



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะ  
การคว้านรูด้วยแก๊สของแผ่นฐานโครงสร้างเหล็ก  
An Investigation of the Effect of Oxy-Fuel Cutting on  
Bolt Holes in Structural Steel Plate

นายพลากร ร่มวงษ์

นายอนวัช ขุนยาบี

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559



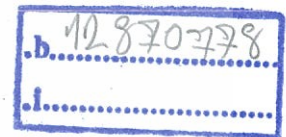
รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะ  
การคว้านรูด้วยแก๊สของแผ่นฐานโครงสร้างเหล็ก

An Investigation of the Effect of Oxy-Fuel Cutting on  
Bolt Holes in Structural Steel Plate

นายพลากร ร่วมวงศ์  
นายอนวัช ขุนยาปี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 148482  
วันเดือนปี..... 30 ต.ค. 2560



สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะ  
การคว้านรูด้วยแก๊สของแผ่นฐานโครงสร้างเหล็ก

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายพลากร ร่วมวงษ์  
นายอนวัช ขุนยาปี

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.จิตราภรณ์ วงศ์งาม

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายสิทธิพงษ์ อินจง

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด

### บทคัดย่อ

แผ่นฐานของโครงสร้างเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนที่สำคัญของสถานีรถไฟ เป็นชิ้นส่วนที่ประสานโครงสร้างและพื้นคอนกรีตเข้าด้วยกัน และรับแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากขบวนรถที่วิ่งผ่าน ซึ่งจากการตรวจสอบที่สถานีรังสิตของทีพีบีทีที่ปรึกษาควบคุมงานก่อสร้าง พบปัญหาบริเวณรูสวม Anchor Bolt ของแผ่นฐานโครงสร้างหลังคาสถานี มีรอยไหม้เนื่องมาจากการใช้ความร้อนจากแก๊ส คว้านเนื้อเหล็กที่บริเวณโดยรอบ เพื่อขยายขนาดของรู

ในการทดสอบแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏ สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางกล และทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยการทดสอบความแข็ง นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

ผลการทดสอบที่ได้คือ ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส มีลักษณะที่เปลี่ยนไปจากเดิม เกิดรอยไหม้ ลักษณะผิวไม่เรียบและเกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมากที่บริเวณผิวบน เนื่องจากได้รับความร้อนโดยตรง มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีค่าความแข็งที่สูง ส่งผลให้ความเหนียวลดลงและบริเวณโดยรอบเปราะ นำไปสู่การสร้างความเสียหายในที่สุด

คำสำคัญ : กระบวนการตัดทางความร้อน, การตัดโลหะด้วยแก๊ส, โครงสร้างเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Co-operation Title:** An Investigation of the Effect of Oxy-Fuel Cutting on Bolt Holes  
in Structural Steel Plate

**Student Intern Name:** Mr.Palakorn Roumwong

Mr.Anawat Khunyabee

**Faculty:** Engineering

**Department:** Mechanical Engineering

**Advisor Name:** Dr.Jittraporn Wongsangam

**Mentor Name:** Mr.Sitthipong Injong

**Company:** TEAM Consulting Engineering and Management Co.,Ltd.

## ABSTRACT

A structural steel base plate is one of the most important parts of the stations. It acts as a joint of the structures and concrete and had been experienced vibration during train operation. According to the results of consulting engineers at Rangsit Station, they found a bolt holes of the base plate had been burned by Oxy-fuel cutting in order to enlarge the hole.

In experiments, the base plate was divided into two specimens, the damaged specimen and the normal specimen. After that, microstructure was examined in order to study the phase transformations of the specimens which can explain the mechanical behavior and determined the mechanical properties by microhardness test.

The results are exhibited that both the appearance and the microstructure of the damaged specimen had changed from the original. There are burning mark, poor quality surface and Heat Affected Zone (HAZ) around the hole. The HAZ of the base plate was wider at the top of plate. The HAZ consists of mostly martensite which has the highest hardness resulting in reduced its ductility then leading to the collapse in the end.

**Keywords :** Thermal Cutting Process, Oxy-Fuel Cutting, Structural Steels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และคุ้มครองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด รวมถึงความกรุณาตรวจทานแก้ไขจนรายงานสหกิจศึกษาเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จำลอง ปราบแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และดร.มจรัส สุชาติวัฒน์ ที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบโครงการสหกิจศึกษา และให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ทีเอ็ม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด และวิศวกรพี่เลี้ยงที่ให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัย คำแนะนำและประสบการณ์ในการฝึกงาน

ขอขอบคุณวิศวกรคุมงานการก่อสร้างจากบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเม้นท์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อชิ้นงานและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ ซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องประการใด คณะผู้เขียนขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ที่สามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติการต่อไป

พลากร ร่วมวงษ์

อนวัช ขุนยาปี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย _____	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ _____	II
กิตติกรรมประกาศ _____	III
สารบัญ _____	IV
สารบัญตาราง _____	VI
สารบัญภาพ _____	VII
บทที่ 1 บทนำ _____	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ _____	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย _____	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย _____	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย _____	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ _____	4
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ _____	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	6
2.1 เหล็กกล้า (Steels) _____	6
2.2 กระบวนการตัดโลหะทางความร้อน (Thermal Cutting Process) _____	7
2.3 การเกิดเกรนและการตกผลึกของวัสดุ _____	14
2.4 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone) _____	15
2.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมของเหล็กคาร์บอน- _____	16
2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมเหล็กคาร์บอน- _____	17
2.7 พฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็กคาร์บอน- _____	21
2.8 ความแข็งของวัสดุ (Hardness) _____	23
2.9 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) _____	23
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	32

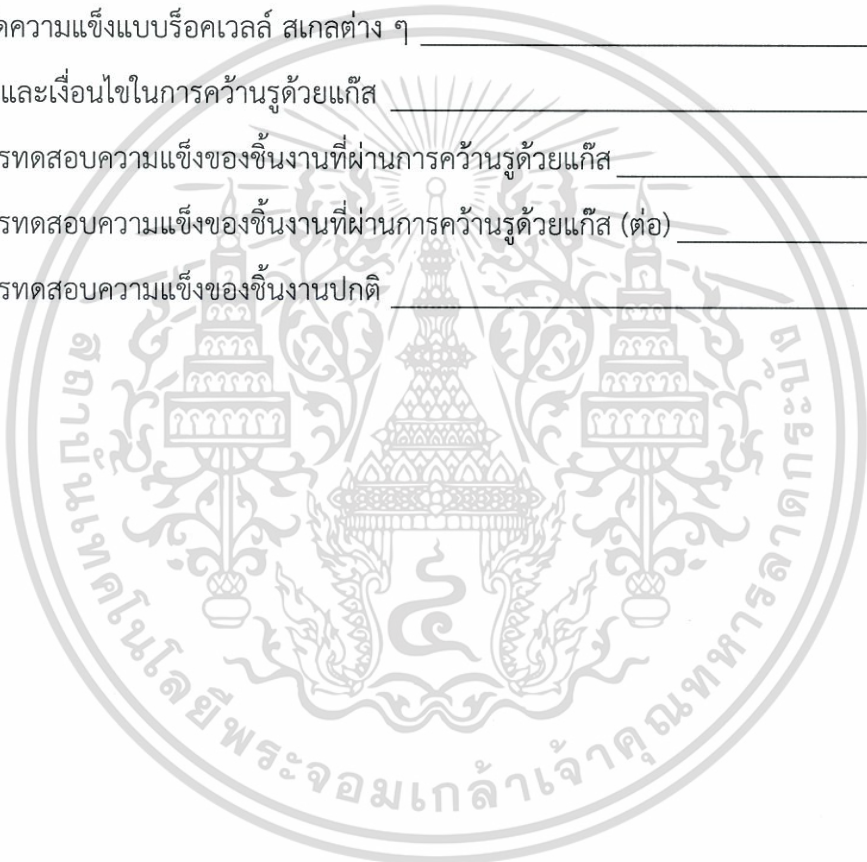
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	33
3.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	33
3.2 ข้อมูลเงื่อนไขในการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊ส	36
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย	43
4.1 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Investigation)	43
4.2 แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone)	45
4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation)	47
4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	60
5.3 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก เครื่องมืออุปกรณ์และการคว้านรูพื้นฐานที่หน้างาน	63
ภาคผนวก ข เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400	66
ภาคผนวก ค ตารางการแปลงค่าความแข็งมาตรฐาน ASTM E140-12b	68
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลค่าความแข็งที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	33
2.1 ความแข็งของธาตุชนิดต่างๆ ในสเกลความแข็งของโมห์	33
2.2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบบริเนลล์	36
2.2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (ต่อ)	37
2.3 การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลต่าง ๆ	43
3.1 ข้อมูลและเงื่อนไขในการคว้านรูด้วยแก๊ส	43
4.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส	45
4.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส (ต่อ)	47
4.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานปกติ	52



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	3
2.1 กระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์	8
2.2 กระบวนการตัดโลหะด้วยลำอาร์คพลาสมา	9
2.3 กระบวนการตัดโลหะด้วยแก๊ส	10
2.4 ตารางแสดงอุณหภูมิของเปลวไฟและค่าความร้อนของแก๊สที่ใช้ชนิดต่าง ๆ	11
2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดโลหะด้วยแก๊ส	12
2.6 หัวตัดที่ใช้ในการตัดโลหะด้วยแก๊ส	12
2.7 ลักษณะการเกิดเกรนในสภาวะการตกผลึกของโลหะ	14
2.8 หน้าตัดแสดงโครงสร้างของรอยเชื่อม	15
2.9 วิธีการสร้างแผนภูมิการแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่	17
2.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงโครงสร้างของเบนไนต์	19
2.11 แผนภูมิการแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับโลหะผสมเหล็กคาร์บอน	20
2.12 ความสัมพันธ์ความเค้นจุดคราก ความต้านแรงดึงและความแข็งแบบบริเนลล์กับปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา	21
2.13 ความแข็งเป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เหมเปอร์มาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์	22
2.14 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	26
2.15 ลักษณะรอยกดของการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส	29
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านแรงดึงในเหล็กกล้า เหล็กหล่อและทองเหลือง	29
3.1 แบบแสดงขนาดและมิติของแผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส	33
3.2 แผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส	34
3.3 เครื่องกัด	34
3.4 เครื่องเลื่อย	35
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	35
3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง	36
3.7 ขนาดของแผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส	37
3.8 การกัดแผ่นฐานเพื่อลดขนาด	37
3.9 การเลื่อยแผ่นฐาน	38
3.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.11 อุปกรณ์และน้ำยาในการหล่อเรซิน _____	39
3.12 เครื่องขัดผงเพชร _____	40
3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่พร้อมทำการทดสอบของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ	40
3.14 แผนภาพแสดงการดำเนินการวัดความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส _____	41
3.15 แผนภาพแสดงการดำเนินการวัดความแข็งของชิ้นงานปกติ _____	42
4.1 ลักษณะสภาพผิวภายในของรูทั้ง 2 ชิ้นงาน _____	43
4.2 ลักษณะสภาพผิวด้านบนและด้านล่างของรูทั้ง 2 ชิ้นงาน _____	44
4.3 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส _____	45
4.4 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สด้วยการตรวจสอบมหภาคที่กำลังขยาย 35 เท่า _____	46
4.5 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 4 บริเวณที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ที่กำลังขยาย 50 เท่า _____	47
4.6 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ก) ตำแหน่ง A ข) ตำแหน่ง B ค) ตำแหน่ง C ง) ตำแหน่ง D ที่กำลังขยาย 500 เท่า _____	48
4.7 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 3 บริเวณที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ที่กำลังขยาย 50 เท่า _____	49
4.8 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ก) ตำแหน่ง A ข) ตำแหน่ง B ค) ตำแหน่ง C ที่กำลังขยาย 500 เท่า _____	50
4.9 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานปกติ ที่กำลังขยาย 200 เท่า	51
4.10 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานปกติ ที่กำลังขยาย 200 เท่า	51
4.11 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส _____	54
4.12 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส _____	54
4.13 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งขอบล่างของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส _____	55
4.14 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ทั้ง 3 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส	55
4.15 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานปกติ _____	55
5.1 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของทั้ง 2 ชิ้นงาน _____	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงการระบบรถไฟชานเมือง (สายสีแดง) ช่วงบางซื่อ-รังสิต เป็นโครงการในแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล (M-MAP) เพื่อทำหน้าที่หลักในการขนส่งผู้โดยสารจากชานเมืองเข้าสู่ใจกลางเมือง โครงการนี้มีการรถไฟแห่งประเทศไทยเป็นเจ้าของโครงการโดยบริษัท ทีเอ็ม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด มีบทบาทเป็นที่ปรึกษาควบคุมงานก่อสร้างของโครงการ ทั้งอาคารต่าง ๆ ในย่านซ่อมบำรุงทางรถไฟและสถานีรถไฟ

เมื่อกล่าวถึงสถานีรถไฟ คืออาคารที่ใช้เป็นจุดจอดหรือเปลี่ยนขบวนสำหรับขบวนรถโดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อการรับส่งผู้โดยสาร โครงสร้างต่าง ๆ ของตัวสถานีจึงมีความสำคัญมากที่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสิ่งแรก โดยชั้นส่วนประกอบที่เป็นหนึ่งในชั้นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างสถานี คือแผ่นฐานของโครงสร้างต่าง ๆ ในสถานี ซึ่งนอกจากเป็นชั้นส่วนที่ประสานโครงสร้าง และพื้นคอนกรีตเข้าด้วยกันแล้ว ยังมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างนั้น เช่น แผ่นฐานของเสา เป็นต้น นอกจากนี้แผ่นฐานของโครงสร้างบางประเภท ต้องรับแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากขบวนรถที่วิ่งผ่านด้วย เช่น แผ่นฐานของโครงหลังคาสถานี

จากการตรวจงานที่สถานีรังสิตของที่ปรึกษาควบคุมงานก่อสร้าง พบปัญหาบริเวณรูสวม Anchor Bolt ของแผ่นฐานโครงหลังคาสถานี มีรอยไหม้เนื่องมาจากการใช้ความร้อนจากแก๊สคว้านเนื้อเหล็กที่บริเวณรอบ ๆ เพื่อขยายขนาด โดยมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนหลังจากการเทปูน ทำให้ตำแหน่งของรูที่จะติดตั้งคลาดเคลื่อนตาม ไม่ตรงตามแบบ ทั้งนี้แล้วการใช้ความร้อนในการตัดหรือเจาะงานโครงสร้างต่าง ๆ ยังเป็นวิธีที่ผิดจากข้อกำหนดหรือสเปคของโครงการ

ปัญหาที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของหัวข้อโครงการงานสหกิจศึกษาที่ตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านรูด้วยแก๊สของแผ่นฐานโครงสร้างเหล็ก โดยมีสมมติฐานว่าการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านด้วยแก๊ส เป็นผลให้บริเวณรอบ ๆ มีคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลง อาจทำหน้าที่ได้ไม่เท่าที่ควรและอาจส่งผลให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างนั้น ๆ เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ทางคณะผู้จัดทำจึงแนวมุมคิดที่จะศึกษาและตรวจสอบผลเสียหายที่เกิดขึ้นต่อแผ่นฐานโครงสร้าง เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการรองรับข้อกำหนดหรือสเปคของโครงการนี้หรือโครงการอื่น ๆ และเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ สามารถเข้าใจผลเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการรองรับข้อกำหนดหรือสเปคของโครงการ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการตัดโลหะด้วยแก๊สต่อคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบความแข็ง

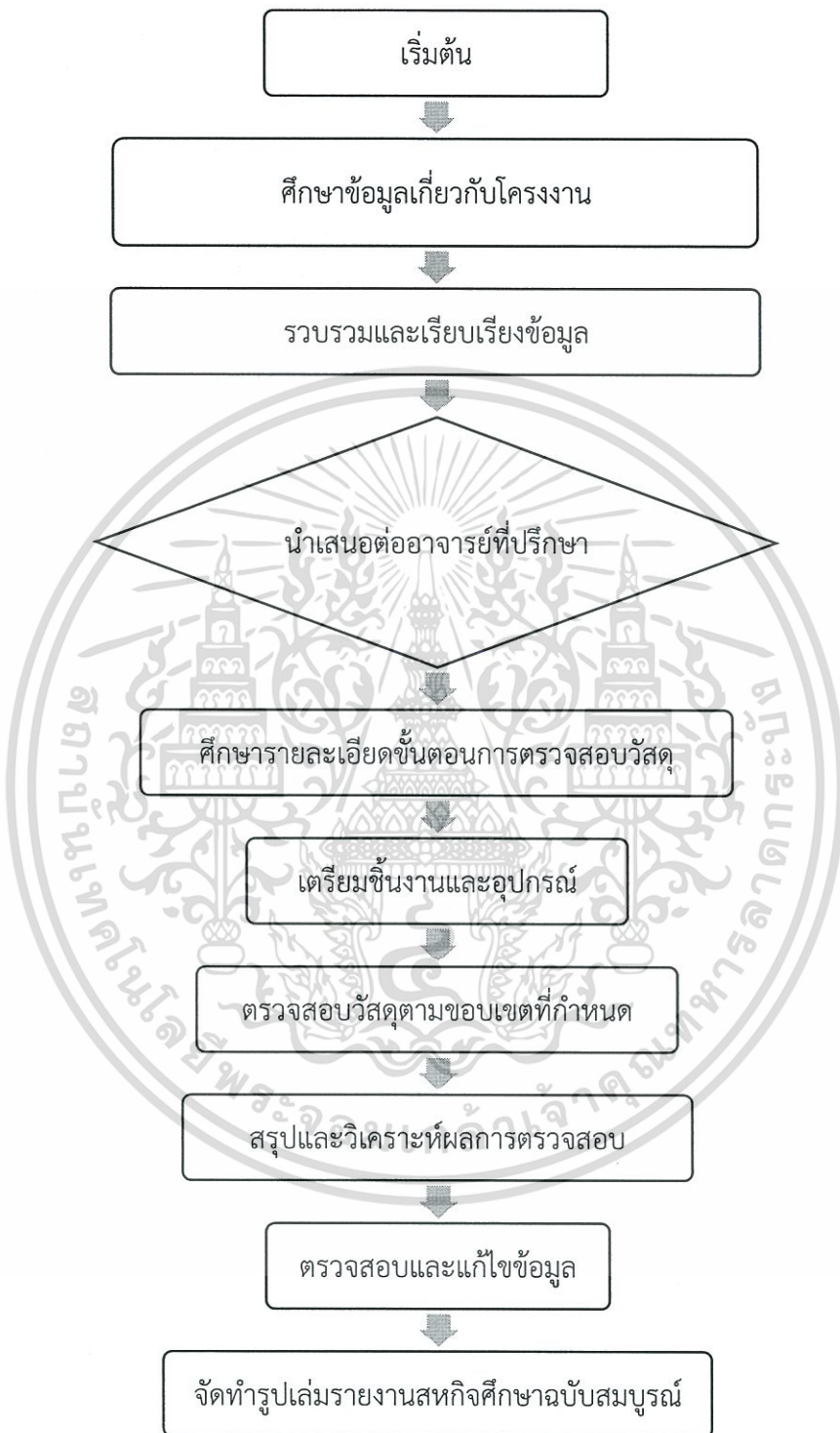
1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะ นำไปวิเคราะห์ความเสียหายตั้งแต่บริเวณรอยคว้านรู, บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone) จนถึงบริเวณเนื้อโลหะ (Base Metal)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยนี้คือ การใช้แผ่นฐานโลหะทรงบันไดสถานีรังสีที่เสียหายจากการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊สเป็นชิ้นงานในการทดสอบ โดยเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ขนาด 400x400x30 มิลลิเมตร การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งบริเวณขอบของรอยคว้าน บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและบริเวณเนื้อโลหะ การทดสอบวัดความแข็งโดยวิธีไมโครวิกเกอร์สที่บริเวณขอบรอยคว้านจนถึงเนื้อโลหะ



#### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ<sup>3</sup> ร้องอ้าวจึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊ส
- 1.5.2 สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ของความแข็งหรือโครงสร้างจุลภาคของโลหะต่อระยะห่างตั้งแต่ขอบรอยคว้านถึงเนื้อโลหะ
- 1.5.3 ผลวิจัยสามารถเป็นองค์ความรู้ หรือรูปแบบวิธีการวิจัยในระยะต่อไป



1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลา													
	สิงหาคม			กันยายน			ตุลาคม			พฤศจิกายน				
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
2. รวบรวมและเรียบเรียงข้อมูล	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
3. ศึกษารายละเอียดขั้นตอนการตรวจสอบวัสดุ	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
4. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์							■	■	■					
5. ตรวจสอบวัสดุตามขอบเขตที่กำหนด							■	■	■					
6. สรุปและวิเคราะห์ผลการตรวจสอบ										■	■	■		
7. ตรวจสอบและแก้ไขข้อมูล													■	
8. จัดทำรูปเล่มรายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์													■	■

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เหล็กกล้า (Steels) [1]

เหล็กกล้า คือโลหะผสมคาร์บอน ปกติมีปริมาณน้อยกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก อาจผ่านการเพิ่มธาตุโลหะอื่น เข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะ เหล็กกล้ามีหลายชนิดที่มีส่วนผสมทางเคมีหรือกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน เหล็กกล้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามปริมาณคาร์บอน ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

##### 2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25% โดยน้ำหนัก ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นมาร์เทนไซต์ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้เหนียว ไม่ค่อยแข็งแรง สามารถนำไปกลึง กัด ไส เชื่อม หรือรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถผลิตได้ในราคาที่ค่อนข้างต่ำเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ จึงมักนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์และในงานก่อสร้าง เช่น เหล็กโครงสร้าง สะพานและตัวค้ำ

##### 2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.25 และ 0.6% โดยน้ำหนัก เหล็กกลุ่มนี้อาจผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล และส่วนมากต้องอบคืนตัวก่อนนำมาใช้งาน จึงมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่อบคืนตัวแล้ว เหล็กกล้าชนิดนี้ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้ว มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่มีความเหนียวและความแกร่งน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่า และยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ นำมาใช้ทำล้อและรางรถไฟ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งใช้ในงานส่วนโครงสร้างความแข็งแรงสูง

##### 2.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.60 และ 1.4% โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงและความแข็งสูงสุด และค่าความเหนียวต่ำสุดในกลุ่มเหล็กกล้า มักใช้งานหลังผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว สำหรับงานที่ต้องการความต้านทานการสึกกร่อนและความคมเพื่อ

