

อิทธิพลของแมงกานีสต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

INFLUENCE OF MANGANESE ON MECHANICAL PROPERTIES
IN MANGANESE STEEL

กุลศิริ โปธิกำจร

KULSIRI POTHIKAMJORN

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

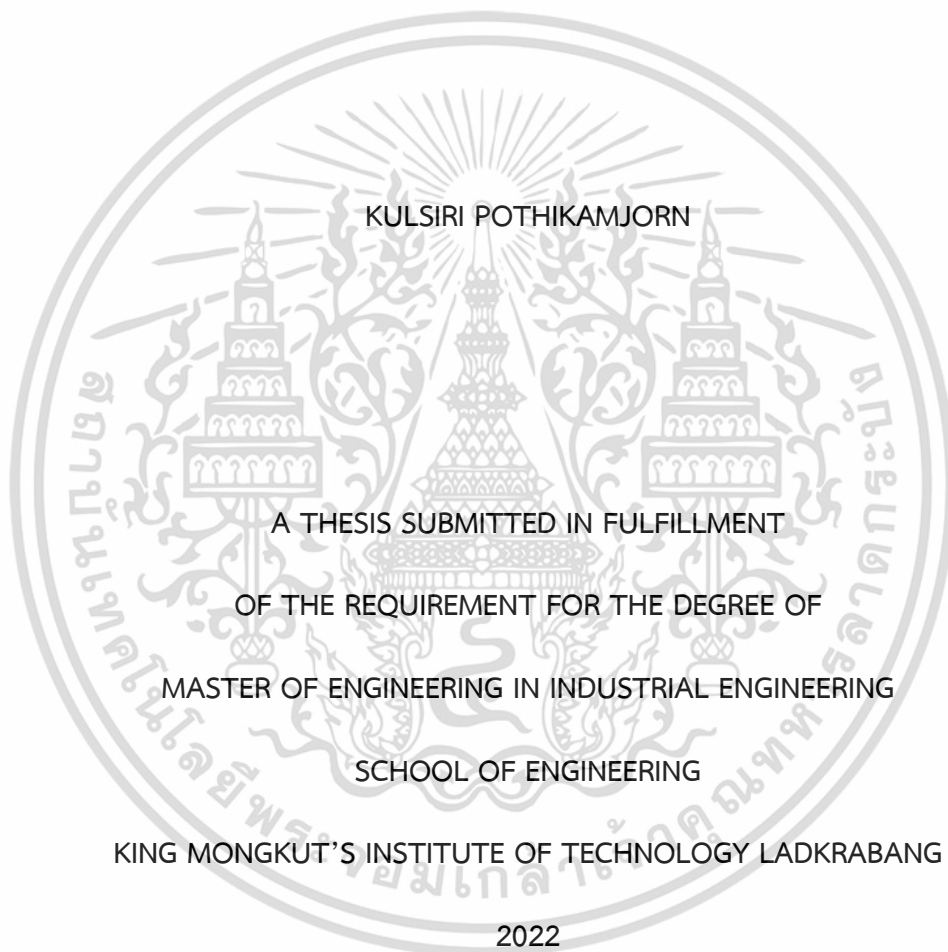
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2565

KMITL-2022-EN-M-217-079

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF MANGANESE ON MECHANICAL PROPERTIES
IN MANGANESE STEEL



KMITL-2022-EN-M-217-079

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของแมงกานีสต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส
นักศึกษา	นางกุลศิริ โปธิกำจร
รหัสประจำตัว	61601153
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พชรพล ตันขววิรุฬห์

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีความระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 11Mn 18Mn และ 21Mn ซึ่งเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีระดับแมงกานีสต่างกันนี้ มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) และสมบัติทางกล (Mechanical properties) เช่น ความแข็ง (Hardness) แรงดึง (Tensile) แรงกระแทก (Impact) และการสึกหรอ (Wear)

ผลที่ได้จากการศึกษานั้นพบว่าโครงสร้างของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับประกอบด้วยเฟสออสเตนไนต์ (Austenite) ทั้งหมด และมีแนวโน้มนที่เหมือนกันหลังจากผ่านกระบวนการหล่อ กระบวนการอบทางความร้อนและกระบวนการชุบน้ำเพื่อให้ชิ้นงานเย็นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งธาตุแมงกานีสนี้ ทำให้เหล็กกล้ามีความเสถียรมากขึ้น เรียกได้ว่า แมงกานีสเป็นตัว Austenite stabilizer โดยจะควบคุมโครงสร้างผลึกแบบออสเตนไนต์ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนในด้านสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับนั้น มีค่าความแข็งที่ประมาณ 286-289 HB โดยเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่าความแข็งมากที่สุด เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn และ 18Mn เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงจะพบว่า ความเค้น จุดคราก (Yield stress) มีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 450-480 เมกะปาสกาล (MPa) ความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength) มีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 720-780 เมกะปาสกาล (MPa) และการยืดตัวของวัสดุ (Elongation) มีค่าที่ใกล้เคียงกันอีกเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 32-40% การวิเคราะห์อัตราของการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียดได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และเครียดจริง ในแต่ละระดับของแมงกานีสเท่ากับ $\sigma_T = 2230.62\varepsilon_T^{0.474}$, $\sigma_T = 2240.41\varepsilon_T^{0.433}$ และ $\sigma_T = 2051.64\varepsilon_T^{0.381}$ สำหรับเหล็กกล้า 11Mn 18Mn และ 21Mn ตามลำดับ โดยจากความสัมพันธ์ที่ได้ Strength coefficient (K) และ Strain-hardening exponent (n) มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของแมงกานีสมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดมีค่าที่ลดลง ซึ่งหมายความว่า วัสดุมีแนวโน้มที่จะเกิด

ความเสียหายเนื่องจากความเปราะหรือการแตกหักเมื่อมีความแข็งแรงมากขึ้นในระหว่างการใช้งานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้!

ลดลง นอกจากนี้การทดสอบแรงกระแทกมีค่าเฉลี่ยของ Impact energy อยู่ระหว่าง 81-91 จูล ซึ่งเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่าเฉลี่ยของ Impact energy มากที่สุด และในการทดสอบสุดท้าย คือ การสึกหรอนั้น ทำให้สรุปได้ว่าชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงกว่า ส่งผลให้มีการสึกหรอน้อยกว่าและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า โดยศึกษาจากภาพถ่ายแบบขยายของชิ้นงานทดสอบ ที่มีลักษณะของรอยแตกที่น้อยกว่า ระดับความลึกของความหยาบผิวที่ตื้นกว่า ตลอดจนน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบที่มีผลต่างที่น้อยลง

ดังนั้นจากการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้ทราบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% (21Mn) มีโครงสร้างออสเทนไนต์ที่เสถียรมากขึ้น และมีสมบัติทางกลที่ดีกว่า ในด้านความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุ ตลอดจนอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด ชิ้นงานเกิดการเสียดรูปได้ยากขึ้น อีกทั้งลดอัตราการเกิดการสึกหรอ จึงสรุปได้ว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายที่ช้าลง ยืดอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Influence of manganese on mechanical properties in manganese steel
Student	Mrs.Kulsiri Pothikamjorn
Student ID.	61601153
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

In this work, the influence of manganese concentrations on microstructures and mechanical properties of manganese steels are studied. The concentrations of manganese are between 11, 18 and 21 wt%. Hereafter, these manganese steels are referred as 11Mn, 18Mn and 21Mn in accordance with manganese concentrations.

For microstructure analysis, results indicated that the microstructure of 11Mn, 18Mn and 21Mn was fully austenite phase after casting process, heat treatment process and subsequently water quenched process. The influence of manganese is to transform steel to more stable by controlling the unchanged structure of austenite, as called austenite stabilizer. To investigate the effect of manganese on the mechanical properties of the experimental manganese steels; hardness, impact energy and tensile properties were studied. The hardness of 11Mn, 18Mn and 21Mn was about 286-289 HB. However, the manganese steel, 21Mn shows the highest hardness, compared to the other manganese steels, 11Mn and 18Mn. For the tensile properties, yield stress was also similar between 450 and 480 MPa in all experimental steels. Tensile strength was near about 720-780 MPa and elongation was about 32-40% relatively for all. To analyze strain hardening rate, true stress and true strain of 11Mn, 18Mn and 21Mn were $\sigma_T = 2230.62\varepsilon_T^{0.474}$, $\sigma_T = 2240.41\varepsilon_T^{0.433}$ and $\sigma_T = 2051.64\varepsilon_T^{0.381}$ relatively. As the higher concentrations of manganese increased, the strength coefficient (K) and strain-hardening exponent (n) decreased. In addition, strain-hardening rate of all experimental steels grew down. Moreover, impact energies of various manganese steels obtained by the impact test was closely about 81-91 J.

However, the highest impact energy was found in the manganese steel, 21Mn. Lastly, เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อคุณผู้ใดเห็นเป็นชอบหรือจะยื่นฟ้องให้ศาล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

for the wear test, results showed that increasing of manganese in manganese steels could lower wear. The micrographs of specimens showed that the higher manganese could reduce the presence of cracks, decrease depths and lower weight loss of manganese steels.

According to the obtained results this thesis, manganese steel 21% (21Mn) performed the better consistent austenite and the greater mechanical properties in hardness, toughness and strain hardening rate as well as wear property. As the result, the more concentrations of manganese in manganese austenitic steel would influence to less damage and longer lifetime of steel products.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาจากท่านอาจารย์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้คำปรึกษากับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เชาวลิต หามนตรี ที่ชักชวนให้มาศึกษาหลักสูตรนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาและกำลังใจ เพื่อให้สำเร็จลุล่วงเป็นที่เรียบร้อยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท สามมิตรเมทัลเวิร์ค จำกัด ที่ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในทุกเรื่องรวมถึงชิ้นงานทดสอบ ตลอดจนข้อมูลต่าง ๆ ของการวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และห้องทดสอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และผู้มีพระคุณทุกท่าน

กุลศิริ โปธิกำจร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 การกำเนิดเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	6
2.1.2 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน (Fe-C).....	8
2.1.3 แผนภาพเฟสของเหล็ก-แมงกานีส (Fe-Mn).....	9
2.1.4 การแปลงเฟส (Phase transformation)	11
2.1.4.1 Time-temperature transformation diagram (TTT diagram)	11
2.1.4.2 Continuous cooling transformation diagram (CCT diagram)	12
2.1.4.3 ผลของธาตุเจือต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้า.....	15
2.1.5 สมบัติทางกล (Mechanical properties).....	17
2.1.5.1 ความแข็ง (Hardness)	17
2.1.5.2 ความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain).....	19
2.1.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	22
2.1.5.4 ความเค้นจริง - ความเครียดจริง (True stress - true strain)... ..	25
2.1.5.5 อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate)	28
2.1.5.6 ความแข็งแรงแรงหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness).....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5.7 การสึกหรอของวัสดุ (Wear).....	31
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 วัสดุ (Materials)	48
3.1.1 ส่วนผสมทางเคมี.....	48
3.1.2 กระบวนการผลิตวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure characterization).....	50
3.3 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties).....	56
3.3.1 การตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness test).....	56
3.3.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test).....	58
3.3.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)	60
3.3.4 การทดสอบการสึกหรอ (Wear test)	61
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	65
4.1 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure).....	65
4.2 สมบัติทางกล (Mechanical properties).....	72
4.2.1 ความแข็ง (Hardness).....	72
4.2.2 แรงดึง (Tensile).....	74
4.2.3 แรงกระแทก (Impact test).....	81
4.2.4 การสึกหรอ (Wear Test).....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป VII

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (GX120Mn12) กับเหล็กทรงรถไฟ (R260).....	41
2.2 ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสที่ระดับแมงกานีส 12% และ 16%.....	43
2.3 ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสที่ระดับแมงกานีส 13% 17% และ 21%.....	44
2.4 ขนาดเกรนของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ผ่านกระบวนการหล่ออย่างเดียว และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพิ่มเติม.....	44
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง.....	73
4.2 ค่าแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง.....	75
4.3 ค่า Impact energy ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง.....	82
4.4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	93
4.5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	94
4.6 น้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	95

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เฟสไดอะแกรมระหว่างธาตุเหล็กและคาร์บอน (Fe-C).....	8
2.2 เฟสไดอะแกรมระหว่างธาตุเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn).....	10
2.3 TTT diagram ของเหล็กและคาร์บอน (Fe-C) ที่ส่วนผสมยูเทคติก.....	12
2.4 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องของเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ส่วนผสมยูเทคติก.....	13
2.5 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและอย่างช้า.....	14
2.6 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิโดยแสดงโครงสร้างในแต่ละช่วงของ อัตราการเย็นตัว.....	15
2.7 แผนภาพการแปลงเฟสของอุณหภูมิคงที่ (TTT diagram) โดยแสดงอิทธิพลของธาตุเจือ	16
2.8 ประเภทของการทดสอบความแข็ง.....	17
2.9 ประเภทของแรงที่มากกระทำต่อชิ้นงาน.....	21
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	23
2.11 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	24
2.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ engineering stress-strain และ true stress-strain...	27
2.13 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดจริงในรูปของ log.....	28
2.14 ชิ้นงานทดสอบที่ใช้แรงกระทำแบบชาร์ปีและแบบไอซอด.....	30
2.15 เครื่องทดสอบแรงกระทำ.....	30
2.16 ความแข็งระหว่างเหล็กกล้าผสมแมงกานีส และเหล็กกล้าผสมนิเกิล.....	35
2.17 โครงสร้างอสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	36
2.18 ขนาดเกรนโครงสร้างอสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ที่ระดับแมงกานีสที่ 7% และ 10% โดยน้ำหนัก.....	36
2.19 กราฟแสดงความเค้นจริงที่ระดับอัตราความเครียดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	37
2.20 กราฟแสดงอัตราการแข็งตัวของเหล็กกล้าแมงกานีสที่อุณหภูมิต่างกัน โดยกำหนด อัตราความเครียดเท่ากับ 0.4 s^{-1}	38
2.21 กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	38
2.22 กราฟแสดงความเค้นจริงและความเครียดจริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	39
2.23 การเสีรูปที่เกิด twin ที่อุณหภูมิ 173K (-100°C) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	40
2.24 การเสีรูปที่เกิด twin ที่อุณหภูมิ 523K (250°C) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	40
2.25 เครื่องไทรโบมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบการเลื่อนแบบกระทำ.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ชั้นทดสอบหมุนเคลื่อนที่บนตำแหน่งงานหมุนตัวล่าง (Lower disc).....	42
2.27 ระยะห่างของการทดสอบบนงานหมุนตัวล่าง และ หน้าสัมผัสของชิ้นงานทดสอบ (Contact area).....	42
2.28 โครงสร้างของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่เกิดคาร์ไบด์อยู่รอบขอบเกรนอสเตนไนต์.....	45
2.29 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก คาร์บอน และแมงกานีส (Fe-C-Mn).....	45
2.30 ผลรวมปริมาตรที่หายไปของแรงที่กระทำต่างกัน.....	46
2.31 อัตราการสึกหรอของแรงที่กระทำต่างกัน.....	46
3.1 ขนาดของชิ้นงานทรงกระบอกที่ใช้ในกระบวนการหล่อเหล็กกล้าแมงกานีส.....	49
3.2 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ยี่ห้อ Baird รุ่น FSQ S/N 2712A.....	50
3.3 แผนภาพกระบวนการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวของเหล็กกล้าแมงกานีส.....	50
3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M.....	51
3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Thermo Fisher scientific รุ่น Apreo S	52
3.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น MiniFlex.....	52
3.7 ภาพแถบคิกูชิ (Kikuchi band)	53
3.8 การเกิดแถบคิกูชิจากลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนเมื่อกระทบกับระนาบของผลึก	54
3.9 ชุดอุปกรณ์ของการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (EBSD).....	54
3.10 ภาพถ่ายจากภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ที่ติดตั้ง ชุดอุปกรณ์ EBSD.....	55
3.11 การประมวลผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อบอกทิศทางการวางตัวของแต่ละระนาบ ของโครงสร้างผลึก.....	55
3.12 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบทั้ง 3 ประเภท คือ 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	56
3.13 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบทั้ง 3 ประเภท.....	57
3.14 เครื่องวัดความแข็ง ยี่ห้อ Innovatest รุ่น Nexus 3000.....	57
3.15 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8.....	58
3.16 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน E8.....	58
3.17 เครื่องทดสอบกำลังวัสดุแบบเอนกประสงค์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG - 100KN.....	59
3.18 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E23.....	60
3.19 เครื่องทดสอบแรงกระแทก Amsler RKP.....	61
3.20 เครื่องไตรีโบมิเตอร์ (Tribometer) รุ่น Anton Paar TRN.....	62
3.21 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM G99.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสก่อนการทดสอบของ 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	62
3.23 ชุดเครื่องวัดทดสอบหาความสึกหรอระดับจุลภาค.....	63
3.24 เครื่อง 3D Measuring Laser Microscope รุ่น Olympus OLS 500 LEXT.....	63
4.1 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn.....	65
4.2 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn.....	66
4.3 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn.....	66
4.4 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn.....	67
4.5 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn.....	67
4.6 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn.....	68
4.7 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn.....	68
4.8 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn.....	69
4.9 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn.....	69
4.10 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn.....	70
4.11 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn.....	71
4.12 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn.....	71
4.13 การวิเคราะห์เฟสของเหล็กกล้าแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	72
4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	73
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดวิศกรรมของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	75
4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดครากของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	76
4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	76
4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการยืดตัวของวัสดุของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจริงและความเครียดจริงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	78
4.20 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจริงและความเครียดจริงในรูปแบบของ \log ที่มีค่า K และ n ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	79
4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่า K และ n ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	79
4.22 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate) ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	80
4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระแทกเฉลี่ยของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn.....	82
4.24 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสก่อนการทดสอบของ 11Mn 18Mn และ 21Mn จำนวน 2 ชิ้นของแต่ละประเภท.....	83
4.25 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% หลังการทดสอบการสึกหรอ.....	83
4.26 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% หลังการทดสอบการสึกหรอ.....	84
4.27 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% หลังการทดสอบการสึกหรอ.....	84
4.28 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 11Mn.....	85
4.29 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 18Mn.....	86
4.30 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 21Mn.....	86
4.31 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 11Mn.....	87
4.32 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 18Mn.....	87
4.33 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 21Mn.....	88
4.34 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn.....	89
4.35 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 18Mn.....	89
4.36 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 21Mn.....	90
4.37 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn.....	91
4.38 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn.....	91
4.39 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 21Mn.....	92
4.40 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 11Mn, 18Mn และ 21Mn	93
4.41 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 11Mn, 18Mn และ 21Mn	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ XII

