มากที่สุด หลังการชุบแข็งเหล็กกล้าจากอุณหภูมิออสเทนไนต์ในสารชุบที่อุณหภูมิต่ำ ยังคงมีออสเทนไนต์เหลือค้ำอยู่จำนวนมากน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของธาตุผสมในเหล็กกล้า
- อุณหภูมิของออสเทนไนท์
- อัตราการเย็นตัว

โดยหลักการทั่วไป การที่ไม่ต้องการให้ที่ออสเทนไนท์เหลือค้างภายหลังจากชุบแข็งโดยเหตุผล 2 ประการที่สำคัญคือ

1) ออสเทนไนท์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำ ถ้าภายหลังจากชุบแข็งมีออสเทนไนท์เหลือค้างปริมาณสูงความแข็งของเหล็กก็จะยิ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

2) ออสเทนไนท์เหลือค้างมีโอกาสดูเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้เมื่อถูกแรงกดหรือดึงในขณะใช้งาน ซึ่งโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของออสเทนไนท์จะมีปริมาณจำเพาะ (Specific Volume) ต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ ดังเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนกับขนาดของชิ้นงาน กล่าวคือมีการขยายตัวซึ่งแน่นอนในสภาพของแข็งและที่อุณหภูมิห้องจะก่อให้เกิดความเครียดขึ้นกับเหล็ก อันเป็นผลทำให้เกิดการแตกร้าว เกิดความเสียหายเพราะอายุการใช้งานของเครื่องมือจะสั้นลง



รูปที่ 2.14 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูง [3]

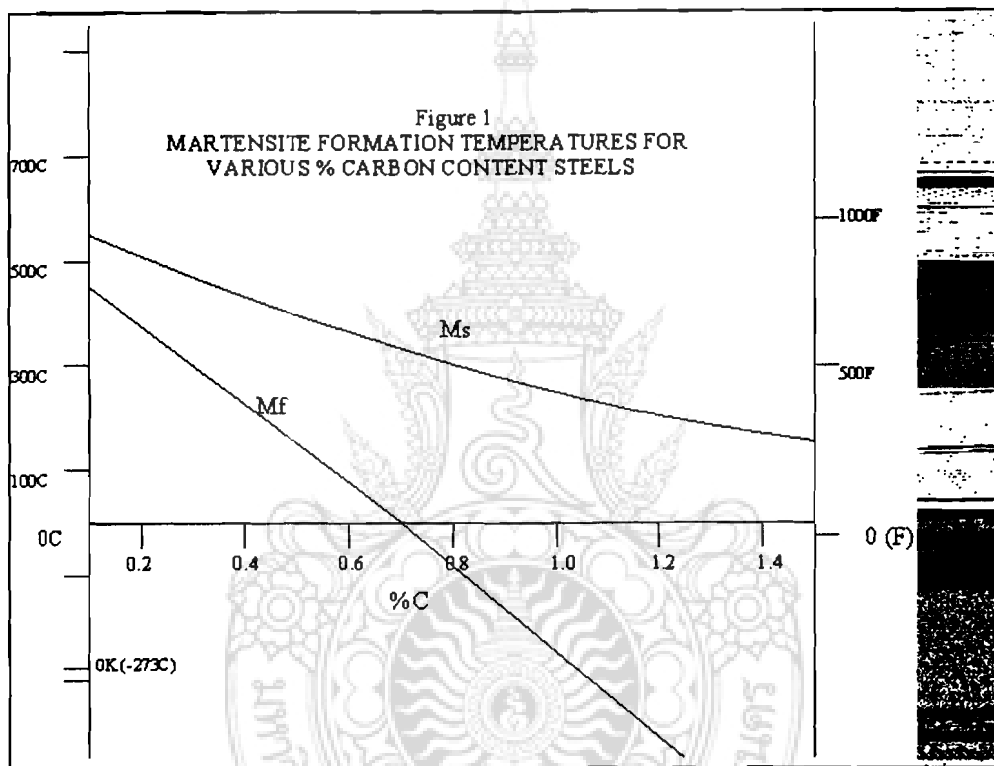
กระบวนการบำบัดเย็น (Cryogenics Treatment) โดยการนำโลหะที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (Heat Treatment) มาแล้วชุบในอุณหภูมิที่ต่ำมากๆ โดยจัดระบบหมุนเวียนและใช้เวลาในช่วงความเย็นนานพอที่จะทำให้เหล็กจัดตัวอย่างสมดุลตลอดมวลของโลหะ การเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ เป็นการควบคุมที่จะนำโลหะกลับมาสู่อุณหภูมิห้องโดยปราศจากการอบร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลอย่างมีเสถียรภาพ ทำให้โลหะเพิ่มความทนทานการเสียดสีดีขึ้น

(Wear Resistance) และผ่อนคลายความเครียดของโลหะ โดยทั่วไป Sub – Zero Treatment จะทำที่อุณหภูมิต่ำลงไปถึง 173 °K ซึ่งอุณหภูมินี้เชื่อกันว่าเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนออสเทนไนท์ที่เหลือค้างอยู่ไปเป็นมาเทนไซต์ในระดับโครงสร้างจุลภาคโดยผ่านการ Quenched ได้มีการพิสูจน์แสดงให้เห็นความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น โดย Cryogenics Treatment มีการแสดงให้เห็นความสำเร็จและมีการวิจัยอย่างกว้างขวางแต่ยังไม่มีมีการสรุปความเข้าใจทางโลหะวิทยาของกรรมวิธีได้อย่างชัดเจน Cryogenics Processing ไม่ได้เข้าไปแทนที่กระบวนการทางความร้อน แต่เป็นการยืดเวลาของการใช้ความร้อน - การ Quenched, - การ Tempering เป็นเรื่องปกติที่อุณหภูมิสุดท้ายหลังจากที่ขึ้นงานผ่านการ Quenched จะเป็นอุณหภูมิห้อง

### 2.7.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะในอุณหภูมิเย็นต้องใช้ความสัมพัทธ์ที่เกี่ยวข้องกันของผังมาตรฐานอุณหภูมิของกระบวนการครายโอจินนิค เมื่อโลหะถูกทำให้ร้อนพลังงานที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลขยายตัว โมเลกุลของเหล็กจะใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างของอะตอมระหว่างที่อะตอมของเหล็กแตกตัว อะตอมของคาร์บอนจะเข้าแทนที่ในพื้นที่ย่างในโมเลกุลของเหล็กที่ใหญ่กว่า สร้างสถานะเหมือนรูของเหล็กคาร์บอนร้อนเหล่านี้บำรุงให้เหล็กดีขึ้นเรียกว่าออสเทนไนต์ โลหะที่มีความแข็งเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์อย่างง่ายโดยการดักจับอะตอมของคาร์บอน การทำให้โลหะแข็งเป็นขั้นตอนแรกในการบำรุงให้ดีขึ้นโดยอุณหภูมิของโลหะเพราะว่าโครงสร้างของออสเทนไนต์โดยปกติแล้วไม่มีเสถียรภาพในอุณหภูมิล้อมรอบ การอบคืนไฟอย่างธรรมดามีผลทำให้โลหะเปราะซึ่งมีประโยชน์น้อยมากในอุตสาหกรรม ถ้าเหล็กบางส่วนคืนไฟและรักษาอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ (ขึ้นอยู่กับคาร์บอนที่มีอยู่จริง) ออสเทนไนท์จะสร้างโครงสร้างใหม่เพื่อเป็นโครงสร้างที่คงที่ซึ่งเรียกว่ามาร์เทนไซต์ หลังจากทีโลหะบรรจุอุณหภูมิที่มาร์เทนไซต์ (Ms) มันถึงเวลาที่จะบอกได้ว่าการลดอุณหภูมิให้เย็นอย่างช้าๆ ส่งเสริมการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ เป็นจุดที่อุณหภูมิแบบครายโอจินนิคมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (มีคาร์บอนมากกว่า 0.83%) โครงสร้างมาเทนไซต์ไม่สามารถจับตัวได้ในอุณหภูมิกที่ในขณะที่ออสเทนไนต์เปลี่ยนมาเป็นมาเทนไซต์ในขณะที่อุณหภูมิล้อมรอบเย็นตัวลง ช่วงอุณหภูมิสำหรับมาร์เทนไซต์กำหนดโดยคาร์บอนของโลหะรูปที่ 2.15 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิของมาเทนไซต์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับความจุของคาร์บอน ช่วงไม่คงที่เป็นเพียงการแสดงจุดมุ่งหมายความคิดของปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมาเทนไซต์ด้วยความเย็นตามที่แสดงในกราฟ การเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์ (M<sub>r</sub>) ลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสประมาณ 0.7 % สิ่งที่จะต้องพิจารณาสำหรับ ผลิตภัณฑ์โลหะส่วนใหญ่คือความร้อนซึ่งมากกว่า มันง่ายมากที่จะเห็นคาร์บอนโลหะเพิ่มสูงขึ้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์เป็นออสเทนไนท์ถ้าปราศจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิเส้น M<sub>r</sub> จะพิเศษเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา แต่จะชี้จุดที่สำคัญในการลดอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์เป็นโลหะคาร์บอนสูงปรากฏอย่างชัดเจนว่า

กระบวนการ ทรายโอจินิกเป็นแนวทางในการเปลี่ยนออสเทนไนท์คงค้าง ไปเป็นมาร์เทนไซต์ในโลหะไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ผลการศึกษาของสถาบัน แจคซิด โรมานีเย แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของทรายโอจินิก ที่คาร์บอน 0.83 % สามารถลดเปอร์เซ็นต์ของออสเทนไนท์คงค้างจาก 42.60 % เหลือ 0.90 % เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิปกติมันคือ การเปลี่ยนของมาร์เทนไซต์ที่สมบูรณ์ซึ่งทำให้กระบวนการทรายโอจินิกบำรุงให้โลหะมีความแข็งแรงสม่ำเสมอในขณะที่ยังคงความเหนียวอย่างเต็มที่ไปได้

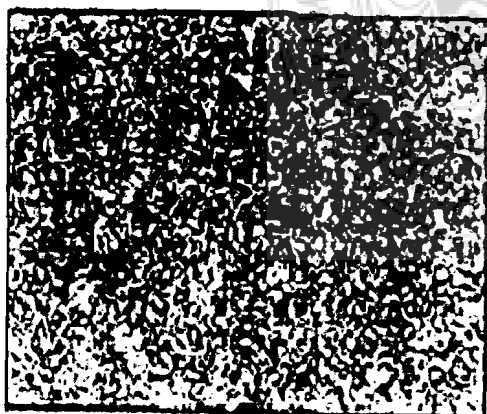


รูปที่ 2.15 อุณหภูมิการบำบัดเย็น[15]

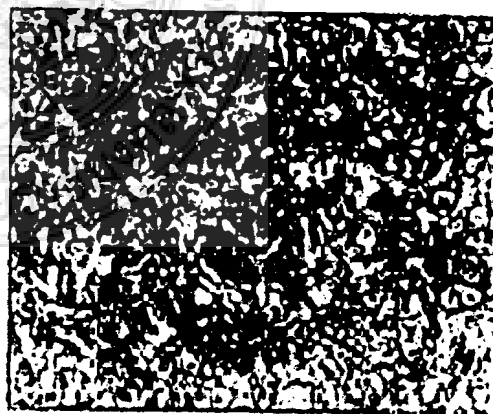
อิเล็กตรอนไมโครกราฟของการบำรุงแบบทรายโอจินิกในโลหะแสดงให้เห็นสิ่งที่ปรากฏซึ่งทำความเข้าใจได้อย่างง่าย ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์ จำนวนคาร์บอนอิสระที่แน่นอนจะพุ่งออกช่องทางที่หนาแน่น อะตอมเหล่านี้จะรวมตัวกันโดยแรงดันระหว่างที่ผลึกของมาร์เทนไซต์โตขึ้น คาร์ไบด์จะค้ำค้ำเป็นก้อนดำเล็กๆ ในบริเวณขอบของมาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์เหล่านี้ทำให้โครงสร้างของมาร์เทนไซต์ ไม่จับตัวกันเป็นแบบเดียวกันและเป็นปัจจัยแสดงถึงความเปราะและความอ่อนของเหล็ก การบำรุงโดยทรายโอจินิกเกิดขึ้นโดยการลดขนาดของคาร์ไบด์ขณะผิวขรุขระถูกแทนที่โดยคาร์บอนอิสระในปริมาณที่เท่ากัน ทรายโอจินิกเสมือนทำให้การพัฒนาของก้อนดำนี้ช้าลง กระจายอะตอมของคาร์บอนให้เรียบและแน่น โครงสร้างโดยรวมมีที่ว่างน้อยลง สมมติฐานอีกข้อหนึ่งคืออุณหภูมิที่ต่ำมากยับยั้งการรวมตัวของคาร์บอนอิสระจัดขวางโครงสร้างของคาร์ไบด์ในการรวมตัวกัน ดังรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ของมาร์เทนไซต์

ก่อนและหลังการผ่านกระบวนการทรายโอจินิค ข้อสังเกตยิ่งคาร์บอนกระจายมากและโครงสร้างใหญ่ชัดเปรียบเทียบกับทรายอย่างต่ำ การเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ ขึ้นอยู่ปัจจัย 2 อย่าง คือปริมาณของคาร์บอนและอุณหภูมิโลหะเริ่มแรกต้องได้รับความร้อนในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อปล่อยอะตอมของคาร์บอนจำนวนที่เหมาะสม อุณหภูมินี้ต้องคงที่และมากพอที่จะทำให้ออสเทนไนต์มีปฏิกิริยาเข้าแทนที่ นี่คือเวลาที่แช่แข็งและซึมอยู่กับมวลของวัสดุที่จะเอาไปบำรุงต่อไปนี้จะต้องทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ เพื่ออุณหภูมิของมาร์เทนไซต์สำหรับการบรรจุคาร์บอนพิเศษเหล่านี้ในโลหะ อีกส่วนหนึ่งคือการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ (ความหนาแน่นของส่วนนี้คืออุณหภูมิเดียวกัน) ภายใต้สภาวะแวดล้อมนั้นส่วนที่จะอยู่ในกระบวนการทรายโอจินิคและถูกทำให้เย็น โดยสัมพันธ์กับ  $M_s$  สำหรับคาร์บอนแทรกและคงอยู่ในอุณหภูมิดังกล่าวจนกระทั่งอุณหภูมิใกล้จุดสมบูรณที่มาแทนมาร์เทนไซต์เปลี่ยนแปลงและชิ้นงานจะเปลี่ยนอุณหภูมิโดยรอบในอัตราที่ทำให้ความต้านทานภายใต้วัตถุน้อยที่สุด

อุณหภูมิสำหรับทรายโอจินิคในอุณหภูมิห้องของเหล็กมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์เหลือค้าง อย่างไรก็ตามผลของโครงสร้างผลึกไม่เสถียรเหมือนมาร์เทนไซต์ทั้งหมดคงที่ในเวลาเดียวกันกับตัวอย่างข้างต้น อุณหภูมิของทรายโอจินิคจะไม่กระทบต่อต้นทุนสำหรับจำนวนผลผลิตเหมือนกับทรายที่มีเครื่องทรายโอจินิคใกล้เคียงกันมากกับเตาหลอมโลหะควรเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะพูดน้อยที่สุด อุณหภูมิที่ไม่ต่อเนื่องหรืออุณหภูมิภายในห้องของเหล็กจะต้องใช้วิธีประยุกต์หลายอย่างเพื่อที่จะรับประโยชน์สูงสุดของวิธีแบบทรายโอจินิค



ก่อนชุบดำกว่าศูนย์องศา



หลังชุบดำกว่าศูนย์องศา



กระบวนการครายโอจินิกมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเกิดขึ้นซึ่ง การเปลี่ยนแปลงนี้คือผลที่ได้ของกรรมวิธีครายโอจินิก (Cryogenics) การเปลี่ยนแปลงมี 2 อย่าง โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นเหตุผลหลักของการปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอที่น่าสนใจ

การเปลี่ยนแปลงที่ 1: Austenite ที่ตกค้างอยู่ (โครงสร้างของ Grain ที่ได้จากกรรมวิธีทาง ความร้อน) ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นโครงสร้างที่แข็งกว่า โครงสร้างของ Grain ทนทานกว่าส่วน มาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างของ Austenite หลังจากที่เริ่มให้ความร้อนจะมีค่าอย่างมาก 50 % หรือ อย่างน้อย 30 % ขึ้นอยู่กับการให้ความร้อนของผู้ปฏิบัติการ และความถูกต้องของเครื่องมือที่ให้ความร้อนนั้น กรรมวิธี ครายโอจินิกจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่เกือบ 100 % ของ Austenite ที่ตก ค้างอยู่จะถูกเปลี่ยนไปเป็น มาร์เทนไซต์ความต้านทานการสึกหรอจะถูกทำให้เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนที่ 2 : อนุภาค Eta ( $\eta$ ) Carbide ที่บริสุทธิ์จะเกิดการตกตะกอนระหว่างการจุ่ม เป็นเวลานาน ในขณะที่ครายโอจินิกอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดการ Form ตัวกันอย่างหนาแน่น มีรูปแบบการเชื่อมตัวและเหนียวมากขึ้นแทรกตัวอยู่บนผิวของ มาร์เทนไซต์ ซึ่งทำให้สภาพ การสึกหรอของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้มีการฉีกขาดน้อยกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ สำหรับ เหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านกระบวนการบัดเย็น จุดเชื่อมต่อบางจุดจะแตกออกและ Form เป็นอนุภาค ที่สึกหรอ ถ้าเหล็กนั้น ไม่ถูก Treat จุดเชื่อมต่อไปจะถูกตัดออกอย่างง่ายดาย

โครงสร้างมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์บริสุทธิ์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจะทำงานรวมกันเพื่อลด การสึกหรอการเพิ่มของอนุภาคคาร์ไบด์บริสุทธิ์นี้เป็นการช่วยสนับสนุน Martensite matrix ทำให้ เกิดการยากในการขูดเอาก้อนเนื้อวัสดุออก เมื่ออนุภาคภายนอกถูกอัดตัวบนพื้นผิว Carbide matrix จะขัดขวางเป็นร่อง และการสึกหรอจะถูกทำให้ลดลง

ทำไมการชุบเย็น “ครายโอจินิก” จึงทำให้โลหะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น การชุบเย็นครายโอจินิก (Cryogenics Treatment) ทำให้ออสเทนไนท์ที่เหลือค้าง (Retained Austenite) เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ให้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือส่วนใหญ่ผสมธาตุต่าง ๆ ในปริมาณสูงซึ่งเมื่อมี การลดอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ภายหลังการชุบแข็ง (Heat-Treatment) เหล็กกล้าจากอุณหภูมิออสเทนไนท์ในสารชุบที่อุณหภูมิลดลงทำให้มีออสเทนไนท์ เหลือค้างอยู่จำนวนหนึ่งอันเป็นผลให้เหล็กมีความแข็งแรงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ออสเทนไนท์เหลือค้าง มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อถูกแรงกดหรือแรงดึงขณะใช้งานซึ่ง คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ออสเทนไนท์จะมีปริมาตรจำเพาะต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ ดังเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อมจะมีผลโดยตรง กับขนาดชิ้นงาน กล่าวคือมีการขยายตัวก่อให้เกิดความเครียดกับเหล็ก อันเป็นผลให้เกิดการแตกร้าว และอายุการใช้งานสั้นลง

#### 2.7.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากครายโอจินิกทรีตเมนต์ (Cryogenics Treatment)

ครายโอจินิกทรีตเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมพานิชยกรรม การกีฬาและผู้บริโภคกระบวนการนี้ทำเพียงครั้งเดียวและเป็นการถาวรประโยชน์ที่ได้รับ อาทิเช่น

1) อายุของชิ้นส่วนเกือบทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น 50 % ถึง 400 % หลังจากผ่านกระบวนการนี้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เฉพาะเจาะจงบางอย่างมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นถึง 60 เท่า การเพิ่มขึ้นอยู่กับโลหะผสม, การนำไปใช้งาน และการผ่านกรรมวิธีทางความเย็นเป็นการบำรุงเพียงครั้งเดียว

2) รูปร่างของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลง มีความมั่นคงทางของมิติ

3) เพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างของโมเลกุล โมเลกุลจัดตัวอย่างมีระเบียบมีผลทำให้มีผิวสัมผัสมากขึ้น ลดแรงเสียดทาน ทนความร้อน

4) เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งหมด ไม่ใช่การเปลี่ยนโครงสร้างเฉพาะผิว

5) เปลี่ยนแปลงออสเทนไนต์ตกค้างให้เป็นมาร์เทนไซด์เกือบทั้งหมด

6) เพิ่มการต้านทานและเพิ่มอายุการใช้งานเครื่องจักร ลดการบำรุงรักษาลดเวลาสูญเสียของเครื่องจักร

7) เพิ่มความเหนียว ลดความเปราะ

8) ความแข็งที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

9) เพิ่มความคมและทนทาน

10) ลดความเค้น (Stress) คลายความเครียด (Strain) ของโลหะ

11) ลดต้นทุนในการใช้เครื่องมือเวลาและการบำรุงรักษา

### 2.7.3 ประโยชน์อื่น ๆ

1) ความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำลงประมาณ 5-7 % ในโลหะผสมหลายชนิด

2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดมีค่าสัดส่วนของสัญญาณรบกวนสูงขึ้น

3) ปรับปรุงลักษณะการสิ้นเสเทือน

4) การกระจายตัวทางความร้อนสม่ำเสมอมากขึ้นและรวดเร็วเป็นผลทำให้การบดงอต่ำ

### 2.7.4 ความต้องการในอนาคต

1) ถ้าหากมีการวิจัยต่อไปเรื่อย ๆ จะทำให้รู้ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคคาร์ไบด์กับคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านการต้านทานการสึกหรอ

2) จะต้องมี การตีพิมพ์เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์ Cryotreatment, การใช้งานรวมถึงการปรับปรุงด้านโลหะวิทยาของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

แหล่งที่มา	วัสดุที่ใช้	วิธีการทดลอง	ผลการทดลอง
Muroran chno- centre, Higashimachi, Muroran ,Hokkaido, 050 Japan, 1994 (ScriptaMetallurgicaet Materialia,Vol.31, No.7,pp.865-868, 1994)	แบบริ่ง JISSUJ 2 (ASTM 52100)	-ให้อัตราความร้อนคงที่ 0.2 °K/S จนถึง 973 °K ในเตาสัญญากาศ จากนั้นให้ ความร้อนจนถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ 1093 °K และ แช่ไว้ 1800 S แล้วทำ coldtreatment ที่ 223°K (-50°C) หรือทำ Cryogening ที่ 93° K (-180° C) จากนั้น อบคืนตัวที่ 473°K (200°C) 3600 S	-ปริมาณออสเทนไนต์ตก ค้างเปรียบเทียบระหว่าง การทำงานsubzero,cold และ Cryogening ได้ผลดังนี้ 6.6%, 4.4% และ 4% ผล การวัดอัตราการสึก หรือ
ปี1970-1980 ,Barron (Metal Heat Treating Digest , Jul/Aug 1997)	ตัวนำต่างๆ เช่น มิด,อาวูธ. เหล็ก กล้าเครื่องมือ และอื่นๆ	- ค่อยๆ ลดอุณหภูมิจนถึง -196°C และ แช่ไว้ 20 ชม. กลับมาที่อุณหภูมิห้อง - การอบคืนตัวที่ 150°C ประมาณ 2 ชม.	- ปรับปรุงความแข็ง - ทนการสึกหรอดีขึ้น - อายุการใช้งานนานขึ้น
DavidN.Collins,National Heat treatment CentreUniversity CollegeDublin Ireland(Advanced Materials&Processes	AISI D me2	- Cryogening ที่ -196°C เป็นเวลา 38120 , 379 และ 1200 นาที ตามลำดับ	- ความแข็งเพิ่มขึ้น - ทนการสึกหรอดีขึ้น
AMERY Corp, Glendale, CA	AISI D2	- ค่อย ๆ ลดอุณหภูมิจนถึง -196°C และแช่ไว้ 40 - 60 ชม. กลับมาที่ อุณหภูมิห้อง - ทำการอบคืนตัว	- เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ งานดีขึ้น

## 2.8 รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

วัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานทั่วไป มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตทั้งระบบ วัสดุเครื่องมือตัดและรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือตัดที่เลือกใช้สำหรับการตัดเฉือนมีความสัมพันธ์กับวัสดุชิ้นงาน กลศาสตร์การตัดเฉือนและเครื่องมือกล วัสดุเครื่องมือตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดเฉือนมีส่วนสำคัญและสอดคล้องกันสองส่วน คือ คุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติทางเคมีในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการสึกหรอเนื่องจากการขูดขีด (Abrasive) และความต้านทานต่อการแตกร้าว (Resistance to Brittle Fracture) ในปัจจุบันมีการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้มีความเปราะน้อยลงและทำให้มีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวัสดุสำหรับการผลิตเครื่องมือตัดอย่างต่อเนื่อง ทั้งที่เป็นเหล็กกล้ารอบสูง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และไททาเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide) ซึ่งเป็นการผลิตเครื่องมือตัดจากวัสดุทั้งชิ้น (Solid Tools) การผลิตเอ็นมิลล์และการนำไปใช้สำหรับการตัดเฉือนมีการศึกษาและวิจัยโดยตลอดและในปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนามากขึ้น

### 2.8.1 แนวทางการกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

เอ็นมิลล์สำหรับงานกัดโดยทั่วไป การกัดเฉือนโลหะชนิดต่าง ๆ การกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของเอ็นมิลล์จะต้องพิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ เช่น วัสดุชิ้นงาน วัสดุเอ็นมิลล์ คุณภาพชิ้นงานที่ทำการผลิต อัตราปริมาณการตัดเฉือน เงื่อนไขการตัดเฉือน การกำหนดขนาดของเอ็นมิลล์ รูปร่างเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เช่น มุมคายเศษ (Rake Angle) มุมเฉียงและมุมหลบ เป็นต้น มุมคายเศษของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูงจะอยู่ในช่วง 8-20 องศา มุมเฉียงอยู่ในช่วง 25-35 องศา มุมหลบแนวรัศมีอยู่ในช่วง 5-20 องศา มุมหลบปลายมีคอยู่ในช่วง 3-7 องศา ทั้งนี้อยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนและเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการผลิตจะมีหลายลักษณะ เช่น เอ็นมิลล์ประเภทที่มีค้ำตรง (Straight Shank) และค้ำมเรียว (Taper Shank) จำนวนคมตัดของเอ็นมิลล์ (Number Tooth of End Mill) สามารถออกแบบและผลิตหลาย ๆ แบบตั้งแต่คมตัดเดี่ยว (Single Point Tool) และหลาย ๆ คมตัด (Multiple Teeth) ได้กำหนดให้เอ็นมิลล์ที่มีมุมเฉียง (Helix Angle) เท่ากับ 30 องศา สามารถคำนวณหาจำนวนคมตัดของเอ็นมิลล์ที่ใช้ตัดเฉือนเหล็กกล้าทั่วไป

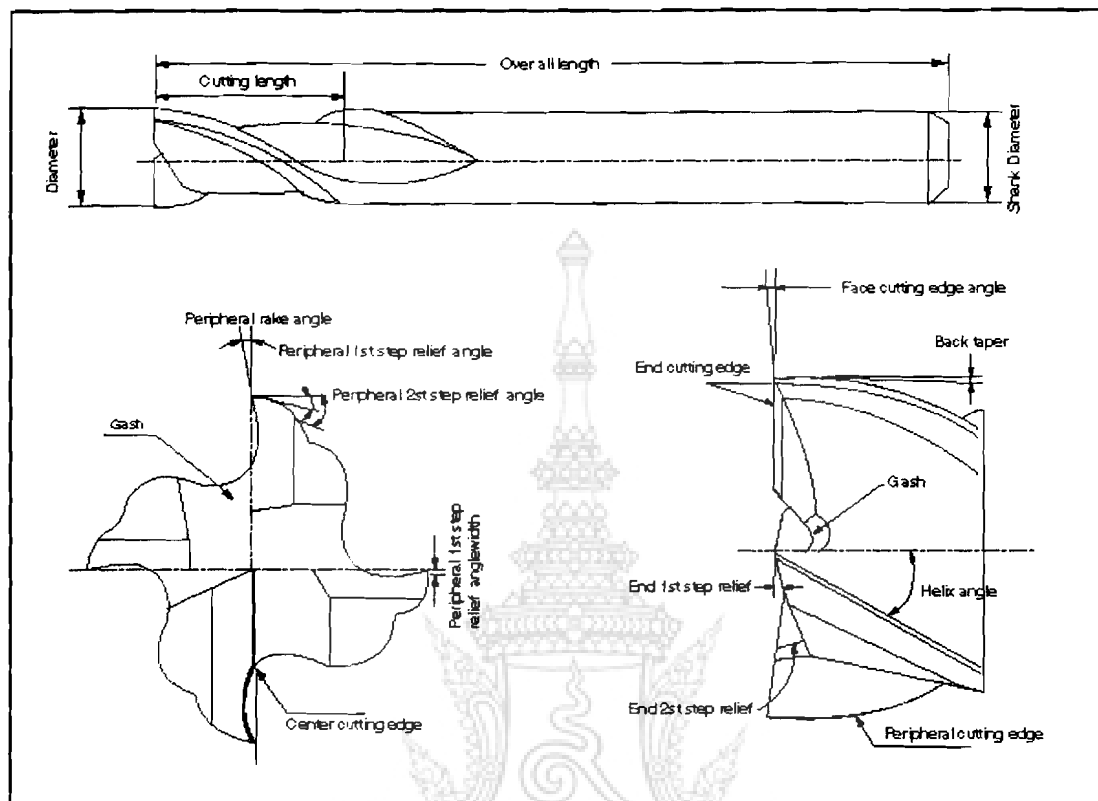
$$Z = \sqrt{D}$$

$$Z = \text{จำนวนคมตัด}$$

$$D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็นมิลล์}$$

การกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง สำหรับการตัดเฉือนวัสดุแต่ละชนิดที่เป็น โลหะกลุ่มเหล็กและไม่ใช่เหล็กมีรายละเอียดในส่วนต่างๆ บริเวณคมตัด ตามรูปร่างเรขาคณิตดังแสดงในรูปที่ 2.17 พร้อมรายละเอียดในตารางที่ 2.6 ส่วนที่สำคัญนอกเหนือจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางความยาวรวมของเอ็นมิลล์และความยาวช่วงคมตัดแล้วขนาดต่าง ๆ บริเวณคมตัดมีผลต่อประสิทธิภาพการตัดเฉือน ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่

- มุมคายเศษในแนวรัศมี (Radial Rake Angle)
- มุมคายเศษในแนวแกน (Axial Rake Angle)
- มุมหลบเศษในแนวรัศมี (Radial Relief Angle)
- มุมหลบเศษในแนวแกน (Axial Relief Angle)
- มุมเฉียงของคมตัดด้านปลายมีด (End Cutting Edge Concavity Angle)
- มุมหลบหลักในแนวรัศมี (Primary Relief Angle)
- มุมหลบรองในแนวรัศมี หรือมุมหลบ (Secondary Relief Angle)



รูปที่ 2.17 การกำหนดส่วนต่างๆ บริเวณคมตัดเอ็นมิลล์ [4]

รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.6-102 มม. (1/16-4 นิ้ว) ขนาดที่ต่างไปจากที่กำหนด มีการนำมาใช้เหมือนกันแต่เป็นกรณีพิเศษโดยขึ้นอยู่กับอุตสาหกรรมการผลิตและลักษณะการตัดเฉือนแต่ละแบบ เอ็นมิลล์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 50 มิลลิเมตร โดยปกติจะผลิตจากเหล็กเครื่องทั้งชิ้น (Solid Tool Steels) แต่ถ้าเอ็นมิลล์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร จะผลิตเป็นแผ่นคมมีดชิ้นเล็กๆ (Insert) เพื่อประกอบเข้ากับค้ำมิด (Holder) สามารถทำได้ทั้งเหล็กกล้ารอบสูงและคาร์ไบด์เอ็นมิลล์ โดยปกติจะกำหนดมุมคายเศษจาก 0 องศาขึ้นไปเป็นมุมบวก (Positive) และมุมคายเศษในแนวแกนจะกำหนดเป็นมุมบวกเช่นกัน ในที่นี้มุมคายเศษในแนวแกนจะมีค่าเท่ากับมุมเฉียงหรือมุมเกลียว การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมหลบ, มุมฟรีและมุมคายเศษ การกำหนดรายละเอียดในส่วนต่างๆ ของเอ็นมิลล์นั้นขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานในแต่ละลักษณะการตัดเฉือนตามแต่ละเงื่อนไข เช่น วัสดุชิ้นงานที่ต่างกัน เป็นต้น การกำหนดขอบเขตงานต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปการออกแบบลักษณะของเอ็นมิลล์ต้องกำหนดทิศทาง การไหลของเศษตัดและหาค่าต่ำสุดที่แน่นอนไว้สำหรับการตัดเฉือนด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน การกำหนดร่องฟัน (Flute) ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบเอ็นมิลล์ เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดต่าง ๆ ของเอ็นมิลล์กับการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานแต่ละชนิด [1]

วัสดุชิ้นงาน	ความแข็ง ชิ้นงาน (HB)	มุมเฉียง (องศา)	มุมคาย เศษ (องศา)	มุมหลบ ปลายมีด (องศา)	มุมหลบ แนวแกน (องศา)	มุมหลบ แนวรัศมี (องศา)
เหล็กเหนียว,เหล็ก กล้าปานกลาง	85 ถึง 325	30	10 ถึง 20	3	3 ถึง 7	A
เหล็กกล้าผสม		30		3	3 ถึง 7	A
เหล็กกล้าเครื่องมือ	25 ถึง 56 HRC	30	10 ถึง 20	3	3 ถึง 7	A
เหล็กกล้าไร้สนิม	135 ถึง 425	30		3	3 ถึง 7	A
เหล็กหล่อสีเทา, เหล็กหล่อเหนียว	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
ไททานเนียมผสม	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

## 2.9 กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด

การผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องกัด (Milling Machine) เป็นกระบวนการตัดเฉือนเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะต่าง ๆ กันหลายรูปแบบและหลายลักษณะ โดยการหมุนตัดของเครื่องมือตัดแบบหลายคมตัด (Multiple – Tool Cutter) คมตัดแต่ละคมตัดจะปาดผิวงานออกเมื่อหมุนทำงานในแต่ละรอบการหมุน เนื่องจากว่าชิ้นงานและเอ็นมิลล์สามารถเคลื่อนที่ตัดในทิศทางต่าง ๆ ได้มากกว่าหนึ่งทิศทางสำหรับการตัดเฉือนแต่ละครั้ง ผิวงานที่เกิดจากการตัดเฉือนสามารถกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ตัด โดยการทำงานของเครื่องกัดซึ่งมีเทคโนโลยีและรูปทรงเรขาคณิตที่ต่างกัน เอ็นมิลล์แต่ละแบบที่นำมาใช้ในการตัดเฉือนจะแตกต่างกันตามชนิดวัสดุงานและลักษณะชิ้นงาน ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างงานกัดและงานตัดเฉือนด้วยวิธีการอื่นๆ มีดังนี้

- 1) คมตัดหลายๆ คมหมุนสลักรตัดเฉือนผิวงานตลอดเวลาที่ตัดเฉือน
- 2) เศษตัด (Chip) ที่ตัดด้วยเอ็นมิลล์จะมีขนาดค่อนข้างเล็ก
- 3) ความหนาเศษตัด (Chip Thickness) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากทิศทางการหมุนและการเคลื่อนที่ตัด

ความหนาเศษตัดเปลี่ยนแปลงในขณะที่คมตัดแต่ละคมตัดกำลังตัดเฉือน เพราะว่าขณะที่คมตัดกำลังตัดเฉือนนั้นมีการป้อนชิ้นงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของโต๊ะจับงานและชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าหาเอ็นมิลล์ การวัดความหนาเศษตัดจะวัดในแนวรัศมีของเอ็นมิลล์ (Radius of End Mill) งานกัดส่วนใหญ่สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่มีความแข็งประมาณ 25 HRC อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าที่มีความแข็ง 35-56HRC สามารถกัดเฉือนด้วยวิธีกัดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือตัดและคุณภาพของวัสดุที่ผลิตเป็นเครื่องมือตัดแต่ละชนิดเช่นเหล็กกล้า รอบสูง , คาร์ไบด์ (Carbide) เป็นต้น

2.9.1 หลักการทำงานของเครื่องกัด ที่ใช้งานโดยทั่วไปมี 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.9.1.1 เครื่องกัดในแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

2.9.1.2 เครื่องกัดในแนวนอน (Horizontal Milling Machine)

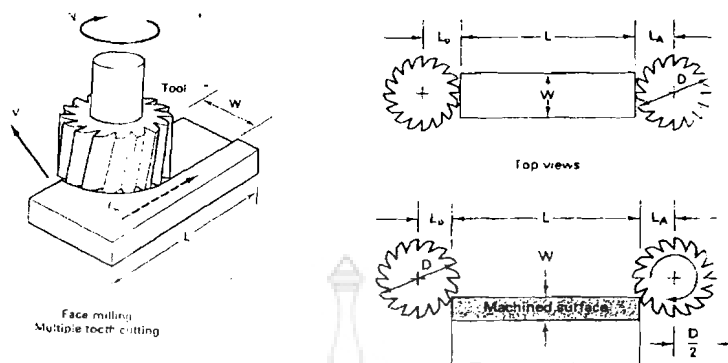
2.9.1.3 เครื่องกัดชนิดพิเศษ (Special Milling Machine)

เป็นเครื่องกัดที่ออกแบบมาสำหรับทำงานอุตสาหกรรมในการผลิตงานจำนวนมากเฉพาะที่คุ้มกับการลงทุนแต่โดยทั่วไปสถานศึกษาจะเป็นเครื่องฝึกหัด เพื่อให้ทราบถึงการทำงานสามารถวิเคราะห์และตัดแปลงการทำงานให้ได้กว้างขวางขึ้นและมีประสิทธิภาพ

การทำงานของมิลด์กัดนอนคือมิลด์ที่หมุนกัดด้วยแกนหมุนของมิลด์ขนานกับผิวงานรูปร่างของมิลด์กัดนอน คมกัดเป็นคมนาอนเมื่อหมุนกัดตามแนวเส้นรอบวงได้เศษกัดยาวเป็นเศษงอตามกว้างเศษกัดหนาไม่เท่ากัน และมักจะกัดผิวได้เป็นรอยลูกคลื่น เพราะคมกัดเดินเข้ากัดเป็นหน้ายาวแรงกระแทกมีมาก คมกัดคมหนึ่งๆ จะทำรอยชุดไว้รอยหนึ่งส่วนมิลด์กัดตั้ง แกนหมุนของมิลด์กัดตั้งจะต้องตั้งฉากกับผิวงานเสมอขณะกัด แม้ว่ากัดตามแนวเส้นรอบวงก็จริง แต่จะเดินกัดเป็นฟันๆ ไปเศษกัดหนาครั้งที่เท่ากันตลอด เนื่องจากไม่มีแรงกระแทก ทำให้ผิวงานเรียบ



รูปที่ 2.18 เครื่องกัด CNC Milling



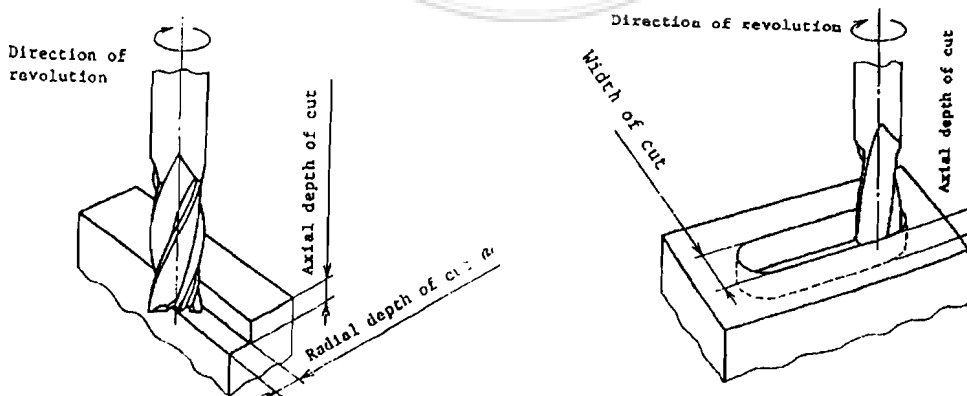
รูปที่ 2.19 การทำงานของเอ็นมิลล์ก้านอนและกััดตั้ง [4]

### 2.9.2 การทำงานของคมมีดกัด

การทำงานของเครื่องกัดเมื่อมีดกัดหมุนนิ่งอยู่กับที่และจะเกิดการตัด ได้ก็ต่อเมื่อป้อนชิ้นงานเข้าหา มีดกัดการป้อนจะใช้การหมุนด้วยล้อมือหมุนหรือการป้อนด้วยกำลังของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ อัตราการป้อนจะต้องเคลื่อนที่ไปอย่างคงที่ตลอดการตัดและเหมาะสมกับอัตราการไหลของโลหะ

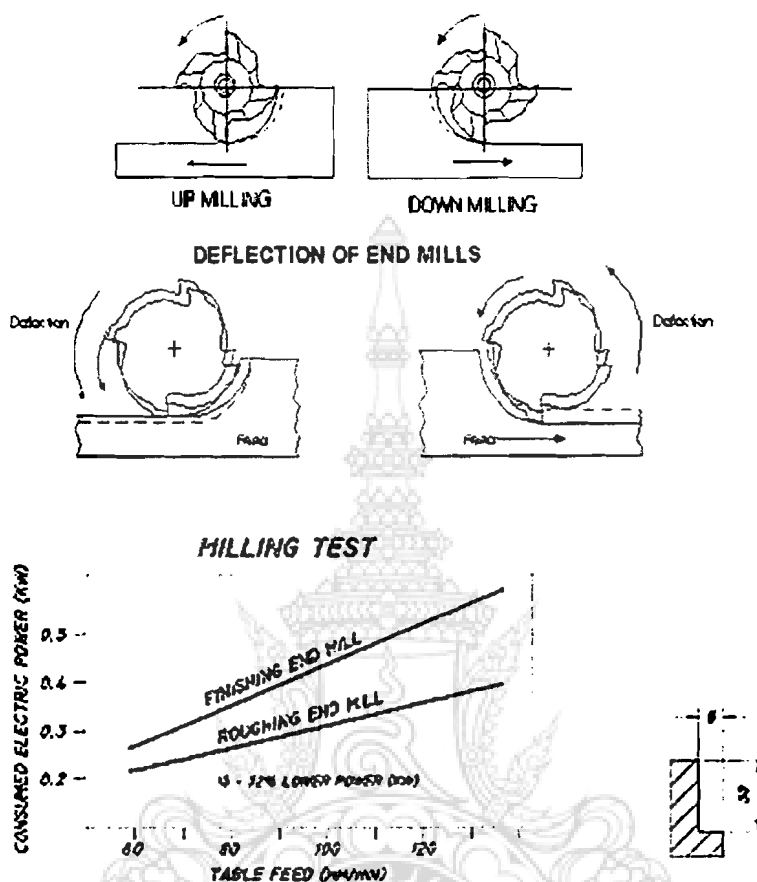
ตามปกติมีดกัด (Milling Cutting) จะมีคมตัดมากกว่าหนึ่งคม ดังนั้นในการตัดเฉือนชิ้นงานคมตัดแต่ละคมจะเริ่มตัดเฉือนจากมากไปหาน้อยหรือจากน้อยไปหามาก ในแต่ละช่วงฟันจะขึ้นอยู่กับทิศทางการป้อนกัดตามหรือป้อนกัดสวน

ในการปาดผิวหน้ากว้าง ๆ โดยใช้มีดกัดตั้งขนาดใหญ่สามารถเปลี่ยนคมกัดได้ขนาดของมีดกัดนี้ จะมีความกว้างเท่าขนาดความกว้างชิ้น และทำการกัดผิวงานกัด ที่ทำการกัดผิวงานจะต้องเอียงเพื่อลดการเสียดสีในส่วนที่คมตัดไม่ได้ทำงาน โดยค่ามุมเอียงจะน้อยมากประมาณ 0.3 -1 องศา ส่วนด้านคมที่ทำการ ตัดเฉือนจะตะผิวงานอยู่ด้านเดียว ในการป้อนตัดเฉือนชิ้นงานแนวศูนย์กลางของงานควรจรรวมศูนย์กลางเดียวกัน ในกรณีทำการกัดงานที่ความกว้างน้อยกว่าขนาดความโตของมีดกัด โดยให้เหลือส่วนเกินของคมตัดยื่นออกมาเท่ากัน



รูปที่ 2.20 ลักษณะการตัดเฉือนชิ้นงานของเอ็นมิลล์ [13]





รูปที่ 2.21 การป้อนกัดตามการป้อนกัดสวน [22]

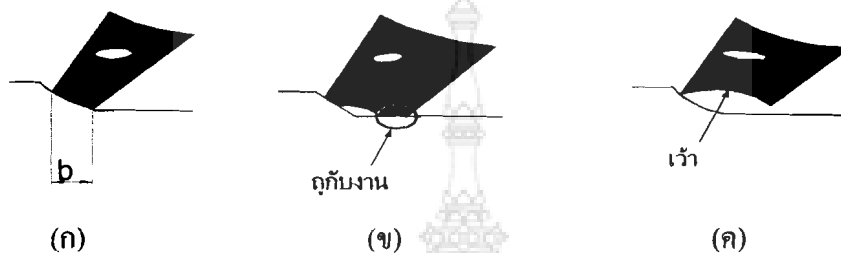
ในลักษณะของการป้อนกัดตามมิดนั้น มิดกัดจะกัดเนื้องานจำนวนมากก่อนมากๆ แล้วค่อยๆ ลดขนาดลงมา ทำให้เศษกัดมีขนาดจากขนาดความหนาไปหาส่วนที่บางกว่า แรงที่กระทำกับคมตัด จะเกิดพร้อม ๆ กัน 2 แรง คือ แรงในแนวเส้นรอบวง และแรงคั่นตัด ของคมตัด ในช่วงระยะของการป้อนที่เท่ากัน และอัตราป้อน อันเดียวกัน

ในลักษณะการป้อนกัดสวนของมิดกัดจะตัดเนื้องานจากน้อยไปหามากจะทำให้เศษมีขนาดจากน้อยไปหามาก ตลอดแรงที่เกิดขึ้นกับคมตัดจะเกิดขึ้น 2 แรง คือ แนวในเส้นรอบวงและแรงที่กระทำกับคมตัด ในลักษณะเช่นนี้แรงจะซ้อนกัน 2 แรง ฉะนั้นลักษณะของแรงเช่นนี้ไม่นิยมป้อนกัดลึกมากเพราะจะทำให้งานเคลื่อนที่ได้ง่ายและคมตัดแตกบิ่น แต่ถ้การป้อนกัดลึกมาก อัตราการป้อนตัดจะน้อยลงเป็นสัดส่วนต่อกัน

การมีวนของเศษกัดในแนวคิ่ง จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของจำนวนฟันมิดกัดและขนาดความโตของเส้นผ่าศูนย์กลางมิดกัด ส่วนความกว้างและความหนาของเศษจะขึ้นอยู่กับระยะของอัตราป้อนในการตัดเฉือนและอัตราการป้อนลึกในการกัด ซึ่งประกอบด้วยมุมคมตัด มุมคาย และมุมหลบ ความหนาของคมตัดจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของมิดกัด เพื่อจะตัดและดึงเศษวัสดุออกมา

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความโตของมีดกัดกับอัตราป้อนต่อฟัน

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



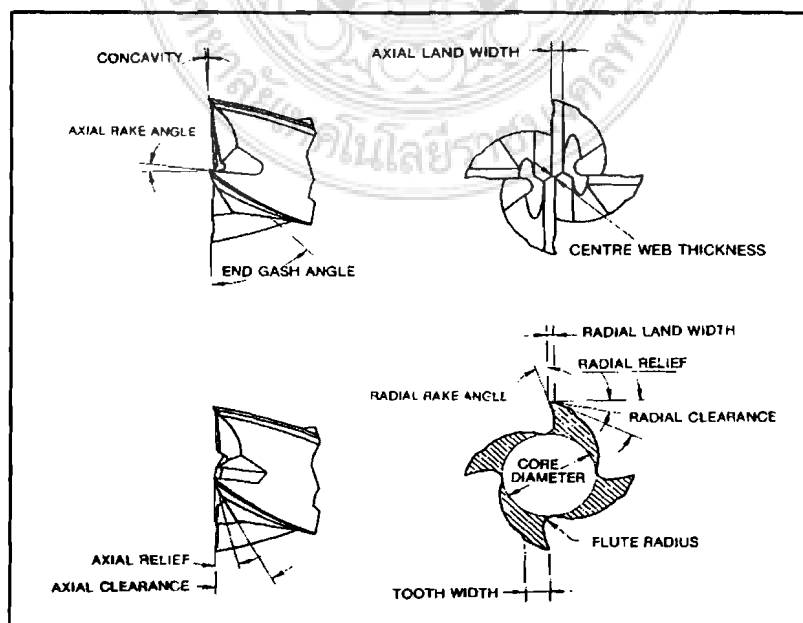
(ก) ความกว้างของคมตัด (b)

(ข) ช่วงนูนหลังชิ้นงาน

(ค) เว้าหลบเมื่อถูกกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.22 ลักษณะคมตัดของมีดกัดแบบต่าง ๆ

ตามรูปที่ 2.22 แสดงถึงความหนาของคมตัดแบบต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการทำงาน ขนาดโต จะทำให้ความแข็งแรงสูง และการตัดเฉือนงานครั้งละมาก ๆ ได้ แต่จะเกิดการเสียดสีกับชิ้นงานขณะทำการตัดเฉือน แก้ปัญหาโดยการเว้าหรือกัดขึ้นรูปหลบคม เช่นรูปที่ 2.22 (ค) เป็นต้น จะทำให้คมตัด สะดวกขึ้น



รูปที่ 2.23 ลักษณะคมตัดแบบต่าง ๆ [4]

ลักษณะของมุมคมตัดของมีดกัดแต่ละฟันจะมีส่วนผสมต่าง ๆ ของคมตัดแบ่งออกเป็นมุมคายเศษ มุมตัดเฉือน มุมหลบ ส่วนมุมหลบกับมุมตัดเฉือนรวมกันจะออกมาเป็นค่ามุมตัดเฉือนเหมือนกับคมตัดทั่วๆ ไปในลักษณะของมีดกัดขึ้นรูปโค้งด้านหลังของฟันที่จะต้องขึ้นรูปหลบเพื่อลดการเสียดสี ซึ่งจะต้องทำการตัดเฉือนขึ้นรูปที่ละฟันจนครบจำนวนฟันของมีดกัดที่มีอยู่ส่วนมุมคายเศษนั้นจะเป็นมุมหลบ (Negative) หรือ มุมบวก (Positive) ก็ได้แล้วแต่การออกแบบให้ใช้งานนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.23

การประกอบมีดกัด (Milling Cutting) เข้ากับเพลาด้าประกอบผิจะทำให้เกิดผลเสียต่อการทำงานเมื่อเปิดเครื่องทำให้มีดกัดเดินหมุนตัดเนื้องานออก มีดกัดจะสะดุดแตกหัก การเริ่มต้นงานกัดไม่ควรใช้วิธีการกัดแบบกัดตาม ควรใช้วิธีการกัดแบบสวนทางขณะเริ่มกัดขึ้นงาน นอกจากนี้การประกอบมีดกัดเข้ากับเพลาด้าจะต้องคำนึงถึงระยะห่างของมีดกัดกับโครงเครื่อง ถ้ามีความจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่างของมีดกัดกับเนื้องาน นอกจากนั้น การประกอบมีดเข้ากับเพลาด้าจะต้องคำนึงถึงระยะห่างมีดกัดกับโครงเครื่อง ถ้ามีความจำเป็นให้ใช้แขนประคอง (Over Arm) เข้าช่วย แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดเฉือนของมีดกัดในลักษณะต่างๆ ตามลักษณะของคมตัดและทิศทางการหมุนของมีดกัดในขณะเดียวกันจะมีแรงต้านกลับที่เกิดจากความแข็งและเหนียวของเนื้อวัสดุงานและแรงต้านกลับนี้จะน้อยกว่าแรงกระทำจึงจะเกิดการตัดเฉือนขึ้นได้ คมตัดของมีดกัดจะมีความแข็งแรงและคมพอที่จะตัดเฉือนเนื้องานออกมาได้ ทิศทางการทำงานของมีดกัดนอนแบบกัดตามที่จะทำให้เกิดแรงต่างๆ ที่กระทำกับมีดกัดและเนื้อวัสดุงานในแนวเส้นรอบวงและเฉพาะจุดที่ปลายคมตัด แรงนี้จะเป็นตัวทำให้อายุของคมมีดกัดสั้นลง ซึ่งผู้ผลิตจะต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงาน รวมถึงสมรรถภาพของเครื่องจักรที่มีกำลังหมุนขับให้มีดกัดทำการตัดเฉือนด้วยเท่าใด ขึ้นอยู่กับการคำนวณ

### 2.9.3 การคำนวณงานกัด

#### 2.9.3.1 การคำนวณความเร็วรอบของมีดกัด

$$N = \frac{V \times 1000}{\pi \cdot d}$$

เมื่อ	N	=	ความเร็วรอบของมีดกัด	รอบ/นาที
	V	=	ความเร็วกัดของมีดกัด	รอบ/นาที
	d	=	ขนาดความโตของมีดกัด	มิลลิเมตร

ค่าคำนวณในการตั้งความเร็วรอบการหมุนของมีดกัดค่าความเร็ว ในการกัดจะหาได้จากตารางมาตรฐานของเครื่องจักรแต่ละเครื่องเมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเร็วรอบ ค่าที่คำนวณได้อาจจะไม่ตรงกับค่าในตาราง อาจจะสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าในตารางของเครื่องกัดที่ให้มา ให้อนุโลมใช้ค่าต่ำกว่าในตารางมาตรฐานของเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่มากับเครื่องกัดเป็นหลักในการทำงานตั้งให้มีดกัดหมุนตัดเฉือนเนื้องาน

### 2.9.3.2 การคำนวณช่วงอัตราป้อนของมีดกัด ( $V_f$ )

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

### 2.9.4 อายุการใช้งานและการสึกหรอของคมตัด

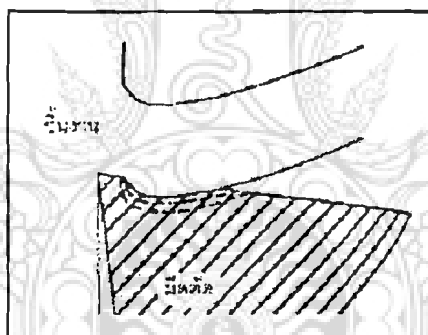
แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนทำให้ผิวคายเศษและผิวหลบของเครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเศษตัดและชิ้นงานในขณะที่ทำการตัด เศษตัดจะเคลื่อนที่ออกจากบริเวณการตัดอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผิวหลบทำให้เกิดการเสียดทานจากการสัมผัสของทั้งสองส่วนมากขึ้นทำให้อุณหภูมิการตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และส่วนผสมทางเคมีของวัสดุส่งผลให้เกิดการสึกหรอตามมา สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเคลื่อนที่และการเสียดทาน การเกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนมีผลต่อค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น เงื่อนไขในการตัดเฉือนส่งผลให้เกิดการสึกหรอ ประกอบด้วยความลึกในการตัด (Depth of Cut) ความเร็วตัด (Cutting Velocity) และอัตราป้อน (Feed Rate) เป็นต้นในระหว่างการตัดเฉือนจำเป็นต้องพิจารณาเพื่อประเมินหรือวิเคราะห์รวมถึงวัสดุที่จะทำการตัดเฉือน จึงมีการผลิตเครื่องมือตัดหลายรูปแบบเพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมฉะนั้นการออกแบบเครื่องมือตัดให้มีรูปทรงทางเรขาคณิตของคมตัดที่ถูกต้องและเหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของวัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือน

#### 2.9.4.1 สาเหตุสำคัญที่ทำให้เครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอ

ความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุเครื่องมือตัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องมือตัดที่แสดงถึงประสิทธิภาพ อายุการใช้งานและการคงสภาพของคมตัดได้ก่อนการสึกหรอ การสึกหรอของเครื่องตัดจะส่งผลทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลงในการทำงานทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตที่จำเป็นต้องใช้วัสดุเครื่องมือตัดในการตัดเฉือนโลหะ โดยส่วนมากแล้วระยะเวลาในการตัดเฉือนชิ้นงานจะส่งผลให้เครื่องมือเริ่มเกิดการเสียดรูป แตกหักหรือเกิดการสึกหรอจนทำให้เครื่องมือตัดชิ้นนั้นๆ ไม่สามารถทำการตัดเฉือนชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนในขณะที่การตัดเฉือน เนื่องจากคมตัดของเครื่องมือเกิดการสึกหรอส่งผลให้ขนาดและผิวงานสำเร็จเปลี่ยนแปลงจากค่าที่กักความคลาดเคลื่อนกำหนด ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการตัดเฉือนจะต้องคอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัดเฉือน เพื่อเปลี่ยนวัสดุเครื่องมือตัดเมื่อหมดอายุการใช้งานก่อนที่จะเกิดการเสียหาย

#### 2.9.4.2 การเสียรูป (Plastic deformation) ของเครื่องมือตัดภายใต้ความร้อน

ในขณะที่ทำการตัดเฉือน ในการตัดเฉือนโลหะและวัสดุชนิดอื่นๆ ด้วยอัตราป้อนและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นที่บริเวณผิวคายเศษของเครื่องมือตัด ความร้อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการเสียดสีของเศษตัดของผิวคายเศษ จากผลกระทบของอัตราป้อนและความเร็วตัดดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่ผิวคายเศษโดยมีลักษณะเป็นแอ่ง (Crater) และจะเกิดขึ้นห่างจากขอบคมตัด (Cutting edge) เพียงเล็กน้อย ตำแหน่งของการเสียดทานเป็นแอ่งจะเกิดขึ้นบริเวณผิวคายเศษในบริเวณจุดที่ได้รับความร้อนสูงสุด ซึ่งสามารถพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวคายเศษจนทำให้เกิดการสึกหรอเป็นแอ่งและบริเวณแอ่งที่สึกหรอจะขยายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการกระจายตัวของความร้อน นอกจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวคายเศษของเครื่องมือตัดที่เกิดจากการสัมผัสของเศษตัดกับผิวคายเศษจนทำให้เกิดความร้อนสูงสุดบริเวณนั้นๆ แล้วจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอเป็นแอ่งขึ้นที่บริเวณผิวคายเศษ ทำให้แนวขอบคมตัดของเครื่องมือเกิดการเสียหายและส่งผลให้ขอบคมตัดมีค่าความแข็งลดลงเนื่องจากปริมาณความร้อนสะสม



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของความร้อนที่ทำให้เกิดการสึกหรอเป็นแอ่ง [9]

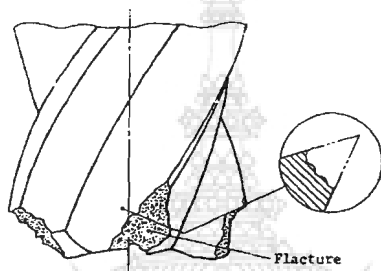
#### 2.9.4.3 การสึกหรอแบบแพร่ซึม (Diffusion wear)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเครื่องมือตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การตัดเฉือนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน เป็นการแสดงถึงลักษณะของการเกิดการแพร่ซึมที่มีขึ้นระหว่างการสัมผัสของชิ้นงาน (เศษตัด) กับผิวคายเศษของเครื่องมือตัด เมื่อทำการตัดเฉือนเป็นระยะเวลานานจะทำให้ลักษณะของการแพร่ซึมนี้เกิดขึ้นเป็นการสึกหรอได้ เนื่องจากว่าบริเวณผิวคายเศษ ที่เกิดการสัมผัสจะมีความร้อนเกิดขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้บริเวณผิวดังกล่าวอ่อนตัวลงอะตอมของวัสดุจึงสามารถทำปฏิกิริยากับผิวของเครื่องมือตัด ส่งผลให้เกิดชั้นผิววัสดุงานหลอมติดกับผิวคายเศษของเครื่องมือตัดทำให้คุณสมบัติทางด้านความแข็งของเครื่องมือตัดเปลี่ยนไป

#### 2.9.4.4 การสึกหรอแบบขัดถูที่ทำให้เกิดจากการแตกหัก (Attrition wear)

การสึกหรอในลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการตัดเฉือนด้วยความเร็วตัด และอุณหภูมิขณะตัดเฉือนต่ำ รวมไปถึงการสึกหรอแบบแพร่ซึม แต่จะเกิดการสึกหรอ

ในลักษณะของการพอกของเศษตัดที่ปลายมีด (Built-up edge) และมีการสัมผัสของเศษตัดแบบไม่ต่อเนื่องซ้ำๆ กันในตำแหน่งเดิม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการขัดถูบริเวณปลายมีดของคมตัดในลักษณะกระแทก ทำให้ปลายมีดเกิดการแตกหัก กระบวนการตัดเฉือนของการสีกรอจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องในขณะการตัดเฉือน มีทั้งการพอกติดที่ปลายและการขัดถูที่ทำให้เกิดการแตกหักที่ขอบคมตัดและปลายมีด ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการขัดสี (Attrition) แสดงลักษณะการสีกรอดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะการสีกรอจากการขัดถูที่ทำให้เกิดการแตกหัก [13]