เอกสารตัดฉีก เช่น เครื่องมือตัดและแม่พิมพ์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการตัดโลหะทางความร้อน (Thermal Cutting Process) [2]

กระบวนการตัดโลหะทางความร้อน เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการตัดหรือการทำรูปชิ้นงานโลหะผสม โดยใช้พลังงานความร้อนที่มากพอกำจัดเนื้อโลหะออกโดยใช้การหลอมละลาย การเผาไหม้หรือการระเหยในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งกระบวนการตัดทางความร้อนนี้ เป็นผลให้เกิดความเสียหายทั้งด้านกายภาพและด้านโลหะวิทยาต่อบริเวณผิวชิ้นงาน ในบางกรณีพื้นผิวของชิ้นงานมีลักษณะเสีย ไม่สามารถนำชิ้นงานไปใช้งานที่ต้องการพื้นผิวที่เรียบได้

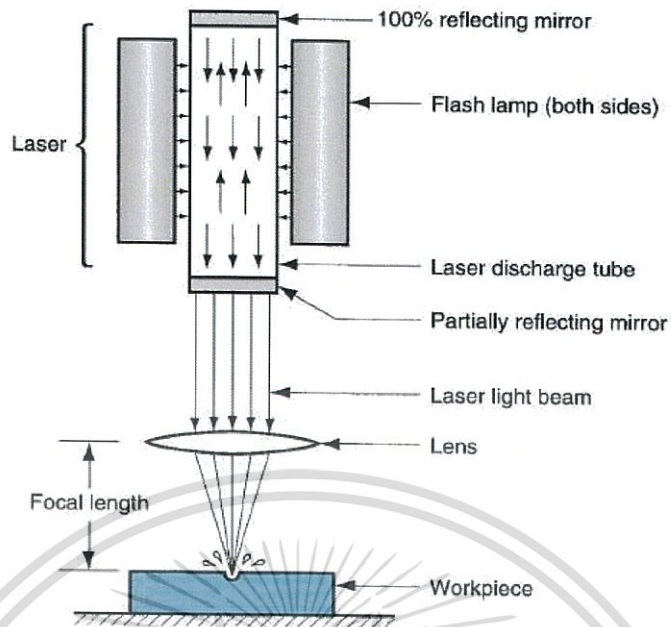
กระบวนการตัดโลหะทางความร้อนถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก โดยเฉพาะในการผลิตเหล็กแผ่นที่ใช้ในการตัดแต่งตัวแผ่นเหล็กให้ได้ขนาดตามที่กำหนด แม้จะใช้ความร้อนในการตัดแต่ง แต่ยังคงมีความแตกต่างกันในแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของวัสดุที่จะทำการตัด ประเภทของกระบวนการตัดโลหะทางความร้อนที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ กระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ กระบวนการตัดโลหะด้วยแก๊ส

### 2.2.1 กระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเจาะและการตัดวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง ให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว และตัดวัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อนได้โดยมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนจากการตัดน้อย ทำให้ชิ้นงานบิดตัวต่ำ การตัดโลหะประเภทนี้ปกติถูกใช้ในงานเฉพาะ ไม่นำมาใช้ทำงานในการผลิตที่มีปริมาณมาก ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการตัดประเภทนี้ เช่น โลหะ เซรามิก วัสดุประเภทแก้วหรือแก้วอีพ็อกซี พลาสติก ยางและไม้

การตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ใช้พลังงานแสงที่มีความเข้มข้นและพลังงานสูงผ่านไปยังชิ้นงาน ทำให้บริเวณจุดของชิ้นงานที่รับลำแสงหลอมละลายหลุดออกไปอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อเคลื่อนแนวลำแสงนี้จะทำให้เกิดเป็นร่องแยกระหว่างชิ้นงานกับตัววัสดุส่วนอื่นๆ เป็นการตัดโลหะด้วยความร้อนจากลำแสงร่วม ซึ่งมักใช้แก๊สความดันสูงร่วมด้วย แก๊สช่วยมักถูกใช้เพื่อนำวัสดุที่หลอมละลายและระเหยออกไปจากเส้นทางของลำแสง แต่ทั้งนี้ยังวัสดุที่มีความหนามาก อัตราสิ้นเปลืองปริมาณแก๊สมากขึ้น ความเร็วในการเดินหัวตัดต้องช้าลงไปด้วยตามลำดับ

เลเซอร์อุตสาหกรรมที่มักนำมาใช้มี 2 ประเภทได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ อลูมิเนียมคาร์เนตที่โด๊ปด้วยนีโอดีเนียม เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ใช้แก๊สเป็นตัวกลางเพื่อสร้างลำแสงเลเซอร์ ในขณะที่อลูมิเนียมคาร์เนตใช้วัสดุที่เป็นผลึก



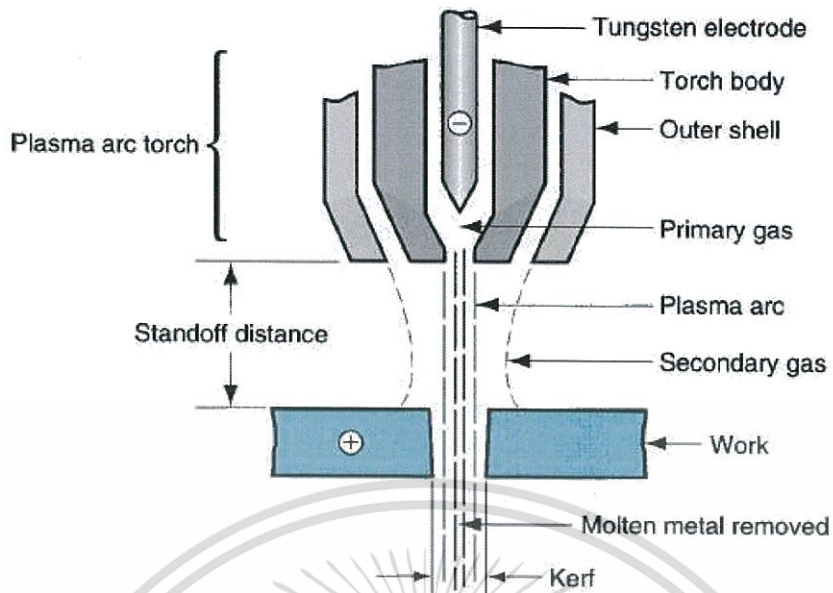
ภาพที่ 2.1 กระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

ที่มา : Mikell P. Groover, 2010 : 642

### 2.2.2 กระบวนการตัดโลหะด้วยลำอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Cutting)

เป็นวิธีตัดโลหะโดยการหลอมละลายบริเวณที่ถูกตัดของวัสดุโดยใช้อาร์คไฟฟ้าที่ถูกจำกัด ซึ่งจะขจัดวัสดุที่หลอมเหลวออกไปด้วยกระแสแก๊สไอออนร้อนที่มีความเร็วสูง อาศัยหลักการการอาร์คระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) และชิ้นงาน ผ่านช่องเล็ก ๆ ที่ทำด้วยทองแดง (Copper Nozzle) ซึ่งจะทำให้เกิดพลาสมา (Plasma) ทำให้มีอุณหภูมิและความเร็วสูงเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 10,000 องศาเซลเซียส และเมื่อปรับความเร็วเข้าใกล้ความเร็วเสียง ซึ่งลำของพลาสมาจะตัดทะลุผ่านชิ้นงานที่หลอมเหลวแล้วถูกจำกัดให้ไหลออกไปทางด้านล่างของชิ้นงาน

การตัดโลหะด้วยพลาสมา สามารถตัดโลหะได้หลากหลายชนิด โดยพิจารณาถึงความหนาและรูปร่างของชิ้นงาน ทำให้ขั้นตอนการตัดต่างออกไปบ้าง แก๊สที่ใช้ในกระบวนการนี้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับเนื้อของโลหะ เพื่อให้การตัดมีประสิทธิภาพและมีความเรียบร้อย แก๊สที่ใช้ได้แก่ ไนโตรเจน อาร์กอน ไฮโดรเจนหรือแก๊สผสมของแก๊สเหล่านี้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการตัดโลหะด้วยอาร์คพลาสมาจะได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนเช่นกัน เมื่อมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดมีความสะดวกในการทำงาน รวมทั้งเรื่องของราคาที่ถูกลงและมีความเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.2 กระบวนการตัดโลหะด้วยลำอาร์คพลาสมา

ที่มา : Mikell P. Groover, 2010 : 643

ข้อดีของการตัดโลหะด้วยพลาสมา

1. สามารถตัดชิ้นงานรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยง่าย
2. สภาพรอยตัดจะมีความราบเรียบและสวยงามมีความเรียบร้อย
3. ความร้อนที่เกิดจากการตัด กระจายความร้อนในวงแคบ ๆ
4. มีความสะดวกในการใช้งานและใช้งานง่าย

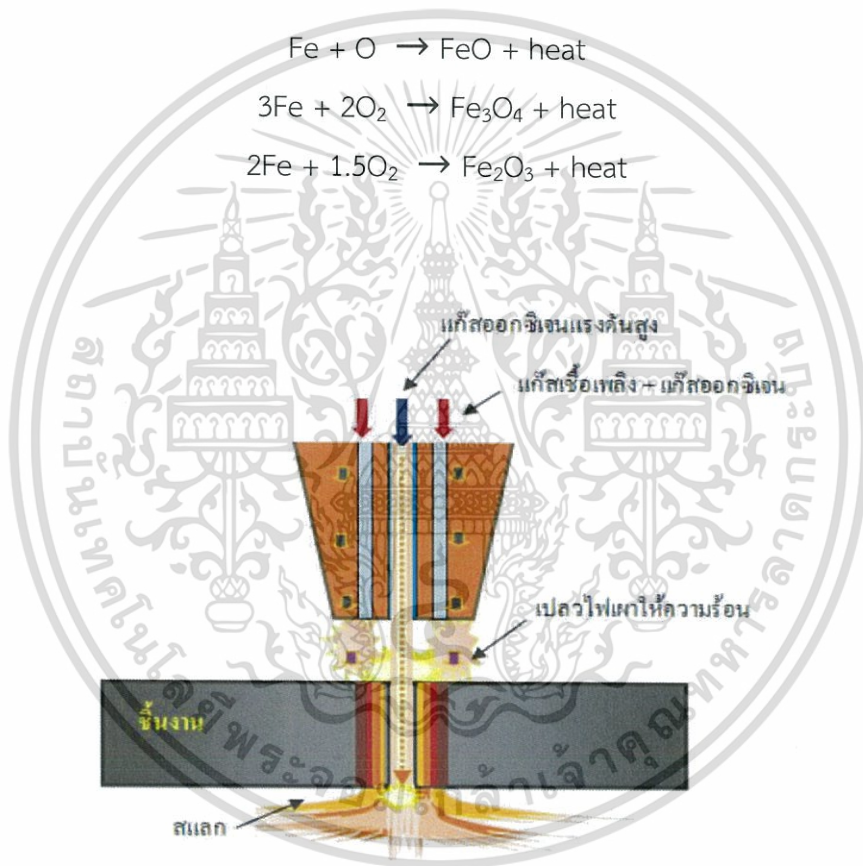
ข้อจำกัดของการตัดโลหะด้วยพลาสมา

1. อาจเกิดอันตรายจากความร้อน, ไฟฟ้าช็อตและระดับเสียงที่มากกว่าการตัดโลหะด้วยวิธีอื่น นอกจากนี้ยังควบคุมขนาดของการตัดได้ยากกว่าการตัดโดยใช้เครื่องมือตัด
2. อุปกรณ์มีราคาแพงเมื่อเทียบกับการตัดโลหะด้วยแก๊ส (Oxy-Fuel Cutting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 กระบวนการตัดโลหะด้วยแก๊ส (Oxy-fuel Cutting Process)

การตัดชนิดนี้ถูกใช้แพร่หลายในบรรดากระบวนการตัดโลหะทางความร้อน หรือที่รู้จักในชื่อการตัดด้วยเปลวไฟ โดยอาศัยเปลวไฟที่ออกมาจากหัวตัด ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่างแก๊สออกซิเจนกับแก๊สเชื้อเพลิง เผาชิ้นงานโลหะให้มีอุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส จึงส่งแก๊สออกซิเจนที่มีความดันสูงลงไป ยิ่งปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ส่งผ่านหัวตัดมีความดันสูง จะเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น จนเกิดการสันดาประหว่างแก๊สออกซิเจนกับเนื้อโลหะ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นเหล็กออกไซด์หลุดออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นรอยตัด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



ภาพที่ 2.3 กระบวนการตัดโลหะด้วยแก๊ส

ที่มา : บัณฑิต อมรสิน, 2012 : 2

การตัดโลหะด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งคนและเครื่องได้ ซึ่งสามารถตัดได้ทั้งแนวตรง วงกลมและท่อ เมื่อเทียบกับรูปแบบการตัดทางความร้อนแบบอื่น ๆ การตัดโลหะด้วยแก๊ส มีต้นทุนที่ถูกกว่า มีความคล่องตัวและกำลังการผลิตสูง โดยทั่วไปวิธีนี้ถูกใช้ในงานซ่อมแซม การตัดเศษโลหะ หรืองานที่ต้องการความแม่นยำน้อย

แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการตัดโดยทั่วไปนิยมใช้แก๊สอะเซทิลีน (Acetylene) แก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) และแก๊สโพรเพน (Propane) เป็นต้น โดยแก๊สแต่ละชนิดนั้นมีค่าความร้อนและอุณหภูมิของเปลวไฟแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง จากเหตุผลที่มีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดจึงมีการออกแบบหัวตัดให้เหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิงและความเร็วในการตัด

**TABLE 30.2 Gases used in oxyfuel welding and/or cutting, with flame temperatures and heats of combustion.**

Fuel	Temperature <sup>a</sup>		Heat of Combustion	
	°C	°F	MJ/m <sup>3</sup>	Btu/ft <sup>3</sup>
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	3087	5589	54.8	1470
MAPP <sup>b</sup> (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> )	2927	5301	91.7	2460
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	2660	4820	12.1	325
Propylene <sup>c</sup> (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	2900	5250	89.4	2400
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2526	4579	93.1	2498
Natural gas <sup>d</sup>	2538	4600	37.3	1000

Compiled from [10].

<sup>a</sup>Neutral flame temperatures are compared since this is the flame that would most commonly be used for welding.

<sup>b</sup>MAPP is the commercial abbreviation for methylacetylene-propadiene.

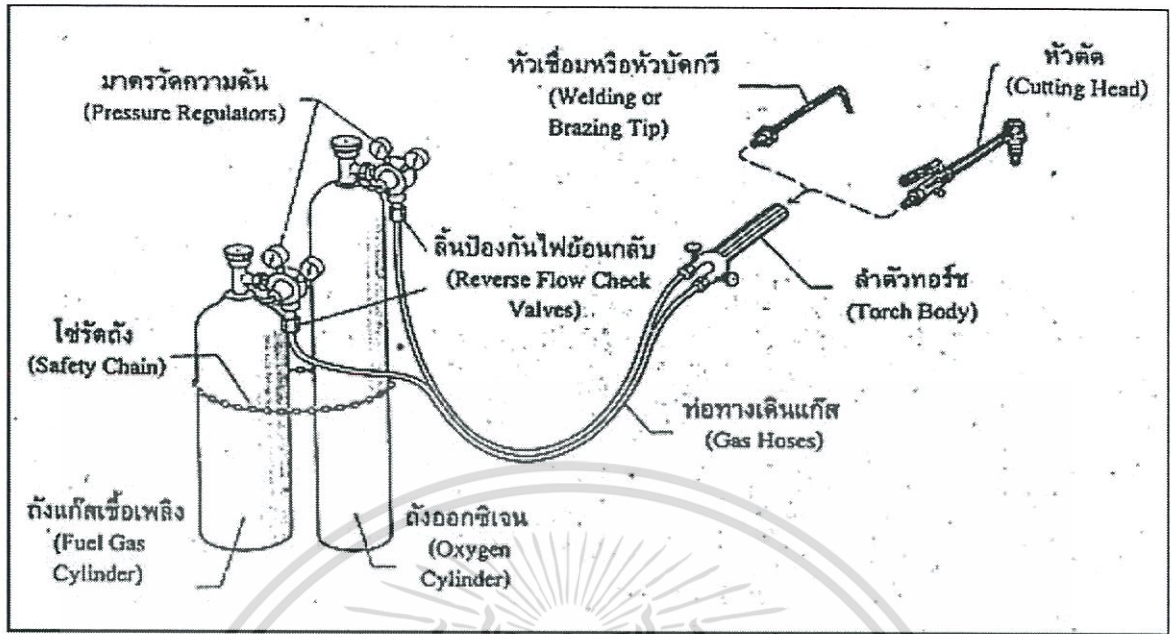
<sup>c</sup>Propylene is used primarily in flame cutting.

<sup>d</sup>Data are based on methane gas (CH<sub>4</sub>); natural gas consists of ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) as well as methane; flame temperature and heat of combustion vary with composition.

ภาพที่ 2.4 ตารางแสดงอุณหภูมิของเปลวไฟและค่าความร้อนของแก๊สที่ใช้ชนิดต่าง ๆ

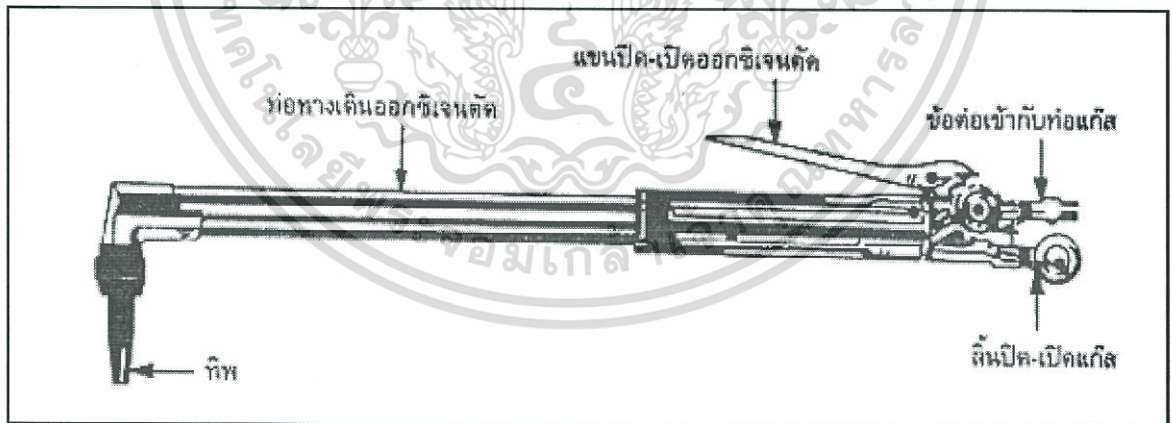
ที่มา : Mikell P. Groover, 2010 : 728

อุปกรณ์การตัดโลหะด้วยแก๊ส มีชิ้นส่วนเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมทุกอย่าง เพียงแต่เปลี่ยนจากหัวเชื่อม (Welding Tip) มาเป็นหัวตัด (Cutting Head) เท่านั้น โดยมีทิวตัด (Cutting Tip) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายคลึงกับทิวเชื่อม (Welding Tip) เพียงแต่ทิวตัดมีท่อทางเดินของแก๊สออกซิเจน เพิ่มขึ้นอีก 1 รู



ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดโลหะด้วยแก๊ส

ที่มา : งานเชื่อมแก๊ส วิทยาลัยเทคนิคพัทยา



ภาพที่ 2.6 หัวตัดที่ใช้ในการตัดโลหะด้วยแก๊ส

ที่มา : งานเชื่อมแก๊ส วิทยาลัยเทคนิคพัทยา

## คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการตัดโลหะด้วยแก๊ส

วัสดุสำหรับการตัดโลหะด้วยแก๊ส ต้องมีผ่านเงื่อนไขดังนี้

1. เป็นโลหะที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (Thermal Conductivity)
2. มีความสามารถในการออกซิไดซ์ สามารถเกิดการสันดาปได้เมื่อเพิ่มแก๊สออกซิเจน
3. มีค่าความร้อนจากการสันดาปสูง
4. จุดหลอมละลายของออกไซด์โลหะมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมละลายของโลหะชิ้นงาน
5. อุณหภูมิที่เกิดการสันดาป ต้องต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย

ข้อดีและข้อเสียของการตัดโลหะด้วยแก๊ส

ข้อดี

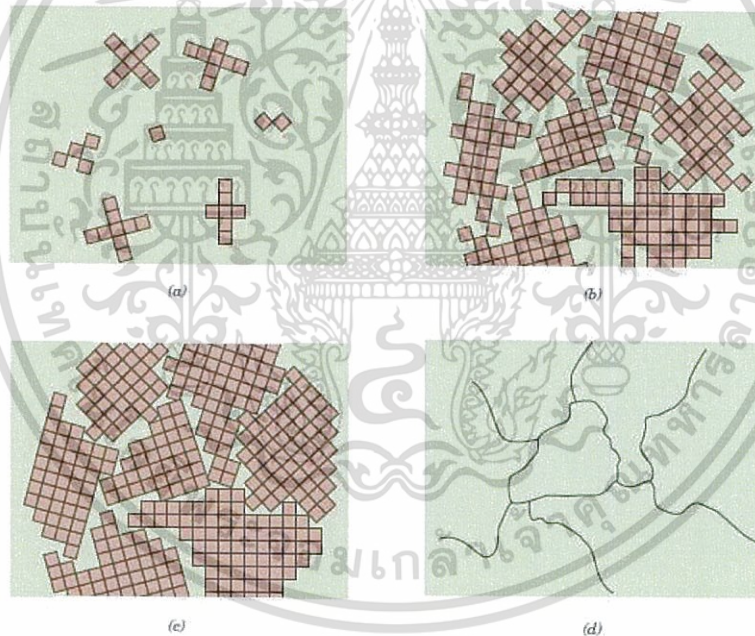
1. ความเร็วในการตัดเร็วกว่าการตัดด้วยวิธีทางกล ทำให้สามารถทำงานได้ครั้งละมาก ๆ
2. อุปกรณ์ต่าง ๆ เคลื่อนย้ายสะดวก และมีการบำรุงรักษาน้อย
3. สามารถเปลี่ยนทิศทางการตัดได้รวดเร็วกว่า เมื่อทำการตัดงานรูปทรงต่าง ๆ

ข้อเสีย

1. คุณภาพของผิววัสดุต่ำกว่าการตัดด้วยวิธีทางกล
2. ใช้สำหรับตัดเหล็กเป็นหลัก โลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิดไม่สามารถตัดด้วยแก๊สได้
3. ต้องระมัดระวังในการเก็บถังแก๊สและสะเก็ดไฟ ซึ่งมีความอันตราย
4. คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะที่ถูกตัดเปลี่ยนแปลง