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส	96
4.43 เปอร์เซนต์ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส.....	96
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ..	97
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ.....	98
4.46 กราฟแสดงระดับความลึกของการสึกหรอกับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ....	99



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันเหล็กกล้าผสมแมงกานีส (Manganese steel, Fe-Mn steel) ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทในประเทศไทย ได้แก่ อุตสาหกรรมรถไฟ ใช้เป็นเหล็กรางรถไฟหรือล้อรถไฟ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องมือในการบดแร่หรือการย่อยหิน อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องมือสำหรับย่อยเปลือกไม้ อุตสาหกรรมกลึงเหล็ก ใช้เป็นเครื่องมือตัดในการย่อยเหล็กหรือตีเหล็กให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก รวมถึงสามารถใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เช่น ใช้ในการบดย่อยวัตถุดิบในระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [1] [2] [3] [4] [5] [6] เป็นต้น

ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน โดยชิ้นส่วนเหล่านี้เกิดการสึกหรอลงเรื่อย ๆ หรือความหนาของชิ้นงานมีขนาดที่ค่อย ๆ บางลง เนื่องด้วยจากการเสียดสี การกระแทก การกัดกร่อนหรือสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่กระทำกับตัวชิ้นงานเองหรือชิ้นงานอื่น ๆ มากระทำกับชิ้นงานเหล่านี้ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพลงจนในที่สุดชิ้นงานเกิดการแตกหัก เสียหายและหมดอายุการใช้งานในที่สุด

เมื่อชิ้นส่วนเครื่องจักรเกิดการชำรุดหรือเสียหายไม่ว่าจะเป็นจากสภาวะแวดล้อม หรือจากการใช้งานส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรมที่นำเหล็กกล้าชนิดนี้มาใช้งาน จำเป็นต้องสั่งซื้อชิ้นส่วนหรืออะไหล่จากต่างประเทศ และต้องใช้ระยะเวลาในการขนส่งและนำเข้า ประกอบกับในการซ่อมบำรุง ถอดประกอบและเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่เหล่านั้น ๆ ในแต่ละครั้งต้องใช้เวลานาน ซึ่งส่งผลให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น ๆ เป็นระยะเวลาอันยาวนานด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเหล็กกล้าผสมแมงกานีส ทั้งให้มีความทนทาน ต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ และสามารถผลิตและจัดส่งได้อย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศดังที่กล่าวมาข้างต้น

อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ มีคุณสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรง และมีความเหนียวสูง [1] [7] อีกทั้งเหล็กกล้าชนิดนี้มีพฤติกรรมการแข็งขึ้น เนื่องจากความเครียด และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดอื่น ๆ [2] โดย

เหล็กกล้าชนิดนี้มีส่วนประกอบของธาตุแมงกานีส (Mn) เป็นส่วนใหญ่ ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสนี้ จะมีความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสอยู่ที่ 3-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%) และธาตุคาร์บอน (C) ในช่วง 0.2-1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%) [8][9] ถ้ามีการเพิ่มธาตุ อื่น ๆ เช่น โครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) และไทเทเนียม (Ti) ชนิดใดชนิดหนึ่งเข้าไปผสมกับเหล็กกล้าชนิดนี้ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพหรือยืดอายุการใช้งานเหล็กกล้าชนิดนี้ให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติหรือเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลอื่น ๆ เช่น พฤติกรรมการแข็งเนื่องจากความเครียด ความแข็งแรง ความแข็งหรือความต้านทานการเสีรูปร่างถาวร ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน เป็นต้น [10] [11] [12]

การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพรวมในการผลิตเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องจากกระบวนการผลิตสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดชะงักบ่อย ลดเวลาในการเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ และการซ่อมบำรุง อย่างไรก็ตามการเจือธาตุหรือเพิ่มเติมธาตุต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาเหล่านั้นมีราคาที่สูง ทำให้ต้นทุนการผลิตเหล็กกล้าแมงกานีสเพื่องานอุตสาหกรรมนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก จึงมีการใช้แมงกานีสมาทดแทนธาตุต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น เพราะแมงกานีสมีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับ ไทเทเนียม โครเมียม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเป้าพัฒนาเหล็กกล้าผสมแมงกานีส โดยมีการเพิ่มธาตุแมงกานีสให้มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นจากปกติ (3-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เพื่อทดแทนธาตุต่าง ๆ ที่มีราคาสูง ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตในทางอุตสาหกรรมนั้นไม่สูงขึ้นมากนัก [13] โดยทั่วไปเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ถูกใช้งานกันโดยทั่วไป จะมีปริมาณแมงกานีสอยู่ที่ 3-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในเชิงพาณิชย์ เหล็กกล้าแมงกานีสจะถูกเรียกกันว่าเหล็กกล้าแมงกานีสต่ำ (Low manganese steel) หากปริมาณแมงกานีสมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าแมงกานีสจะถูกเรียกว่าเหล็กกล้าแมงกานีสกลางและสูง (Medium and high manganese steel) ซึ่งจะมีปริมาณแมงกานีสอยู่ระหว่าง 15-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [11]

อย่างไรก็ตามหลังการเพิ่มปริมาณแมงกานีสให้มีปริมาณสูงกว่าระดับแมงกานีสปกติแล้วสมบัติทางกลต่าง ๆ เช่น พฤติกรรมการแข็งเนื่องจากความเครียด ความแข็งแรง ความแข็งหรือความต้านทานการเสีรูปร่างถาวร ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน ของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงนี้ ยังไม่ปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดในงานวิจัย ดังนั้นในการศึกษานี้จึง มุ่งเน้นทำการศึกษาถึงอิทธิพลของธาตุแมงกานีสที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแมงกานีส เช่น ความต้านทานแรงดึง การแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (การเสีรูปร่าง) ความต้านทานการสึกหรอดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง ความสัมพันธ์ระหว่างเค้นและความเครียด พฤติกรรมการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด ความแข็งเกร่ง

1.2.3 เพื่อศึกษาการสึกหรอเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสที่เปลี่ยนไป

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องและในงานวิจัยต่าง ๆ สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษาได้ ดังนี้

1.3.1. การเติมธาตุแมงกานีสจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ เนื่องจากอะตอมของแมงกานีสที่มากขึ้นจะเข้าแทนที่อะตอมของเหล็ก ทำให้โครงสร้างอะตอมเกิดการบิดเบี้ยวมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความต้านทานการลื่นไถลของระนาบในผลึก

1.3.2. เมื่อระนาบเกิดการลื่นไถลได้ยากเนื่องจากปริมาณที่สูงขึ้นของแมงกานีส ความแข็งของวัสดุถูกคาดหวังว่าจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้นตาม

1.3.3. ปริมาณธาตุแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียดของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสลดลง ทำให้เกิดการยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรนั้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษานี้ได้กระทำการหล่อชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาด 30 มิลลิเมตร ยาว 260 มิลลิเมตร และหลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบนี้เข้าสู่กระบวนการทางความร้อนและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการชุบน้ำ โดยชิ้นงานทดสอบนี้เป็นเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 11 ถึง 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะแบ่งระดับแมงกานีสออกเป็น 3 ระดับ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (11Mn) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกว่า เหล็กกล้าผสมแมงกานีสต่ำ
2. เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (18Mn) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกว่า เหล็กกล้าผสมแมงกานีสกลาง
3. เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (21Mn) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกว่า เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง

ในการทดสอบสมบัติทางกลต่าง ๆ เช่น ความแข็ง ความสัมพันธ์ระหว่างเค้นและความเครียด พฤติกรรมการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด ความแข็งแรง และการสึกหรอ จะกระทำที่อุณหภูมิห้องทั้งสิ้น

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลในเชิงทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาวิธีการ กระบวนการดำเนินงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนของการวิจัย ตลอดจนเครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- 1.5.3 ออกแบบรูปแบบของการดำเนินงานวิจัย และจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- 1.5.4 ลงมือทดลองปฏิบัติ และเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำผลของการดำเนินงานวิจัยไปใช้ในขั้นต่อไป
- 1.5.5 วิเคราะห์ผลของการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดว่ามีข้อมูลในด้านใดบ้างมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง
- 1.5.6 สรุปผลของการดำเนินงานวิจัย พร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

เพื่อพัฒนาเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ให้มีความต้านทานต่อความเสียหายหรือมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ลดการนำเข้าเหล็กหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้าผสมแมงกานีส และในอีกด้านทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้นในเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้งในด้านโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล เช่น

ความแข็ง ความเค้น ความเครียด และอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด ความแข็งแรง และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสีกหรือ อีกรั้งสามารถแนะนำอธิบายถึงความสำคัญของธาตุแมงกานีสและประโยชน์ต่อผู้บริโภคได้อย่างชัดเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของธาตุแมงกานีสที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ได้มีการศึกษาทฤษฎีทางด้านวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยา รวมทั้งศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด และเกิดความถูกต้อง สมบูรณ์มากที่สุด โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การกำเนิดเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

เหล็กกล้าผสมแมงกานีส เป็นเหล็กกล้าที่ถูกค้นพบโดย Robert Abbott Hadfield นักโลหะ วิทยา ชาวอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ. 1882 หรือ พ.ศ. 2425 เหล็กกล้าผสมแมงกานีสมีชื่อที่เรียกทางการค้า หลากหลายชื่อ เช่น Austenitic manganese steel หรือ Hadfield steel หรือ Mangalloy [1] ซึ่ง ในประเทศไทยได้เริ่มมีการผลิตเหล็กชนิดนี้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1953 หรือ พ.ศ. 2496 โดยบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ทั้งนี้การผลิตเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นการใช้ทดแทน ชิ้นส่วนอะไหล่เหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในกระบวนการสั่งซื้อ การนำเข้าและการขนส่งนั้นใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน ทำให้กระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเครื่องจักร เฉพาะทางนั้น ๆ ต้องหยุดชะงักเป็นเวลานาน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าผสม แมงกานีสในประเทศไทยจึงได้เติบโตและขยายสัดส่วนการตลาด และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมมากขึ้นจึงส่งผลให้เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1960 หรือ พ.ศ. 2503 ธุรกิจในด้านโรงงาน หล่อเหล็กได้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากตั้งแต่นั้นมา [14]

โดยทั่วไปเหล็กกล้าผสมแมงกานีสเป็นเหล็กที่มีปริมาณแมงกานีส (Mn) เป็นธาตุเจือหลัก โดย จุดเด่น คือ เมื่อผสมแมงกานีสลงไปในเหล็กกล้าแล้วจะทำให้โครงสร้างผลึกแบบออสเตนไนต์ (Austenite, γ) ในเหล็กกล้ามีความเสถียรมากขึ้น หรือเรียกได้ว่า แมงกานีสเป็นตัว Austenite stabilizer อีกทั้ง แมงกานีสยังคงควบคุมโครงสร้างผลึกแบบออสเตนไนต์ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อทำการอบชุบด้วยความร้อน และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเข้าสู่อุณหภูมิห้อง โดยการควบคุม ไม่ให้เกิดโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ (Martensite, ϵ)

โดยปกติผลึกแบบออสเตนไนต์ในเหล็กกล้าผสมแมงกานีสจะมีความเหนียวและความแข็งแรง สูง แต่เนื่องจากกระบวนการผลิต อาจทำให้เกิดแมงกานีสคาร์ไบด์ (Mn_3C) เนื่องจากการเย็นตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

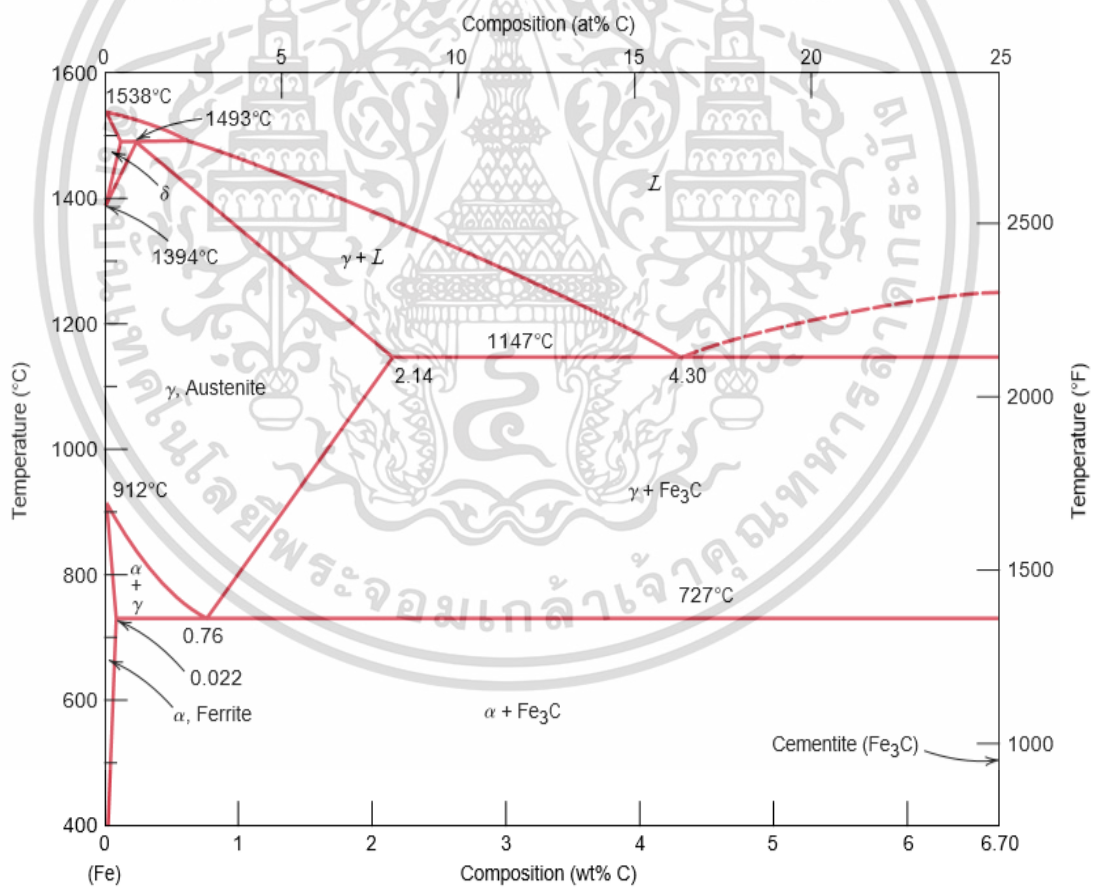
ซ้ำ ๆ ของเหล็กกล้าที่ได้จากกระบวนการหล่อ จึงส่งผลให้เหล็กกล้าผสมแมงกานีสมีความเหนียวลดลง ไปจนถึงมีความเปราะสูง เนื่องจากแมงกานีสคาร์ไบด์จะจับตัวรวมตามขอบเกรน ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานจริงต้องมีการนำไปผ่านกระบวนการอบชุบที่อุณหภูมิประมาณ 1000–1100°C เพื่อสลายแมงกานีสคาร์ไบด์ และหลังจากนั้นนำมาทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ เพื่อให้ได้โครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้มีคุณสมบัติที่เหนียวขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของเหล็กแมงกานีสนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากใช้งานในลักษณะงานที่มีการกระแทก โครงสร้างออสเทนไนต์อาจเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [15] โดยกระบวนการนี้เรียกว่า Strain induced martensitic transformation ซึ่งจะให้ความเหนียวของเหล็กกล้านี้ลดลงและเกิดการสึกกร่อนและแตกหักได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวของเหล็กกล้านี้ ทำให้ชิ้นงานมีการสึกกร่อนอยู่ตลอดเวลาการใช้งาน

เหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้เป็นเหล็กกล้าที่ทนต่อการสึกหรอในลักษณะรับแรงกระแทกและการเสียดสีได้ดีมากกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ [2] เนื่องจากมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ ในสภาพไม่สมดุล (Metastable) [14] ซึ่งได้รับอิทธิพลหลักมาจากธาตุแมงกานีสเป็นสำคัญ โดยในกระบวนการผลิตจะผ่านกระบวนการอบชุบ (Heat treatment) และหลังจากนั้นจะนำไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ (Water quenching) ดังที่กล่าวมาแล้ว โครงสร้างของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสภายหลังจากการอบชุบยังคงมีสภาพเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ เมื่อนำเหล็กกล้าชนิดนี้ไปใช้งาน โครงสร้างออสเทนไนต์ที่อยู่ในสภาพไม่สมดุลนี้ มีสมบัติเด่น คือ มีความเหนียว ทนทานต่อการแตกหักได้ดี จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เนื่องจากผลของความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจากการใช้งาน โครงสร้างมาร์เทนไซต์นี้มีคุณสมบัติทางด้านความแข็งที่สูงกว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ ทำให้เหล็กกล้าผสมแมงกานีสมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการใช้งานจะเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน หรือบริเวณที่ได้รับแรงกระแทก หรือการเสียดสีให้เกิดการเสียดสีเท่านั้น โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่อยู่ลึกลงไปจากผิววัสดุ นั้นยังคงสภาพเป็นโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ ทำให้เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสามารถรักษาสภาพความเหนียวของชิ้นงานไว้ไม่ให้เกิดการแตกกร้าว ทำให้ชิ้นงานใช้งานได้อย่างทนทาน ในการอธิบายโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าทั่วไป หรือเหล็กกล้าผสมแมงกานีส สามารถอธิบายได้โดยแผนภาพของเฟส (Phase diagram) โดยทั่วไปการศึกษาแผนภาพเฟสจะทำให้สามารถระบุโครงสร้างผลึกที่ส่วนผสมทางเคมีต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน และแผนภาพเฟสนี้มีความสำคัญในการควบคุมกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) รวมถึงการออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ของเหล็กกล้า ซึ่งแผนภาพเฟสที่จะกล่าวต่อไปนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเหล็กกับธาตุคาร์บอน และธาตุเหล็กกับธาตุแมงกานีส ซึ่งจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน (Fe-C)

แผนภาพเฟสหรือเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน (Fe-C) เป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเหล็ก ธาตุคาร์บอนและอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพเฟสที่อุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่แตกต่างกันเหล็กจะปรากฏเฟสที่แตกต่างกันได้หลายโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 2.1 ซึ่งแผนภาพเฟสเหล็กและคาร์บอนนี้ไม่ได้อยู่ในสถานะที่สมดุลจริงเนื่องจากสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) หรือที่เรียกว่า ซีเมนไทต์ (Cementite) นี้สามารถสลายตัวไปเป็นเหล็กและคาร์บอน (แกรไฟต์, C = 100% โดยน้ำหนัก) ได้ อย่างไรก็ตามโครงสร้างเหล็กที่ปรากฏจากแผนภาพเฟสนี้ ประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α), โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite, γ), โครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite, Fe_3C) และโครงสร้างเพอร์ไรต์ (Ferrite, δ)



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมระหว่างธาตุเหล็กและคาร์บอน (Fe-C) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ หรือ อัลฟาเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) และอะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างผลึกของเหล็กแบบ BCC (Body centered cubic) โดยโครงสร้างนี้จะคงตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 912°C ในโครงสร้างผลึกชนิดนี้คาร์บอนจะสามารถละลายในเฟอร์ไรต์ได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งมีขีดจำกัดในการละลาย (Solid solubility) สูงสุดเท่ากับ 0.022% โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 727°C เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่น ๆ โครงสร้างประเภทนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่น้อย

โครงสร้างออสเตนไนต์ (Austenite, γ) เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) เช่นเดียวกับโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และอะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างผลึกของเหล็กแบบ FCC (Face centered cubic) โดยโครงสร้างนี้จะคงตัวที่อุณหภูมิ $727^{\circ}\text{C} - 1493^{\circ}\text{C}$ และมีความสามารถในการละลายของคาร์บอนสูงกว่าเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) ซึ่งมีค่าสูงสุด คือ 2.14% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1147°C

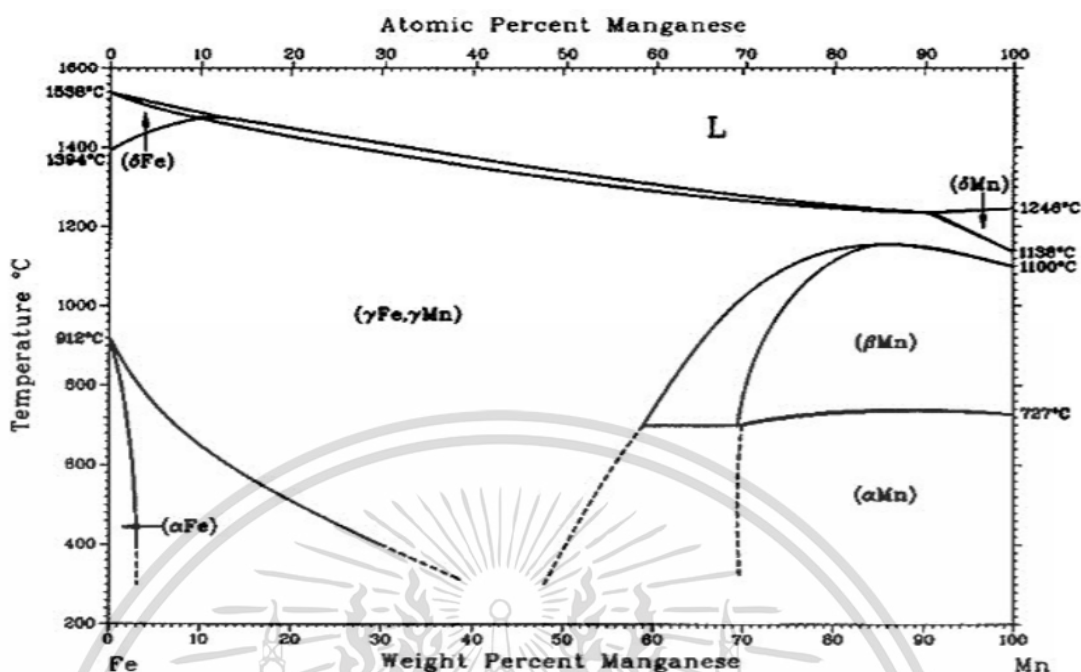
โครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite, Fe_3C) เป็นสารประกอบเชิงโลหะ ระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุคาร์บอน (C) ในอัตราส่วนอะตอม 3:1 โครงสร้างซีเมนไทต์มีสมบัติเด่น คือ ความแข็ง อย่างไรก็ตามโครงสร้างซีเมนไทต์มีความเปราะค่อนข้างสูง เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงนั่นเอง ซึ่งปริมาณคาร์บอนสูงสุดที่ 6.7% โดยน้ำหนัก และเหล็ก 93.3% โดยน้ำหนัก

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ หรือ เดลต้าเฟอร์ไรต์ (Ferrite, δ) เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างผลึกของเหล็กแบบ BCC (Body-Centered Cubic) เช่นเดียวกับอัลฟาเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) แต่คงตัวที่อุณหภูมิระหว่าง $1394^{\circ}\text{C} - 1538^{\circ}\text{C}$ คาร์บอนจะสามารถละลายได้สูงสุดถึง 0.1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1493°C

2.1.3 แผนภาพเฟสของเหล็ก-แมงกานีส (Fe-Mn)

แผนภาพเฟสของเหล็ก-แมงกานีส (Fe-Mn) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเหล็ก ธาตุแมงกานีสและอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพเฟสที่อุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างธาตุเหล็กและธาตุแมงกานีสที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนปริมาณของธาตุเหล็กและธาตุแมงกานีสนี้จะมีปริมาณที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายธาตุทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่เกิดขึ้นปรากฏจากแผนภาพเฟสนี้ประกอบไปด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α), โครงสร้างออสเตนไนต์ (Austenite, γ) และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite, δ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมระหว่างธาตุเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) [17]

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ หรือ อัลฟาเฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของแมงกานีสจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็กแบบ BCC (Body centered cubic) ในโครงสร้างนี้แมงกานีสจะสามารถละลายในเฟอร์ไรต์ได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งมีขีดจำกัดการละลาย (Solid solubility) สูงสุดอยู่ที่ 3% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 300°C อย่างไรก็ตามการเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์นี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 912°C แล้วเกิดการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อมีการเพิ่มธาตุแมงกานีสให้สูงขึ้น โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite, γ) จะปรากฏสัดส่วนที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงแมงกานีสที่มีปริมาณประมาณ 12-13% โดยน้ำหนัก โครงสร้างออสเทนไนต์สามารถคงสภาพได้ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1,450°C เมื่อปริมาณแมงกานีสเพิ่มมากขึ้นไปจนถึง 100% โดยน้ำหนัก การคงสภาพของโครงสร้างออสเทนไนต์นี้จะลดลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 1,110°C – 1,138°C

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ หรือ เดลต้าเฟอร์ไรต์ (Ferrite, δ) เป็นโครงสร้างที่มีธาตุแมงกานีสแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็กแบบ BCC (Body centered cubic) เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบอัลฟา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์ไรต์ (Ferrite, α) โดยโครงสร้างเตลต้าเฟอร์ไรต์นี้มีขีดจำกัดของการละลายธาตุแมงกานีสถึงแค่ประมาณ 10% โดยน้ำหนัก และกระทำ ณ ช่วงอุณหภูมิ 1,400°C - 1,538°C

เมื่อเปรียบเทียบเฟสไดอะแกรมระหว่างเหล็ก-คาร์บอน และเหล็ก-แมงกานีสที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และ 2.2 พบว่าเมื่อเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุแมงกานีสจะส่งผลทำให้สัดส่วนของโครงสร้างออสเตนไนต์ (Austenite, γ) มีมากขึ้น เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่มีธาตุแมงกานีสผสมอยู่ ซึ่งจากการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าธาตุแมงกานีสเป็นธาตุที่สร้างเสถียรภาพให้กับโครงสร้างออสเตนไนต์ในเหล็กกล้าได้เป็นอย่างดี

2.1.4 การแปลงเฟส (Phase transformation)

ในกระบวนการทางโลหะวิทยาของการผลิตเหล็กกล้า จำเป็นต้องมีการกำหนดปัจจัยเพื่อให้ได้ซึ่งโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าที่มีความจำเพาะเจาะจง และเพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกหรือเฟสเฉพาะตามที่ต้องการจากเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ กระบวนการแปลงเฟสหรือกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทางความร้อนและจำเป็นต้องมีการควบคุมทั้งอุณหภูมิและเวลาไปพร้อม ๆ กัน ในหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายถึงกระบวนการการแปลงเฟสโดยพิจารณาแผนภาพการแปลงเฟส 2 ลักษณะ คือ การแปลงเฟสที่มีการกำหนดอุณหภูมิคงที่ (Isothermal phase transformation) หรือในบางครั้งถูกเรียกว่า Time-temperature transformation diagram และการแปลงเฟสที่มีการเย็นตัวของอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่อง (Continuous phase transformation) ดังนี้

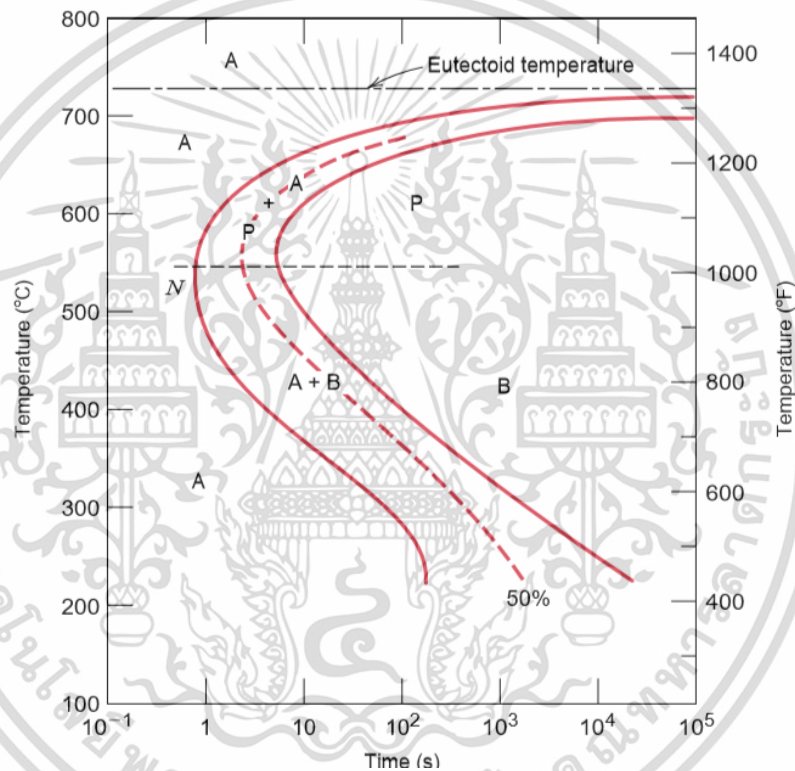
2.1.4.1 Time-temperature transformation diagram (TTT diagram)

แผนภาพการแปลงเฟสที่มีการกำหนดอุณหภูมิคงที่เป็นแผนภาพที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสโดยในระหว่างกระบวนการจะกำหนดให้อุณหภูมิคงที่เมื่อเวลาในการแปลงเฟสดำเนินไป โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นทำโลหะให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิที่ต้องการและรักษาอุณหภูมินั้น ๆ ให้คงที่ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกหรือเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์

รูปที่ 2.3 เป็นแผนภาพการแปลงเฟสที่มีการกำหนดอุณหภูมิคงที่ หรือ TTT diagram ของเหล็กกล้า-คาร์บอน ที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์ (Eutectoid) ซึ่งด้านบนสุดจะแสดงเส้นอุณหภูมิยูเทคตอยด์ (727°C) โครงสร้างของเหล็กกล้าเหนือเส้นนี้จะเป็นมีโครงสร้างเป็นออสเตนไนต์ (γ) ทั้งหมด เส้นส่วนโค้งทางซ้ายสุดแสดงถึงจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในพื้นที่ทางซ้ายมือของเส้นนี้ เหล็กกล้ายูเทคตอยด์จะมีโครงสร้างเป็นออสเตนไนต์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล และพื้นที่ด้านขวาของเส้นโค้งนี้เป็นพื้นที่ของเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) หรือ เบนไนต์ (Bainite) เส้นประตรงกลางจะแสดงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากโครงสร้าง ออสเตนไนต์ไปเป็นเพิร์ลไลต์ หรือเบนไนต์แล้ว 50% ส่วนโค้งทางขวามือแสดงจุดสิ้นสุดของการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนต์เป็นเพิร์ลไลต์ หรือเบนไนต์ ดังนั้นทางขวามือของเส้นนี้จะเป็น ผลผลิตของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตนไนต์ จุดหักโค้งทางซ้ายมือ เรียกว่า “จุกของกราฟ (Nose)” เป็นจุดที่แบ่งระหว่างโครงสร้างเพิร์ลไลต์และเบนไนต์ ในส่วนพื้นที่จุกด้านบนจะเป็น โครงสร้างเพิร์ลไลต์ และในส่วนพื้นที่จุกด้านล่างจะเป็นโครงสร้างเบนไนต์

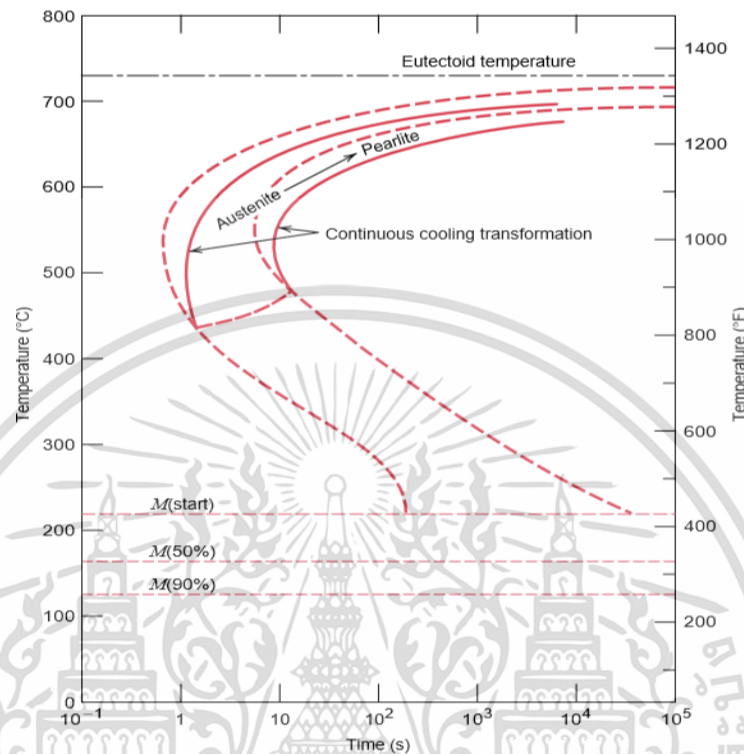


รูปที่ 2.3 TTT diagram ของเหล็กและคาร์บอน (Fe-C) ที่ส่วนผสมยูเทคติก [18]