#### 2.9.4.5 การสีกรอที่เกิดจากการขัด (Abrasive wear)

การสีกรอที่เกิดขึ้นจากการขัดสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง จะเกิดขึ้นจากการตัดเฉือนวัสดุที่มีความแข็ง โดยอนุภาคอะตอมของวัสดุงานมีความแข็งมากกว่าโครงสร้างมาร์เทนไซด์ของวัสดุเครื่องมือตัด จึงทำให้อนุภาคที่แข็งของวัสดุงานขัดถูผิวภายนอกและขอบคมตัดของเครื่องมือ โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กของวัสดุงานจะอยู่ในรูปของคาร์ไบด์ที่มีความแข็ง ซึ่งสามารถพบการสีกรอแบบขัดถูนี้จากวัสดุจำพวกเหล็กหล่อโลหะผสมนิกเกิล ผลของการสีกรอจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคมตัด (Flank wear) และบริเวณผิวภายนอก (Rack wear)

#### 2.9.4.6 การสีกรอภายใต้สภาวะการลื่นไถลของเศษตัด

การสีกรอภายใต้สภาวะการลื่นไถลจะเกิดขึ้นกับเศษตัดพอกที่ปลายมีด จึงทำให้พื้นที่สัมผัสของเศษตัดกับผิวภายนอกเกิดขึ้นในบริเวณถัดจากพื้นที่ ที่มีการพอกของเศษตัดและส่งผลให้การลื่นไถลของพื้นที่สัมผัสนี้จะทำให้เกิดการสีกรอที่ผิวภายนอกและผิวหน้าของเครื่องมือตัด เหล็กกล้ารอบสูงเป็นร่องลึก กระบวนการในการสีกรอจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและซ้ำๆ กัน การป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการสีกรอดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารหล่อเย็นในขณะตัดเฉือนโลหะ โดยการสีกรอของคมตัดสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

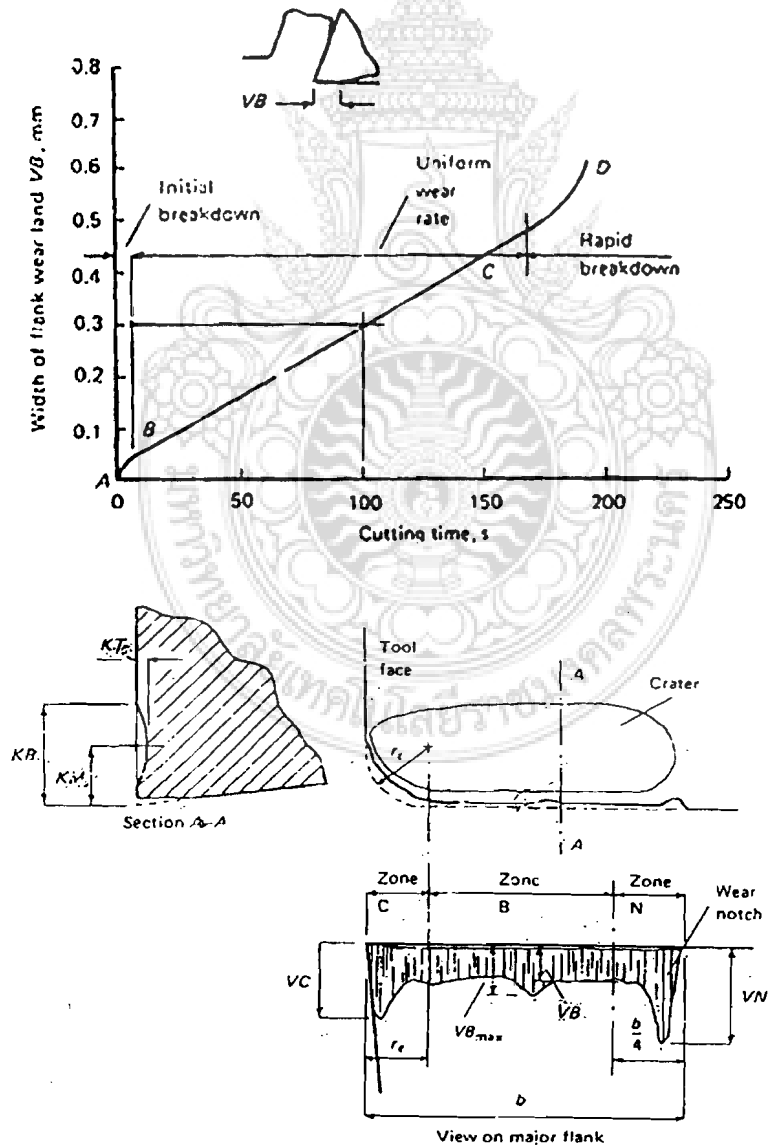
##### 1) การสีกรอบริเวณผิวหอบ (Flank Wear)

สาเหตุเกิดจากผิวหอบของเครื่องมือตัดเกิดการขัดสีกับชิ้นงานขณะตัดเฉือน การสีกรอในกรณีนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด การเลือกใช้ความเร็วตัดและความเร็วป้อนการสีกรอที่ผิวหอบจะเพิ่มขึ้นถ้าเงื่อนไขการตัดเฉือนไม่เหมาะสม

การสึกหรอที่ผิวหลบของเครื่องมือตัดสามารถตรวจสอบได้ด้วยการวัดความกว้างของการสึกหรอ (VB) เมื่อเวลาในการตัดเพิ่มขึ้นหรือระยะทางในการตัดเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะมาก

## 2) การสึกหรอที่ผิวคายเศษ (Crater Wear)

เป็นการสึกหรอเนื่องจากหลาย ๆ สาเหตุประกอบกัน องค์ประกอบที่สำคัญทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวคายเศษ ประกอบด้วย การขูดขีด (Abrasion) การยึดติด (Adhesion) และการแพร่ (Diffusion) การสึกหรอที่ผิวคายเศษเกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวคายเศษตัดที่เคลื่อนออกมาจากบริเวณการตัด ทำให้เกิดอุณหภูมิและการเสียดทานเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการสึกหรอที่ผิวคายเศษมีลักษณะเป็นแอ่งคือ การสึกหรอระหว่างสันคมตัดข้างและสันคมตัดหลัก โดยจะมีการสึกหรอที่เห็นได้ชัดเจน เป็นการสึกหรอของผิวคายเศษ



รูปที่ 2.26 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบ [4]

### 2.9.5 ความสามารถในการตัดเฉือน ( Mach inability )

ความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงอายุการใช้งานของคมตัดที่สามารถตัดเฉือนและการคงรูปของคมตัดได้นาน การเสียดทานของคมตัดจะทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง เครื่องมือตัดจะใช้งานต่อไปไม่ได้เมื่อชิ้นงานที่ผลิต ผลิตออกมาไม่อยู่ในพิสัยความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ เช่น ขนาดและผิวงาน เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับความสามารถในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ประกอบด้วยเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เงื่อนไขในการตัดเฉือน ความเหมาะสมในการตัดเฉือนวัสดุงาน

ตารางที่ 2.7 แนวทางการเลือกใช้เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ [1]

วัสดุชิ้นงาน (Materials)	เงื่อนไข (Condition)	ความลึก (Depth of cut) (มม.)	ความเร็วตัด (Speed) (ม. / นาที)	อัตราป้อน (มม. / ฟัน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)				
				10	12	18	25-30	
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง								
1030	1042	อบอ่อน						
1033	1043	(Annealed)	0.5	37	0.025	0.075	0.102	0.102
1035	1044		1.5	27	.050	0.102	0.130	0.130
1037	1045		Dia./4	24	0.0255	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

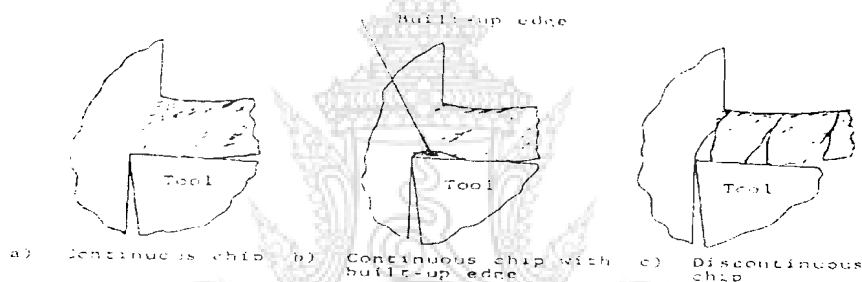
1330	4135	อบปกติ	0.5	26	0.018	0.038	0.075	0.102
1335	4137	(Normalized)	1.5	20	0.025	0.05	0.102	0.130
4027	4427		Dia./4	17	0.018	0.038	0.075	0.05
4028	4626		Dia./2	15	0.0130	.0025	0.05	0.075
4032	5130							
4037	5132							
4130	5135							



### 2.9.7 ลักษณะของเศษกีด (Chip Formation) [4]

เครื่องจักรที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตมีความสำคัญต่อค่าดัชนีทางเศรษฐศาสตร์ เช่น อัตราการผลิตต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต้นทุนต่อหน่วย อัตราผลกำไรต่อหน่วยเวลา ทำให้มีผลการศึกษาต่างๆ ที่ครอบคลุมเกี่ยวกับการตัดเฉือน ซึ่งเป็นองค์ประกอบต่อการตัดสินใจ เช่น ความเร็วตัด ความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น ล้วนมีผลต่อการตัดสินใจเปลี่ยนเครื่องมือตัดของช่างเครื่อง

ภายใต้ความแตกต่างของเงื่อนไขการตัดเฉือนต่างๆ เช่น ความลึก วัสดุชิ้นงาน มุมคาย ความเร็วตัดและเครื่องจักร ฯลฯ สามารถจำแนกชนิดของเศษตัดได้ 3 ประเภท คือเศษตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous) เศษตัดแบบต่อเนื่องซึ่งเกิดการหลอมละลาย (Build-up-edge) และเศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous)



รูปที่ 2.27 ลักษณะของเศษกีด

เศษตัดแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.30 (a) พบได้จากการตัดปาดวัสดุเหนียวที่สัมพันธ์กับความเสียดทานต่ำ เช่น อลูมิเนียมและทองแดง จะทำให้ผิวสำเร็จมีคุณภาพดีกว่าเศษตัดแบบไม่ต่อเนื่องและทำให้เครื่องมือมีอายุการใช้งาน

เศษตัดแบบต่อเนื่องเกิดการหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (b) เป็นเศษตัดจากการตัดปาดวัสดุเหนียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงมาก ซึ่งลักษณะนี้ขณะทำการตัดจะมีการก่อตัวของโลหะขึ้นที่ด้านหน้าของขอบตัด และสำหรับวัสดุบางชนิดอาจมีการเชื่อมขึ้นที่บนจุดตัดของเครื่องมือได้ โดยบริเวณที่มีลักษณะดังกล่าวเรียกว่าขอบก่อนูน (Build-up-edge) หรือ BUE เมื่อการตัดดำเนินต่อไปแนวทางการไหลของเศษตัดจะมีทิศทางไปตามขอบก่อนูนและหน้าของเครื่องมือตัด ส่วนขอบก่อนูนจะมีการแยกตัวออกเป็นระยะ จากนั้นจะหนีออกไปพร้อมกับเศษตัดหรือฝังตัวบนผิวหน้าของมีดกัด ซึ่งเนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ความเรียบของผิวหน้าไม่สม่ำเสมอ เช่น เศษตัดแบบต่อเนื่อง BUE จะก่อตัวขึ้นอย่างสม่ำเสมอระหว่างการตัดและจะมีผลให้มุมคายเปลี่ยนแปลงไปบ้างอย่างไรก็ตามขนาดของ BUE จะลดลงโดยการเพิ่มอัตราเร็วตัด, ลดความหนาของเศษตัดหรือเพิ่มมุมคาย ซึ่งเมื่อขนาดของ BUE ลดลงทำให้ผิวสำเร็จมีคุณภาพดีขึ้น เนื่องการเพิ่มหรือลดตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ยังไม่สามารถขจัด BUE ได้หมดสิ้นในวัสดุเหนียวบางประเภท

เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (c) พบได้จากการตัดปาดวัสดุเปราะเช่น เหล็กหล่อและทองเหลือง โดยในการปฏิบัติจะได้คมตัดเรียบในขณะที่เศษตัดไม่เป็นระเบียบผิวสำเร็จที่ได้ปานกลางและอายุการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างยาวนาน ซึ่งปกติแล้วความเสียหายของมีดจะเป็นผลจากการขัดสีบนผิวหน้าสัมผัสของเครื่องมือ อย่างไรก็ตามเศษตัดนี้อาจพบได้ในวัสดุเหนียวที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงซึ่งจะแสดงถึงสภาพการตัดที่ไม่เหมาะสม

#### 2.9.8 การวิเคราะห์การเฉือน ( Shear Analysis of Metal Cutting )

ลักษณะรูปร่างของการตัดเฉือนในระนาบมุมฉาก (orthogonal tool) ซึ่งจะขอบตัดตั้งฉากกับทิศทางการตัด จะทำให้ภาคตัดของเศษตัดไม่ได้อยู่ในรูปของสี่เหลี่ยมผืนผ้าเนื่องจากว่าเศษตัดจะถูกบังคับทิศทางการไหลด้วยผิวคายเศษ จึงทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่นเดียวกับรูปร่างของเศษตัดที่เคลื่อนที่ออกไปทางด้านข้าง ซึ่งความกว้างสูงสุดของเศษตัดที่ได้จะมีค่าเท่ากับระยะป้อนลึกโดยปกติเศษที่ได้จากการตัดจะมีลักษณะมันเรียบ และไหลตัวออกทางด้านข้าง จึงพบว่าผิวด้านบนของเศษมีความขรุขระเสมอ

รูปที่ 2.28 แบบจำลองของเครื่องมือตัดแบบระนาบมุมฉาก

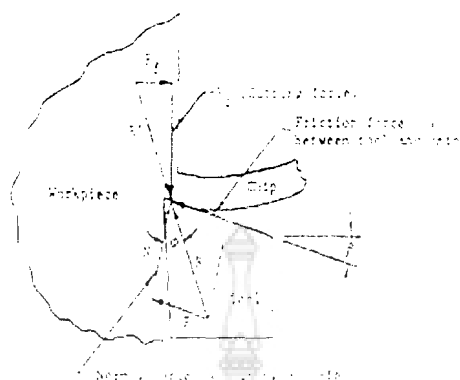
การเปลี่ยนรูปของเศษจะทำให้เกิดการอัดตัวของผิวเครื่องมือกับตัวเศษ ซึ่งเป็นบ่อเกิดของแรงเสียดทาน ดังนั้นงานที่ต้องใช้ในการตัดโลหะจะต้องสามารถเอาชนะทั้งแรงเฉือนและแรงเสียดทาน ดังรูปที่ 2.29 ในแบบจำลองของการตัดในรูปแบบนี้จะกำหนดให้เครื่องมือถูกยึดนิ่งในขณะที่ชิ้นงานมีการหมุนหรือเคลื่อนที่ไม่ว่าในทิศทางใด โดยสถานะของความเค้นก่อนและหลังระนาบเฉือนจะเป็นการไหลแบบพลาสติกที่ซับซ้อนของโลหะเสมอ ระนาบเฉือนถูกกำหนดโดยมุมคาย (rake angle) ของเครื่องมือและ โดยแรงเสียดทานระหว่างเศษผิวหน้าของเครื่องมือ

$N$  = แรงที่กระทำบนเศษในทิศทางตั้งฉากกับผิวเครื่องมือ

$F$  = ความต้านทานจากแรงเสียดทานจากการที่เครื่องมือทำให้เกิดแรง  $N$  กับเศษ โดยจะกระทำที่ตัวเศษขณะที่มันเคลื่อนไปตามผิวหน้าของเครื่องมือ

$F_f$  = แรงในแนวตั้งหรือแนวสัมผัสที่ยึดเครื่องมือตัดไว้กับชิ้นงาน

$F_c$  = แรงในแนวนอนหรือแรงของการตัด

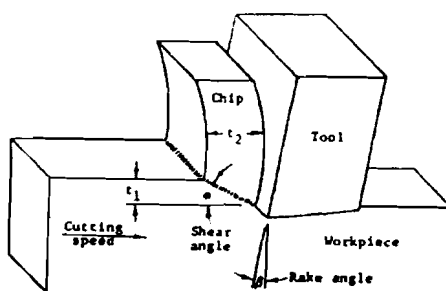


รูปที่ 2.29 แรงที่กระทำบนเศษตัด

แรงเฉือนของมุมระนาบเฉือนเป็นผลมาจากแรงเสียดทานของเศษที่มีต่อผิวหน้าของเครื่องมือ โดยแรงเสียดทานนี้จะแปรไปตามความเรียบและความแหลมคมของเครื่องมือ การใช้สารหล่อเย็นวัสดุใช้ทำเครื่องมือและชิ้นงานอัตราเร็วของการตัดรวมทั้งรูปร่างของเครื่องมือแรงเสียดทานจะมีค่าสูงที่เกิดขึ้นกับการตัดเศษตัดขนาดใหญ่และมีค่ามุมเฉือนต่ำ ในขณะที่จะมีค่าต่ำเมื่อขนาดของเศษและมุมตัดแปรกลับทางในข้างต้น โดยประสิทธิภาพการตัดเศษจะ แปรผกผันกับแรงเสียดทาน

โดยทั่วไปแล้ว ค่าเฉลี่ยความหนาของเศษตัดเป็นตัวแปรที่สำคัญ เศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือนส่วนใหญ่แล้วสังเกตว่ามีความบาง เนื่องจากอัตราป้อนในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงกำหนดความหนาของเศษตัดเศษตัด ( $t_2$ ) มีค่าเท่ากับอัตราป้อน เพราะฉะนั้นให้ค่าจำกัดความของอัตราส่วนของเศษตัดก่อนตัดและหลังตัดว่า  $ra = t_2 / t_1$  โดยที่  $ra < 1$  ความหนาของเศษตัดไม่ถูกกำหนดโดยเครื่องมือตัดหรือความเหนียวของโลหะ แต่จะกำหนดได้ด้วยอัตราป้อนและระยะป้อนลึก

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาอยู่เสมอ นั่นคือ อัตราส่วนของเศษตัด ( $ra$ ) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 นอกจากนี้ ความหนาของเศษตัดยังสัมพันธ์กับมุมคายเศษ (Rake angle) และมุมเฉือน (Shear plan angle) ระบายเฉือนจะเกิดขึ้น โดยทำมุมระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและระนาบเฉือนจากขอบของเครื่องมือตัดเมื่อเศษได้ไหลผ่านผิวคายเศษ



รูปที่ 2.30 ลักษณะการตัดเฉือน

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

เมื่อ  $\alpha$  = มุมเอียง

$f$  = อัตราป้อนต่อคมตัด                      มิลลิเมตร/ฟัน

$t$  = ความหนาเศษคัตเฉลิย                      มิลลิเมตร

$\beta$  = มุมคายของมีดกัด (องศา)

## 2.10 หลักการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี การตรวจสอบโครงสร้างและการทดสอบความแข็ง

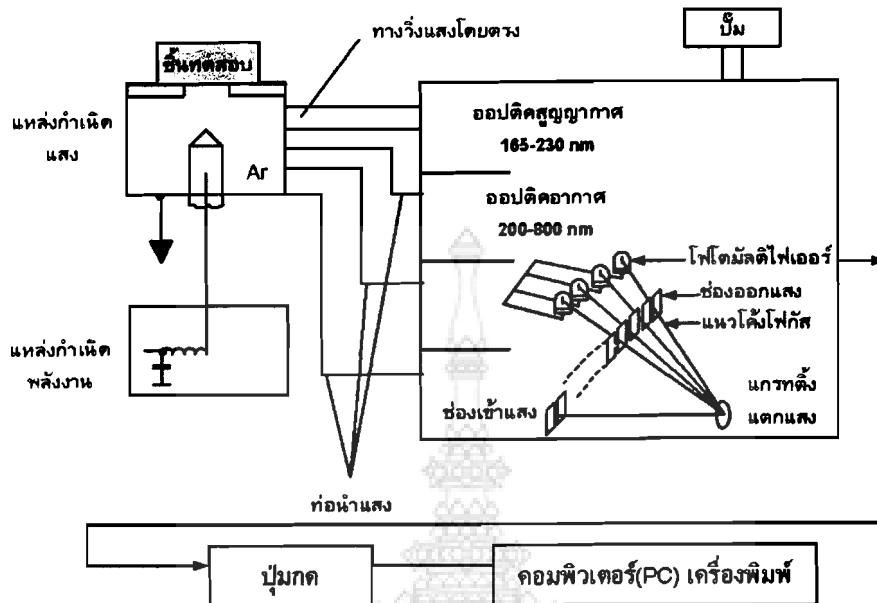
### 2.10.1 การวิเคราะห์เพื่อหาส่วนผสมทางเคมี

โลหะที่ใช้งานทางเทคนิคส่วนใหญ่ ไม่ใช่โลหะบริสุทธิ์มีการผสมสารเจือเพื่อเพิ่ม คุณสมบัติด้านต่างๆ ให้กับโลหะเช่น คุณสมบัติทางกล การทนทานต่อการกัดกร่อน การทนทานที่อุณหภูมิสูง หรือต่ำ เป็นต้น การทดสอบเพื่อหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะ สามารถนำไปใช้ในด้าน การประกันคุณภาพการวิเคราะห์การเสียหายของวัสดุและวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ซึ่งเป็นวิธีการหาชนิดของวัสดุของชิ้นส่วน โลหะ ที่ต้องการผลิตให้เหมือนกับชิ้นส่วนดั้งเดิม (Original Part) การทดสอบเพื่อหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังต่อไปนี้ เช่น อิมิซันสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบในการดำเนินการทดลอง

#### 2.10.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิมิซันสเปคโตรมิเตอร์

วิธีการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่องอิมิซันสเปคโตรมิเตอร์ มีขั้นตอน คือ ชิ้นส่วนโลหะที่ต้องการจะวิเคราะห์ส่วนผสม จะถูกสปาร์กที่ผิวชิ้นทดสอบจนเกิดเป็นเปลวอาร์ค สารเจือที่ผสมอยู่ในชิ้นทดสอบโลหะจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นเป็นกลุ่มหรือเป็นสเปคตรัมของคลื่นแสง โดยสารเจือแต่ละชนิดจะมีความยาวคลื่นที่เป็นเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ และเนื่องจากมีธาตุอยู่หลายชนิดในโลหะชิ้นทดสอบเครื่องอิมิซันสเปคโตรมิเตอร์จะทำหน้าที่แยกคลื่นแสงที่รวมอยู่เป็นสเปคตรัมนี้ออกให้เป็นเฉพาะสำหรับธาตุชนิดใดชนิดหนึ่ง

ขณะเดียวกันความเข้มของแสงที่เกิดขึ้นสามารถบอกถึงปริมาณของธาตุนั้นๆ ได้โดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่รู้ค่า ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบ และปัจจุบันคอมพิวเตอร์ ได้ถูกพัฒนาให้มีหน่วยความจำที่มากและทำงานด้วยความรวดเร็วจึงทำให้การวิเคราะห์วิธีนี้มีความรวดเร็วและแม่นยำเพียงพอใน ทางเทคนิคการวิเคราะห์แต่ละครั้งใช้เวลาเพียงประมาณ 1 นาที ในขณะที่สามารถบอกปริมาณสารเจือที่ผสมอยู่ในโลหะระหว่าง 10–20 ธาตุในคราวเดียวกันสามารถบอกลักษณะของธาตุโดยเฉพาะในเหล็กกล้าสามารถวิเคราะห์ธาตุที่ผสม ในเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ได้ครบแทบทุกธาตุโดยทั่วไปเครื่องอิมิซันสเปคโตรมิเตอร์มีขนาดค่อนข้างใหญ่และต้องประจำอยู่กับที่แต่ปัจจุบันมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง และสามารถเคลื่อนย้ายได้



รูปที่ 2.31 หลักการทำงานของเครื่องอิมพัลส์สเปคโตรมิเตอร์

### 2.10.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของวัสดุ คือการวัดค่าความต้านทานของวัสดุ ต่อการแปรรูปอย่างถาวร ค่าความแข็งเป็นตัวบ่งชี้ว่าชิ้นส่วนที่เสียหายผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนตรงตามทฤษฎีไว้ในข้อกำหนดของวัสดุหรือไม่ การเปรียบเทียบความแข็งชิ้นงานที่เสียหายกับไม่เสียหายสามารถสะท้อนกับลักษณะการใช้งาน เช่น มีความแข็งจากการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) การอบอ่อน (Softening) ทดสอบ โดยการ ใช้หั่วกด ที่เป็นมาตรฐานทดลองบนผิวงาน โดยหั่วกดมักเป็นรูปทรงกลม พีระมิด และกรวย และทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าวัสดุที่จะถูกทดสอบซึ่งหั่วกดส่วนมาก จะนิยมทำด้วยเพชร วิธีการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้กัน มี 4 วิธีคือ การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell), วิคเกอร์ (Vicker), บรินเนล (Brinell) และ Shore – scleroscope แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell) เท่านั้น

การทดสอบความแข็งแบบ (Rockwell) การทดสอบด้วยวิธีนี้เหมาะสมที่จะใช้ทดสอบชิ้นงานที่ต้องการทราบผลโดยเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากสามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าจอปัทม์ของเครื่องวัด การวัดค่าความแข็งนี้จะมีทั้งหมด 9 สเกล เช่น สเกล A, B, C, D, E, F, G, H, K, L แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ สเกล B และ สเกล C ซึ่งค่าที่วัดออกมาได้จะมีหน่วยที่วัดเป็น HRB และ HRC สำหรับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกกว่าควรเลือกใช้หั่วกดชนิดใด และความแข็งสเกลใดในการทดสอบความแข็ง มีหลักเกณฑ์การเลือกตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกด และโลหะที่ต้องการทดสอบ

สเกล	แรงกด	ชนิดของหัวกด	ชนิดของวัสดุที่ใช้
A	60	หัวเพชร	โลหะคาร์ไบด์ชนิดต่าง ๆ และวัสดุที่มีความแข็ง
B	100	1/16 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหล็กกล้าคาร์บอน, ทองเหลืองและวัสดุที่มีความแข็งปานกลาง
C	150	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง และ โลหะที่ผ่านการชุบแข็ง
D	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่ผิว
E	100	1/8 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหล็กหล่อ, อะลูมิเนียมผสมและแมกนีเซียมผสม
F	60	1/16 <sup>2</sup> ลูกบอล	ทองเหลืองและทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน
G	150	1/16 <sup>2</sup> ลูกบอล	เบริลเลียมผสมทองแดง, บรอนซ์
H	60	1/8 <sup>2</sup> ลูกบอล	อะลูมิเนียมแผ่น
K	150	1/8 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหล็กหล่อ, อะลูมิเนียมผสม
L	60	1/4 <sup>2</sup> ลูกบอล	ตะกั่ว, พลาสติก, วัสดุอ่อนอื่น ๆ
M	100	1/4 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
P	100	1/4 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
R	60	1/2 <sup>2</sup> ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L

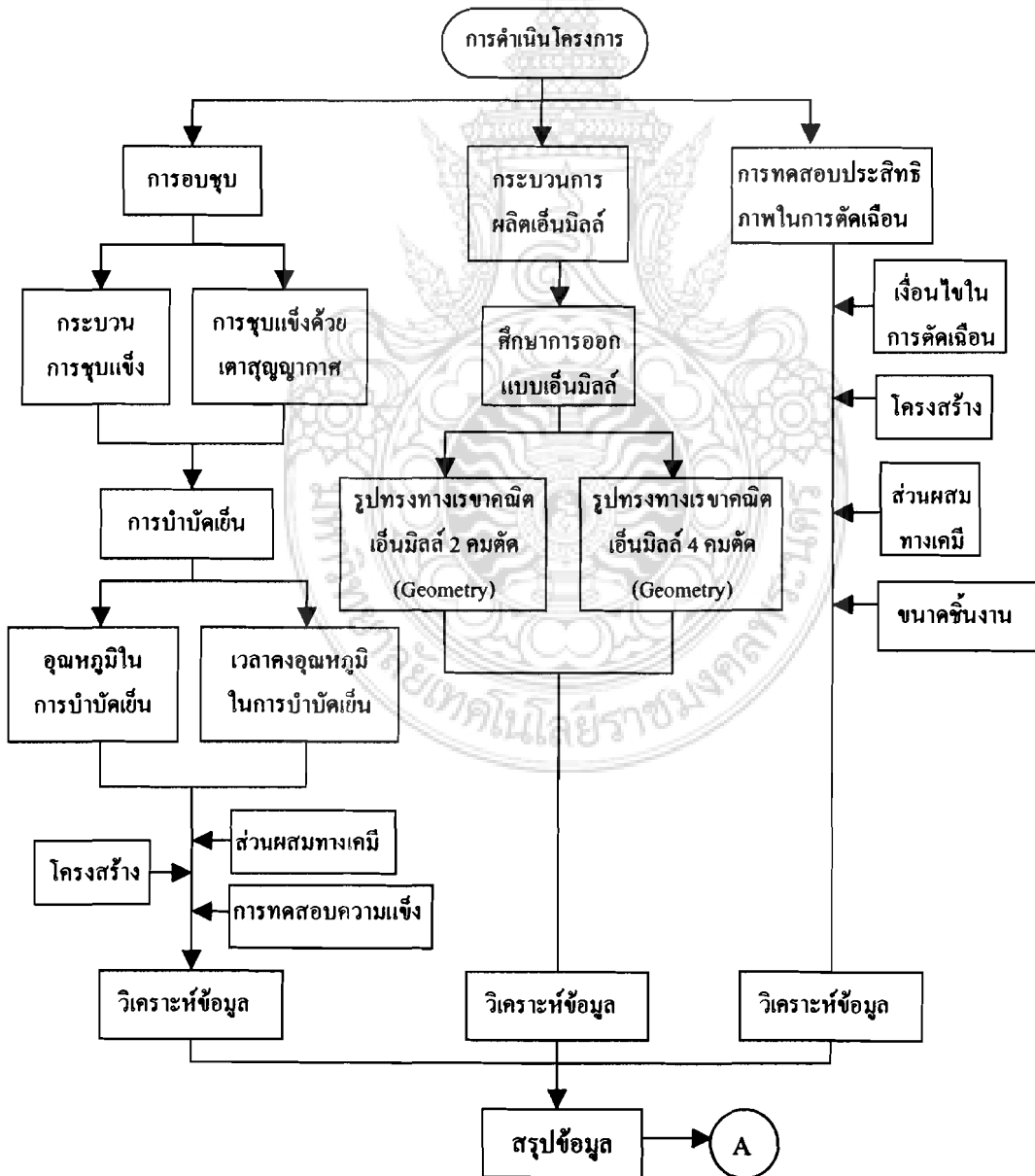
### 2.10.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนี้ก็เพื่อที่จะดูโครงสร้าง เม็ดเกรน ส่วนเงาของธาตุอื่น ๆ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปฏิกิริยา ที่มีผลต่อกรรมวิธีการผลิตหรือต่อการรับภาระที่แน่นอนได้ การตรวจสอบวิธีนี้เป็นวิธีการตรวจสอบทางโลหะวิทยาวิธีหนึ่ง ที่จะหาข้อผิดพลาดในการผลิตหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับกรณีความเสียหายของวัสดุได้ ซึ่งขั้นทดสอบจะถูกเตรียมด้วยการตัดด้วยแผ่นตัด โดยห้ามมิให้เกิดความร้อนตามแผ่นตัดมากเกินไป หรือใช้แรงกดตัดมากเกินไปเพราะจะทำให้โครงสร้างเสียรูป เพื่อสะดวกกับการจับชิ้นงานทดสอบ มาทำการขัดให้ผิวเรียบจะมีการหล่อด้วยพลาสติกให้หุ่นชิ้นทดสอบแล้วจึงนำไปขัดกระดาษทราย และสารขัดละเอียดจนให้เกิดผิวเป็นมันจากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมี ทำให้เกิดเป็นรอยโครงสร้างที่ขอบเม็ดเกรนขึ้นหรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องแสงไฟฟ้าไปกระทบผิวชิ้นทดสอบและสะท้อนออกมาแตกต่างกัน การมองตรวจสอบวิธีนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างของเม็ดเกรน จากขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน เช่น เกรนหยาบ หรือละเอียด การเกิดระนาบคู่ (Twin plane) รูปเข็มรูปทรงกลม การแผ่กระจาย และการเรียงตัวของเม็ดเกรน เช่น เดกซ์เจอร์ (texture) จาก การรีดการแยกตัวที่ขอบเม็ดเกรน

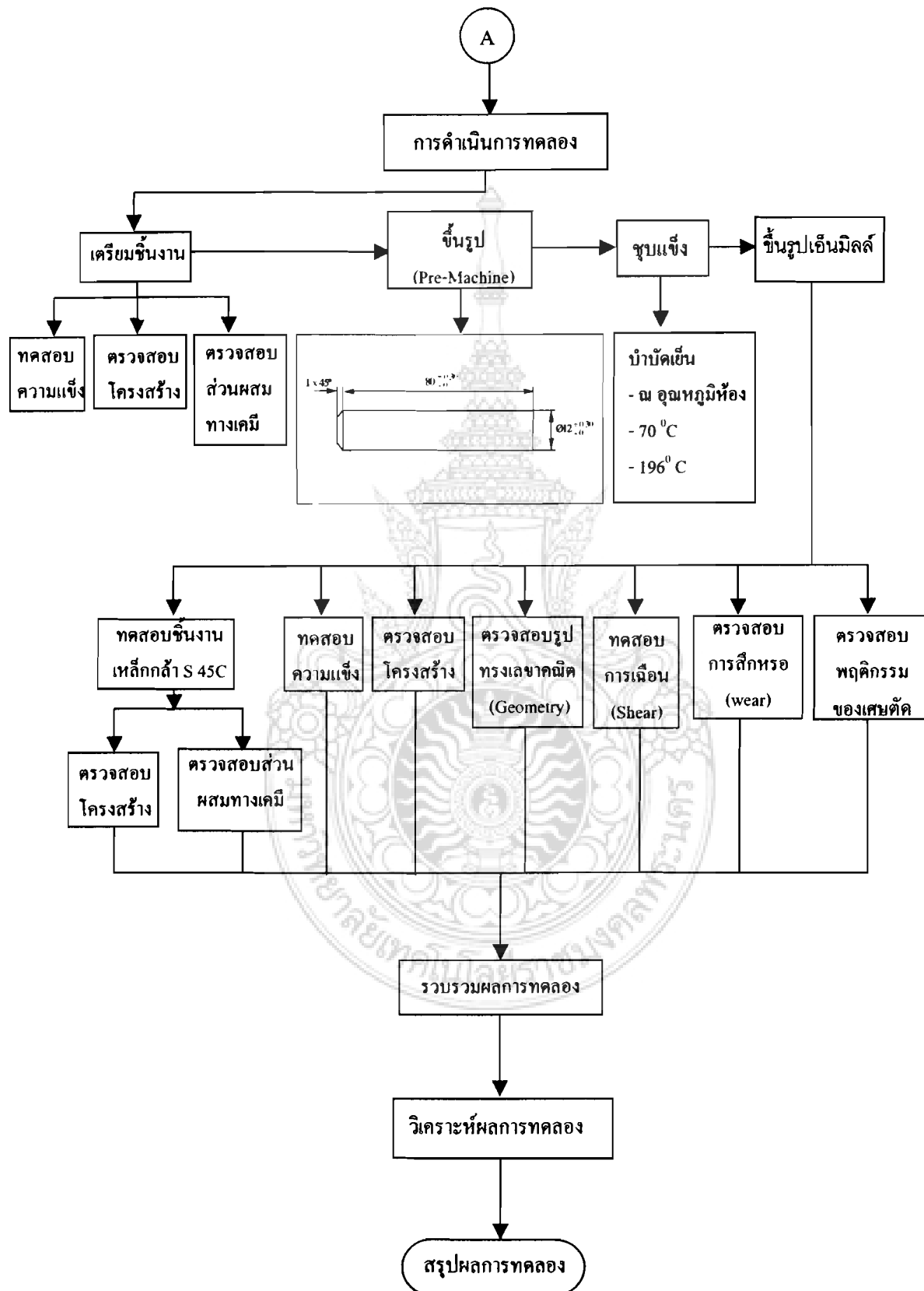
### บทที่ 3

#### การดำเนินการและวิธีการทดลอง

การดำเนินโครงการ เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูงในการดำเนินโครงการ ได้กำหนดแผนการดำเนินงาน ตั้งแต่เริ่มต้นศึกษารวบรวมข้อมูลจนถึงทำการทดลอง โดยกำหนดแผนการทำงาน ดังแผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินการ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง



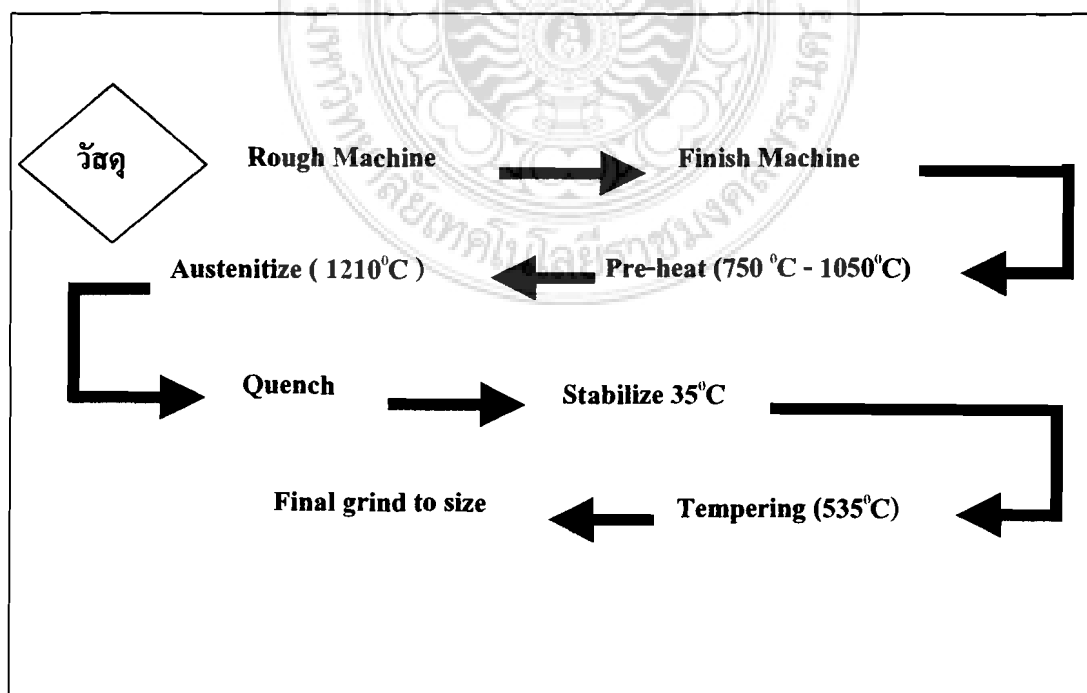
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง (ต่อ)



ตามขั้นตอนการดำเนินงานที่กำหนด ส่วนที่สำคัญในการทดลอง คือการบำบัดเย็นวัสดุ เอ็นมิลล์หลังผ่านกระบวนการอบชุบมาแล้ว โดยบำบัดเย็นภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทำการทดสอบ ความแข็ง ตรวจสอบโครงสร้างและทดสอบการสึกหรอด้วยการตัดเฉือน เพื่อเปรียบเทียบผลการ ทดลองของเอ็นมิลล์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็นในแต่ละเงื่อนไข

### 3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI และการชุบแข็ง

บริษัท เอ็น อาร์ อินคัสตรี บริหารงานโดยประธานบริษัทคุณณรงค์ สกุลศิริรัตน์ ซึ่งเป็น บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดประเภทเอ็นมิลล์ ดอกสว่าน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ที่ผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง คาร์ไบด์และเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยผลิตเอ็นมิลล์จากเหล็กกล้ารอบสูง S500 ตามมาตรฐานของผู้ผลิต ตราผลิตภัณฑ์ (BOHLER) ซึ่งเทียบเท่ากับเหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI ตามลำดับ ซึ่งบริษัท สหมิตร เครื่องกล จำกัด เป็นตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย โดยเอ็นมิลล์ที่ผลิตส่วนใหญ่ จะผลิตจากเหล็กกล้ารอบสูง M42 และจากการค้นคว้างานวิจัยของต่างประเทศได้กล่าวว่าการทำ กระบวนการครายโอจินิก (Cryogenics) จะทำให้วัสดุที่ผ่านกระบวนการครายโอจินิก มีคุณสมบัติด้าน การต้านทานการสึกหรอดีขึ้นและเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุได้ ปัจจุบันบริษัทยังไม่มี การนำ กระบวนการ Cryogenics มาใช้ในการผลิตจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการ Cryogenics เพื่อนำมา ประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัท เพื่อยืดอายุการใช้งานของเอ็นมิลล์และเพิ่มประสิทธิ ภาพการต้านทานการสึกหรอให้ดีขึ้น โดยปัจจุบันบริษัทมีขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ดังนี้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัท(แบบเดิม)

จากขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัทในปัจจุบันยังไม่มีกระบวนการบำบัดเย็น (Cryogenics) มาใช้ในกระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ ดังนั้นจึงได้ทดลองทำการบำบัดเย็น (Cryogenics -Treatment) เหล็กกล้ารอบสูง M42 แล้วทำการผลิตเป็นมิลล์ เพื่อศึกษาการต้านทานการสึกหรอหลังการตัดเฉือนโดยเหล็กกล้ารอบสูง M42 ที่ใช้ในการทดลองมีส่วนผสมทางเคมีเทียบเท่า S500 ตามมาตรฐานของผู้ผลิตตราผลิตภัณฑ์(BOHLER)ซึ่งมาตรฐานมีดังนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเคมีเหล็กกล้ารอบสูง S500 ตามมาตรฐานของผู้ผลิตตราผลิตภัณฑ์ (BOHLER)

ธาตุ	คาร์บอน	โครเมียม	โมลิบดีนัม	วานาเดียม	ทังสแตน	โคบอลต์	แมงกานีส	ซิลิกอน
ส่วนผสม (น้ำหนัก%)	1.05 –1.15	3.5 –4.25	9-10	0.95 –1.35	1.15 –1.85	7.75 – 8.75	0.15 – 0.4	0.15 – 0.5

### 3.1.1 กระบวนการชุบแข็ง

กระบวนการชุบแข็งเป็นกระบวนการทางความร้อนเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กด้านโครงสร้าง เพื่อให้เหล็กเกิดโครงสร้างที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน สามารถต้านทานการสึกหรอและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน

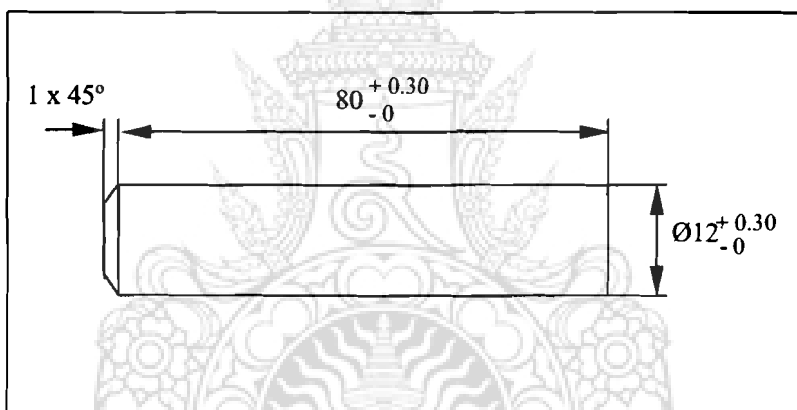
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการชุบแข็ง

ลำดับ	เอกสารอ้างอิง	Temperature(°C)	Holding (min)	Tempering (°C)	HRC
1	Tool steels	1163-1191		510-595	66-70
2	Metallurgy and treatment of tool steels	1100-1225			
3	Heat treatment and process	1190-1210	2-5	510-595	65-70
4	Metal hand book Vol.4	1165-1190	2-5		63-66
5	Metal hand book Vol.1	1190-1210	2-5	510-595	65-70
6	Metal databook	1180-1230	2-5	530-570	66-70
7	ASM hand book	1190-1210	2-5	510-595	65-70
8	Metal hand book Vol.2	1190-1210	2-5		63-66
9	Heat treatment of metal	1170-1225	2-5	530-560	
10	Heat treatment Guide	1175-1190	2-5	510-595	65-70
11	Heat treater 'Guide	1165-1190	2-5	510-595	65-70

จากงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ตัวแปรในการชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูงเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์ ผลการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1210 °C คงอุณหภูมิ 2.5 นาที และอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535 °C จำนวน 3 ครั้ง มีโครงสร้างเหล็กเป็นมาเทนไซต์ละเอียดการกระจายของคาร์ไบด์ค่อนข้างสม่ำเสมอ สามารถต้านทานการสึกหรอในการตัดเฉือนได้ดี ซึ่งเป็นวิธีการที่ยังไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กด้วยกระบวนการบำบัดเย็น

### 3.1.2 การทดลองการอบชุบด้วยเตาสัญญากาศ

การชุบแข็งด้วยเตาสัญญากาศเป็นการชุบแข็งที่ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติมีความผิดพลาดน้อยและสามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวชิ้นงานที่นำไปสู่การเกิดออกซิเดชัน ชิ้นงานที่ทำการชุบแข็งจะต้องเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการกลึงปาดหน้าและเจียรไนที่หน้าตัดหนึ่งด้านพร้อมกับเจียรไนในผิวกลมตามขนาดดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง

### 3.1.3 การบำบัดเย็น (Cryogenics)

การชุบเย็น “ครายโอจีนิก” (Cryogenic Treatment) คือการชุบเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C โดยทำกับโลหะที่ผ่านการชุบแข็ง (Heat Treatment) มาแล้ว เป็นการจัดระบบหมุนเวียนความเย็นและเวลาต้องมากพอที่ทำให้โลหะเปลี่ยนแปลง โดยการใช้ความเย็นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C มากๆ และนานที่จะพอทำให้ผลึกจัดตัวอย่างสมดุล ซึ่งเป็นปัจจัยในการเปลี่ยนออสเทนไนต์ตกค้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ในรูปของโลหะไฮเปอรัยเทคตอยด์ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างโมเลกุลอย่างมีเสถียรภาพ จากบทความ Deep Cryogenic Treatment Systems และ Cryogenic International ข้อมูลลำดับที่ 1 และลำดับที่ 3 จากตารางที่ 3.3 ผลการวิจัยเหล็กกล้า M42 ด้วยกระบวนการ Cryogenic สามารถต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น 450 % จากเดิม และบทความเรื่อง Frozen Gears ได้กล่าวไว้ว่าหลังการทำ Cryogenic เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ Austenite decreased from 42.6 % to 0.9 % , Martensite Increased from 66 % to 81.7 % และ Carbides increased from 6.9 % to 17.4 % ซึ่งเป็นผลให้เครื่องมือและอุปกรณ์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ตารางที่ 3.3 เวลาในการคงอุณหภูมิในการชุบไนโตรเจนและอุณหภูมิที่ใช้ในบำบัดเย็น

ลำดับ	บทความ	แหล่งอ้างอิงข้อมูล	ชนิดวัสดุ	เวลาในการคงอุณหภูมิ (ชม.)	อุณหภูมิในการบำบัดเย็น ( $^{\circ}\text{C}$ )	ผลการทดลอง
1	Deep Cryogenic Treatment Systems	<a href="http://www.Cryopro.com/tool.html">www.Cryopro.com/tool.html</a>	M42	48	-196	ดีขึ้น 450%
2	These search terms have been highlighted:M42	<a href="http://www.CustomerCostReductionApexKnivesPvtLtd.htm">www.CustomerCostReductionApexKnivesPvtLtd.htm</a>	M42	24-72	-196	
3	Cryogenic International	<a href="http://www.cryogenicsintermaytion.com">www.cryogenicsintermaytion.com</a>	M42	36-74	-196	ดีขึ้น 450%
4	The Cryogenic Process	<a href="http://www.mmsonline.com/articles/0301rt2.htm">www.mmsonline.com/articles/0301rt2.htm</a>	Tool steel	15-30	-196	
5	Deep Cryogenic Tempering Process	<a href="http://info.lu.farmingdale.cdn/depts/met/mct205/cryogenictreatment.htm">http://info.lu.farmingdale.cdn/depts/met/mct205/cryogenictreatment.htm</a>	Tool steel	20-40	-196	ดีขึ้น 50%
6	Deep Cryogenic Tempering	<a href="http://www.ln2cryo.com">http://www.ln2cryo.com</a>	-	20	-196	
7	อุปกรณ์สำหรับการอบชุบโดยวิธีการ Cryogenic ของเหล็กกล้าผสมสูง	วิทยานิพนธ์เรื่องการอบชุบด้วยวิธีการ cryogenics เหล็กกล้าผสมสูง	M2	20	-196	

### 3.1.3.1 อุณหภูมิในการบำบัดเย็น

จากตารางที่ 3.3 เป็นข้อมูลของอุณหภูมิในการบำบัดเย็นของวัสดุชนิดต่างๆ และอุณหภูมิที่นิยมใช้ในการวิจัยคือที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  และผลการวิจัยอยู่ในทิศทางที่ดีขึ้นสามารถต้านทานการสึกหรอดีขึ้น 50 % และ 450 % ตามลำดับขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

### 3.1.3.2 เวลาในการบำบัดเย็น

1) จากตารางที่ 3.2 เวลาในการคงอุณหภูมิของกระบวนการบำบัดเย็นจากข้อมูลการวิจัยและข้อมูลวัสดุต่างๆ ช่วงเวลาที่ใช้ในการคงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15-74 ชั่วโมง เวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 35 ชั่วโมง

2) จากค่านิยามของเวลาในการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นของข้อมูลทั้งหมดซึ่งเป็นวัสดุต่างชนิดกันค่าของอุณหภูมิที่นิยมใช้คือ 20 ชั่วโมง



3) จากเวลาในการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นของเหล็กกล้า M42 และวัสดุที่เป็น Tool Steel ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิด เป็นเหล็กที่นิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเทศเครื่องมือตัดโดยค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการบำบัดเย็นเท่ากับ 40 ชั่วโมง 48 นาทีและเมื่อพิจารณาเวลาจากค่าฐานนิยมเวลาที่ใช้ในการบำบัดเย็นเท่ากับ 48 ชั่วโมง

4) จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของเวลาในการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นของเหล็กกล้ารอบสูง M42 ซึ่งเวลาที่ใช้เท่ากับ 50 ชั่วโมง

5) เมื่อพิจารณาเวลาการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นซึ่งเป็นฐานนิยมของข้อมูลเหล็กกล้า M42 ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงอุณหภูมียู่ที่ 48 ชั่วโมง

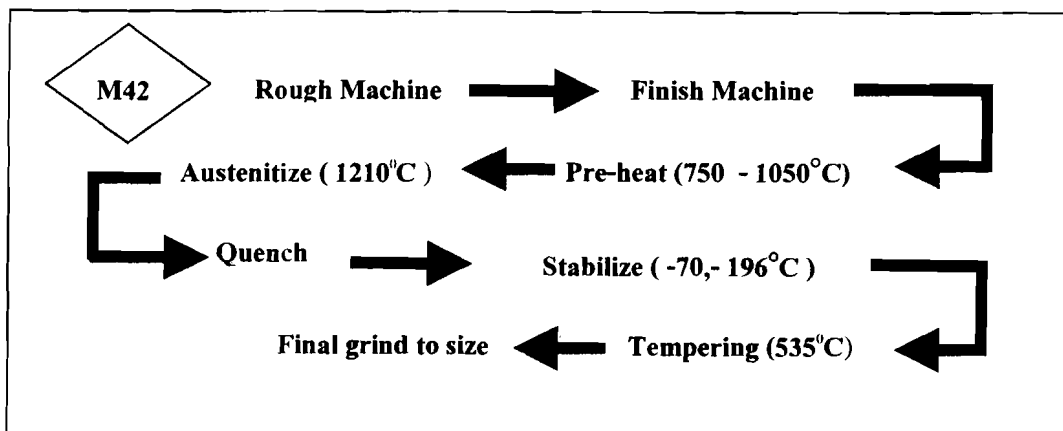
### 3.1.3.3 วิเคราะห์ข้อมูลการบำบัดเย็น

1) เวลาในการคงอุณหภูมิ จากการพิจารณาเวลาการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นในการทดลองเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการด้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง เลือกว่าจะใช้เวลาในการคงอุณหภูมิตั้ง 20 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าฐานนิยมของเวลาในการคงอุณหภูมิในการบำบัดเย็นของข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 3.3 โดยเป็นค่าทางสถิติที่สามารถควบคุมระยะเวลาในการทดลองได้และสามารถควบคุมปริมาณของสารชุบที่ใช้ในการทดลองได้

2) อุณหภูมิในการบำบัดเย็น จากข้อมูลการวิจัยอุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัยมากที่สุดอยู่ที่  $-196^{\circ}\text{C}$  ผลการวิจัยอยู่ในทิศทางที่ดีขึ้นสามารถด้านทานการสึกหรอดีขึ้น 450% ในการทดลองเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการด้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง เลือกว่าอุณหภูมิในการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง,  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการด้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ

### 3.1.3.4 ขั้นตอนการชุบแข็งและการบำบัดเย็น

การชุบเป็นการปรับปรุงโลหะด้วยกระบวนการทางความร้อนและบำรุงรักษาโครงสร้างของโลหะหลังการชุบแข็งด้วยกระบวนการบำบัดเย็น โดยเป็นขั้นตอนในการชุบแบบมีการบำบัดเย็น (Cryogenics Treatment) เพื่อการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้า M42



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการชุบแข็งในการทดลอง

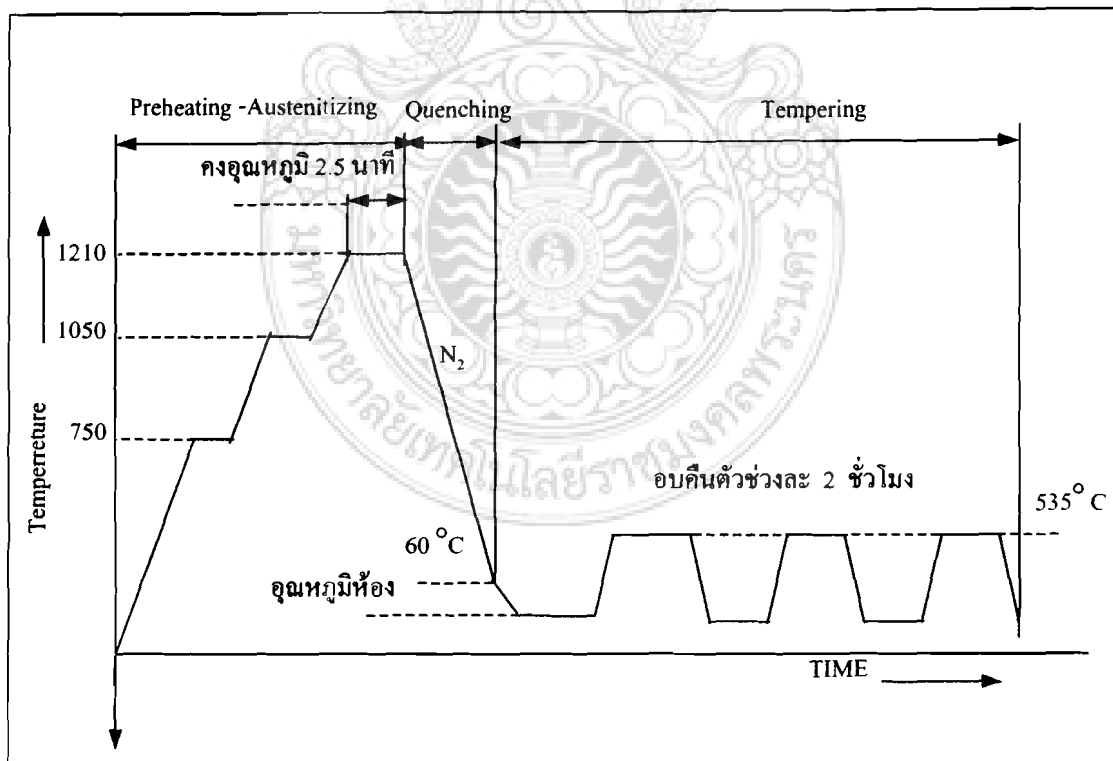
เงื่อนไขในการชุบแข็งวัสดุเอ็นมิลล์เหล็กกล้า M42 ตามมาตรฐาน AISI ประกอบด้วย

- 1) อุณหภูมิในการชุบแข็ง คือ  $1210^{\circ}\text{C}$
- 2) ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (Holding time) ที่เวลา 2.5 นาที
- 3) เส้นตัวด้วยก๊าซไนโตรเจนและอยู่ภายใต้ความดันของไนโตรเจนคงที่ 4.5 บาร์
- 4) การเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 5) ทำการบำบัดเย็น โดยมีอุณหภูมิดังนี้
  - บำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  เวลาการคงอุณหภูมิ 20 ชั่วโมง
  - บำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  เวลาการคงอุณหภูมิ 20 ชั่วโมง
- 6) อบคืนตัวที่อุณหภูมิ  $535^{\circ}\text{C}$  โดยการทำการอบคืนตัวไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

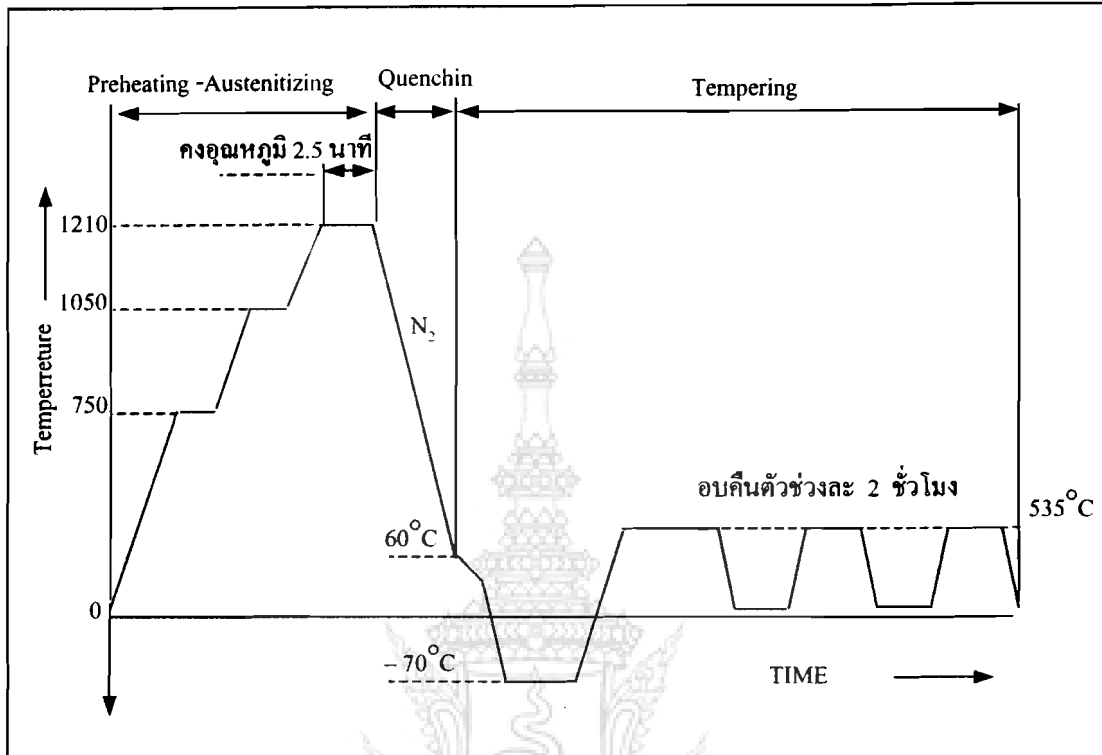
ชิ้นงานที่ทำการชุบแข็งรวมทั้งหมด 30 ชิ้น โดยทำการชุบแข็งภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด

#### 3.1.4 วิเคราะห์ข้อมูลการอบชุบ

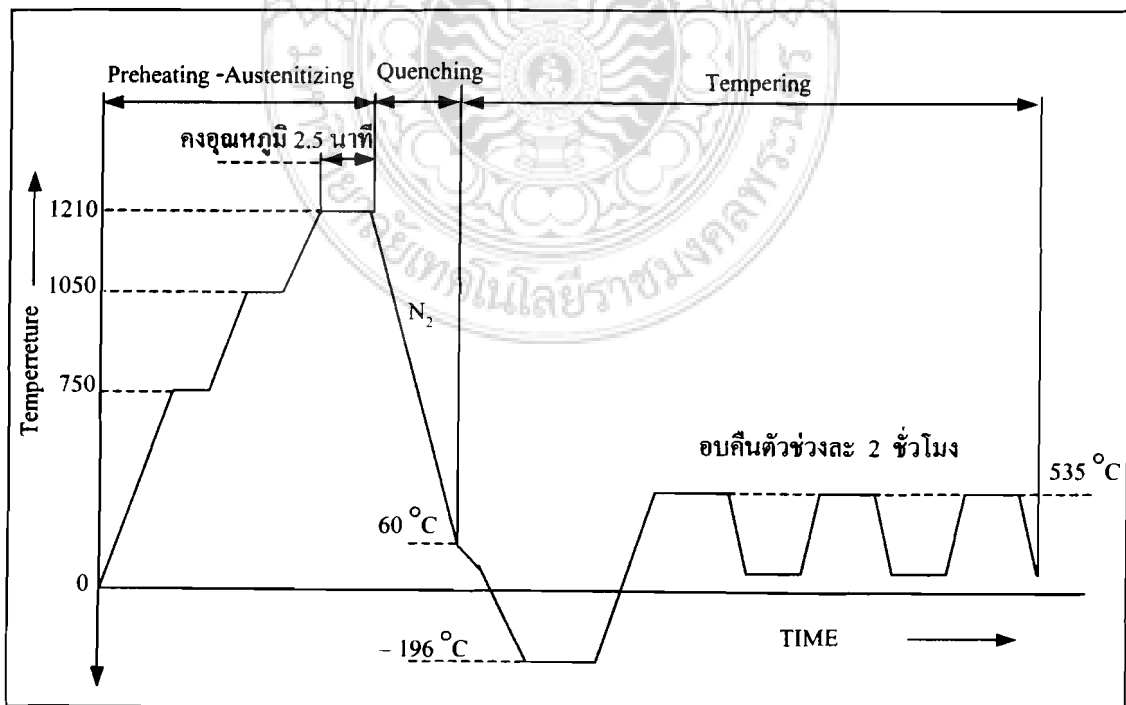
จากกระบวนการชุบแข็งด้วยเตาสุญญากาศนำมาออกแบบกราฟชุบในการทดลองแต่ละเงื่อนไขดังรูป



รูปที่ 3.5 แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.6 แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งและบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



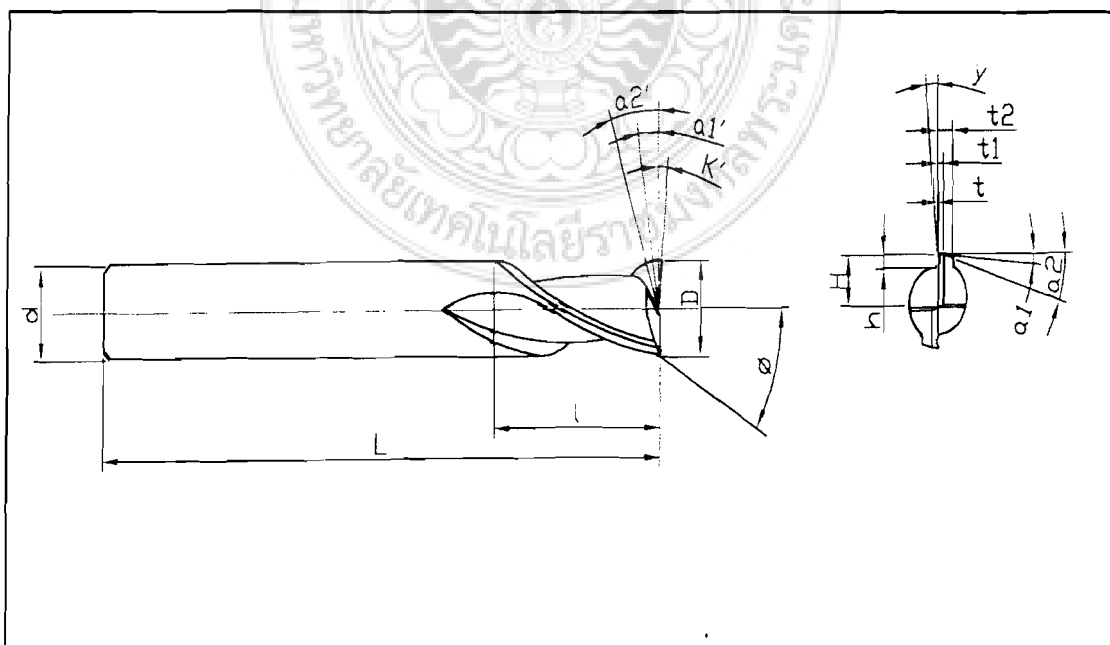
รูปที่ 3.7 แผนภูมิขั้นตอนการชุบแข็งและบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

### 3.2 ศึกษาออกแบบเอ็นมิลล์

จากการศึกษาการออกแบบ คือ การศึกษาเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์และขนาดต่างๆ ของคมตัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตัดเฉือน ของเอ็นมิลล์ ประเภท 2 คมตัด และเอ็นมิลล์ ประเภท 4 คมตัดซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- $L$  = ความยาวทั้งหมดของเอ็นมิลล์ (Overall Length)
- $l$  = ความยาวของคมตัด (Length of Cut)
- $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter of End mills)
- $D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคมตัด (Cutting Diameter)
- $\gamma$  = มุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake Angle)
- $\phi$  = มุมเฉียง (Helix Angle)
- $K$  = มุมหลบในแนวแกน (Axial Relief Angle)
- $\alpha_1$  = มุมหลบในแนวรัศมี (Radial Relief Angle)
- $\alpha_2$  = มุมหลบรองในแนวรัศมี (Secondary Relief Angle) หรือ มุมหลบ
- $\alpha_1$  = มุมเอียงของคมตัดด้านปลายมีด (End Cutting Edge Concavity Angle)

3.2.1 รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด สำหรับศึกษาทางรูปทรงเรขาคณิตและออกแบบในการผลิตเอ็นมิลล์ประกอบด้วยส่วนๆ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด



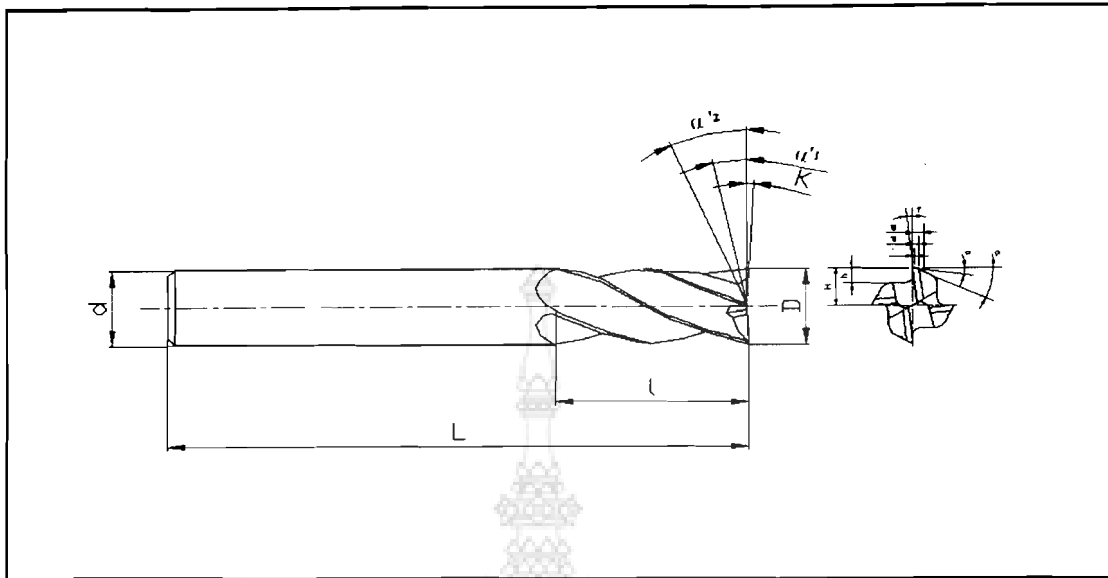
ตารางที่ 3.4 ผลการวัดขนาดเอ็นมิลล์แต่ละรหัส จำนวน 2 คมตัด

ลำดับ	รหัส	ประเทศผู้ผลิต	ผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์				
			d	L	I	$\gamma$	$\phi$
1	A	เยอรมัน	11.94	110.9	25.4	11°45'	28°28'
2	B	ญี่ปุ่น	11.97	95.2	30.0	15°32'	29°37'
3	C	อิสราเอล	11.95	73.8	18.5	13°12'	29°28'
4	D	สวิตเซอร์แลนด์	11.93	82.7	26.9	9°59'	27°34'
5	E	อังกฤษ	11.98	73.2	19.6	14°29'	29°32'
6	F	อังกฤษ	11.95	67.0	23.2	7°38'	28°24'
7	G	ออสเตรเลีย	12.00	81.4	30.9	18°34'	29°12'
8	H	ญี่ปุ่น	11.96	90.7	31.2	15°04'	29°11'

จากการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพการใช้งานของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูงจำนวน 2 คมตัดผลการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผลการทดสอบการสึกหรอของเอ็นมิลล์และจากผลการทดสอบการสึกหรอของเอ็นมิลล์รหัส B มีระยะการสึกหรอน้อยที่สุด โดยการทดสอบการตัดเฉือนตามเงื่อนไขของบริษัท รหัส B และการทดสอบตามเงื่อนไขมาตรฐานของแต่ละบริษัท โดยการทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. โดยผลการตรวจสอบขนาดของเอ็นมิลล์รหัส B ประกอบด้วยความยาวของคมตัด 30 มม. มุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 15° 32' และมุมเฉียงเท่ากับ 29°37' ซึ่งเป็นมุมที่สำคัญในการออกแบบการผลิตเอ็นมิลล์

ฉะนั้นการทดลองเรื่องการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการขึ้นตัวต่อประสิทธิภาพการด้านการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง จึงเลือกออกแบบขนาดของรูปทรงเรขาคณิตเทียบเท่ากับเอ็นมิลล์รหัส B ส่วนรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ ที่มีได้กล่าวไว้ผลิตตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิตเอ็นมิลล์ (บริษัท เอ็นอาร์ อินดัสตรี) เพื่อผลิตเอ็นมิลล์หลังผ่านการขึ้นตัว ณ อุณหภูมิห้องและผ่านการบำบัดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาในแต่ละเงื่อนไข ทดสอบการตัดเฉือนเพื่อเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ในแต่ละอุณหภูมิ

3.2.2 รูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด สำหรับศึกษาทางรูปทรงเรขาคณิตและออกแบบในการผลิตเอ็นมิลล์ประกอบด้วยส่วนๆ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์ แต่ละรหัส จำนวน 4 คมตัด

ลำดับ	รหัส	ประเทศผู้ผลิต	ผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์				
			d	L	I	$\gamma$	$\phi$
1	ME	เชคโก	11.99	85	26	10° 01'	29° 46' 05"
2	OG	ญี่ปุ่น	11.99	80	30	13° 34' 30"	29° 18' 21"
3	HI	ญี่ปุ่น	12.00	95	30	12° 20' 38"	22° 07' 11"
4	YC	ญี่ปุ่น	11.99	90	30	5°	32° 21' 39"
5	SA	อเมริกา	11.99	80	30	16°	25° 15' 15"
6	MA	อเมริกา	12.00	80	30	4° 06' 05"	28° 05' 12"
7	FR	เยอรมัน	12.00	82	28	1° 22' 02"	28°
8	IZ	เยอรมัน	11.99	90	30	14° 42' 15"	29° 28' 49"
9	YG	เกาหลี	11.99	85	28	4° 25' 22"	28°
10	FE	เยอรมัน	11.99	83	26	8° 25' 08"	29° 51' 5"
11	OB	อังกฤษ	11.99	70	26	5°	31° 11' 45"

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์แต่ละรหัส จำนวน 4 คมตัด (ต่อ)

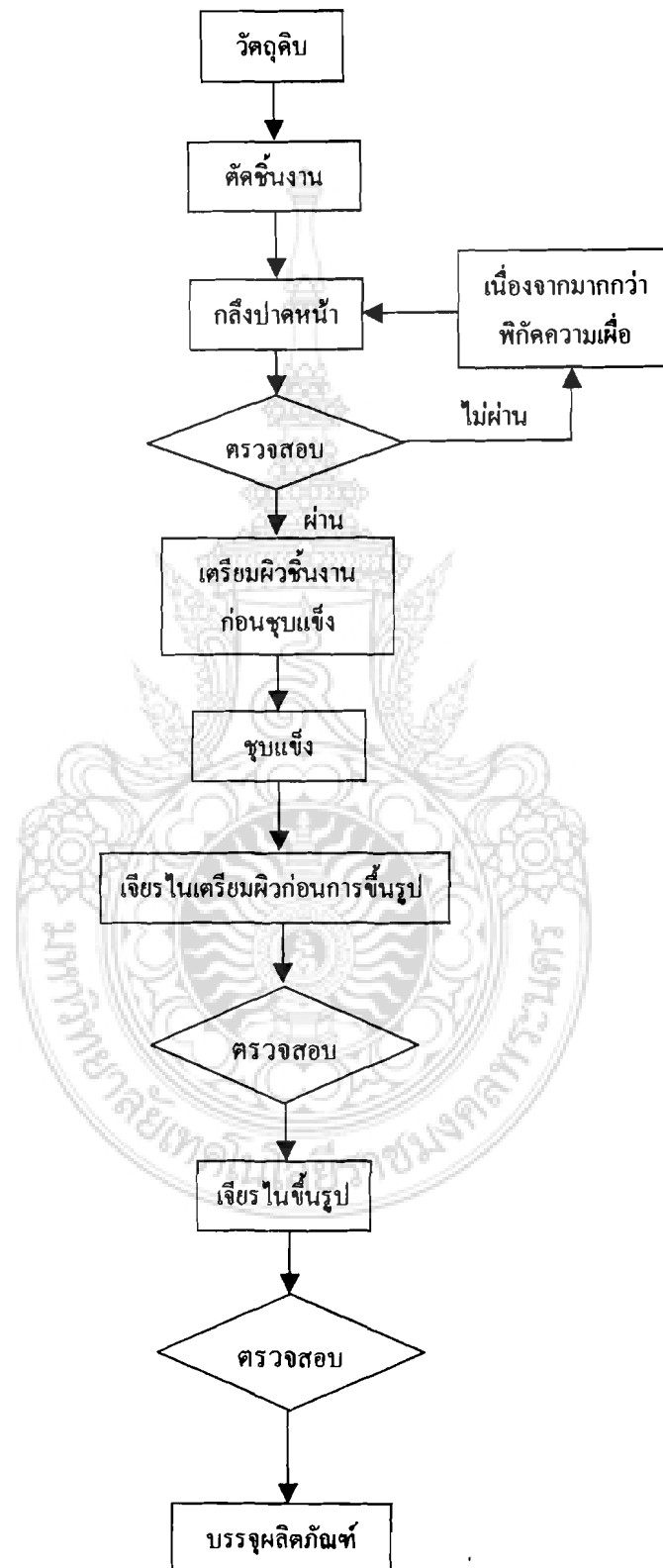
ลำดับ	รหัส	ประเทศผู้ผลิต	ผลการวัดขนาดของเอ็นมิลล์				
			d	L	I	$\gamma$	$\phi$
12	DO	อังกฤษ	11.95	70	26	8°17' 41"	29° 37' 14"
13	VR	อิตาลี	12.00	83	30	8°	29° 10' 16"
14	VE	อิตาลี	11.99	83	30	10° 32' 55"	29° 10' 16"
15	MF	ฝรั่งเศส	11.99	83	26	2°26'05"	31° 11' 34"
16	HA	อิสราเอล	12.00	83	26	10°37' 55"	28° 46' 08"
17	YG	เกาหลี	11.99	90	30	11°31' 26"	29° 10' 37"

จากการศึกษารูปทรงทางเรขาคณิตของงานวิจัย เรื่องการวิเคราะห์ตัวแปรในการชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของเอ็นมิลล์ โดยเป็นเอ็นมิลล์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งได้กำหนดขนาดมุมของเอ็นมิลล์ในการวิจัยประกอบด้วย มุมคายเศษเท่ากับ 8° มุมเฉียงของสันคมตัดเท่ากับ 29° ซึ่งมีระยะการสึกหรอน้อยที่สุดในการทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3500 มม. โดยมีอุณหภูมิชุบแข็งที่ 1210 °C และเวลาในการคงอุณหภูมิ 2.5 นาที อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535 °C ไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง ซึ่งเป็นเอ็นมิลล์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา (Cryogenics Treatment)

ฉะนั้นในการทดลองเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง ได้ออกแบบขนาดมุมคายเศษเท่ากับ 8° และมุมเฉียงของสันคมตัดเท่ากับ 29° ส่วนรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ ที่มีได้กล่าวไว้ผลิตตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิตเอ็นมิลล์ (บริษัท เอ็น อาร์ อินคัสตรี จำกัด ) เพื่อผลิตเอ็นมิลล์หลังผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิห้องและผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาในแต่ละเงื่อนไขเพื่อนำมาทดสอบการตัดเฉือนและเปรียบเทียบการสึกหรอในแต่ละเงื่อนไขของอุณหภูมิ

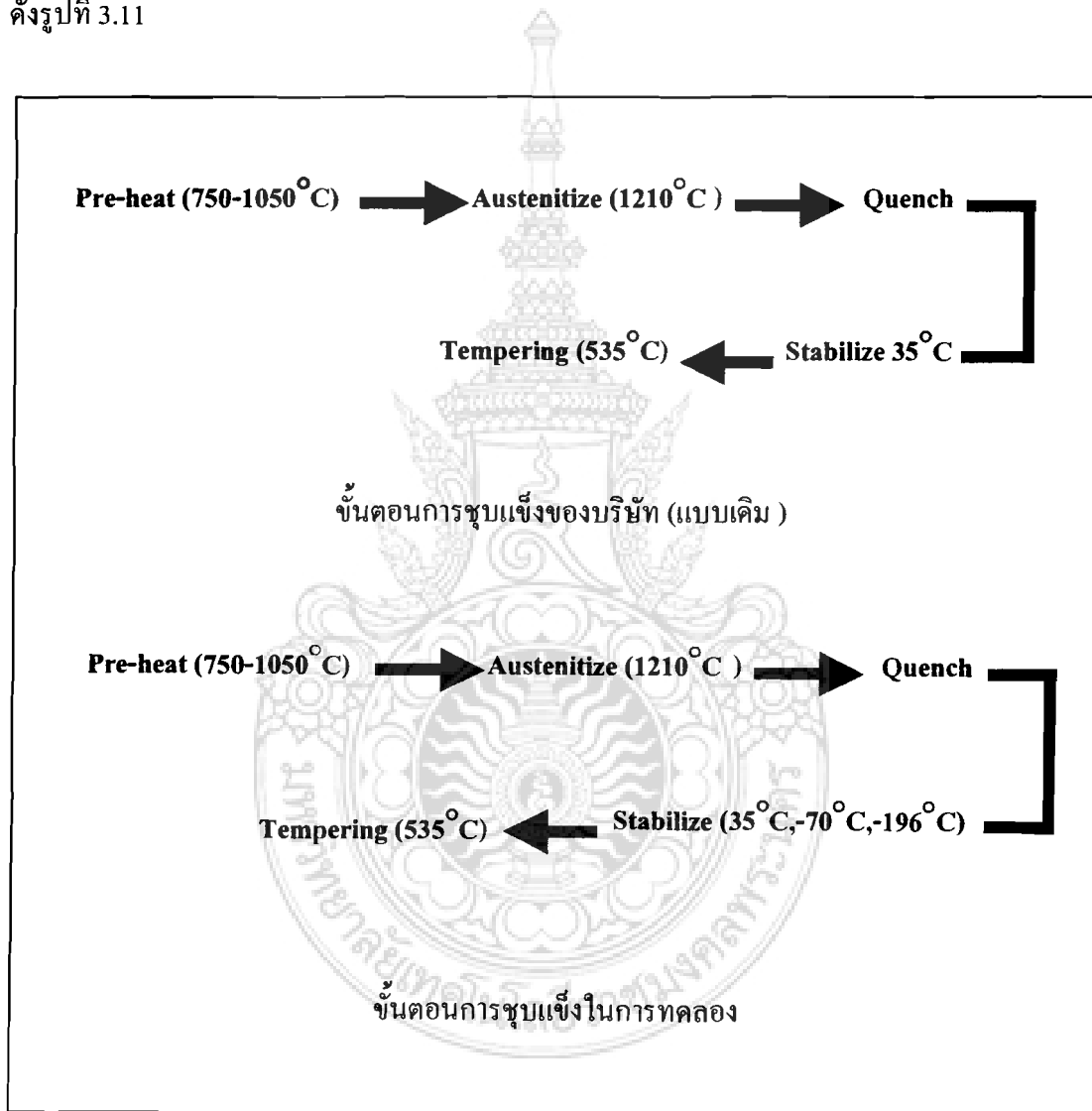
หมายเหตุ : ค่าพิถีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับอยู่ในช่วงมากกว่าหรือน้อยกว่าได้ไม่เกิน 1 องศา

## 3.2.3 กระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ ( End mills )



รูปที่ 3.10 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์

3.2.3.1 การชุบแข็ง จากขั้นตอนการชุบแข็งของกระบวนการผลิตเอ็นมิลล์ในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นขั้นตอนการผลิตเอ็นมิลล์ของบริษัท เอ็น อาร์ อินดัสตรี จำกัด โดยการผลิตเอ็นมิลล์ ยังไม่มีการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาหลังการชุบแข็ง ส่วนในการทดลองได้ออกแบบการชุบแข็งให้มีการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาหลังการชุบแข็งดังแสดงขั้นตอนการชุบแข็งดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการชุบแข็ง

### 3.3 ทดสอบประสิทธิภาพการตัดเฉือน

กระบวนการทดสอบการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ทั้ง 2 และ 4 คมตัด โดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) ตามโปรแกรมการทำงาน (ภาคผนวก ก.) ทดลองกัดชิ้นงานเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องมือกลชนิด 1045 ตามมาตรฐาน AISI ความแข็ง 160 HB เป็นระยะทาง 3000 มม. โดยมีเงื่อนไขในการตัดเฉือนดังนี้

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ HSS ขนาด 12 มม.ประเภท 2 คมตัด

รหัส	แหล่ง ข้อมูล	ความเร็วรอบ rev/min	ความเร็ว ป้อน mm/min	อัตราป้อน mm/tooth	ความเร็วตัด m/min	ความลึก ตัดมีด mm	วัสดุชิ้น งาน (AISI)	ความแข็ง (HB)
A	Milanda	480	60	0.06	25	0.5D	S45C	200
B	Hitachi	530	80	0.05	20	0.5D	S45C	200
C	Hanita	796	180	0.12	30	0.5D	-	250
D	Vallorbe	725	83	0.07	30	0.5D	-	250
E	Domer	836	87	0.05	32	0.5D	S45C	200
F	Clarkson	849	140	0.08	32	0.5D	-	200
G	Sutton	589	36	0.03	25	0.5D	S45C	200
H	STK	750	106	0.07	28	0.5D	-	200
	เฉลี่ย	695	97	0.07	28	0.5D	S45C	-

จากตารางที่ 3.6 เป็นข้อมูลการกำหนดเงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด จำนวน 8 คราผลิตรัดเกศาการทดลองสามารถกำหนดเงื่อนไขทดสอบการตัดเฉือนได้ดังนี้

### 3.3.1 เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

ความเร็วรอบ (Rpm)	695 รอบ/นาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	0.07 มม./ฟัน
ความเร็วป้อน (Feed velocity)	97 มม./นาที
ความลึก (Depth of cut)	3 มม.
ความเร็วตัด (Cutting Speed)	28 ม./นาที

ตารางที่ 3.7 แสดงเงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ HSS ขนาด 12 มม. จำนวน 4 คมตัด

เอกสารอ้างอิง	ความเร็วรอบ rev/min	ความเร็วป้อน mm/min	อัตราการป้อน mm/tooth	ความเร็วตัด m/min	ความลึกตัดมีด mm	วัสดุชิ้นงาน AISI	ความแข็ง (HB)
MachineTool							
Design hand Book	716	140s	0.05	27	0.25D	1045	175-225
Osbron	550-672	72-88	0.035	24.25	0.25D	1045	206
Frenken	530-742	84-118	0.04	20.28	0.5D	1045	220
E.C	530-660	80	0.035	23-28	0.25D	1045	250
Machine tools	610	122	0.05	23	0.25D	1045	225
ILLI-CO	636	100	0.04	24	0.25D	-	260
Vallorbe	470-660	90-130	0.05	18-25	0.5D	-	215-300
Hanita	715	65	0.023	26	0.5D	-	300
Y.G.	700	90	0.032	26	0.25D	-	175
NW	660	100	0.038	25	0.25D	1045	200
Sumitom	900	90	0.025	33	0.25D	-	220
ตาราง โลหะ	636	80-100	0.035	22-24	-	-	250
เฉลี่ย	665	100	0.04	25	0.25D	1045	-

จากตารางที่ 3.7 เป็นข้อมูลการกำหนดเงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด จำนวน 12 ตราผลิตภัณฑ์การทดลองสามารถกำหนดเงื่อนไขในการกวดทดสอบได้ดังนี้

### 3.3.2 เงื่อนไขในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ความเร็วรอบ (Rpm)	665	รอบ/นาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	0.04	มม./ฟัน
ความเร็วป้อน(Feed velocity)	100	มม./นาที
ความลึก(Depth of cut)	3	มม.
ความเร็วตัด (Cutting Speed)	25	ม./นาที

ในการทดลองการตัดเฉือนจะใช้ค่าเฉลี่ยของบริษัทในแต่ละประเภทคมตัด โดยกำหนดความยาวส่วนปลายของเอ็นมิลล์ให้ห่างจากหัวจับเอ็นมิลล์  $45 \pm 0.05$  มม. สำหรับเอ็นมิลล์ 2 คมตัด และ  $40 \pm 0.05$  มม. สำหรับเอ็นมิลล์ 4 คมตัด โดยตรวจสอบการสึกหรอทุกๆ ระยะ 1000 มม.

### 3.3.3 คุณสมบัติและขนาดของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า 1045 ตาม มาตรฐาน AISI

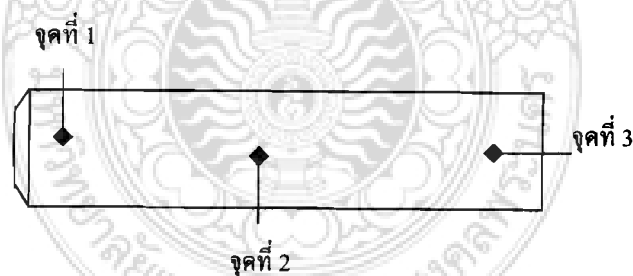
เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนผสมปานกลาง ที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้ว และทำการปาดผิวเรียบให้มีขนาดชิ้นงานเท่ากันทั้งชิ้น โดยขนาดชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนมีขนาดความยาวเท่ากับ 260 มม. และความกว้าง 250 มม. ความแข็งชิ้นงานเท่ากับ 160 HB

### 3.3.4 การทดสอบความแข็ง

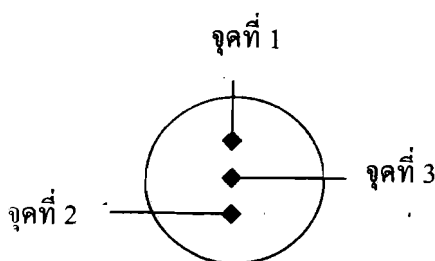
วัตถุประสงค์ในการทดสอบความแข็งเพื่อหาค่าความแข็งของวัสดุเอ็นมิลล์ ในแต่ละอุณหภูมิ ที่ทำการบำบัดเย็นในเงื่อนไขการทดลอง โดยการทดสอบความแข็งจะแบ่งออกเป็น การทดสอบที่ผิว และการทดสอบความแข็งที่แกนกลางชิ้นงาน โดยทดสอบชิ้นละ 3 ตำแหน่ง นำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแล้วเปรียบเทียบกับค่าความแข็งทั้ง 3 อุณหภูมิ การทดสอบความแข็งใช้การทดสอบแบบ รอคเวลสเกลซี (Rock Well Hardness Scale C: HRC)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งมีดังนี้ คือ

- เครื่องทดสอบความแข็งแบบ HRC
- หัวกดเพชรรูปกรวยมีมุม  $120^\circ$  C



รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งที่ผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งแกนกลางชิ้นงาน



### 3.3.5 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเอ็นมิลล์ที่นำมาทำการทดลอง ซึ่งตรวจสอบส่วนผสมของธาตุต่างๆ เปรียบเทียบกับตามมาตรฐาน AISI เบอร์ M 42 หรือเทียบเท่าและวัสดุชิ้นงานเบอร์ 1045 การทดสอบใช้วิธี Emission Spectrometer ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่ได้เป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักของปริมาณธาตุต่างๆ ขั้นตอนการทดสอบจะอยู่ในขั้นตอนดำเนินการทดลองในหัวข้อ 3.4

### 3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้าง

จุดประสงค์ของการตรวจสอบโครงสร้างเพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและการกระจายของคาร์ไบด์ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์โครงสร้างของเหล็กก่อนและหลังการทดลองการบำบัดเย็น โดยเปรียบเทียบกันในแต่ละอุณหภูมิของการชุบแข็งทั้ง 3 อุณหภูมิ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบตามหัวข้อ 3.4.3

## 3.4 การดำเนินการทดลอง

เตรียมชิ้นงาน การเตรียมชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือวัสดุเอ็นมิลล์ เบอร์ M42 และวัสดุชิ้นงานเบอร์ 1045 ตามมาตรฐาน AISI โดยเตรียมชิ้นงานในการทดลองความแข็ง, โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี

### 3.4.1 การทดสอบความแข็งก่อนการชุบแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์ก่อนการชุบแข็งเพื่อนำเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์การทดลองการศึกษากระบวนการบำบัดเย็น

- วิธีการทดสอบความแข็ง ทดสอบ โดยการกดที่ตำแหน่งผิวของวัสดุเอ็นมิลล์ โดยทดสอบชิ้นละ 3 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความแข็ง ที่ถูกต้องการแสดงตำแหน่งการกดทดสอบตามรูปที่ 3.12

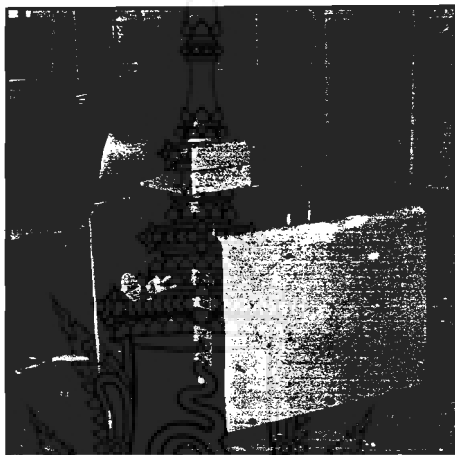


รูปที่ 3.14 การทดสอบความแข็งที่ผิว

### 3.4.1 ตรวจสอบโครงสร้างอาคาร

การตรวจสอบโครงสร้างจะแบ่งเป็นการตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุเอ็นมีลล์ตามมาตรฐาน AISI เบอร์ M 42 และวัสดุชิ้นงาน เบอร์ 1045 โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

3.4.1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยนำชิ้นงานที่จะทำการทดสอบมาทำการอัดเบเคอไลท์เพื่อสะดวกต่อการจับยึดในขณะขัดผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.15 การอัดเบเคอไลท์

3.4.1.2 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ นำชิ้นงานที่อัดเบเคอไลท์มาขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ เพื่อให้ผิวของโลหะมีความสม่ำเสมอและเหมาะสมจากนั้นขัดด้วยแผ่นสีกกะหลาดและใช้ ผงขัดอลูมินาช่วยในการขัดเพื่อให้ผิวมีความเรียบมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การขัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง

3.4.1.3 การกักกรด ใช้กรดไนตริกในการกักกรดเพื่อให้สามารถส่องกล้องมองเห็น โครงสร้างได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการกักขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของกรดที่ใช้



รูปที่ 3.17 การกักกรดเพื่อตรวจสอบ โครงสร้าง

3.4.1.4 ขั้นตอนการดู โครงสร้างทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคของเอ็นมิลล์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบ โครงสร้างและถ่ายรูปโครงสร้างเพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างในการจับแ่งแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 3.18 การตรวจสอบ โครงสร้าง

### 3.4.2 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

โดยใช้เครื่อง Emission Spectrometer เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเอ็นมิลล์ และวัสดุชิ้นงานเบอร์ 1045 คู่ส่วนผสมของธาตุต่างๆ เพื่อเทียบกับมาตรฐาน AISI เพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ในการทดลอง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

3.4.2.1 การเตรียมชิ้นงาน จัดบริเวณที่จะทำการทดสอบส่วนผสมทางเคมีเพื่อไม่ให้ค่าที่ได้เกิดความผิดพลาดในตรวจสอบ

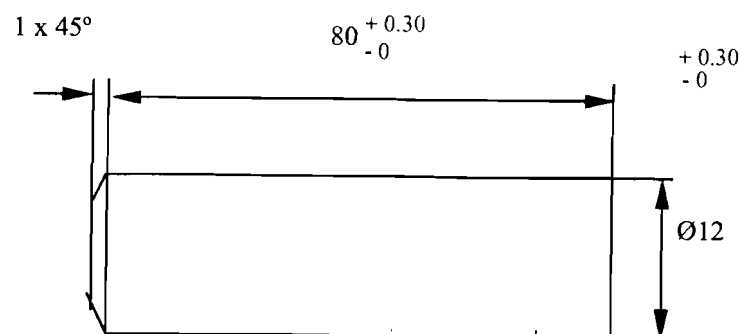
3.4.2.2 วิธีการตรวจหาส่วนผสม นำชิ้นงานเข้าเครื่อง Emission Spectrometer โดยใช้อุปกรณ์การจับยึดให้ได้ตำแหน่ง เพื่อให้ได้ค่าที่ออกมาเที่ยงตรง ตามรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

### 3.4.3 การขึ้นรูปก่อนการชุบแข็ง (Pre-Machine)

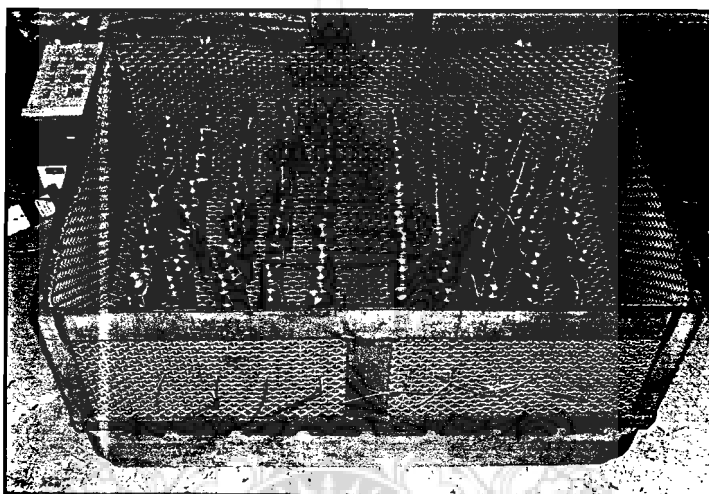
นำชิ้นงานที่เตรียมมาทำการขึ้นรูปโดยเครื่องเจียรไนไร้ศูนย์กลางให้ได้ตามขนาดที่กำหนดพร้อมที่จะมาทำการชุบแข็งและทำการบำบัดเย็น ดังรูปที่ 3.20



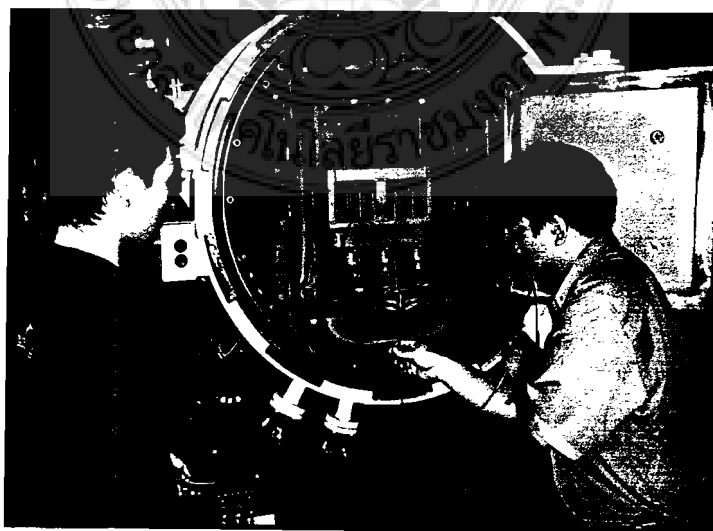
รูปที่ 3.20 ลักษณะชิ้นที่ทำการขึ้นรูป (Pre-Machine)

#### 3.4.4 การชุบแข็ง (Hardening)

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป Pre-machine มาทำความสะอาดผิวก่อนชุบแข็ง การวางชิ้นงานเตรียมการชุบในตะแกรงคังรูปที่ 3.20 โดยการชุบแข็งจะให้อุณหภูมิที่ 750°C คงอุณหภูมิไว้ 22 นาที จากนั้น เพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 1050 °C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิ Austenitizing ที่ 1210°C คงอุณหภูมิไว้ 2.5 นาที เย็นตัวถึงอุณหภูมิ 60°C ด้วยก๊าซไนโตรเจน ปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาจนถึงที่อุณหภูมิ 35 °C โดยการใช้ Load Control เทียบกับแกนกลางชิ้นงานคังรูปที่ 3.21 เพื่อวัดอุณหภูมิที่แกนกลางชิ้นงานตามที่กำหนด



รูปที่ 3.21 การวางชิ้นงานในการชุบแข็ง



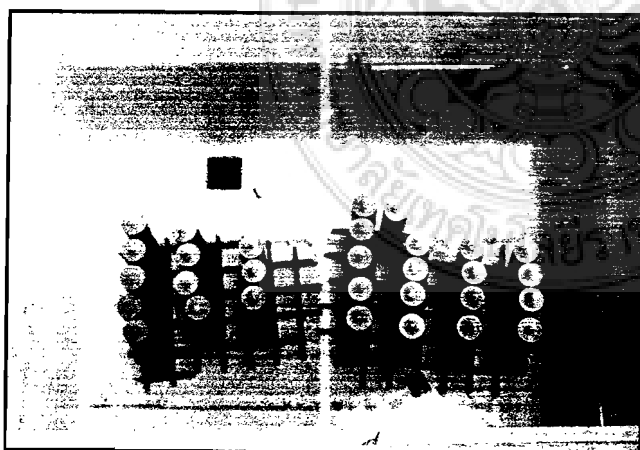
รูปที่ 3.22 การนำชิ้นงานเข้าเตาอบชุบสุญญากาศ

### 3.4.5 กระบวนการทำให้โครงสร้างเสถียรภาพ (Stabilize)

เป็นกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิในการเย็นตัว โดยเปรียบเทียบ 3 อุณหภูมิ คือ นำชิ้นงานที่ชุบแข็งและเย็นตัวถึงอุณหภูมิ 35°C นำออกจากเตาอบสุญญากาศและการแยกชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ 1 ทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535°C เป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยไม่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ดังรูปที่ 3.23 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ทำการบำบัดเย็นเพื่อให้โครงสร้างมีความเสถียรภาพ ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ตามลำดับ



รูปที่ 3.23 การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535 °C



ก)



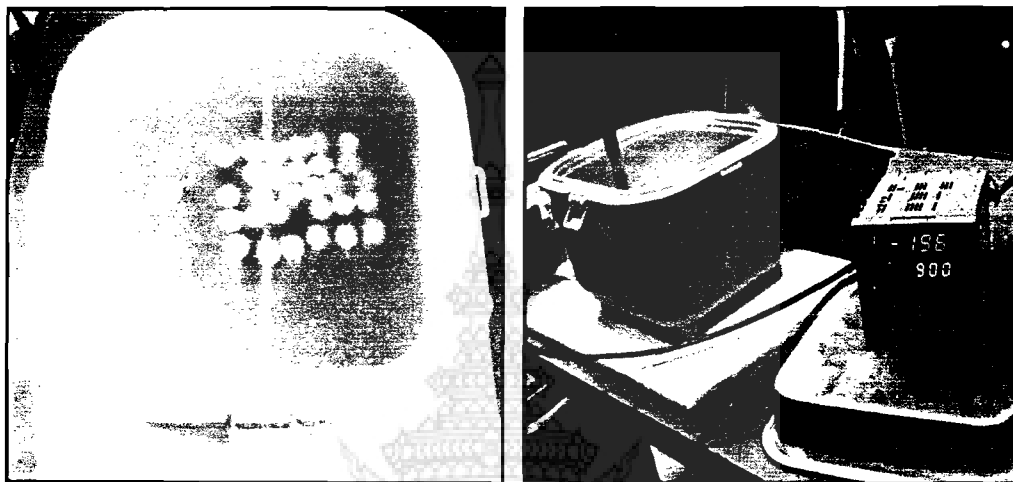
ข)

รูปที่ 3.24 การบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C

ก) แสดงชิ้นงานขณะทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C

ข) แสดงการตรวจวัดอุณหภูมิขณะทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C

การบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  สารที่ซุบคือ น้ำแข็งแห้งกับเมทานอลทำละลายกัน ให้ได้ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  และใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิตดลปได้  $-200^{\circ}\text{C}$  ตรวจสอบอุณหภูมิ เวลาคง อุณหภูมิ 20 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.24



ก)

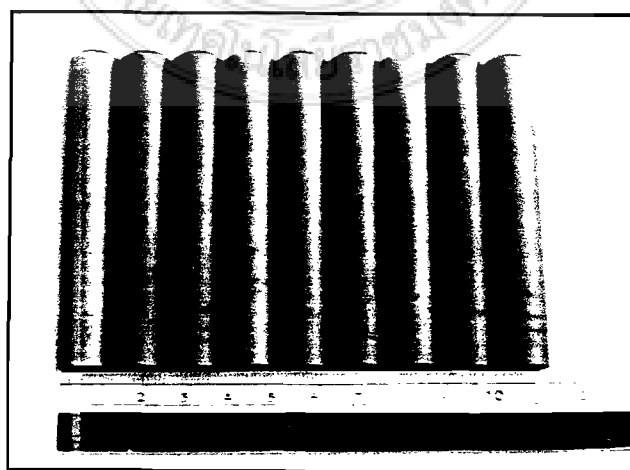
ข)

รูปที่ 3.25 การบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

ก) แสดงชิ้นงานขณะทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

ข) แสดงการตรวจวัดอุณหภูมิขณะทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 3.25 เป็นการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  สารซุบคือ ไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$ ) และใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิตดลปได้  $-200^{\circ}\text{C}$  สอบอุณหภูมิและเวลาคงอุณหภูมิ 20 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.25 ข)

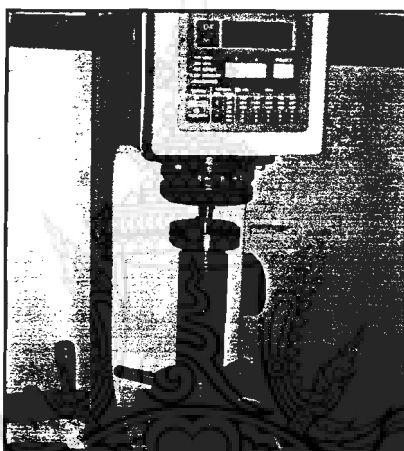


รูปที่ 3.26 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น

### 3.4.5.1 การทดสอบความแข็งหลังจากการชุบแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของวัสดุเอ็นมิลล์หลังการบำบัดเย็นเพื่อนำเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์การทดลองการศึกษากระบวนการบำบัดเย็นและการทดสอบการตัดเฉือน

- ทดสอบความแข็งที่ผิว โดยทดสอบชั้นละ 3 ตำแหน่งนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ตำแหน่งการทดสอบความแข็งที่ผิวมีตามรูปที่ 3.12
- ทดสอบความแข็งแกนกลาง โดยทดสอบชั้นละ 3 ตำแหน่ง นำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ตำแหน่งการทดสอบความแข็งที่แกนกลาง มีดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.27 การทดสอบความที่แกนกลางชิ้นงาน

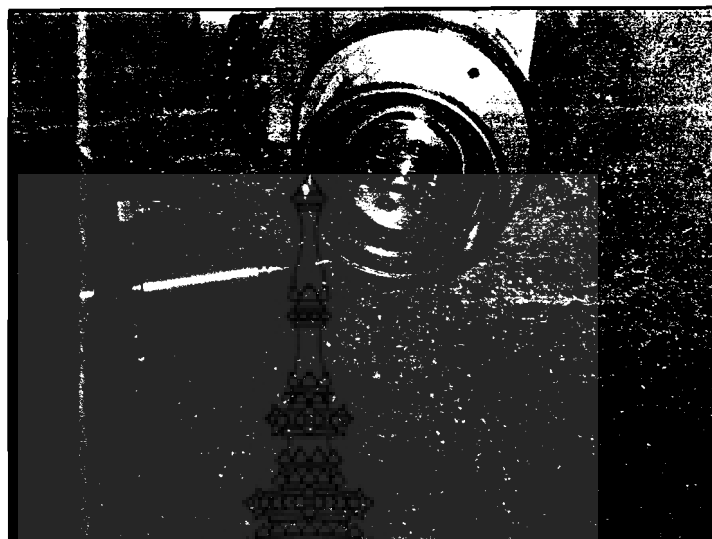
### 3.4.6 การขึ้นรูปเอ็นมิลล์ (Final Grind to size)

นำชิ้นงานที่ผ่านการ Stabilize ทั้งสามอุณหภูมิเจียรไนขึ้นรูปเอ็นมิลล์ โดยขึ้นรูปเป็นเอ็นมิลล์ 2 และ 4 คมตัด ดังรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32 นำมาทดสอบการตัดเฉือนเพื่อเปรียบเทียบการด้านทานการสึกหรอ



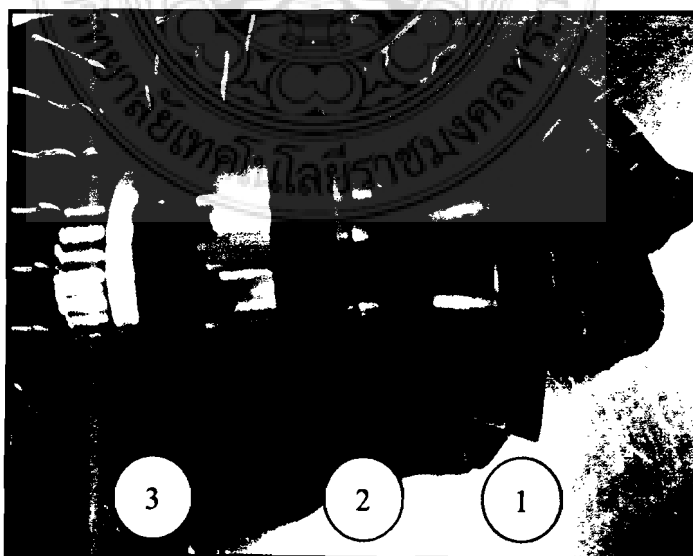
รูปที่ 3.28 การเจียรไนขึ้นรูปเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ด้วยเครื่อง A



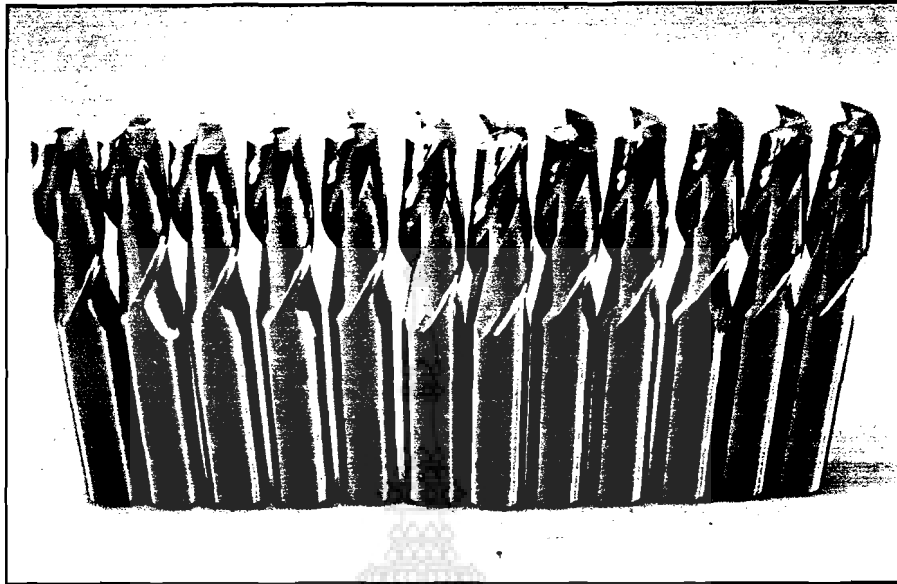


รูปที่ 3.29 การเจียรไนชิ้นรูปเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ด้วยเครื่อง B

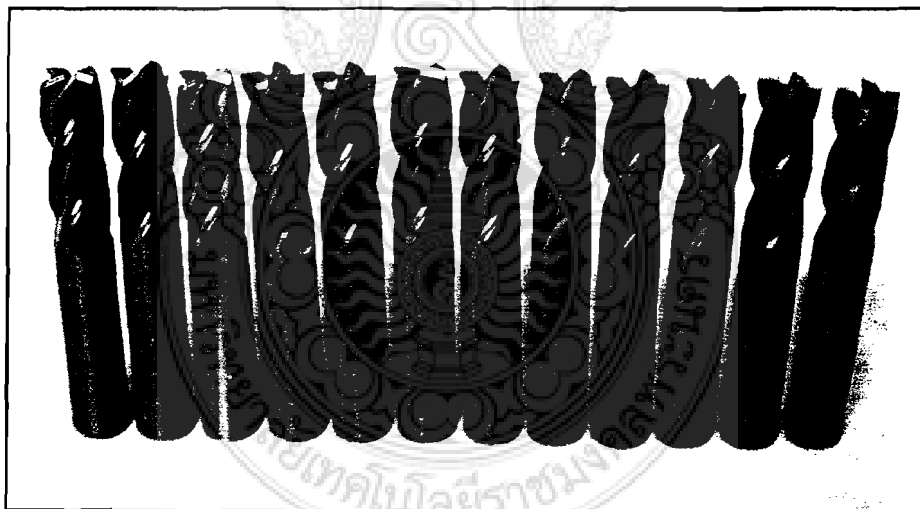
การเจียรไนชิ้นรูปเอ็นมิลล์ 2 และ 4 คมตัด ชิ้นรูปเอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรไน 5 แกน (5-Axis CNC Grinding Machine) โดยใช้หินเพชรในการเจียรไนลักษณะของหินเจียรไนดังรูปที่ 3.30 โดยหินเจียรไน 1 ชุด จำนวน 3 ชิ้น ชิ้นที่ 1 ทำหน้าที่เจียรไนคมตัด ชิ้นที่ 2 เจียรไนร่องฟันของเอ็นมิลล์ ชิ้นที่ 3 เจียรระโนมุ่มต่างๆ ของเอ็นมิลล์



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะของล้อหินเจียรไนสำหรับชิ้นรูปเอ็นมิลล์



รูปที่ 3.31 เอ็นมิลล์ 2 คมตัด



รูปที่ 3.32 เอ็นมิลล์ 4 คมตัด

#### 3.4.7 การตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์

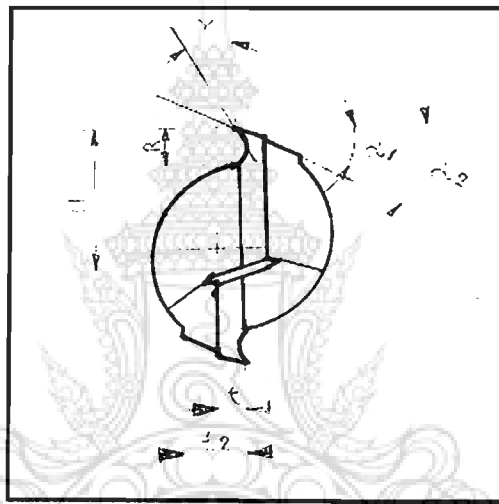
ตรวจสอบขนาดความยาว ความโตเส้นผ่าศูนย์กลางเอ็นมิลล์ และตรวจสอบมุมหลบ (Relief Angle) มุมคายเศษ (Rake Angle) และมุมเอียง (Helix Angle) โดยตรวจสอบทั้งเอ็นมิลล์ 2 และ 4 คมตัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

- เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ความละเอียด 0.01 มม.
- ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มม.

- Measuring Microscope ความละเอียด 0.001 มม.
- Profile Projector กำลังขยาย 50 เท่า ความละเอียด 0.001 มม.

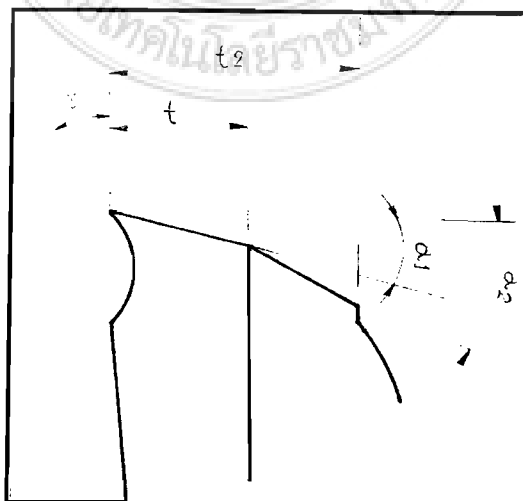
## 2) วิธีการตรวจสอบ

ใช้ไมโครมิเตอร์ตรวจสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเอ็นมิลล์ ตรวจสอบความยาวของเอ็นมิลล์ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และตรวจสอบมุมต่างๆ ของเอ็นมิลล์ โดยใช้เครื่อง Profile Projector ในการตรวจสอบต้องจับยึดเอ็นมิลล์ด้วย V-Block เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่แน่นอน โดยวิธีการวัดมุมต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.32 ถึง 3.34 ตามลำดับ

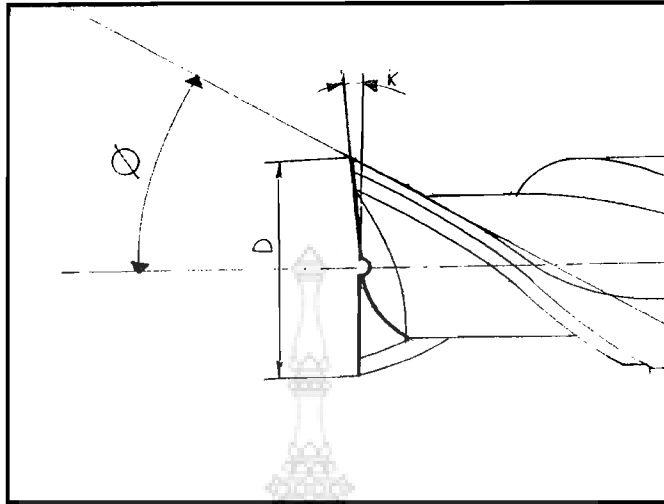


รูปที่ 3.33 มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

จากรูปที่ 3.32 เป็นลักษณะของมุมคายเศษ ( $\gamma$ ) มุมหลบ ( $\alpha_1$ ) ระยะช่วงผิวหลบและส่วนต่างๆ ของบริเวณคมตัด



รูปที่ 3.34 มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์(ต่อ)



รูปที่ 3.35 มุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์(ต่อ)

จากรูปที่ 3.34 เป็นระยะคมตัดมุมคายเศษ ( $\gamma$ ) มุมหลบ ( $\alpha'_1$ ) มุมหลบรอง ( $\alpha'_2$ ) จากรูปที่ 3.35 การวัดมุมเฉียง (Helix angle) ( $\phi$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และมุม มุมหลบในแนวแกน (Radial Relief Angle) (K)

จากรูปที่ 3.33-3.35 แสดงมุมและขนาดต่างๆ ในการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เช่น ความยาวของคมตัด (Length of Cut) มุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake Angle) มุมเฉียง (Helix Angle) มุมหลบในแนวแกน (Axial Relief Angle) มุมหลบในแนวรัศมี (Radial Relief Angle) มุมหลบรองในแนวรัศมี (Secondary Relief Angle) หรือ มุมหลบ โดยใช้เครื่อง Profile Projector ในการตรวจสอบ ตามรูปที่ 3.36



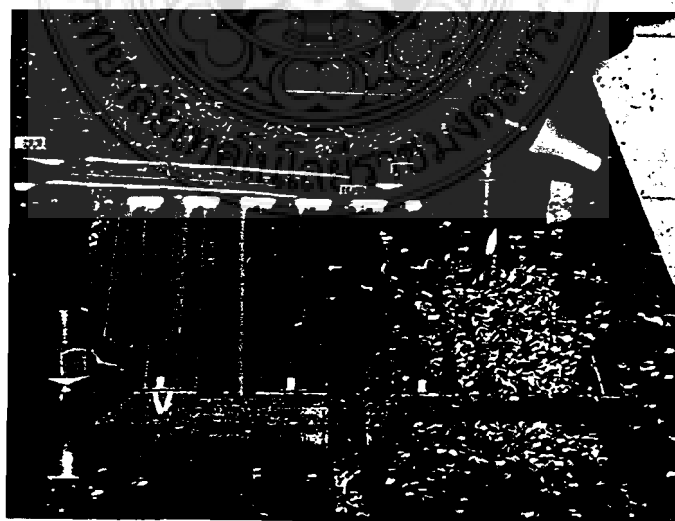
รูปที่ 3.36 การตรวจสอบมุมและขนาดเอ็นมิลล์

### 3.4.9 ทดสอบการตัดเฉือน

การทดสอบการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) ทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. โดยตรวจสอบการสึกหรอทุกๆ ระยะ 1000 มม. เงื่อนไขในการทดสอบการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 2 กมตัด ตามตารางที่ 3.6 และเงื่อนไขในการทดสอบการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 4 กมตัด ตามตารางที่ 3.7

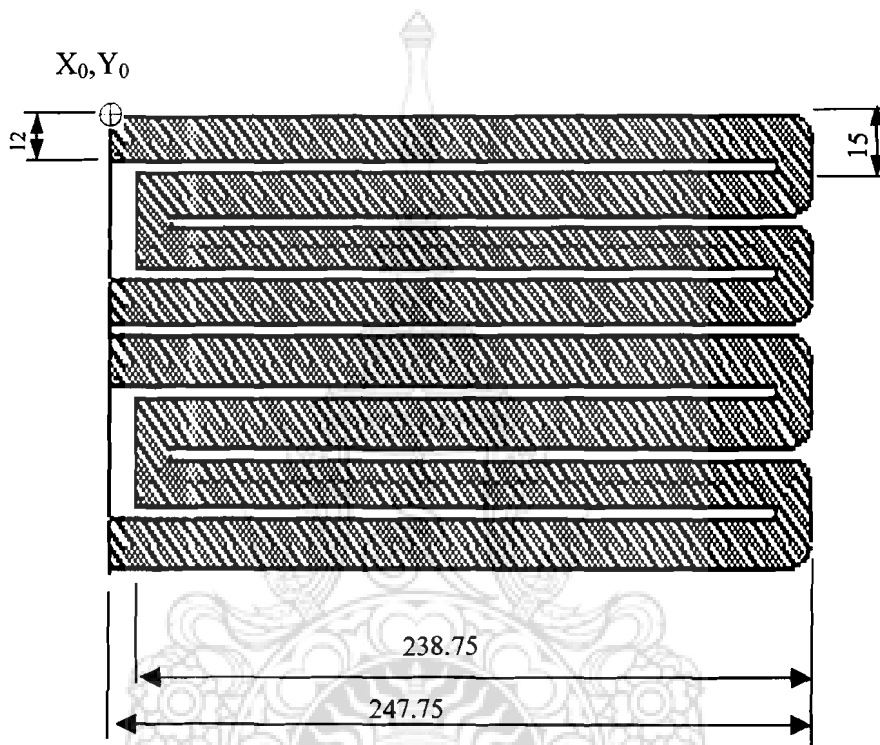


รูปที่ 3.37 การประกอบเอ็นมิลล์ในทดสอบการตัดเฉือน



รูปที่ 3.38 แสดงการตัดเฉือนของ (CNC Milling)

วิธีการจับยึดชิ้นงาน ให้จับยึดในแนวระดับและทำความสะอาดชิ้นงานและแท่นจับงานก่อนการจับยึดชิ้นงาน เพื่อให้ง่ายต่อการจับยึดและงานจะอยู่ในแนวระดับกับแท่นเครื่องกัดตามรูปที่ 3.38 และกำหนดให้ปลายเอ็นมิลล์ยาว  $40 \pm 0.05$  มม. สำหรับเอ็นมิลล์ 4 คมตัดส่วน 2 คมตัดยาว  $45 \pm 0.05$  มม. ตามรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.39 เส้นทางการตัดเฉือนในการทดสอบ

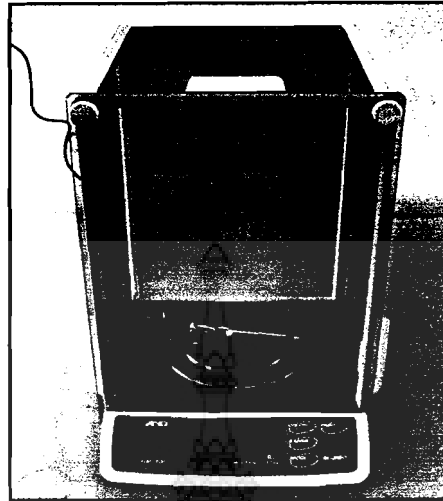
#### 3.4.8 การตรวจสอบการสึกหรอ

การตรวจสอบการสึกหรอแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ การตรวจสอบน้ำหนักของเอ็นมิลล์ การตรวจวัดระยะการสึกหรอและการตรวจสอบการสึกหรอ โดยรูปถ่าย

##### 3.4.8.1 การตรวจสอบโดยการชั่งน้ำหนัก

- ตรวจสอบน้ำหนักก่อนการตัดเฉือน โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาน้ำหนักก่อนการทดสอบการตัดเฉือน ชั่งน้ำหนักทุกชิ้นที่ใช้ในการทดสอบการตัดเฉือน เพื่อนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงหลังการตัดเฉือน ชั่งน้ำหนักต้องทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

- ตรวจสอบน้ำหนักหลังการตัดเฉือน โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาน้ำหนักหลังการตัดเฉือนเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนการตัดเฉือน โดยชั่งน้ำหนักทุกๆ ระยะ 1000 มม. เพื่อตรวจสอบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของเอ็นมิลล์ที่เกิดในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง



รูปที่ 3.40 การชั่งน้ำหนักเอ็นมิลล์

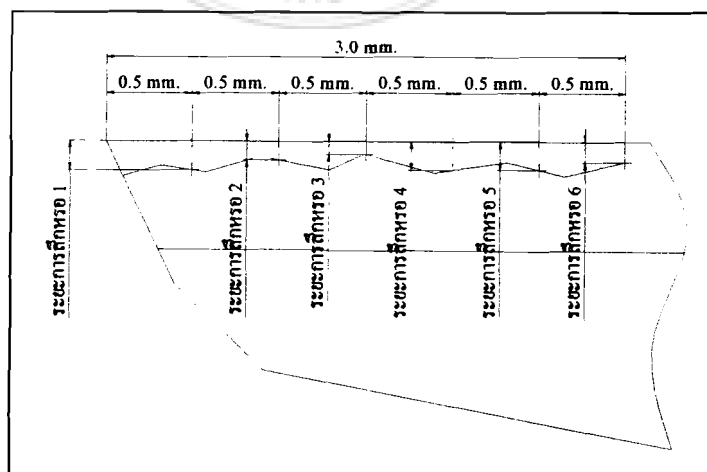
การชั่งน้ำหนัก จะชั่งน้ำหนัก 3 ครั้งต่อเอ็นมิลล์ 1 คอก นำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง และก่อนการชั่งน้ำหนักต้องเซตน้ำหนักของเครื่องชั่งให้อยู่ที่จุด 0.0000 กรัม

#### 3.4.8.2 การวัดระยะการสึกหรอ

โดยใช้เครื่อง Measuring Microscope ในการตรวจสอบคมตัดของเอ็นมิลล์เพื่อวัดระยะการสึกหรอแต่ละคมตัดเพื่อเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ในแต่ละอุณหภูมิ

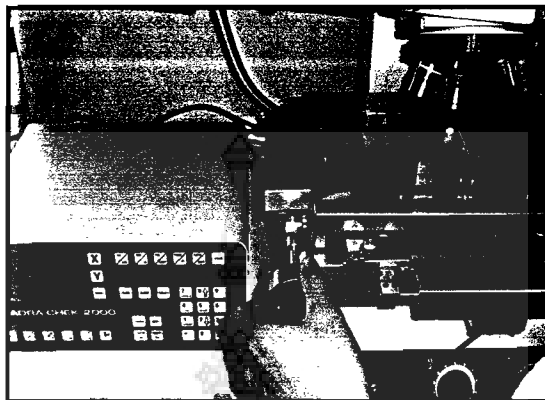
- วิธีการวัดระยะการสึกหรอ

วัดระยะการสึกหรอทุกๆ ระยะทางการตัดเฉือน 1000 มม. โดยวัดระยะการสึกหรอทุกคมตัด โดยการกำหนดวิธีการวัดดังนี้ วัดจากปลายของคมตัดถึงระยะของการป้อนลึกในการตัดเฉือน โดยป้อนระยะในการวัดครั้งละ 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.41 และมีอุปกรณ์จับยึดเพื่อช่วยในการหาค่าแห่งการวัดและการวัดอ้างอิงกับมุม Helix Angle เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำในการวัด โดยใช้เครื่อง Measuring Microscope ในการตรวจสอบดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 ระยะการวัดการสึกหรอ

จากรูปที่ 3.41 การวัดระยะการสึกหรอคมตัดด้านข้างของเอ็นมิลล์ คือวัดจากระยะอ้างอิงไปถึงระยะที่มีการสึกหรอแล้วนำค่าที่วัดได้มาลบกับค่า (t) จะได้ค่าอัตราการสึกหรอในแต่ละระยะดังรูป



รูปที่ 3.42 วัดการสึกหรอโดยเครื่อง Measuring Microscope

#### 3.4.8.3 วิธีการตรวจสอบการสึกหรอโดยรูปถ่าย

ตรวจสอบการสึกหรอโดยการถ่ายรูปคมตัดของเอ็นมิลล์แต่ละเงื่อนไขที่ผ่านการทดสอบการตัดเฉือนทุกๆระยะการทดสอบ 1000 มม. ถึง 3000 มม. โดยถ่ายบริเวณระยะของการป้อนลึกในการตัดเฉือน

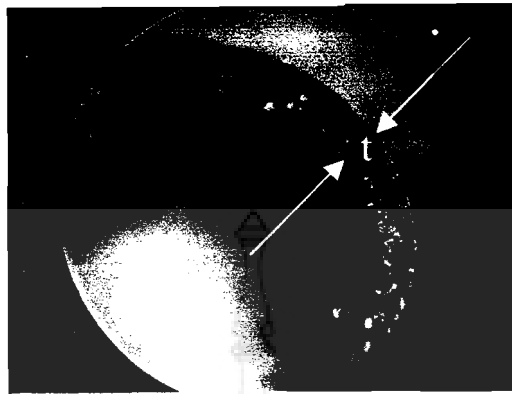


รูปที่ 3.43 ตรวจสอบการสึกหรอโดยการถ่ายรูปคมตัด

#### 3.4.8.4 การวัดขนาดเศษตัด

ตรวจสอบวัดความหนาเศษตัดของแต่ละเงื่อนไขที่ผ่านการทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทางการตัดเฉือน 3000 มม. โดยวัดขนาดของเศษตัดเริ่มตัดเฉือนและหลังตัดเฉือนทุกๆ ระยะ 1000 มม. ดังภาพที่ 3.44 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมุมคมตัด โดยใช้เครื่อง Measuring Microscope ในการตรวจสอบดังรูปที่ 3.44





รูปที่ 3.44 การวัดความหนาเศษตัดกำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 3.45 การวัดขนาดของเศษตัด

### 3.5 การบันทึกและรวบรวมผลการทดลอง

ทำการบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบ โดยละเอียดเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยใช้เครื่องมือช่วยในการจดบันทึกและรวบรวมผลคือ

1) ตารางบันทึกผลการทดลอง โดยการนำตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง เพื่อง่ายต่อการนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ เช่น ตารางบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ ตารางบันทึกผลการชั่งน้ำหนัก ตารางบันทึกผลการวัดเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิต เป็นต้น

2) แผนภูมิ โดยการเขียนแผนภูมินั้นเพื่อแสดงขั้นตอนในการปฏิบัติงานที่ทดลองเพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปตามแผนที่ได้กำหนดไว้

3) กราฟ เมื่อได้ข้อมูลจากการทดลอง นำข้อมูลมาทำกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้กราฟเส้นและกราฟแท่งในการเปรียบเทียบผลการทดลอง

4) รูปภาพในการทดลองขั้นตอนต่าง ๆ จะมีการถ่ายรูปเก็บไว้เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการทดลอง โดยแสดงขั้นตอนการทำงานแสดงการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองและแสดงผลที่ได้จากการทดลองในส่วนต่างๆ เช่น เป็นข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบเกี่ยวกับการศึกษาของเอ็นมิลล์ โครงสร้างของเอ็นมิลล์ และส่วนผสมทางเคมี เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบก่อนทดลองและหลังทดลองเพื่อประกอบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำแบบฟอร์มรายงานผลการทดลองเพื่อใช้ในการนำเสนอผลการทดลองในบทที่ 4 ต่อไปโดยแบ่งออกเป็น 6 แบบคือ

1) รายงานผลโครงสร้างของเอ็นมิลล์ วิเคราะห์โครงสร้างของเอ็นมิลล์เปรียบเทียบกันแต่ละเงื่อนไขและเอ็นมิลล์ที่ไม่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น โดยการถ่ายภาพ โครงสร้างเปรียบเทียบ (ตามภาคผนวก ฉ.)