### 2.3 การเกิดเกรนและการตกผลึกของวัสดุ [1]

วัสดุของแข็งส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มผลึกขนาดเล็กจำนวนมากหรือที่เรียกว่าเกรน (Grains) วัสดุประเภทนี้ถูกเรียกว่าวัสดุหลายผลึก (Polycrystalline) ซึ่งผลึกนี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแข็งตัว โดยในผลึกแต่ละผลึกเริ่มเกิดนิวเคลียสที่จุดต่าง ๆ พร้อมกัน นิวเคลียสมีทิศทางการเรียงตัวไม่แน่นอน ทำให้การแข็งตัวจากนิวเคลียสเป็นเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน เมื่อนิวเคลียสเติบโตขึ้นเป็นผลึกและผลึกจะโตขึ้นเรื่อย ๆ จากการจับตัวกันของอะตอมตามรูปทรงของผลึกของวัสดุ การจับตัวกันของอะตอมนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กันกับการเย็นตัว ซึ่งการจับยึดตัวของอะตอมต่อไปเรื่อย ๆ นี้เรียกว่า Dendrite และแผ่ขยายตัวออกไปชนกับแขนงตัวข้างเคียงเรื่อย ๆ จนกระทั่งการแข็งตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ ไม่มีของเหลวเหลือจึงจะหยุดการเจริญเติบโต ทั้งนี้เกรนแต่ละเกรนมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากการเติบโตของ Dendrite แต่ละตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน ดังนั้นบริเวณที่เป็นรอยต่อแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรน เรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundary)



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการเกิดเกรนในสภาวะการตกผลึกของโลหะ

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 73

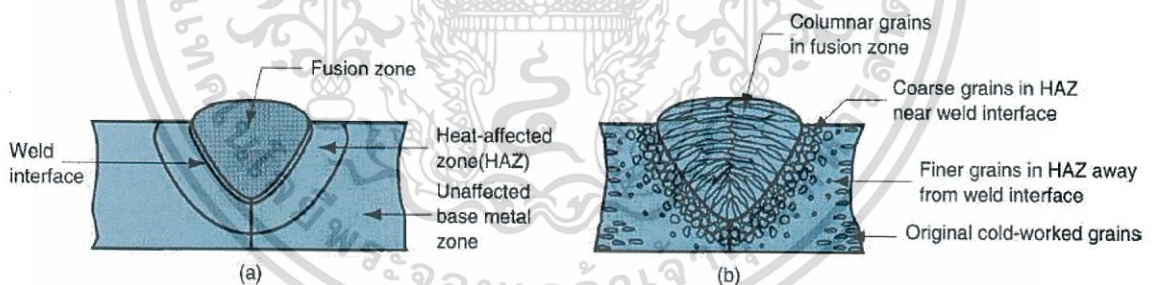
ในวัสดุโลหะขนาดของเกรนมีความสำคัญเนื่องจากขนาดเกรนมีผลต่อคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปขนาดของเกรนที่เล็กจะถูกเลือกในการออกแบบ เพราะขนาดเกรนที่เล็กจะมีความแข็งแรงและความแข็งที่สูง ทั้งนี้แล้วขนาดของเกรนที่เล็กยังเป็นที่ต้องการในขั้นตอนกระบวนการผลิต เช่น การขึ้นรูปโลหะ เพราะขนาดเกรนที่เล็กจะให้ความเหนียวที่สูงขึ้นระหว่างการแปรรูปถาวรและสภาพพื้นผิวที่ดีของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเกรนจะแปรผกผันกับอัตราการเย็นตัว โดยการลดอุณหภูมิเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเกรนขนาดเล็ก ในขณะที่การเย็นตัวอย่างช้า ๆ ส่งผลให้เกิดเกรนขนาดใหญ่

## 2.4 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) [2]

เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้แนวรอยเชื่อมหรือรอยตัดที่ได้รับอุณหภูมิสูง โดยต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ แต่สูงเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้คุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงตาม ความเสียหายทางโลหะวิทยาในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณความร้อนเข้าและอุณหภูมิสูงสุดของโลหะ ระยะห่างจากเส้นหลอมละลาย ระยะเวลาที่โลหะได้รับความร้อนและอัตราการเย็นตัว เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางความร้อนในบริเวณนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับเนื้อโลหะปกติ โดยปกติคุณสมบัติทางกลของโลหะในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนนี้จะเสียและความเสียหายจากการเชื่อมมักเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ เนื่องจากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีโครงสร้างที่แข็ง เปราะ มีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำและมีความแข็งแรงลดลง



ภาพที่ 2.8 หน้าตัดแสดงโครงสร้างของรอยเชื่อม

ที่มา : Mikell P. Groover, 2010 : 704

## 2.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมของเหล็ก-คาร์บอน [1]

โครงสร้างจุลภาคเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล ในการวิเคราะห์โครงสร้างจะกล่าวถึงจำนวนและอัตราส่วนของเฟสการกระจายตัวของเฟสต่าง ๆ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ส่วนผสม ชนิดของโลหะผสม รวมทั้งกรรมวิธีทางความร้อนสามารถส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคแตกต่างกันด้วยเช่นกัน เมื่อเหล็กบริสุทธิ์ถูกทำให้ร้อนจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก 2 ครั้งก่อนที่จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิห้อง

เฟอร์ไรต์ (Ferrite) เฟสนี้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็กแบบ BCC คาร์บอนสามารถละลายในเฟอร์ไรต์ได้เพียงเล็กน้อย กล่าวคือมีความสามารถในการละลาย Solid Solubility สูงสุดเพียง 0.02% ที่อุณหภูมิ 723°C และความสามารถในการละลายจะลดลงเป็น 0.005% ที่อุณหภูมิ 0°C

ออสเตนไนต์ (Austenite) เฟสนี้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็ก ออสเตนไนต์มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีความสามารถในการละลายของคาร์บอนสูงกว่าแบบเฟอร์ไรต์ ความสามารถในการละลายของคาร์บอนในออสเตนไนต์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.08% ที่อุณหภูมิ 1148°C และลดลงเป็น 0.8% ที่อุณหภูมิ 723 °C

ซีเมนไตต์ (Cementite) สารประกอบ Intermetallic  $Fe_3C$  จะเรียกว่า Cementite สารประกอบ Cementite จะมีปริมาณของคาร์บอน 6.67% และเหล็ก 93.3% Cementite มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ

เบนไนต์ (Bainite) เฟสที่แปลงมาจากออสเตนไนต์ พบในเหล็กกล้าและหล่อบางชนิด เบนไนต์จะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดเพิร์ลไลต์ และอุณหภูมิที่เกิดมาร์เทนไซต์ โครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ละเอียดที่กระจายตัวอยู่

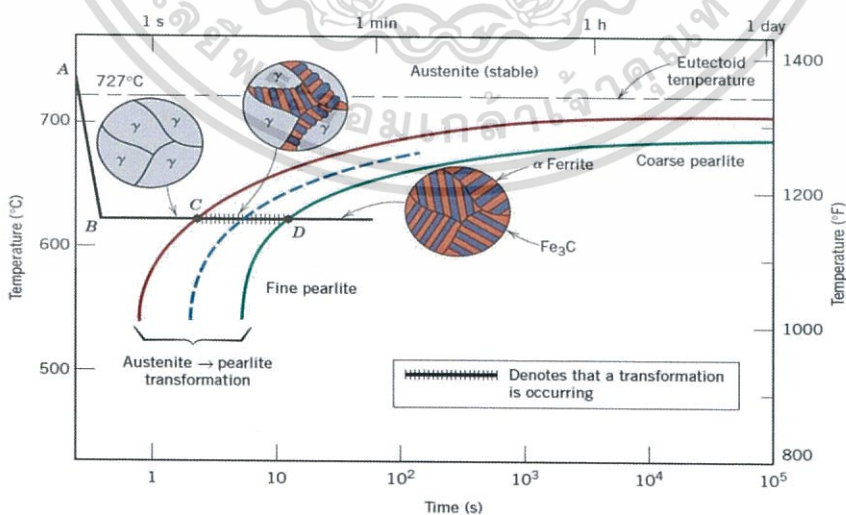
มาร์เทนไซต์ (Martensite) เฟสที่แข็งเสถียรของเหล็กที่อิ่มตัวด้วยคาร์บอน เกิดจากการแปลงเฟสมาจากออสเตนไนต์แบบไม่อาศัยการแพร่

2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน [1]

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกรรมวิธีทางความร้อน กระบวนการดังกล่าวหมายถึงการข้ามเส้นขอบของพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่งบนแผนภูมิเฟสที่พล็อตระหว่างอุณหภูมิ-ส่วนผสม โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ การแปลงเฟสส่วนใหญ่ต้องการเวลาระยะหนึ่งกว่าจะสมบูรณ์ได้ โดยความเร็วหรืออัตราเร็วมักส่งผลสำคัญต่อความสัมพันธ์ระหว่างกรรมวิธีทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างจุลภาค อัตราเร็วของการเข้าสู่สมดุลในระบบของแข็งมักจะช้ามากจนโครงสร้าง สมดุลอย่างแท้จริงเกิดขึ้นน้อยมาก สภาวะสมดุลจะถูกรักษาไว้ได้ก็ต่อเมื่อการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้ามาก ๆ เท่านั้น แต่เป็นอัตราเร็วที่ไม่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นการเปลี่ยนเฟสจริงจะเกิด ณ อุณหภูมิต่ำกว่าที่ระบุไว้ในแผนภูมิเฟส กรณีอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้นจริง เร็วกว่า อัตราการเย็นตัวที่ระบุไว้ในแผนภูมิเฟส เรียกว่า Supercooling หรือกรณีให้ความร้อน การเปลี่ยนแปลงเฟสก็จะเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสมดุลหรือเกิด Superheating

2.6.1 การเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เป็น เฟอร์ไรต์

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานในการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ในระหว่างการเย็นตัว ออสเทนไนต์ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนในระดับปานกลาง เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสของเฟอร์ไรต์ซึ่งมีคาร์บอนต่ำมาก และซีเมนต์ไต์ซึ่งมีคาร์บอนสูงกว่าออสเทนไนต์เดิม เฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างจุลภาคผลลัพท์โครงสร้างหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงนี้ อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญต่ออัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์เป็นเฟอร์ไรต์ โดยในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของการแปลงเฟสดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วิธีการสร้างแผนภูมิการแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 359

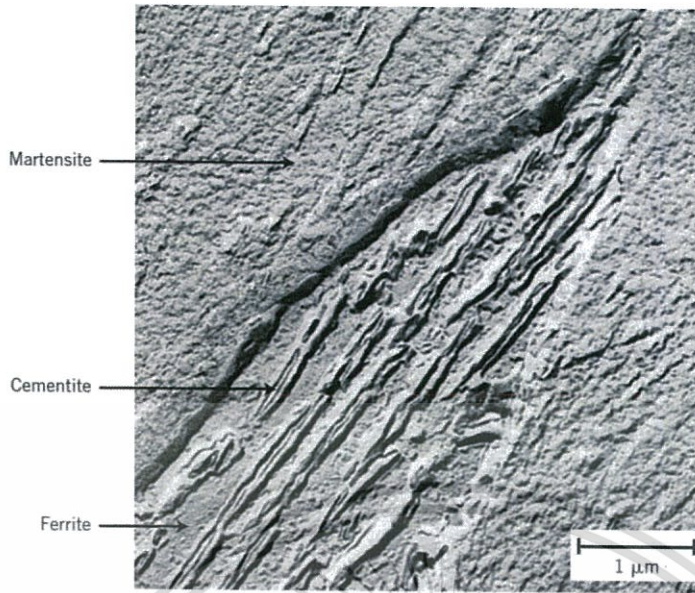
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขอขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตีความแผนภูมินี้ ก่อนอื่นให้สังเกตว่าอุณหภูมิยูเทกตอยด์  $727^{\circ}\text{C}$  ถูกระบุด้วยเส้นแนวนอนในบริเวณเหนือเส้นนี้ขึ้นไปไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานเพียงใดระบบจะมีแต่ออสเตนไนต์เท่านั้น การแปลงเฟสจากออสเตนไนต์เป็นเฟิร์ลไลต์ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อโลหะผสมนี้ถูกทำให้เย็นตัวยิ่งยวดลงไปที่อุณหภูมิต่ำกว่ายูเทกตอยด์ ในการที่จะเริ่มเกิดและสิ้นสุดนี้เป็นเส้นที่ขนานกันโดยประมาณและโค้งเฉียงตีสันแสดงอุณหภูมิยูเทกตอยด์บริเวณทางซ้ายของเส้นโค้งที่แสดงการเริ่มต้นการแปลงเฟส ระบบจะมีแต่เฟสออสเตนไนต์ เท่านั้น ในขณะที่ส่วนขวามือของเส้นโค้งสิ้นสุดการแปลงเฟสจะมีแต่เฟิร์ลไลต์ปรากฏอยู่ บริเวณระหว่างเส้นโค้งทั้งสอง ออสเตนไนต์อยู่ระหว่างการเปลี่ยนไปเป็นเฟิร์ลไลต์ ดังนั้น จะพบส่วนประกอบระดับจุลภาคทั้ง 2 ชนิดในระบบจากภาพที่ 2.8 พบว่ายิ่งระยะเวลาสั้นแสดงว่าอัตราเร็วของการแปลงเฟสสูง และที่อุณหภูมิต่ำกว่ายูเทกตอยด์เพียงเล็กน้อยต้องใช้เวลามากเพื่อที่จะเปลี่ยนเฟสหมายความว่าอัตราเร็วที่อุณหภูมินี้ต่ำมาก

อัตราส่วนของความหนาของชั้นเฟอไรต์ต่อชั้นซีเมนไตต์ในโครงสร้างเฟิร์ลไลต์มีค่าประมาณ 8 ต่อ 1 แต่ค่าความหนาของชั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดการแปลงเฟสแบบอุณหภูมิคงที่นั้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่ายูเทกตอยด์เพียงเล็กน้อย เกิดชั้นของของเฟอไรต์และซีเมนไตต์ที่ค่อนข้างหนา เรียกโครงสร้างจุลภาคแบบนี้ว่า เฟิร์ลไลต์หยาบ (Coarse Pearlite) พบในบริเวณด้านขวาของเส้นโค้งสิ้นสุดการแปลงเฟสในภาพที่ 2.9 ที่อุณหภูมิช่วงนี้ อัตราเร็วของการแพร่ค่อนข้างสูง ทำให้ระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส อะตอมของคาร์บอนสามารถแพร่ไปได้ระยะทางค่อนข้างไกล ส่งผลให้เกิดชั้นที่หนาขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิต่ำ อัตราเร็วของการแพร่ของคาร์บอนมีค่าต่ำลง ชั้นที่เกิดขึ้นจึงบางกว่า โครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นแคบ ๆ หรือบาง ๆ นี้เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ  $540^{\circ}\text{C}$  เรียกว่า โครงสร้างเฟิร์ลไลต์ละเอียด (Fine Pearlite)

#### 2.6.2 การเปลี่ยนเฟสออสเตนไนต์เป็นเบนไนต์

นอกจากเฟิร์ลไลต์แล้ว ยังมีส่วนประกอบระดับจุลภาคชนิดอื่นอีกที่เป็นผลมาจากการแปลงเฟสของออสเตนไนต์ เช่น เบนไนต์ โครงสร้างจุลภาคของเบนไนต์ประกอบด้วยเฟสเฟอไรต์และซีเมนไตต์ ดังนั้น ในการเกิดเบนไนต์จึงมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้อง โครงสร้างจุลภาคของเบนไนต์นั้นละเอียดมากจนกระทั่งเราสามารถมองแยกรายละเอียดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น ดังภาพที่ 2.10 จากรูปจะเห็นว่าประกอบด้วยเข็มของเฟอไรต์ ซึ่งมีอนุภาคเรียวยาวของเฟสซีเมนไตต์ เกาะกระจายอยู่ดังที่ได้ระบุในรูป นอกจากนี้เฟสที่ล้อมรอบเข็มคือมาร์เทนไซต์



ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงโครงสร้างของเบนไนต์ เกรนของเบนไนต์ในรูปพาดผ่านจากมุมซ้ายล่างไปยังมุมขวาบน

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 360

การเกิดเบนไนต์ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ โดยการเกิดโครงสร้างนี้จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิที่เกิดเพิร์ลไลต์ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเพิร์ลไลต์และเบนไนต์นั้นเป็นการแย่งกันเกิด นั่นคือหากส่วนหนึ่งของโลหะผสมเกิดเป็นเพิร์ลไลต์หรือเบนไนต์ตัวใดตัวหนึ่งไปแล้ว จะไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นอีกตัวหนึ่งได้โดยตรงนอกจากจะให้ความร้อนจนมันกลับไปเป็นออสเทนไนต์ใหม่ก่อน

### 2.6.3 การเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์

มาร์เทนไซต์ เกิดได้ในโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอนที่ถูกทำให้เป็นออสเทนไนต์แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว หรือชุบ (Quench) ลงมาที่อุณหภูมิต่ำเพียงพอ มาร์เทนไซต์นี้เป็นเฟสเดี่ยว ๆ ที่ไม่ใช่ภาวะสมดุล อันเป็นผลจากการแปลงเฟสอีกทางหนึ่ง ซึ่งต้องแย่งกันเกิดกับเพิร์ลไลต์และเบนไนต์ การแปลงเฟสเป็นมาร์เทนไซต์จะเกิดเมื่ออัตราการชุบเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแพร่ของคาร์บอน เพราะหากเกิดการแพร่ขึ้น จะทำให้เกิดเป็นเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ได้

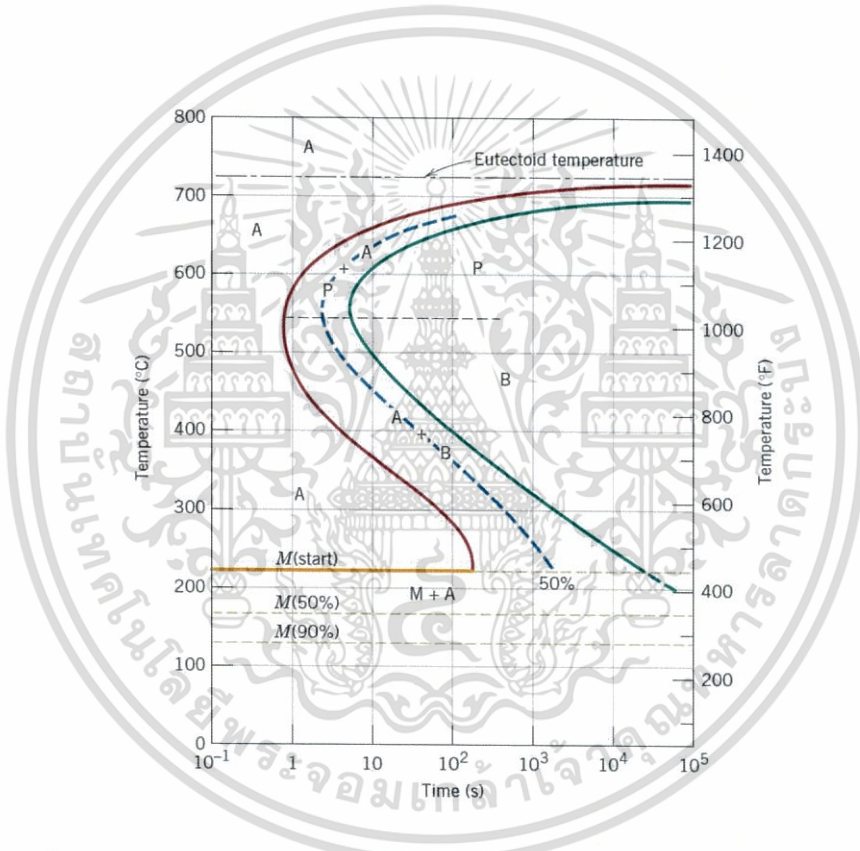
การแปลงเฟสเป็นมาร์เทนไซต์เกิดจากการที่การเคลื่อนที่ร่วมกันของอะตอมเป็นจำนวนมาก ซึ่งผลลัพธ์คือ อะตอมแต่ละตัวมีการเคลื่อนที่ เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับบริเวณข้างเคียง กระบวนการดังกล่าวยังต้องทำให้ออสเทนไนต์ซึ่งเป็น FCC สามารถเปลี่ยนอัญรูป (โครงสร้างผลึก) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบ BCT คือลักษณะ BCC ที่ยืดออก

ในแนวแกนแกนหนึ่งนั่นเอง แต่โครงสร้างผลึกแบบนี้แตกต่างจากเฟอร์ไรต์-BCC อย่างสิ้นเชิง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมคาร์บอนทั้งหมดยังคงมีสภาพของสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดขึ้น และพร้อมจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างอื่นได้อีก หากถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่มีอัตราเร็วของการแพร่ที่สูงพอ อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าหลายชนิดสามารถคงสภาพโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ไว้ได้เกือบตลอดที่อุณหภูมิต้อง

เนื่องจากมาร์เทนไซต์ไม่ต้องอาศัยการแพร่ ดังนั้นจึงเกิดขึ้นด้วยความเร็วของเสียงภายในเนื้อพื้นที่ออสเทนไนต์เลยทีเดียว ดังนั้นในทางปฏิบัติจะถือว่า การแปลงเฟสเป็นมาร์เทนไซต์เป็นกระบวนการที่ไม่อาศัยเวลา เกรนของมาร์เทนไซต์มีรูปร่างเป็นเหมือนแผ่นหรือเข็ม โดยอาจมีเฟสออสเทนไนต์ตกค้างอยู่ ซึ่งไม่เปลี่ยนเฟสในระหว่างที่ชุบเย็นอย่างรวดเร็ว