2.1.4.2 Continuous cooling transformation diagram (CCT diagram)

แผนภาพการแปลงเฟสที่มีการเย็นตัวของอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องหรือ CCT diagram เป็นไดอะแกรมที่อธิบายการเปลี่ยนเฟสเทียบกับเวลานั้น ๆ เมื่อปล่อยให้มีการลดลงของ อุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง CCT diagram จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับ TTT diagram เพียงแต่เส้นของกราฟ จะถูกเลื่อนไปทางด้านขวาและต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจะมีระยะเวลานานขึ้น เมื่อโลหะมีอุณหภูมิลดลงหรือมีการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง โครงสร้าง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

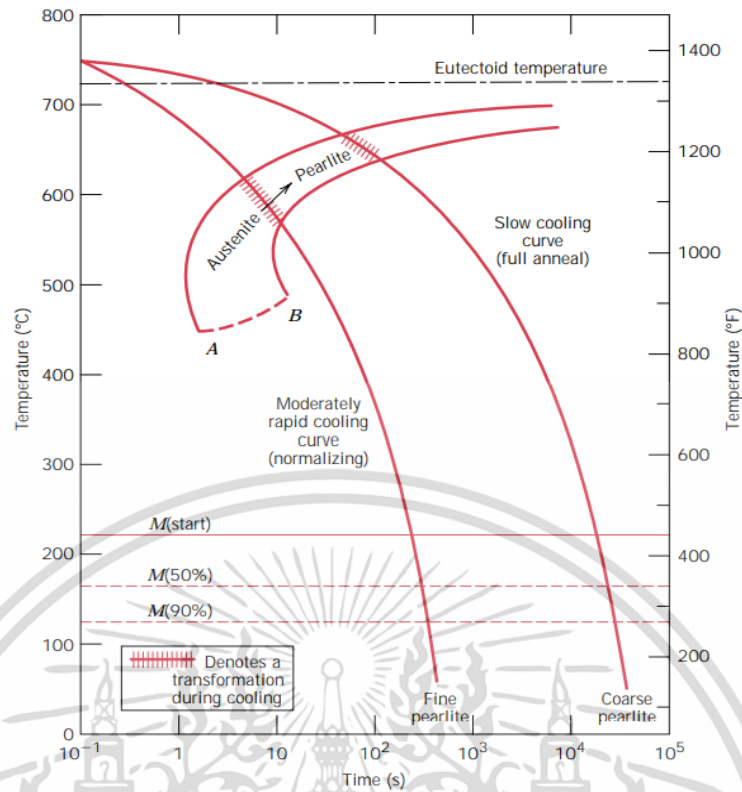
สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ (Austenite) เป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ได้เช่นเดียวกับการใช้แผนภาพการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบอุณหภูมิคงที่



รูปที่ 2.4 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องของเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ส่วนผสมยูเทคติก [19]

โดยทั่วไปการใช้ CCT diagram สามารถกำหนดให้การลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องเป็นไปได้ใน 2 ลักษณะหลัก ๆ เพื่อให้ได้โครงสร้างจำเพาะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (Fast cooling) ซึ่งภายหลังจากการแปลงเฟสโดยอาศัยกระบวนการเช่นนี้โครงสร้างที่ปรากฏจะเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่มีโครงสร้างผลึกหรือขนาดผลึกละเอียด (Fine pearlite) ในทางกลับกันการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ (Slow cooling) โครงสร้างที่ปรากฏยังคงเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ แต่โครงสร้างที่ปรากฏนี้นั้นจะมีโครงสร้างผลึกหรือขนาดผลึกหยาบ (Coarse pearlite) ซึ่งเส้นทางของการแปลงเฟสแบบลดอุณหภูมิต่อเนื่องอย่างรวดเร็วและอย่างช้า ๆ แสดงในรูปที่ 2.5

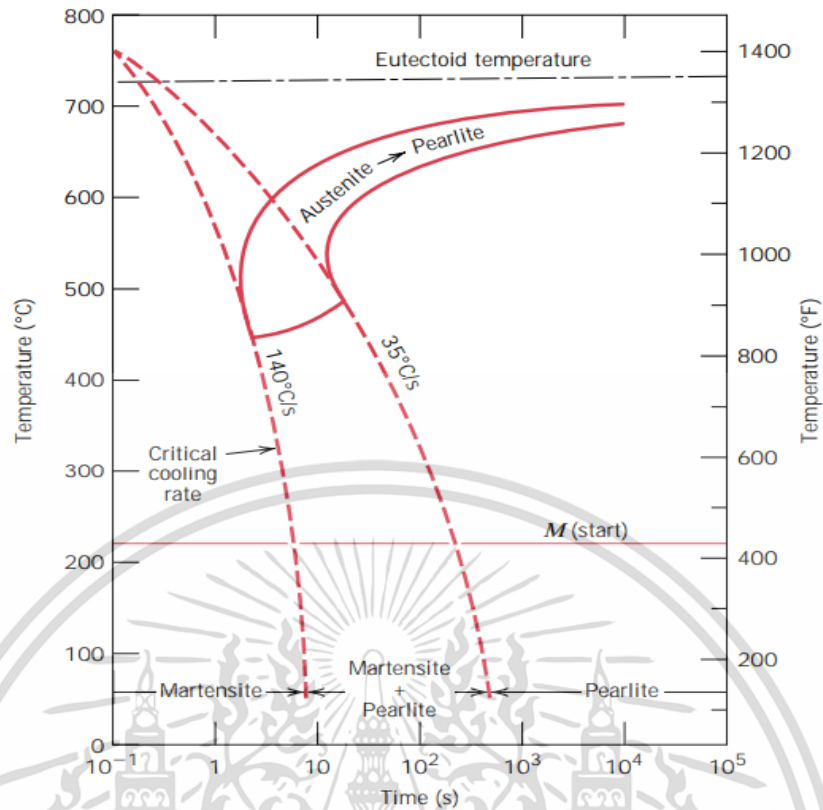
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและอย่างช้า [19]

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโครงสร้างจากออสเตนไนต์ไปเป็นเฟิร์ลไลต์โดยอาศัยการลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องนี้จะถูกกำหนดขอบเขตไว้ด้วยอัตราในการเย็นตัว (Cooling rate) โดยในกรณีของเหล็กกล้าที่ส่วนผสมยูเทคติกที่อัตราการเย็นตัวระหว่าง 35 ถึง 140 องศาเซลเซียสต่อวินาที โครงสร้างจากออสเตนไนต์จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟิร์ลไลต์ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หากอัตราการเย็นตัวเกิดขึ้นสูงกว่า 140 องศาเซลเซียสต่อวินาที โครงสร้างจะไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟิร์ลไลต์ได้ แต่จะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) แทนตำแหน่งที่มีอัตราการเย็นตัวสูงสุดในรูปที่ 2.6 นี้สามารถระบุได้ว่าเป็นจุดวิกฤต (Critical point) ในการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้ โครงสร้างผลึกแบบมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้านี้เป็นโครงสร้างที่มีความไม่เสถียร (Metastable) จึงไม่มีโครงสร้างนี้ปรากฏในแผนภาพเฟสระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ถึงแม้โครงสร้างนี้จะไม่เสถียรแต่ในทางการใช้งานทางวิศวกรรมโครงสร้างผลึกนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าโครงสร้างผลึกชนิดอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพการแปลงเฟสของการลดอุณหภูมิโดยแสดงโครงสร้างในแต่ละช่วงของอัตราการเย็นตัว [19]

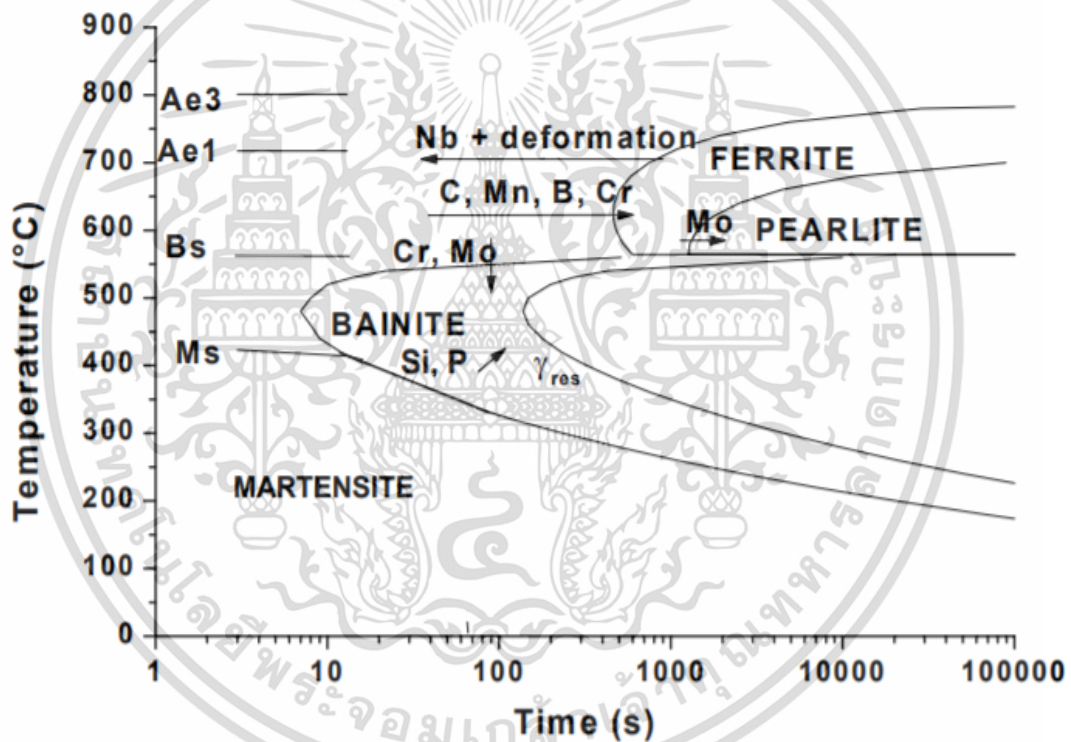
2.1.4.3 ผลของธาตุเจือต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้า

นอกเหนือจากคาร์บอนที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กแล้ว เหล็กมักมีการเจือธาตุอื่น เพื่อให้มีสมบัติด้านอื่น ๆ ดีขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการเจือธาตุมักมีอิทธิพลต่อตำแหน่งของเส้นโค้งและอัตราการเย็นตัววิกฤตของการเปลี่ยนเฟสทั้งในแผนภาพการแปลงเฟสโดยอาศัยอุณหภูมิคงที่ (TTT diagram) และการลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง (CTT diagram) รูปที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของธาตุเจือต่อตำแหน่งของเส้นโค้งของการเปลี่ยนเฟส จากตัวอย่างของธาตุเจือในรูปแบบจะเห็นได้ว่าคาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) โครเมียม (Cr) โบรอน (B) และโมลิบดีนัม (Mo) เปลี่ยนตำแหน่งของเส้นโค้งการเปลี่ยนเฟสให้ขยับไปทางด้านขวามือในแผนภาพการแปลงเฟสโดยอาศัยอุณหภูมิคงที่ (TTT diagram) ซึ่งจากการเปลี่ยนตำแหน่งนี้ส่งผลให้มีพื้นที่ทางซ้ายของเส้นโค้งการเปลี่ยนเฟสมากขึ้น พื้นที่ทางด้านซ้ายนี้เป็นพื้นที่ที่ยังคงให้โครงสร้างออสเทนไนต์คงสภาพได้อยู่แต่จะอยู่ในความไม่เสถียร หรือในทางกลับกันโครงสร้างเฟิร์ลโลอิด์จะเกิดได้ยากขึ้นในระหว่างการเย็นตัวนั่นเอง ในขณะที่โครเมียม (Cr) และโมลิบดีนัม (Mo) จะเปลี่ยนตำแหน่งของเส้นโค้งการเปลี่ยนเฟสให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยับไปทางด้านขวามือและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสต่ำลงในเวลาเดียวกันในแผนภาพการแปลงเฟสโดยอาศัยอุณหภูมิกงที่ (TTT diagram)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาธาตุแมงกานีส เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ซึ่งหากพิจารณาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสจะพบว่าจมูกของเส้นโค้งการเย็นตัว (Nose) ขยับไปทางขวามือเมื่อมีการเจือธาตุแมงกานีส ทำให้มีพื้นที่ทางซ้ายมือมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่โครงสร้างอสเตนไนต์ยังคงสภาพได้อยู่ หรือในทางกลับกันโครงสร้างเฟอร์ไรต์เกิดได้ยากขึ้นในระหว่างการเย็นตัว ซึ่งจากผลของการขยับเส้นโค้งการเย็นตัวนี้ หากในกระบวนการผลิตมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้โครงสร้างผลึกและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแมงกานีสนี้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.7 แผนภาพการแปลงเฟสของอุณหภูมิกงที่ (TTT diagram) โดยแสดงอิทธิพลของธาตุเจือ

[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

2.1.5.1 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานการเสียรูปอย่างถาวรของโลหะ (Resistance to plastic deformation) การทดสอบวัดความแข็งนี้จะใช้วัสดุที่มีลักษณะที่แข็งกว่า เช่น เหล็ก เพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปร่างที่แตกต่างกัน เช่น วงกลม พีระมิด โคน หรือกรวย เป็นตัวกด (Indenter) กดลงไปบนวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยตัวกดจะทำมุม 90 องศากับวัสดุและการกดจะกดลงไปอย่างช้า ๆ และวัดรอยกดหรือรอยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบริเวณผิววัสดุนั้น ในทางวิศวกรรมมีการทดสอบวัดค่าความแข็งทั้งหมด 4 แบบ คือ Brinell, Vickers, Knoop และ Rockwell ดังแสดงในรูปที่ 2.8

Shape of Indentation						
Test	Indenter	Side view	Top view	Load	Formula for hardness number	
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.772P}{d^2}$	
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{P}$	
Rockwell						
A } C } D }	Diamond cone			60 kg	$R_A =$	100-500f
				150 kg	$R_C =$	
				100 kg	$R_D =$	
B } F } G }	1/2-in-diameter steel sphere			100 kg	$R_B =$	130-500f
				60 kg	$R_F =$	
				150 kg	$R_G =$	
E	1/2-in-diameter steel sphere			t	$R_E =$	

Source: After H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials," vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

รูปที่ 2.8 ประเภทของการทดสอบความแข็ง [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Brinell เป็นการทดสอบความแข็งโดยหัวกดจะเป็นหัวบอล ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบทำโดยใช้หัวบอลกดลงบนชิ้นงานจนเกิดรอย ซึ่งรอยกดจะมีลักษณะคล้ายครึ่งวงกลม ในการคำนวณความแข็งที่ได้จากการทดสอบนี้ ขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวแปรหลักที่จะแสดงค่าความแข็ง และให้ความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นในการป้องกันการความผิดพลาดของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังการกด ควรใช้ค่ามาตรฐานของน้ำหนักที่ใช้ในการกดลงบนผิวของชิ้นงาน ถ้าความแข็งของชิ้นงานมีระดับความแข็งมาก เช่น เหล็กกล้า ควรใช้น้ำหนักกด 3,000 กิโลกรัม ถ้าความแข็งของชิ้นงานมีระดับรองลงมา เช่น ทองเหลือง อลูมิเนียม ควรใช้น้ำหนักกด 2,000 หรือ 1,000 กิโลกรัม ตามลำดับ หน่วยความแข็งชนิดนี้ใช้ชื่อย่อว่า HB ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบนี้ คือ สามารถวัดความแข็งบนชิ้นงานที่มีพื้นผิวไม่เรียบสม่ำเสมอ มีรอยขีดข่วนเล็กน้อย ทำให้ค่าความแข็งที่ได้เกิดความผิดพลาดน้อย ส่วนข้อเสีย คือ สามารถเกิดความผิดพลาดจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด และไม่สามารถวัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบางได้

Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยหัวกดจะเป็นหัวเพชรทรงพีรามิด ซึ่งมีมุมระหว่างหน้าตรงข้ามของพีรามิด เท่ากับ 136 องศา วิธีการทดสอบทำโดยใช้หัวเพชรทรงพีรามิดกดลงบนชิ้นงานจนเกิดรอยเป็นรูปพีรามิดฐานสี่เหลี่ยม ในการวัดความแข็งนี้ควรเลือกน้ำหนักกดชิ้นงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้รอยกดเป็นรูปพีรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ โดยทั่วไปน้ำหนักที่ใช้กดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1 กิโลกรัม หน่วยความแข็งชนิดนี้ใช้ชื่อย่อว่า HV ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบนี้ คือ สามารถวัดค่าความแข็งในวัสดุได้หลากหลายชนิดและให้ความแม่นยำสูง