2) รายงานส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์ วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์เปรียบเทียบข้อมูลโดยการทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (ตามภาคผนวก ง.)

3) รายงานผลการทดสอบความแข็ง เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแข็งของเอ็นมิลล์ก่อนการทดลองและหลังการทดลอง โดยการทำการเปรียบเทียบ (ตามภาคผนวก จ.)

4) รายงานผลการศึกษาของเอ็นมิลล์แต่ละเงื่อนไขว่ามีผลการศึกษาเท่าใด วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการศึกษา โดยการทำการเปรียบเทียบการศึกษาคือ

5) รายงานการศึกษาคัดค้านข้าง โดยการถ่ายภาพเพื่อเปรียบเทียบการศึกษาคัดค้าน (ตามภาคผนวก ช.)

6) รายงานผลขนาดความหนาของเศษตัดเพื่อทำการวิเคราะห์มุมเฉือนที่เปลี่ยนไปตามความหนาของเศษตัดวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล โดยการทำการกราฟเส้นเปรียบเทียบ (ตามภาคผนวก ฉ.)

### 3.7 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์และรายงานผลการทดสอบนำมาสรุปหาข้อมูลว่าเอ็นมิลล์ที่เงื่อนไขใดมีประสิทธิภาพการใช้งานดีที่สุด และมีประสิทธิภาพในการต้านทานการศึกษาคัดค้านที่ดีที่สุดส่วนผสมทางเคมีมีผลต่อการศึกษาคัดค้านและประสิทธิภาพการใช้งาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจว่าอุณหภูมิใดในการทดลองการบำบัดเย็นมีประสิทธิภาพดีที่สุด จัดทำการสรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะในบทที่ 5 ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 เงื่อนไขในการทดลอง

จากการผลิตเอ็นมิลล์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ประกอบด้วยการชุบแข็งในเตาอบสุญญากาศ ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ เช่นตัวด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1210°C เวลา คงอุณหภูมิ 2.5 นาที และเย็นตัวถึงอุณหภูมิ 35°C ทำการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70 °C และ -196°C คงอุณหภูมิเป็นเวลา 20 ชั่วโมง อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 535°C จำนวน 3 ครั้ง และขึ้นรูปเป็น เอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรไนอัตโนมัติ จากนั้นทดสอบการตัดเฉือนเหล็กกล้า 1045 ตามมาตรฐาน AISI โดยตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบการสึกหรอ โดยมีเงื่อนไข ทดสอบการตัดเฉือนดัง ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

Revolution Rpm/min	Feed Velocity	Feed Rate	Cutting Speed	Depth of cut	Materials	Hardness (HB)
695	97	0.07	28	3.0	1045	160

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขในการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

Revolution Rpm /min	Feed Velocity	Feed Rate	Cutting Speed	Depth of cut	Materials	Hardness (HB)
665	100	0.04	25	3.0	1045	160

#### 4.2 ผลการทดสอบความแข็ง

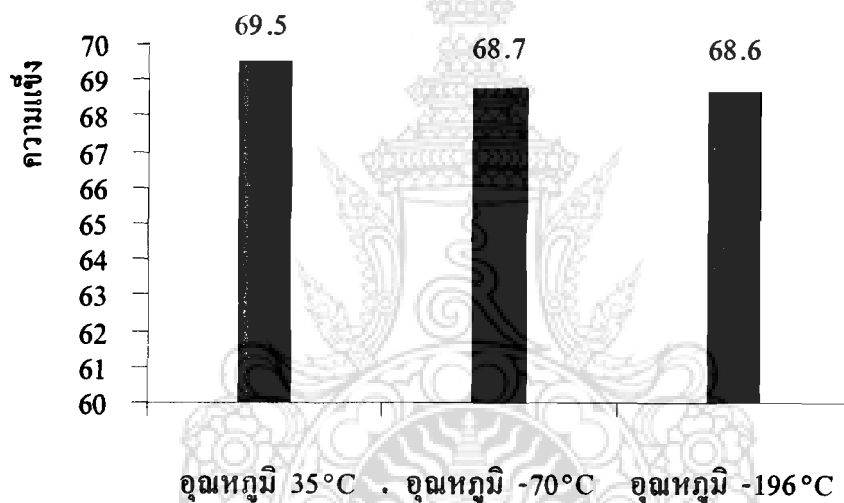
การทดสอบความแข็งของเอ็นมิลล์ตามมาตรฐาน AISI เบอร์ M42 โดยนำเอ็นมิลล์ที่ผ่าน กระบวนการชุบแข็งในอุณหภูมิแต่ละเงื่อนไขมาทดสอบความแข็ง โดยทดสอบอุณหภูมิละ 3 ชิ้น

หมายเหตุ การทดสอบความแข็งที่ผิวชิ้นงานจะต้องบวกค่าความผิดพลาดจากตาราง Handness Conversion Table Mitutoyo 1.0 HRC

#### 4.2.1 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเอ็นมิลล์ในแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ 4.3 ความแข็งที่ผิว

อุณหภูมิบำบัดเย็น	ความแข็ง (HRC)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	เฉลี่ย
อุณหภูมิ 35°C	69.3	69.7	69.5	69.5
อุณหภูมิ -70°C	68.6	68.7	68.9	68.7
อุณหภูมิ -196°C	68.8	68.2	68.7	68.6

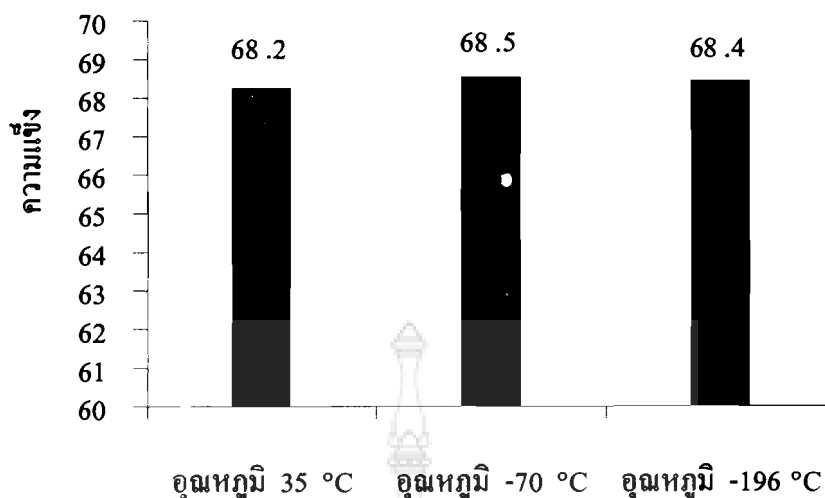


รูปที่ 4.1 ความแข็งที่ผิวของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ

ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวเอ็นมิลล์หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งที่อุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไข ความแข็งของเอ็นมิลล์อยู่ในช่วง 68.6-69.5 HRC โดยเอ็นมิลล์ที่มีความแข็งสูงสุดคือเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C มีความแข็งเท่ากับ 66.5 HRC ส่วนความแข็งของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C มีความแข็งเท่ากับ 68.7 HRC และ 68.6 HRC ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ความแข็งแกนกลาง

อุณหภูมิบำบัดเย็น	ความแข็ง (HRC)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งจุดที่ 3	เฉลี่ย
อุณหภูมิ 35 °C	67.0	68.9	68.7	68.2
อุณหภูมิ -70 °C	67.9	68.6	68.7	68.5
อุณหภูมิ -196 °C	68.0	68.5	68.6	68.4



รูปที่ 4.2 ความแข็งแกนกลางเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ

ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุเอ็นมิลล์ที่แกนกลางหลังผ่านกระบวนการชุบแข็งในอุณหภูมิแต่ละเงื่อนไข ความแข็งของวัสดุเอ็นมิลล์อยู่ในช่วง 68.2 - 68.5 HRC โดยวัสดุเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70 °C มีความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 68.5 HRC ส่วนวัสดุเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35 °C มีความแข็งต่ำสุดเฉลี่ย 68.2 HRC และวัสดุเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -196 °C มีความแข็งเฉลี่ย 68.4 HRC ซึ่งมีความแข็งที่แกนกลางแต่ละอุณหภูมิจึงมีความแข็งใกล้เคียงกัน

#### 4.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง M42 ตามมาตรฐาน AISI และวัสดุชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า 1045 โดยผลการตรวจสอบส่วนผสมเคมี ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

ชนิดของวัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี											
	C	Si	Ma	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Co	Cu
M42	0.983	0.345	0.231	0.512	<0.01	3.69	0.0662	9.17	0.996	1.16	8.15	<0.01
S45C	0.521	0.166	0.64	0.0122	0.0136	0.146	0.0409	0.0133	<.001	<0.1	<0.1	0.145

##### 4.3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเอ็นมิลล์

จากผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่จะนำมาผลิตเอ็นมิลล์ ผลการตรวจสอบปรากฏว่า คาร์บอน(C) มีส่วนผสมต่ำกว่ามาตรฐาน 0.067% โดยน้ำหนัก ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของธาตุ คาร์บอนในเหล็กกล้ารอบสูง มาตรฐาน AISI เบอร์ M42 จะมี คาร์บอน อยู่ในช่วง 1.05 % ถึง 1.15% นอกจากนี้แล้ว ส่วนผสมธาตุต่างๆ เช่น โคบอลต(Co) ทังสเตน(W) โครเมียม(Cr) วานาเดียม (V) และธาตุอื่น ๆ เทียบเท่าเหล็ก M42 ตามมาตรฐาน AISI

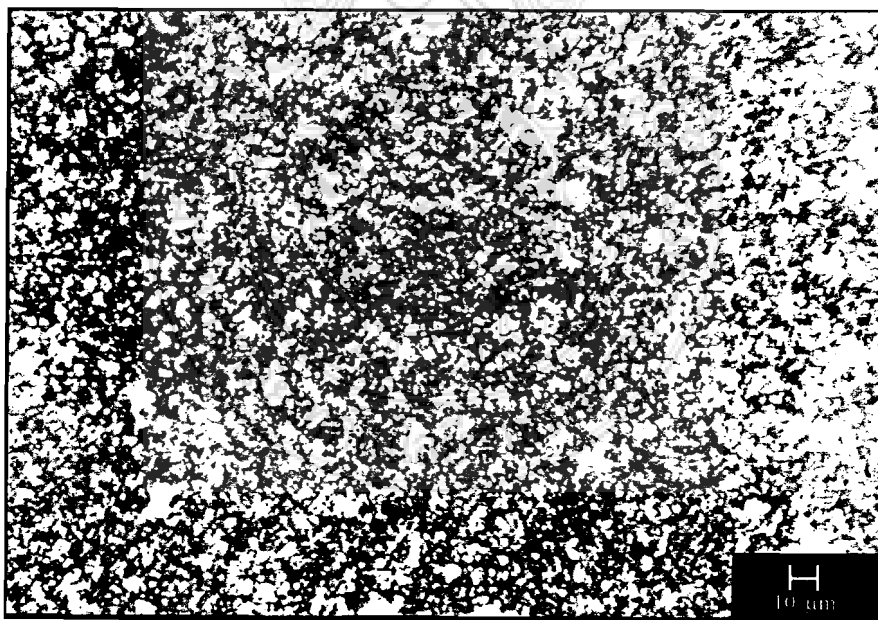
#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีวัสดุชิ้นงาน 1045 มาตรฐาน AISI

จากผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กชิ้นงาน 1045 ผลการตรวจสอบปรากฏ มีธาตุคาร์บอน (C) 0.521%, ซิลิกอน(Si) 0.166%, แมงกานีส (Mn) 0.64 %, โดยเป็นธาตุผสมหลักและจากผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี เหล็กกล้า 1045 เป็นเหล็กกล้าอยู่มาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมปานกลาง

#### 4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเอ็นมิลล์ โดยตรวจสอบตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์ ก่อนการชุบแข็งและหลังการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิ เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละอุณหภูมิ โดยศึกษาโครงสร้างเดิมก่อนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน เพื่อนำมาประกอบการเปรียบเทียบการสึกหรอในการทดสอบกัดัดเดือน และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน 1045 เพื่อประกอบผลการทดลอง

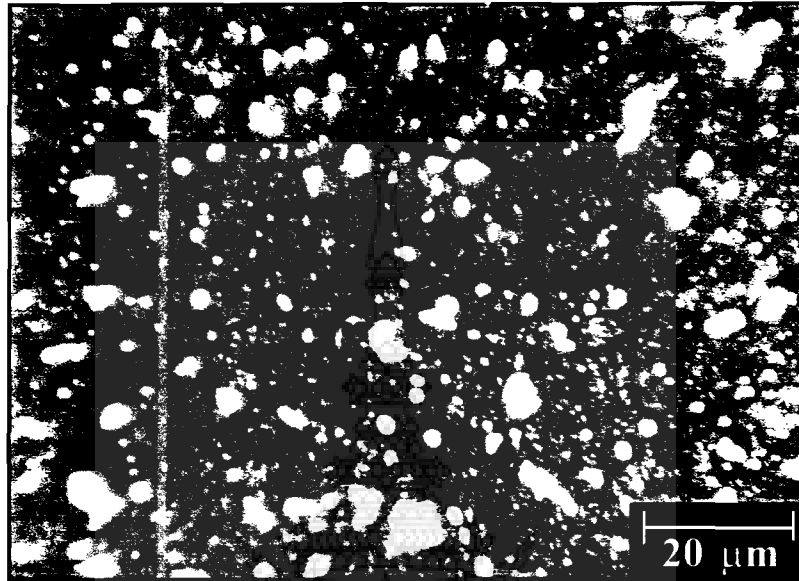
4.4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าอบสูง M42 ก่อนการชุบแข็งของตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์ มีผลดังนี้



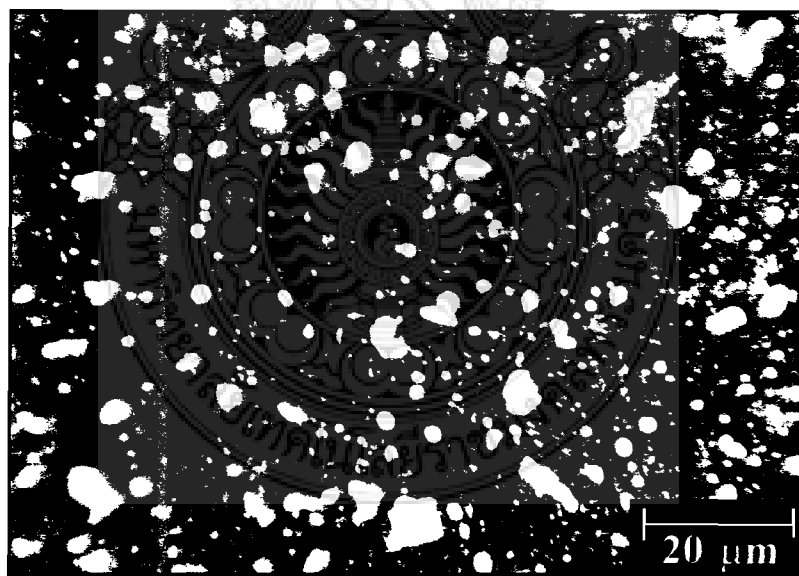
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าอบสูง M42 ก่อนการชุบแข็ง (กำลังขยาย1500 เท่า)

โครงสร้างหลักเป็นเพอร์ไลต์ละเอียดและมีโครงสร้างซีเมนไตท์เจ็ปและในโครงสร้างประกอบด้วยคาร์ไบด์ ขนาดไม่แน่นอนกระจายทั่วไปอย่างเห็นได้ชัดมีขนาดแตกต่างกันค่อนข้างมากและกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ

4.4.2 โครงสร้างทางจุลภาค ตัวอย่างเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C มีผลดังนี้



ก) ผิวขอบกำลังขยาย 1500 เท่า

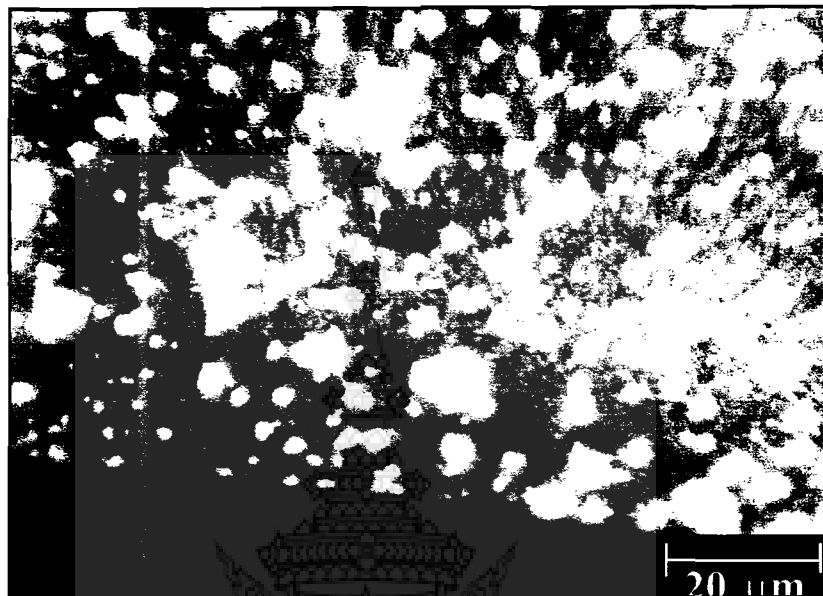


ข) ผิวแกนกลางกำลังขยาย 1500 เท่า

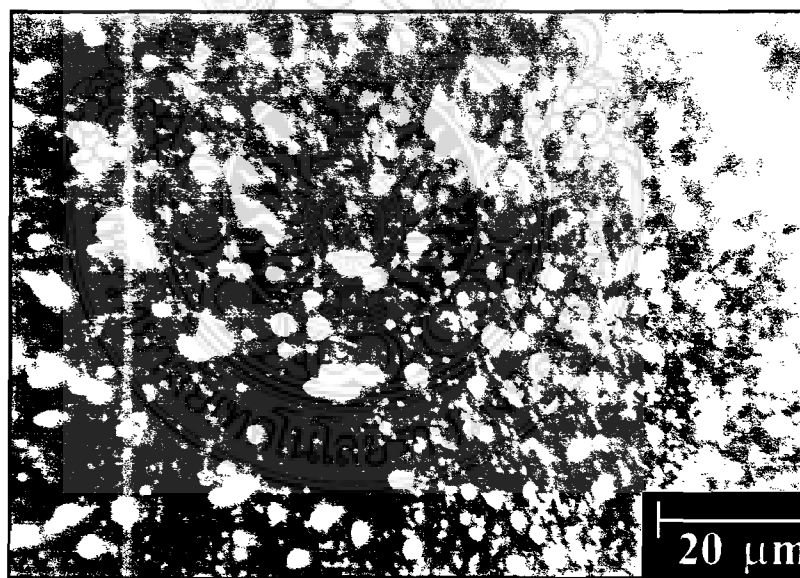
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C

โครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ โครงสร้างไม่ค่อยสมบูรณ์และมีความละเอียดน้อย ซึ่งลักษณะเป็นพื้นที่สีเทาคือมาร์เทนไซต์ และพื้นที่สีขาวเหลืองลักษณะเป็นจุดที่เกิดขึ้น คือ คาร์ไบด์ ซึ่งการกระจายตัวของคาร์ไบด์ยังมีอยู่น้อยไม่สม่ำเสมอขนาดเกรนมีความแตกต่างกัน

#### 4.4.3 โครงสร้างทางจุลภาค ตัวอย่างเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ $-70^{\circ}\text{C}$ มีผลดังนี้



ก) ฝิวขอบกำลังขยาย 1500 เท่า



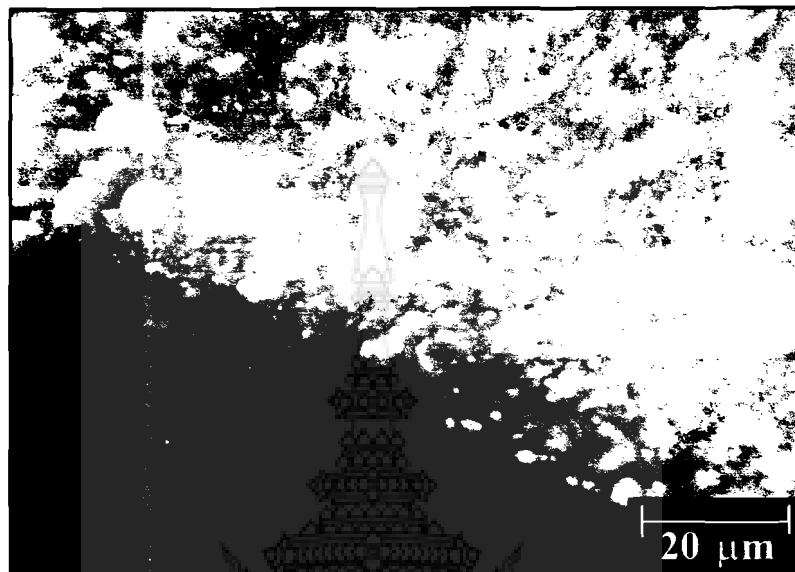
ข) ฝิวแกนกลางกำลังขยาย 1500 เท่า

#### รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ $-70^{\circ}\text{C}$

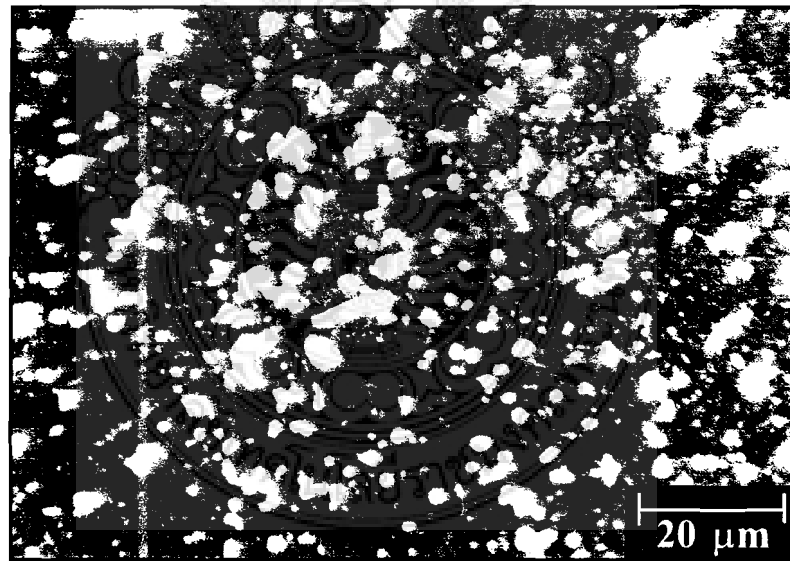
โครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ค่อนข้างสมบูรณ์และมีความละเอียด ซึ่งลักษณะพื้นที่สีเทาคือมาร์เทนไซต์และพื้นที่สีขาวเหลืองลักษณะเป็นจุดที่เกิดขึ้น คือ คาร์ไบด์ ซึ่งการกระจายตัวของคาร์ไบด์มีมากขึ้นและความสม่ำเสมอมากกว่าเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  และขนาดเกรนมีความละเอียดมากขึ้น กระจายตัวเริ่มเป็นระเบียบมากขึ้น



4.4.4 โครงสร้างทางจุลภาค ตัวอย่างเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C มีผลดังนี้



ก) ผิวยอบกำลังขยาย 1500 เท่า

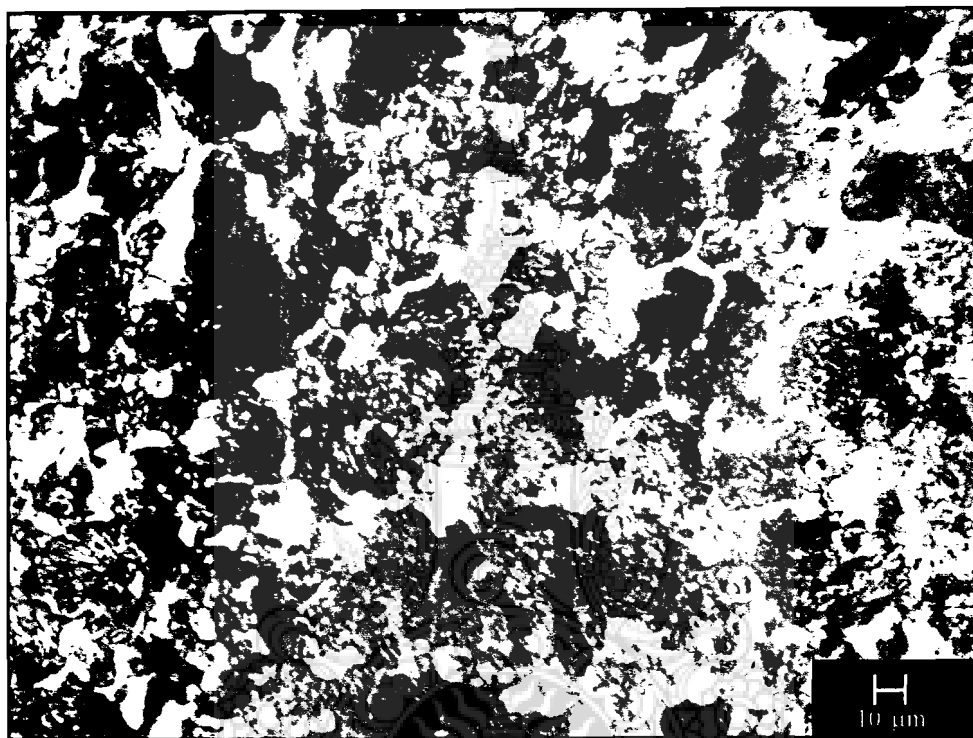


ข) ผิวแกนกลางกำลังขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็น ณ อุณหภูมิ -196°C

โครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์ค่อนข้างสมบูรณ์และมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่สีเทาคือมาร์เทนไซต์ และพื้นที่สีขาวเหลืองลักษณะเป็นจุดที่เกิดขึ้น คือ คาร์ไบด์ ซึ่งคาร์ไบด์มีการกระจายตัวมากขึ้น มีความสม่ำเสมอมากกว่าเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C และเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และขนาดเกรนมีความละเอียด เรียงตัวอย่างมี

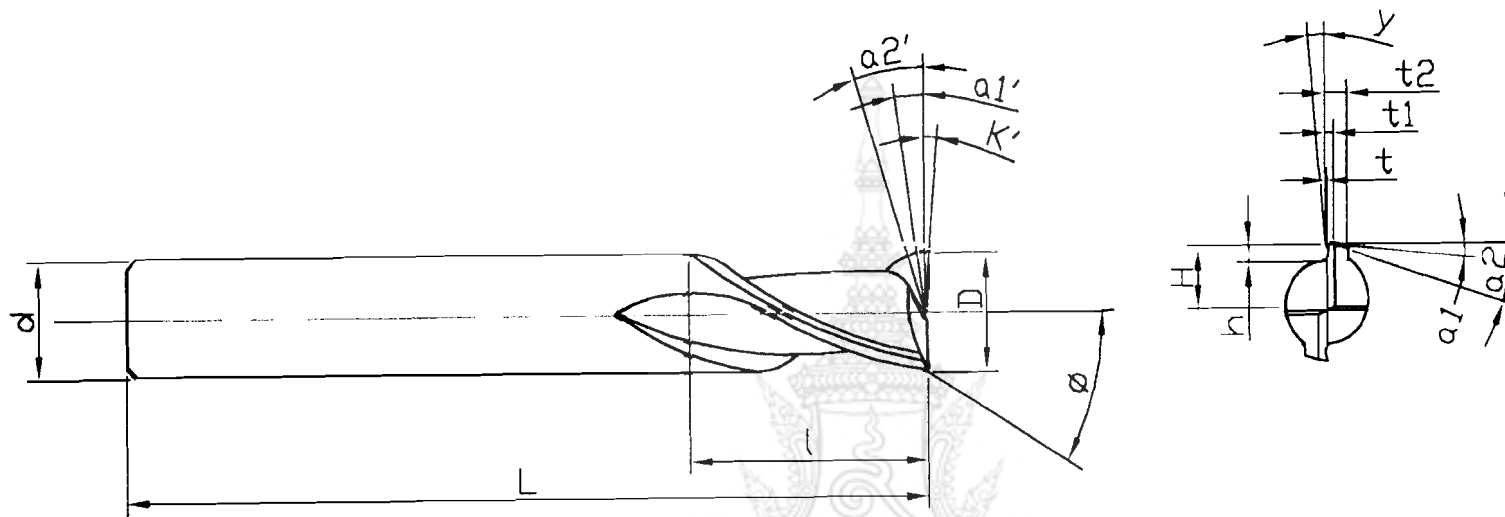
4.4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ตัวอย่างวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า 1045 ตามมาตรฐาน AISI ซึ่งผลการตรวจสอบโครงสร้างปรากฏว่าโครงสร้างจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์กับเพอร์ไรต์ ซึ่งเฟอร์ไรต์จะมีลักษณะสีขาว



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 1045

#### 4.4 ผลตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์

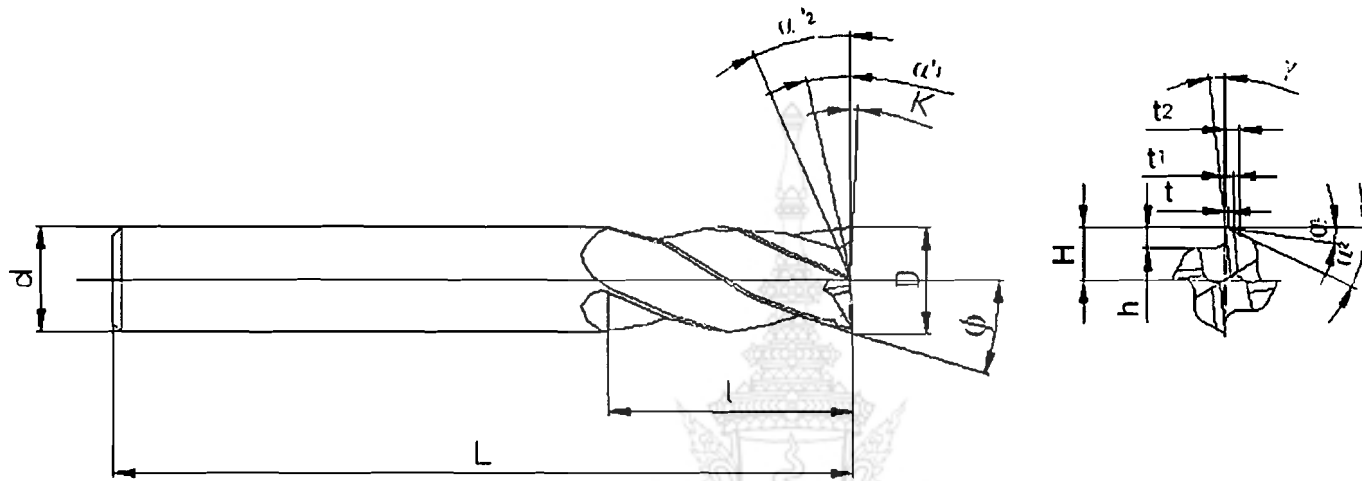
ผลการตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ที่ผลิต แบ่งออกเป็น เอ็นมิลล์ 2 คมตัด และเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ซึ่งตรวจสอบมุมและขนาดต่างๆ ทางรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ เช่น ความยาวของคมตัด (Length of Cut) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคมตัด (Cutting Diameter) มุมคายเศษ ในแนวรัศมี (Radial Rake Angle) มุมเฉียง (Helix Angle) มุมหลบในแนวแกน (Axial Relief Angle) มุมหลบในแนวรัศมี (Radial Relief Angle) มุมหลบรองในแนวรัศมี (Secondary Relief Angle) หรือ มุมหลบโดยผลการตรวจสอบมีขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4. 8 มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 ตมตัด

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 ตมตัด

ประเภทคมตัด	NAME OF END MAIL PARTS																
	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
2 ตมตัด	80.57	31	11.92	11.99	15°42'	29°33'	4°3'	14°2'	11°3'	22°2'	0.74	0.85	1.75	2°2'	6.2	1.80	0.7



รูปที่ 4.9 มุมและขนาดที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ประเภทคมตัด	NAME OF END MALL PARTS																
	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
4 คมตัด	80.55	31	11.92	11.99	8°	29°1'	4°	14°	10°	22°23'	0.73	0.78	1.92	2°	-	1.74	0.7

#### 4.5.1 ผลการตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์

จากขนาดที่กำหนดสำหรับการผลิตเป็นเอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลองของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด คือ มุมคาย  $15^{\circ}31'$  มุมเฉียงของคมตัด  $29^{\circ}37'$  เพื่อเจียรไนขึ้นรูปเป็นเอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรไนอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานโดยโปรแกรมอัตโนมัติ หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ และเมื่อผลิตเป็นเอ็นมิลล์เรียบร้อยแล้วนำมาตรวจวัดขนาดและมุมต่าง ๆ ซึ่งจากการตรวจวัด ทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์มีขนาด Over Length ; L เฉลี่ย 80.57 มม. Cut Length ; l เฉลี่ย 31 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคมตัดเฉลี่ย ; D เฉลี่ย 11.92 มม. มุมคายเศษ  $\gamma$  เฉลี่ย  $15^{\circ}33'$  และมุม Helix Angle;  $\phi$  เฉลี่ย  $29^{\circ}42'$

ขนาดที่กำหนดสำหรับการผลิตเป็นเอ็นมิลล์ 4 คมตัด คือ มุมคายเศษ  $8^{\circ}$  และมุมเฉียงของคมตัด  $29^{\circ}$  เจียรไนขึ้นรูปเป็นเอ็นมิลล์ด้วยเครื่องเจียรไนอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานโดยโปรแกรมอัตโนมัติ หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งและหลังจากผลิตเป็นเอ็นมิลล์เรียบร้อยแล้วนำมาตรวจวัดขนาดและมุมต่าง ๆ ซึ่งผลการตรวจวัดทรงเรขาคณิตเอ็นมิลล์มีขนาด Over Length ; L เฉลี่ย 80.55 มม. Cut Length ; l เฉลี่ย 31 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคมตัดเฉลี่ย ; D เฉลี่ย 11.92 มม. มุมคายเศษ;  $\gamma$  เฉลี่ย  $8^{\circ}$  และมุม Helix Angle;  $\phi$  เฉลี่ย  $29^{\circ}$  ซึ่งจากการตรวจวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ขนาดที่วัดได้ใกล้เคียงกับขนาดที่กำหนดสำหรับการผลิต โดยค่าพิสัยความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับอยู่ในช่วงมากกว่าหรือน้อยกว่าได้ไม่เกิน 1 องศา

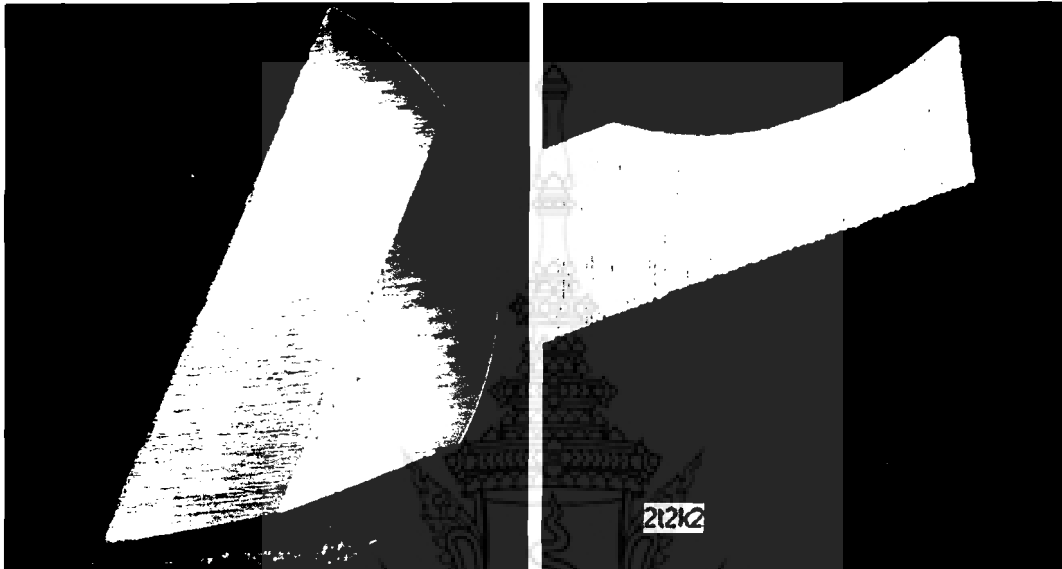
#### 4.6 ผลการทดสอบการสึกหรอ

ผลการทดสอบการตัดเฉือน โดยนำเอ็นมิลล์ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งที่อุณหภูมิ  $1210^{\circ}\text{C}$  เวลาคงอุณหภูมิ 2.5 นาที เป็นตัวที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  และบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  โดยที่เอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  อบคืนตัวที่อุณหภูมิ  $535^{\circ}\text{C}$  จำนวน 3 ครั้ง ส่วนวัสดุเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาคงอุณหภูมิ 20 ชั่วโมง อบคืนตัวที่อุณหภูมิ  $535^{\circ}\text{C}$  จำนวน 3 ครั้ง ทดสอบการตัดเฉือนภายใต้เงื่อนไขเดียวกันในแต่ละประเภทของคมตัดเอ็นมิลล์ โดยทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ไม่ใช้สารหล่อเย็นในการตัดเฉือน ซึ่งแบ่งการตรวจสอบผลการทดสอบการตัดเฉือนดังนี้

##### 4.6.1 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอที่ผิวหยาบ โดยรูปถ่าย

การเปรียบเทียบรูปถ่ายของตัวอย่างเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิของการทดลอง โดยถ่ายรูปคมตัดก่อนทดสอบการตัดเฉือนและหลังการทดสอบการตัดเฉือน โดยใช้กล้องกำลังขยาย 60 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะการสึกหรอที่ผิวหยาบด้านข้างและรูปการสึกหรอผิวหยาบด้านหน้าของคมตัดเอ็นมิลล์ได้ผลดังนี้

4.6.1.1 บริเวณคมตัดด้านหน้าและผิวหลบด้านข้างของเอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่เขียน  
ตัว ฅ อุณหภูมิ 35°C



ก)

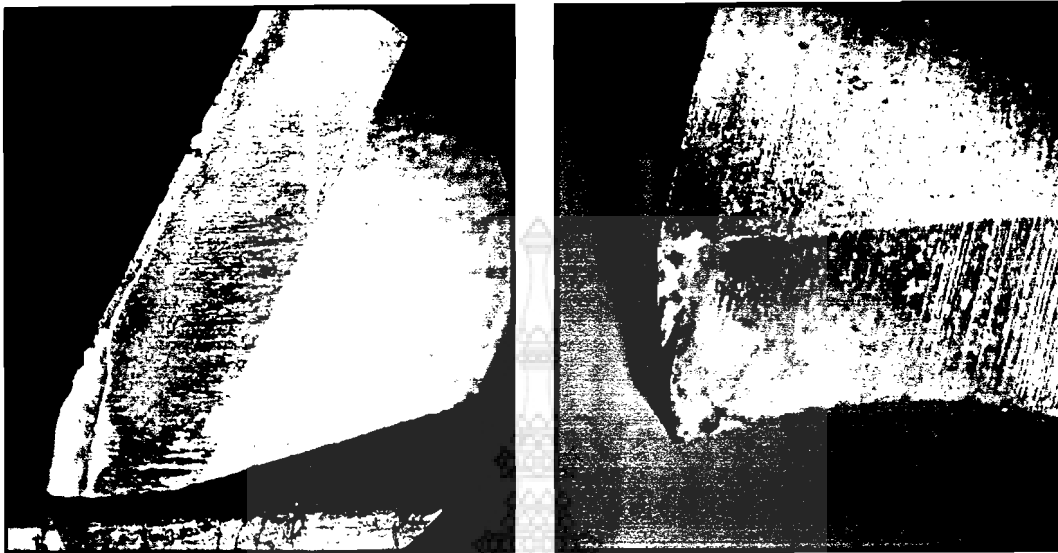
ข)

รูปที่ 4.10 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เขียนตัว ฅ อุณหภูมิ 35°C

- ก) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านข้าง
- ข) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.11 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เขียนตัว ฅ อุณหภูมิ 35°C



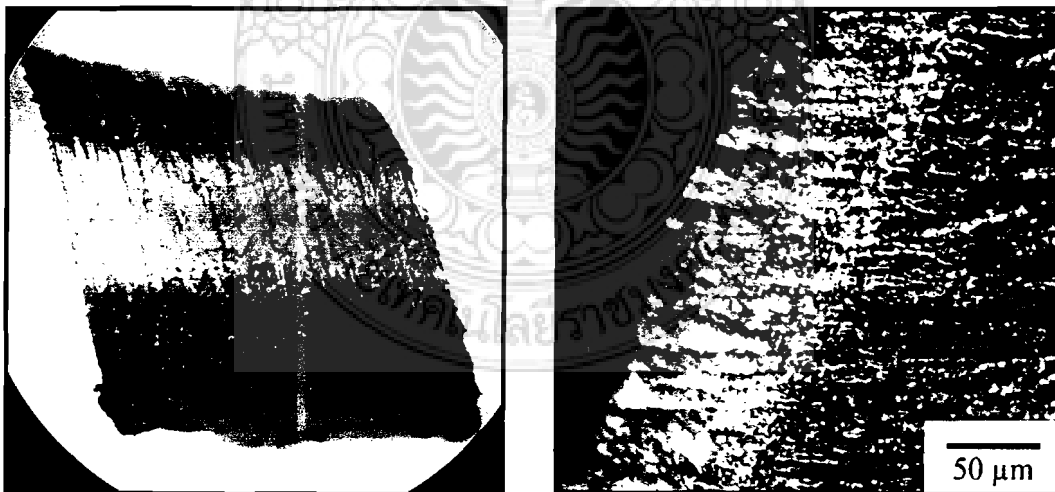
ก)

ข)

รูปที่ 4.12 คมตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ของเอ็นมิลล์ที่เส้นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C

ก) ลักษณะผิวหลบด้านข้างของคมตัดผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.

ข) ลักษณะผิวหลบด้านหน้าของคมตัดผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.



ก)

ข)

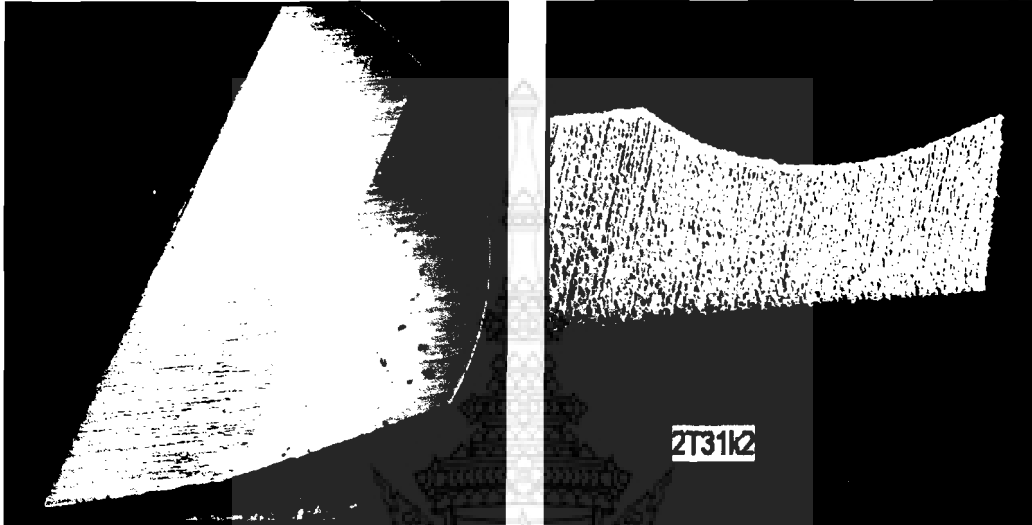
รูปที่ 4.13 เศษตัดและคมตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ของเอ็นมิลล์ที่เส้นตัว

ณ อุณหภูมิ 35°C

ก) เศษคมตัดที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมตัดที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. (250 เท่า)

4.6.1.2 บริเวณคมตัดด้านหน้าและผิวหลบด้านข้างของเอ็นมิลล์ 2 ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



ก)

ข)

รูปที่ 4.14 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$

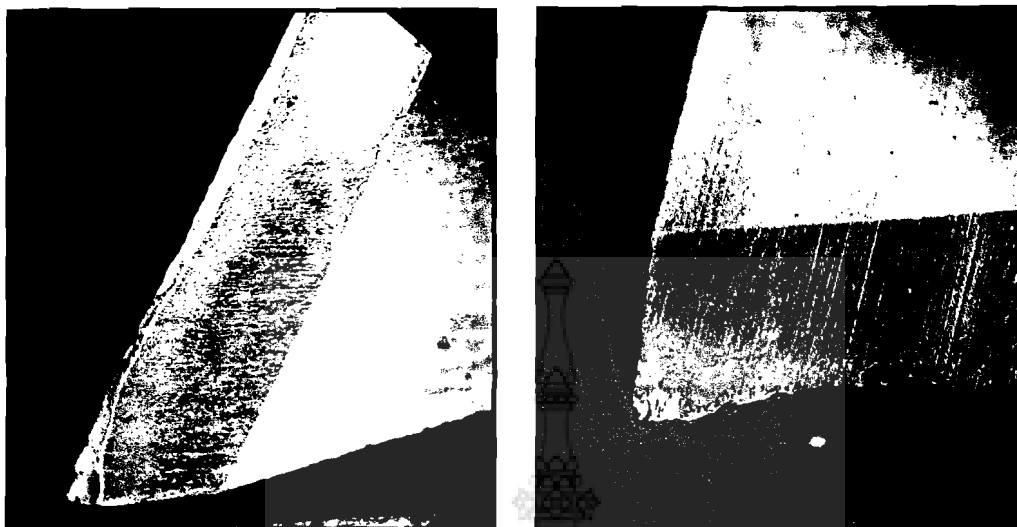
ก) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านข้าง

ข) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.15 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$





ก)

ข)

รูปที่ 4.16 คมตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70°C

ก) ลักษณะผิวหลังด้านข้างของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.

ข) ลักษณะผิวหลังด้านหน้าของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.



ก)

ข)

รูปที่ 4.17 เศษคัตและคมคัต ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70°C

ก) เศษคัตที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมคัตที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. (250 เท่า)

4.6.1.3 บริเวณคมตัดด้านหน้าและผิวหลบด้านข้างของเอ็นมิลล์ 2 ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$



ก)

ข)

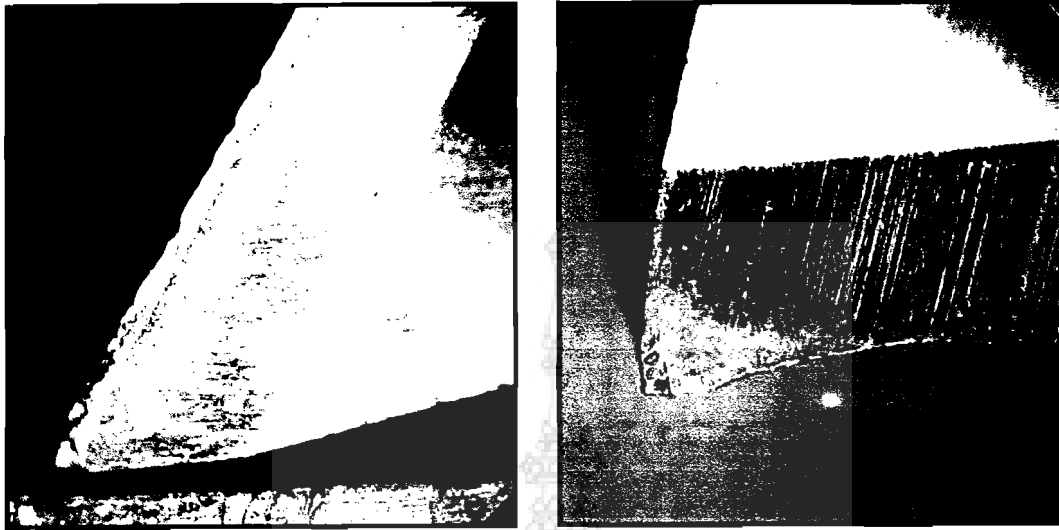
รูปที่ 4.18 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

ก) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านข้าง

ข) ลักษณะผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.19 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$



ก)

ข)

รูปที่ 4.20 คมตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C

ก) ผิวหลังด้านข้างของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน3000 มม.

ข) ผิวหลังด้านหน้าของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน3000 มม.



ก)

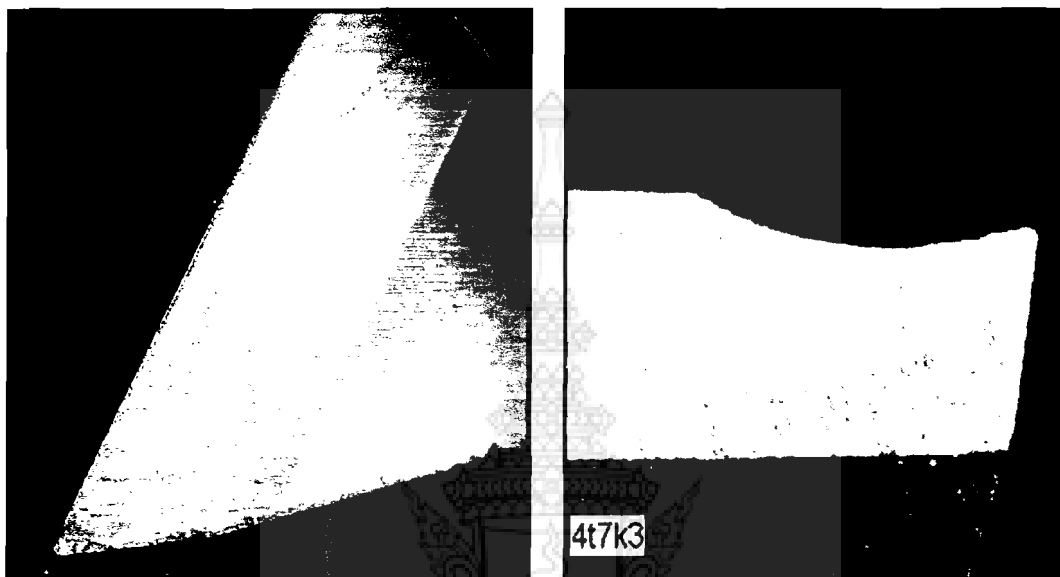
ข)

รูปที่ 4.21 เศษคัตและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-196°C

ก) เศษคัตคัตที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมตัดที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. (250เท่า)

4.6.1.4 บริเวณคมตัดด้านหน้าและผิวหลบด้านข้างของเอ็นมิลล์ 4 ที่เข็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C



ก)

ข)

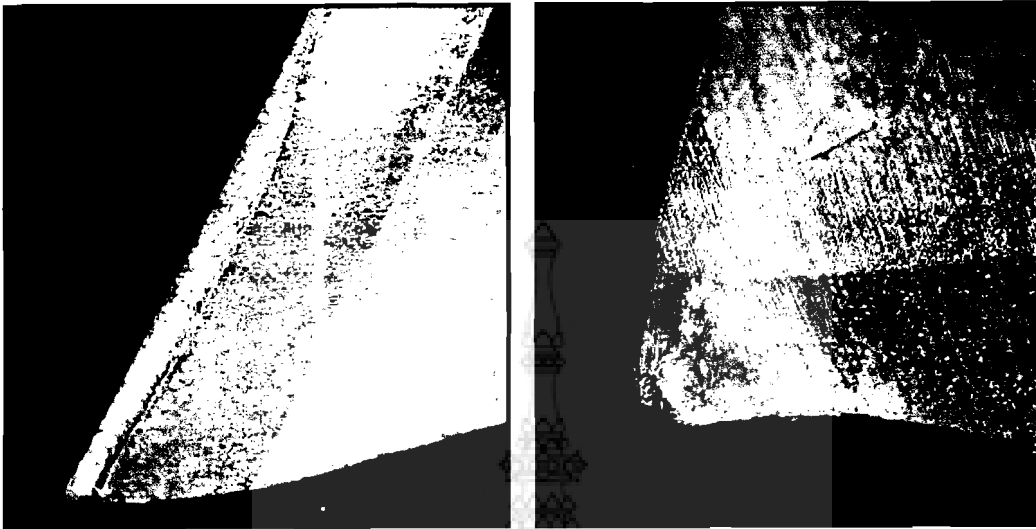
รูปที่ 4.22 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เข็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C

ก) ผิวหลบของคมตัดด้านข้าง

ข) ผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.23 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เข็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C



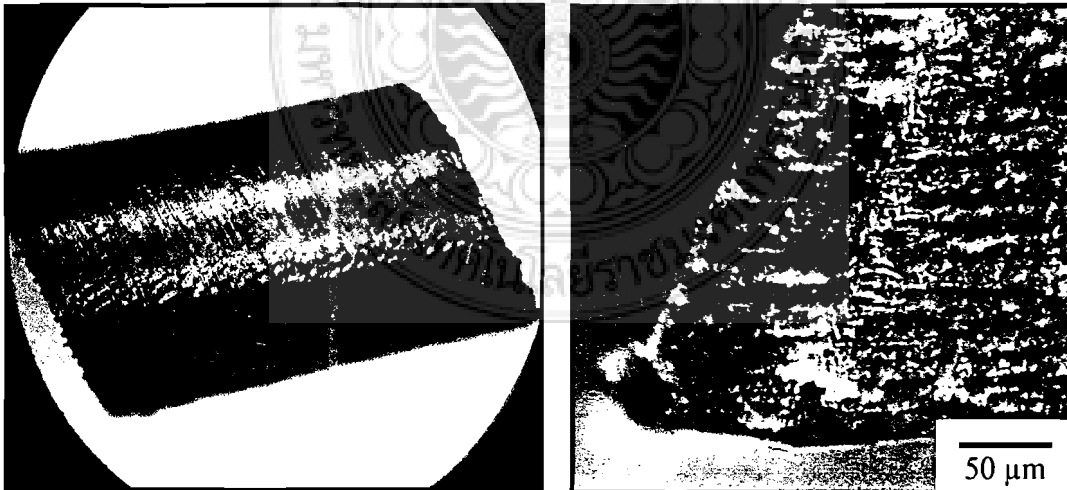
ก)

ข)

รูปที่ 4.24 ตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ $35^{\circ}\text{C}$

ก) ผิวหลบด้านข้างของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน3000 มม.