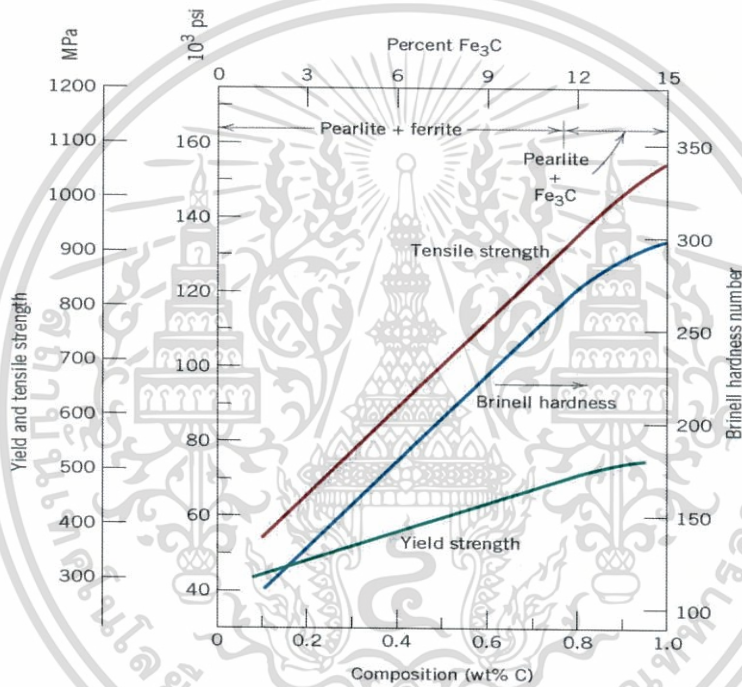
ภาพที่ 2.11 แผนภูมิการแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับโลหะผสมเหล็กคาร์บอน ส่วนผสมยูเทคตอยด์ A คือออสเทนไนต์ B คือเบนไนต์ M คือมาร์เทนไซต์ และ P คือเฟิร์ลไลต์

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 364

## 2.7 พฤติกรรมทางกลของโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน [1]

### 2.7.1 เฟิร์ลไลต์

ซีเมนไตต์แข็งและเปราะกว่าเฟอร์ไรต์มาก ดังนั้นหากโลหะผสมของเหล็กกล้ามีปริมาณของ  $Fe_3C$  สูงขึ้น ในขณะที่ส่วนประกอบทางจุลภาคอื่นคงที่ ทำให้วัสดุแข็งและแข็งแรงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งแสดงค่าความต้านแรงดึง ความเค้นจุดคราก ตลอดจนความแข็งแบบบริเนลล์เป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของคาร์บอน ค่าสมบัติทางกลทั้งสามเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเหล็กมีคาร์บอนเข้มข้นขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการมีซีเมนไตต์เพิ่มขึ้น ทำให้ทั้งความเหนียวและความแกร่งลดลงทั้งคู่



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ความเค้นจุดคราก ความต้านแรงดึงและความแข็งแบบบริเนลล์กับปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟิร์ลไลต์ละเอียด

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 371

ความหนาของชั้นแต่ละชั้นของเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ในโครงสร้างจุลภาค ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุด้วย โครงสร้างเฟิร์ลไลต์ละเอียดแข็งและแข็งแรงกว่าโครงสร้างเฟิร์ลไลต์หยาบ เพราะปรากฏการณ์ผิวสัมผัสระหว่างเฟส  $\alpha-Fe_3C$  มีระดับการยึดติดค่อนข้างสูงระหว่างเฟสทั้งสองตรงบริเวณผิวสัมผัส ดังนั้นเฟสซีเมนไตต์ ซึ่งแข็งและเกร็งกว่าจะจำกัดการแปรรูปของเฟอร์ไรต์ที่นิ่มกว่าอย่างรุนแรง โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับผิวสัมผัสกล่าวคือ ซีเมนไตต์ช่วยเสริมแรงให้กับเฟอร์ไรต์ ระดับการเสริมแรงนี้จะมากในโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ละเอียด เพราะพื้นผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงกว่าของเฟิร์ลไลต์หยาบ ในโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ละเอียด มีผิวสัมผัสเช่นนี้ที่ติสโลเคชันต้องข้ามผ่านเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

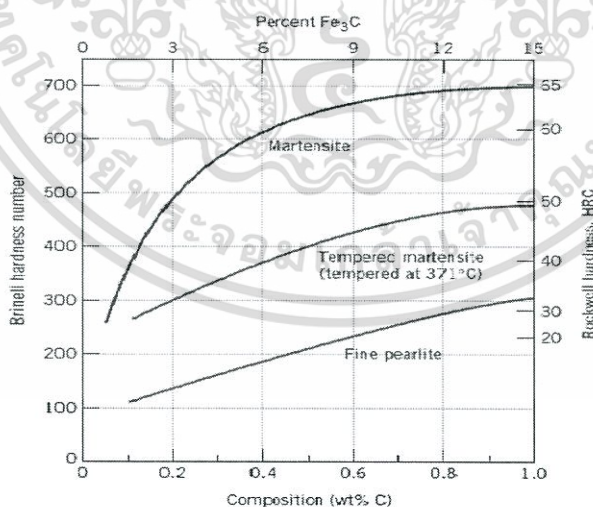
จำนวนที่มากกว่าระหว่างการแปรรูปถาวร ดังนั้น ผลจากการเสริมแรงและการจำกัดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันที่รุนแรงกว่าในเฟิร์ลไลต์ละเอียด จึงส่งผลให้มันมีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าเฟิร์ลไลต์หยาบ

### 2.7.2 เบนไนต์

เนื่องจากเหล็กกล้าเบนไนต์มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่า (มีเกรนของเฟอร์ไรต์  $\alpha$  และอนุภาคของ  $Fe_3C$  ที่เล็กกว่า) ดังนั้นจึงแข็งและแข็งแรงกว่าเหล็กที่เป็นเฟิร์ลไลต์ นอกจากนี้มันยังมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอีกด้วย

### 2.7.3 มาร์เทนไซต์

ในบรรดาโครงสร้างจุลภาคแบบต่าง ๆ โครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์คือ โครงสร้างที่แข็งที่สุดและเปราะที่สุดด้วย ในความจริงถือว่ามีมาร์เทนไซต์ไม่มีความเหนียวอยู่เลย ความแข็งของมาร์เทนไซต์ขึ้นกับปริมาณคาร์บอนจนถึง 0.6 % โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งแสดงความแข็งของมาร์เทนไซต์และเฟิร์ลไลต์ละเอียด เป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนตรงข้ามกับเหล็กกล้าชนิดเฟิร์ลไลต์ ความแข็งแรงและความแข็งของมาร์เทนไซต์ที่สูงนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค แต่ถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการที่อะตอมแทรกของคาร์บอนขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันอย่างมีประสิทธิภาพ และการที่โครงสร้างแบบ BCT มีระบบสลิปจำนวนน้อยให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้



ภาพที่ 2.13 ความแข็งเป็นฟังก์ชันของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เหมเปอร์มาร์เทนไซต์และเฟิร์ลไลต์

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 374

## 2.8 ความแข็งของวัสดุ (Hardness)

คุณสมบัติของวัสดุมีหลายประการ สิ่งหนึ่งที่สำคัญคือความแข็งของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเป็นคุณสมบัติที่ต้านทานต่อแรงกดการขีดสีและการกลึงของวัสดุโดย การต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุหรือความต้านทานต่อการกระทำต่อวัสดุ เมื่อวัสดุสูญเสียความต้านทาน ก่อให้เกิดความเสียหาย รอยบวม ความเสื่อมหรือความทรุดโทรมอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากแรงหรือความกดดันที่กระทำต่อวัสดุนั้น วัสดุที่มีความแข็งจะสามารถทนทานต่อการขีดข่วนได้มาก และเมื่อเกิดการขีดข่วนจะไม่เกิดรอยขึ้นในวัสดุชนิดนั้นๆ ดังนั้น การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ เมื่อนำวัสดุชนิดหนึ่งขูดบนวัสดุอีกชนิดหนึ่ง แล้วทำให้วัสดุที่ถูกขูดเกิดรอย แสดงว่าวัสดุที่ถูกขูดมีความแข็งน้อยกว่าวัสดุที่ใช้ขูด แต่ถ้าวัสดุที่ถูกขูดไม่เกิดรอย แสดงว่าวัสดุที่ถูกขูดมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่ใช้ขูด สมบัติด้านความแข็งของวัสดุสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น เหล็กใช้ทำมีด เพราะเหล็กมีความแข็ง เพชรใช้ทำเครื่องมือตัดกระจก เพราะเพชรมีความแข็งแรงมากกว่ากระจก แก้ว กระจก และเหล็กมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่ใช้ทำเหรียญเพราะเมื่อใช้เหรียญขูดแล้วไม่เกิดรอย วัสดุที่เกิดเป็นผลึกชัดเจน สามารถตรวจหาความแข็งได้ง่ายและได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

ความแข็ง คือคุณสมบัติของโลหะที่มีความสำคัญต่อวัสดุ ซึ่งมีการเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติอื่นของโลหะด้วย เช่น ความแข็งแกร่ง (Strength), ความเปราะ (Brittleness) และความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ในการวัดความแข็งของโลหะนั้น เป็นการวัดความแข็งแกร่ง ความเปราะและยืดเป็นแผ่นของโลหะโดยทางอ้อม โดยทราบจากผลการทดลอง แล้วนำมาคำนวณหาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกันได้

## 2.9 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งของวัสดุไม่สามารถบ่งบอกด้วยน้ำหนัก ความยาวหรือเวลา แต่เป็นค่าที่ได้จากกระบวนการทดสอบความแข็ง โดยมีหลายวิธีดังนี้

2.9.1 การทดสอบโดยการเสียดสี พิจารณาความแข็งจากการสึกหรอของผิววัสดุ เช่น การใช้ตะไบผิวชิ้นทดสอบ บอกได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อน ไม่ใช่วิธีทดสอบที่เป็นมาตรฐาน

2.9.2 การทดสอบโดยการขีดข่วน ใช้หลักการของวัสดุที่แข็งกว่าสามารถขีดวัสดุที่อ่อนกว่าเป็นรอยได้ จึงมีสเกลความแข็งของโมห์ (Moh's Scale of Hardness) คิดค้นเพื่อเปรียบเทียบและแบ่งสเกลความแข็งจากวัสดุแม่แบบออกเป็น 10 ชนิดด้วยกันโดยการเรียงลำดับตัวเลขจาก 1-10 เป็นวัสดุจากอ่อนสุดไปถึงวัสดุที่แข็งสุด

## ตารางที่ 2.1 แสดงความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ ในสเกลความแข็งของมอร์

วัสดุ	สเกล
Diamond	10
Corundum	9
Topaz	8
Quartz	7
Feldspar	6
Apatite	5
Fluorite	4
Calcite	3
Gypsum	2
Talc	1

การทดสอบความแข็งโดยการเปรียบเทียบมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถให้ข้อมูลตัวเลขที่แม่นยำหรือกำหนดสเกลเฉพาะ สำหรับวัสดุและโลหะสมัยใหม่ วิธีปกติที่ใช้วัดหาค่าความแข็งทั่วไป คือการวัดความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่าง ภาชนะโหลดและเวลาที่เจาะจง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงกด

- Macro-Hardness: Load > 1 Kgf (1 Kgf = 9.81 N)
- Micro-Hardness: Load  $\leq$  1 Kgf
- Nano-Hardness: Load < 500 mN (Nano Resolution)

2.9.3 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test; HB) โดยทั่วไปใช้ทดสอบวัสดุที่มีโครงสร้างที่หยาบหรือมีผิวที่หยาบกร้านเกินไปที่จะทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบอื่น การทดสอบบริเนลล์ มักใช้โหลดสูงมาก โดยใช้โหลดมาตรฐานในช่วงระหว่าง 500 - 3000 กิโลกรัม ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวของวัตถุเพื่อให้ผลจากรอยกดเฉลี่ยเท่ากันทั่วพื้นผิว ลูกปืนทำจากเหล็กกล้าที่ทำให้แข็งหรือทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์ เงื่อนไขในการทดสอบควรให้ความหนาของชิ้นงานมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของรอยกดเพื่อลดอิทธิพลของ Strain Hardening ในเนื้อชิ้นงาน

## ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

1. นำโลหะตัวอย่างมาวางบนแท่นวางชิ้นงาน
2. นำหัวกดลูกบอลเหล็กแข็ง ค่อย ๆ นำเข้าไปกดกับชิ้นงาน การทำงานของการกด มีทั้งอัตราโนมัติและควบคุมด้วยมือ แรงที่ใช้ในการกดอัดไปที่ชิ้นงานมีค่าประมาณ 30000 N (3000 Kg) หัวกดลูกบอลซึ่งแข็งกว่าชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีรอยบุ่มลงไป
3. หลังจากที่ลูกบอลทำรอยบุ่มแล้ว ให้นำหัวกดออกและนำชิ้นงานออกมาวัด
4. นำกล้องจุลทรรศน์พร้อมเลนส์ที่มีขีดสเกลเปรียบเทียบ นำไปส่องเส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ่มของชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นมิลลิเมตร ค่าที่ได้จากการวัดถูกเปลี่ยนเป็นค่าของความแข็ง

ผลของความแข็งได้จากการวัดระยะรอยกดของลูกปืนเหล็กและเวลาที่ใช้กด โดยการวัดระยะของรอย วัดโดยใช้เครื่อง Brinell Hardness Testing Machine หรือวัดรอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ผลที่ได้จากการวัดระยะของรอยกดลูกปืน นำไปแปลค่าโดยใช้ Brinell Formula หรือตารางเปรียบเทียบ

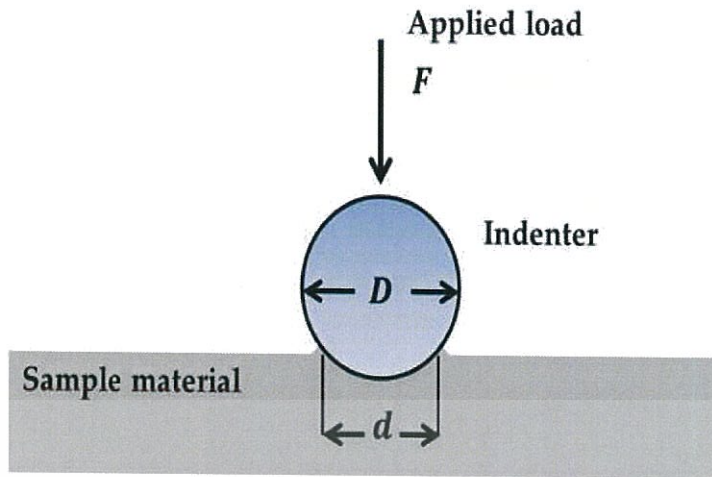
$$HB = \frac{2P}{\pi D \left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$$

โดย HB คือค่าความแข็งที่วัดได้ (HB)

P คือแรงที่ใช้กด (kgf)

D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลกด (mm)

d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดบนชิ้นงาน (mm)



ภาพที่ 2.14 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ที่มา : Ametek. *Brinell Hardness Testing* [Online].

Available from : <http://hardnesstesters.com/Applications/Brinell-Hardness-Testing.aspx>. 15 พฤศจิกายน 2559.

ข้อควรระวังจากการใช้ Brinell Hardness Test คือการเตรียมผิว ต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนและการเกิด Cold Working ที่ผิว ซึ่งทำให้ความแข็งที่ผิวลดลงหรือสูงขึ้นได้ และแทนวางชิ้นงานต้องแข็งแรง ไม่เกิดการเลื่อนของชิ้นทดสอบในขณะที่ทำการทดสอบ และระหว่างการทดสอบต้องไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้นการทดสอบ ไม่ควรทดสอบกับชิ้นงานที่บางมาก เช่น ใบมีดโกน และชิ้นส่วนที่ผ่านการอบชุบผิวแข็ง เพราะความหนาผิวแข็งอาจจะบางกว่าความลึกรอยบุม ทำให้ค่าความแข็งไม่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบบริเนลล์ ใช้แรงกด 3000 กิโลกรัม, ลูกบอลกดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุมในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)	เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุมในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)	เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุมในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)
2.25	745	3.05	401	3.80	255
2.30	710	3.10	388	3.85	248
2.35	682	3.15	375	3.90	241
2.40	653	3.20	363	3.95	239
2.45	627	3.25	352	4.00	229
2.55	578	3.30	341	4.05	223
2.60	555	3.35	331	4.10	217
2.65	534	3.40	321	4.15	212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุ่มในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)	เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุ่มในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)	เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยบุ่มในชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HBN)
2.70	514	3.45	311	4.25	203
2.75	495	3.50	302	4.35	192
2.80	477	3.55	293	4.40	187
2.85	461	3.60	285	4.50	179
2.90	444	3.65	277	4.60	170
2.95	432	3.70	269	4.65	166
3.00	415	3.73	262	4.80	156

#### 2.9.4 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test; HR)

วิธีวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เป็นวิธีวัดความแข็งที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม โดยใช้แรงกดด้วยแรงคงที่ สามารถอ่านค่าได้โดยไม่ต้องวัดขนาดของรอยกด หัวทดสอบแบบร็อคเวลล์ มีอยู่ 2 ชนิดคือ หัวกดเพชรทรงกรวย (Diamond cone) และหัวกดเหล็กกล้าทั้งสเทนคาร์ไบด์ ขนาดต่างๆ ทำให้มีสเกลการวัดแบ่งออกหลายสเกล เพื่อสามารถเลือกใช้วัดความแข็งให้เหมาะสมที่สุด

ในการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ ใช้แรงกดสองแรง คือ Minor Load เป็นแรงที่ยืดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็งหรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่ต้องการวัดความแข็ง และ Major Load เป็นแรงที่มากกว่า Minor Load และกดลงหลังจากการกด Minor Load กับชิ้นงาน แรง Minor Load มีค่าประมาณ 10 กิโลกรัม เพื่อเป็นการนำร่องรอยกด ป้องกันการพลาดที่อาจเกิดขึ้น เมื่อเจอผิวที่มีความขรุขระและไม่ราบเรียบ หลังจากนั้นจึงใส่ Major Load ตามต้องการ (ขนาดแรง 60, 100, 150 กิโลกรัม) ด้วยการใช้มือหมุนหรืออย่างอัตโนมัติ ค่าความแข็งสามารถอ่านได้โดยตรงจากการอ่านที่หน้าจอตตัวเลขดิจิทัลหรือจากเข็มนาฬิกาวัดของเครื่องทดสอบ โดยไม่ต้องมีกล้องจุลทรรศน์อยู่ตรงกลาง สเกลที่อ่านแบบร็อคเวลล์ ขึ้นอยู่กับความลึกของการกด ในกรณีเครื่องทดสอบแบบอัตโนมัติ ค่าที่กดได้จากการคำนวณ โดยดูที่หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงผล

#### ข้อดีการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

- สามารถทดสอบได้รวดเร็ว ไม่ต้องเสียเวลาวัดขนาดรอยบุ่ม
- สามารถทดสอบชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าแบบบริเนลล์
- สามารถทดสอบวัสดุอ่อนและแข็งได้ มีหลายสเกลให้เลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรระวัง

- ผิวสัมผัสต้องตั้งฉากและสะอาดปราศจากน้ำมันหรือออกไซด์
- ระยะห่างของจุดทดสอบแต่ละจุด ควรห่างกันเกิน 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด

ตารางที่ 2.3 แสดงการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลต่าง ๆ

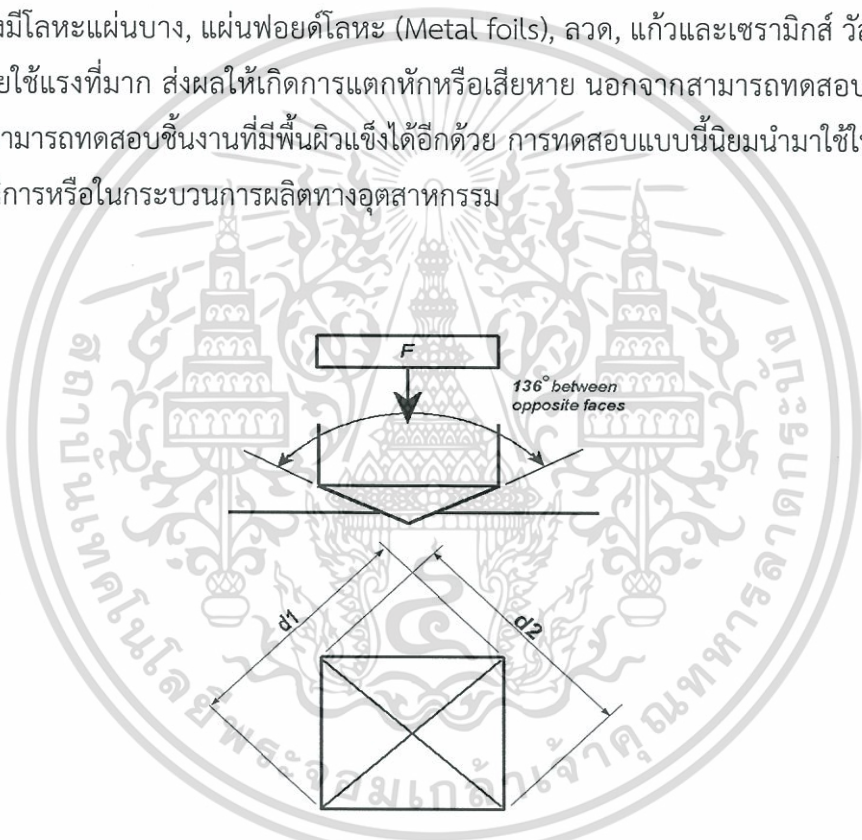
สเกล	ประเภทหัวกด	Major Load (kgf)	การใช้งาน
A	หัวกดเพชร	60	เหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก, ซีเมนต์คาร์ไบด์
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว	100	โลหะผสมของอลูมิเนียม, โลหะผสมของทองแดง
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อ
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว	100	โลหะผสมของอลูมิเนียม, โลหะผสมของแมกนีเซียม
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว	60	โลหะแผ่นบาง, โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบ
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว	150	เหล็กหล่ออบเหนียว ความแข็งไม่เกิน 90 HRG
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว	60	อลูมิเนียม, ตะกั่ว, สังกะสี
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว	60	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว	100	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว	60	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว	100	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม
V	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง, วัสดุอื่นที่บางและนิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.5 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test; HV)

เป็นการทดสอบแบบ Microhardness Test ลักษณะเด่นของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สคือ รอยจากการกดมีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานน้อยมาก จึงสามารถนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแล้วกลับมาใช้งานได้ใหม่ และรอยที่เกิดจากการกดบนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กนี้ ทำให้สามารถนำมาทดสอบกับชิ้นงานที่มีขนาดเปราะและบาง หรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กได้อีกด้วย หัวกดที่ใช้เป็นหัวกดเพชร ลักษณะพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม (Square-Based Diamond Pyramid) ที่ทำมุม 136 องศา

วัสดุที่นิยมนำมาทดสอบกับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส นอกจากโลหะทั่วไปแล้ว ยังมีโลหะแผ่นบาง, แผ่นฟอยด์โลหะ (Metal foils), ลวด, แก้วและเซรามิกส์ วัสดุเหล่านี้เมื่อถูกกดโดยใช้แรงที่มาก ส่งผลให้เกิดการแตกหักหรือเสียหาย นอกจากสามารถทดสอบชิ้นงานที่บางแล้ว ยังสามารถทดสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวแข็งได้อีกด้วย การทดสอบแบบนี้นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยในห้องปฏิบัติการหรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.15 ลักษณะรอยกดของการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ที่มา : Samuel R. 2001. *Low Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials* [Online]. Available from : <http://www.gordonengland.co.uk/hardness>.