Knoop เป็นการทดสอบความแข็งโดยหัวกดจะเป็นหัวเพชรทรงพีรามิด การทดสอบแบบนี้มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบ Vickers แต่ในที่นี้หัวกดจะมีมุมระหว่างหน้าตรงข้ามของพีรามิด เท่ากับ 130 องศา และ 172 องศา 30 ลิปดา ซึ่งเป็นหัวกดพีระมิดที่มีลักษณะเรียวยาว จึงทำให้มีความยาวของเส้นทแยงมุมที่ยาวกว่าแบบ Vicker ประมาณ 7 เท่า วิธีการทดสอบทำโดยใช้หัวเพชรทรง พีรามิดกดลงบนชิ้นงานจนเกิดรอยเป็นรูปพีรามิดฐานสี่เหลี่ยม รอยที่เกิดขึ้นสามารถเห็นรอยที่ชัดเจน แม้จะใช้แรงกดที่ต่ำ หน่วยความแข็งชนิดนี้ใช้ชื่อย่อว่า HK ข้อดี คือ สามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก หรือบางได้ เช่น แผ่นฟิล์มที่บาง หรือวัสดุที่เปราะ แตกง่าย เช่น แก้ว เซรามิก หรือวัสดุที่มีลักษณะยวรี ข้อเสีย คือ ไม่สามารถทดสอบกับชิ้นงานใหญ่ได้ และมีเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ถ้าชิ้นงานทดสอบไม่มีพื้นผิวที่เรียบ

Rockwell เป็นการทดสอบความแข็งโดยมีหัวกด 2 แบบ คือ หัวกดที่ทำมาจากเพชร ลักษณะจะเป็นทรงกรวยปลายมน ทำมุมด้านใน 120 องศา และหัวกดที่ทำมาจากเหล็กแข็ง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอลอยู่ในช่วง 1.6-12.7 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบทำโดยใช้ หัวกดกดลงบนชิ้นงานจนเกิดรอย แล้วดูค่าความลึกของรอยกด ความลึกของรอยกดจะเป็นตัวบ่งชี้ ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็ง หน่วยความแข็งชนิดนี้ใช้ชื่อย่อว่า HRC การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ข้อดี คือ สามารถทำการทดสอบได้อย่างรวดเร็ว และสามารถอ่านค่าความแข็งที่ได้จากเครื่องมือวัดโดยตรง และยังสามารถใช้ทดสอบชิ้นงานได้หลากหลายวัสดุ เพราะสามารถเลือกหัวกดได้หลายขนาด ประกอบกับแรงกดได้หลายระดับ เพื่อให้เกิดความเหมาะสม ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งที่เหมาะสมกับชิ้นงานอย่างแม่นยำ ข้อเสีย คือ ชิ้นงานที่ทดสอบต้องมีผิวเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน เพราะถ้าผิวไม่เรียบ จะส่งผลต่อค่าความแข็งที่ได้ เนื่องจากรอยกดส่วนใหญ่จะขนาดเล็กและไม่ลึกมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.2-1 มิลลิเมตร

2.1.5.2 ความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain)

ความเค้น (Stress) คือ แรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยแรงกระทำภายนอกนี้มีความสมดุล หรือเท่ากับแรงต้านทานภายใน ซึ่งในความเป็นจริงต้องเป็นแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุ โดยทั่วไปสามารถแบ่งความเค้นได้ออกเป็น 5 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ ดังแสดงในรูปที่ 9 ดังนี้

1) ความเค้นแรงกดอัด (Compressive stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉาก 90 องศา กับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยจะพยายามอัดเนื้อวัสดุให้มีขนาดสั้นลง

2) ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉาก 90 องศา กับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยจะพยายามแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน

ความเค้นแรงกดอัด และความเค้นแรงดึง สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

โดยที่ σ = ความเค้น หน่วยเป็น พาสคัล (Pa)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ หน่วยเป็น นิวตัน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดที่แรงภายนอกมากระทำ หน่วยเป็น ตารางเมตร (m²)

3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกัน มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear stress) ทหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางที่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

ความเค้นแรงเฉือน สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$\tau = \frac{S}{A} \quad (2)$$

- โดยที่ τ = ความเค้นแรงเฉือน หน่วยเป็น ปาสคัล (Pa)
 S = แรงเฉือนที่กระทำ **surface** A หน่วยเป็น นิวตัน (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดที่แรงเฉือนมากระทำ หน่วยเป็น ตารางเมตร (m²)

4) ความเค้นแรงบิด (Torsion stress) เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงบิด หรือ ทอร์ก (Torque) หมุนรอบแกนหมุนใด ๆ ซึ่งกระทำต่อชิ้นงานนั้น ๆ

ความเค้นแรงบิด สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (3)$$

- โดยที่ τ = ความเค้นแรงเฉือน หน่วยเป็น ปาสคัล (Pa)
 T = แรงบิดที่ใช้ในการบิดของเพลลา
 ρ = ระยะห่างจากแนวแกนกลางเพลลา
 J = Polar moment of inertia

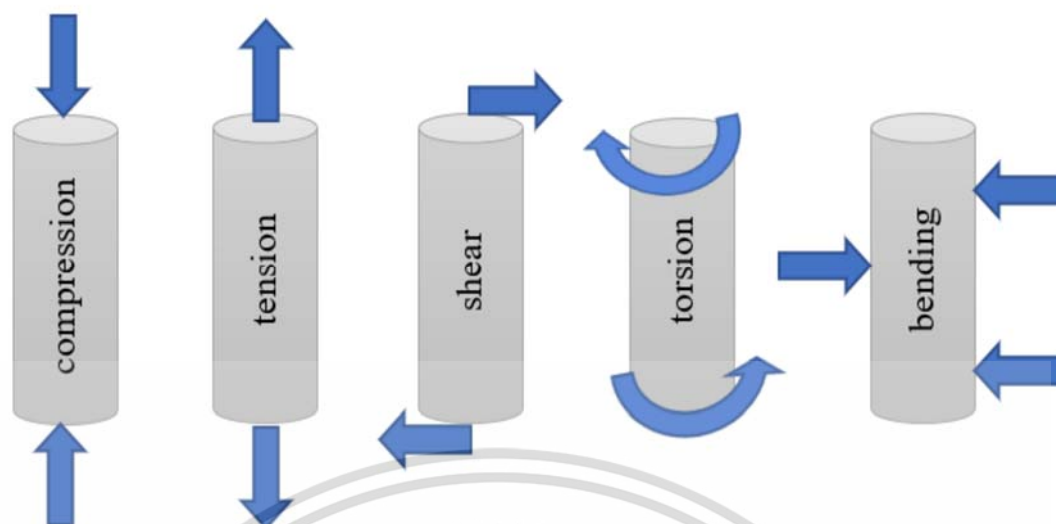
5) ความเค้นแรงดัด (Bending stress) เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงดัด ถ้าเป็นคานาก็จะเกิดขึ้นที่หน้าตัดของคานาโดยตั้งฉากกับแกนตามความยาวของคานานั้น

ความเค้นแรงดัด สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (4)$$

- โดยที่ σ = ความเค้นแรงดัด หน่วยเป็น ปาสคัล (Pa)
 M = โมเมนต์ที่ใช้ในการดัดของเพลลาที่จุดแกนสะเทิน (Neutral axis)
 y = ระยะห่างจากแนวแกนสะเทิน (Neutral axis) ถึงแนวระนาบ (Plane)
 I = Centroidal moment of inertia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ประเภทของแรงที่มากระทำต่อชิ้นงาน [22]

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) ซึ่งเกิดจากแรงภายนอกมากระทำ หรือ เกิดจากความเค้นมากระทำ โดยผลของการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุนั้นเกิดมาจากการเปลี่ยนรูปร่าง ความเครียด หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) ความเครียดแบบคืนรูป หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic strain or elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงกระทำออกมาแล้ว วัสดุนั้นสามารถกลับคืนสภาพได้ดั้งเดิม หรือตำแหน่งเดิม เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในสปริง หรือยางยืด ตัวอย่างเช่นถ้าดึงวัสดุจำพวกสปริงหรือยางยืดแล้วปล่อยการดึงนั้น วัสดุเหล่านี้จะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมเหมือน ก่อนการดึง

2) ความเครียดแบบคงรูป หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic strain or plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงกระทำออกมาแล้ว วัสดุนั้นไม่สามารถกลับคืนสภาพได้ดั้งเดิม หรือตำแหน่งเดิม คือ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเสียรูปไปแล้วก็ยังคงสภาพการเสียรูปนั้น ๆ ต่อไป

ในวัสดุทุกชนิดสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ทั้งสองแบบ โดยหากวัสดุนั้น ๆ มีแรง หรือความเค้นมากระทำ ถ้ามีแรง หรือความเค้นมากระทำไม่เกินขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit) แล้ว วัสดุนั้น ๆ ก็จะสามารถคืนรูปได้ (Elastic deformation) แต่ถ้าแรง หรือความเค้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำมีมากจนเกินขีดจำกัดการคืนรูป วัสดุนั้น ๆ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างถาวร (Plastic deformation)

ความสามารถคำนวณความเค้นได้ตามสมการ ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

โดยที่ ε = ความเครียด
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลง
 L_0 = ความยาวเดิม

2.1.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงการเสียรูป คือ ช่วงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic region) และช่วงพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวร (Plastic region) ในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่น เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงจะเกิดการยืดตัวออก หรือหดตัวตามทิศทางของแรง เมื่อเอาแรงที่กระทำนี้ออกแล้ว วัสดุสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยที่ไม่เกิดการเสียรูป เรียกคุณสมบัตินี้ว่า ความยืดหยุ่น (Elasticity) และวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ เรียกว่า วัสดุยืดหยุ่น (Elastic material) ในทางตรงกันข้ามจะเป็นช่วงพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวร คือ ถ้าแรงที่กระทำนี้มีมากเกินไป เมื่อเอาแรงที่กระทำนี้ออกแล้ว วัสดุไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนี้แสดงดังรูปที่ 2.10 ถ้าพิจารณาในช่วงรอยต่อระหว่างการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและการเสียรูปแบบถาวรสามารถระบุได้จากความเค้นที่จุดคราก (Yield strength) และเมื่อความเค้นเกิดขึ้นสูงสุด วัสดุจะเกิดคอคอดเกิดขึ้น ซึ่งหากพิจารณาการเสียรูปก่อนการเกิดคอคอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างสม่ำเสมอ

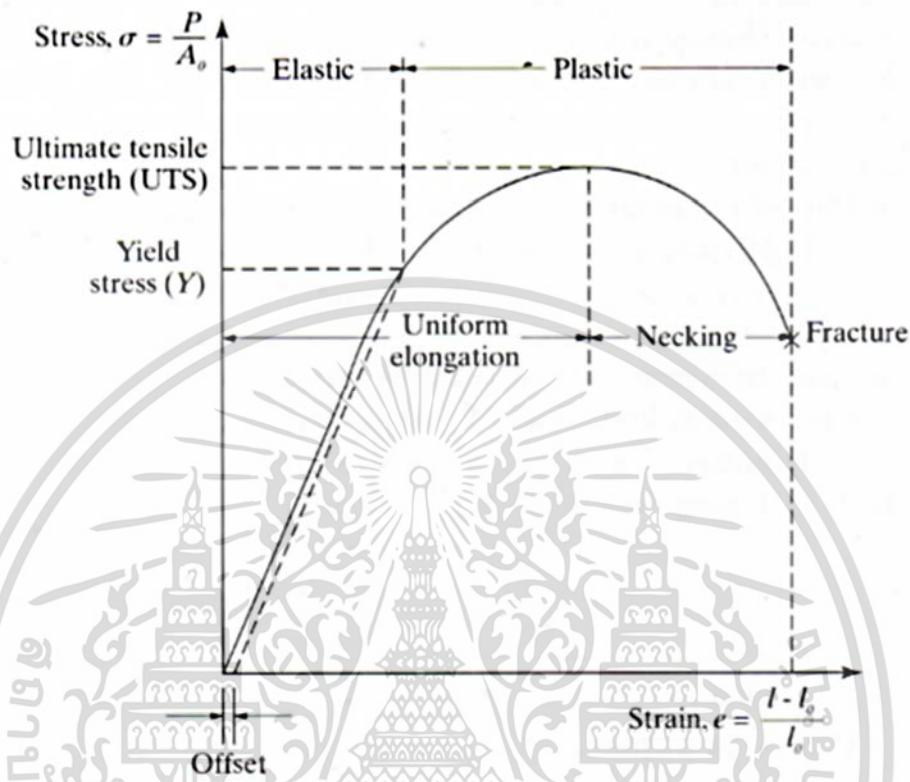
พฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นสามารถอธิบายได้โดยกฎของโรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) หรือเรียกว่า กฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งความเค้นจะแปรผันโดยตรงกับความเครียดเป็นไปตามสมการที่ 6

นั่นคือ
$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

หรือ
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E = ค่าคงที่ของวัสดุ เรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity หรือ Young's modulus)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [23]

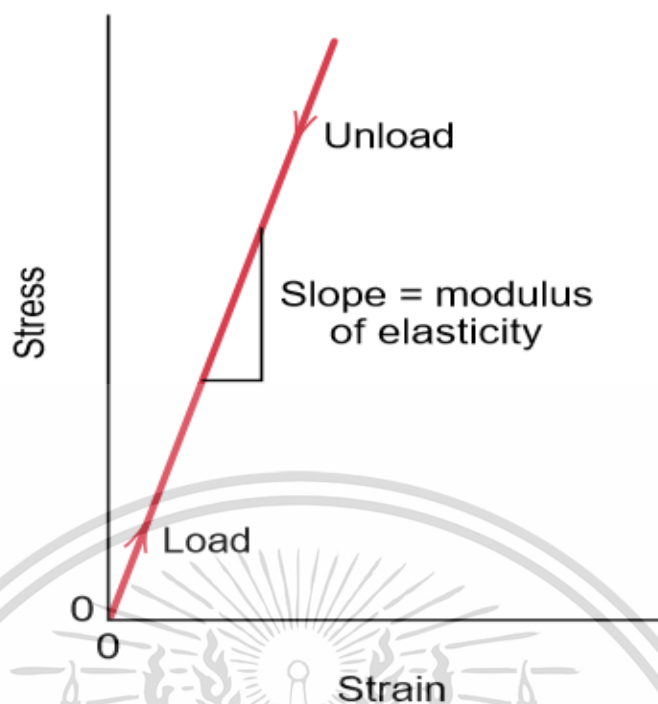
จากการทดลองแรงดึงในวัสดุต่าง ๆ โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) พบว่าภายในขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของวัสดุ ส่วนที่ยึดตัวของวัสดุจะแปรผันตามขนาดของแรงดึง (P) และความยาว (L) ของท่อนวัสดุ แต่จะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด (A) ของท่อนวัสดุ

นั่นคือ

$$\Delta L = \frac{PL}{EA} \quad (8)$$

และจากสมการที่ 6 พบว่า ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก และเนื่องจากความเครียดไม่มีหน่วย ดังนั้นค่า E จึงมีหน่วยเดียวกันกับความเค้น คือ มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือเรียกได้ว่าค่า E คือ ความชัน (Slope) ของเส้นตรง ดังรูปที่ 2.11 [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [24]

พฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวร (Permanent deformation) เกิดจากวัสดุที่มีแรงมากระทำจนถึงจุดที่เกิดพิกัดที่จะสามารถทนได้ โดยเมื่อเอาแรงออก วัสดุนั้นไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปไปอย่างถาวร โดยขบวนการที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรนั้นมี 3 แบบ ดังนี้

1) Slip Deformation คือ การเคลื่อนตัว หรือการเลื่อนตัวผ่านกันระหว่างโครงสร้างผลึกในแนวระนาบของอะตอม การเคลื่อนตัวแบบนี้เป็นการเคลื่อนที่แบบถาวร นั่นหมายความว่า การเคลื่อนที่แบบนี้โครงสร้างผลึกไม่สามารถกลับมาอยู่ในสภาพเดิมได้อีก ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเค้นมากระทำก็ตาม

2) Twinning Deformation คือ กระบวนการเสียรูปแบบถาวร ที่เกิดขึ้นจากแนวระนาบของโครงสร้างผลึกที่เกิดการถูกเฉือนออกเป็น 2 ส่วนซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกัน หรือเรียกได้ว่าเหมือนกันเลยทีเดียว ทิศทางที่หักเหเกิดขึ้นตลอดทั้งแนวระนาบของโครงสร้างผลึก

3) Dislocation คือ กระบวนการเสียรูปแบบถาวรอีกแบบหนึ่ง โดยเกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีการเคลื่อนที่ หรือเคลื่อนตัวจากการที่ได้รับแรงมากระทำจากภายนอก หรือเกิดมีแรงขึ้นที่วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นเอง เมื่อวัสดุนี้เกิดแรงใด ๆ มากกระทำแล้วจะส่งผลให้โครงสร้างอะตอมเกิดการเคลื่อนที่ออก ไม่อยู่นิ่งกับที่นั่นเอง