ข) ผิวหลบด้านหน้าของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน3000 มม.



ก)

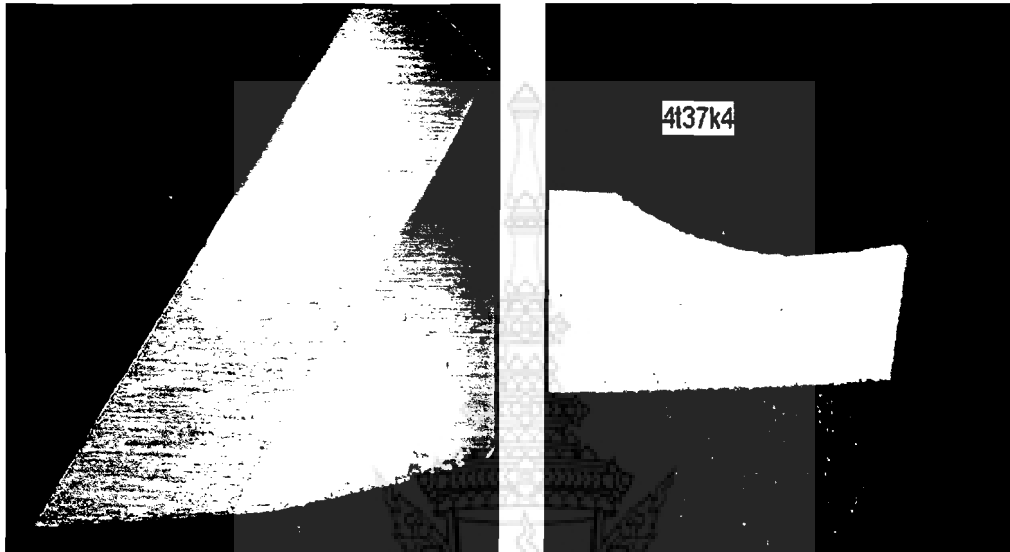
ข)

รูปที่ 4.25 เศษตัดและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ $35^{\circ}\text{C}$

ก) เศษคมตัดที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมตัดที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. (250 เท่า)

4.6.1.5 บริเวณคมตัดด้านหน้าและผิวหลบด้านข้างของเอ็นมิลล์ 4 ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



ก)

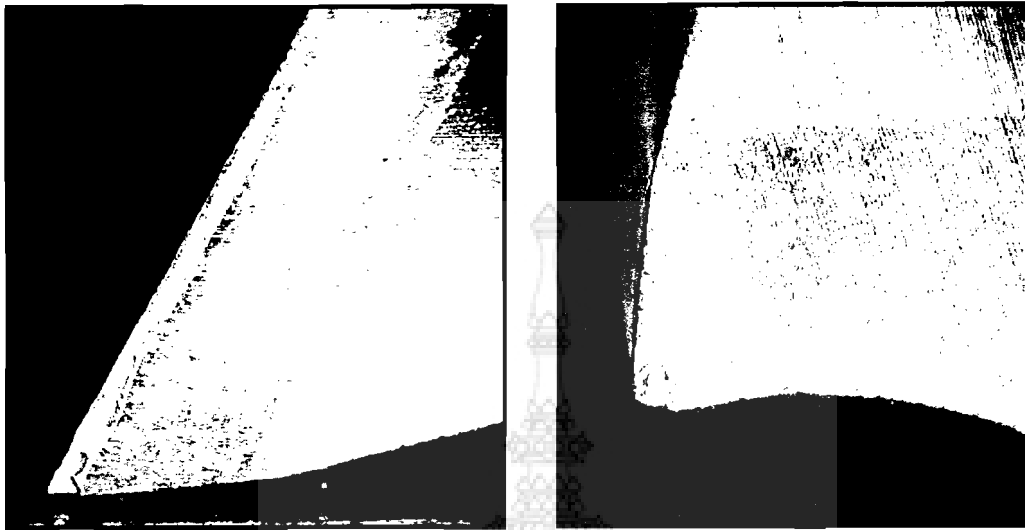
ข)

รูปที่ 4.26 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$

- ก) ผิวหลบของคมตัดด้านข้าง
- ข) ผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.27 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



ก)

ข)

รูปที่ 4.28 ตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70 °C

ก) ผิวหลังด้านข้างของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.

ข) ผิวหลังด้านหน้าของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.



ก)

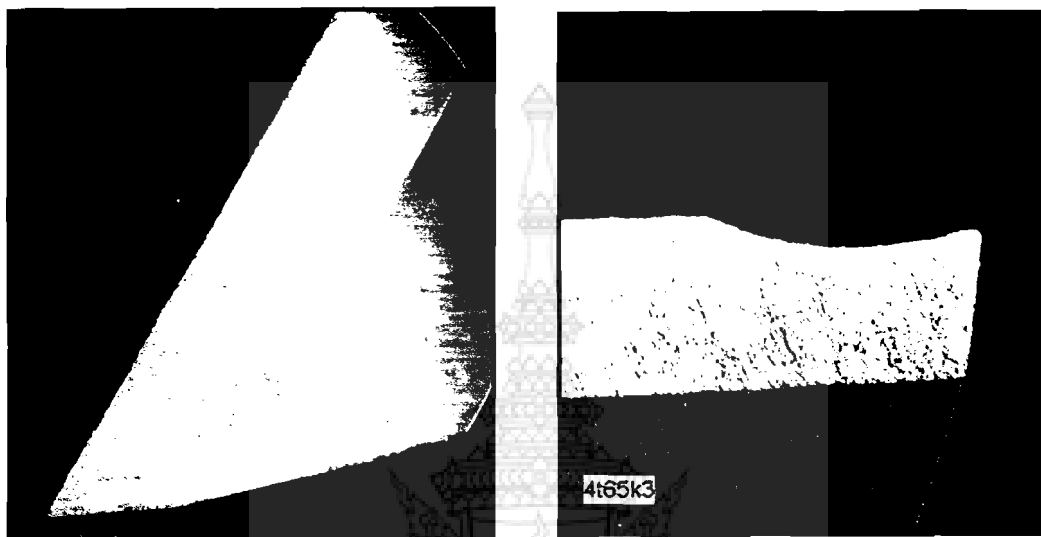
ข)

รูปที่ 4.29 เศษตัดและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70 °C

ก) เศษคมตัดที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมตัดที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. (250 เท่า)

4.6.1.6 บริเวณคมตัดและผิวหลบของเอ็นมิลล์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็น  
ณ อุณหภูมิ-196°C ประเภท 4 คมตัด



ก)

ข)

รูปที่ 4.30 คมตัดก่อนการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ -196°C

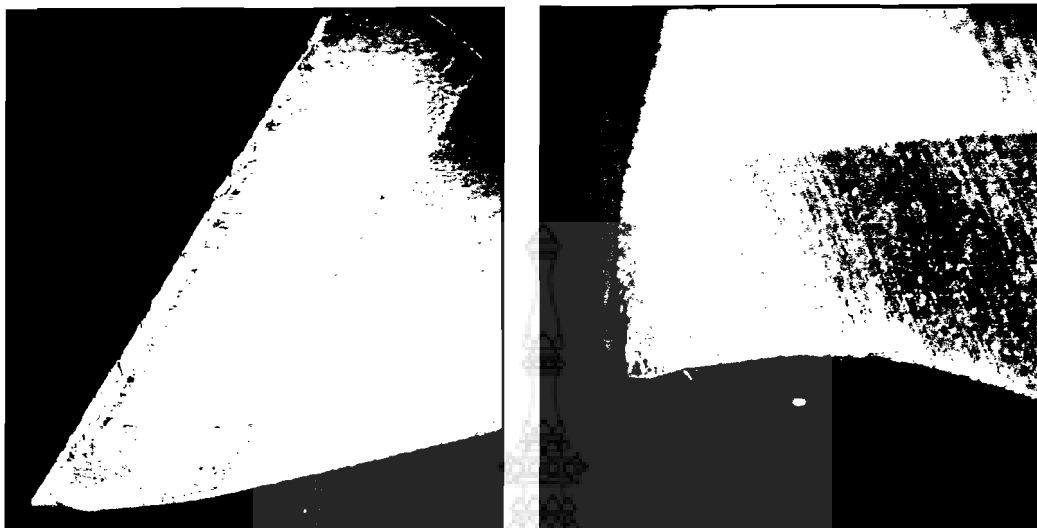
ก) ผิวหลบของคมตัดด้านข้าง

ข) ผิวหลบของคมตัดด้านหน้า



รูปที่ 4.31 เศษตัดเริ่มการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ-70°C





ก)

ข)

รูปที่ 4.32 ตัดผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

ก) ผิวหลังด้านข้างของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.

ข) ผิวหลังด้านหน้าของคมตัดที่ผ่านการตัดเฉือน 3000 มม.



ก)

ข)

รูปที่ 4.33 เศษตัดและคมตัด ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.ของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

ก) เศษคมตัดที่การตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

ข) คมตัดที่ผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ( ขยาย 250เท่า)

4.6.1.2 รูปถ่ายแสดงคมตัดอื่นมิลล์ก่อนการทดสอบการตัดเฉือนและหลังการทดสอบการตัดเฉือน โดยเปรียบเทียบการสึกหรอที่ผิวหลบในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองในแต่ละประเภทของคมตัด แบ่งเป็นอื่นมิลล์ 2 คมตัดและ 4 คมตัด

รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 2 คมตัด บริเวณคมตัดอื่นมิลล์ ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C แสดงให้เห็นระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมีจำนวนมากและรอยการสึกหรอไม่มีความสม่ำเสมอ บริเวณจุดปลายของคมตัดแตกหักเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการสึกหรอกับอื่นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C มีระยะการสึกหรอน้อยกว่า

รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C แสดงให้เห็นการสึกหรอที่บริเวณผิวคมตัดมีระยะการสึกหรอน้อยลงและเริ่มมีระดับการสึกหรอที่สม่ำเสมอมากขึ้น บริเวณจุดปลายของคมตัดมีการสึกหรอน้อยกว่าตัวอย่างอื่นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C

รูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงการสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการบำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -196°C แสดงให้เห็นการสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C และอื่นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ -70°C และมีระยะการสึกหรอน้อยลง บริเวณปลายคมตัดมีการสึกหรอและแตกหักน้อยลง

รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 การสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 4 คมตัดที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C แสดงให้เห็นการสึกหรอที่ไม่สม่ำเสมอของคมตัด 0 และมีระยะการสึกหรอมาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C กับ -196°C และบริเวณปลายคมตัดเกิดการหลอมละลายและแตกหักเล็กน้อย

รูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 การสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 4 คมตัดที่ผ่านการบำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C แสดงให้เห็นถึงการสึกหรอที่ใกล้เคียงกันและระยะการสึกหรอมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C ระยะการสึกหรอมีจำนวนน้อย

รูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 การสึกหรอที่ผิวหลบของตัวอย่างอื่นมิลล์ 4 คมตัดที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -196°C แสดงให้เห็นการสึกหรอที่ไม่สม่ำเสมอของคมตัด แต่คมตัดมีระยะจำนวนการสึกหรอน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นมิลล์ที่ผ่านการเย็น ณ อุณหภูมิ 35°C และตัวอย่างอื่นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C บริเวณปลายของคมตัดเกิดการสึกหรอน้อยลง

#### 4.6.2 ผลการวัดระยะการสึกหรอเอ็นมิลล์

ผลการวัดระยะการสึกหรอเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. โดยตรวจสอบระยะการสึกหรอทุกๆ ระยะ 1000 มม. โดยไม่ใช้สารหล่อเย็นในการทดสอบการตัดเฉือน

##### 4.6.2.1 ผลการวัดระยะการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

ผลการวัดระยะการสึกหรอจากทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. เอ็นมิลล์ที่มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบน้อยที่สุดคือเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  โดยมีระยะการสึกหรอเท่ากับ 0.137 มม. และ 0.138 มม. ตามลำดับ ซึ่งมีระยะการสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเอ็นมิลล์ที่มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมากที่สุดคือ เอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบเท่ากับ 0.164 มม.

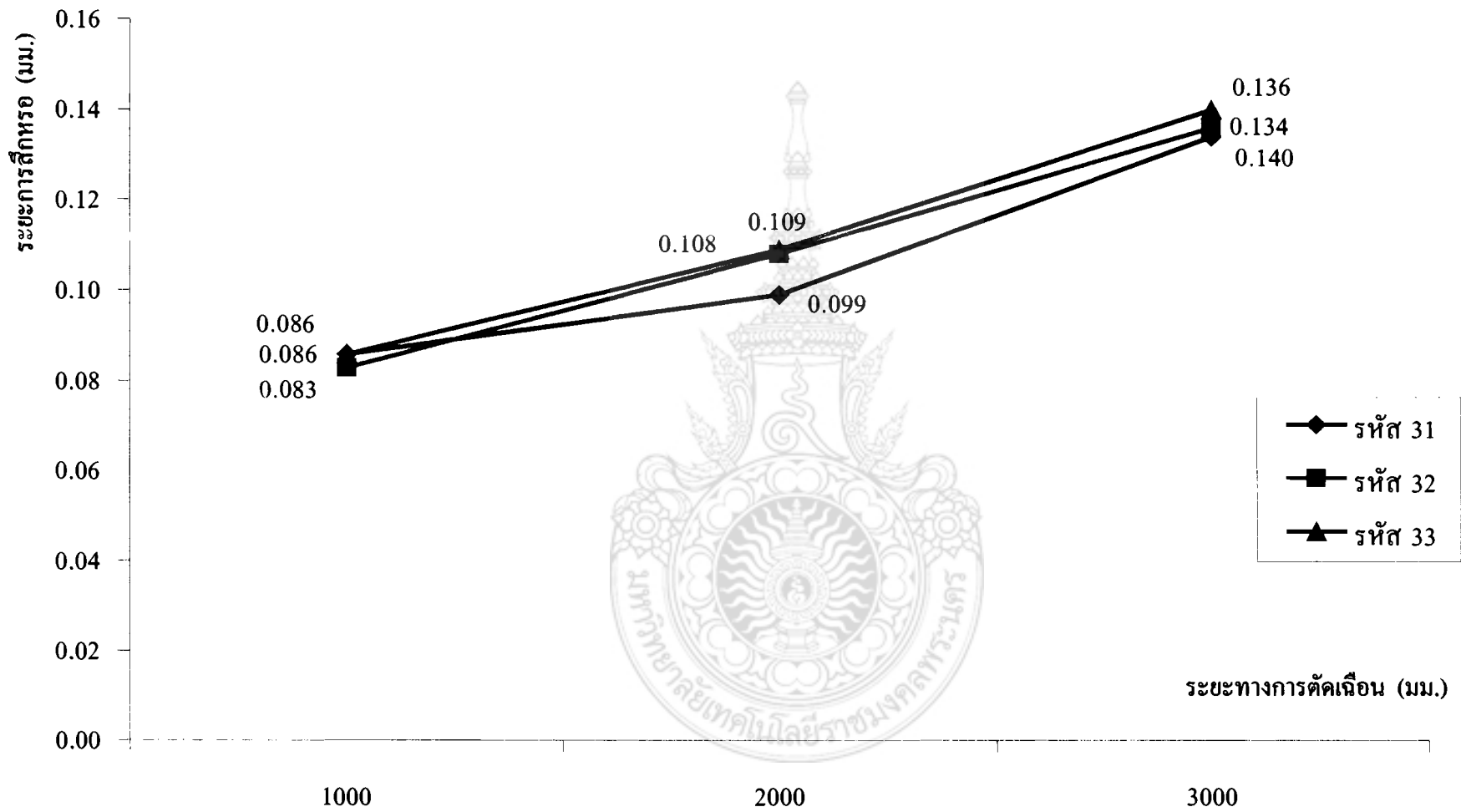
##### 4. 6.2.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ผลการวัดระยะการสึกหรอจากทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ผลการทดสอบการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ที่มีระยะการสึกหรอน้อยที่สุดคือ เอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอที่เท่ากัน โดยมีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบเท่ากับ 0.138 มม. ส่วนเอ็นมิลล์ที่มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบมากที่สุดคือ เอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบเท่ากับ 0.141 มม.

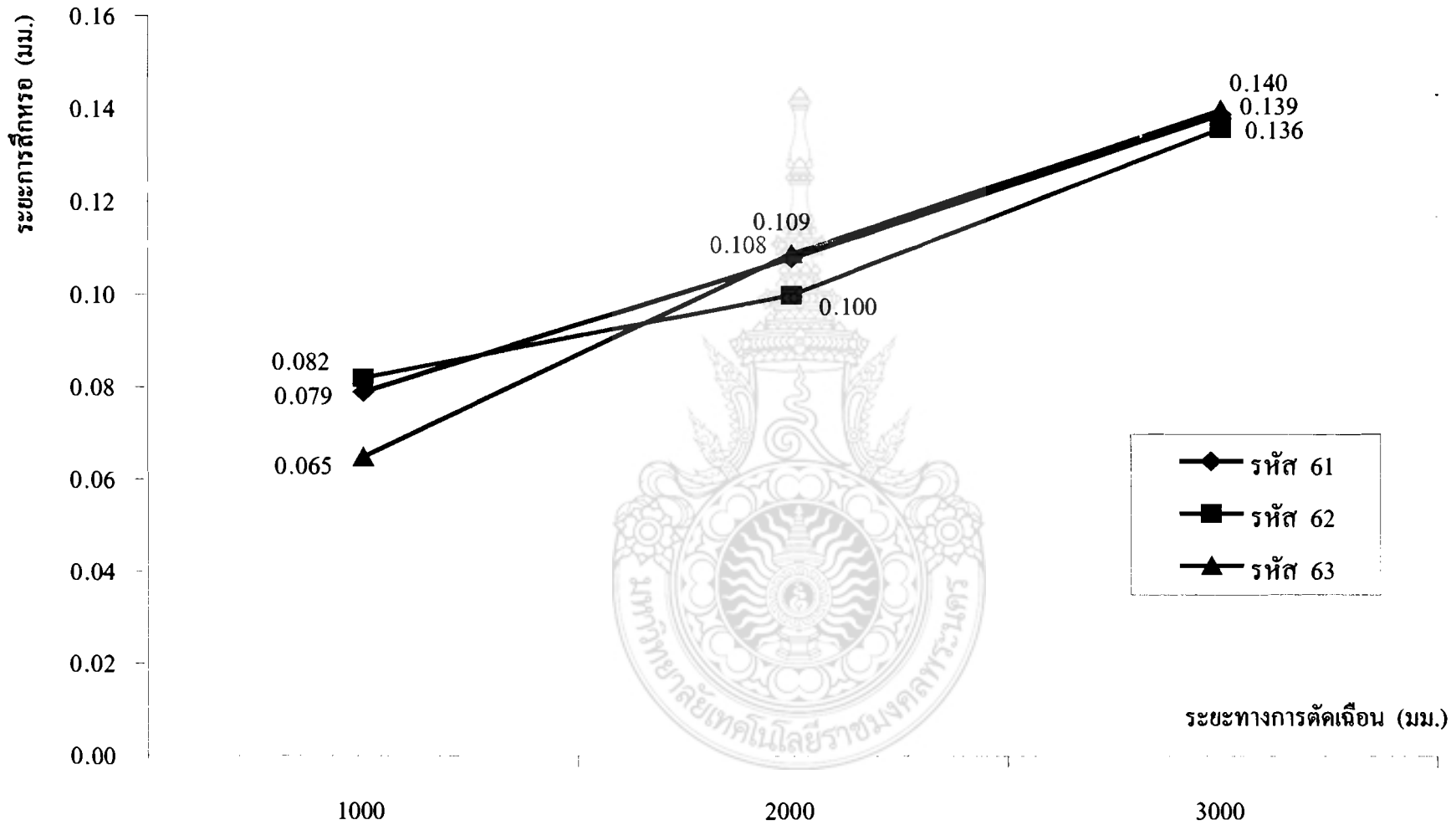
จากผลการวัดระยะการสึกหรอของการตัดเฉือน เอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นในแต่ละอุณหภูมิเป็นระยะทาง 3000 มม. เอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา มีระยะการสึกหรอที่ผิวหลบน้อยกว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  โดยแสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการสึกหรอของผิวหลบของเอ็นมิลล์ในแต่ละอุณหภูมิ อาจกล่าวได้ว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา มีโครงสร้างที่ดีขึ้นและมีความเสถียรของโครงสร้างมากขึ้นมีการต้านทานการสึกหรอดีขึ้น



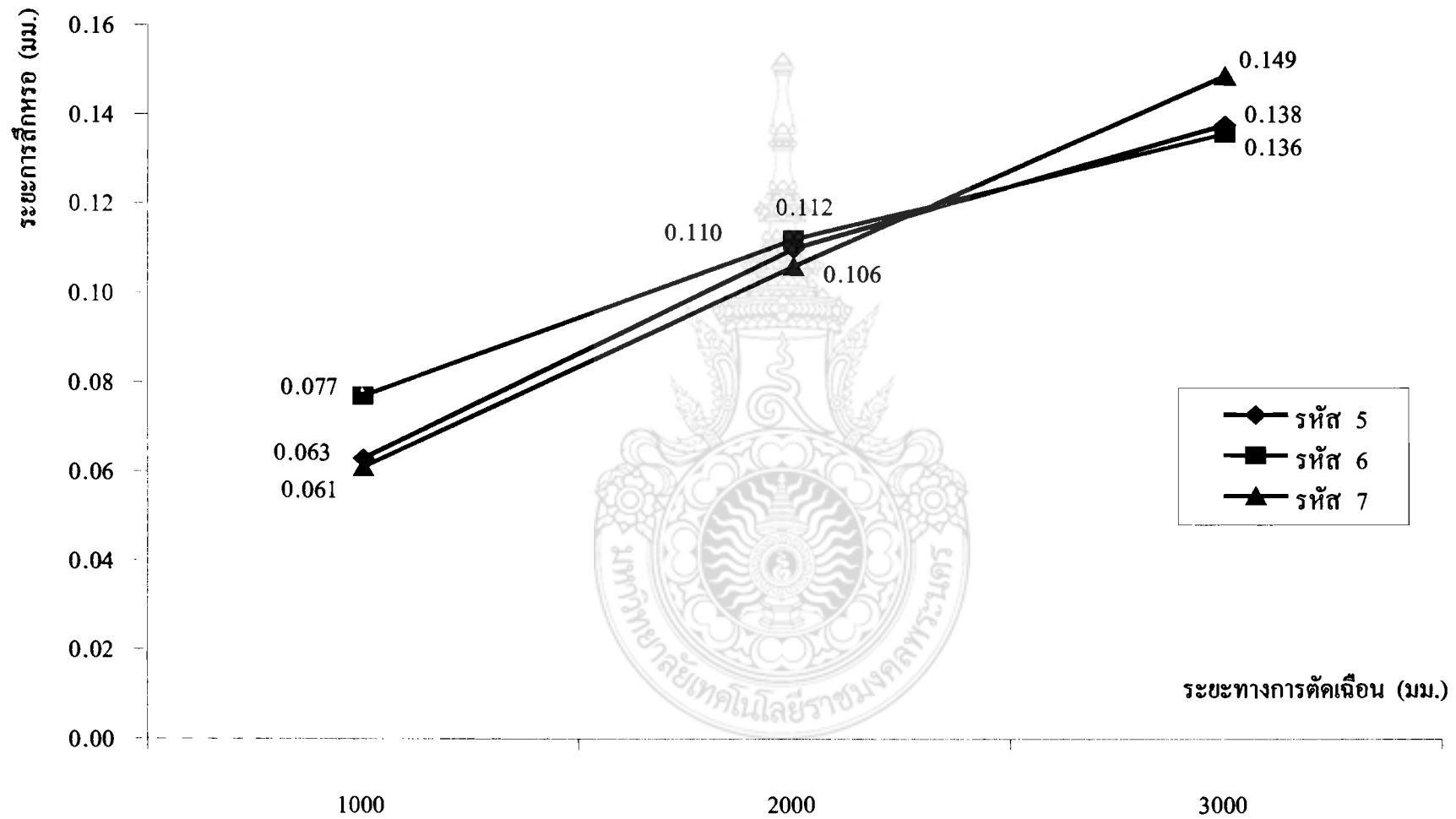
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบการสึกหของเอ็นมิลล์ 2 มมตัด เส้นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C



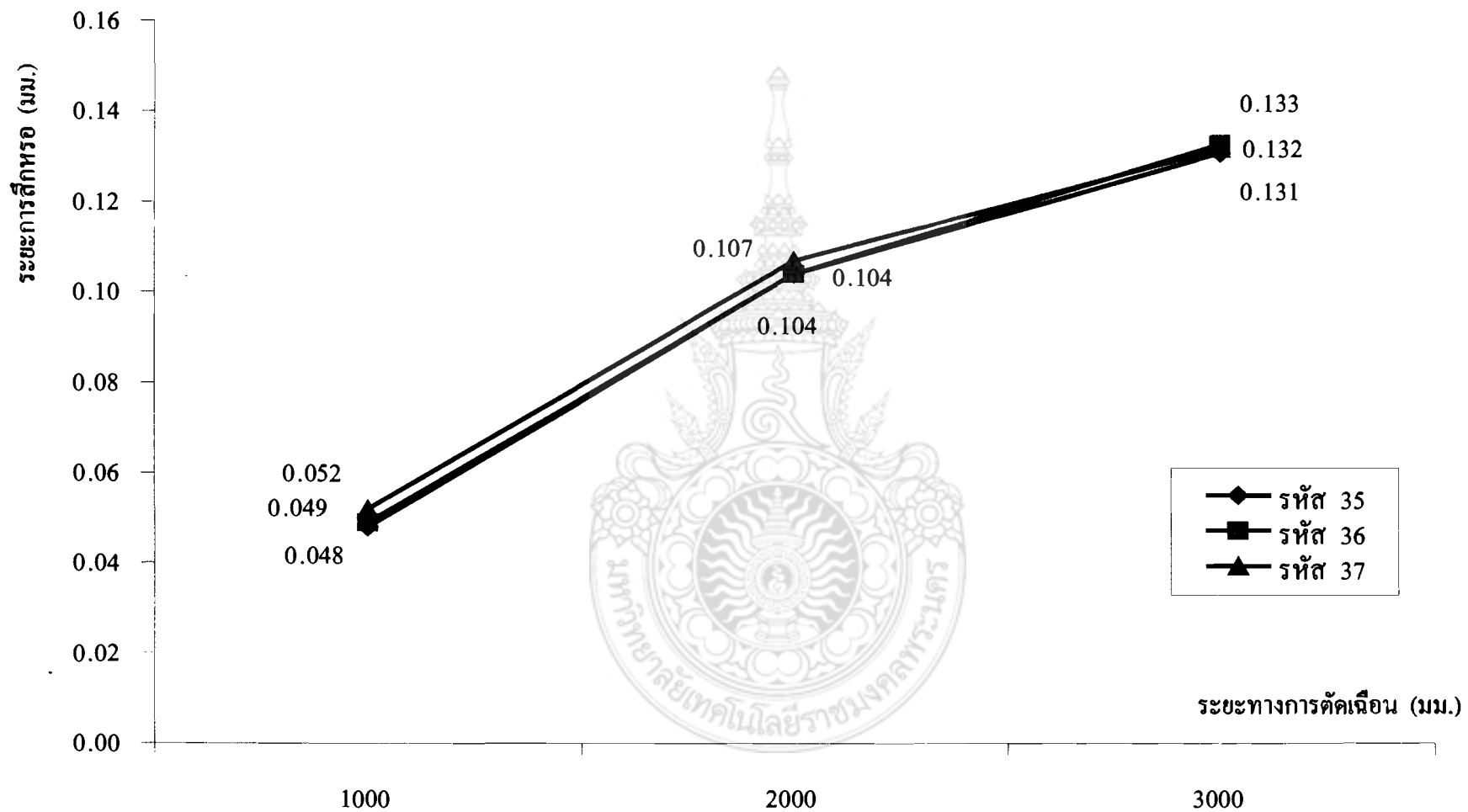
รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลต์ 2 คมตัด ที่ผ่านการบำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการบำบัดแข็งตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

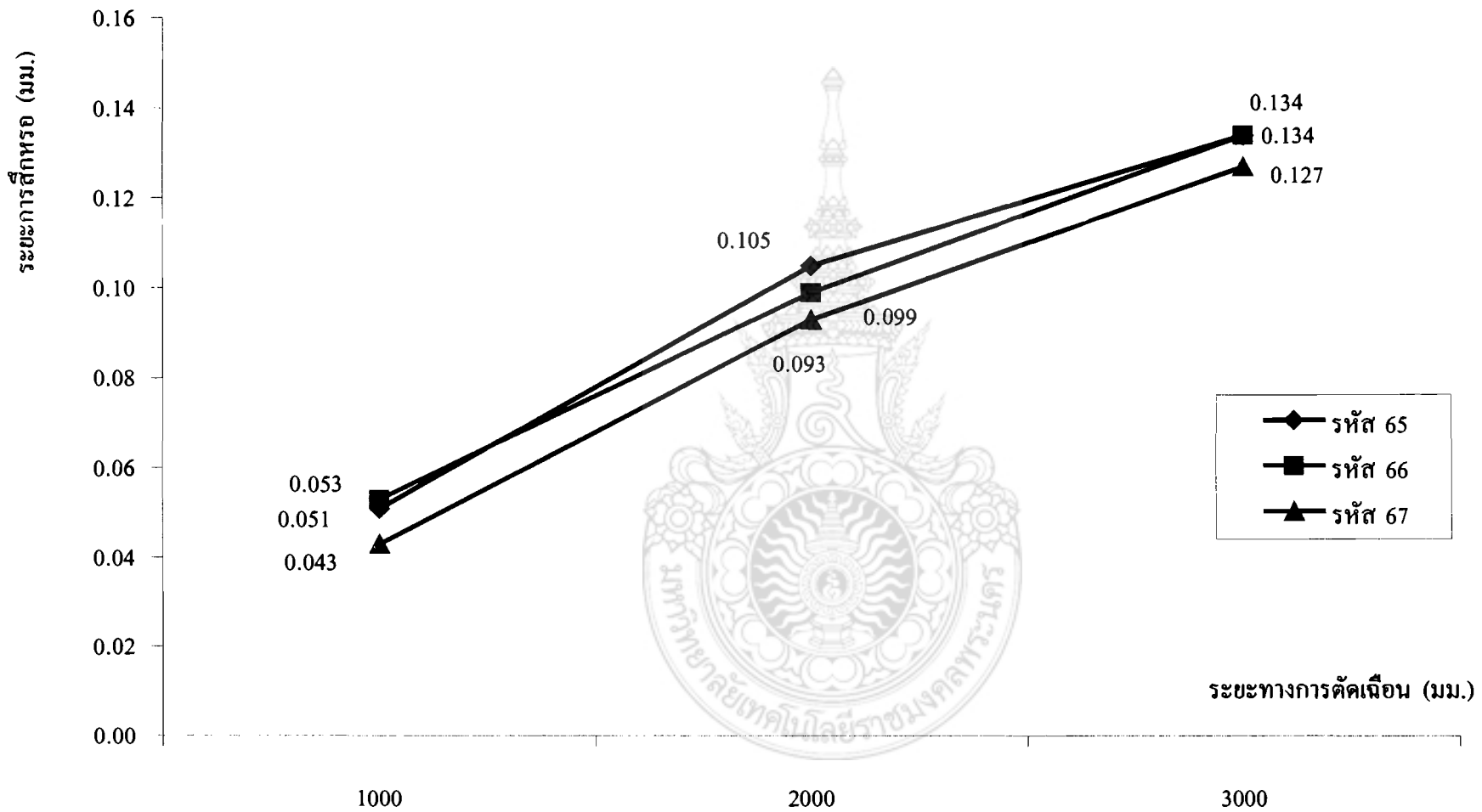


รูปที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 มม.ตัด ที่เส้นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C

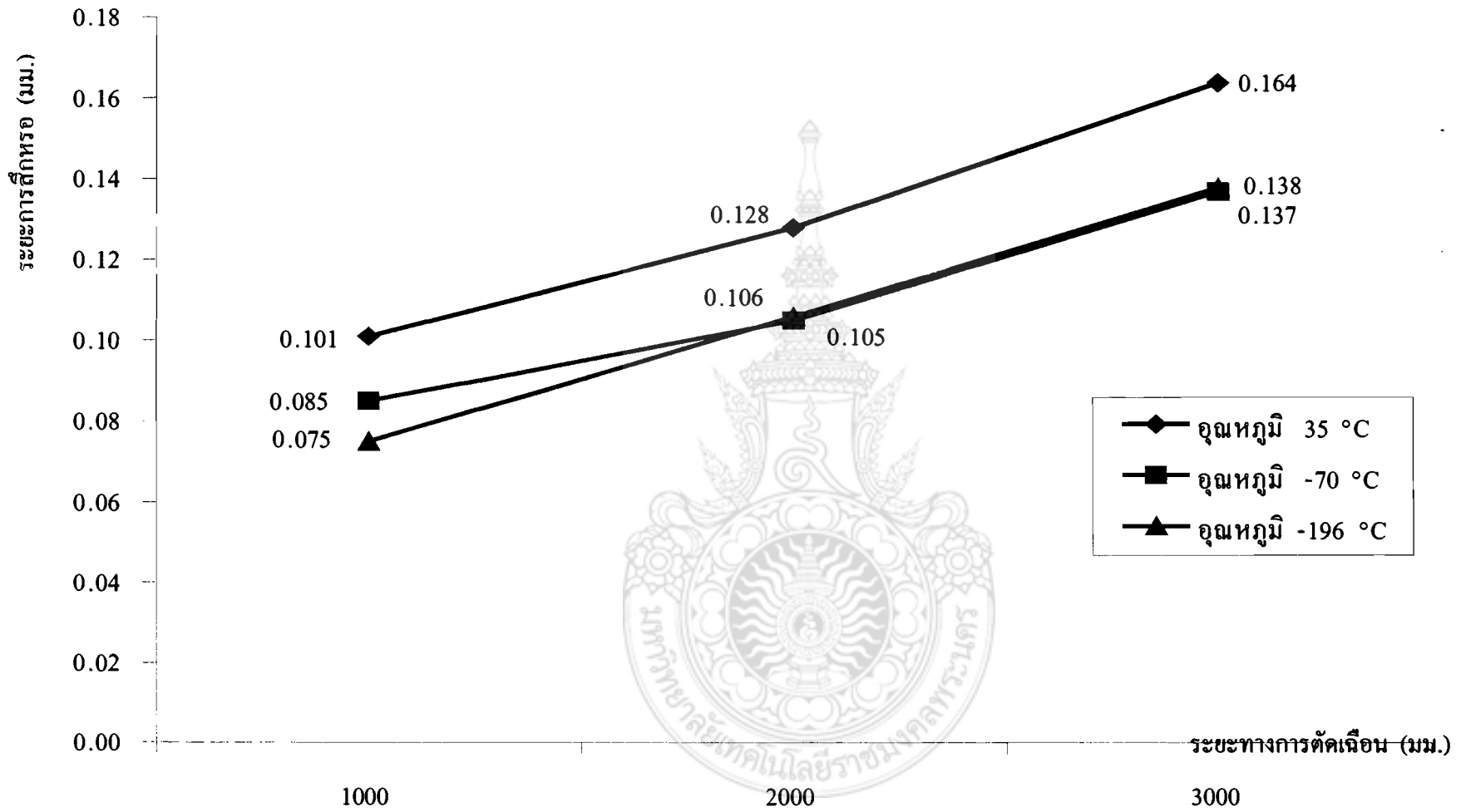


รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการบำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$

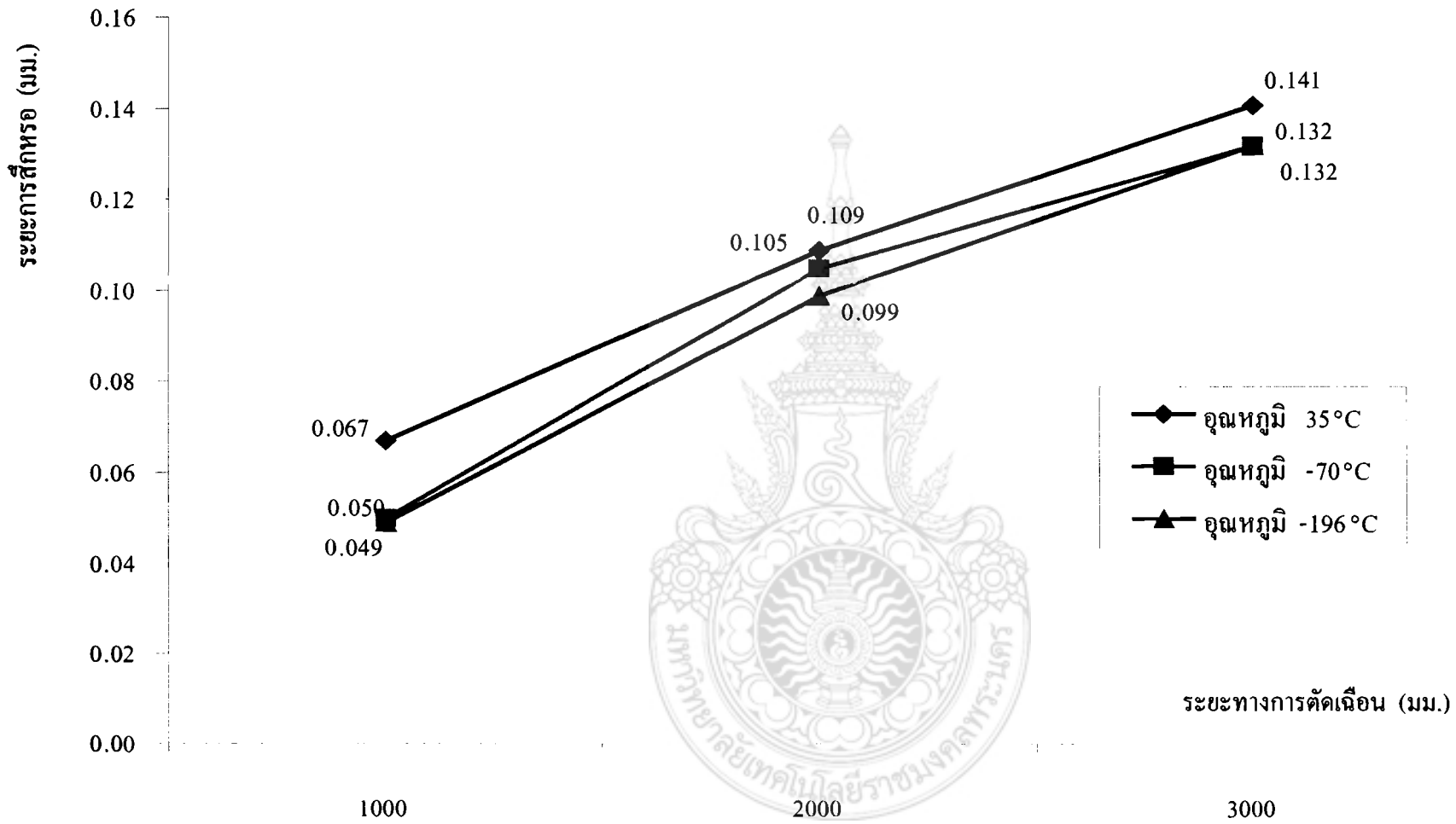




รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการบำบัดแข็งตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบการสีกรของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการเข็นตัวในแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการเข็นตัวในแต่ละอุณหภูมิ

#### 4.6.3 กระบวนการเงื่อนไขบริเวณคมตัด

ผลการวัดขนาดเศษตัดของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ โดยทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

##### 4.6.3.1 ผลการวัดขนาดเศษของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

ผลการวัดขนาดเศษตัด เมื่อผ่านการทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ความหนาเศษตัดของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งทั้ง 3 อุณหภูมิ มีความหนาเศษตัดเท่ากัน คือ 0.20 มม. ซึ่งความหนาเศษตัดเริ่มการตัดเฉือนมีความหนาเศษตัดใกล้เคียงกัน เพราะคมตัดยังไม่เกิดการสึกหรอ โดยความหนาเศษตัดมีแนวโน้มจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านระยะทางการตัดเฉือนที่มากขึ้น เพราะการสึกหรอของคมตัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านการตัดเฉือนที่มากขึ้น

##### 4.6.3.2 ผลการวัดขนาดเศษของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ผลการวัดความหนาเศษตัด เมื่อเริ่มการตัดเฉือนความหนาเศษตัดของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ละอุณหภูมิมีความหนาเศษตัดใกล้เคียงกัน เมื่อผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. เอ็นมิลล์ ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C มีความหนาเศษตัดมากที่สุดเท่ากับ 0.18 มม. ส่วนเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C มีความหนาเศษตัดเท่ากับ 0.16 มม. โดยความหนาเศษตัดมีแนวโน้มจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านระยะทางการตัดเฉือนที่มากขึ้น

จากผลการวัดความหนาเศษตัดแต่ละอุณหภูมิ เศษตัดของเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C มีความหนาเศษตัดมากกว่าเศษตัดของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C กล่าวได้ว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ 35°C มีการสึกหรอของคมตัดมากเมื่อเทียบกับเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านระยะทางการตัดเฉือนมากขึ้นเพราะการสึกหรอของคมตัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านการตัดเฉือนที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C กับ -196°C ซึ่งมีความหนาเศษตัดมีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. โดยมีความหนาเศษตัดเท่ากับ 0.16 มม. ส่วนที่ระยะเริ่มการตัดเฉือนความหนาเศษตัดเท่ากับ 0.15 มม.

จากผลการตรวจสอบความหนาเศษตัด ซึ่งความหนาเศษตัดจะมีความสัมพันธ์กับมุมเงื่อนไขบริเวณคมตัดเอ็นมิลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการตัดเฉือน และผลการตรวจสอบมุมเงื่อนไขบริเวณคมตัดจากความหนาเศษตัด โดยตรวจสอบก่อนเริ่มการตัดเฉือนและเมื่อตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ผลการตรวจสอบขนาดมุมเงื่อนไขจากเศษตัดแบ่งเป็นเอ็นมิลล์ 2 คมตัด 4 คมตัด

##### 4.6.3.3 ขนาดมุมเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

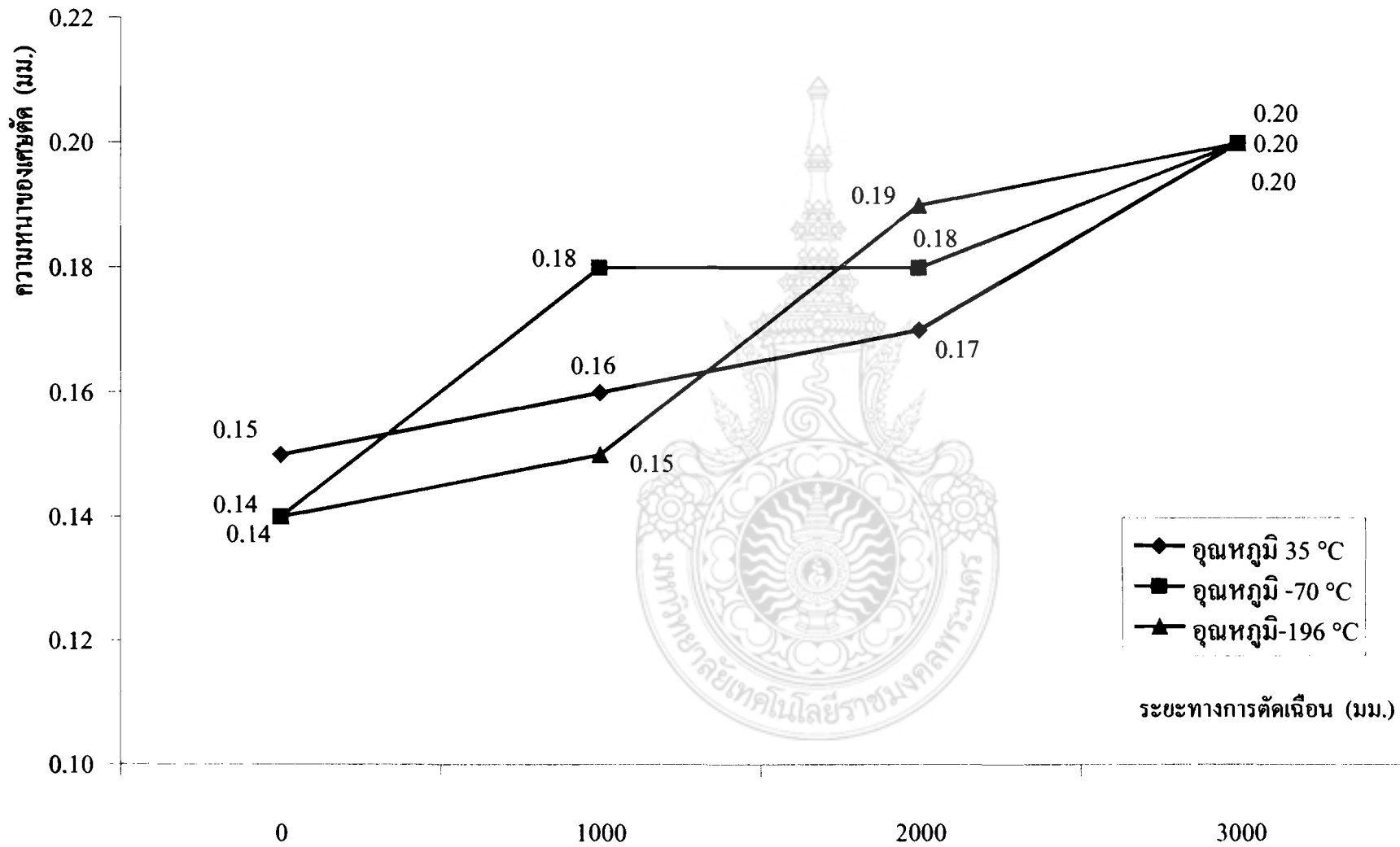
ขนาดมุมเงื่อนไขของเอ็นมิลล์เมื่อผ่านการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ที่ระยะทางการตัดเฉือน 3000 มม. ขนาดมุมเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งทั้ง 3 อุณหภูมิ มีขนาดมุมเงื่อนไขเท่ากับ 20°12' มม. โดยมุมเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70°C และ -196°C

มุมเดือนที่เริ่มการตัดเดือนมีขนาดของมุมเดือนเท่ากับ  $30^{\circ}$  ซึ่งมากกว่ามุมเดือนของเอ็นมิลล์ที่เอ็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีขนาดมุมเดือน  $28^{\circ}$

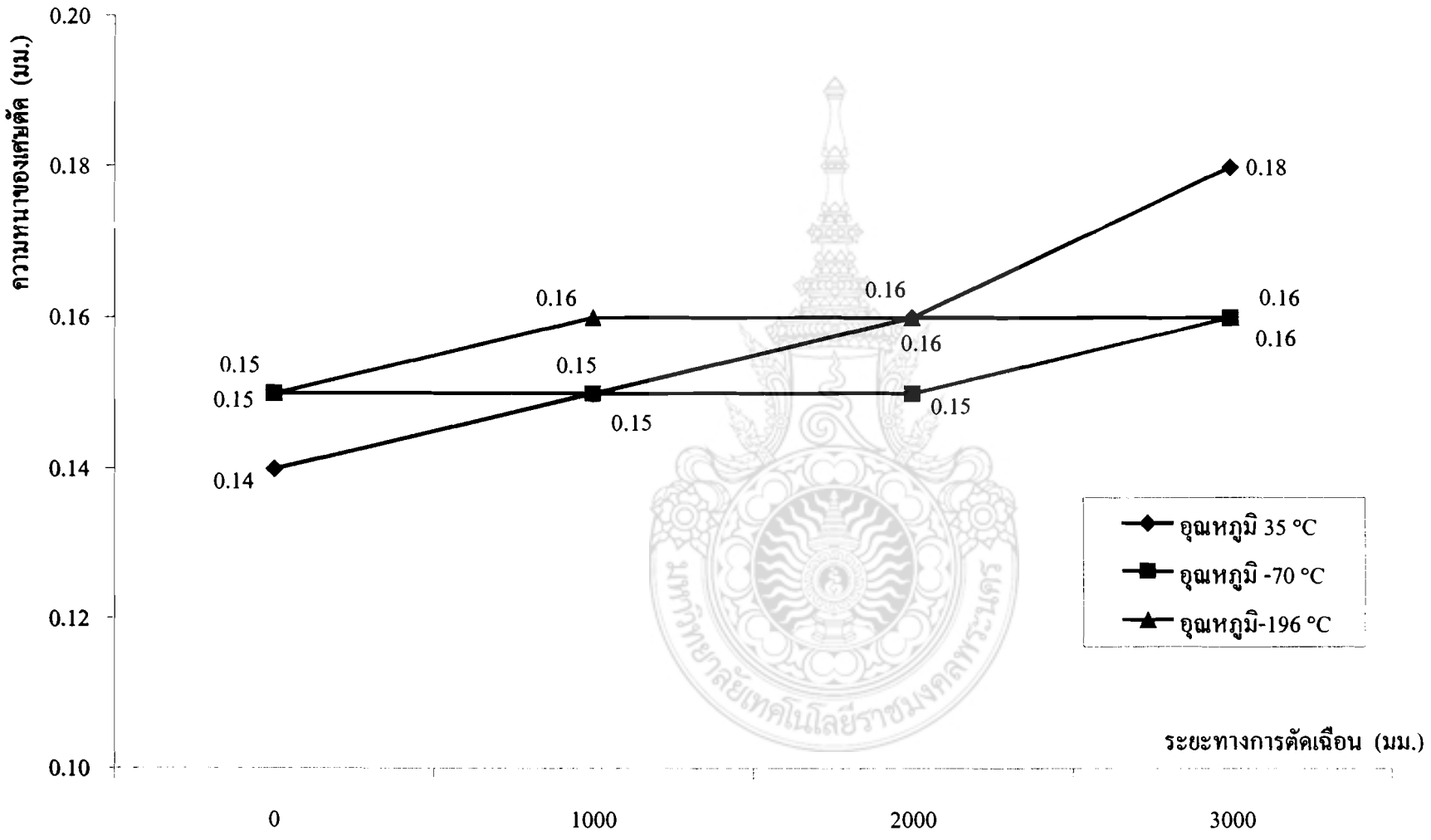
#### 4.6.3.4 ขนาดมุมเดือนของเอ็นมิลล์ 4 กมตัด

ขนาดมุมเดือนของเอ็นมิลล์เมื่อผ่านการตัดเดือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ขนาดมุมเดือนบริเวณคมตัดของเอ็นมิลล์ที่เอ็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีขนาดมุมเดือนลดลงมากที่สุดลดลงจากเดิม  $3^{\circ}40'$  โดยมีขนาดมุมเดือนเริ่มการตัดเดือน  $16^{\circ}25'$  ส่วนขนาดมุมเดือนของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเอ็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  และ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีขนาดมุมเดือนที่เริ่มการตัดเดือนเท่ากับ  $15^{\circ}20'$  โดยมีขนาดมุมเดือนลดลงเดิม  $1^{\circ}$  เมื่อผ่านการตัดเดือนเป็นระยะทาง 3000 มม. ซึ่งมีความสม่ำเสมอของมุมเดือนมากกว่าเอ็นมิลล์ที่เอ็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  และมุมเดือนบริเวณคมตัดมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อผ่านระยะทางการตัดเดือนมากขึ้น ซึ่งเอ็นมิลล์ที่เอ็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีแนวโน้มที่ลดลงมากที่สุดจากผลการทดสอบตัดเดือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

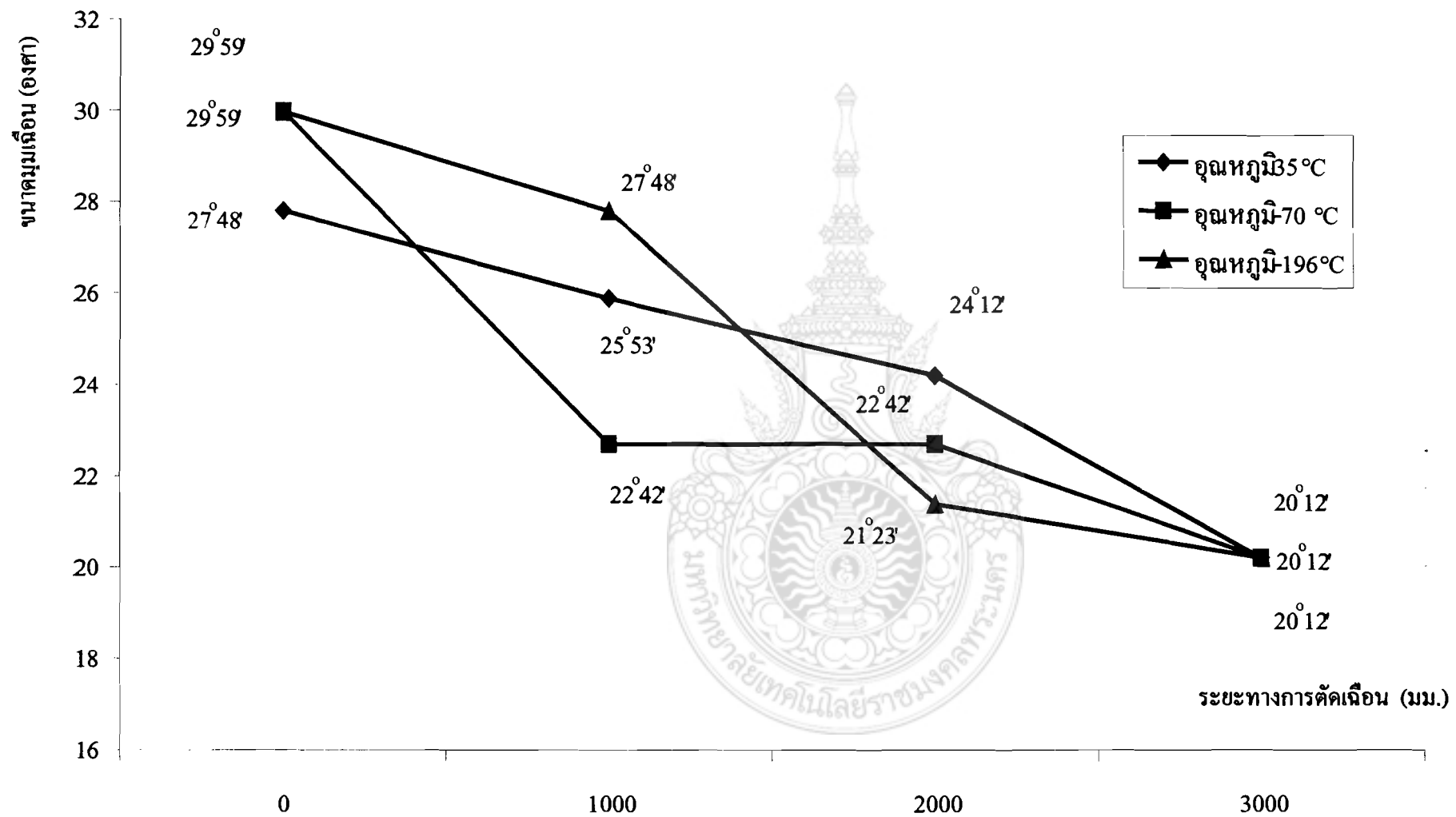
จากผลการตรวจสอบความหนาเศษตัดและขนาดมุมเดือนจากความหนาเศษตัดเมื่อผ่านกระบวนการเดือนจะมีความสัมพันธ์ต่อกัน โดยความหนาเศษตัดของเอ็นมิลล์ที่มีความหนามากขึ้น แสดงว่ามุมเดือนบริเวณคมตัดของเอ็นมิลล์มีขนาดลดลง เมื่อผ่านการตัดเดือนเป็นระยะทางที่มากขึ้น การสึกหรอของคมตัดจะมากขึ้น จะเป็นความสัมพันธ์กันไปอย่างต่อเนื่อง โดยระยะการสึกหรอขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการด้านทานการสึกหรอของเครื่องมือตัด



รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบขนาดเสียดของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ

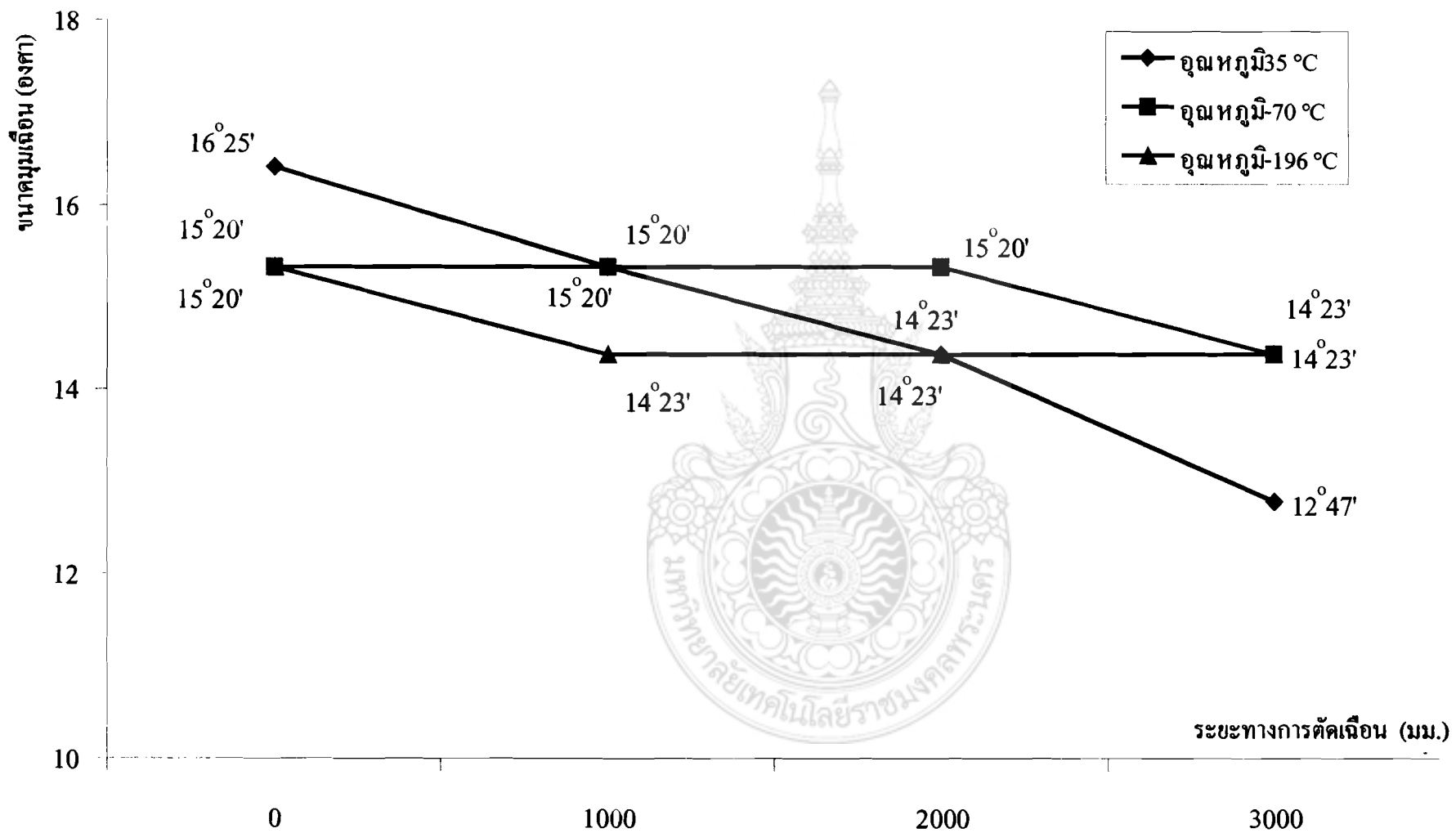


รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบขนาดเศษตัดของเอ็นมิลล์ 4 มม. ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบมมเดือนของเอ็นมิลล์ 2 มมตัด ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ





รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบมุมเฉือนของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ผ่านการชุบแข็งในแต่ละอุณหภูมิ

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

ในการดำเนินทดลองได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กกล้า M42 ตามมาตรฐาน AISI ด้วยกระบวนการชุบแข็งทั้งชิ้นงาน จนถึงอุณหภูมิ Austenitizing Temperature แล้วเป็นตัวก๊าซไนโตรเจนความดัน 4.5 Bar ให้ได้โครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์และปรับปรุงโครงสร้างหลังการชุบแข็งด้วยการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ (Cryogenics Treatment) ที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  ผลิตเป็นเอ็นมิลล์ 2 คมตัดและเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ทดสอบการตัดเฉือนชิ้นงานเหล็กกล้า 1045 ตามมาตรฐาน AISI ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนผสมปานกลาง

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

##### 5.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้าง

โครงสร้างก่อนการชุบแข็ง โครงสร้างหลักเป็นเพอร์ไลต์ละเอียดและมีโครงสร้างซีเมนไตท์เจือปน โดยโครงสร้างหลังจากผ่านกระบวนการชุบแข็ง วัสดุเอ็นมิลล์ที่เย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์มีการกระจายตัวของคาร์ไบด์อยู่ทั่วชิ้นงานแต่มีขนาดเกรนที่ไม่แน่นอนอนที่ขนาดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดและการจัดเรียงตัวของคาร์ไบด์ยังไม่เป็นระเบียบ ส่วนเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  มีการกระจายตัวของคาร์ไบด์มากขึ้นขนาดเกรนของคาร์ไบด์เริ่มมีขนาดเล็กลง คาร์ไบด์มีความสม่ำเสมอในการกระจายตัวมากขึ้น โดยเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  คาร์ไบด์มีความละเอียดมากขึ้น มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและเป็นระเบียบมากขึ้นและมีขนาดของเกรนที่ละเอียดขึ้นเมื่อเทียบกับเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งทั้ง 2 อุณหภูมิ

##### 5.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง

ความแข็งที่ผิวอยู่ในช่วง 68.6-69.5 HRC โดยเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งเฉลี่ย 69.5 HRC ซึ่งเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งเฉลี่ย 68.7 HRC กับ 68.5 HRC ตามลำดับ ส่วนความแข็งที่แกนกลางอยู่ในช่วง 68.2-68.5 HRC โดยเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งเฉลี่ย 68.2 HRC ส่วนเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-71^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งเฉลี่ย 68.5 HRC และ 68.4 HRC ตามลำดับ จากผลการทดลอง ความแข็งที่แกนกลางกับที่ผิวของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกัน 1.3 HRC ส่วนเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$

มีความแข็งที่ผิวกับความแข็งที่แกนกลางใกล้เคียง ซึ่งกล่าวได้ว่าโครงสร้างของเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีความเสถียรภาพของโครงสร้างมากขึ้น

### 5.2.3 ผลการทดสอบการสึกหรอ

ผลการทดสอบการสึกหรอเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ปรากฏว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอเฉลี่ย 0.164 มม. โดยเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอเฉลี่ย 0.137 มม. และ 0.138 มม. ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบการสึกหรอเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ปรากฏว่าเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอเฉลี่ย 0.141 มม. และเอ็นมิลล์ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีระยะการสึกหรอเฉลี่ย 0.132 มม. เท่ากัน ซึ่งจากผลการตัดเฉือนเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ที่ผ่านการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$  กับ  $-196^{\circ}\text{C}$  มีประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอดีขึ้น 15.8- 16.5 % ส่วนเอ็นมิลล์ 4 คมตัด มีประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอดีขึ้น 6.5% เมื่อเทียบกับเอ็นมิลล์ที่ผ่านการเย็นตัวที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การดำเนินโครงการ การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเย็นตัวต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เหล็กกล้ารอบสูง จากการศึกษาและเปรียบเทียบในส่วนของอุณหภูมิการเย็นตัวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์เนื่องจากผลการตัดเฉือนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งผลการทดลองสามารถนำไปประกอบเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการทดลองที่เกี่ยวข้องในด้านต่างๆ แต่ในส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างของเหล็กกล้ารอบสูงที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาจะมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อนำผลมาประกอบการวิเคราะห์ในเรื่องของประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอ เช่น

1. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกรรมวิธี X-Ray
2. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกรรมวิธี SEM
3. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขณะที่ชิ้นงานยังอยู่ในสภาวะอุณหภูมิบำบัดเย็น
4. การตรวจสอบการสึกหรอควรที่จะศึกษากรรมวิธีการตรวจสอบและเครื่องมืออื่นๆเพิ่มเติม เช่น การตรวจสอบความเรียบผิวที่ส่วนปลายของคมตัด
5. ควรที่จะมีการศึกษาค่าความแข็งที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอ

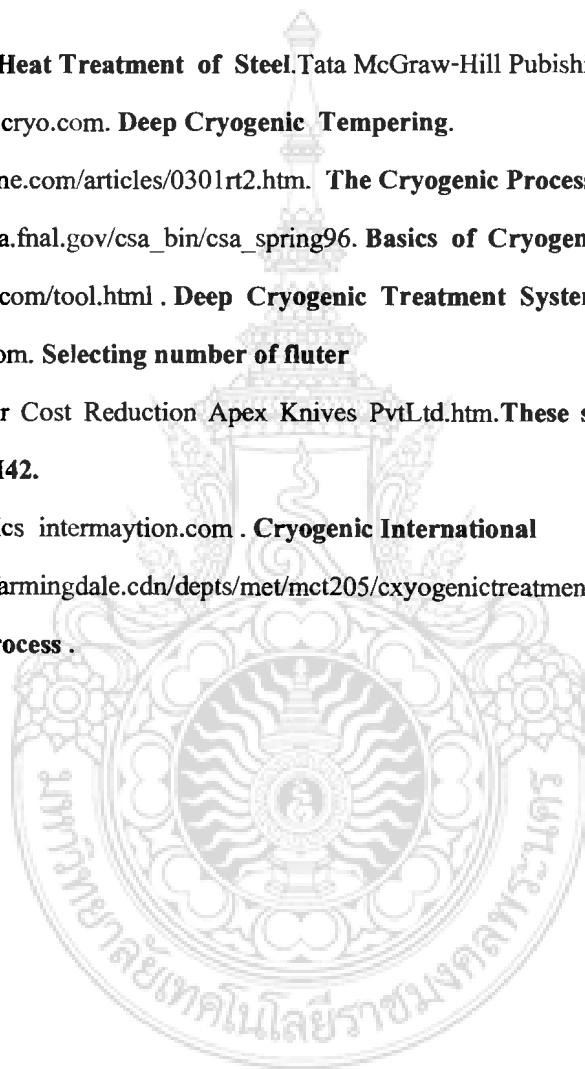
จากที่ได้กล่าวมานั้นการดำเนินโครงการนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาไว้ เนื่องจากยังขาดความพร้อมของแหล่งข้อมูลอ้างอิงตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ก็ยังมีไม่แพร่หลายนักในบ้านเราเพราะเป็นการทดลองที่ค่อนข้างใหม่สำหรับบ้านเรารวมทั้งระยะเวลาในการดำเนินงานมีจำกัด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ.การวิเคราะห์ตัวแปรในการชุบแข็งเหล็กกล้ารอบสูงเพื่อการปรับปรุงการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,2541
- [2] รศ. สมนึก วัฒนศรีกุล . การชุบแข็งเหล็กกล้า (Hardening of Steels). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [3] รศ. มนต์ สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 7,เมษายน 2543
- [4] Frydery E. Corczyca,1978,Application of metal cutting theory
- [5] ชนรี พลเยี่ยม,กรรณิกา พิมาร,กิตติพงษ์ สุนทรจักรพงศ์. อุปกรณ์สำหรับการอบชุบโดยวิธีการ Cryogenics เหล็กกล้าผสมสูง, ปรียญานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544
- [6] รศ. สมนึก วัฒนศรีกุล . โลหะวิทยา (METALLURGY).สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , พิมพ์ครั้งที่ 1 ,กันยายน 2538
- [7] ชวลิต เชิงกุล. โลหะวิทยา. พิมพ์ที่บริษัท ที เอส บีโปรดัก จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 4 ,2545
- [8] รศ.บรรเลง ศรีนิต, ผศ.ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์. ตารางงานโลหะ.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.กรุงเทพฯ :พิมพ์โดยศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [9] สมเดช อิงคะวะระ. อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือตัดเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง,วารสาร เทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม,ปีที่20,ฉบับ 231, หน้า 1-10
- [10] มานพ ดันตระบัณฑิตย์. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [11] อ.วัลลภ ภูผา.วิศวกรรมเครื่องมือ Tool Engineering. บริษัทสำนักพิมพ์เอ็มพันธ์ จำกัด
- [12] WWW. Bohler-edelstahl.at .BOHLER, S500 Schnell Arbeitsstahl High Speed Steel
- [13] JIS HANDBOOK TOOL 1998. Japanese Standards Association
- [14] Robert Wilson. Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steel . McGraw – Hill Book Company (UK) Limited
- [15] <http://lennon.pub.csufresno.edu%7Erlk16/cryo.html>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] **HEAT TREATER'S GUIDE**.AMERICAN SOCCIETY FOR METALS, METALSPARK,  
OHIO 44073
- [17] **Handbook of Heat Treatment of Steel**.Tata McGraw-Hill Pubishing Company Limited
- [18] <http://www.ln2cryo.com>. **Deep Cryogenic Tempering**.
- [19] [www.mmsonline.com/articles/0301rt2.htm](http://www.mmsonline.com/articles/0301rt2.htm). **The Cryogenic Process**
- [20] [http://www-csa.fnal.gov/csa\\_bin/csa\\_spring96](http://www-csa.fnal.gov/csa_bin/csa_spring96). **Basics of Cryogenics Metallurgy**
- [21] [www.Cryopro.com/tool.html](http://www.Cryopro.com/tool.html) . **Deep Cryogenic Treatment Systems**
- [22] [www.hanita.com](http://www.hanita.com). **Selecting number of fluter**
- [23] [www.Customer Cost Reduction Apex Knives PvtLtd.htm](http://www.Customer Cost Reduction Apex Knives PvtLtd.htm).**These search terms have been highlighted:M42.**
- [24] [www.cryogenicsintermaytion.com](http://www.cryogenicsintermaytion.com) . **Cryogenic International**
- [25] <http://info.lu.farmingdale.cdn/depts/met/mct205/cxyogenictreatment.html>. **Deep Cryogenic Tempering Process .**



ภาคผนวก

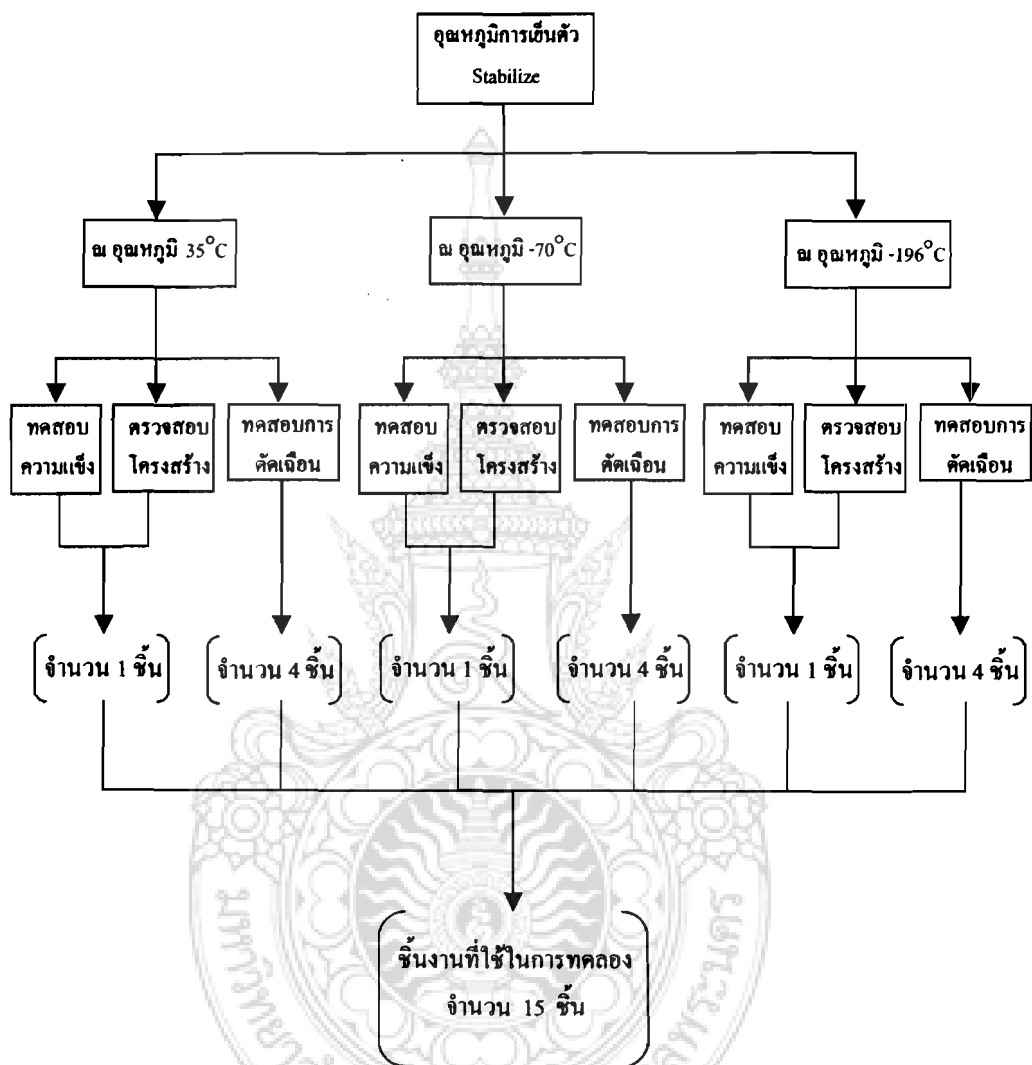




ภาคผนวก ก.

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข

### จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข



หมายเหตุ : เอ็นมิลล์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ

เอ็นมิลล์ 2 คมตัด 15 ชิ้น

เอ็นมิลล์ 4 คมตัด 15 ชิ้น

ฉะนั้นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองรวม 30 ชิ้น

รูปที่ ก.1 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข





ภาคผนวก ข.

การกำหนดรหัสเอ็นมิลล์ในการขูบแจ้งแต่ละอนุหภูมิ

ตารางที่ ข.1 การกำหนดรหัสเอ็นมิลล์ในการบำบัดเย็น

ลำดับ	อุณหภูมิในการบำบัดเย็น	รหัส	ประเภทคมตัดของเอ็นมิลล์
1		1	
2	อุณหภูมิ 35 °C	2	2 คมตัด
3		3	
4		5	
5	อุณหภูมิ 35 °C	6	4 คมตัด
6		7	
7		31	
8	อุณหภูมิ -70 °C	32	2 คมตัด
9		33	
10		35	
11	อุณหภูมิ -70 °C	36	4 คมตัด
12		37	
13		61	
14	อุณหภูมิ -196 °C	62	2 คมตัด
15		63	
16		65	
17	อุณหภูมิ -196 °C	66	4 คมตัด
18		67	



ภาคผนวก ก.

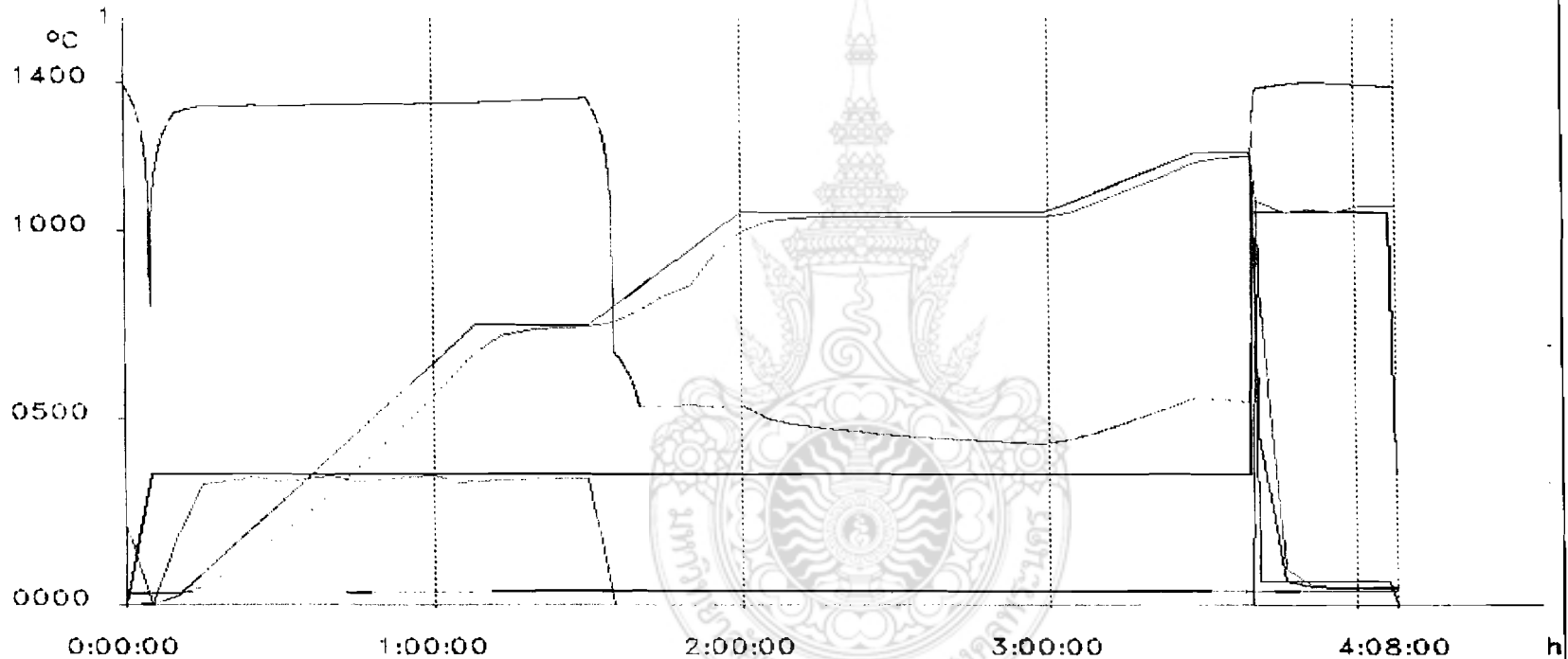
กราฟการชุบแข็งและผลการบันทึกอุณหภูมิในการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิ -70 °C

measurement: 05012101

start: 21.01.05 12:07:56 - end: 21.01.05 16:15:57

comment: V05005-HE Endmill M42 RUT-NBK

Endmill M42 1210Cx2.5mln Load control Heatup30mln 4.5mbar 2R(15, 20)



1 HEATING\_SETPOINT [°C]  
2 HEATING\_ACT\_VALUE [°C]  
3 LOAD\_ACTUAL\_VALUE\_1 [°C]  
4 LOAD\_ACTUAL\_VALUE\_2 [°C]

5 LOAD\_ACTUAL\_VALUE\_3 [°C]  
6 GASPRESSURE\_SETPOINT [mbar]  
7 GASPRESS\_ACT\_VALUE [mbar]  
8 FINEVACUUM\_ACT\_VAL [mbar]

KMITNB: (1) HARDEN\_L STANDARD

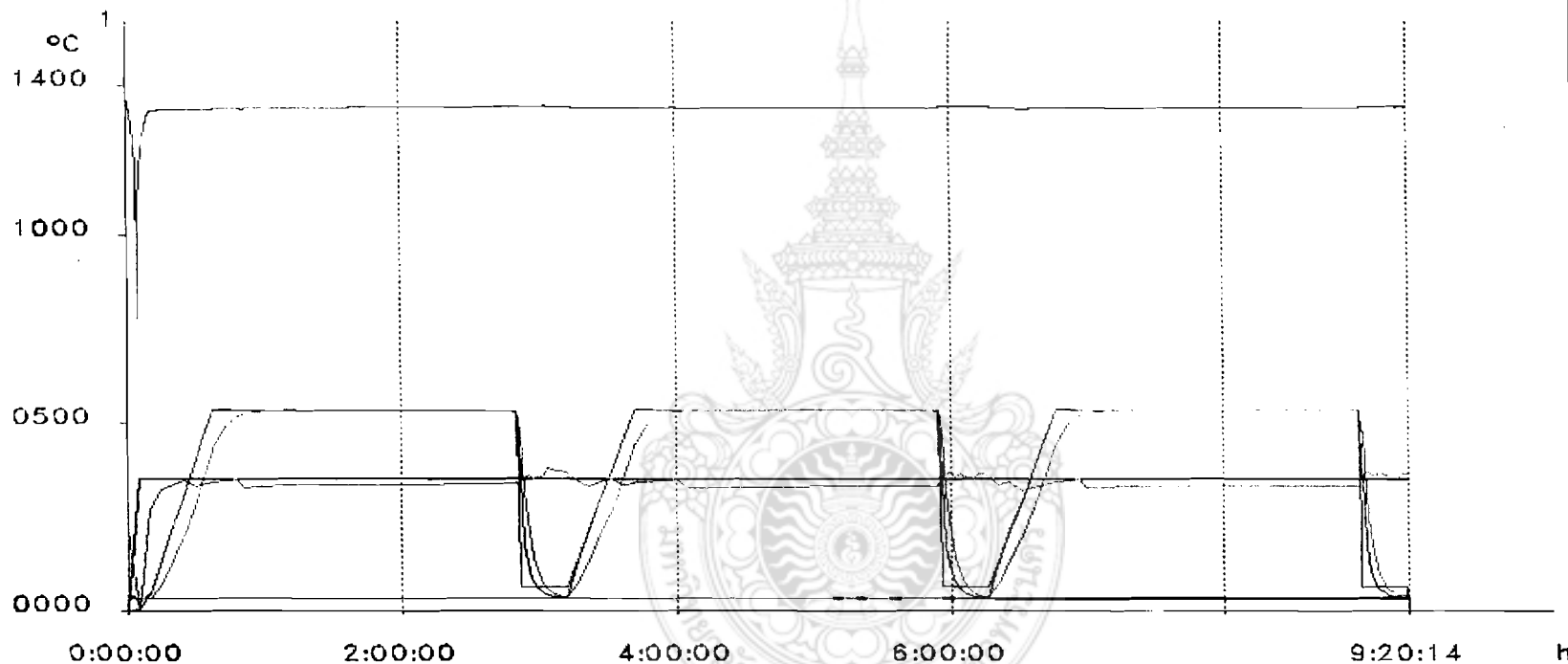
รูปที่ ค.1 กราฟการชุบแข็งเหล็กกล้า M42 จากเตาสถุญอากาศ

measurement: 05012201

start: 22.01.05 17:15:08 -- end: 23.01.05 02:35:23

comment: V05007-1T3 endmill M42 RUT-NBK

Endmill M42 temper 535C535C535Cx2h loadcontrol 2R(15, 15) 1.5bar heatup30min



TEMPER: (1) TEMPER STANDARD

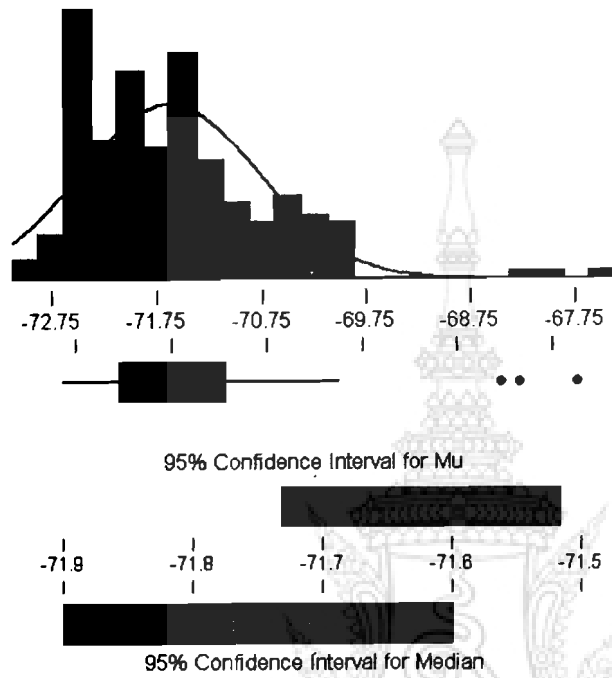
รูปที่ ค.2 กราฟการอบคืนตัวเหล็กกล้า M42 จากเตาสุญญากาศ

ตารางที่ ค.1 ผลการจذبบันทึกอุณหภูมิในการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ -70 °C

ชั่วโมง	ช่วงเวลาในการจذبบันทึก											
	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที	35 นาที	40 นาที	45 นาที	50 นาที	55 นาที	60 นาที
1	-68.3	-68.1	-67.5	-70.2	-70.1	-70.2	-70.5	-70.8	-71.2	-72.3	-71.3	-70.9
2	-70.8	-72.5	-72.3	-72.1	-71.5	-71.3	-71.1	-70.8	-70.5	-70.1	-72.9	-72.6
3	-72.1	-71.9	-71.6	-71.3	-72.1	-71.5	-71.8	-72.6	-72.5	-72.8	-72.5	-72.8
4	-72.4	-72.2	-71.9	-71.2	-71.5	-71.3	-70.9	-70.7	-71.6	-71.2	-70.2	-72.3
5	-72.1	-71.9	-71.6	-71.2	-70.6	-72.6	-72.4	-72.3	-71.6	-70.2	-70.5	-72.5
6	-72.3	-72.1	-71.6	-70.6	-70.3	-72.4	-71.9	-71.0	-70.6	-70.1	-70.1	-70.1
7	-70.2	-72.7	-72.3	-71.9	-71.6	-71.2	-70.8	-70.3	-70.2	-72.5	-70.1	-70.8
8	-71.4	-71.3	-71.2	-70.4	-70.2	-70.1	-71.3	-71.6	-71.7	-71.6	-71.4	-71.2
9	-70.8	-70.9	-70.7	-71.9	-72.2	-72.3	-72.4	-72.5	-72.1	-71.8	-72.5	-72.3
10	-72.6	-72.2	-72.4	-71.5	-70.7	-70.6	-71.4	-71.8	-71.6	-71.9	-72.1	-71.9
11	-71.8	-71.6	-71.6	-71.5	-71.9	-71.8	-71.6	-71.6	-71.4	-70.9	-70.2	-71.7
12	-71.8	-71.8	-71.8	-71.4	-71.2	-70.6	-71.9	-71.7	-71.8	-71.3	-71.1	-71.2
13	-71.1	-71.1	-70.6	-70.5	-70.4	-70.1	-71.6	-72.5	-72.3	-72.5	-72.6	-72.4
14	-72.3	-72.5	-72.3	-72.2	-72.0	-72.1	-71.6	-71.3	-70.5	-72.5	-72.1	-72.1
15	-72.0	-72.7	-72.8	-72.6	-72.4	-72.2	-72.1	-71.7	-71.5	-71.7	-71.4	-71.5
16	-71.1	-70.9	-71.6	-71.9	-72.1	-72.1	-71.9	-71.9	-71.9	-71.6	-71.4	-71.5
17	-71.3	-71.1	-71.8	-72.3	-72.3	-72.4	-72.4	-72.6	-72.4	-72.5	-72.4	-72.1
18	-72.4	-72.1	-72.1	-71.8	-71.8	-71.7	-71.8	-71.4	-72.5	-72.4	-72.4	-72.3
19	-72.6	-72.4	-72.5	-72.6	-72.4	-72.2	-71.8	-71.9	-71.8	-71.4	-72.4	-71.3
20	-72.6	-72.5	-72.5	-72.3	-72.2	-72.2	-72.1	-72.8	-71.8	-72.9	-72.9	-72.6

# Descriptive Statistics

Variable: C1



Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 3.951  
P-Value: 0.000

Mean -71.6238  
StDev 0.8505  
Variance 0.723408  
Skewness 1.26483  
Kurtosis 2.95643  
N 240

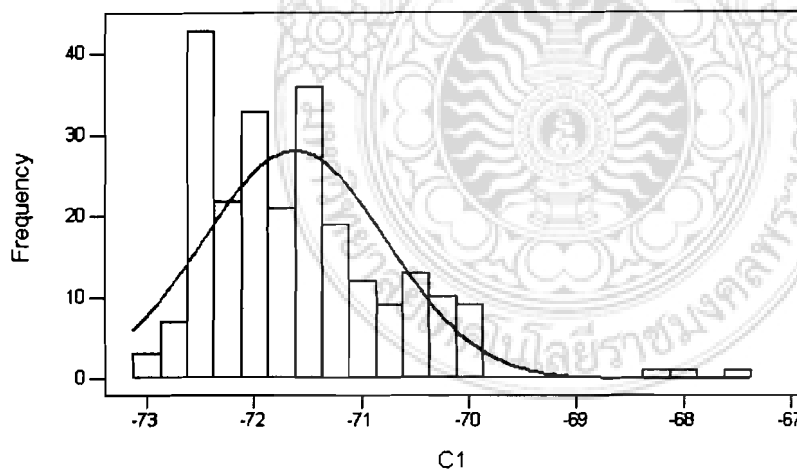
Minimum -72.9000  
1st Quartile -72.3000  
Median -71.8000  
3rd Quartile -71.2000  
Maximum -67.5000

95% Confidence Interval for Mu  
-71.7319 -71.5156

95% Confidence Interval for Sigma  
0.7806 0.9343

95% Confidence Interval for Median  
-71.9000 -71.6000

Histogram of C1, with Normal Curve



รูปที่ ค.3 Normal Curve ของอุณหภูมิในการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$

Variable	N	Mean	Median	TrMean	StDev	SE Mean
C1	240	-71.624	-71.800	-71.675	0.851	0.055
Variable	Minimum	Maximum	Q1	Q3		
C1	-72.900	-67.500	-72.300	-71.200		





ตารางที่ ง.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์

ตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์	ส่วนผสมทางเคมี							
	C	Si	Ma	P	S	Cr	Ni	Mo
	0.998	0.336	0.233	0.0485	<0.01	3.70	0.0651	9.19
M42	0.966	0.346	0.231	0.0533	<0.01	3.69	0.0684	9.11
	0.984	0.351	0.229	0.0519	<0.01	3.69	0.0650	9.21

ตัวอย่างวัสดุเอ็นมิลล์	ส่วนผสมทางเคมี							
	V	W	Co	Cu	Sn	Al	Ti	Fe
	0.997	1.14	8.05	<0.01	0.0036	0.0530	<0.001	<75.13
M42	0.990	1.17	8.15	<0.01	0.0048	0.0529	<0.001	<75.15
	1.000	1.16	8.21	<0.01	0.0040	0.0555	<0.001	<74.97

ตารางที่ ง.2 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

		ส่วนผสมทางเคมี								
เหล็กกล้า S45C	C	Si	Ma	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W
	0.52	0.175	0.636	0.0119	0.0151	0.146	0.0438	0.015	<0.001	<0.001
S45C	0.527	0.164	0.644	0.011	0.0128	0.146	0.0406	0.0134	<0.001	<0.001
	0.517	0.16	0.641	0.0106	0.0129	0.144	0.0381	0.0113	<0.001	<0.001

		ส่วนผสมทางเคมี								
เหล็กกล้า S45C	Cu	Sn	Al	Ti	Pb	B	Mg	Nb	Fe	
	0.157	0.0100	<0.001	0.00206	<0.10	0.00041	<0.001	0.00106	<98.05	
S45C	0.140	0.0074	<0.001	0.00191	<0.10	0.00023	<0.002	0.00115	<98.08	
	0.137	0.0067	<0.001	0.00193	<0.10	0.00027	<0.003	0.00100	<98.11	



ภาคผนวก จ.

ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวก่อนทดลอง

รหัส	ความแข็ง HRC			ค่าเฉลี่ย
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
9	25.3	24.9	24.1	24.7
34	24.7	25.1	24.6	24.8
83	25.5	24.8	25.2	25.2

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1210 °C ก่อนทำการ Tempering

รหัส	ความแข็ง HRC			ค่าเฉลี่ย
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
9	63.1	63.1	63.4	63.2
34	61.9	62.8	62.9	62.5
83	63.4	63.7	63.5	63.5

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบความแข็งเย็นตัวถึงอุณหภูมิ 35 °C ทำการ Tempering จำนวน 3 ครั้ง

รหัส	ความแข็ง HRC			ค่าเฉลี่ย
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
9	69.2	69.3	69.5	69.3
28	69.1	70.7	69.2	69.7
14	69.5	69.7	69.2	69.5

ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบความแข็งเย็นตัวถึงอุณหภูมิ -70 °C ก่อนทำการ Tempering

รหัส	ความแข็ง HRC			ค่าเฉลี่ย
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	
40	67	66.9	65.8	66.6
54	67.1	67	66.5	66.9
39	66.9	67.1	65.4	66.5

ตารางที่ จ.5 ผลการทดสอบความแข็งเย็นตัวถึงอุณหภูมิ -196 °C ก่อนทำการ Tempering

ความแข็ง HRC				
รหัส	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
68	67.1	67.5	67.2	67.3
84	67.6	67.7	67.0	67.4
61	67.3	67.1	67.8	67.4

ตารางที่ จ.6 ผลการทดสอบความแข็งเย็นตัวถึงอุณหภูมิ -70 °C ทำการ Tempering จำนวน 3 ครั้ง

ความแข็ง HRC				
รหัส	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
39	68.8	68.7	68.3	68.6
40	68.6	68.9	68.7	68.7
54	68.9	69.1	68.7	68.9

ตารางที่ จ.7 ผลการทดสอบความแข็งเย็นตัวถึงอุณหภูมิ -196 °C ทำการ Tempering จำนวน 3 ครั้ง

ความแข็ง HRC				
รหัส	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
68	68.6	69.1	68.7	68.8
83	68.7	68.7	69.1	68.2
84	68.6	68.5	68.9	68.7

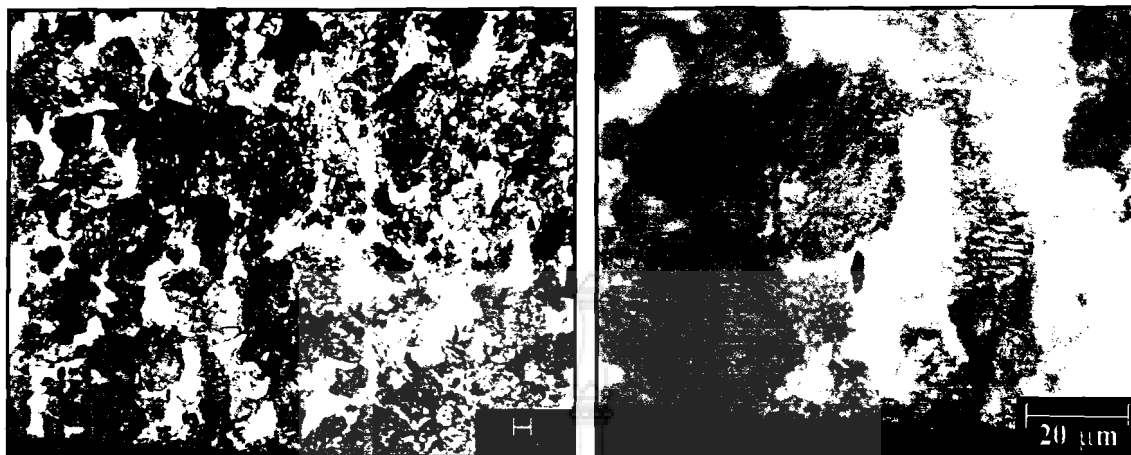
หมายเหตุ ค่าความผิดพลาดจากตาราง Handness Conversion Table Mitutoyo 1.0 HRC.

สำหรับการทดสอบความแข็งที่ผิว

ภาคผนวก ฉ.

โครงสร้างเหล็กกล้า M42 ชูบแข็งแต่ละอุณหภูมิและเหล็กกล้า S45C





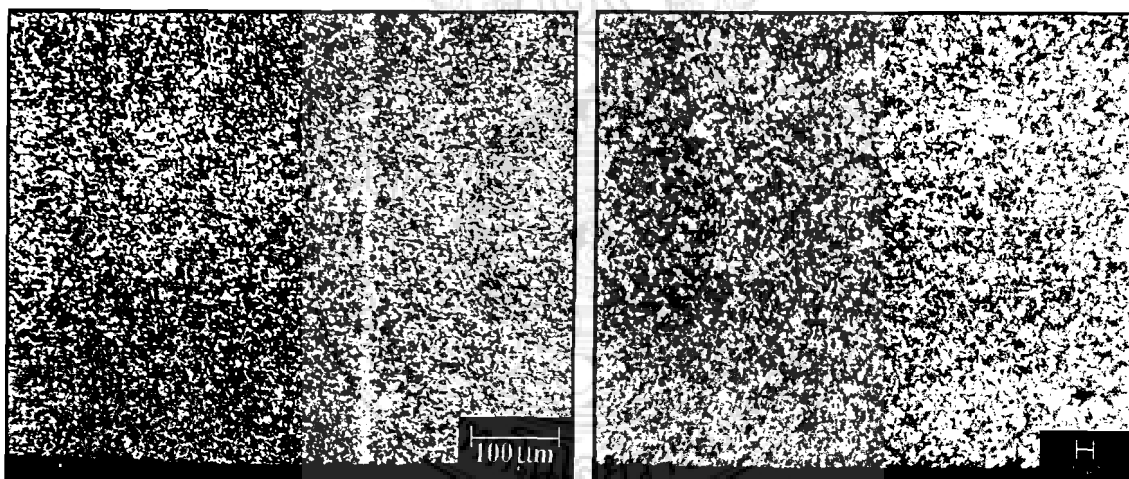
ก)

ข)

รูปที่ ๑.1 โครงสร้างเหล็กทดสอบ S45C

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



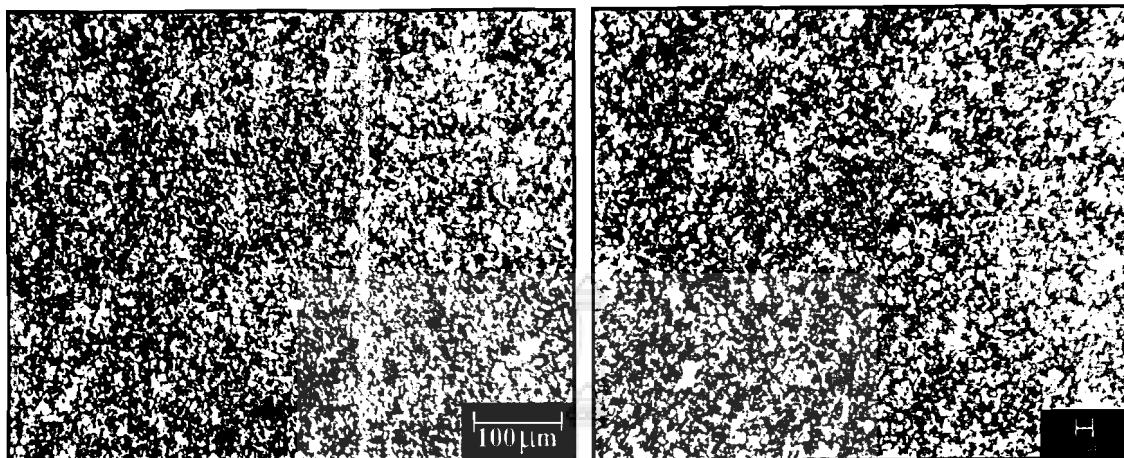
ก)

ข)

รูปที่ ๑.2 โครงสร้างที่ขอบเหล็ก M42 ก่อนการชุบแข็ง

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



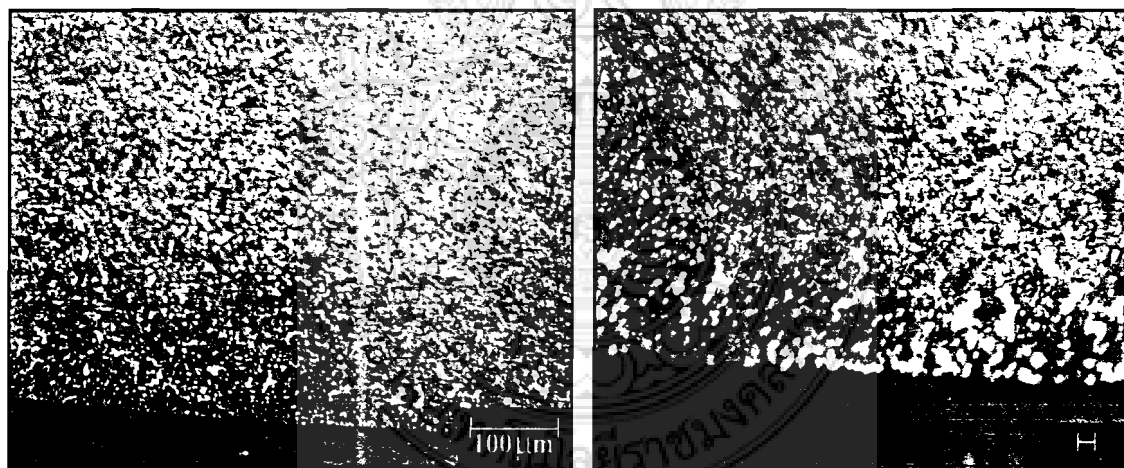
ก)

ข)

รูปที่ ๓.3 โครงสร้างด้านในของเหล็ก M 42 ก่อนการชุบแข็ง

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



ก)

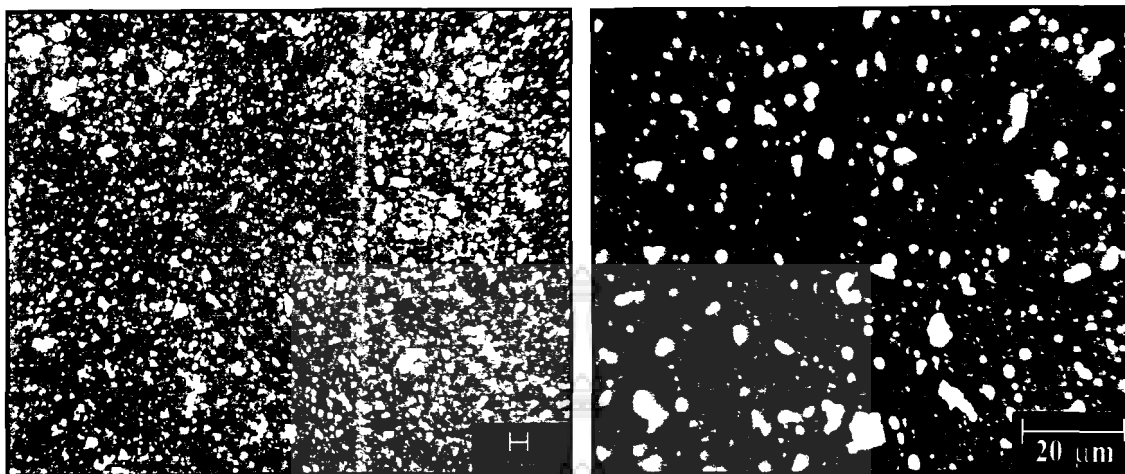
ข)

รูปที่ ๓.4 โครงสร้างที่ขอบชิ้นตัวถึงอุณหภูมิ 350°C

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า





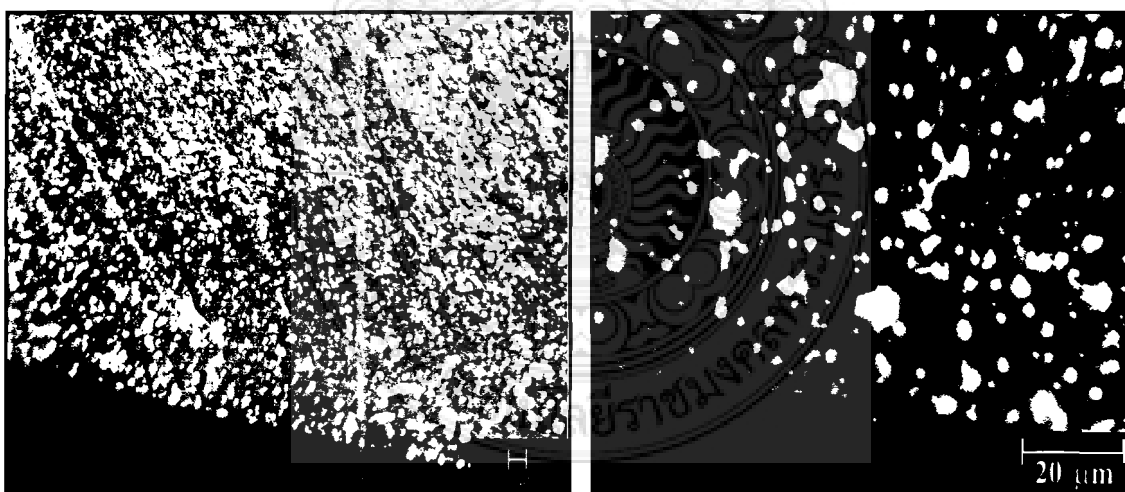
ก)

ข)

รูปที่ ๕ โครงสร้างค้ำในเย็นตัวถึงอุณหภูมิ 35° C

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



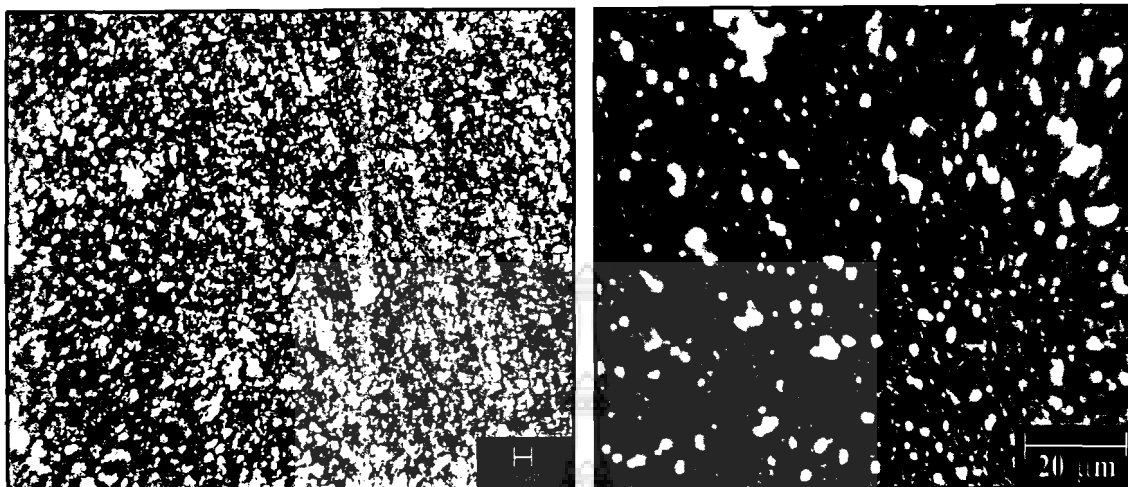
ก)

ข)

รูปที่ ๖ โครงสร้างที่ขอบ บำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ -70° C

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



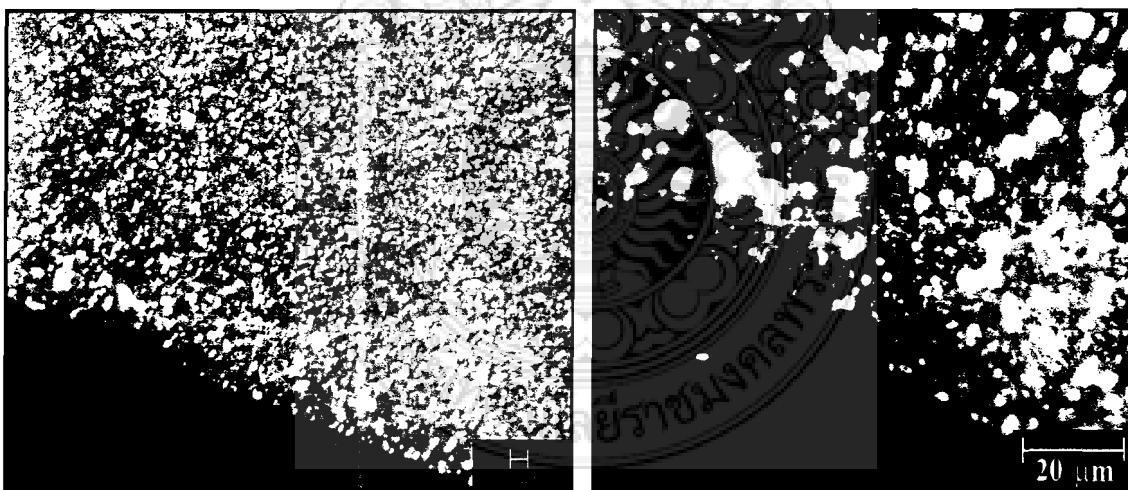
ก)

ข)

รูปที่ ๗.7 โครงสร้างค้ำในใน บำบัดเข็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$ 

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



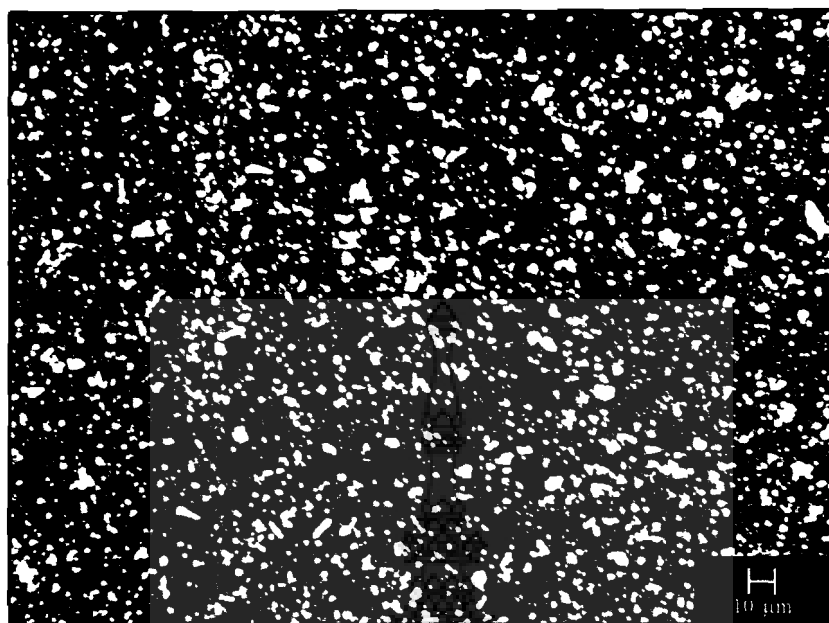
ก)

ข)

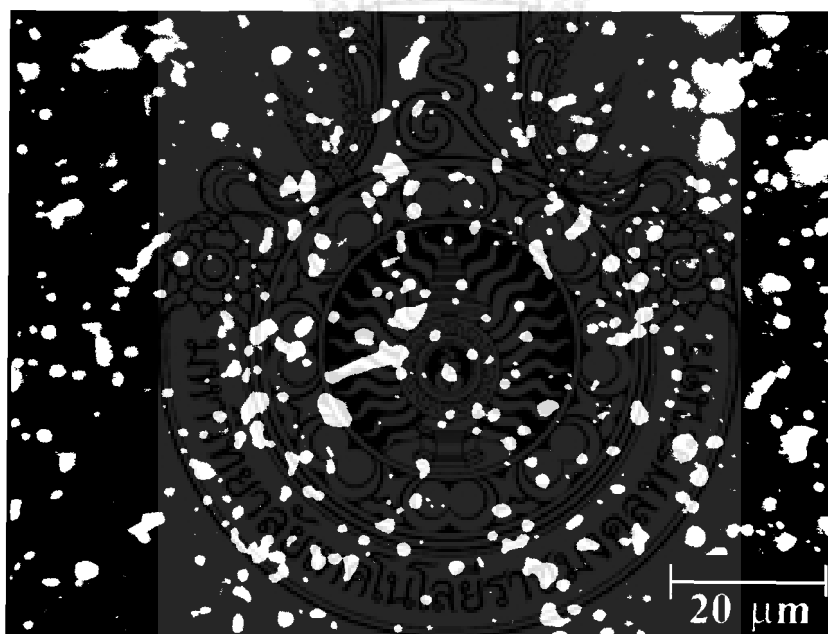
รูปที่ ๗.8 โครงสร้างที่ขอบ บำบัดเข็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$ 

ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า



ก)



ข)

รูปที่ ๙.๑ โครงสร้างด้านใน บำบัดเย็นตัว ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$

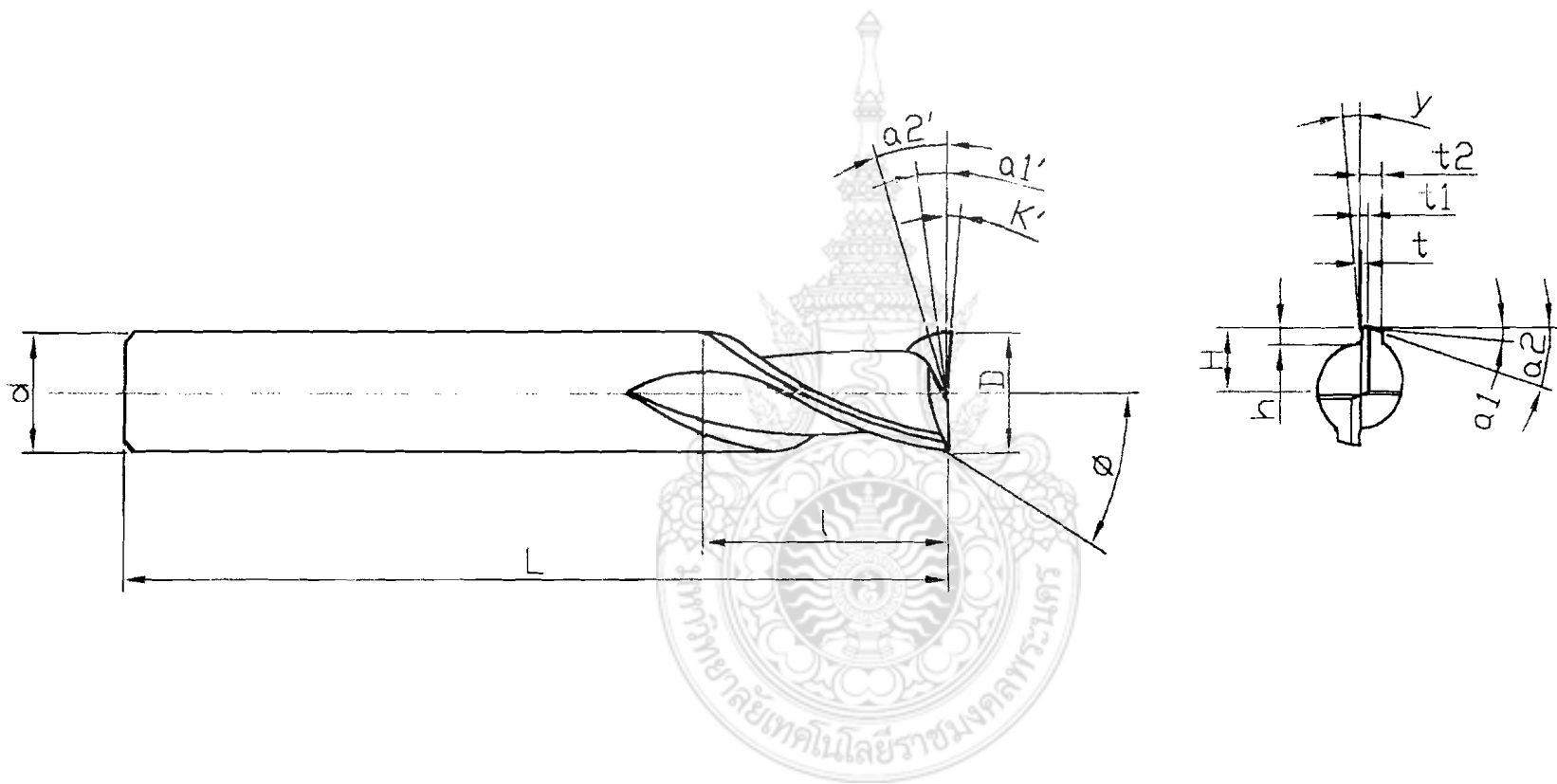
ก) ขนาดกำลังขยายที่ 500 เท่า

ข) ขนาดกำลังขยายที่ 1500 เท่า

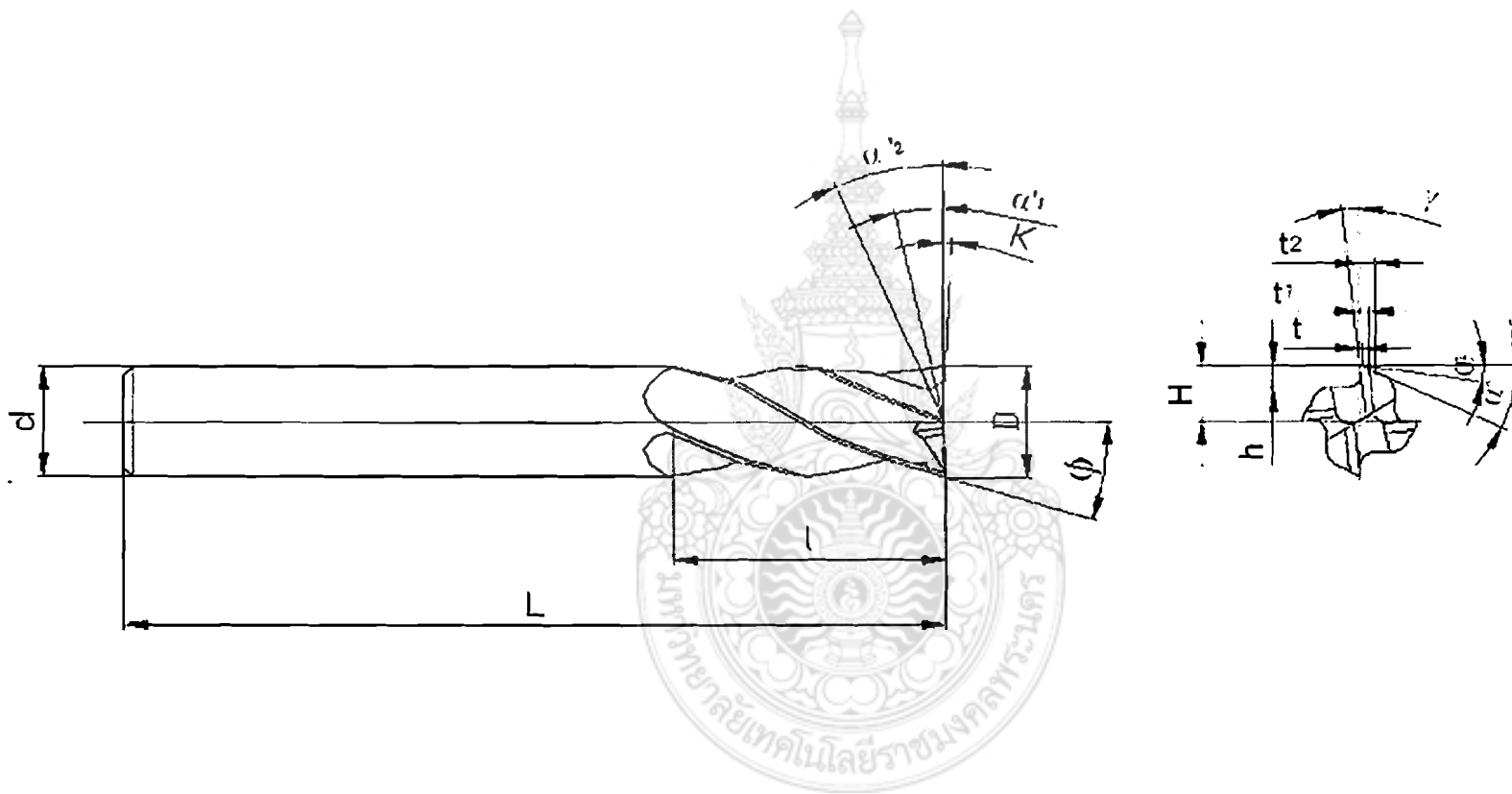
ภาคผนวก ข.

ผลการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด และ 4 คมตัด





รูปที่ ข.1 แสดงขนาดและมุมต่างๆที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 มมตัด



รูปที่ ช.2 แสดงขนาดและมุมต่างๆที่ใช้ในการตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลลล์ 4 คมตัด

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์กัท 2 คมตัด

		NAME OF END MAILL PARTS																
รหัส	กมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
1	1	80.61	30.97	11.95	11.96	15° 35'	29° 32'	3° 58'	14° 22'	11° 20'	22° 12'	0.74	0.85	1.79	2° 15'	6.21	1.83	0.7
	2	80.61	30.97	11.95	11.96	15° 28'	29° 37'	4° 2'	14° 9'	11° 22'	22° 8'	0.74	0.85	1.79	2° 13'	-	1.82	0.7
	เฉลี่ย	80.61	30.97	11.95	11.96	15° 33'	29° 34'	4°	14° 15'	11° 21'	22° 10'	0.74	0.85	1.79	2° 14'	6.21	1.87	0.7
2	1	80.55	30.96	11.86	12.00	15° 38'	30° 4'	4° 22'	14° 15'	11° 8'	21° 57'	0.73	0.87	1.78	2° 25'	6.22	1.79	0.7
	2	80.55	30.96	11.86	12.00	15° 32'	30° 7'	4° 18'	14° 25'	11° 2'	21° 59'	0.73	0.87	1.78	2° 30'	-	1.79	0.7
	เฉลี่ย	80.55	30.96	11.86	12.00	15° 35'	30° 6'	4° 20'	14° 20'	11° 5'	21° 59'	0.73	0.87	1.78	2° 28'	6.22	1.79	0.7
3	1	80.70	31.03	11.83	11.97	15° 25'	30° 2'	3° 57'	13° 48'	10° 58'	22° 3'	0.71	0.86	1.75	2° 2'	6.18	1.80	0.7
	2	80.70	31.03	11.83	11.97	15° 28'	29° 47'	3° 42'	13° 57'	10° 48'	22° 1'	0.71	0.87	1.75	2° 7'	-	1.80	0.7
	เฉลี่ย	80.70	31.03	11.83	11.97	15° 27'	29° 54'	3° 49'	13° 52'	10° 53'	22° 2'	0.71	0.87	1.75	2° 4'	6.18	1.80	0.7
4	1	80.66	31.00	11.95	11.94	15° 35'	29° 20'	4° 22'	13° 32'	10° 52'	21° 57'	0.70	0.86	1.76	2° 9'	6.31	1.78	0.7
	2	80.66	31.00	11.95	11.94	15° 36'	29° 41'	3° 58'	13° 46'	10° 48'	21° 49'	0.70	0.86	1.76	2° 5'	-	1.78	0.7
	เฉลี่ย	80.66	31.00	11.95	11.94	15° 36'	29° 31'	4° 10'	13° 37'	10° 52'	21° 53'	0.70	0.86	1.76	2° 7'	6.31	1.78	0.7
31	1	80.59	30.81	11.88	12.00	15° 45'	30° 2'	4° 23'	14° 26'	11° 15'	22° 4'	0.71	0.85	1.75	2° 1'	2.15	1.80	0.7
	2	80.59	30.81	11.88	12.00	15° 3'	30° 7'	4° 2'	14° 17'	11° 26'	24° 4'	0.71	0.85	1.75	2° 3'	-	1.80	0.7
	เฉลี่ย	80.59	30.81	11.88	12.00	15° 41'	30° 5'	4° 13'	14° 22'	11° 21'	22° 4'	0.71	0.85	1.75	2° 2'	2.15	1.80	0.7

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด (ต่อ)

รหัส	คมที่	NAME OF END MAIL PARTS																
		L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
32	1	80.56	30.90	11.93	11.97	15°19'	30°15'	4°4'	13°58'	11°5'	22°3'	0.75	0.85	1.74	2°11'	6.26	1.81	0.7
	2	80.56	30.90	11.93	11.97	15°22'	30°8'	4°3'	14°3'	11°2'	21°59'	0.75	0.84	1.74	2°15'	-	1.81	0.7
	เฉลี่ย	80.56	30.90	11.93	11.97	15°21'	30°12'	4°3'	14°1'	11°3'	22°1'	0.75	0.85	1.74	2°13'	6.26	1.81	0.7
33	1	80.62	31.04	11.97	11.98	16°1'	29°2'	3°58'	14°2'	10°59'	22°	0.74	0.85	1.75	2°20'	6.31	1.79	0.7
	2	80.62	31.04	11.97	11.98	15°54'	29°7'	3°58'	14°2'	10°59'	21°58'	0.74	0.85	1.75	2°23'	-	1.79	0.7
	เฉลี่ย	80.62	31.04	11.97	11.98	15°57'	29°5'	3°58'	14°2'	10°59'	21°59'	0.74	0.85	1.75	2°22'	6.31	1.79	0.7
34	1	80.56	30.64	11.94	11.97	15°10'	28°58'	4°2'	14°3'	10°58'	21°59'	0.74	0.86	1.76	2°18'	6.28	1.78	0.7
	2	80.56	30.64	11.94	11.97	15°16'	29°5'	4°3'	13°59'	11°2'	21°59'	0.74	0.86	1.76	2°11'	-	1.78	0.7
	เฉลี่ย	80.56	30.64	11.94	11.97	15°13'	29°2'	4°2'	14°2'	11°	21°59'	0.74	0.86	1.76	2°14'	6.28	1.78	0.7
61	1	80.5	31.00	11.79	11.98	15°37'	30°15'	4°1'	13°59'	11°2'	22°22'	0.73	0.85	1.75	1°54'	5.98	1.79	0.7
	2	80.5	31.00	11.79	11.98	15°58'	30°2'	4°59'	13°59'	11°	22°18'	0.73	0.84	1.75	2°3'	-	1.79	0.7
	เฉลี่ย	80.5	31.00	11.79	11.98	15°47'	30°9'	4°	13°59'	11°2'	22°20'	0.73	0.85	1.75	1°59'	5.98	1.79	0.7
62	1	80.58	30.78	11.78	11.98	14°42'	29°27'	4°	13°57'	10°58'	21°57'	0.73	0.84	1.76	2°18'	6.2	1.81	0.7
	2	80.58	30.78	11.78	11.98	14°49'	29°18'	4°2'	14°2'	10°57'	22°	0.73	0.86	1.76	2°27'	-	1.80	0.7
	เฉลี่ย	80.58	30.78	11.78	11.98	14°45'	29°23'	4°1'	14°	10°58'	21°59'	0.73	0.85	1.76	2°23'	6.2	1.81	0.7



ตารางที่ ข.1 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด (ต่อ)

NAME OF END MAIL PARTS																		
รหัส	คมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
63	1	80.51	30.96	11.71	11.99	15°42'	29°44'	3°58'	14°1'	11°8'	22°4'	0.74	0.86	1.75	1°52'	6.28	1.79	0.7
	2	80.51	30.96	11.71	11.99	15°31'	29°38'	3°55'	14°4'	11°10'	22°1'	0.74	0.83	1.75	2°17'	-	1.79	0.7
	เฉลี่ย	80.51	30.96	11.71	11.99	15°36'	29°42'	3°57'	14°	11°9'	22°2'	0.74	0.84	1.75	2°6'	6.28	1.79	0.7
64	1	80.63	30.56	11.81	12.00	16°12'	29°47'	3°59'	13°58'	10°59'	21°58'	0.72	0.85	1.74	2°31'	6.18	1.78	0.7
	2	80.63	30.56	11.81	12.00	15°58'	29°37'	4°4'	13°59'	10°57'	22°3'	0.72	0.86	1.74	2°23'	-	1.78	0.7
	เฉลี่ย	80.63	30.56	11.81	12.00	16°7'	29°42'	4°2'	13°59'	10°58'	22°	0.72	0.86	1.74	2°27'	6.18	1.78	0.7



ตารางที่ ข.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 มมตัด

NAME OF END MAILL PARTS																		
รหัส	คมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
5	1	80.67	31.6	12.00	11.98	7°59'	29°	4°2'	14°3'	10°1'	24°21'	0.74	0.80	1.93	1°59'	-	1.74	0.7
	2	80.67	31.6	12.00	11.98	8°2'	28°59'	4°1'	13°59'	9°58'	24°25'	0.74	0.80	1.93	2°1'	-	1.75	0.7
	3	80.67	31.6	12.00	11.98	8°1'	29°1'	3°59'	14°2'	10°	24°22'	0.74	0.80	1.93	2°	-	1.73	0.7
	4	80.67	31.6	12.00	11.98	7°59'	29°2'	4°1'	14°	9°59'	24°25'	0.74	0.80	1.93	1°59'	-	1.74	0.7
เฉลี่ย		80.67	31.6	12.00	11.98	8°1'	29°1'	4°1'	14°1'	9°59'	24°23'	0.74	0.80	1.93	2°	-	1.74	0.7
6	1	80.74	31.2	11.95	11.94	8°1'	28°59'	4°	13°58'	10°1'	23°58'	0.73	0.82	2.05	2°2'	-	1.75	0.7
	2	80.74	31.2	11.95	11.94	8°	28°58'	3°58'	13°59'	9°59'	24°5'	0.73	0.84	2.05	2°1'	-	1.74	0.7
	3	80.74	31.2	11.95	11.94	7°58'	29°3'	3°59'	14°2'	9°58'	23°57'	0.73	0.84	2.05	2°	-	1.74	0.7
	4	80.74	31.2	11.95	11.94	7°59'	29°1'	4°	13°57'	9°58'	24°2'	0.73	0.82	2.05	1°59'	-	1.73	0.7
เฉลี่ย		80.74	31.2	11.95	11.94	8°	29°	3°59'	13°59'	9°59'	24°	0.73	0.83	2.05	2°	-	1.74	0.7
7	1	80.68	30.84	12.00	11.99	8°2'	29°2'	4°6'	14°2'	10°3'	24°12'	0.75	0.80	1.95	1°59'	-	1.73	0.7
	2	80.68	30.84	12.00	11.99	7°59'	29°1'	4°5'	13°59'	10°5'	24°18'	0.75	0.80	1.95	1°58'	-	1.73	0.7
	3	80.68	30.84	12.00	11.99	8°1'	29°	4°5'	14°	10°2'	24°17'	0.75	0.80	1.95	1°59'	-	1.75	0.7
	4	80.68	30.84	12.00	11.99	7°59'	28°58'	4°5'	14°1'	10°5'	24°15'	0.75	0.80	1.95	2°1'	-	1.42	0.7
เฉลี่ย		80.68	30.84	12.00	11.99	8°1'	29°	4°5'	14°1'	10°3'	24°15'	0.75	0.80	1.95	1°59'	-	1.73	0.7

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด (ต่อ)

		NAME OF END MAIL PARTS																
รหัส	คมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A
8	1	80.67	31.20	12.00	11.98	7°52'	28°59'	3°57'	14°11'	10°8'	25°48'	0.75	0.77	1.98	1°52'	-	1.78	0.7
	2	80.67	31.20	12.00	11.98	7°51'	29°8'	3°58'	14°8'	10°7'	24°43'	0.75	0.77	1.98	2°1'	-	1.79	0.7
	3	80.67	31.20	12.00	11.98	8°2'	29°6'	3°58'	14°5'	10°4'	25°	0.75	0.78	1.98	2°2'	-	1.80	0.7
	4	80.67	31.20	12.00	11.98	7°55'	28°57'	4°2'	13°55'	9°58'	24°58'	0.75	0.77	1.98	2°1'	-	1.79	0.7
	เฉลี่ย	80.67	31.20	12.00	11.98	7°57'	29°2'	3°58'	14°4'	10°4'	24°52'	0.75	0.77	1.98	2°		1.79	0.7
35	1	80.47	31.17	11.96	11.94	8°2'	29°5'	3°59'	13°58'	10°2'	24°48'	0.73	0.80	2.03	2°2'	-	1.81	0.7
	2	80.47	31.17	11.96	11.94	8°7'	29°8'	3°57'	14°2'	9°57'	24°29'	0.73	0.80	2.03	2°1'	-	1.82	0.7
	3	80.47	31.17	11.96	11.94	8°2'	29°6'	4°1'	14°3'	9°59'	24°33'	0.73	0.80	2.03	2°2'	-	1.81	0.7
	4	80.47	31.17	11.96	11.94	7°59'	29°5'	4°3'	13°59'	9°58'	24°31'	0.73	0.80	2.03	2°1'	-	1.80	0.7
	เฉลี่ย	80.47	31.17	11.96	11.94	8°1'	29°6'	4°	14°1'	9°58'	24°35'	0.73	0.80	2.03	2°1'		1.81	0.7
36	1	80.67	31.33	12.00	11.96	8°5'	28°58'	3°58'	14°2'	10°3'	24°31'	0.72	0.76	1.96	1°59'	-	1.79	0.7
	2	80.67	31.33	12.00	11.96	8°2'	29°2'	4°2'	13°58'	9°59'	24°24'	0.72	0.76	1.96	1°58'	-	1.77	0.7
	3	80.67	31.33	12.00	11.96	8°4'	29°1'	3°59'	14°1'	10°2'	24°33'	0.72	0.76	1.96	2°2'	-	1.76	0.7
	4	80.67	31.33	12.00	11.96	8°5'	28°57'	4°3'	13°59'	9°58'	24°19'	0.72	0.77	1.96	2°1'	-	1.77	0.7
	เฉลี่ย	80.67	31.33	12.00	11.96	8°4'	28°59'	4°1'	14°	10°1'	24°26'	0.72	0.76	1.96	2°	-	1.77	0.7

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 กมตัด (ต่อ)

		NAME OF END MAIL PARTS																	
รหัส	คมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A	
37	1	80.65	31.27	80.65	11.95	8°3'	29°2'	4°2'	13°58'	10°1'	24°28'	0.73	0.76	1.98	1°59'	-	1.76	0.7	
	2	80.65	31.27	80.65	11.95	8°2'	28°58'	4°5'	13°59'	9°59'	24°25'	0.73	0.76	1.98	2°1'	-	1.75	0.7	
	3	80.65	31.27	80.65	11.95	8°1'	29°1'	3°59'	14°2'	10°2'	24°23'	0.73	0.77	1.98	2°2'	-	1.75	0.7	
	4	80.65	31.27	80.65	11.95	7°59'	29°3'	4°1'	14°	9°57'	24°29'	0.73	0.76	1.98	2°2'	-	1.77	0.7	
เฉลี่ย		80.65	31.27	80.65	11.95	8°1'	29°1'	4°1'	14°	9°59'	24°26'	0.73	0.76	1.98	2°1'		1.76	0.7	
38	1	80.65	31.32	12.00	11.96	7°58'	28°59'	4°	14°2'	10°3'	23°58'	0.74	0.77	1.87	2°	-	1.78	0.7	
	2	80.65	31.32	12.00	11.96	8°2'	29°	4°1'	14°3'	10°4'	23°59'	0.74	0.77	1.87	1°59'	-	1.77	0.7	
	3	80.65	31.32	12.00	11.96	8°1'	29°2'	3°59'	14°1'	10°2'	24°3'	0.74	0.77	1.87	2°3'	-	1.78	0.7	
	4	80.65	31.32	12.00	11.96	7°59'	28°58'	4°3'	13°59'	9°59'	24°8'	0.74	0.76	1.87	1°59'	-	1.76	0.7	
เฉลี่ย		80.65	31.32	12.00	11.96	8°	29°	4°1'	14°1'	10°2'	24°2'	0.74	0.77	1.87	๒		1.77	0.7	
65	1	80.57	30.83	12.00	11.96	8°3'	29°4'	3°59'	14°3'	10°1'	24°31'	0.72	0.78	1.89	1°59'	-	1.69	0.7	
	2	80.57	30.83	12.00	11.96	8°2'	29°2'	3°58'	13°59'	9°59'	24°39'	0.72	0.78	1.89	2°1'	-	1.70	0.7	
	3	80.57	30.83	12.00	11.96	8°2'	29°1'	3°59'	14°1'	10°	24°33'	0.72	0.78	1.89	2°3'	-	1.71	0.7	
	4	80.57	30.83	12.00	11.96	8°3'	28°59'	4°2'	13°58'	10°	24°29'	0.72	0.78	1.89	1°59'	-	1.70	0.7	
เฉลี่ย		80.57	30.83	12.00	11.96	8°2'	29°1'	3°59'	14°	10°	24°33'	0.72	0.78	1.89	2°1'		1.70	0.7	

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด (ต่อ)

		NAME OF END MAIL PARTS																	
รหัส	คมที่	L	l	D	d	$\gamma$	$\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	K	H	R <sub>1</sub>	A	
66	1	80.52	31.30	11.98	11.95	8°1'	28°59'	4°2'	13°58'	10°1'	24°28'	0.73	0.76	1.87	2°	-	1.69	0.7	
	2	80.52	31.30	11.98	11.95	8°2'	28°58'	4°1'	13°59'	9°59'	24°25'	0.73	0.76	1.87	2°	-	1.68	0.7	
		80.52	31.30	11.98	11.95	7°58'	29°	3°59'	14°2'	10°2'	24°23'	0.73	0.76	1.87	1°59'	-	1.69	0.7	
		80.52	31.30	11.98	11.95	7°59'	29°1'	3°58'	13°59'	9°57'	24°29'	0.73	0.76	1.87	2°2'	-	1.68	0.7	
เฉลี่ย		80.52	31.30	11.98	11.95	8°	28°59'	4°	13°59'	10°	24°26'	0.73	0.76	1.87	2°1'		1.68	0.7	
67	1	80.64	31.24	11.98	11.96	8°3'	28°59'	3°58'	14°2'	10°3'	23°58'	0.74	0.75	1.83	2°1'	-	1.68	0.7	
	2	80.64	31.24	11.98	11.96	8°2'	29°	4°1'	14°3'	10°4'	23°59'	0.74	0.75	1.83	2°2'	-	1.67	0.7	
		80.64	31.24	11.98	11.96	8°2'	29°1'	3°59'	14°1'	10°2'	24°3'	0.74	0.75	1.83	2°2'	-	1.68	0.7	
		80.64	31.24	11.98	11.96	7°59'	28°58'	4°3'	13°59'	9°59'	24°8'	0.74	0.76	1.83	2°	-	1.68	0.7	
เฉลี่ย		80.64	31.24	11.98	11.96	8°2'	28°59'	4°1'	14°1'	10°2'	24°2'	0.74	0.75	1.83	2°		1.68	0.7	
69	1	80.65	31.30	12.00	11.96	7°57'	28°59'	3°59'	14°3'	10°1'	24°31'	0.73	0.765	1.89	1°58'	-	1.72	0.7	
	2	80.65	31.30	12.00	11.96	7°56'	29°2'	3°58'	13°59'	9°59'	24°39'	0.73	0.76	1.89	1°58'	-	1.71	0.7	
		80.65	31.30	12.00	11.96	7°59'	29°1'	3°59'	14°1'	10°	24°33'	0.73	0.76	1.89	2°1'	-	1.71	0.7	
		80.65	31.30	12.00	11.96	8°	28°59'	4°2'	13°58'	10°	24°29'	0.73	0.76	1.89	2°	-	1.71	0.7	
เฉลี่ย		80.65	31.30	12.00	11.96	7°58'	29°	4°	14°	10°	24°33'	0.73	0.76	1.89	1°59'		1.71	0.7	



ภาคผนวก ซ.

ระบะการศึกษรของเอนมิลลในแต่ละอุนหภูมิ

ตารางที่ ข.1 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 1

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.098	0.127	0.129	
	1.0	0.094	0.119	0.160	
	1.5	0.096	0.138	0.147	
	2.0	0.090	0.116	0.141	
	2.5	0.099	0.124	0.145	
	3.0	0.098	0.122	0.168	
2	0.5	0.097	0.114	0.161	
	1.0	0.091	0.125	0.180	
	1.5	0.100	0.152	0.170	
	2.0	0.103	0.135	0.147	
	2.5	0.103	0.127	0.131	
	3.0	0.098	0.136	0.172	

ตารางที่ ข.2 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 2

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.098	0.125	0.202	
	1.0	0.097	0.137	0.172	
	1.5	0.100	0.138	0.132	
	2.0	0.099	0.094	0.117	
	2.5	0.102	0.097	0.154	
	3.0	0.096	0.125	0.151	
2	0.5	0.116	0.178	0.210	
	1.0	0.107	0.120	0.129	
	1.5	0.106	0.105	0.152	
	2.0	0.099	0.124	0.157	
	2.5	0.097	0.112	0.123	
	3.0	0.098	0.130	0.203	

ตารางที่ ข.3 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 3

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.103	0.128	0.164	
	1.0	0.106	0.119	0.179	
	1.5	0.099	0.135	0.175	
	2.0	0.105	0.144	0.181	
	2.5	0.104	0.133	0.179	
	3.0	0.114	0.142	0.180	
2	0.5	0.113	0.160	0.186	
	1.0	0.112	0.130	0.172	
	1.5	0.109	0.124	0.190	
	2.0	0.100	0.105	0.155	
	2.5	0.089	0.092	0.172	
	3.0	0.102	0.170	0.213	

ตารางที่ ข.4 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 31

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.074	0.092	0.154	
	1.0	0.087	0.095	0.107	
	1.5	0.091	0.092	0.103	
	2.0	0.060	0.086	0.113	
	2.5	0.072	0.090	0.110	
	3.0	0.072	0.109	0.187	
2	0.5	0.069	0.101	0.129	
	1.0	0.100	0.099	0.126	
	1.5	0.104	0.109	0.171	
	2.0	0.101	0.103	0.145	
	2.5	0.095	0.099	0.116	
	3.0	0.106	0.115	0.142	



ตารางที่ ข.5 ใบรายงานผลการศึกษารองของเอ็นมิลล์ รหัส 32

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.057	0.099	0.119	
	1.0	0.091	0.097	0.105	
	1.5	0.086	0.106	0.116	
	2.0	0.097	0.105	0.123	
	2.5	0.098	0.108	0.141	
	3.0	0.093	0.109	0.143	
2	0.5	0.066	0.100	0.107	
	1.0	0.075	0.106	0.160	
	1.5	0.099	0.131	0.175	
	2.0	0.087	0.114	0.146	
	2.5	0.079	0.109	0.130	
	3.0	0.071	0.117	0.172	

ตารางที่ ข.6 ใบรายงานผลการศึกษารองของเอ็นมิลล์ รหัส 33

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.069	0.078	0.094	
	1.0	0.077	0.098	0.102	
	1.5	0.086	0.113	0.124	
	2.0	0.099	0.111	0.161	
	2.5	0.092	0.112	0.133	
	3.0	0.097	0.108	0.171	
2	0.5	0.089	0.104	0.162	
	1.0	0.079	0.109	0.153	
	1.5	0.075	0.112	0.135	
	2.0	0.069	0.109	0.138	
	2.5	0.098	0.124	0.161	
	3.0	0.099	0.126	0.150	

ตารางที่ ข.7 ใบรายงานผลการศึกษารองของเอ็นมิลล์ รหัส 61

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.070	0.109	0.127	
	1.0	0.076	0.095	0.105	
	1.5	0.065	0.089	0.121	
	2.0	0.056	0.083	0.095	
	2.5	0.074	0.103	0.118	
	3.0	0.042	0.079	0.104	
2	0.5	0.090	0.116	0.125	
	1.0	0.082	0.118	0.146	
	1.5	0.099	0.143	0.176	
	2.0	0.108	0.148	0.161	
	2.5	0.100	0.112	0.128	
	3.0	0.089	0.098	0.175	

ตารางที่ ข.8 ใบรายงานผลการศึกษารองของเอ็นมิลล์ รหัส 62

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.089	0.086	0.139	
	1.0	0.064	0.109	0.142	
	1.5	0.052	0.089	0.153	
	2.0	0.091	0.103	0.142	
	2.5	0.052	0.098	0.140	
	3.0	0.046	0.093	0.116	
2	0.5	0.086	0.106	0.150	
	1.0	0.134	0.108	0.138	
	1.5	0.100	0.099	0.137	
	2.0	0.104	0.113	0.123	
	2.5	0.079	0.089	0.122	
	3.0	0.089	0.109	0.133	

ตารางที่ ข.9 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 63

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเดือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.028	0.097	0.163	
	1.0	0.054	0.106	0.176	
	1.5	0.057	0.131	0.180	
	2.0	0.044	0.118	0.144	
	2.5	0.039	0.110	0.143	
	3.0	0.070	0.119	0.150	
2	0.5	0.066	0.128	0.110	
	1.0	0.072	0.091	0.111	
	1.5	0.083	0.101	0.114	
	2.0	0.069	0.071	0.113	
	2.5	0.096	0.107	0.126	
	3.0	0.103	0.126	0.154	



ตารางที่ ซ.10 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 5

กมตค	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.068	0.105	0.153	
	1.0	0.066	0.117	0.173	
	1.5	0.070	0.119	0.161	
	2.0	0.067	0.099	0.106	
	2.5	0.089	0.113	0.132	
	3.0	0.083	0.131	0.228	
2	0.5	0.054	0.147	0.179	
	1.0	0.053	0.140	0.167	
	1.5	0.056	0.102	0.118	
	2.0	0.059	0.098	0.106	
	2.5	0.058	0.094	0.113	
	3.0	0.066	0.132	0.145	
3	0.5	0.061	0.145	0.193	
	1.0	0.049	0.127	0.162	
	1.5	0.070	0.103	0.119	
	2.0	0.064	0.099	0.104	
	2.5	0.080	0.104	0.115	
	3.0	0.057	0.103	0.117	
4	0.5	0.053	0.097	0.127	
	1.0	0.054	0.094	0.109	
	1.5	0.054	0.079	0.108	
	2.0	0.057	0.096	0.099	
	2.5	0.067	0.086	0.114	
	3.0	0.068	0.110	0.155	

ตารางที่ ข.11 ใบรายงานผลการสีกรของเอ็นมิลล์ รหัส 6

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.088	0.126	0.153	
	1.0	0.088	0.117	0.129	
	1.5	0.087	0.099	0.106	
	2.0	0.085	0.098	0.102	
	2.5	0.097	0.100	0.105	
	3.0	0.086	0.131	0.173	
2	0.5	0.074	0.149	0.238	
	1.0	0.097	0.126	0.184	
	1.5	0.087	0.093	0.151	
	2.0	0.089	0.010	0.090	
	2.5	0.088	0.090	0.112	
	3.0	0.092	0.193	0.226	
3	0.5	0.058	0.114	0.174	
	1.0	0.056	0.112	0.177	
	1.5	0.045	0.104	0.097	
	2.0	0.097	0.113	0.077	
	2.5	0.054	0.123	0.153	
	3.0	0.096	0.131	0.204	
4	0.5	0.051	0.088	0.128	
	1.0	0.060	0.120	0.077	
	1.5	0.053	0.121	0.069	
	2.0	0.058	0.094	0.099	
	2.5	0.071	0.119	0.093	
	3.0	0.080	0.114	0.155	

ตารางที่ ซ.12 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 7

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.062	0.113	0.185	
	1.0	0.053	0.103	0.148	
	1.5	0.060	0.099	0.107	
	2.0	0.063	0.076	0.109	
	2.5	0.058	0.095	0.133	
	3.0	0.055	0.086	0.160	
2	0.5	0.064	0.081	0.209	
	1.0	0.068	0.085	0.206	
	1.5	0.058	0.078	0.146	
	2.0	0.041	0.072	0.099	
	2.5	0.046	0.097	0.102	
	3.0	0.074	0.095	0.136	
3	0.5	0.058	0.117	0.204	
	1.0	0.062	0.141	0.201	
	1.5	0.063	0.145	0.141	
	2.0	0.054	0.091	0.098	
	2.5	0.056	0.088	0.105	
	3.0	0.061	0.117	0.194	
4	0.5	0.069	0.131	0.207	
	1.0	0.074	0.145	0.169	
	1.5	0.064	0.099	0.106	
	2.0	0.067	0.094	0.121	
	2.5	0.059	0.109	0.105	
	3.0	0.086	0.189	0.194	

ตารางที่ ข.13 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 35

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.052	0.076	0.119	
	1.0	0.050	0.078	0.125	
	1.5	0.054	0.083	0.099	
	2.0	0.058	0.079	0.093	
	2.5	0.048	0.084	0.085	
	3.0	0.030	0.083	0.164	
2	0.5	0.037	0.074	0.170	
	1.0	0.068	0.062	0.144	
	1.5	0.077	0.100	0.106	
	2.0	0.040	0.092	0.116	
	2.5	0.023	0.065	0.136	
	3.0	0.082	0.115	0.199	
3	0.5	0.023	0.186	0.187	
	1.0	0.023	0.108	0.139	
	1.5	0.030	0.118	0.105	
	2.0	0.040	0.128	0.131	
	2.5	0.043	0.115	0.120	
	3.0	0.051	0.138	0.151	
4	0.5	0.078	0.124	0.138	
	1.0	0.071	0.102	0.154	
	1.5	0.055	0.104	0.118	
	2.0	0.026	0.111	0.076	
	2.5	0.040	0.106	0.109	
	3.0	0.051	0.163	0.170	

ตารางที่ ซ.14 ใบรายงานผลการสีกรของเอ็นมิลล์ รหัส 36

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.060	0.127	0.144	
	1.0	0.066	0.119	0.127	
	1.5	0.055	0.112	0.140	
	2.0	0.024	0.098	0.104	
	2.5	0.060	0.080	0.115	
	3.0	0.065	0.110	0.164	
	2	0.5	0.049	0.117	0.147
1.0		0.050	0.120	0.127	
1.5		0.058	0.103	0.111	
2.0		0.036	0.079	0.102	
2.5		0.028	0.085	0.093	
3.0		0.046	0.086	0.098	
3		0.5	0.051	0.076	0.115
	1.0	0.076	0.127	0.158	
	1.5	0.043	0.084	0.110	
	2.0	0.046	0.095	0.106	
	2.5	0.031	0.103	0.109	
	3.0	0.054	0.126	0.210	
	4	0.5	0.047	0.111	0.200
1.0		0.045	0.127	0.154	
1.5		0.028	0.084	0.123	
2.0		0.046	0.095	0.112	
2.5		0.057	0.103	0.131	
3.0		0.043	0.126	0.182	



ตารางที่ ข.15 ใบรายงานผลการสีกรของเอ็นมิลล์ รหัส 37

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเดือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.053	0.127	0.163	
	1.0	0.051	0.131	0.178	
	1.5	0.046	0.101	0.147	
	2.0	0.050	0.055	0.084	
	2.5	0.048	0.084	0.093	
	3.0	0.052	0.129	0.176	
2	0.5	0.049	0.124	0.163	
	1.0	0.057	0.148	0.172	
	1.5	0.054	0.099	0.121	
	2.0	0.054	0.104	0.112	
	2.5	0.037	0.088	0.096	
	3.0	0.064	0.129	0.166	
3	0.5	0.057	0.112	0.151	
	1.0	0.057	0.107	0.138	
	1.5	0.037	0.086	0.090	
	2.0	0.051	0.106	0.113	
	2.5	0.053	0.115	0.139	
	3.0	0.068	0.116	0.136	
4	0.5	0.063	0.107	0.135	
	1.0	0.049	0.100	0.134	
	1.5	0.037	0.080	0.090	
	2.0	0.049	0.095	0.116	
	2.5	0.049	0.103	0.116	
	3.0	0.059	0.116	0.127	

ตารางที่ ข.16 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 65

กมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.050	0.085	0.156	
	1.0	0.067	0.099	0.177	
	1.5	0.042	0.094	0.159	
	2.0	0.053	0.076	0.097	
	2.5	0.054	0.122	0.095	
	3.0	0.059	0.098	0.106	
2	0.5	0.032	0.083	0.198	
	1.0	0.048	0.082	0.176	
	1.5	0.049	0.098	0.119	
	2.0	0.026	0.115	0.131	
	2.5	0.032	0.097	0.133	
	3.0	0.048	0.109	0.139	
3	0.5	0.066	0.148	0.177	
	1.0	0.059	0.115	0.119	
	1.5	0.050	0.098	0.102	
	2.0	0.039	0.098	0.108	
	2.5	0.055	0.088	0.143	
	3.0	0.044	0.121	0.150	
4	0.5	0.064	0.123	0.143	
	1.0	0.059	0.104	0.113	
	1.5	0.053	0.121	0.107	
	2.0	0.058	0.110	0.116	
	2.5	0.056	0.106	0.113	
	3.0	0.071	0.125	0.142	

ตารางที่ ๗.17 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 66

กมตค	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเนื้อ			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.047	0.090	0.150	
	1.0	0.054	0.101	0.138	
	1.5	0.039	0.067	0.123	
	2.0	0.025	0.067	0.089	
	2.5	0.041	0.091	0.148	
	3.0	0.044	0.052	0.105	
2	0.5	0.039	0.095	0.128	
	1.0	0.048	0.081	0.131	
	1.5	0.045	0.096	0.107	
	2.0	0.038	0.099	0.103	
	2.5	0.050	0.082	0.107	
	3.0	0.073	0.083	0.112	
3	0.5	0.067	0.127	0.172	
	1.0	0.064	0.121	0.176	
	1.5	0.059	0.111	0.168	
	2.0	0.061	0.108	0.156	
	2.5	0.058	0.078	0.093	
	3.0	0.069	0.108	0.138	
4	0.5	0.059	0.156	0.179	
	1.0	0.047	0.164	0.171	
	1.5	0.059	0.108	0.156	
	2.0	0.073	0.083	0.118	
	2.5	0.055	0.075	0.142	
	3.0	0.053	0.133	0.114	

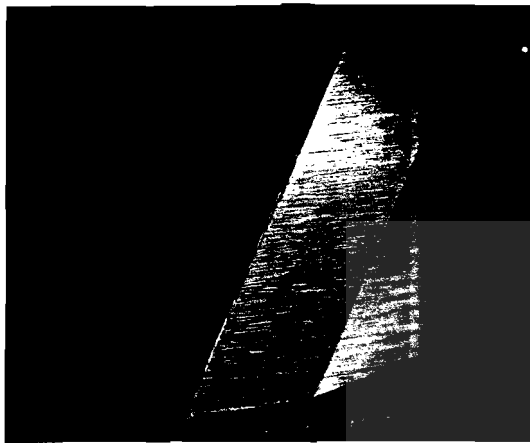
ตารางที่ ข.18 ใบรายงานผลการสึกหรอของเอ็นมิลล์ รหัส 67

คมตัด	ระยะ (มม.)	ระยะการตัดเฉือน			หมายเหตุ
		1000	2000	3000	
1	0.5	0.038	0.129	0.148	
	1.0	0.059	0.138	0.142	
	1.5	0.040	0.091	0.086	
	2.0	0.021	0.067	0.106	
	2.5	0.041	0.097	0.143	
	3.0	0.044	0.116	0.180	
2	0.5	0.035	0.085	0.095	
	1.0	0.053	0.083	0.085	
	1.5	0.054	0.070	0.072	
	2.0	0.045	0.070	0.134	
	2.5	0.039	0.076	0.092	
	3.0	0.047	0.107	0.138	
3	0.5	0.019	0.082	0.114	
	1.0	0.032	0.081	0.124	
	1.5	0.019	0.049	0.107	
	2.0	0.028	0.070	0.090	
	2.5	0.039	0.057	0.084	
	3.0	0.031	0.064	0.148	
4	0.5	0.054	0.128	0.217	
	1.0	0.045	0.140	0.248	
	1.5	0.064	0.153	0.170	
	2.0	0.072	0.080	0.098	
	2.5	0.060	0.095	0.085	
	3.0	0.057	0.110	0.148	

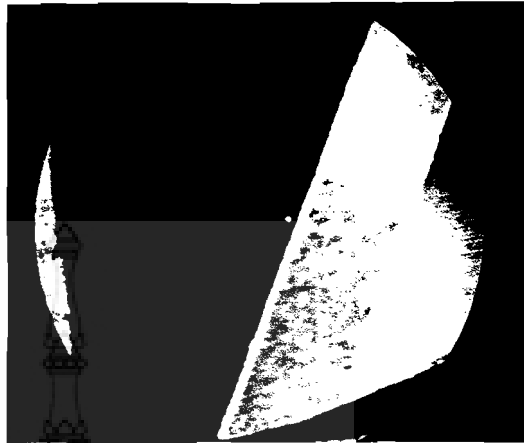


ภาคผนวก ฉ.

รูปถ่ายคมตัดของเอ็นมิลล์



ก)



ข)



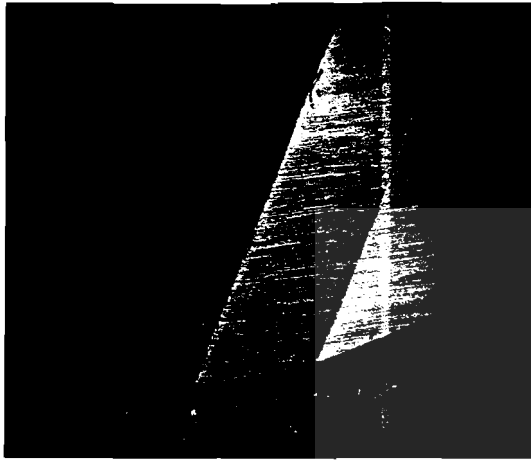
ค)



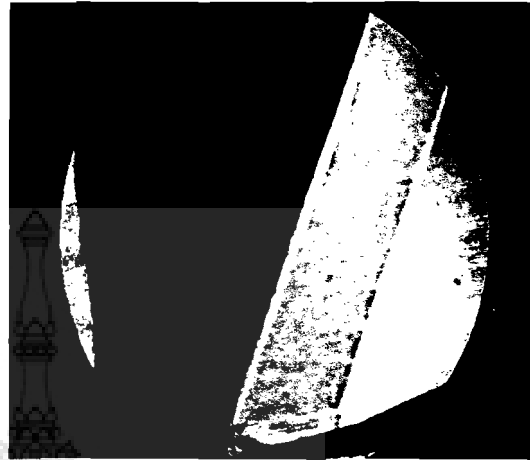
ง)

รูปที่ ๗.1 แสดงการสึกหกร่อนของตัวอย่างเอ็นมิลล์ 2 มมตัด รหัศ 1

- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



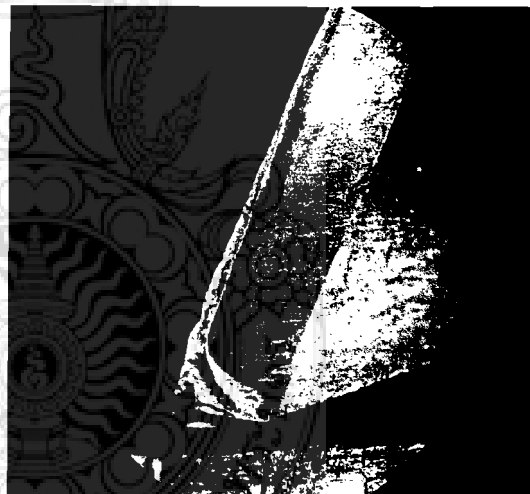
ก)



ข)



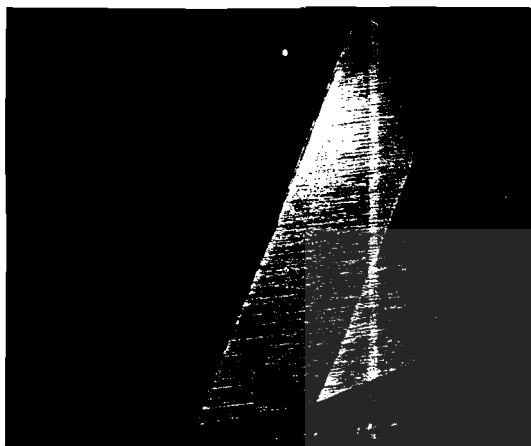
ค)



ง)

รูปที่ ๓.๒ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ 2 ซม.ตัด รหัส 2

- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



ค)

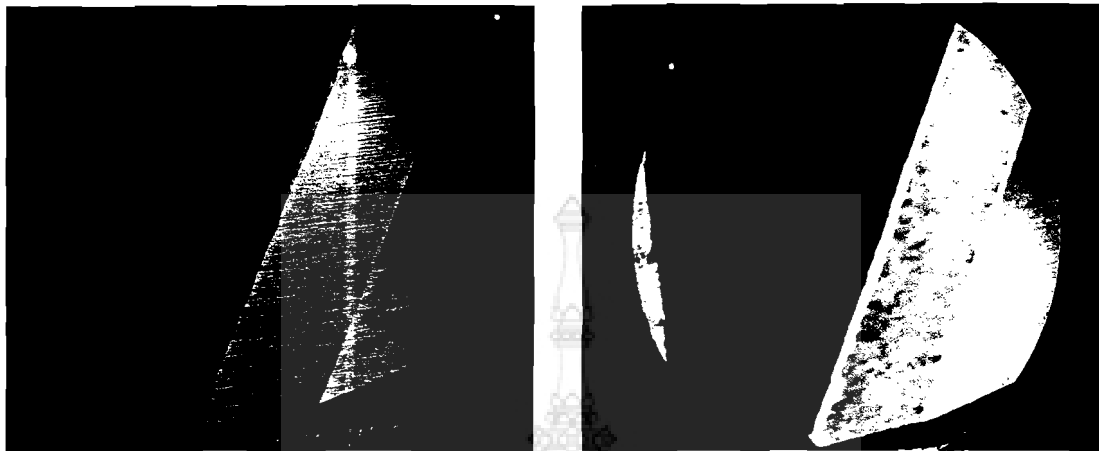


ง)

รูปที่ ๓.3 แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ 2 ซม.ตัด รหัส 3

- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า





ก)

ข)

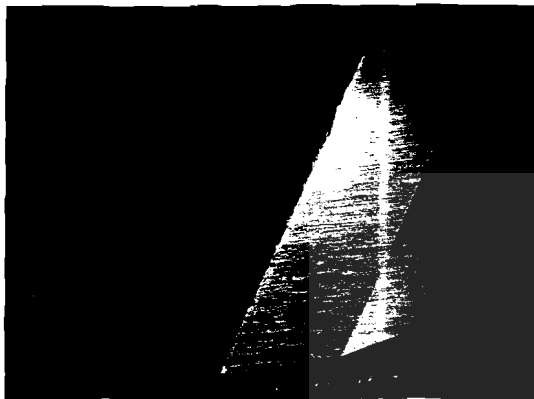


ค)

ง)

รูปที่ ๓.๔ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ 2 ซมตัด รหัส 31

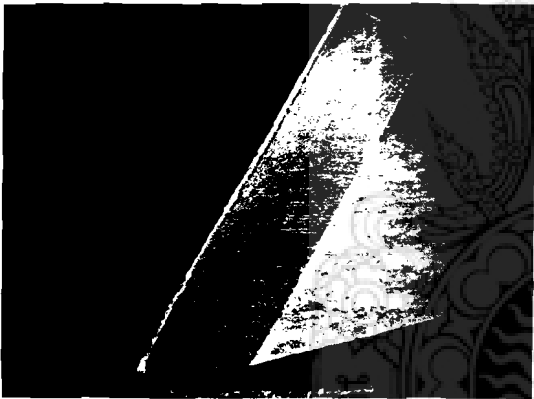
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเนื้อ ก้างขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเนื้อเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. ก้างขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเนื้อเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. ก้างขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเนื้อเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. ก้างขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



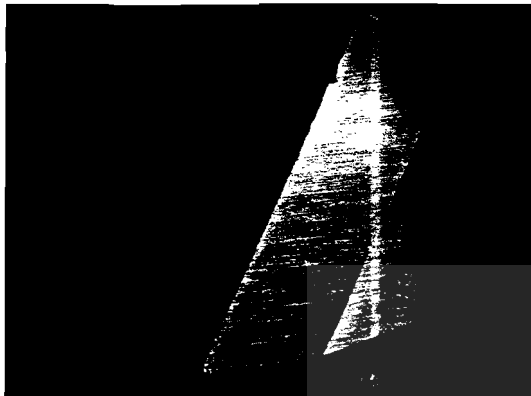
ค)



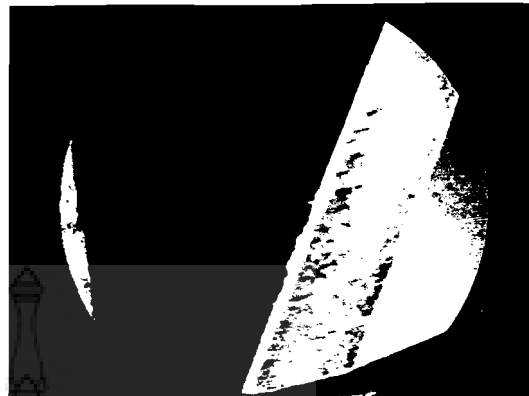
ง)

รูปที่ ๕.5 แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด รหัส 32

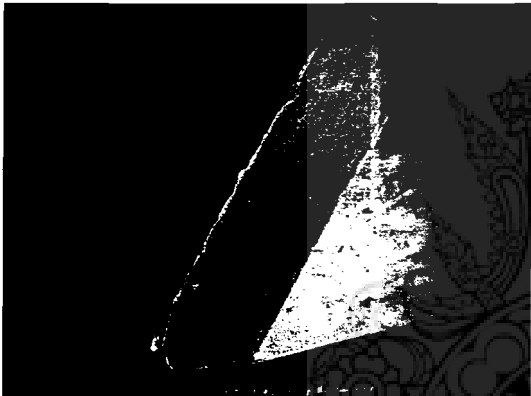
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



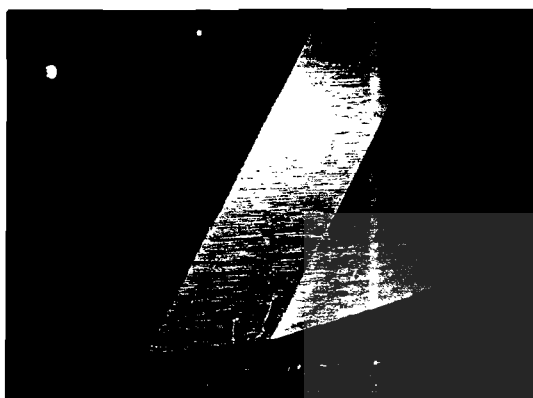
ค)



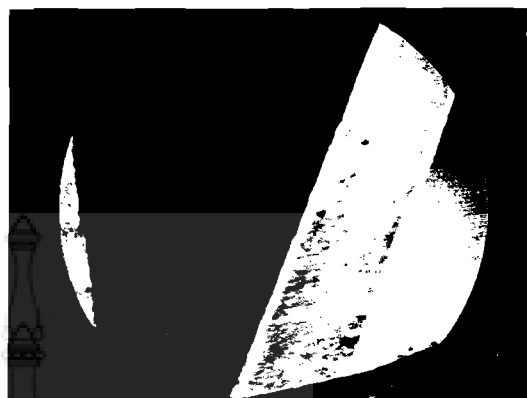
ง)

รูปที่ ๖.6 แสดงการสึกกร่อนของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด รหัส 33

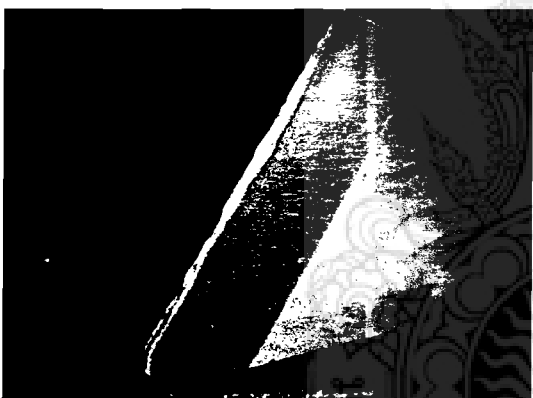
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



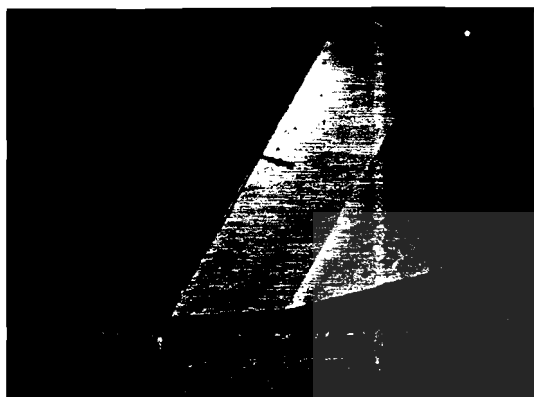
ค)



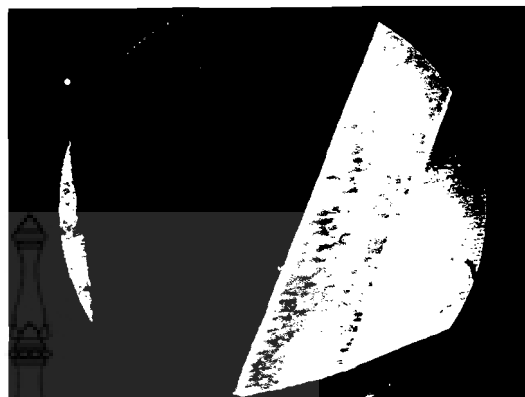
ง)

รูปที่ ๗.7 แสดงการสีกรหของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด รหัส 61

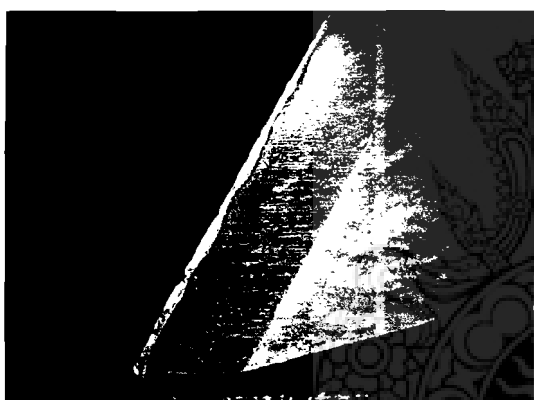
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



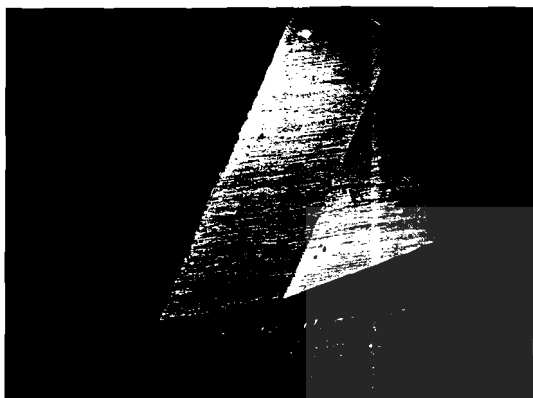
ค)



ง)

รูปที่ ๘.๘ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด รหัส 62

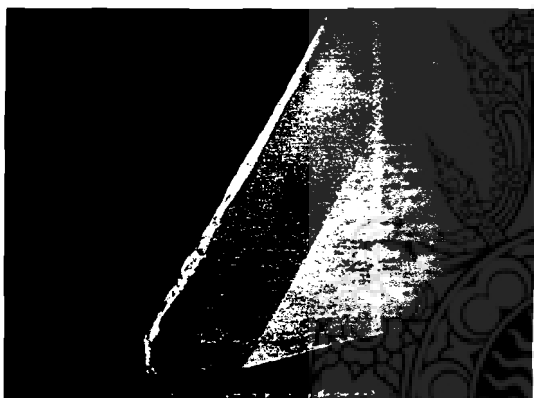
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



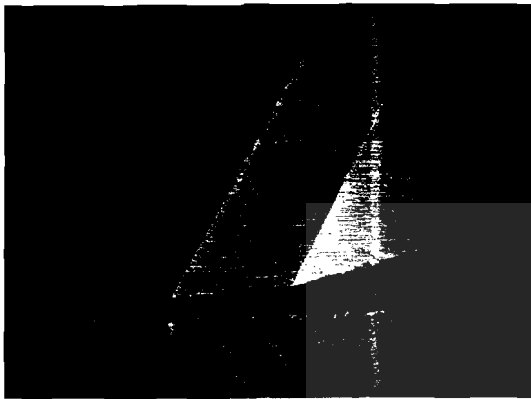
ค)



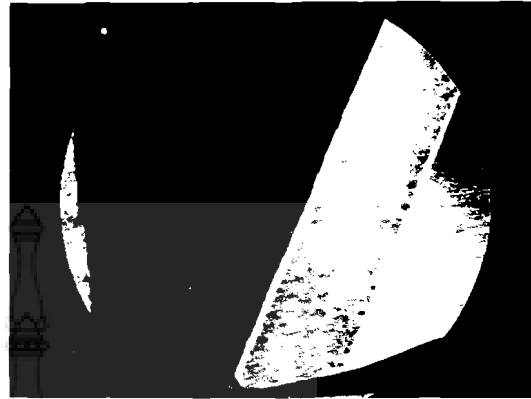
ง)

รูปที่ ๗.9 แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 2 คมตัด รหัส 63

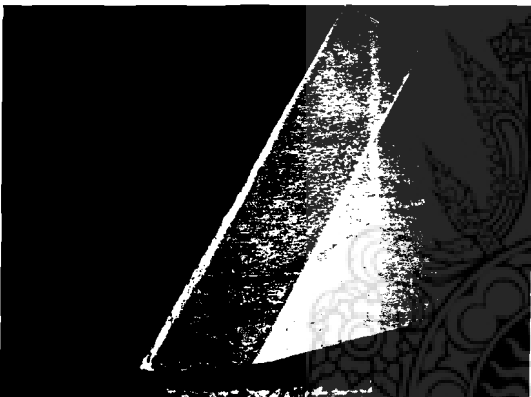
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



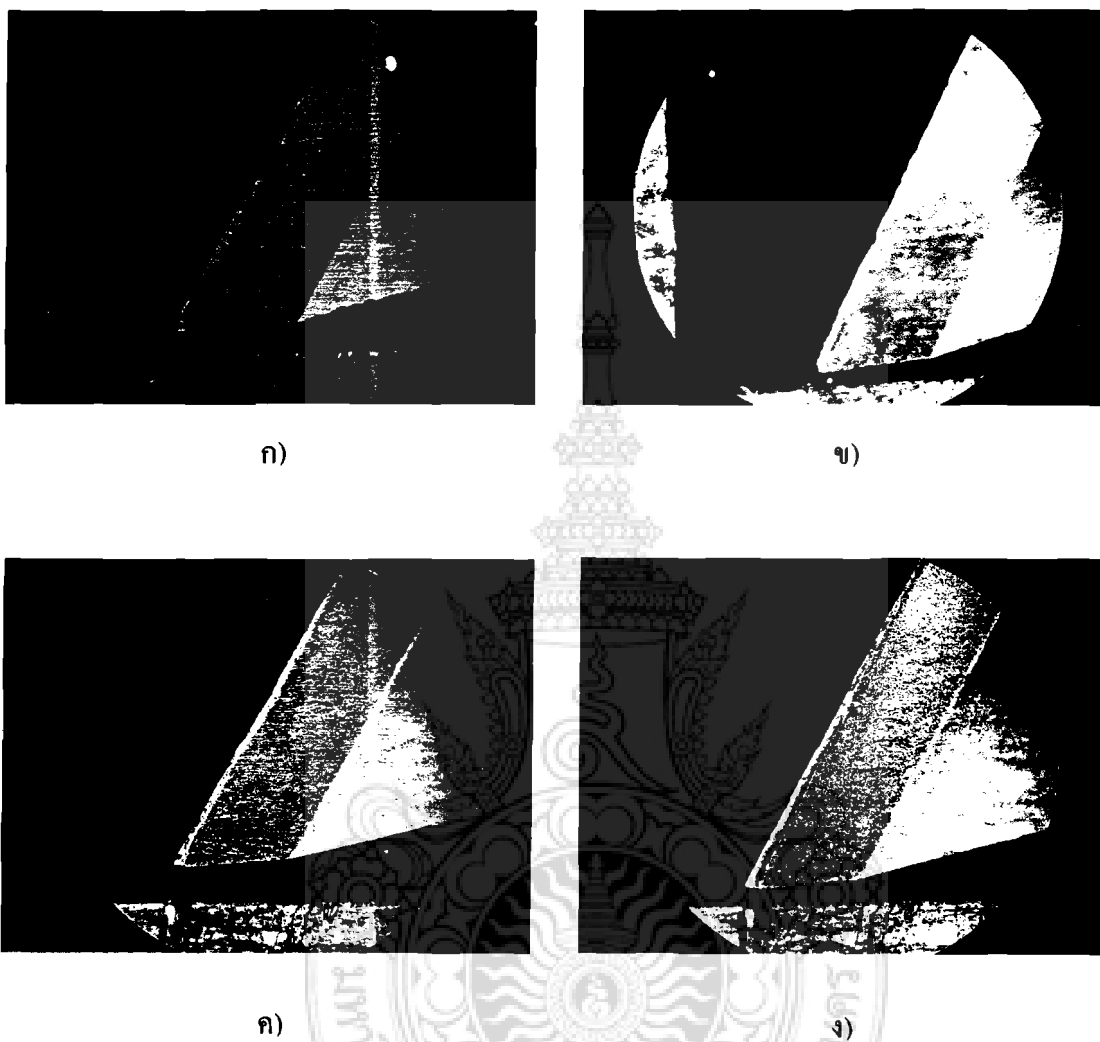
ค)



ง)

รูปที่ ๑๑.10 แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 5

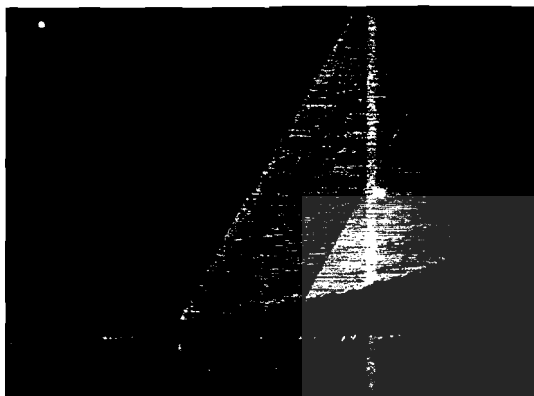
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



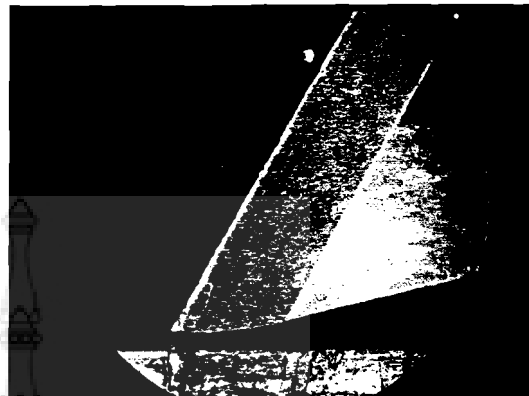
รูปที่ ๑๑.๑๑ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 ซม.ตัด รหัส 6

- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า

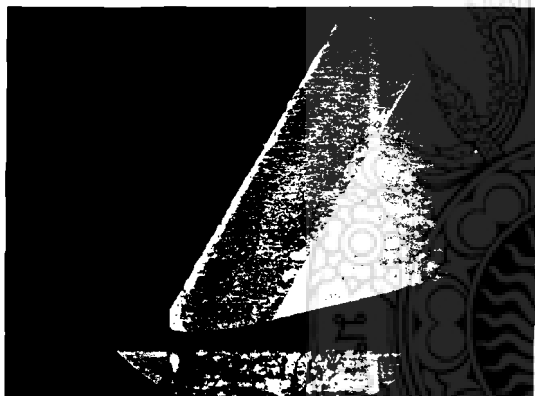




ก)



ข)



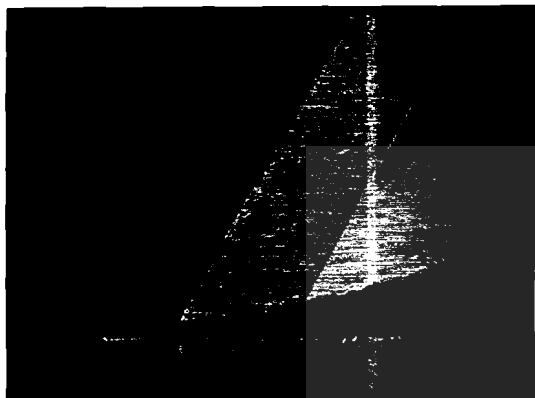
ค)



ง)

รูปที่ ๑๒.๑๒ แสดงการสีกรหของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 7

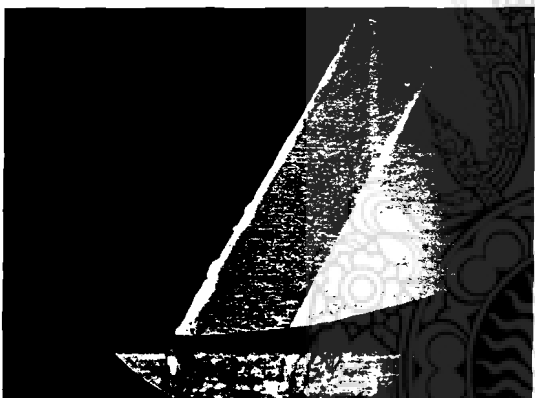
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



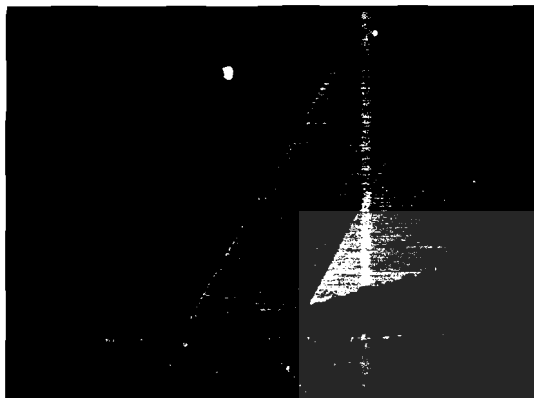
ค)



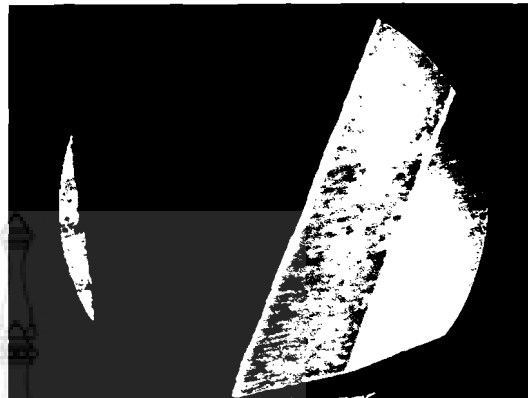
ง)