22 พฤศจิกายน 2559.

## ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

1. นำชิ้นงานทดสอบมาวางบนแท่นวางชิ้นงานใต้เครื่องกด
2. เคลื่อนหัวกดเพชรลงมาอย่างช้า ๆ จนไปสัมผัสกับชิ้นทดสอบ โดยให้ค้างไว้ระยะเวลาประมาณ 10-15 วินาที
3. นำหัวกดออก ชิ้นงานเกิดรอยบุ๋ม เป็นรูปทรงพีระมิด (Pyramidal) ขนาดเล็ก
4. ทำการวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด นำมาคำนวณความยาวเส้นทแยงมุม โดยสามารถวัดความยาวของเส้นทแยงมุมจากรอยกดได้หลายวิธี เช่น ใช้กล้องจุลทรรศน์ที่คล้ายกับการวัดแบบบริเนลล์ ใช้เครื่องมือวัดเปรียบเทียบที่ เรียกว่า ไมโครมิเตอร์บาร์เรล (Micrometer Barrel) ใช้การอ่านจากข้อมูลดิจิตอล (Digital Readout) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงรูปของรอยกดในหน้าจอคอมพิวเตอร์ และสามารถเทียบกับตารางเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ เปลี่ยนไปเป็นหน่วย DPH (Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV ซึ่งสามารถใช้สมการข้างล่างนี้คำนวณได้

$$DPH = \frac{1.85F}{d^2}$$

โดย DPH คือค่าความแข็งที่วัดได้ (HV)

F คือแรงที่ใช้กด (Kgf)

d คือระยะเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด (mm)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีข้อดีคือ สามารถใช้กับวัสดุที่มีความนิ่มจนถึงแข็งมากได้เนื่องจากหัวกดเป็นเพชร ซึ่งมีความแข็งสูง แรงที่ใช้กดมีขนาดน้อย และหัวกดมีขนาดเล็ก จึงใช้พื้นที่และความหนาน้อย แต่มีข้อความระวังสำหรับการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์สคือ ถ้าเลือกน้ำหนักที่ใช้กดน้อยเกินไป ค่าความแข็งที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนตาม แต่ถ้าชิ้นงานนิ่มและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชร ขณะคลายหัวกดได้ ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มีออกไซด์หรือสิ่งแปลกปลอมปะปน การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนหรือ Cold Working

## 2.9.6 การเปรียบเทียบและการแปลงค่าความแข็ง

การทดสอบความแข็งมีด้วยกันหลายวิธี ขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบ ความแข็งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งไม่ได้นิยามแน่ชัดเหมือนคุณสมบัติทางกลอื่น ๆ ของวัสดุ ทำให้ยังไม่มีวิธีที่แปลงค่าความแข็งที่ใช้ในทุกสภาวะเงื่อนไขได้ โดยข้อมูลเกี่ยวกับการแปลงความแข็งที่เป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดเป็นข้อมูลที่ใช้กับเหล็กกล้า

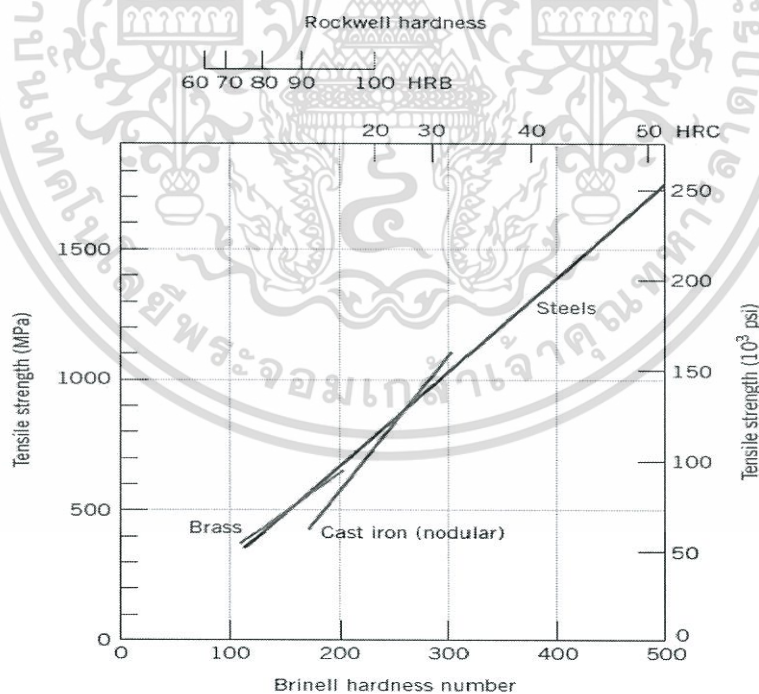
## 2.9.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความต้านแรงดึง [3]

ทั้งความแข็งและค่าต้านแรงดึง ต่างเป็นตัวชี้วัดถึงความต้านทานของวัสดุต่อการแปรรูปถาวร ดังนั้นคุณสมบัติทางกลทั้งสอง แปรผันตรงกันอย่างหยาบ ๆ แต่โลหะทุกชนิดไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์นี้เสมอไป สำหรับเหล็กกล้าส่วนใหญ่สมการทั่วไปที่ใช้คือ

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB$$

โดย TS คือค่าต้านแรงดึง (MPa)

HB คือค่าความแข็งแบบบริเนลล์ของชิ้นงาน (HB)



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านแรงดึงในเหล็กกล้า เหล็กหล่อและทองเหลือง

ที่มา : William D. Callister, Jr. & David G. Rethwisch, 2010 : 179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับผลที่เกิดจากการตัดทางความร้อนชนิดต่าง ๆ ของโลหะเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากการตัดทางความร้อนมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลโดยตรงและส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในกรณีที่ใช้โลหะที่ตัดในงานโครงสร้าง งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลมากกว่าศึกษาคุณสมบัติบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ซึ่งการศึกษาในบริเวณดังกล่าวมีความสำคัญที่จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของระยะขอบที่รอยตัดกับคุณสมบัติทางกล งานวิจัยการอธิบายลักษณะของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเกิดจากการตัดทางความร้อนและการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยวิธี Small Punch ของ D. Andres และคณะ [4] โดยปกติการตัดโลหะทางความร้อนทั้งวิธีการตัดด้วยแก๊ส การตัดด้วยเลเซอร์และการตัดด้วยพลาสมา จะมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเกิดขึ้น คุณสมบัติทางกลในบริเวณนี้จะเปลี่ยนไปตาม พวกเขาพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะทดสอบและค่าความแข็งแตกต่างกันตามวิธีการตัดโลหะทางความร้อน โดยโครงสร้างปกติที่พบในโลหะทดสอบปกติเป็น Pearlite และ Ferrite ในขณะที่โครงสร้างจากการตัดทางความร้อนอื่น ๆ จะมีการตกผลึกใหม่และเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างจุลภาค ส่วนค่าความแข็งมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับระยะจากขอบที่ทำการตัดทางความร้อนทั้ง 3 ชนิด กล่าวคือที่บริเวณใกล้ขอบตัดค่าความแข็งมีค่าที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ

การศึกษารองคัพประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปจากการตัดโลหะทางความร้อน เป็นเรื่องที่น่าสนใจอีกประการเพราะองคัพประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปของโลหะ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะโดยตรง A.K. Tingaev, R.G. Gubaydulina และ I.A. Ilin [5] ได้ทดลองผลของการตัดทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและองคัพประกอบทางเคมีของโลหะ S345 และ S390 โดยตัดโลหะทั้ง 2 ชนิดที่ความหนา 25 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการตัดด้วยแก๊สและการตัดด้วยพลาสมา แล้วจึงตรวจสอบองคัพประกอบทางเคมี โครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ตามระยะที่ห่างจากขอบรอยตัด ทั้งนี้ความกว้างและความลึกของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน จะแตกต่างกันตามวิธีที่ทำการตัดโลหะ ผลการทดลองพบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของโลหะ S345 และ S390 มีโครงสร้างจุลภาคและองคัพประกอบทางเคมีเปลี่ยนไปจากปกติ ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ผสมในโลหะลดลง ในขณะที่ธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 2-2.5 เท่า ส่วนค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกับระยะห่างจากขอบรอยตัด

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

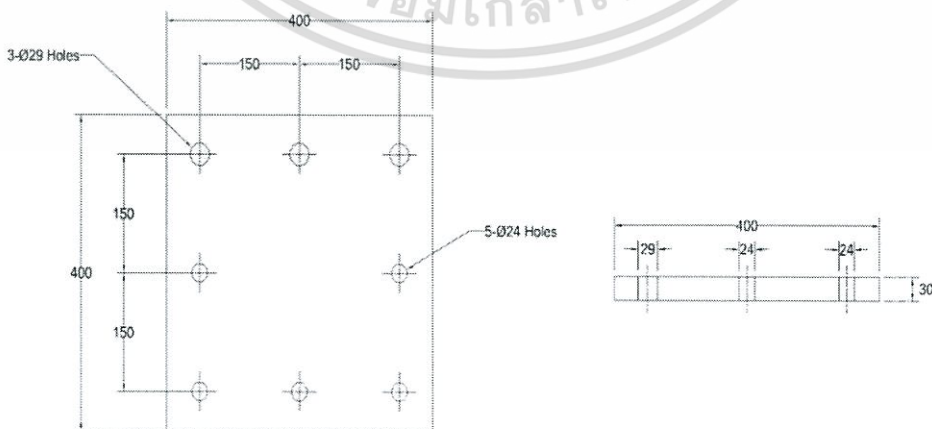
ในการศึกษาและดำเนินการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านรูด้วยแก๊สของแผ่นฐานโครงสร้างเหล็ก” โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตลอดจนแนวคิดและจุดประสงค์ของการวิจัย
2. จัดเตรียมเครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบ
3. กำหนดการออกแบบการทดสอบ
4. เตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานที่กำหนดและทดสอบชิ้นงานตามแผนการทดสอบ
5. บันทึกข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลของการวิจัยจากการทดสอบผลกระทบของการตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านรูด้วยแก๊ส

#### 3.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

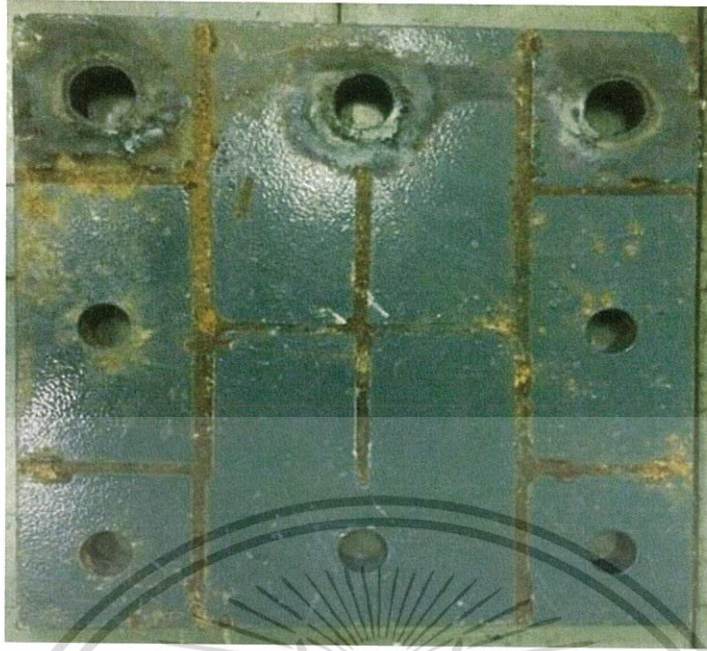
##### 3.1.1 แผ่นฐานเหล็กกล้าเกรด SS400

โลหะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือเหล็กแผ่นฐาน เกรด SS400 หนา 30 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 400 มิลลิเมตร ความยาว 400 มิลลิเมตร มีรูสวมโบลท์ 8 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูสวม 24 มิลลิเมตร โดยในจำนวน 8 รู มี 3 รูที่ถูกคว้านด้วยแก๊ส เพื่อขยายให้มีขนาด 29 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1 และ 3.2



ภาพที่ 3.1 แบบแสดงขนาดและมิติของแผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

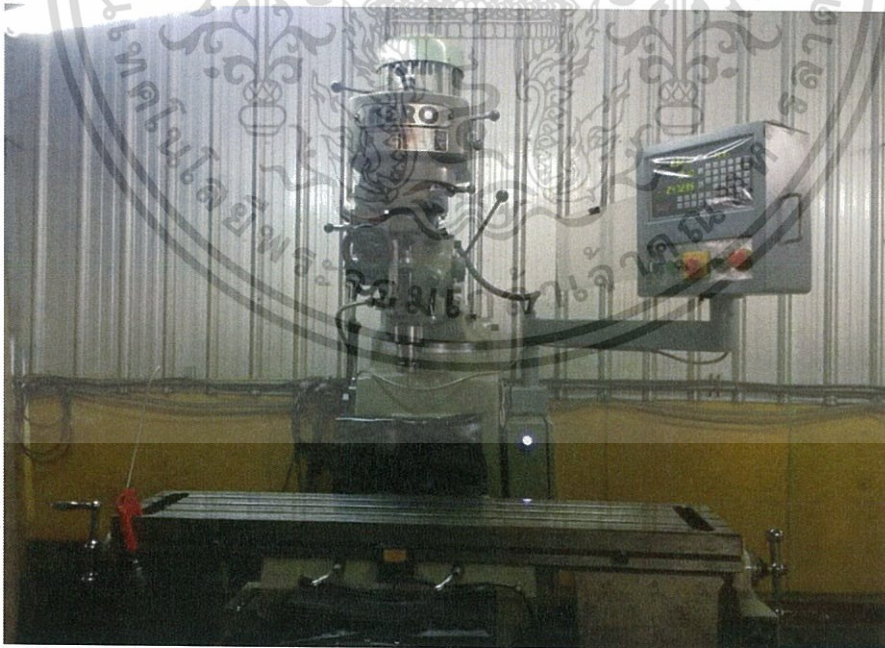
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 แผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

### 3.1.2 เครื่องกัด (Milling) AERO รุ่น M4

ในการกัดใช้ดอกกัดหยาบหัวคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.3 เครื่องกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 เครื่องเลื่อย (Bandsaw)



ภาพที่ 3.4 เครื่องเลื่อย

### 3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ZEISS รุ่น Axio โมเดล TM10196

ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์และส่วนบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 เครื่องทดสอบความแข็ง

เครื่องทดสอบความแข็ง เพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส BUEHLER รุ่น Wilson Tukon 1102 สามารถอ่านผลการทดสอบจากเครื่องโดยตรงเป็นตัวเลข ดิจิตอล วัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชร ลักษณะพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง

### 3.2 ข้อมูลเงื่อนไขในการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊ส

จุดประสงค์ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการตัดโลหะด้วยแก๊ส ในลักษณะการคว้านของรูสวมโบลท์ของแผ่นเหล็กฐานโครงสร้างต่อคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบความแข็ง และทางโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลเงื่อนไขในขณะทำการคว้านรูของแผ่นฐานโลหะ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลและเงื่อนไขในการคว้านรูด้วยแก๊ส

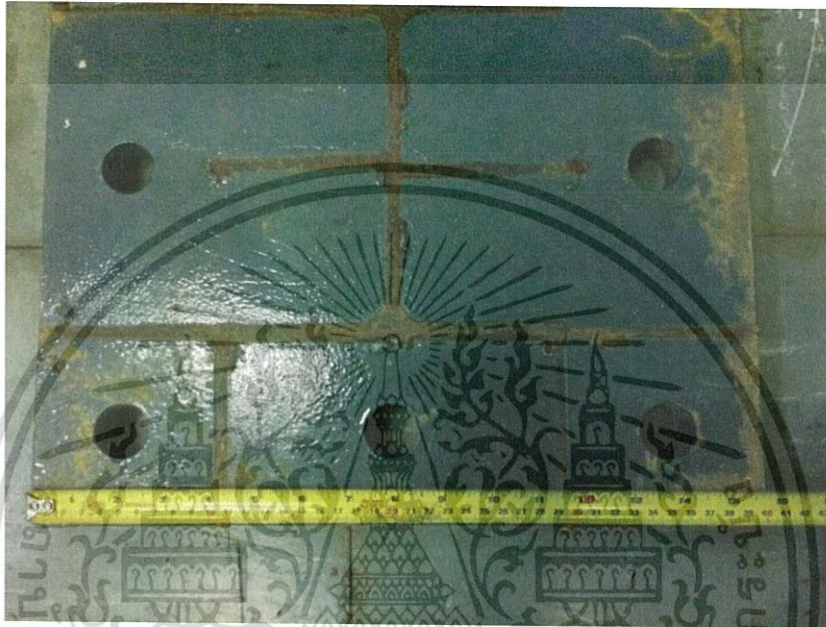
ข้อมูลเงื่อนไขในการคว้านรู	ค่า
ชนิดของแก๊สที่ใช้	แก๊สออกซิเจนและแก๊ส LPG
แรงดันแก๊สออกซิเจน	3.5 bar
แรงดันแก๊ส LPG	2.3 bar
ระยะเวลาที่ใช้ในการคว้านรู	49 วินาที
ค่าความร้อนโดยประมาณ	26.62 MJ/Liter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเป็นชิ้นงานแผ่นฐานรองโครงสร้างบันไดของสถานีที่เสียหายจากการคว้านเนื้อโลหะบริเวณรูด้วยแก๊ส เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ขนาด 400x400x30 มิลลิเมตร ดังแสดงภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงขนาดของแผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

3.3.1.1 การตัดชิ้นงานด้วยการกัด (Milling) เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องลดขนาดลง ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การกัดแผ่นฐานเพื่อลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อย (Bandsaw) แบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วน ๆ เพื่อสะดวกแก่การนำไปทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การเลื่อยแผ่นฐาน

### 3.3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา

3.3.2.1 การตัดชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยทำการตัดด้วยเครื่องเลื่อย (Bandsaw) พร้อมน้ำหล่อเย็น เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด และความเค้นตกค้างอันเนื่องมาจากความร้อนในระหว่างการตัด สำหรับชิ้นงานตรวจสอบถูกตัดออกเป็นจำนวน 2 ชิ้น แบ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ กำหนดให้ทั้ง 2 ชิ้น มีขนาด 30x30 มิลลิเมตร เพื่อได้ขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปหล่อทำตัวเรือน ดังแสดงในภาพที่ 3.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยหรือการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 ทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำตัวเรซิน การทำตัวเรซิน (Mounting) นำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทำการหล่อตัวเรซินขึ้นมา เนื่องจากชิ้นงานตรวจสอบมีขนาดเล็กถือได้ไม่สะดวกในระหว่างกระบวนการขัดหยาบ ขัดละเอียดและขัดเงา



ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์และน้ำยาในการหล่อเรซิน

3.3.2.3 เตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดด้วยกระดาษทรายผ่านน้ำสะอาด เพื่อปรับระนาบผิวขัด ลดความลึกของรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงาน การขัดไล่เรียงลำดับตั้งแต่ระดับความหยาบไปจนถึงละเอียด โดยเริ่มจากเบอร์ 80, 120, 320, 600 และ 1200 ในขณะที่ทำการขัดอยู่ เปิดน้ำตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำช่วยหล่อเย็นแก่ผิวชิ้นงานและชำระสิ่งสกปรกออกไป เช่น เศษผงโลหะ ฯลฯ ระหว่างการขัดผิว ควรใช้แรงพอประมาณ เพื่อไม่ให้เกิดความบกพร่องในชิ้นงานต่าง ๆ เช่น รอยบนผิวหน้าลึกเกินไป ระนาบผิวขัดเอียง

3.3.2.4 การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานตรวจสอบด้วยผงขัดเพชร ขนาด 1 และ 3 ไมครอน ด้วยจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด ใช้ผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเรียบเป็นมันเงา



ภาพที่ 3.12 เครื่องขัดผงเพชร

3.3.2.5 การกัดด้วยกรด (Etching) ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันเงา ต้องทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง จึงนำไปกัดกรดด้วยน้ำยา Nital 4% (Nitric Acid 4 cc และ Ethyl Alcohol 96 cc) ระยะเวลาในการกัดประมาณ 3 วินาที หลังจากการกัดกรดนำไปล้างน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง จึงได้ตัวอย่างชิ้นงานที่พร้อมทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.13 พร้อมนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่พร้อมทำการทดสอบของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบทางโครงสร้างจุลภาค ทำโดยวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏของโลหะ โดยแบ่งตรวจสอบทั้งชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ

ชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส แบ่งตรวจสอบ 2 แนว คือ แนวบริเวณขอบบนและแนวบริเวณตำแหน่งกึ่งกลาง ชิ้นงาน ตรวจสอบตั้งแต่บริเวณใกล้ขอบของรูที่ถูกคว้าน บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) จนถึงบริเวณเนื้อโลหะ (Base Metal) ส่วนชิ้นงานปกติตรวจสอบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส เพียงแต่ไม่มีบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

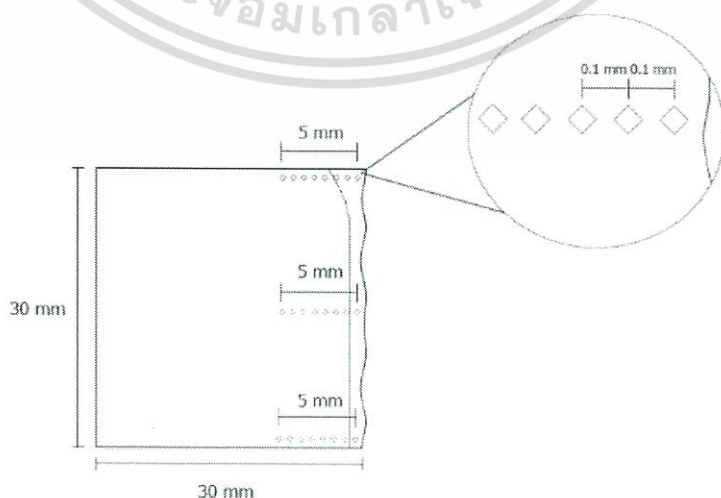
### 3.3.4 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง

3.3.4.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ใช้ชิ้นงานเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