2.1.5.4. ความเค้นจริง – ความเครียดจริง (True stress - true strain)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจะเห็นได้ว่า เมื่อความเค้นเกิดขึ้นถึงจุดสูงสุด วัสดุจะเกิดคอคอดขึ้น หรือพื้นที่หน้าตัดเสียรูปอย่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้การคำนวณความเค้นความเครียดทางวิศวกรรมที่ได้นั้นมีความผิดพลาด เพราะเมื่อเกิดคอคอดขึ้น ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานควรจะสูงกว่าความเค้นในขณะนั้น เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กลง ความผิดพลาดดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อัตราส่วนความเค้นความเครียดจริง (True stress-strain)

การคำนวณค่าความเค้นจริง และความเครียดจริงสามารถคำนวณได้ดังสมการและวิธีดังต่อไปนี้

เมื่อความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) มีค่าเท่ากับ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (9)$$

โดยที่ ϵ = ความเครียดทางวิศวกรรม

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลง

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

ดังนั้น ความเครียดจริง (True strain) สามารถหาได้จากการอินทิเกรตตั้งแต่ความยาววัสดุเริ่มต้นถึงความยาวที่เปลี่ยนไป ดังสมการ

$$\epsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (10)$$

โดยที่ ϵ_t = ความเครียดจริง

L = ความยาวที่วัดได้เมื่อทำการทดลอง

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเครียดจริง (True strain) และ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) ในสมการที่ 11 และ 12 จะได้สมการความเครียดจริงเป็นไปตามสมการที่ 13 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (11)$$

$$\varepsilon + 1 = \frac{L}{L_0} \quad (12)$$

ความเครียดจริง (True Strain) $\varepsilon_t = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(\varepsilon + 1)$ (13)

ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) $\sigma = \frac{P}{A_0}$ (14)

โดยที่ σ = ความเค้นทางวิศวกรรม หน่วยเป็น พาสคัล (Pa)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ หน่วยเป็น นิวตัน (N)

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นที่แรงภายนอกมากระทำ หน่วยเป็น ตารางเมตร (m²)

ในการคำนวณความเค้นจริงจะกำหนดให้ปริมาตรของวัสดุมีค่าคงที่ คือ ปริมาตรเดิมก่อนการเสียรูป และปริมาตรหลังการเสียรูปมีค่าเท่ากัน คือ

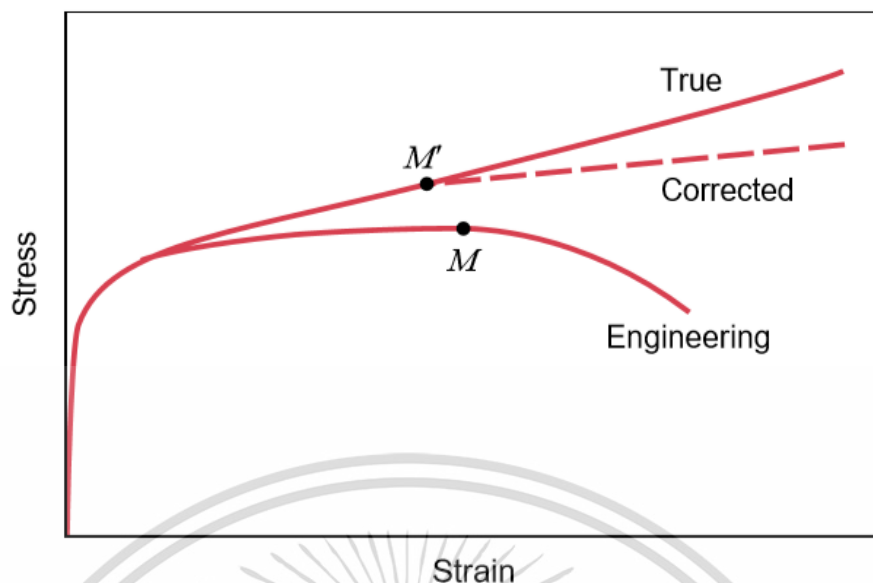
$$L_0 A_0 (\text{ปริมาตรเดิม}) = LA (\text{ปริมาตรใหม่}) \quad (15)$$

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นจริงโดยความสัมพันธ์จากปริมาตรเดิมก่อนการเสียรูปและปริมาตรหลังการเสียรูปนั้นตามสมการที่ 15 กับ ความสัมพันธ์ของความเครียดจริงตามสมการที่ 12 จะได้สมการ ดังนี้

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \quad (16)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (True stress) และความเค้นทางวิศวกรรม(Engineering stress) เป็นไปตามสมการ ดังต่อไปนี้ [26]

$$\sigma_t = \frac{P}{A_0} (\varepsilon + 1) = \sigma (\varepsilon + 1) \quad (17)$$



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Engineering stress–strain และ True stress–strain [25]

จากรูปที่ 2.12 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่าง ความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม และ ความเค้น-ความเครียดจริง ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้น-ความเครียดจริงมีค่าสูงกว่าค่าความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม ดังที่กล่าวไปข้างต้นนั้นบริเวณที่เป็นคอคอดนั้นเริ่มต้นที่จุด M บนเส้นกราฟ ความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม ส่วนกราฟความเค้น-ความเครียดจริง บริเวณที่เป็นคอคอดนั้นเริ่มต้นที่จุด M' สำหรับชิ้นงานโลหะบางประเภทที่เกิดคอคอด ในพฤติกรรม การเสียรูปแบบพลาสติก สามารถคำนวณ ได้ตามสมการ Power-law ดังนี้ [25]

$$\sigma_T = K \varepsilon_T^n \quad (18)$$

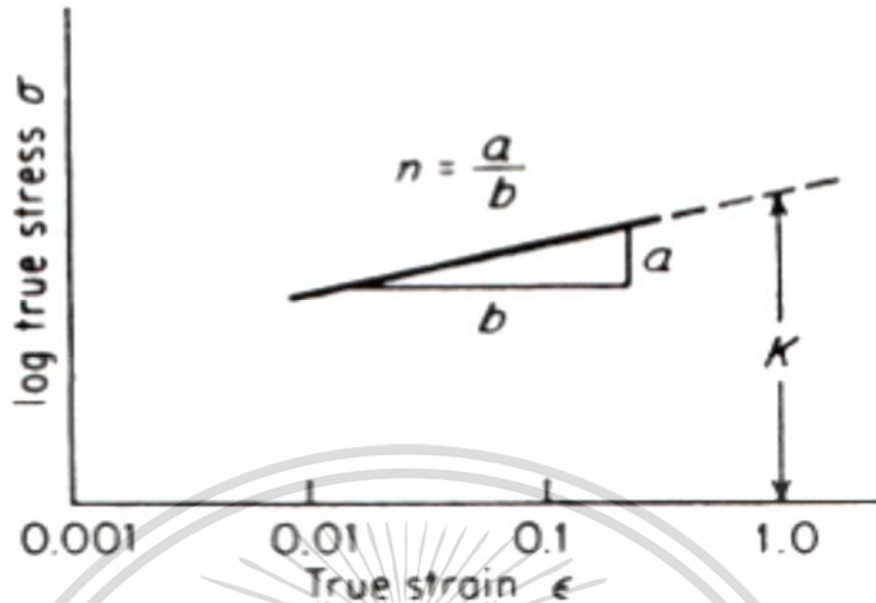
โดยที่ K = Strength coefficient

n = Strain-hardening exponent (work hardening exponent) [26]

ซึ่งค่า K และ n สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของความเค้นและความเครียดจริง ดังแสดงในสมการที่ 19 โดยที่ n คือ ความชันของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของความเค้นและความเครียดจริง และค่า K สามารถกำหนดได้จากจุดตัดแกน Y โดยมีเงื่อนไขที่ความเครียดจริง มีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.13

$$\log \sigma_T = \log K + n \log \varepsilon_T \quad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดจริงในรูปของ \log [27]

2.1.5.5 อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate)

อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด คือ อัตราการแข็งตัวของวัสดุ เมื่อวัสดุนั้นได้ผ่านจุดครากไปหรือเกิดการเสียรูปอย่างถาวร แล้วยังมีแรงกระทำที่วัสดุอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวัสดุสามารถต้านทานแรงดึงได้อีกครั้งจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด (Ultimate stress) โดยความสัมพันธ์สามารถแสดงผลต่างระหว่างความเค้นและความเครียด ออกมาเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (20)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงการเสียรูปแบบถาวร ผลต่างระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงมีค่าเท่ากับ ความชันของกราฟในรูปที่ 2.13 คือ

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (21)$$

ทำการจัดสมการที่ 21 ใหม่ จะได้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดเป็นไปตามสมการที่ 22

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (22)$$

2.1.5.6 ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness)

ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ เป็นสมบัติของวัสดุอย่างหนึ่งที่จะดูดซับพลังงานไว้โดยไม่เกิดการแตกหัก [28] ซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของการแตกหักเสียหาย และความปลอดภัยในขณะใช้งาน ซึ่งความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุจะพิจารณาจากความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) โดยไม่เกิดการแตกหัก วิธีที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) เป็นการตีชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐาน จนชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหัก เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic load) ของวัสดุชิ้นนั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทก คือ พลังงานรับแรงกระแทก (Impact energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก จนเกิดการแตกหัก โดยวิธีการทดสอบนี้มีอยู่ 2 วิธี คือ การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) และ การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact test) [29]

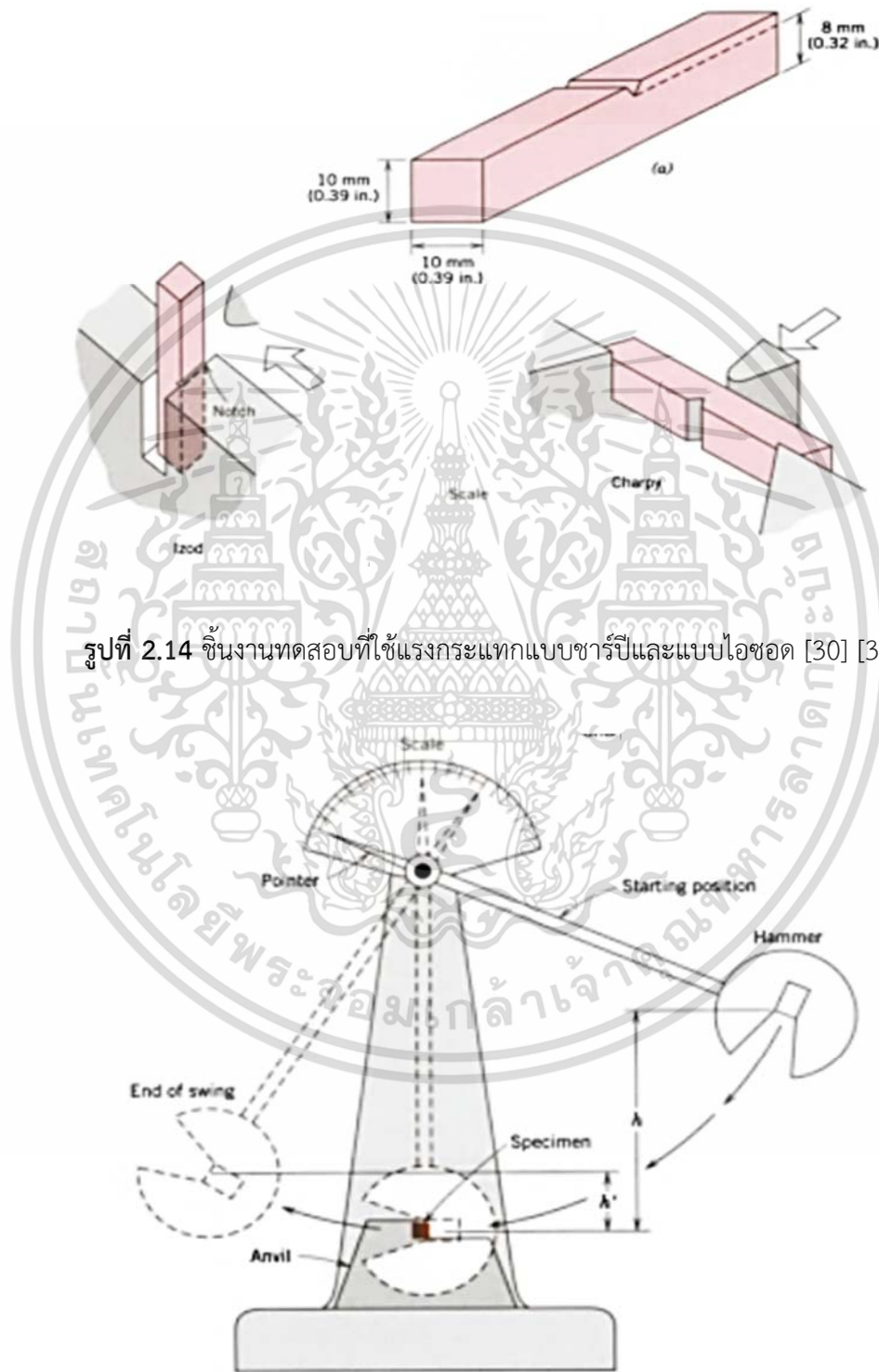
การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) คือ การทดสอบแรงกระแทกโดยการวางชิ้นงานทดสอบในแกนแนวระดับ และตำแหน่งตรงกลางของชิ้นงานทดสอบ ต้องทำรอยบากเป็นร่องตัววี ตามมาตรฐาน ASTM E23 ซึ่งชิ้นงานทดสอบนี้จะรับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มเพียงครั้งเดียว ตกกระทบกับฝั่งตรงข้ามของรอยบากร่องตัววี จนชิ้นงานทดสอบนี้เกิดการหัก ค่าพลังงานของลูกตุ้มที่เสียไป ขณะที่ลูกตุ้มกระทบชิ้นงานทดสอบนี้ เรียกค่าพลังงานนี้ว่า พลังงานรับแรงกระแทก (Impact energy) หน่วยเป็นจูล (J) หรือ ฟุต-ปอนด์ (ft-lb)

การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact test) คือ การทดสอบแรงกระแทกโดยการวางชิ้นงานทดสอบในแกนแนวตั้ง และชิ้นงานทดสอบต้องทำรอยบาก ซึ่งชิ้นงานทดสอบนี้จะรับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มเพียงครั้งเดียว โดยลูกตุ้มนี้จะตกกระทบกับด้านเดียวกับที่มีรอยบากจนชิ้นงานทดสอบนี้เกิดการหัก จนเกิดค่าพลังงานรับแรงกระแทก (Impact Energy) เกิดขึ้น [31]

จากรูปที่ 2.14 การทดสอบแรงกระแทกของทั้งสองแบบนี้ ต้องมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อที่จะสามารถวางเข้าไปที่เครื่องทดสอบแรงกระแทกได้ และจากรูปที่ 2.15 การทดสอบเริ่มต้นจากการปล่อยลูกตุ้ม (ตัวกระแทก) ที่ตำแหน่งความสูง h โดยที่ชิ้นทดสอบ (ตัวรับแรงกระแทก) วางอยู่พื้นฐาน ซึ่งลูกตุ้มจะตกลงมากระทบชิ้นทดสอบ แล้วลูกตุ้มจะหมุนไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องจนกระทบแล้วตัดเฉือนชิ้นทดสอบที่ตำแหน่ง h' จุดนี้คือจุดสูงสุดเมื่อลูกตุ้มตกกระทบกับชิ้นทดสอบ แต่ก็ยังมีค่าความสูงที่น้อยกว่า h ที่เป็นตำแหน่งของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มปล่อยลูกตุ้มในตอนแรก ค่าพลังงานรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากค่าความสูงที่ลดลง ค่าความสูงระหว่าง h และ h' ที่ต่างกันนั้น สามารถวัดค่าเป็นพลังงานรับแรงกระแทกได้ค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.14 ชิ้นงานทดสอบที่ใช้แรงกระแทกแบบชาร์ปีและแบบไอซอด [30] [32]

รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบแรงกระแทก [30] [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.7 การสึกหรอของวัสดุ (Wear)

การสึกหรอของวัสดุ คือ รูปแบบการเสียหายของวัสดุอย่างหนึ่ง โดยการเสียหายของวัสดุนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุนั้น ๆ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของวัสดุชิ้นหนึ่งชิ้นใด หรือทั้งสองชิ้น แล้วเกิดการสัมผัส เสียดสีซึ่งกันและกัน อีกทั้งอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวชิ้นงานทั้งสอง ซึ่งการสูญเสียนี้มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง น้ำหนักชิ้นงานตั้งแต่ปริมาณที่เล็กน้อยจนไปถึงปริมาณที่มาก แล้วทำให้ชิ้นส่วนวัสดุนั้นเสียหาย เสื่อมสภาพไปจนหมดอายุการใช้งาน หรือไม่สามารถใช้งานต่อได้อีก ประเภทของการสึกหรอแบ่งเป็น 6 ชนิด ดังนี้ [33]

1) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

การสึกหรอแบบยึดติด เป็นการสึกหรอของชิ้นงาน 2 ชิ้น ที่เคลื่อนที่สัมผัสกันจนเกิดความเค้นสัมผัส (Contact stress) ที่ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสอง หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ชิ้นงานทั้งสองเกิดการเสียดสีกัน จนเกิดความเครียดขึ้นเกินจุดครากของวัสดุ ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่าจะพาเอาเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่าไปด้วย จึงทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น อย่างไรก็ตามการสึกหรอแบบนี้สามารถเกิดจากการที่ผิวโลหะของชิ้นงานทั้งสองมาเสียดสีกัน แล้วทำให้เกิดยอดแหลม ๆ ที่ติดกัน จนในที่สุดเกิดการฉีกกระแทกให้แตกหัก ซึ่งเหตุการณ์นี้ทำให้เกิดขบวนการการเกิดแรงเสียดทานขึ้น

2) การกะเทาะ (Galling)

การกะเทาะ เป็นการสึกหรอของชิ้นงานแบบยึดติดที่รุนแรง เนื่องจากเกิดการเสียดสีอย่างรุนแรง โดยความเสียหายเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสอง หรือชิ้นงานใดชิ้นงานหนึ่งหลุดร่อนออกจากชิ้นงานวัสดุนั้น

3) การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดสี เป็นการสึกหรอของชิ้นงานที่ผิวหน้าของวัสดุ โดยถ้าชิ้นงานมีความแข็งสูงที่ผิวหน้า ก็จะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่ต่ำ และถ้าความแข็งที่ผิวหน้าของชิ้นงานมีค่าที่สูงกว่าความแข็งของชิ้นงานที่มาขัดสี ก็จะทำให้เกิดการสึกหรอเพียงเล็กน้อย ซึ่งชิ้นส่วนที่สึกหรอแตกออกมานี้จะเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยได้

4) การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Corrosion wear)

การสึกหรอแบบการกัดกร่อน เป็นการสึกหรอที่เกิดร่วมกันระหว่างการสึกกร่อนทางเคมี (Chemical wear) ซึ่งปัจจัยหลัก คือ ก๊าซออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) กับ การสึกหรอทางกล (Mechanical wear) โดยการสึกหรอแบบกัดกร่อนนี้จะเกิดที่ผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุ หรือเกิดการออกซิไดซ์ขึ้นนั้นทำให้สมบัติทางกลลดลง และยังส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่สูงขึ้น ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิไดซ์นั้นจะหลุดออกมาจากผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุแล้วยังส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเอกรสารนี้เป็นเอกรสารที่สวมน้ำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สึกหรอแบบเสียดสีต่อไปได้ ดังนั้น จึงมีการสร้างฟิล์ม หรือชั้นเคลือบผิว เพื่อมาปกป้องโลหะพื้น หรือโลหะผสมจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจนทำให้เกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อน

5) การสึกหรอแบบล้าตัวบนผิวหน้า (Surface fatigue wear)

การสึกหรอแบบล้าตัวบนผิวหน้า เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุ ทั้งสองชิ้น ที่สัมผัสกับชิ้นงานวัสดุอีกชิ้นหนึ่งที่กำลังจะกลิ้ง และมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อน (Sliding motion) ทำให้เกิดแรงแบบสลับ หรือการวางตัว หรือการวางตัวของแรงเค้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุ ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เป็นความเค้นสัมผัส (Contact stress) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุ โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการฟอร์มตัวของรอยร้าวภายใต้ผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุ และขยายตัวกลับมาที่ผิวหน้าอีกครั้ง จนทำให้ผิวหน้าวัสดุเกิดเป็นหลุม (Pit) ขึ้น ซึ่งการสึกหรอประเภทนี้ มักจะพบในวัสดุผ่านกระบวนการรีด ทำซ้ำ ๆ หลายครั้งผ่านผิวหน้าของวัสดุ ส่งผลต่อเนื่องให้เกิดความเค้นตกค้างที่สูง ในแต่ละจุดที่เป็นแนวยาวบนผิวหน้าของวัสดุ

6) การสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear)

การสึกหรอแบบถูครูด ส่วนใหญ่จะเกิดร่วมกับการสึกหรอแบบกัดกร่อน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาแบบออกซิเดชัน โดยจะมีเศษชิ้นส่วนจะหลุดออกมา ไม่มีเศษชิ้นส่วนตกค้างบนพื้นผิวหน้าสัมผัสกับพื้นผิวหน้าอีกด้านหนึ่ง ทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าเศษชิ้นส่วนที่หลุดออกมาแล้ว เกิดการตกค้าง หรือฝังอยู่ในพื้นผิวหน้าของโลหะที่มีความนิ่มกว่า จะส่งผลทำให้อัตราการสึกหรอลดลง ดังนั้นการป้องกันการสึกหรอแบบถูครูดนี้ สามารถป้องกันโดย ปรับปรุงพื้นผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุ หรือการทำให้พื้นผิวหน้าเป็นร่อง เพื่อเก็บเศษชิ้นส่วนที่หลุดออกมา หรือการเคลือบผิว เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ แบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 ชนิด ดังนี้

1. ความแข็ง (Hardness) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสึกหรอ โดยพบว่าวัสดุที่มีความแข็งสูงจะมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำ ค่าความแข็งนี้จะเป็ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสึกหรอโดยเฉพาะกับโลหะบริสุทธิ์ แต่ถ้าโลหะผสมนั้นจะมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วยกับความแข็งที่มีผลต่อการสึกหรอ

2. น้ำหนักกด (Load) การสึกหรอนั้นมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักกด คือ การสึกหรอจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีแรงกระทำบนผิววัสดุเพิ่มมากขึ้น

3. อุณหภูมิ (Temperature) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่ขึ้นวัสดุนั้นเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าความคงทนของวัสดุ (Yield stress) นั้นมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิยังมีอิทธิพลมากต่อการสึกหรอโดยเฉพาะการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosion wear) ยิ่งส่งผลให้เกิดการสึกหรอได้ง่ายขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความเร็วการสัมผัส (Speed of contact) มีอิทธิพลต่อการสึกหรอ โดยที่ความเร็วการสัมผัสที่มากขึ้น ส่งผลให้การสึกหรอเกิดมากขึ้นตามไปด้วย

5. ความชื้น (Humidity) โดยส่วนใหญ่แล้วความชื้นจะมีผลทำให้เกิดการสึกหรอที่สูงขึ้น โดยเฉพาะการสึกหรอแบบการขัดสี (Abrasive wear) และแบบการกัดกร่อน (Corrosive wear) แต่ในบางครั้งความชื้นที่มีค่าสูงมากในระดับหนึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น (Lubricant) ได้และทำให้การสึกหรอลดลง

6. อนุภาค (Abrasive particle) เป็นปัจจัยอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอ ซึ่งทั้งค่าความแข็ง ขนาด ตลอดจนรูปร่างของอนุภาคมีผลสำคัญต่อการสึกหรอ โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างที่เป็นเหลี่ยม ยิ่งทำให้เกิดการสึกหรอที่สูง และเมื่อเทียบกับปัจจัยการสึกหรอในด้านความแข็งของวัสดุนั้น อนุภาคที่เป็นเหลี่ยมส่งผลกระทบต่อการสึกหรอที่มากกว่า เนื่องจากอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมนี้เกิดการขัดถูที่มากขึ้น

การสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ได้มีความสัมพันธ์กับความเสียดทาน โดยกลไกของการสึกหรอทำให้เกิดความเสียดทาน เพราะกระบวนการสึกหรอนี้เกิดจากการมีแรงมากระทำที่ชิ้นงานและมีปริมาณของพลังงานที่ถูกใช้ไป ในขณะที่เดียวกันกลไกการสึกหรอนี้ยังถูกกระทบจากการรับแรงเฉือนที่เป็นผลมาจากความเสียดทานและการเพิ่มอุณหภูมิที่มาจากความร้อนของแรงเสียดทานด้วย ดังนั้นความเสียดทานจึงมีอิทธิพลต่อการสึกหรอ นอกจากนั้นแล้วความเสียดทานยังเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงที่ผิวชิ้นงานจนเกิดการสึกหรอ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานกับเวลา หรือระยะทางเลื่อนไถลนั้นมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอ ในบางครั้งการลดลงของสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานกับการเลื่อนไถลอย่างต่อเนื่องจากระยะเริ่มต้นถึงระยะคงที่สามารถทำให้เกิดรูปแบบของฟิล์มที่คงตัวได้

แรงเสียดทาน (Friction force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นเพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดที่บริเวณระหว่างชิ้นงาน 2 ชิ้นที่บนผิวสัมผัส และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวสัมผัส แรงที่กดลงบนพื้นสัมผัส ตลอดจนชนิดของวัสดุที่ผิวสัมผัส

แรงเสียดทาน สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$f = \mu N \quad (23)$$

โดยที่ f = แรงเสียดทาน หน่วยเป็น นิวตัน (N)

μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส

N = แรงที่ต่อจากพื้น หน่วยเป็น นิวตัน (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ทฤษฎีการสึกหรอยังมีความสัมพันธ์กันกับความแข็งของวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) จากสมการที่เรียกว่า Archard ได้
อัตราการสึกหรอ สามารถคำนวณค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$W = \frac{KPL}{H} \quad (24)$$

โดยที่ W = อัตราการสึกหรอ หน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
 K = สัมประสิทธิ์การสึกหรอ
 P = แรงที่ได้จากการทดสอบ หน่วยเป็น นิวตัน (N)
 L = ระยะทางที่ได้จากการทดสอบ หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
 H = ค่าความแข็งของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ

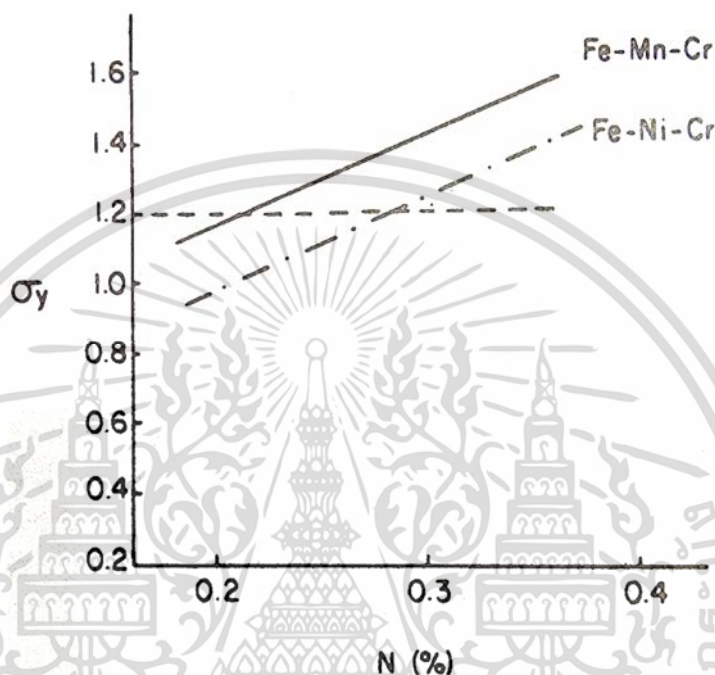
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการพิจารณาและศึกษาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าโดยเปรียบเทียบระดับของธาตุแมงกานีสที่เติมผสมในเหล็กกล้า ซึ่งในระหว่างการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ทำวรรณกรรมวิจัยเพื่อใช้ประกอบเป็นข้อมูลสนับสนุนการเลือกและวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการศึกษา ดังแสดงต่อไปนี้

Luta [13] ศึกษาถึงเหล็กกล้าแมงกานีสโดยเริ่มจากในอดีต โดย Robert Abbott Hadfield ค้นพบเหล็ก 1.2%C-12%Mn และใช้ชื่อว่า Hadfield ตามชื่อของตนเอง ต่อมาก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 ที่ประเทศเยอรมัน และระหว่างสงครามเกาหลี ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในขณะนั้นเกิดความขาดแคลนธาตุนิเกิลเป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาถึงเหล็กกล้าแมงกานีสขึ้นว่าสมบัติของธาตุแมงกานีสนั้น มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันกับธาตุนิเกิลหรือไม่ จนได้ค้นพบว่าคุณสมบัติของธาตุแมงกานีสนั้น มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันกับธาตุนิเกิล สามารถนำมาใช้ทดแทนธาตุนิเกิลได้ ซึ่งธาตุแมงกานีสนี้มีราคาที่ถูกกว่าด้วย อีกทั้งยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติการละลาย (Solubility) ของธาตุไนโตรเจนจาก 0.05% ในเหล็กกล้าเป็น 1.45% ในเหล็กกล้าแมงกานีส คุณสมบัติการละลายของไนโตรเจนที่ดีขึ้นนี้ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงสร้างออสเทนไนต์ให้กับเหล็กกล้าแมงกานีส และธาตุแมงกานีสยังทำให้เหล็กมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง (Strength) เหมือนกับธาตุนิเกิลได้ นอกจากนี้เหล็กกล้าแมงกานีส ยังมีคุณสมบัติที่เด่น คือ มีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ใช้นิเกิล ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และเหล็กกล้าแมงกานีสนี้ยังทนทานต่อการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะแบบการกะเทาะ (Galling) ด้านทานการกัดกร่อนและทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) มีความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness) ที่สูง เพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการแข็งขึ้น (Work hardening rate) ความเป็นแม่เหล็กที่ดูดีติดตำ ในทางตรงกันข้ามเหล็กกล้าแมงกานีสก็มีข้อจำกัด คือ นำชิ้นงานมากลึง กระทบทำได้ยาก

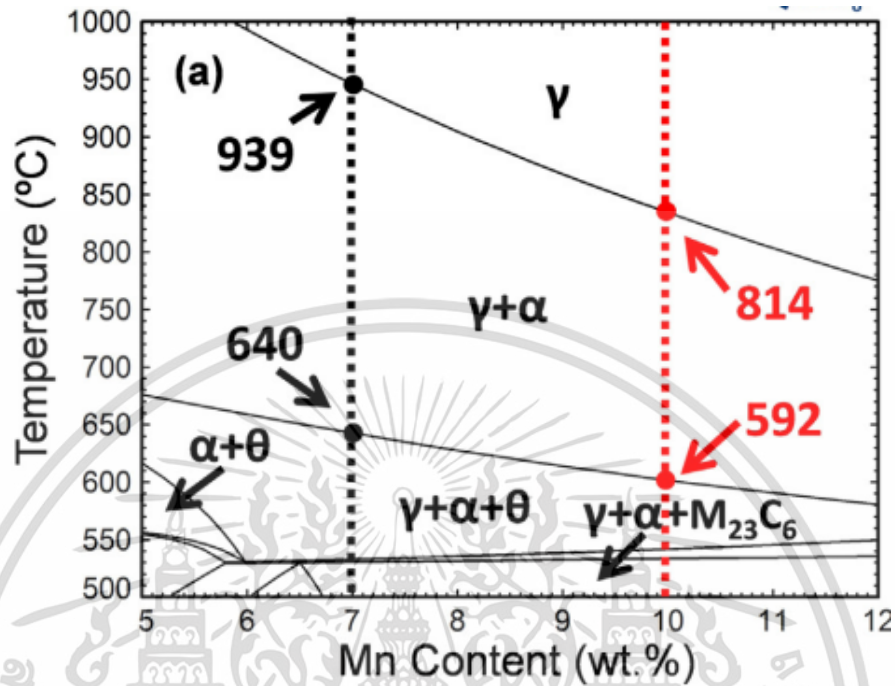


รูปที่ 2.16 ความแข็งแรงระหว่างเหล็กกล้าผสมแมงกานีส และเหล็กกล้าผสมนิกเกิล [13]