รูปที่ ๑๓.๑๓ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 35

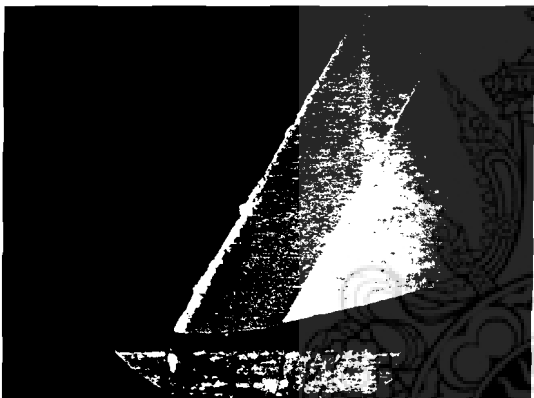
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเอ็น กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 1000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 2000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 3000 มม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



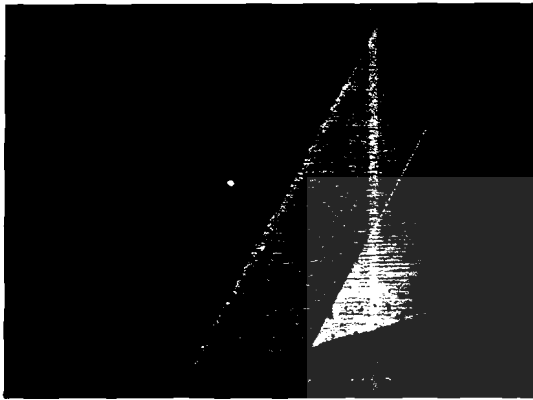
ค)



ง)

รูปที่ ๑๔.๑๔ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 36

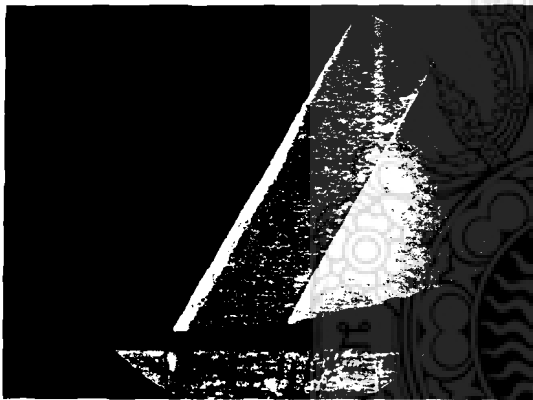
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



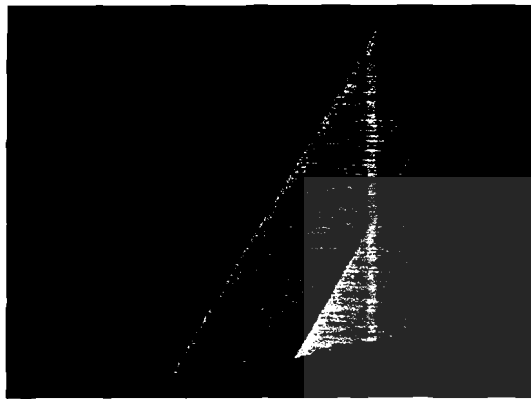
ค)



ง)

รูปที่ ๑๕.15 แสดงการสีกหรือของตัวอย่างเอ็นมีลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 37

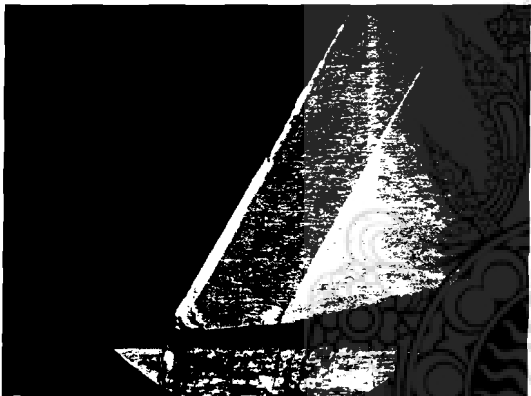
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



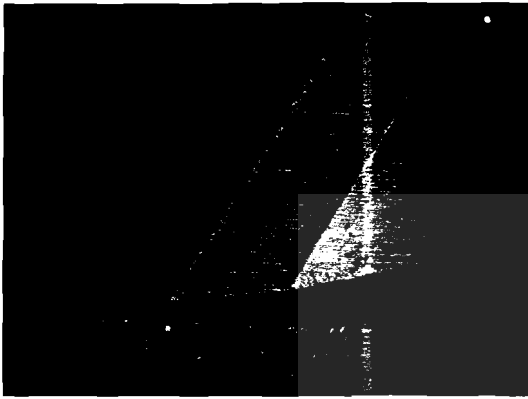
ค)



ง)

รูปที่ ๑๖.๑๖ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 65

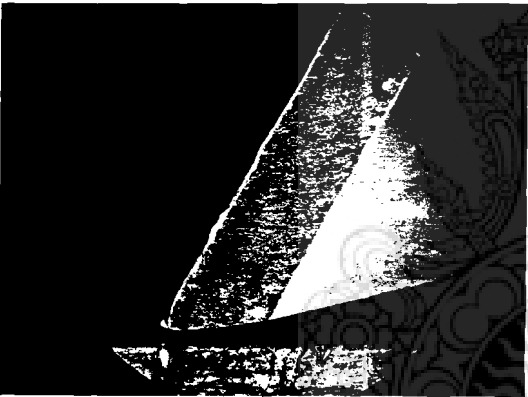
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเอ็น กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเอ็นเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



ก)



ข)



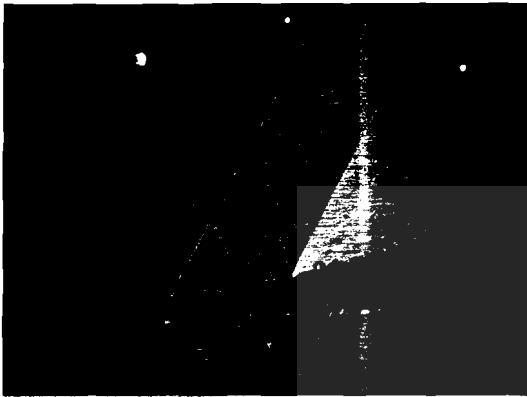
ค)



ง)

รูปที่ ๑๗.๑๗ แสดงการสึกหรอของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 66

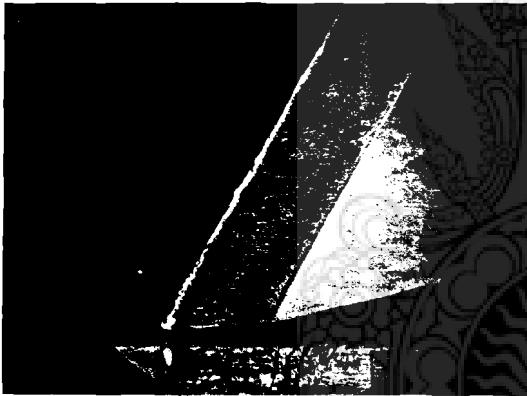
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า



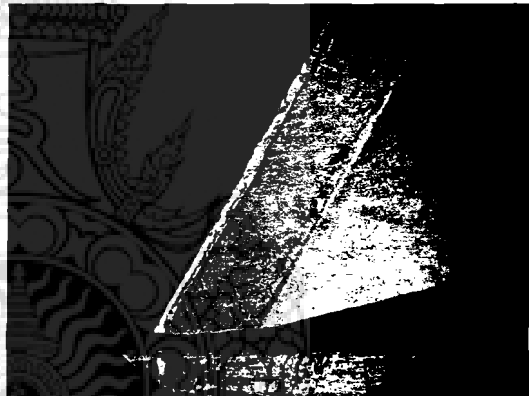
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ ๗.18 แสดงการสีกหราชอาณาจักรของตัวอย่างเอ็นมิลล์ประเภท 4 คมตัด รหัส 67

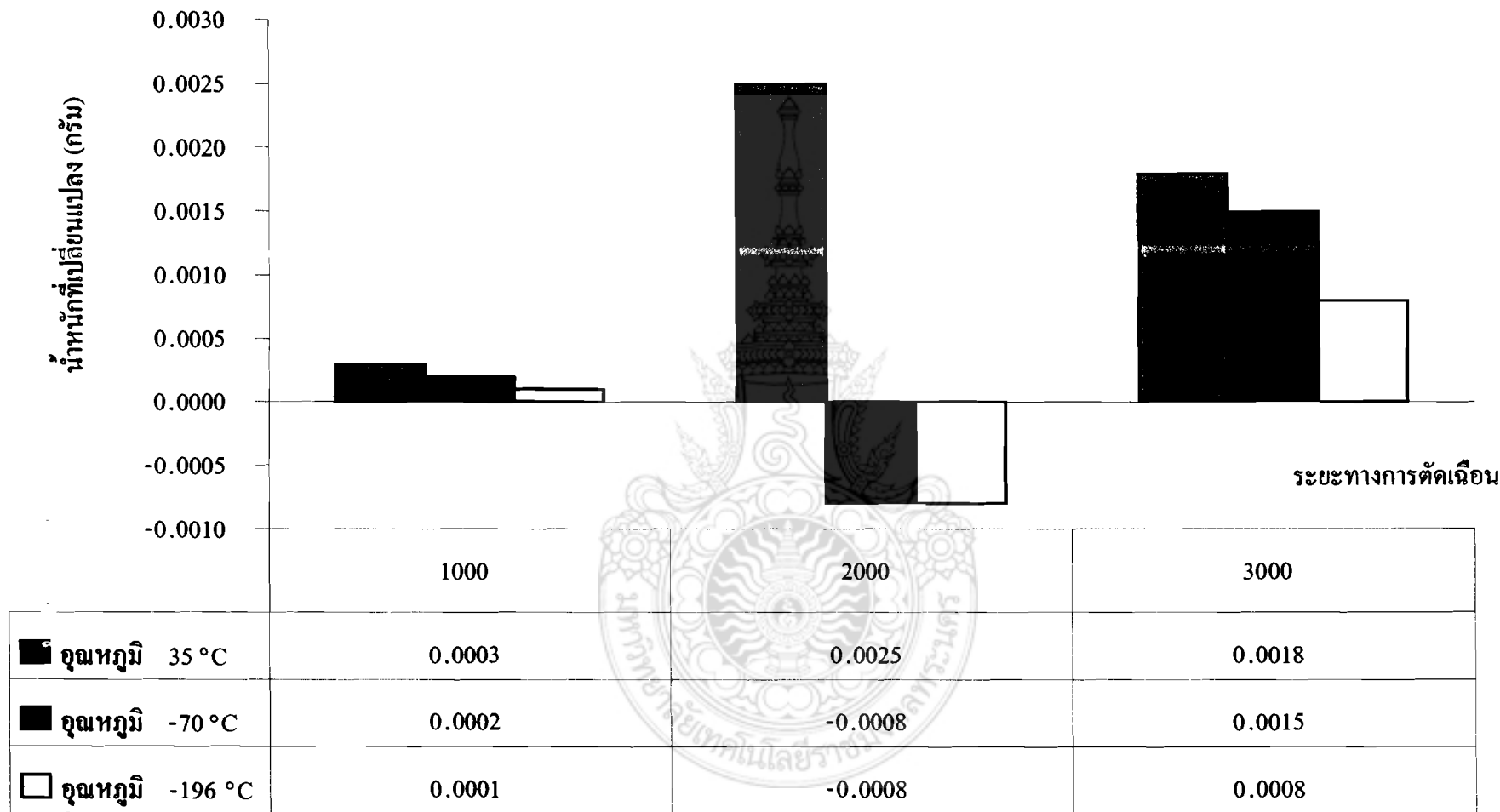
- ก) ก่อนทดสอบการตัดเฉือน กำลังขยาย 60 เท่า
- ข) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ค) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า
- ง) ตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 ม.ม. กำลังขยาย 60 เท่า

ภาคผนวก ญ.

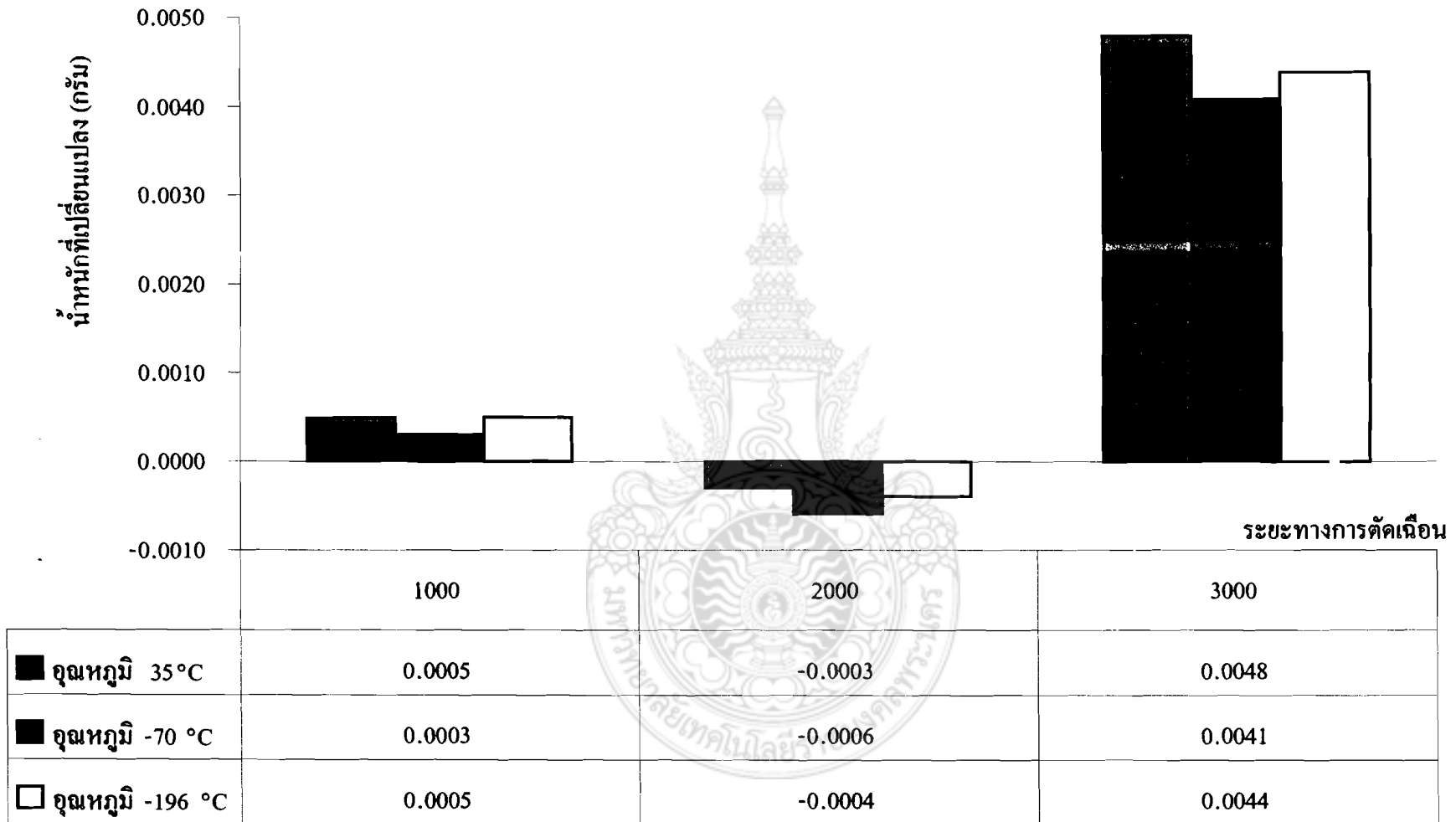
ผลการชั่งน้ำหนักเอ็นมิลล์







รูปที่ ๑.๑ กราฟแสดงน้ำหนักหลังการตัดเฉือนของเอ็นมิลต์ 2 คมตัด



รูปที่ ๒.2 กราฟแสดงน้ำหนักหลังการตัดเงื่อนไขของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

ตารางที่ ๑.1 ผลการชั่งน้ำหนักเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

รหัส	ก่อนตัดเอ็น	ตัดเอ็นเป็น		
		ระยะทาง 1000 มม.	ระยะทาง 2000 มม.	ระยะทาง 3000 มม.
1	58.8993	58.8992	58.9000	58.8977
2	58.7555	58.7550	58.7560	58.7535
3	58.8539	58.8535	58.8463	58.8521
4	58.8376	-	-	-
31	58.8528	58.8525	58.8536	58.8514
32	58.8641	58.8643	58.8647	58.8624
33	58.8557	58.8553	58.8566	58.8543
34	59.0623	-	-	-
61	58.7397	58.7395	58.7403	58.7387
62	58.7929	58.7928	58.7937	58.7922
63	58.8241	58.8213	58.8223	58.8207
64	58.8986	-	-	-

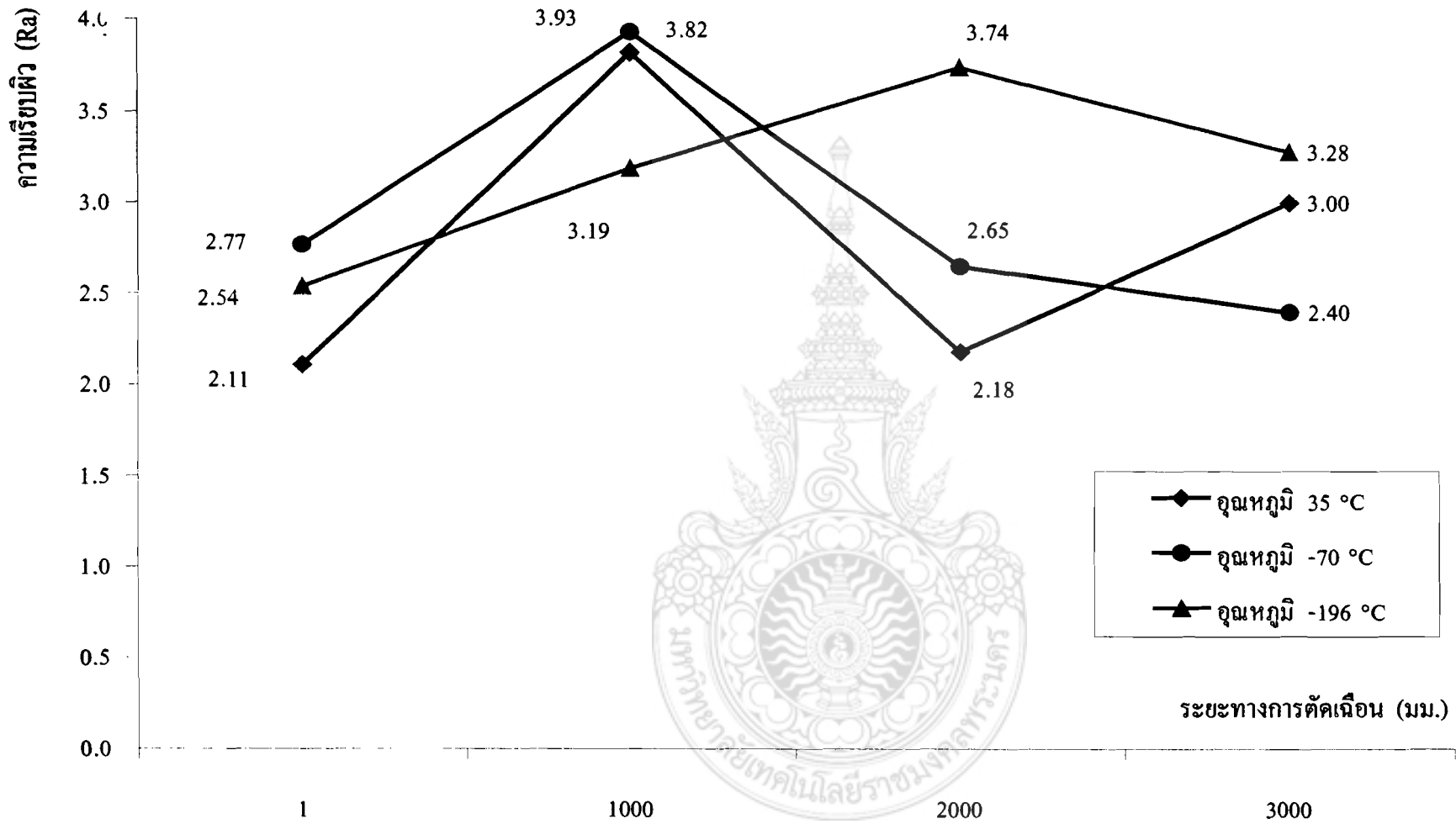
ตารางที่ ๓.๒ ผลการชั่งน้ำหนักเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

รหัส	ก่อนตัดเดือน	ตัดเดือนเป็น		
		ระยะทาง 1000 มม	ระยะทาง 2000 มม	ระยะทาง 3000 มม
5	60.6410	60.6404	60.6412	60.6361
6	60.8352	60.8348	60.8356	60.8304
7	60.7097	60.7091	60.7099	60.7050
8	60.6838	-	-	-
35	60.5304	60.5302	60.5310	60.5266
36	60.6580	60.6577	60.6586	60.6540
37	60.9207	60.9204	60.9213	60.9162
38	60.6275	-	-	-
65	60.6764	60.6760	60.6769	60.6722
66	60.7183	60.7177	60.7188	60.7141
67	60.7011	60.7005	60.7014	60.6963
69	60.5830	-	-	-

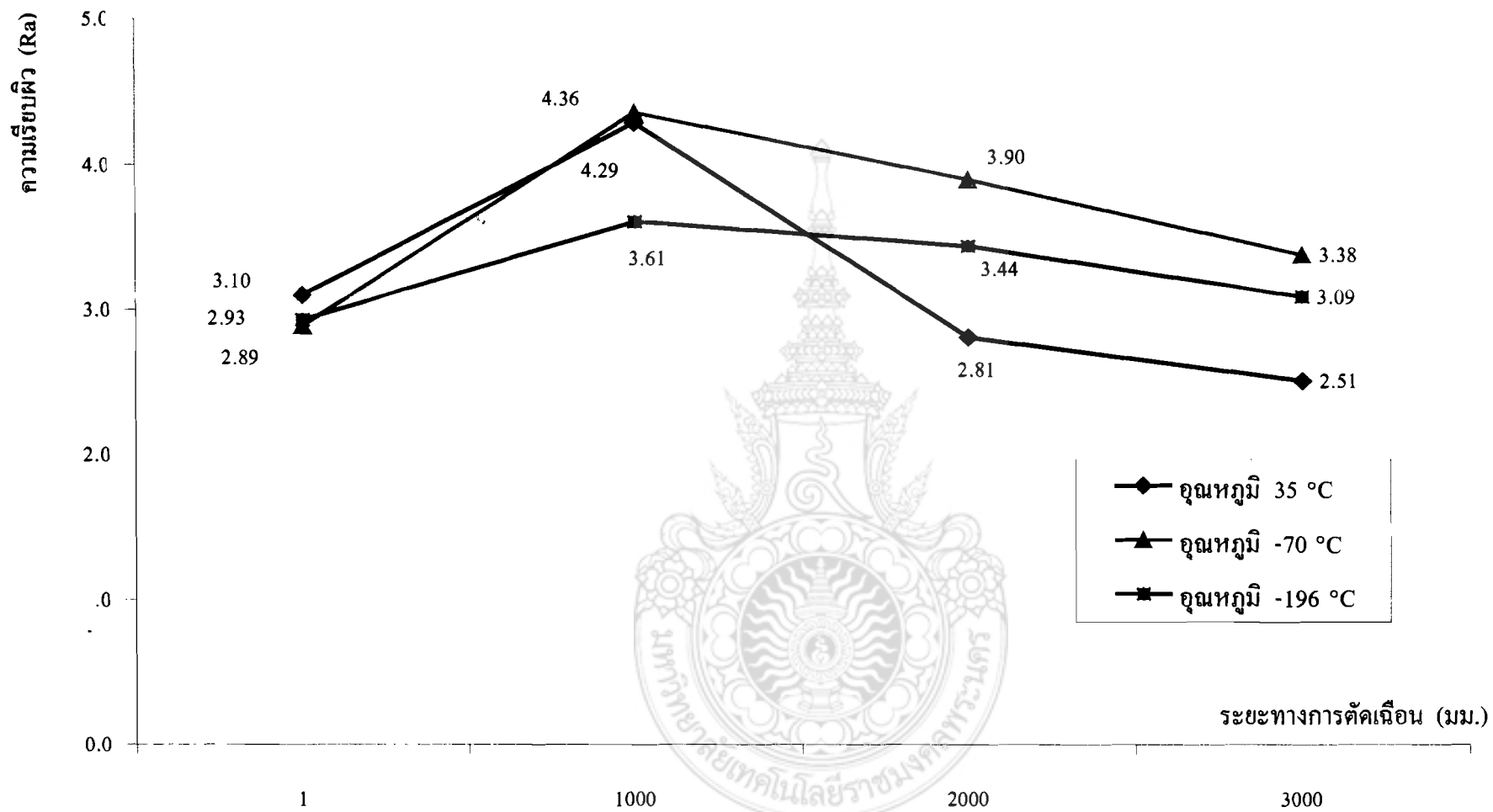


ภาคผนวก ฎ.

ความหนาเศษตัดและความเรียบผิว



รูปที่ ๑.1 กราฟเปรียบเทียบความเรียบผิวของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด ในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ ๒.2 กราฟเปรียบเทียบความเรียบผิวของเอ็นมิลล์ 4 มมตัด ในแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ ฎ.1 ใบรายงานความหนาเสียดัด เอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ 34°C

ลำดับ	ระยะการตัดเฉือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.13	0.17	0.17	0.21
2	0.15	0.16	0.15	0.19
3	0.17	0.16	0.13	0.20
4	0.15	0.13	0.16	0.19
5	0.16	0.14	0.15	0.18
6	0.12	0.17	0.14	0.20
7	0.16	0.14	0.17	0.18
8	0.18	0.11	0.19	0.19
9	0.16	0.14	0.17	0.19
10	0.14	0.18	0.14	0.20
11	0.15	0.16	0.15	0.21
12	0.15	0.16	0.14	0.17
13	0.19	0.17	0.18	0.23
14	0.17	0.18	0.19	0.21
15	0.15	0.16	0.21	0.22
16	0.12	0.15	0.14	0.18
17	0.15	0.16	0.18	0.19
18	0.15	0.16	0.17	0.19
19	0.10	0.17	0.21	0.21
20	0.16	0.18	0.19	0.20
$\bar{t}$	0.15	0.16	0.17	0.20



ตารางที่ ๒.2 ใบรายงานความหนาเศษตัด เอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ -70°C

ลำดับ	ระยะการตัดเฉือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.11	0.15	0.15	0.21
2	0.16	0.22	0.21	0.22
3	0.18	0.18	0.19	0.16
4	0.09	0.20	0.22	0.22
5	0.11	0.22	0.19	0.22
6	0.17	0.18	0.17	0.18
7	0.17	0.17	0.14	0.20
8	0.14	0.16	0.14	0.19
9	0.07	0.15	0.16	0.19
10	0.13	0.19	0.17	0.20
11	0.13	0.16	0.19	0.18
12	0.11	0.19	0.21	0.21
13	0.12	0.18	0.19	0.17
14	0.15	0.19	0.18	0.19
15	0.18	0.20	0.16	0.19
16	0.20	0.17	0.15	0.18
17	0.14	0.16	0.17	0.21
18	0.15	0.18	0.19	0.20
19	0.16	0.15	0.20	0.19
20	0.18	0.17	0.18	0.20
๕	0.14	0.18	0.18	0.20

ตารางที่ ฎ.3 ใบรายงานความหนาเสยตัด เอ็นมิลล์ 2 คมตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ -196°C

ลำดับ	ระยะการตัดเฉือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.13	0.15	0.22	0.19
2	0.13	0.15	0.24	0.19
3	0.15	0.14	0.21	0.22
4	0.10	0.14	0.2	0.23
5	0.13	0.16	0.19	0.19
6	0.14	0.15	0.18	0.19
7	0.14	0.16	0.2	0.21
8	0.15	0.14	0.18	0.19
9	0.15	0.11	0.19	0.2
10	0.17	0.16	0.19	0.18
11	0.18	0.14	0.2	0.2
12	0.14	0.16	0.21	0.19
13	0.15	0.15	0.19	0.23
14	0.15	0.14	0.2	0.19
15	0.17	0.14	0.18	0.2
16	0.16	0.18	0.17	0.21
17	0.15	0.16	0.16	0.19
18	0.14	0.16	0.17	0.22
19	0.13	0.17	0.19	0.18
20	0.13	0.17	0.2	0.21
$\bar{x}$	0.14	0.15	0.19	0.20

ตาราง ฎ.4 ใบรายงานความหนาเสียดัด เอ็นมิลล์ 4 คมตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ 34°C

ลำดับ	ระยะการตัดเดือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.11	0.11	0.13	0.15
2	0.16	0.15	0.17	0.19
3	0.09	0.17	0.14	0.18
4	0.15	0.18	0.16	0.17
5	0.18	0.17	0.15	0.16
6	0.14	0.14	0.14	0.20
7	0.15	0.15	0.16	0.21
8	0.14	0.16	0.21	0.19
9	0.14	0.11	0.17	0.18
10	0.13	0.17	0.19	0.16
11	0.17	0.16	0.19	0.14
12	0.13	0.12	0.17	0.17
13	0.15	0.14	0.16	0.22
14	0.15	0.13	0.16	0.19
15	0.13	0.16	0.15	0.23
16	0.12	0.15	0.15	0.17
17	0.12	0.17	0.14	0.16
18	0.17	0.14	0.16	0.18
19	0.15	0.15	0.18	0.20
20	0.16	0.16	0.19	0.19
$\bar{t}$	0.14	0.15	0.16	0.18

ตาราง กว.5 ใบรายงานความหนาเศษตัด เอ็นมิลล์ 4 มม.ตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ -70°C

ลำดับ	ระยะการตัดเฉือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.14	0.14	0.11	0.15
2	0.17	0.16	0.12	0.10
3	0.17	0.12	0.15	0.14
4	0.15	0.13	0.12	0.16
5	0.16	0.19	0.16	0.16
6	0.17	0.12	0.18	0.18
7	0.13	0.17	0.16	0.15
8	0.14	0.11	0.19	0.15
9	0.16	0.15	0.19	0.13
10	0.11	0.11	0.18	0.16
11	0.17	0.12	0.17	0.17
12	0.14	0.16	0.16	0.14
13	0.15	0.16	0.14	0.19
14	0.15	0.15	0.16	0.16
15	0.16	0.18	0.15	0.20
16	0.15	0.16	0.14	0.18
17	0.13	0.14	0.13	0.21
18	0.15	0.17	0.16	0.02
19	0.17	0.15	0.13	0.18
20	0.15	0.15	0.15	0.19
̄	0.15	0.15	0.15	0.16

ตาราง ฎ.6 ใบรายงานความหนาเศษตัด เอ็นมิลล์ 4 มม.ตัดที่ผ่านการบำบัด ณ อุณหภูมิ -196°C

ลำดับ	ระยะการตัดเฉือน (มม.)			
	1	1000	2000	3000
1	0.19	0.18	0.15	0.15
2	0.19	0.16	0.16	0.16
3	0.12	0.16	0.14	0.12
4	0.18	0.2	0.17	0.15
5	0.15	0.17	0.16	0.14
6	0.15	0.19	0.15	0.14
7	0.17	0.17	0.17	0.16
8	0.16	0.18	0.18	0.13
9	0.15	0.19	0.16	0.18
10	0.14	0.17	0.18	0.15
11	0.18	0.16	0.15	0.18
12	0.14	0.18	0.18	0.17
13	0.12	0.14	0.17	0.16
14	0.14	0.14	0.16	0.13
15	0.15	0.15	0.14	0.18
16	0.16	0.07	0.15	0.15
17	0.15	0.1	0.15	0.17
18	0.15	0.13	0.18	0.19
19	0.16	0.12	0.18	0.16
20	0.13	0.16	0.17	0.15
̄	0.15	0.16	0.16	0.16

ตารางที่ ๗.7 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม.

อุณหภูมิบำบัดเย็น	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	1	1.96	1.89	12.70	10.40
	2	1.57	2.87	9.00	18.00
	3	2.79	6.69	14.70	30.80
อุณหภูมิ -70 องศา	31	2.23	6.59	13.9	28.7
	32	2.99	2.85	17	14.5
	33	3.09	2.36	16.7	11.3
อุณหภูมิ -196 องศา	61	2.87	2	13.9	10.6
	62	2.55	2.78	14	13
	63	2.19	4.8	12.2	20.5

ตารางที่ ๗.8 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม.

อุณหภูมิการชุบแข็ง	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	1	2.61	2.19	13.3	13.2
	2	2.37	1.87	12.4	10.9
	3	2.44	2.49	13.4	13.5
อุณหภูมิ -70 องศา	31	3.06	2.61	15.6	14.2
	32	2.36	3.04	14.1	17.1
	33	3.08	2.3	18.8	13.6
อุณหภูมิ -196 องศา	61	5.92	4.58	27.4	22.5
	62	3.14	3.16	17.3	16.9
	63	2.92	3.49	16.2	17.9

ตารางที่ ๙.9 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

อุณหภูมิการชุบแข็ง	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	1	2.84	4.03	16.7	18.5
	2	3.37	2.39	17.3	12.2
	3	2.6	2.59	12.9	13
อุณหภูมิ -70 องศา	31	2.75	2.6	16.4	13.4
	32	1.49	2.19	9.4	12.1
	33	2.46	2.42	13.5	11.7
อุณหภูมิ -196 องศา	61	2.02	3.88	14	18.6
	62	3.41	3.27	18.1	17.5
	63	3.43	2.68	18.1	15.4

ตารางที่ ๙.10 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 1000 มม.

อุณหภูมิบำบัดเย็น	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	5	2.79	3.48	15.10	15.70
	6	3.79	4.25	20.90	21.10
	7	2.71	5.15	14.70	28.30
อุณหภูมิ -70 องศา	35	4.14	4.24	21.70	17.80
	36	2.45	4.47	13.60	22.20
	37	2.08	4.36	13.10	20.90
อุณหภูมิ -196 องศา	65	3.29	2.93	17.20	16.70
	66	3.23	4.31	17.50	17.70
	67	2.26	3.60	13.70	18.40

ตารางที่ ฎ.11 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 2000 มม.

อุณหภูมิการชุบแข็ง	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	5	2.82	3.08	13.50	18.30
	6	3.78	3.41	17.90	16.60
	7	2.11	1.94	13.00	11.50
อุณหภูมิ -70 องศา	35	4.67	3.64	19.60	20.50
	36	5.49	4.44	23.90	21.00
	37	3.39	2.69	14.50	13.83
อุณหภูมิ -196 องศา	65	2.60	3.02	13.70	16.80
	66	1.06	2.39	6.90	13.00
	67	3.96	4.90	19.90	23.50

ตารางที่ ฎ.12 ความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบการตัดเฉือนเป็นระยะทาง 3000 มม.

อุณหภูมิการชุบแข็ง	รหัส	ค่า Ra		ค่า Ry	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ 35 องศา	5	2.86	2.68	14.50	15.70
	6	3.39	2.73	18.00	13.20
	7	2.18	2.12	13.30	12.00
อุณหภูมิ -70 องศา	35	5.20	4.38	25.80	20.20
	36	3.95	3.21	19.50	17.20
	37	2.13	2.54	13.00	15.60
อุณหภูมิ -196 องศา	65	3.39	3.00	16.60	17.60
	66	3.37	3.45	17.20	19.60
	67	4.29	2.81	20.40	14.40



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการตัดเฉือน



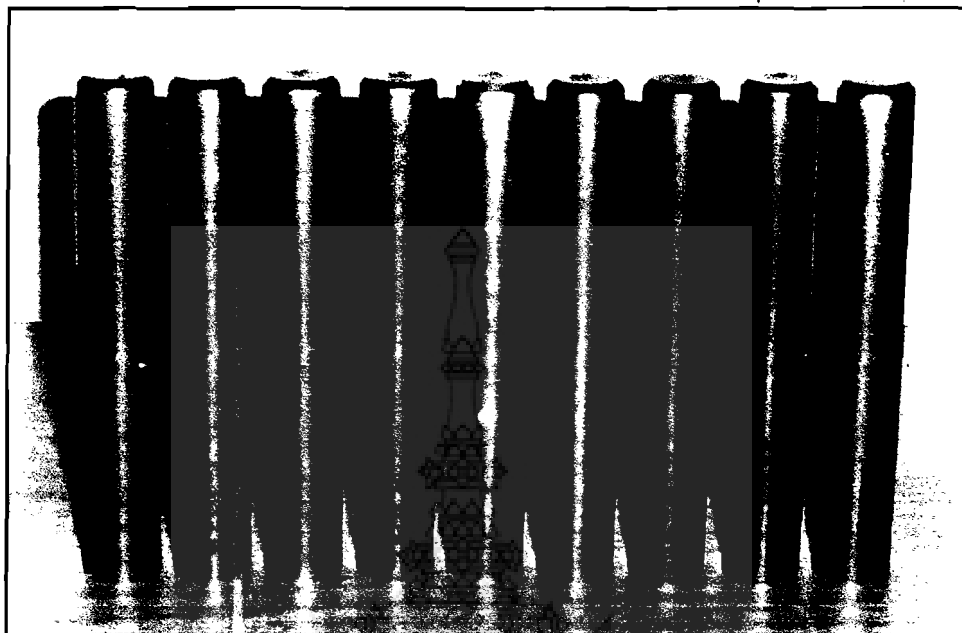
โปรแกรมที่ใช้ในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 2 คมตัด

N 000	00600
N 010	T1 M06
N 020	GOO G54 G90 X 10 Y 0.00 S 695 MO3
N 030	G43 H01 Z5
N 040	G01 Z-3.00 F97
N 050	X -247.75
N 060	Y 15.00
N 070	X -9.00
N 080	Y 30.00
N 090	X -247.75
N 100	Y 45.00
N 110	X 10.00
N 120	G 00 Z 200.00
N 130	Y 60
N 140	M 30

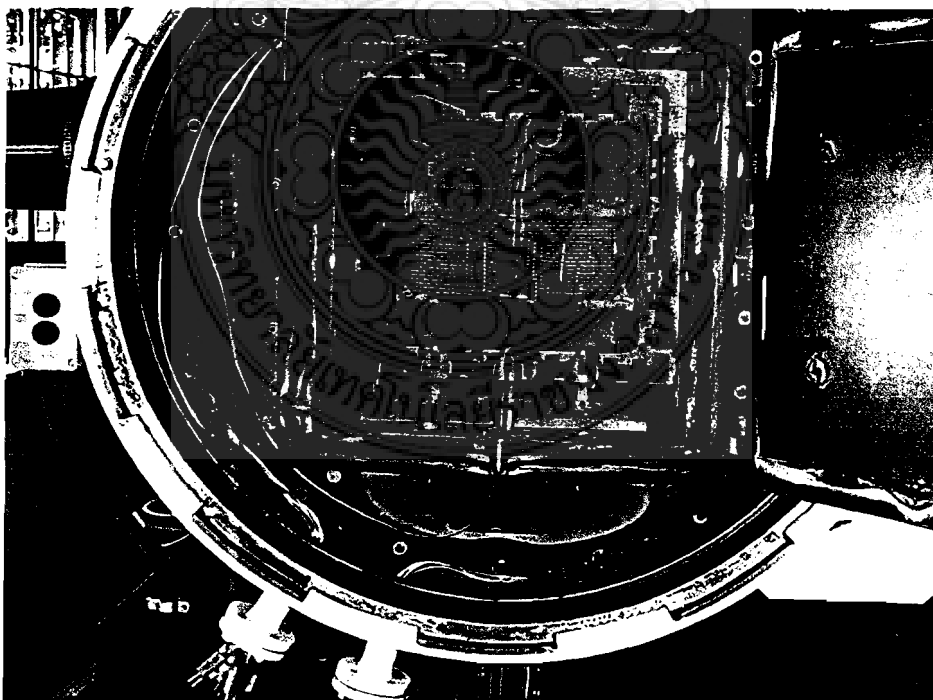
โปรแกรมที่ใช้ในการตัดเฉือนของเอ็นมิลล์ 4 คมตัด

N 000	00600
N 010	T1 M06
N 020	GOO G54 G90 X 10 Y 0.00 S 665 MO3
N 030	G43 H01 Z5
N 040	G01 Z-3.00 F100
N 050	X -247.75
N 060	Y 15.00
N 070	X -9.00
N 080	Y 30.00
N 090	X -247.75
N 100	Y 45.00
N 110	X 10.00
N 120	G 00 Z 200.00
N 130	Y 60
N 140	M 30

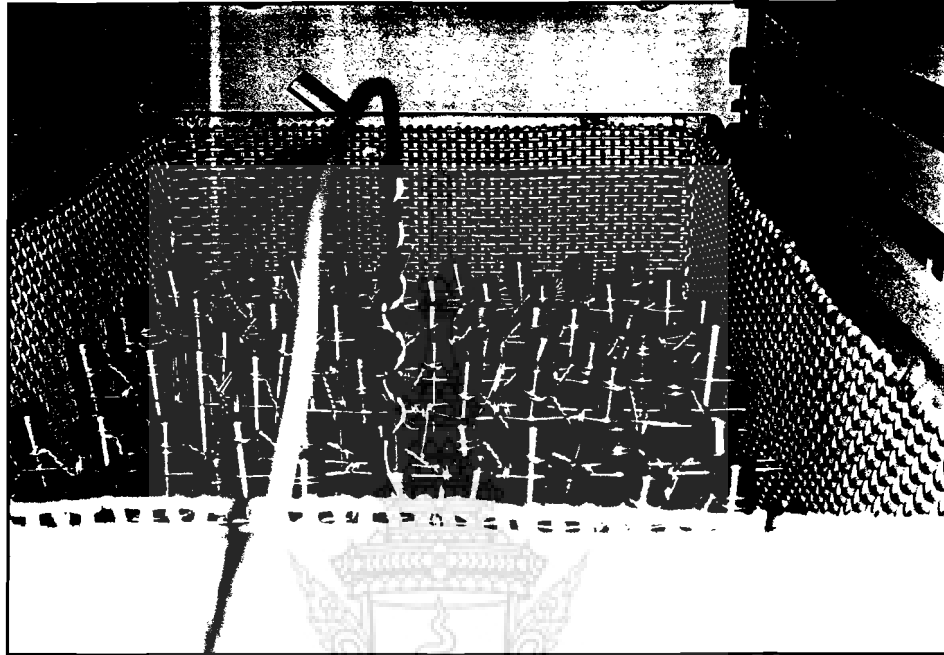




รูปที่ ๓.๑ เหล็กกล้า M42 ตามมาตรฐาน AISI ที่ใช้ในการชุบแข็ง



รูปที่ ๓.๒ เตาชุบสุญญากาศที่ใช้ในการชุบแข็ง



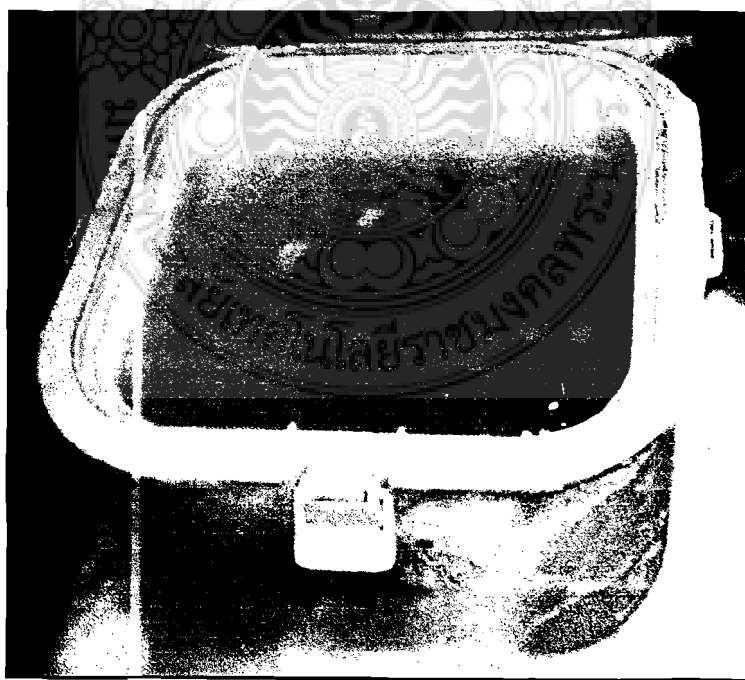
รูปที่ ๓.3 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่แกนกลางชิ้นงานทดลอง



รูปที่ ๓.4 อุปกรณ์ใช้ในการบำบัดเย็น



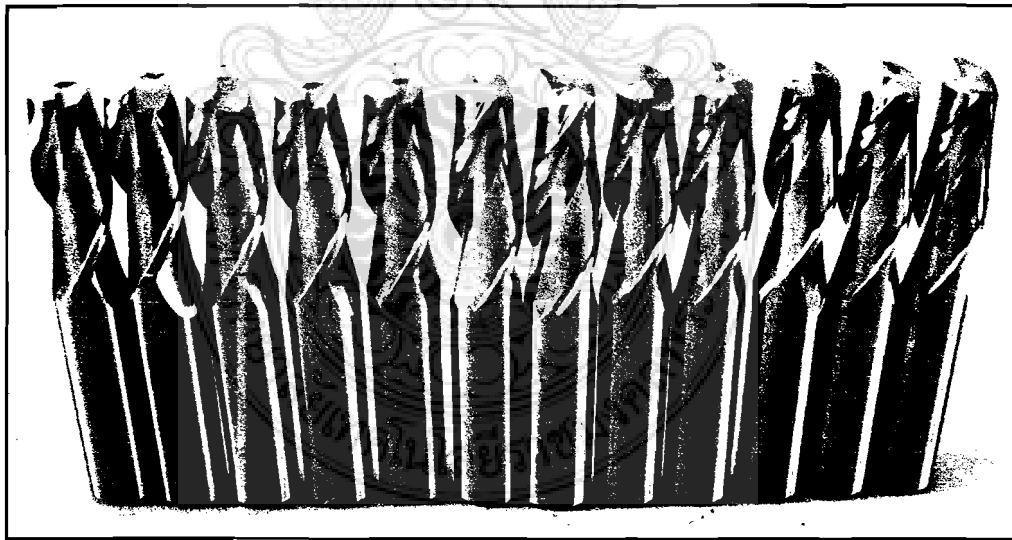
รูปที่ รุ.5 แสดงชิ้นงานขณะทำการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-70^{\circ}\text{C}$



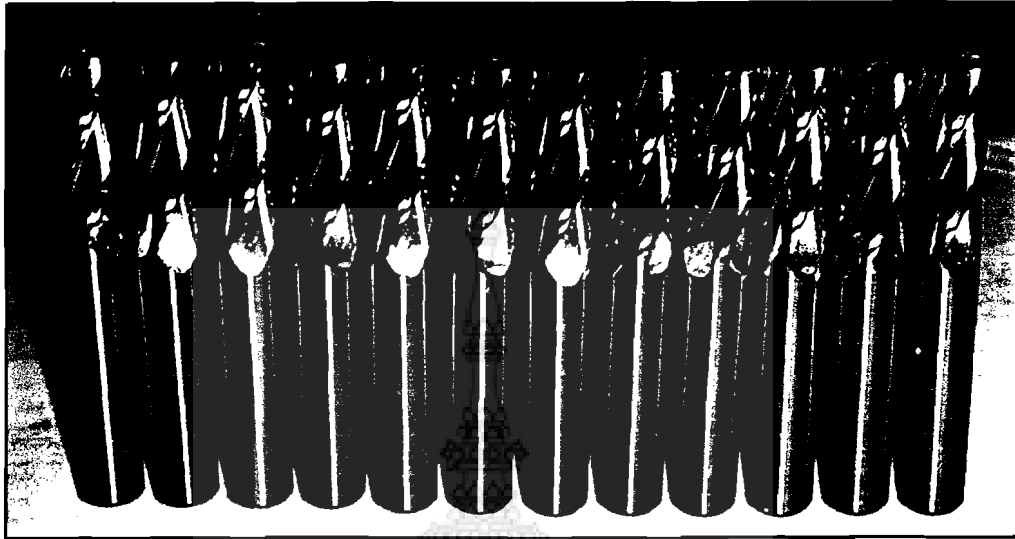
รูปที่ รุ.6 แสดงชิ้นงานขณะทำการบำบัดเย็น ณ อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$



รูปที่ ๓.๗ แสดงการขึ้นรูปเอ็นมิลล์



รูปที่ ๓.๘ แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นเอ็นมิลล์ 2 มม.ตัด

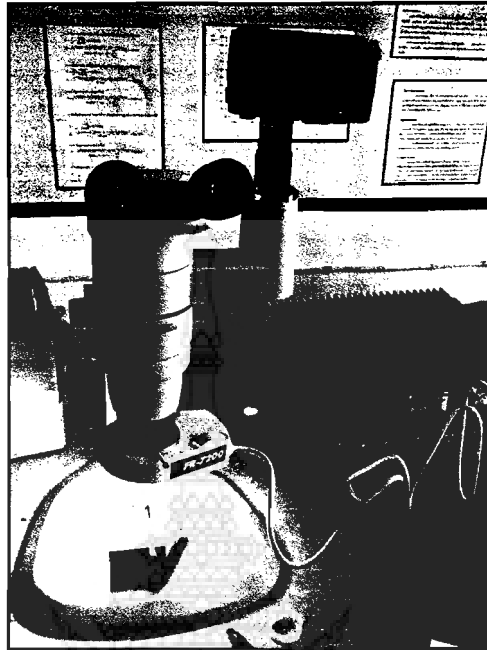


รูปที่ ๙.๙ แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นเอ็นมิลล์ 2 มม.ตัด

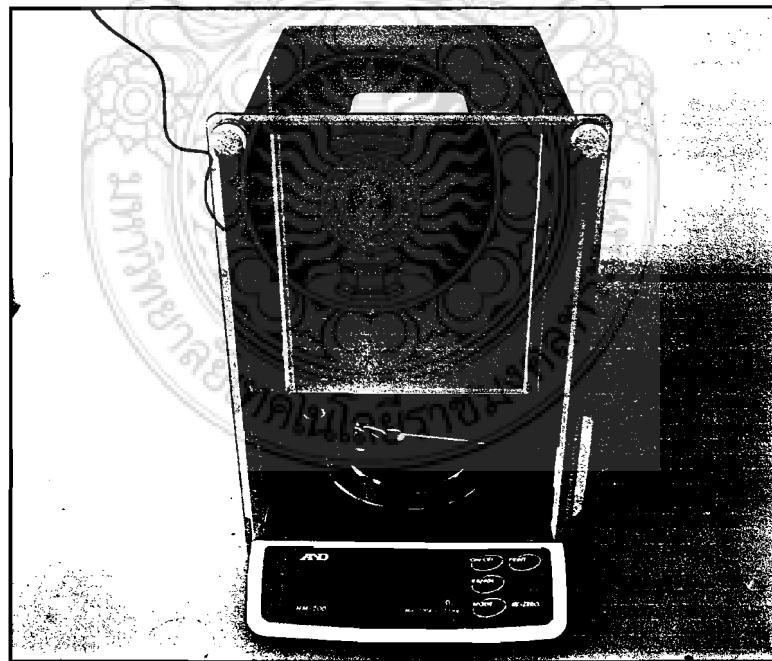


รูปที่ ๙.๑๐ การตรวจสอบรูปทรงเรขาคณิตด้วยเครื่อง Profile Project

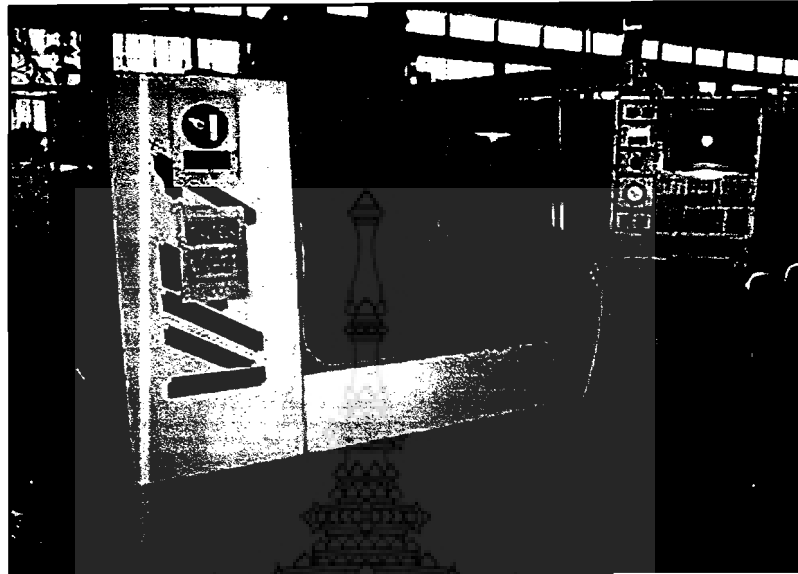




รูปที่ ๑๑.๑๑ การถ่ายภาพคอมพิวเตอร์ด้วยกึ่งกำลังขยาย 60 เท่า



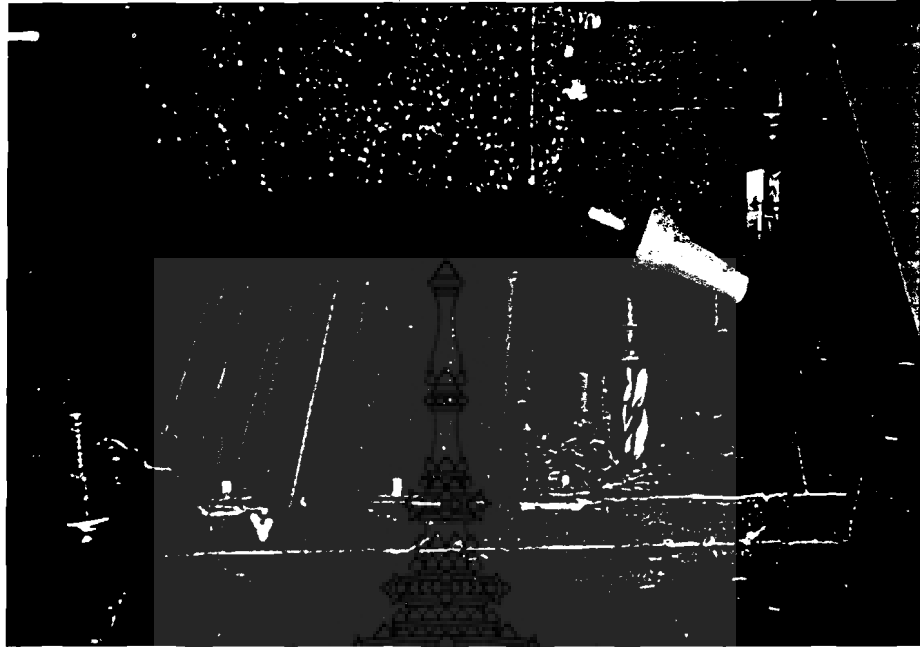
รูปที่ ๑๑.๑๒ เครื่องชั่งน้ำหนัก 1/10000กรัม



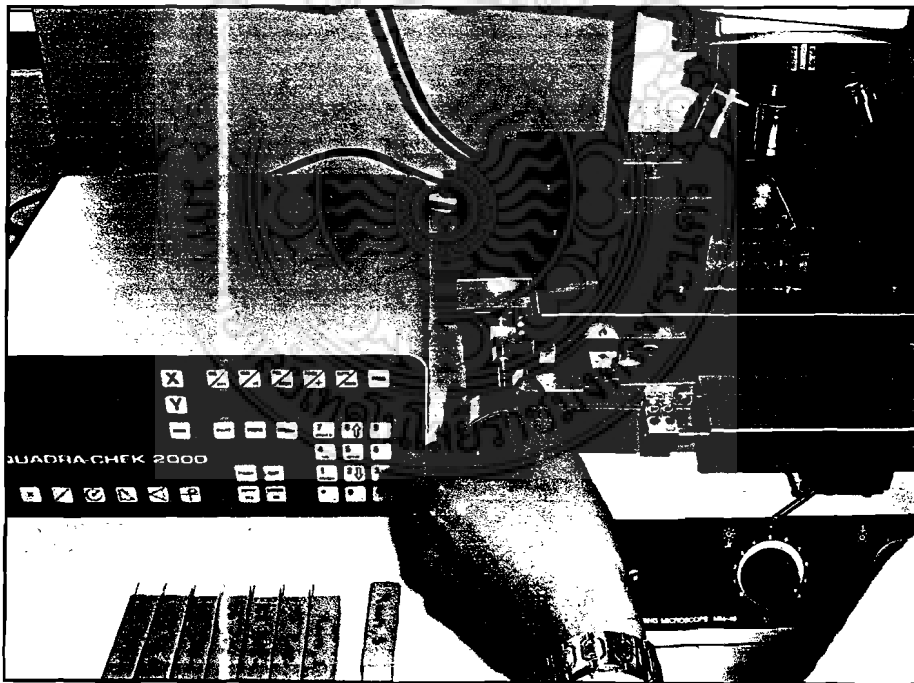
รูปที่ ๑.13 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling)



รูปที่ ๑.14 แผ่นเหล็กกล้า S45C ที่ใช้ในการทดสอบการตัดเฉือน



รูปที่ ๑๕.15 แสดงชิ้นงานขณะทำการตัดเฉือน



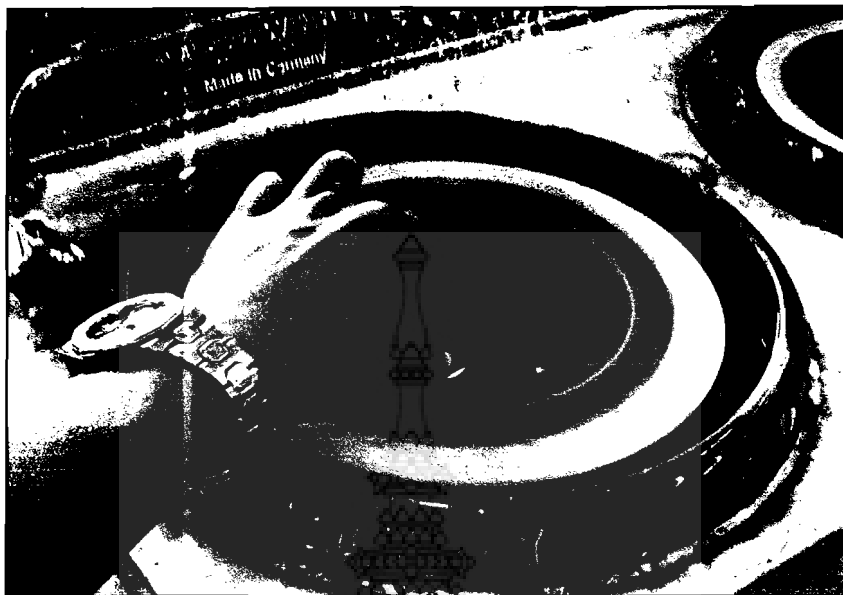
รูปที่ ๑๕.16 การวัดระยะการสึกหรอโดยเครื่อง Measuring Microscope



รูปที่ ๑.17 เครื่องจับยึดชิ้นงานทดสอบแบบร้อน (Hot Mounting Machine)



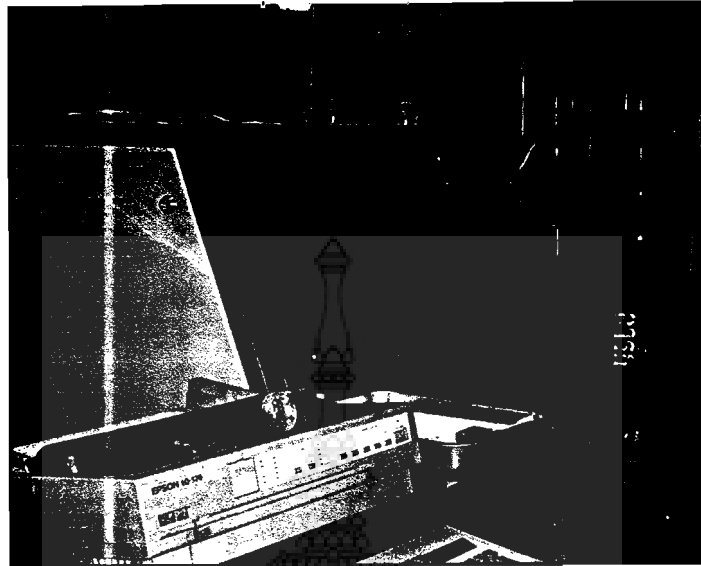
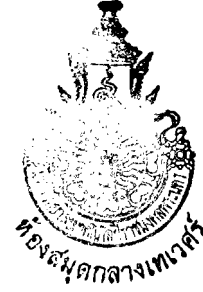
รูปที่ ๑.18 ชิ้นงานที่ผ่านการอัดเบคเคอไลต์



รูปที่ ๑๙ เครื่องขัดละเอียดด้วยสั๊กเหล็ก แบบจานหมุน



รูปที่ ๒๐ เครื่องตรวจสอบโครงสร้าง



รูปที่ ๑.21 เครื่องอิมิตชันสเปคโตมิเตอร์



รูปที่ ๑.22 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness Vickers Rock well (HRC)