### 3.3.5 การทดสอบความแข็ง

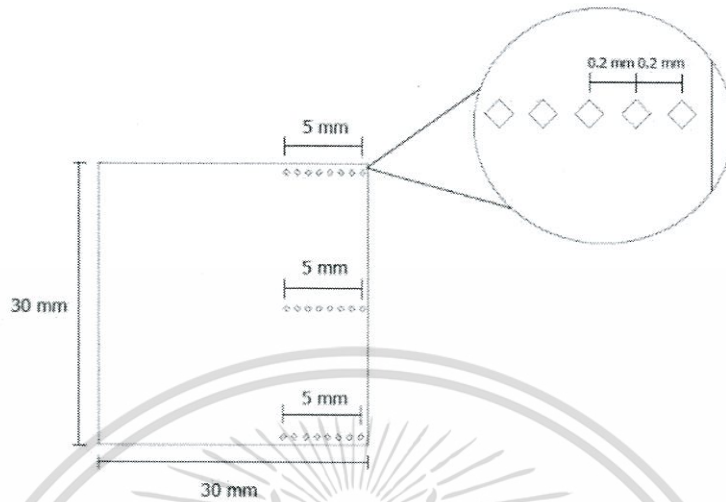
การทดสอบวัดความแข็งโดยวิธีไมโครวิกเกอร์ส ทำการทดสอบทั้งชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ กำหนดตำแหน่งวัดความแข็งบริเวณขอบบน กึ่งกลางและขอบล่าง เพื่อเปรียบเทียบความแข็งทั้ง 3 บริเวณจากตำแหน่งได้รับความร้อนที่แตกต่างกัน วิธีการวัดความแข็งใช้หัวกดเพชร ลักษณะพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา น้ำหนักที่ใช้กด 100 gf ระยะเวลาที่กดค้างไว้ (Dwell Time) 10 วินาที

ชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ตำแหน่งแรกวัดจากระยะขอบรอยคว้าน 0.1 มิลลิเมตร และตำแหน่งต่อไปห่างกัน 0.1 มิลลิเมตร เป็นระยะรวม 5 มิลลิเมตรของทุกบริเวณ ดังแสดงในภาพที่ 3.14



เอกสารภาพที่ 3.14 แผนภาพแสดงการดำเนินการวัดความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สด้านการคว้านรูว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานปกติ ตำแหน่งแรกวัดจากระยะขอบ 0.1 มิลลิเมตร และตำแหน่งต่อไปห่างกัน 0.2 มิลลิเมตร เป็นระยะรวม 5 มิลลิเมตรของทุกบริเวณ ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 แผนภาพแสดงการดำเนินการวัดความแข็งของชิ้นงานปกติ

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านรูด้วยแก๊สของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยผลของการทดลองงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

### 4.1 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Investigation)

สภาพพื้นผิวภายในรูที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊ส มีลักษณะขรุขระและมีสแลกเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากเนื้อโลหะเกิดการออกซิเดชันไม่หมดหรือเกิดจากการใช้ความดันแก๊สออกซิเจนมากเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ก) ส่วนในภาพที่ 4.1 ข) เป็นสภาพผิวภายในของรูปกติ



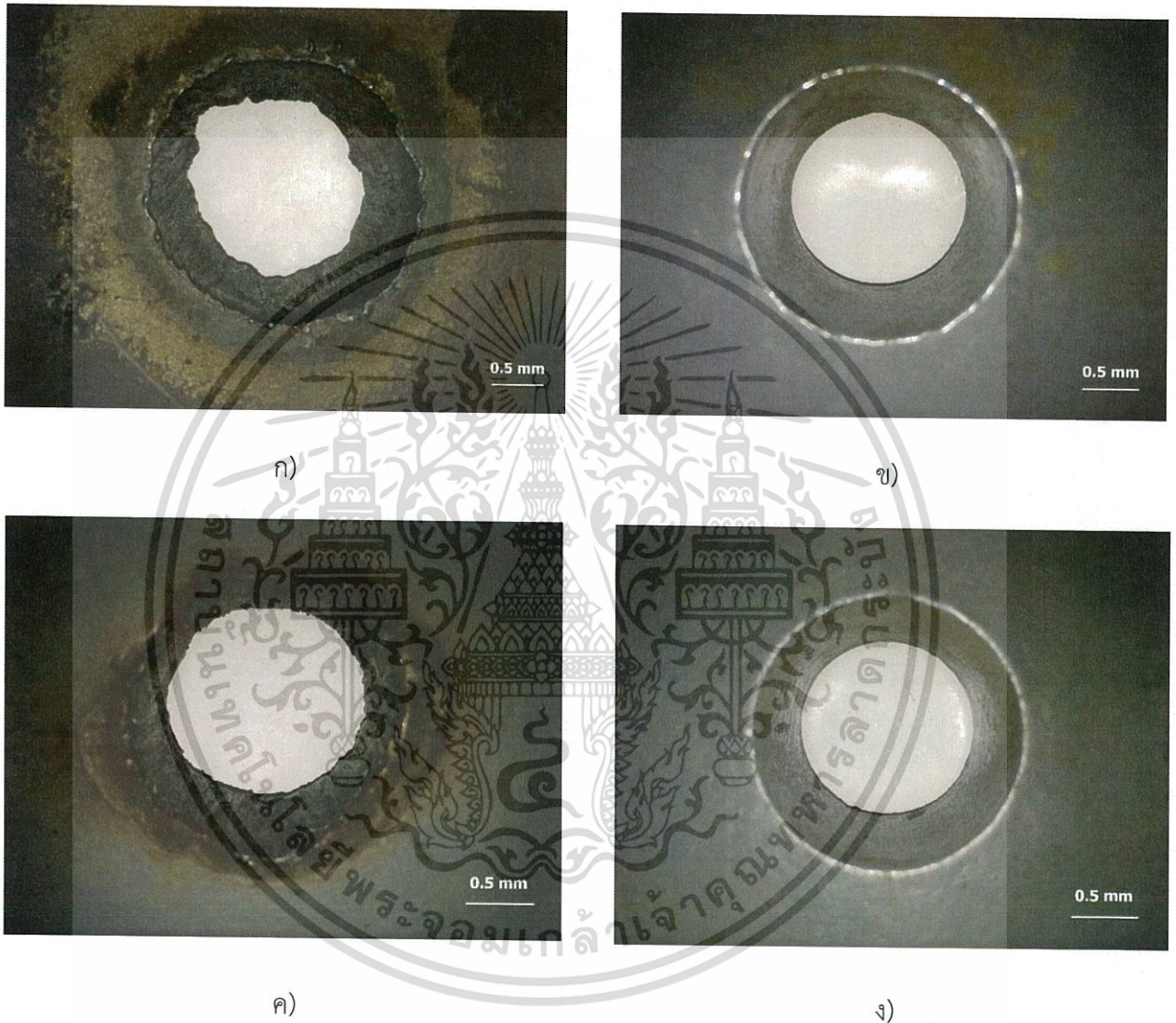
ก)

ข)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะสภาพผิวภายในของรู ก) ชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ข) ชิ้นงานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

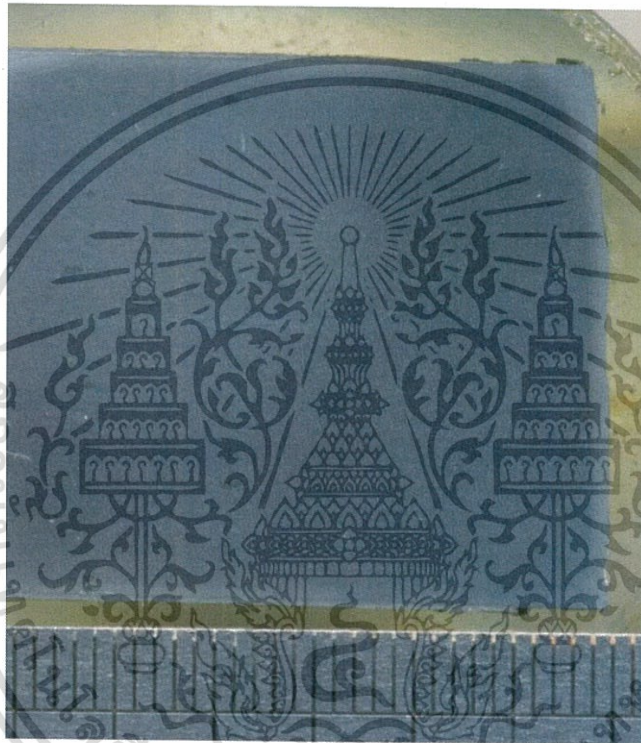
สภาพผิวด้านบนและผิวด้านล่างของรูที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊ส เกิดรอยไหม้ ไม่สม่ำเสมอ และมีสแตกบริเวณโดยรอบรู ลักษณะของรอยคว้านมีรูปร่างค่อนข้างเป็นรูปวงกลม ดังแสดงใน ภาพที่ 4.2 ก) และ ค)



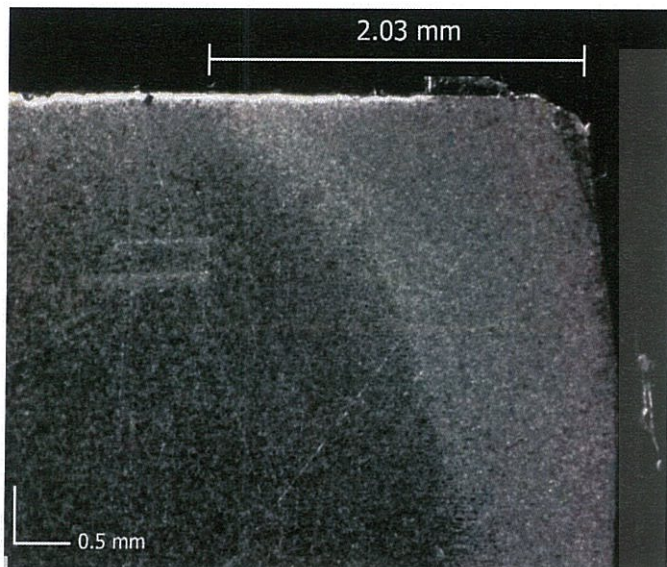
ภาพที่ 4.2 ลักษณะสภาพผิวของรูที่ตำแหน่ง ก) ผิวด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส  
ข) ผิวด้านบนของชิ้นงานปกติ ค) ผิวด้านล่างของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส  
ง) ผิวด้านล่างของชิ้นงานปกติ

#### 4.2 แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone)

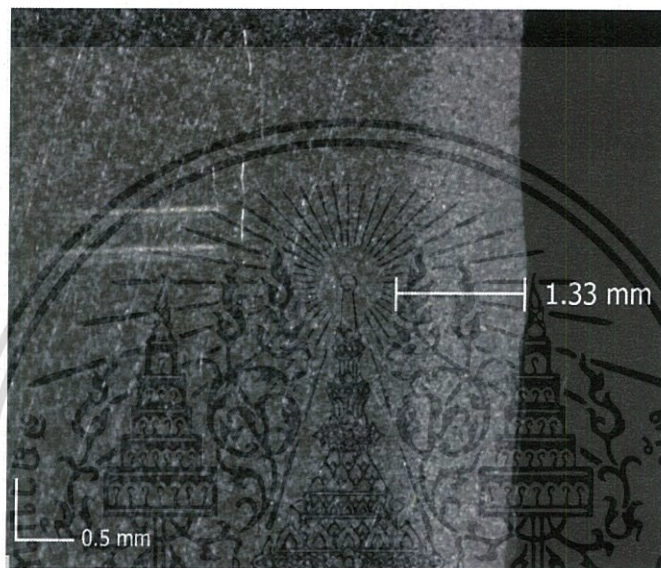
แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเกิดติดกับรูคว้านและเกิดลึกลงตามความหนาของแผ่นฐานโลหะ บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่ผิวด้านบน มีลักษณะกว้างกว่าที่ตำแหน่งอื่น (ความกว้าง 2.03 มิลลิเมตร) เนื่องจากตำแหน่งนี้ได้รับความร้อนจากเปลวไฟจากการตัดโดยตรง ดังแสดงในภาพ 4.4 ก) จากนั้นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนแคบลงมาคงที่ที่ระยะหนึ่ง (ความกว้างประมาณ 1.33 มิลลิเมตร) ตลอดชิ้นงาน



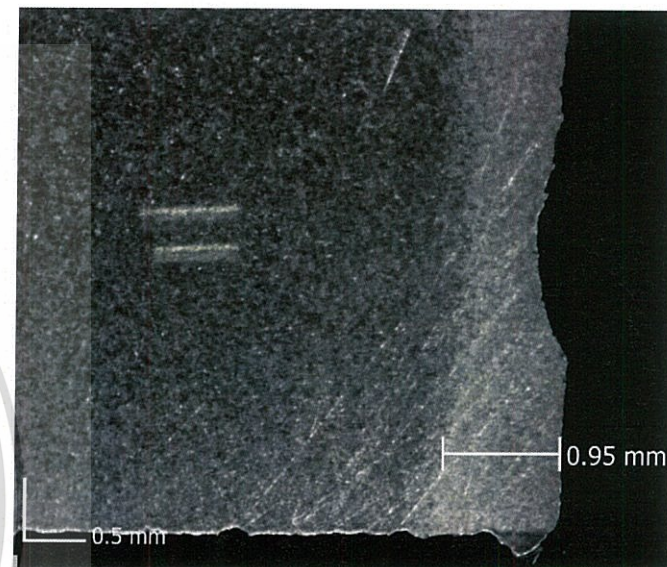
ภาพที่ 4.3 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 4.4 บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊สด้วยการตรวจสอบมหภาคที่กำลังขยาย 35 เท่า  
ที่ตำแหน่ง ก) ขอบบน ข) กึ่งกลาง ค) ขอบล่าง

### 4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation)

#### 4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงาน มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B, C และ D ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 4 บริเวณที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ที่กำลังขยาย 50 เท่า

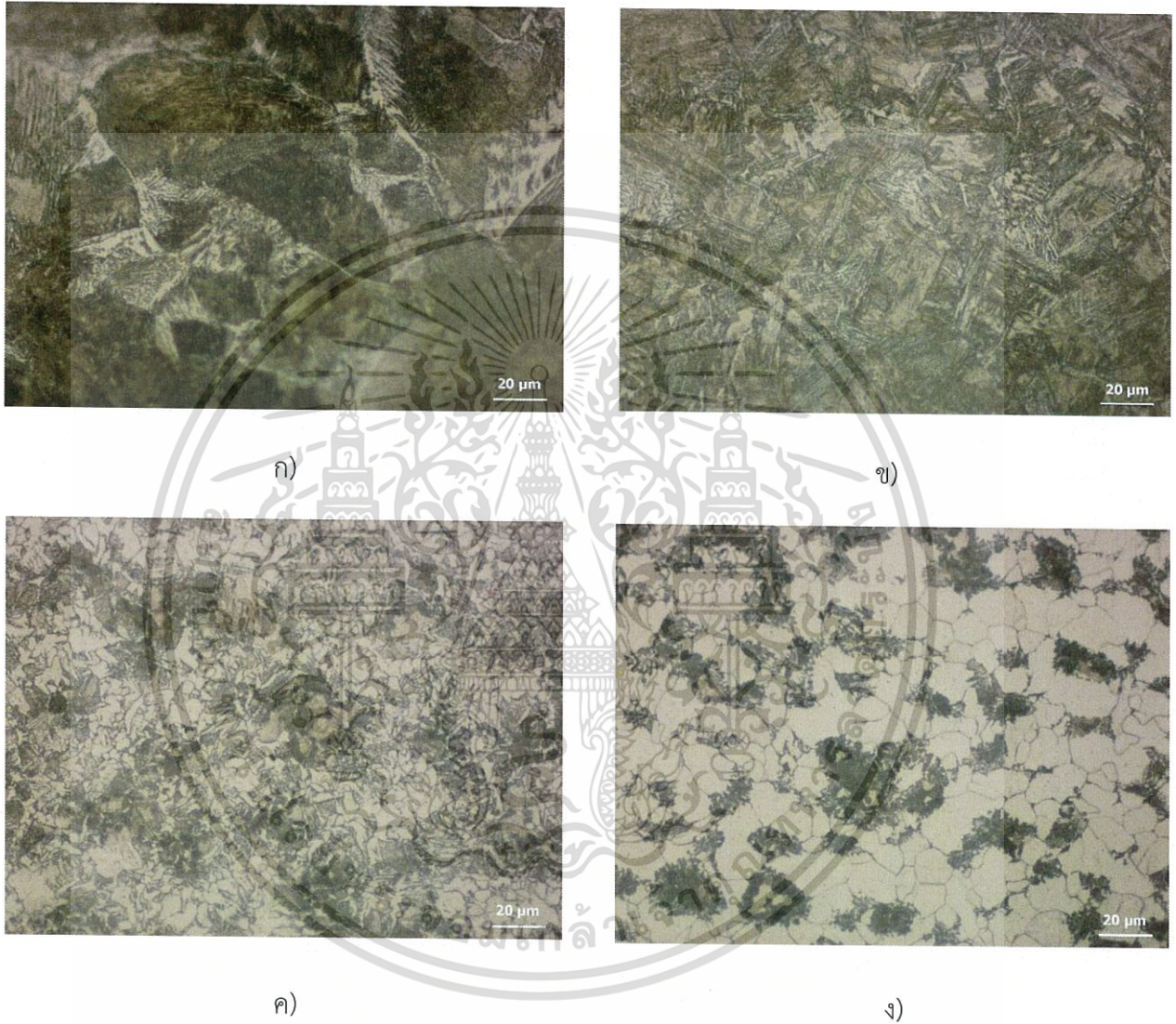
ตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งบนสุดของขอบรอยคว้าน ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนจากเปลวไฟโดยตรง เกรนมีขนาดใหญ่และมีแขนงของเดรนไตรต์เกิดขึ้น เนื่องจากที่บริเวณนี้เกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ก)

ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ข)

ตำแหน่ง C เป็นตำแหน่งช่วงรอยต่อระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและเนื้อโลหะปกติ (Base Metal) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเพิร์ลไลต์แบบละเอียด (Fine Pearlite) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

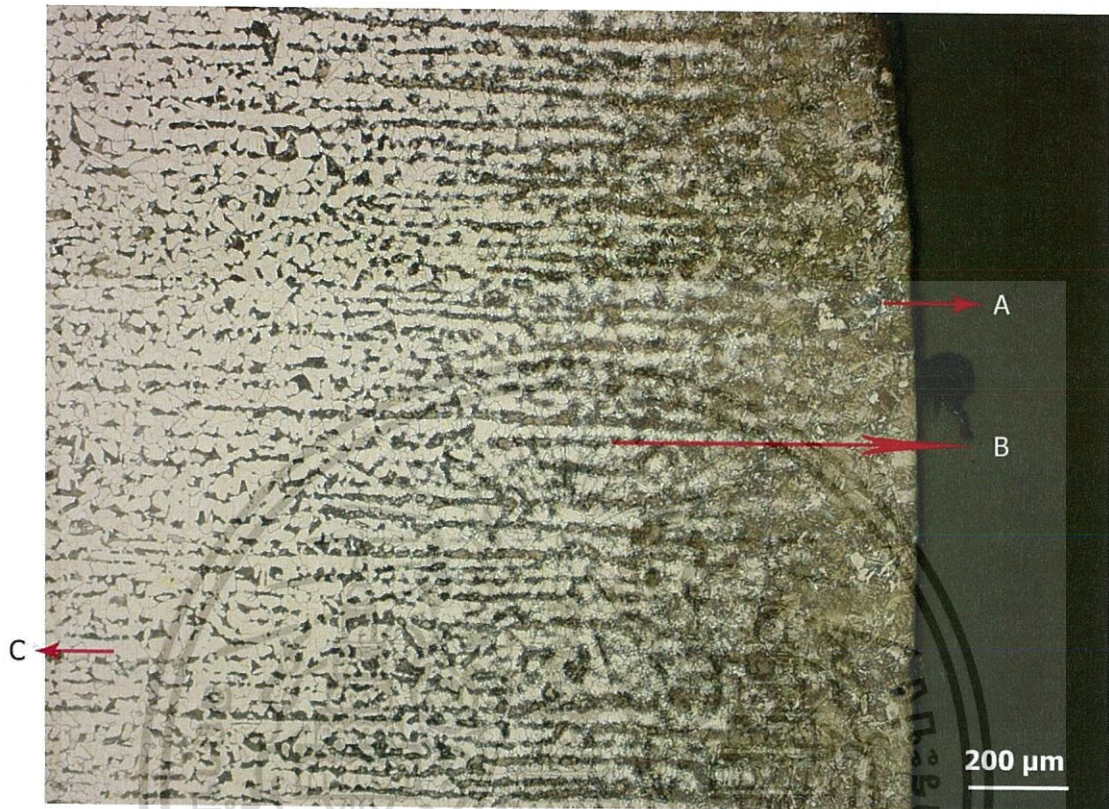
ตำแหน่ง D เป็นตำแหน่งบริเวณเนื้อโลหะปกติ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งมีผลกระทบจากความร้อน ทำให้อะตอมคาร์บอนภายในเริ่มขยายตัว ดังแสดงในภาพ 4.6 ง)



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส  
ก) ตำแหน่ง A ข) ตำแหน่ง B ค) ตำแหน่ง C ง) ตำแหน่ง D ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 4.7

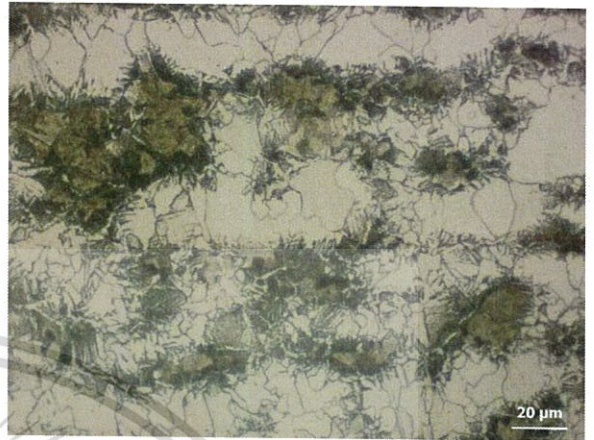
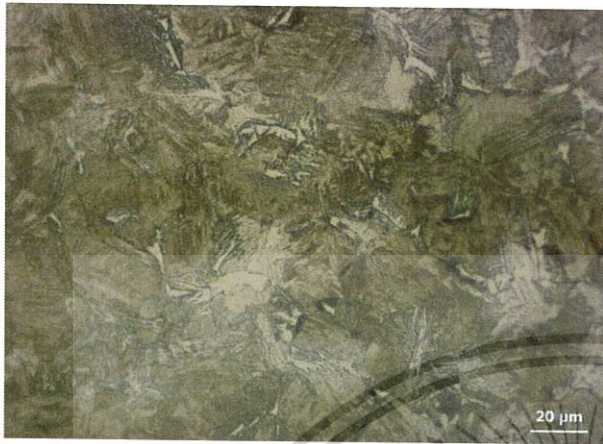


ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน 3 บริเวณที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน ที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ที่กำลังขยาย 50 เท่า

ตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่ใกล้เคียงขอบรอยคว้าน ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นมาร์เทนไซต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ก)

ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งช่วงรอยต่อระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและเนื้อโลหะปกติ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเพิร์ลไลต์แบบละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ข)

ตำแหน่ง C เป็นตำแหน่งบริเวณเนื้อโลหะปกติ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ค)



ก)

ข)



ค)

ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ก) ตำแหน่ง A ข) ตำแหน่ง B ค) ตำแหน่ง C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานปกติ

เนื่องจากชิ้นงานปกติไม่มีผลกระทบจากความร้อน จึงทำการตรวจสอบเพียงตำแหน่งเดียวของชิ้นงาน คือบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานปกติที่กำลังขยาย 200 เท่า

เป็นบริเวณเนื้อโลหะปกติ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ ลักษณะเดียวกับที่บริเวณเนื้อโลหะปกติของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ที่ กำลังขยาย 200 เท่า นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

##### 4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

ชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส ค่าความแข็งสูงสุดของทั้ง 3 แนวอยู่ที่บริเวณใกล้ขอบรอยคว้าน และค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่เนื้อโลหะปกติ ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน มีค่าความแข็งที่สูงกว่าเนื้อโลหะปกติเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

ระยะจากขอบรอยคว้าน (mm)	ค่าความแข็ง (HV0.1)		
	ขอบบน	กึ่งกลาง	ขอบล่าง
0.1	341.9	310.3	316
0.2	297.9	263.4	287
0.3	263.4	227.7	261
0.4	285	248.4	234.8
0.5	267.3	234.9	199.2
0.6	290.7	194.9	169.6
0.7	291.1	171	170.4
0.8	262.5	176.9	169.8
0.9	256.7	188.5	169.1
1	253.3	172.5	168.7
1.1	246.6	180.8	154.5
1.2	235	175.7	154.9
1.3	222.7	161.6	155.7
1.4	210.6	163.4	149.5
1.5	228.9	156.2	153.3
1.6	222.7	159	145.7
1.7	210.2	158.3	150.3
1.8	191.6	140.7	153.5
1.9	198.6	160.2	153.3
2	209.7	142.3	148.3
2.1	185.3	145.5	141.2
2.2	199.7	154.7	145.9
2.3	180.8	154.8	150.8
2.4	171	146	155.5
2.5	161.1	154.4	156
2.6	164	141.4	150.5
2.7	158.5	145.8	155

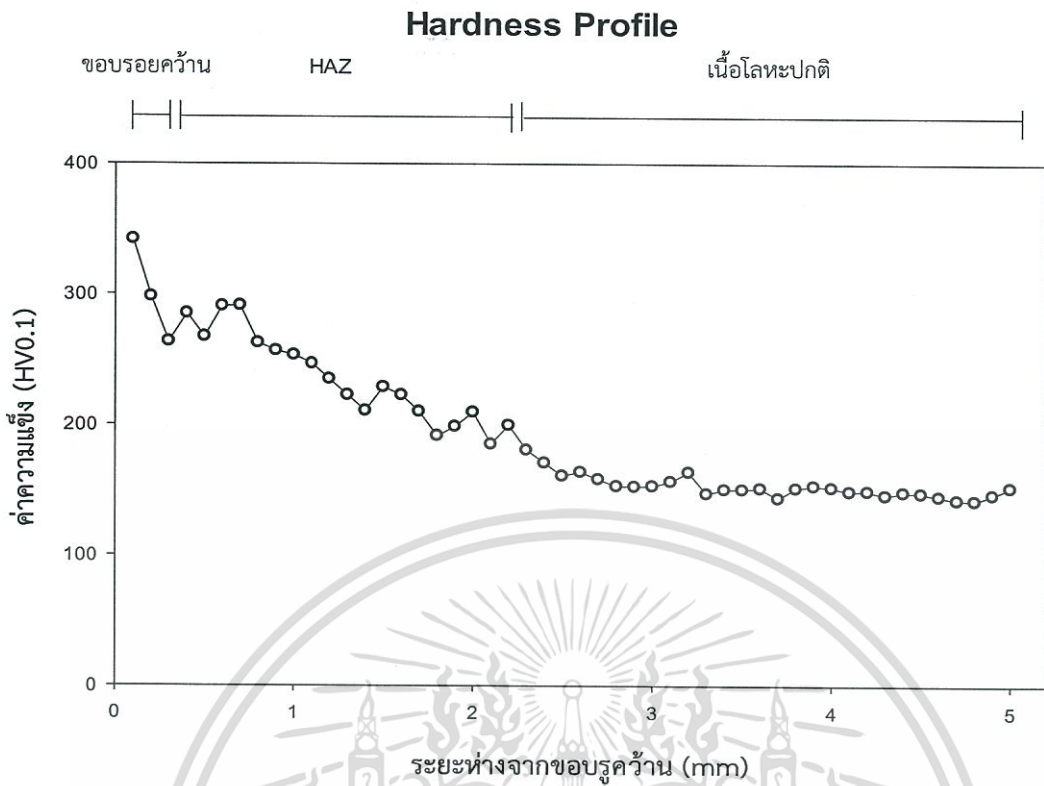
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

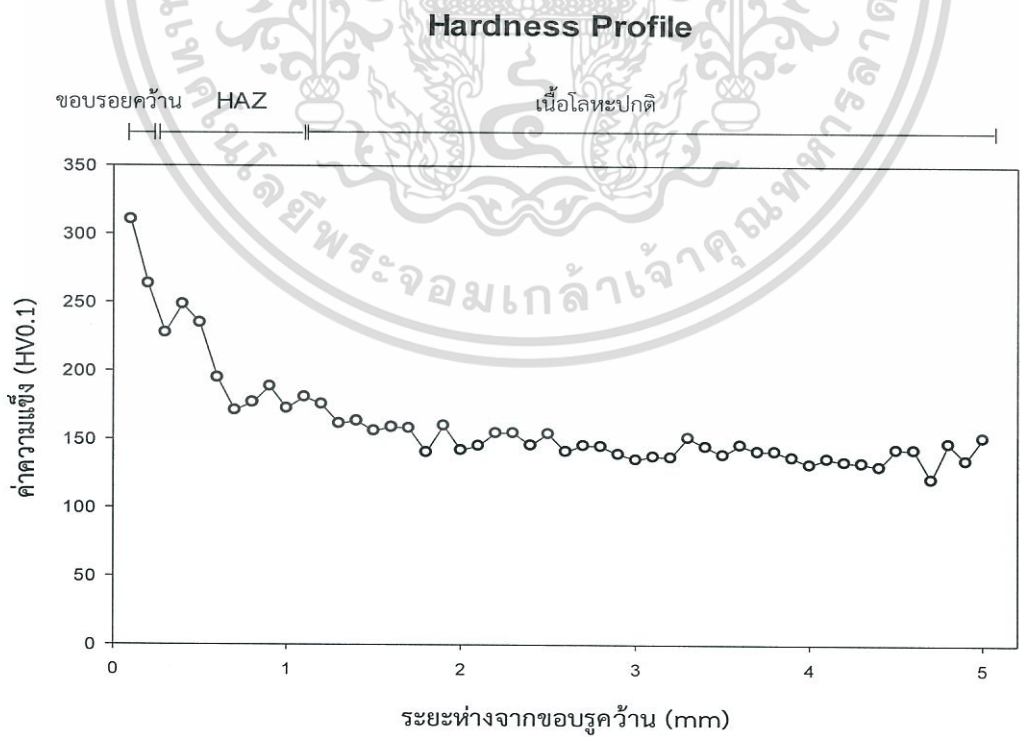
ระยะจากขอบรอยคว้าน (mm)	ค่าความแข็ง (HV0.1)		
	ขอบบน	กึ่งกลาง	ขอบล่าง
2.8	153.1	145.2	157.1
2.9	152.7	139.5	160.4
3	153.2	135.6	163.4
3.1	156.7	137.8	153.5
3.2	163.8	137.2	156.4
3.3	147.4	151.5	154.5
3.4	150.6	145	160
3.5	150.6	139	147.7
3.6	151.5	146.2	153.1
3.7	143.9	141.5	156.9
3.8	151.6	141.5	152.6
3.9	153.3	137.1	146.9
4	152	132	160.8
4.1	149	136.3	152.3
4.2	149.3	133.8	156.4
4.3	146	133	160.8
4.4	148.4	130.4	161.7
4.5	147.6	143.1	158.8
4.6	145.3	142.9	157.8
4.7	142.5	121.5	146.1
4.8	142.1	147.5	148.8
4.9	146.6	135.1	146.2
5	152.1	151.7	145.3

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งทั้ง 3 แนวของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วย แก๊สพบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่บริเวณใกล้กับขอบรอยคว้านที่สุดหรือที่ระยะ 0.1 มิลลิเมตร โดยที่ ตำแหน่งขอบบน กึ่งกลางและขอบล่าง มีค่าความแข็ง 341.9 HV, 310.3 HV และ 316 HV ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 จากนั้นค่าความแข็งลดลงมาเมื่อเป็นช่วงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ตำแหน่งขอบบนช่วงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนอยู่ติดกับขอบรอยคว้านถึงที่ระยะ 2.1 มิลลิเมตร มีช่วงค่าความแข็ง 185.3-297.9 HV ส่วนตำแหน่งกึ่งกลางและขอบล่างอยู่ติดกับขอบรอยคว้านถึงที่ระยะ 1.4 มิลลิเมตร มีช่วงค่าความแข็งเท่ากับ 149.5-287 HV ค่าความแข็งลดลงอีกเมื่อเป็นบริเวณเนื้อโลหะปกติ ซึ่งค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 140-160 HV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



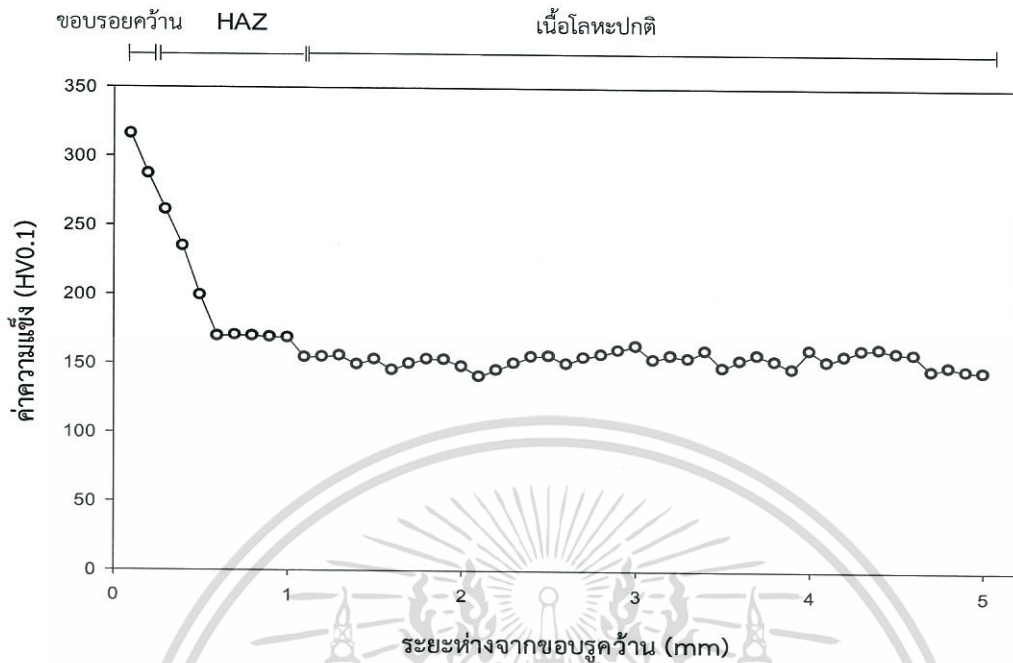
ภาพที่ 4.11 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งขอบบนของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส



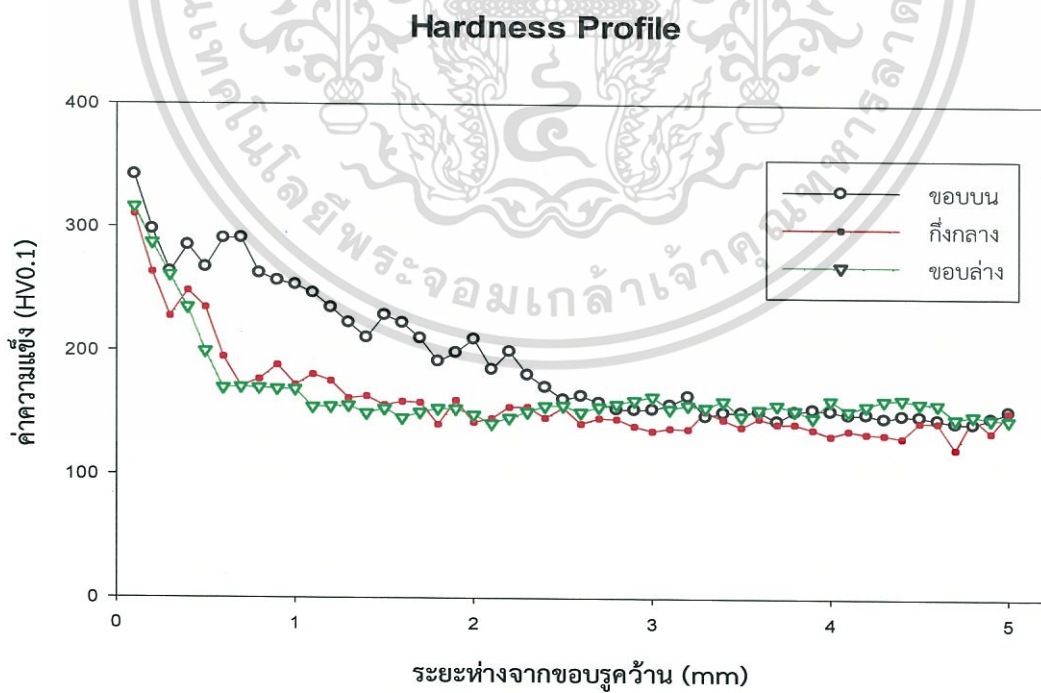
ภาพที่ 4.12 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Hardness Profile



ภาพที่ 4.13 กราฟ Hardness Profile ที่ตำแหน่งขอบล่างของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส



ภาพที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ทั้ง 3 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรู

ด้วยแก๊ส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานปกติ

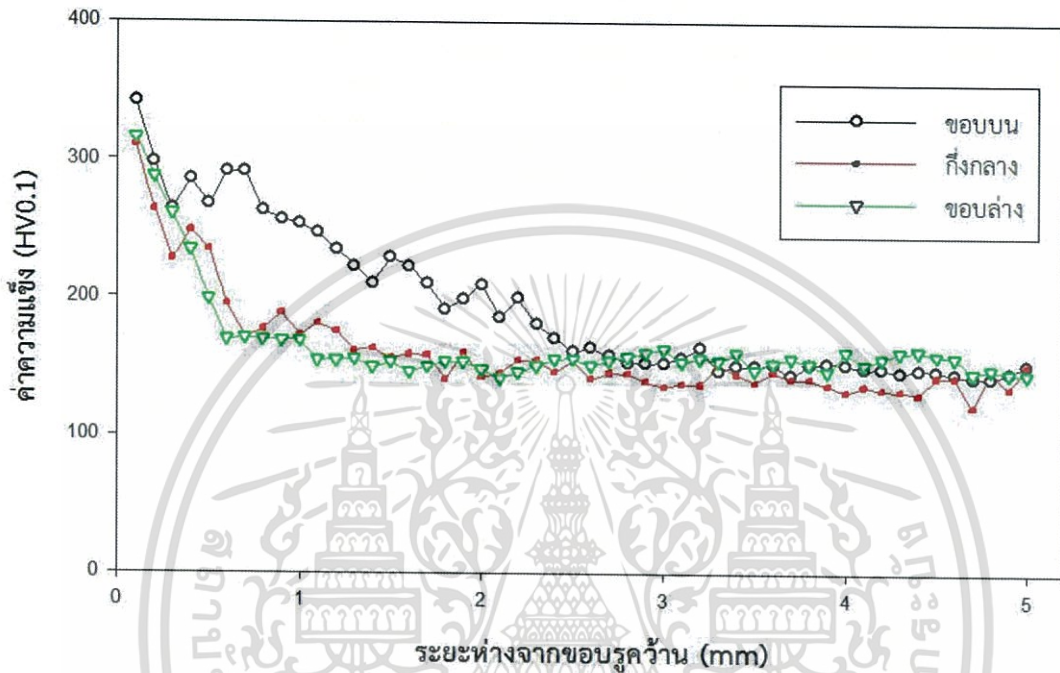
ชิ้นงานปกติ มีค่าความแข็งที่กระจายตลอดทั้งแนวของทุกตำแหน่ง โดยตำแหน่งขอบบนมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณใกล้กับขอบรู

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานปกติ

ระยะจากขอบรู (mm)	ค่าความแข็ง (HV0.1)		
	ขอบบน	กึ่งกลาง	ขอบล่าง
0.2	216.2	148.8	134.6
0.4	175.8	130.6	133.4
0.6	184.1	131.2	152
0.8	141.2	119.5	122.6
1	146.4	136.9	129.4
1.2	149	121.2	134
1.4	141.1	122.4	134.5
1.6	135.6	125.3	157.3
1.8	130.5	121.5	124.8
2	145.7	134.5	131.4
2.2	146.2	128.5	138.4
2.4	150.1	144.4	120.8
2.6	142.7	135.4	126.2
2.8	157.2	134.9	127.8
3	147.6	135.7	128.7
3.2	146	146.6	128
3.4	149.8	140.7	128.1
3.6	141.4	123.5	141.5
3.8	162	138.8	120.9
4	167.7	123.7	122.1
4.2	146.5	131.6	139.5
4.4	157.2	132.5	124.5
4.6	165.3	108.7	146.3
4.8	164.6	133.7	119.9
5	162.3	110.4	119.1

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งทั้ง 3 แนวของชิ้นงานปกติ พบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งขอบบนบริเวณใกล้กับขอบรู มีค่าความแข็งเท่ากับ 216.2 HV จากนั้นจึงลดลงมา ส่วนที่ตำแหน่งอื่นค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตลอดแนว มีช่วงประมาณ 110-160 HV

### Hardness Profile



ภาพที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานปกติ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบแผ่นฐานของโครงสร้าง เกรด SS400 ขนาด กว้าง 400 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตรและหนา 30 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบแผ่นที่เสียหายจากการใช้ความร้อนตัดเนื้อโลหะในลักษณะการคว้านด้วยแก๊สกับแผ่นฐานปกติ จึงนำมาทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และคุณสมบัติทางกล จากการทดลองจึงพอสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลจากลักษณะทางกายภาพ แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และการทดสอบคุณสมบัติทางกลได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะสภาพพื้นผิวภายในระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊สและชิ้นงานปกติ มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊ส พื้นผิวภายในมีลักษณะขรุขระและบริเวณผิวจะไม่เรียบต่างจากชิ้นงานปกติ

##### 5.1.2 ผลของแนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเกิดกว้างที่สุดที่บริเวณผิวบนสุดของแผ่นฐาน เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ใกล้เปลวไฟในการคว้านมากที่สุด และแคบลงมาคงที่เมื่อถึงระยะความหนาของแผ่นฐานค่าหนึ่ง

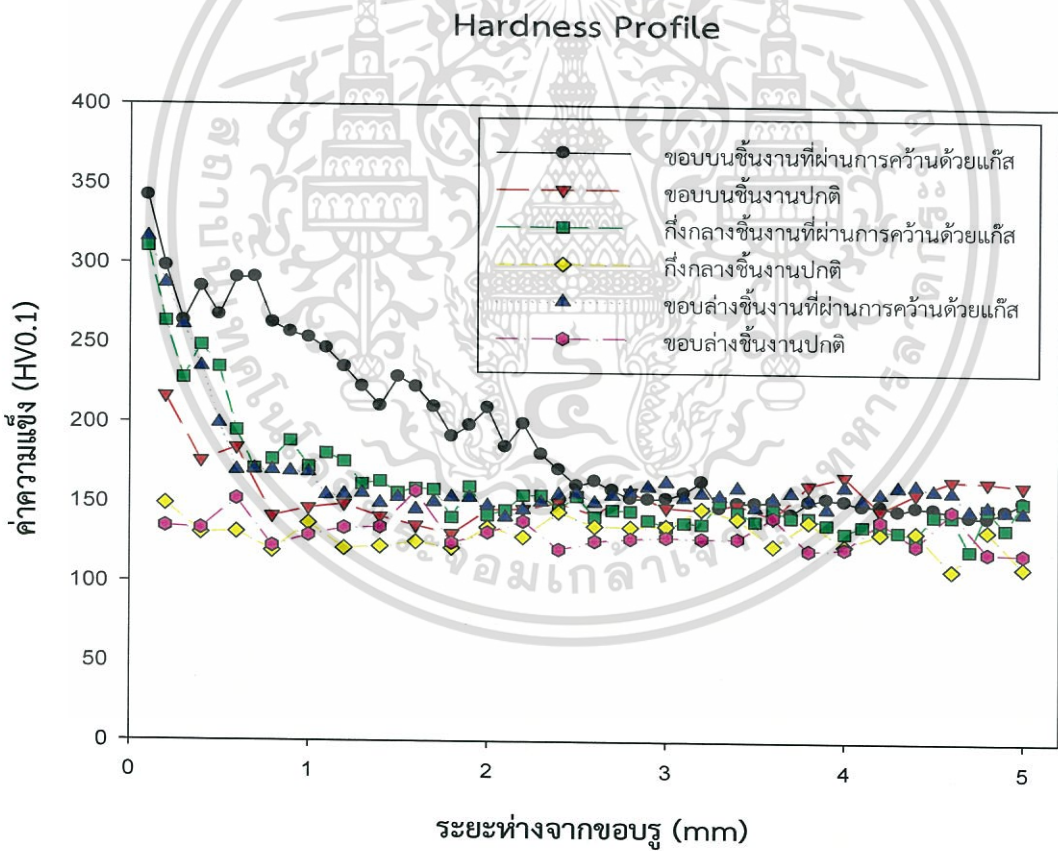
##### 5.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการตรวจสอบพบว่า ทั้ง 3 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊ส คือตำแหน่งขอบบน ตำแหน่งกึ่งกลางและตำแหน่งขอบล่าง มีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) บริเวณช่วงรอยต่อระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และเนื้อโลหะปกติ (Base Metal) มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเพิร์ลไลต์แบบละเอียด (Fine Pearlite) และบริเวณเนื้อโลหะปกติ มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับเพิร์ลไลต์ (Pearlite) การที่มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันทั่วทั้งชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานปกติมีเพียงตำแหน่งเดียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือบริเวณเนื้อโลหะปกติ มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์กับเฟิร์ลไลต์เช่นเดียวกับ บริเวณเนื้อโลหะปกติของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊ส

#### 5.1.4 ผลการทดสอบความแข็ง

ในชิ้นงานที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊สของทั้ง 3 ตำแหน่งค่าความแข็งมีค่ามากที่สุดที่ บริเวณขอบรอยคว้านและค่าลดลงมาจนเข้าสู่บริเวณเนื้อโลหะปกติ ความแข็งจึงเริ่มมีค่าคงที่ ที่เป็น เช่นนี้ เพราะลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแต่ละบริเวณที่แตกต่างกัน โดยบริเวณใกล้ขอบรอยคว้านมี ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคที่แข็งที่สุดแต่เปราะ ทำให้ค่าความ แข็งบริเวณนี้มีค่าสูงที่สุดประมาณ 341.9 HV, 310.3 HV และ 316 HV ที่ตำแหน่งขอบบน กึ่งกลาง และขอบล่าง ตามลำดับ ความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณขอบบนมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับ ความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟในการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊ส ส่วนชิ้นงานปกติ มีช่วงค่าความแข็งอยู่ ประมาณ 110-160 HV ดังแสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบ Hardness Profile ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของทั้ง 2 ชิ้นงาน

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะผิวภายในที่ขรุขระของแผ่นฐานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดการแตกร้าวและการกัดกร่อน ในเรื่องของสภาพผิวด้านบนและผิวด้านล่างบริเวณโดยรอบรู มีรอยไหม้เกิดขึ้น ไม่สวยงามแก่การนำไปใช้งานและบริเวณที่ขอบรูผิวไม่สม่ำเสมอ จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊ส ส่งผลให้เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนโดยรอบรู ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ จากภาพที่ 2.13 โครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างที่แข็งที่สุด สอดคล้องกับผลทดสอบความแข็งที่มีค่าสูงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ส่งผลให้ความเหนียวที่บริเวณนั้นลดลง และทำให้เนื้อโลหะที่บริเวณโดยรอบรูมีความเปราะ ทั้งนี้แผ่นฐานต้องรับแรงจากโครงสร้างหลังคาสถาณียกรถไฟฟ้า และรับแรงสั่นสะเทือนจากการวิ่งของขบวนรถ อาจทำให้บริเวณรูที่ผ่านการคว้านด้วยแก๊สเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักแบบเปราะได้ จึงเป็นข้อสนับสนุนที่ว่าไม่อนุมัติให้มีการตัดหรือคว้านเนื้อโลหะของโครงสร้างเหล็กด้วยแก๊ส ตรงตามข้อกำหนดของโครงการ

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิและความดัน เนื่องจากการคว้านเนื้อโลหะด้วยแก๊สกระทำที่หน้างาน ทำให้อุปกรณ์ไม่สะดวกต่อการวัดค่า ครั้งต่อไปควรมีการวัดค่านี้ด้วย

5.3.2 สามารถนำไปศึกษาต่อยอดการวิจัยโดยการเปลี่ยนชนิดของเหล็กหรือเกรด

5.3.3 งานวิจัยครั้งต่อไปควรมีการเพิ่มตัวแปรในการทดลอง เช่น ความเหนียว (Ductility) ความล้า (Fatigue) เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] William D. Callister Jr. and David G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [2] Mikell P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [3] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 9<sup>th</sup> ed. USA: McGraw-Hill, Inc., 2011.
- [4] D. Andres, T. Garcia, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Alvarez, A. Martin-Meizoso, J. Aldazabal, A. Bannister and A. Klimpel. Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by mean of Small Punch tests. *Materials Characterization* 119. (2016): 55-64.
- [5] A.K. Tingaev, R.G. Gubaydulín and I.A. Ilin. Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition of the Edges of Workpieces Made of Steel Brands S345, S390. *Procedia Engineering* 150. (2016): 1783-1790.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 63 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมืออุปกรณ์และการคว้านรูแผ่นฐานที่หน้างาน



ภาพที่ ภ.1 ชนิดหัวตีพที่ใช้



ภาพที่ ภ.2 แก๊สออกซิเจนและแก๊ส LPG ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ๓.3 แผ่นฐานก่อนการคว้านรู



ภาพที่ ๓.4 การคว้านรูแผ่นฐานด้วยแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีลักษณะต่าง ๆ เช่น I-Beam เหล็กแบนหรือเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนในรูปของแผ่นฐาน มีทั้งขนาดหนาและบาง โดยทั่วไปเหล็กชนิดนี้ ถูกใช้สำหรับงานโครงสร้างเหล็กทั่วไปและอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ญี่ปุ่น JIS G 3101-2004 และมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1479-2541

### องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกล

JIS G 3101 กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ดังแสดงตามตารางที่ 2 ซึ่งธาตุอื่น ๆ นอกจากธาตุฟอสฟอรัสและกำมะถัน จะถูกกำหนดตามสเปคของโครงการนั้น ๆ

ตารางที่ ๑.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

Grade	Chemical Composition, % by weight				
	C. max	Si. max	Manganese	P. max	S. max
SS400	-	-	-	0.050	0.050

ค่า Yield Strength ของเหล็ก มีแนวโน้มที่ลดน้อยลงตามความหนาของเหล็กที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณธาตุคาร์บอนเหมาะสม คุณสมบัติทางกลอื่น ๆ ดีขึ้นตามไปด้วย เช่น ความแข็งแรง ความเหนียวและประสิทธิภาพในการเชื่อม

ตารางที่ ๑.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

Grade	Yield Strength min. (Mpa)		Tensile Strength MPa	Elongation min. %			Impact Resistance min.[J]
	Thickness <16 mm	Thickness ≥16mm		Thickness <5mm	Thickness 5-16mm	Thickness ≥16mm	
	SS400	245		235	400-510	21	

ภาคผนวก ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการแปลงค่าความแข็งมาตรฐาน ASTM E140-12b

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)<sup>A, B</sup>

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number <sup>C</sup>		Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness Number <sup>D</sup>	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)	15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)		
68	940	...	...	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	...	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	...	...	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	...	...	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	...	...	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	...	...	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	595	...	...	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	...	...	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	...	...	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	37
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	35
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28
27	279	264	264	290	63.9	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	27
26	272	258	258	284	63.4	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	26
25	266	253	253	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	22
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20

<sup>A</sup> In the table headings, force refers to total test forces.  
<sup>B</sup> Annex A1 contains equations converting determined hardness scale numbers to Rockwell C hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.12 before using conversion equations.  
<sup>C</sup> The Brinell hardness numbers in parentheses are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 8.1 of Test Method E10.  
<sup>D</sup> These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks, Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc., the Roll Manufacturers Institute, and members of this institute, and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

ที่มา : ASTM International E140. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness.* USA. (2013): 3.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๗๐ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลผลค่าความแข็งที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส BUEHLER รุ่น Wilson Tukon 1102

ผลของความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการคว้านรูด้วยแก๊ส

1. ตำแหน่งขอบบน

MICRO HARDNESS TESTER

TUKON 1102

DATE 12.07.16 TIME 18:09:01

TEST SCALE HV0.1  
 DWELL TIME 10 sec  
 TEST FORCE 100 gf  
 UPPER LIMIT 500  
 LOWER LIMIT 100  
 CONVERSION TABLE ASTM T.1  
 CONVERSION SCALE HV

No. 52  
 MEAN 194.97  
 Std.DEV 53.39  
 MAX 341.9  
 MIN 127.1  
 RANGE 214.8

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	152.1	--	GO	34.63	35.21
2	146.6	--	GO	34.99	36.14
3	142.1	--	GO	36.18	36.08
4	142.5	--	GO	34.71	37.44
5	145.3	--	GO	36.22	35.23
6	147.6	--	GO	36.02	34.87
7	148.4	--	GO	34.46	36.25
8	146	--	GO	36.14	35.15
9	149.3	--	GO	35.7	34.78
10	149	--	GO	35.43	35.12
11	152	--	GO	34.9	34.96
12	153.3	--	GO	34.71	34.86
13	151.6	--	GO	35.19	34.75
14	143.9	--	GO	35.15	36.64
15	151.5	--	GO	35.08	34.89
16	150.6	--	GO	34.95	35.22
17	150.6	--	GO	35.57	34.6
18	127.1	--	GO	40.65	35.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19	163.8	--	GO	34.04	33.26
20	156.7	--	GO	34.35	34.46
21	153.2	--	GO	35.01	34.57
22	152.7	--	GO	35.16	34.54
23	153.1	--	GO	35.47	34.13
24	158.5	--	GO	34.61	33.8
25	164	--	GO	33.55	33.71
26	161.1	--	GO	33.75	34.1
27	171	--	GO	33.32	32.55
28	180.8	--	GO	32.44	31.62
29	199.7	--	GO	30.38	30.56
30	185.3	--	GO	31.47	31.8
31	209.7	--	GO	28.93	30.55
32	198.6	--	GO	31.28	29.83
33	191.6	--	GO	32.22	30
34	210.2	--	GO	29.78	29.62
35	222.7	--	GO	29.02	28.69
36	228.9	--	GO	28.35	28.57
37	210.6	--	GO	29.89	29.46
38	222.7	--	GO	29.43	28.28
39	235	--	GO	27.55	28.63
40	246.6	246.6	GO	26.46	28.38
41	253.3	253.3	GO	27.38	26.73
42	256.7	256.7	GO	26.83	26.92
43	262.5	262.5	GO	25.99	27.17
44	291.1	291.1	GO	24.7	25.78
45	290.7	290.7	GO	25.52	24.99
46	267.3	267.3	GO	26.46	26.22
47	285	285	GO	24.47	26.55
48	263.4	263.4	GO	26.72	26.35
49	297.9	297.9	GO	25.7	24.2
50	341.9	341.9	GO	23.55	23.03

----- END -----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ๗๒ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตำแหน่งกึ่งกลาง

MICRO HARDNESS TESTER

TUKON 1102

DATE 12.08.16 TIME 14:21:35

TEST SCALE HV0.1

DWELL TIME 10 sec

TEST FORCE 100 gf

UPPER LIMIT 500

LOWER LIMIT 100

CONVERSION

TABLE ASTM T.1

CONVERSION

SCALE HV

No. 60

MEAN 158.65

Std.DEV 34.33

MAX 310.3

MIN 121.5

RANGE 188.8

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	136.9	--	GO	36.79	36.81
2	138.2	--	GO	36.07	37.18
3	140.8	--	GO	35.97	36.61
4	134.9	--	GO	36.84	37.3
5	139.6	--	GO	35.47	37.42
6	143.2	--	GO	35.76	36.21
7	148.9	--	GO	34.31	36.28
8	148.7	--	GO	35.02	35.6
9	145.7	--	GO	35.18	36.17
10	154.9	--	GO	34.57	34.63
11	151.7	--	GO	34.25	35.68
12	135.1	--	GO	37.41	36.7
13	147.5	--	GO	35.67	35.24
14	121.5	--	GO	38.47	39.68
15	142.9	--	GO	35.38	36.67
16	143.1	--	GO	36.52	35.47
17	130.4	--	GO	37.12	38.31
18	133	--	GO	37.05	37.62
19	133.8	--	GO	36.91	37.55
20	136.3	--	GO	36.36	37.42
21	132	--	GO	37.48	37.47
22	137.1	--	GO	36.93	36.63
23	141.5	--	GO	36.59	35.81
24	141.5	--	GO	35.68	36.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25	146.2	--	GO	35.62	35.62
26	139	--	GO	36.54	36.5
27	145	--	GO	36.03	35.49
28	151.5	--	GO	34.25	35.73
29	137.2	--	GO	36.92	36.6
30	137.8	--	GO	37.06	36.3
31	135.6	--	GO	37.02	36.93
32	139.5	--	GO	36.63	36.29
33	145.2	--	GO	35.07	36.41
34	145.8	--	GO	36.78	34.54
35	141.4	--	GO	36.28	36.16
36	154.4	--	GO	35.22	34.1
37	146	--	GO	34.96	36.33
38	154.8	--	GO	34.84	34.39
39	154.7	--	GO	34.6	34.65
40	145.5	--	GO	35.63	35.76
41	142.3	--	GO	36.49	35.7
42	160.2	--	GO	34.23	33.81
43	140.7	--	GO	35.81	36.81
44	158.3	--	GO	33.64	34.81
45	159	--	GO	34.45	33.86
46	156.2	--	GO	34.6	34.32
47	161.6	--	GO	34.14	33.6
48	175.7	--	GO	32.94	32.04
49	180.8	--	GO	32.02	32.04
50	172.5	--	GO	32.71	32.86
51	188.5	--	GO	32.19	30.54
52	176.9	--	GO	32.23	32.52
53	171	--	GO	32.03	33.83
54	194.9	--	GO	30.09	31.6
55	234.9	--	GO	26.95	29.24
56	248.4	248.4	GO	27.51	27.14
57	227.7	--	GO	29.1	27.97
58	263.4	263.4	GO	26.23	26.84
59	310.3	310.3	GO	24.04	24.85
60	163.4	--	GO	33.61	33.76

----- END -----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๗๔ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตำแหน่งขบล่าง

MICRO HARDNESS TESTER  
TUKON 1102

DATE 12.08.16 TIME 15:46:21

TEST SCALE HV0.1  
DWELL TIME 10 sec  
TEST FORCE 100 gf  
UPPER LIMIT 500  
LOWER LIMIT 100  
CONVERSION TABLE ASTM T.1  
CONVERSION SCALE HV

No. 61  
MEAN 163.25  
Std.DEV 32.22  
MAX 316  
MIN 141.2  
RANGE 174.8

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	197.3	--	GO	30.57	30.74
2	152.5	--	GO	35.26	34.49
3	150.5	--	GO	35.13	35.07
4	154.9	--	GO	34.58	34.62
5	144.6	--	GO	36.76	34.87
6	147.3	--	GO	35.28	35.68
7	149.5	--	GO	35.82	34.63
8	147.6	--	GO	34.84	36.05
9	148.2	--	GO	34.79	35.96
10	142.7	--	GO	36.11	35.99
11	146.2	--	GO	35.25	35.97
12	145.3	--	GO	36.26	35.19
13	146.2	--	GO	34.83	36.39
14	148.8	--	GO	34.52	36.08
15	146.1	--	GO	35.59	35.66
16	157.8	--	GO	34.02	34.54
17	158.8	--	GO	34.12	34.23
18	161.7	--	GO	33.67	34.05
19	160.8	--	GO	33.53	34.39
20	156.4	--	GO	33.93	34.93
21	152.3	--	GO	34.06	35.72
22	160.8	--	GO	33.55	34.36
23	146.9	--	GO	34.75	36.3
24	152.6	--	GO	35.02	34.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 75 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25	156.9	--	GO	34.51	34.25
26	153.1	--	GO	34.04	35.56
27	147.7	--	GO	35.11	35.75
28	160	--	GO	33.67	34.42
29	154.5	--	GO	33.84	35.44
30	156.4	--	GO	34.37	34.5
31	153.5	--	GO	34.57	34.94
32	163.4	--	GO	33.3	34.08
33	160.4	--	GO	35.01	32.99
34	157.1	--	GO	34.92	33.79
35	155	--	GO	34.1	35.07
36	150.5	--	GO	35.43	34.77
37	156	--	GO	34.75	34.2
38	155.5	--	GO	34.18	34.88
39	150.8	--	GO	35.08	35.05
40	145.9	--	GO	35.27	36.04
41	141.2	--	GO	36.07	36.41
42	148.3	--	GO	34.78	35.94
43	153.3	--	GO	35.07	34.49
44	153.5	--	GO	33.94	35.57
45	150.3	--	GO	34.71	35.53
46	145.7	--	GO	35.27	36.08
47	153.3	--	GO	35.72	33.84
48	149.5	--	GO	35.27	35.17
49	155.7	--	GO	34.51	34.52
50	154.9	--	GO	34.7	34.49
51	154.5	--	GO	34.63	34.65
52	168.7	--	GO	32.88	33.42
53	169.1	--	GO	33.11	33.13
54	169.8	--	GO	31.75	34.34
55	170.4	--	GO	32.91	33.06
56	169.6	--	GO	33.09	33.04
57	199.2	--	GO	31.07	29.95
58	234.8	--	GO	27.99	28.22
59	261	261	GO	26.77	26.54
60	287	287	GO	25.41	25.43
61	316	316	GO	24.06	24.39

----- END -----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของความแข็งของชิ้นงานปกติ

1. ตำแหน่งขอบบน

MICRO HARDNESS TESTER

TUKON 1102

DATE 12.09.16 TIME 13:55:06

TEST SCALE HV0.1

DWELL TIME 10 sec

TEST FORCE 100 gf

UPPER LIMIT 500

LOWER LIMIT 100

CONVERSION

TABLE ASTM T.1

CONVERSION

SCALE HV

No. 33

MEAN 157.14

Std.DEV 21.13

MAX 230.4

MIN 130.5

RANGE 99.9

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	230.4	--	GO	27.99	28.75
2	216.2	--	GO	29.89	28.68
3	181	--	GO	32.99	31.03
4	175.8	--	GO	33.24	31.71
5	153.3	--	GO	35.78	33.77
6	184.1	--	GO	29.12	34.36
7	135.3	--	GO	38.48	35.56
8	141.2	--	GO	37.12	35.36
9	146.4	--	GO	33.8	37.37
10	170.5	--	GO	32.78	33.17
11	144	--	GO	34.96	36.82
12	149	--	GO	37.17	33.39
13	149.2	--	GO	36.23	34.27
14	141.1	--	GO	36.65	35.85
15	150	--	GO	35.47	34.84
16	135.6	--	GO	37.34	36.63
17	130.5	--	GO	37.46	37.92
18	145.7	--	GO	35.5	35.86
19	146.2	--	GO	35.28	35.96
20	150.1	--	GO	35.78	34.51
21	142.7	--	GO	35.84	36.25
22	157.2	--	GO	34.73	33.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 77 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23	147.6	--	GO	34.77	36.12
24	146	--	GO	36.18	35.1
25	149.8	--	GO	35.17	35.2
26	141.4	--	GO	36.41	36.03
27	162	--	GO	34.91	32.75
28	167.7	--	GO	33.31	33.19
29	146.5	--	GO	34.86	36.29
30	157.2	--	GO	34.49	34.2
31	165.3	--	GO	32.84	34.15
32	164.6	--	GO	33.34	33.8
33	162.3	--	GO	33.2	34.41

----- END -----

## 2. ตำแหน่งกึ่งกลาง

MICRO HARDNESS TESTER

TUKON 1102

DATE 12.09.16 TIME 14:17:26

TEST SCALE HV0.1

DWELL TIME 10 sec

TEST FORCE 100 gf

UPPER LIMIT 500

LOWER LIMIT 100

CONVERSION TABLE ASTM T.1

CONVERSION SCALE HV

No. 25

MEAN 132.17

Std.DEV 8.48

MAX 148.8

MIN 119.5

RANGE 29.3

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	148.8	--	GO	35.48	35.13
2	130.6	--	GO	36.99	38.37
3	131.2	--	GO	37.92	37.27
4	119.5	--	GO	38.61	40.17
5	136.9	--	GO	36.79	36.81
6	121.2	--	GO	39.63	38.59
7	122.4	--	GO	39.84	38
8	125.3	--	GO	38.12	38.83
9	121.5	--	GO	38.78	39.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 78 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	134.5	--	GO	36.68	37.58
11	128.5	--	GO	38.41	37.57
12	144.4	--	GO	36.47	35.2
13	135.4	--	GO	38.68	35.33
14	134.9	--	GO	37.49	36.66
15	135.7	--	GO	36.67	37.26
16	146.6	--	GO	34.75	36.39
17	140.7	--	GO	36.58	36.03
18	123.5	--	GO	38.62	38.87
19	138.8	--	GO	35.05	38.06
20	123.7	--	GO	38.49	38.96
21	131.6	--	GO	37.81	37.27
22	132.5	--	GO	37.7	37.13
23	108.7	--	GO	42.13	40.48
24	133.7	--	GO	37.58	36.91
25	110.4	--	GO	41.15	40.83

----- END -----

### 3. ตำแหน่งขอบล่าง

MICRO HARDNESS TESTER

TUKON 1102

DATE 12.09.16 TIME 14:52:31

TEST SCALE HV0.1

DWELL TIME 10 sec

TEST FORCE 100 gf

UPPER LIMIT 500

LOWER LIMIT 100

CONVERSION TABLE ASTM T.1

CONVERSION SCALE HV

No.	30
MEAN	133.03
Std.DEV	10.92
MAX	164.5
MIN	119.1
RANGE	45.4

No.	HARDNESS	CONVERSION	LIMIT	D1(um)	D2(um)
1	164.5	--	GO	33.43	33.72
2	134.6	--	GO	37.49	36.75
3	134.3	--	GO	37.14	37.17
4	133.4	--	GO	37.41	37.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 79 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	143.9	--	GO	36.41	35.39
6	152	--	GO	34.17	35.68
7	131.3	--	GO	37.52	37.65
8	122.6	--	GO	39.4	38.37
9	131.1	--	GO	37.93	37.28
10	129.4	--	GO	38.56	37.15
11	134	--	GO	38.38	36.01
12	134.5	--	GO	37.15	37.1
13	157.3	--	GO	32.92	35.76
14	124.8	--	GO	38.37	38.73
15	131.4	--	GO	37.17	37.96
16	138.4	--	GO	37.84	35.38
17	120.8	--	GO	38.66	39.7
18	126.2	--	GO	38.46	38.21
19	127.8	--	GO	37.91	38.26
20	128.7	--	GO	38.23	37.69
21	128	--	GO	39.38	36.75
22	128.1	--	GO	37.88	38.21
23	141.5	--	GO	37.61	34.78
24	120.9	--	GO	39.26	39.08
25	122.1	--	GO	39.2	38.75
26	139.5	--	GO	35.99	36.92
27	124.5	--	GO	38.57	38.63
28	146.3	--	GO	35.83	35.38
29	119.9	--	GO	38.91	39.76
30	119.1	--	GO	39.1	39.81

-----END-----