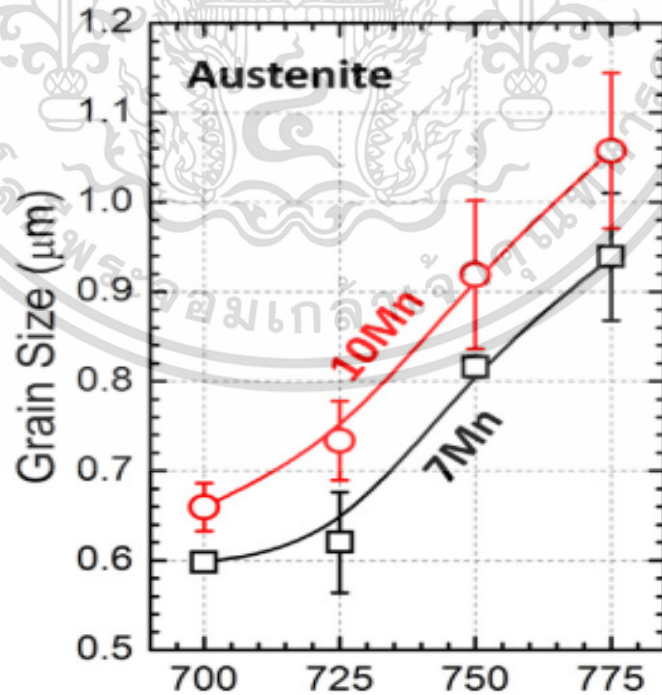
Sun และคณะ [9] ศึกษาผลของความเข้มข้นของแมงกานีสในเหล็กกล้าต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของเหล็กกล้า นั้น โดยระดับความเข้มข้นของแมงกานีสแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ 7 และ 10 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาและตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าระดับแมงกานีสส่งผลโดยตรงกับสัดส่วนของโครงสร้างออสเตนไนต์ โดยที่ระดับแมงกานีสที่ 7 และ 10% โดยน้ำหนัก มีปริมาณออสเตนไนต์อยู่ที่ 10% และ 20% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณออสเตนไนต์ของระดับแมงกานีสที่ 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่าที่สูงกว่าระดับแมงกานีสที่ 7% โดยน้ำหนัก นั้นหมายความว่าโครงสร้างออสเตนไนต์ที่ระดับแมงกานีส 10% มีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น ดังแสดงในกราฟของรูปที่ 2.17 นอกจากนั้นระดับแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนของเหล็กกล้านี้โตขึ้นด้วย ซึ่งระดับแมงกานีสที่ 7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700°C จะมีขนาดเกรนของออสเตนไนต์อยู่ที่ 0.60 ไมโครเมตร (μm) ถ้าระดับแมงกานีสที่ 10% โดยน้ำหนัก ในอุณหภูมิเดียวกัน จะมีขนาดเกรนของออสเตนไนต์ที่โตกว่าเล็กน้อยมีค่าอยู่ที่ 0.65 ไมโครเมตร (μm) ดังรูปที่ 2.18 ในส่วนของสมบัติ ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล ระดับแมงกานีสที่มากขึ้นส่งผลต่ออัตราการแข็งขึ้นของเหล็กกล้า โดยที่ระดับแมงกานีสที่ 7% โดยน้ำหนัก มีอัตราในการแข็งขึ้นสูงกว่าเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมแมงกานีสที่ 10 % โดยน้ำหนัก

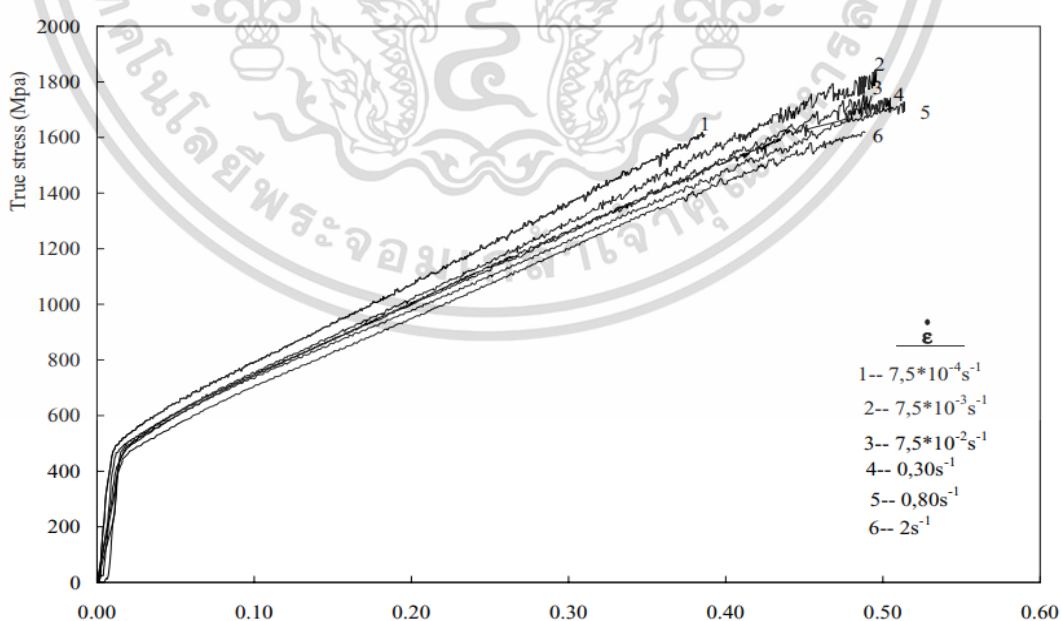


รูปที่ 2.17 โครงสร้างออสเตนไนต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ [9]



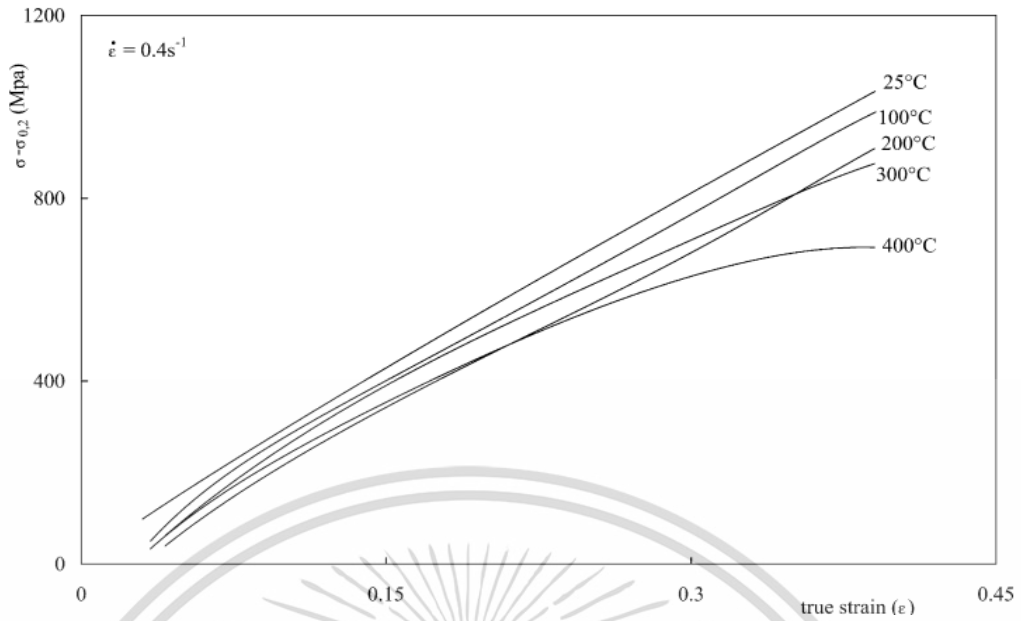
รูปที่ 2.18 ขนาดเกรนโครงสร้างออสเตนไนต์ที่ระดับแมงกานีสที่ 7% และ 10% โดยน้ำหนัก [9]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bayraktar และคณะ [1] ศึกษาคุณสมบัติของการเปลี่ยนรูปของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง ภายใต้การทดสอบแรงดึง โดยพิจารณาถึงอัตราความเครียด (Strain rate) ที่เปลี่ยนแปลงไปในหลากหลายรูปแบบ และอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain hardening rate) ของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง รวมทั้งได้ทดสอบความแข็งทางจุลภาคก่อนและหลังการเสียรูปด้วย จากการศึกษาพบว่าอัตราความเครียดที่ $7.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ เป็นค่าที่ต่ำสุดของการศึกษาครั้งนี้ มีผลทำให้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความเครียดที่ 2 s^{-1} ณ อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จากนั้นผลการทดสอบโดยมีอัตราความเครียดคงที่เท่ากับ 0.4 s^{-1} พบว่าอุณหภูมิที่ 25°C มีผลทำให้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงขึ้น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็น 400°C ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ดังนั้นสรุปได้ว่าอัตราของความเครียดและอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง โดยอัตราการแข็งตัวของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงจะสูงขึ้น เมื่ออัตราความเครียดมีค่าลดลง และอุณหภูมิมี่ค่าลดลง ทางด้านความแข็งทางจุลภาคได้ทดสอบวัดค่าความแข็งที่อุณหภูมิ $25 - 400^\circ\text{C}$ ทั้งหมด 3 บริเวณ คือ บริเวณที่มีเกรนทวิน (Twinned grain) ไม่มีเกรนทวิน (Non-twinned grain) และขอบเกรน (Grain boundary) พบว่าตำแหน่งบริเวณที่เกิดการเสียรูปอย่างมากจะมีเกรนทวินที่หนาแน่นโดยมีค่าความแข็งสูงสุดและที่อุณหภูมิ 25°C ดังแสดงในรูป 2.21 ดังนั้นสรุปได้อีกอย่างว่าบริเวณที่เกิดการเสียรูปจากแรงดึงจะทำให้เกิดเกรนทวินที่มาก ส่งผลทำให้เหล็กกล้าแมงกานีสบริเวณนั้นมีค่าความแข็งที่สูง ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำด้วยเช่นกัน

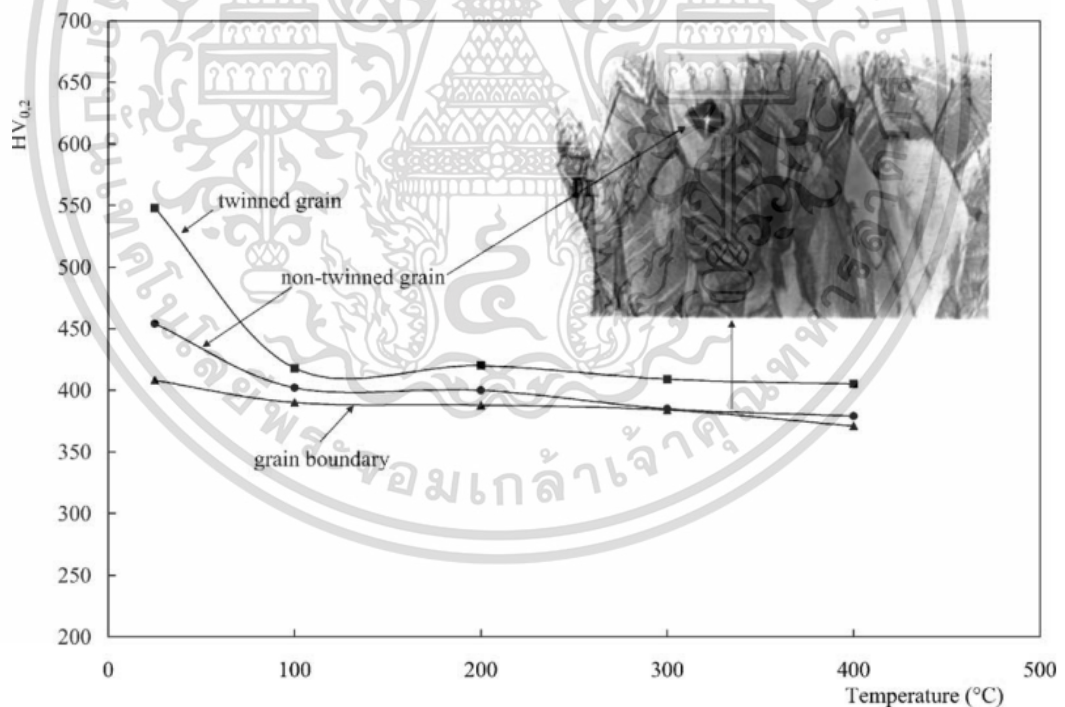


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความเค้นจริงที่ระดับอัตราความเครียดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



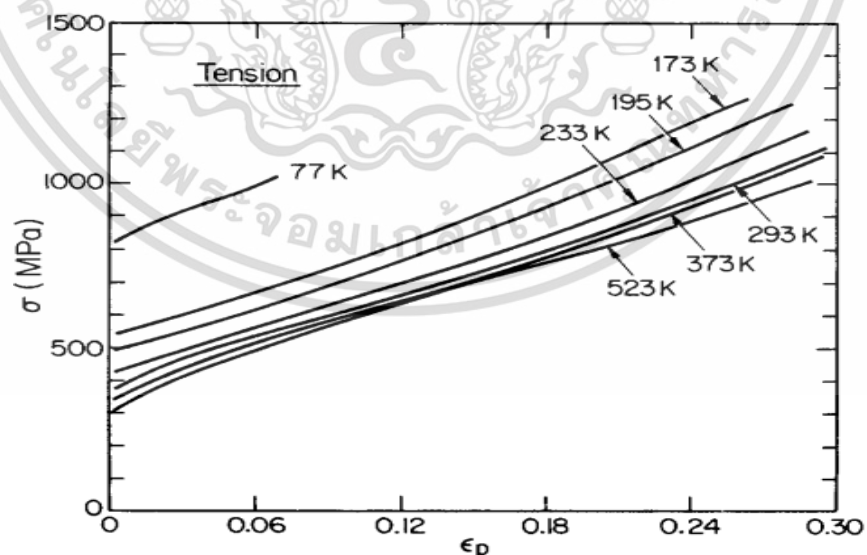
รูปที่ 2.20 กราฟแสดงอัตราการแข็งตัวของเหล็กกล้าแมงกานีสที่อุณหภูมิต่างกัน โดยกำหนดอัตราความเครียดเท่ากับ 0.4 s^{-1} [1]



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ [1]

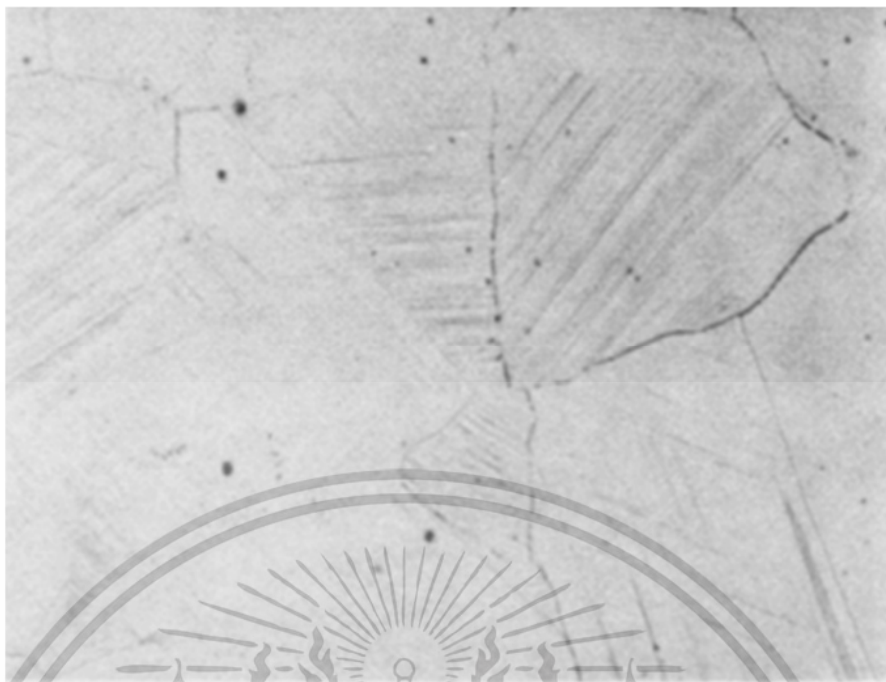
Adler และคณะ [34] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นนั้น ต่อพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของเหล็กแมงกานีสเพียง โดยนำกราฟความเค้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเครียดมาตรวจสอบ วิเคราะห์ถึงคุณลักษณะของการเกิด twin ในระหว่างการเสียรูปที่เนื่องมาจากความเครียดสูง ซึ่งมาจากการดึงและการกดอัด ซึ่งสามารถศึกษากลไกอัตราการแข็งขึ้นในเหล็กกล้าแมงกานีส โดยการทดสอบได้ใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด 5 นิ้ว x 3 นิ้ว มีขนาดเกรนเริ่มต้นที่ 50 ไมโครเมตร (μm) เมื่อชิ้นงานทดสอบได้ผ่านกระบวนการชุบน้ำ ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น และมี twin ที่ใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน ขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นนี้มีค่าอยู่ในช่วง 100-500 ไมโครเมตร (μm) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 220 ไมโครเมตร (μm) ส่วนผสมทางเคมีไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการผ่านกระบวนการทางความร้อน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากกราฟความเค้นที่เกิดจากการดึงนั้น พบว่าที่อุณหภูมิ 523K มีค่าความเค้นไหลที่ลดลง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 77K นั้นหมายความว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้กราฟความเค้นไหลมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้กราฟความเค้นไหลมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในกราฟจากรูปที่ 2.22 และจากกราฟความเครียดที่เกิดจากการกดอัดนั้น พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้กราฟความเครียดมีค่าที่ลดลง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้กราฟความเครียดมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นผลสรุปจากกราฟความเค้นและความเครียดนี้ พบว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิต่ำ จะมีค่าความเค้นและความเครียดที่สูง เกิดการเสียรูปมาก มี twin เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.23 และ 2.24 ที่อุณหภูมิ 173K (-100°C) มีการเสียรูปที่เกิด twin เป็นจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิ 523K (250°C) นอกจากนี้ขอบเกรนแบบ Twin ที่เกิดขึ้นสามารถหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของ dislocation รวมทั้งการลื่นไถลของระนาบอื่น ๆ ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความเค้นจริงและความเครียดจริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การเสีรูปร่างที่เกิด twin ที่อุณหภูมิ 173K (-100°C) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส [34]



รูปที่ 2.24 การเสีรูปร่างที่เกิด twin ที่อุณหภูมิ 523K (250°C) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส [34]

Harzallah และคณะ [35] ได้ศึกษาถึงน้ำหนักที่หายไปจากการกัดดูและความแข็งของเหล็กกล้าแมงกานีส โดยใช้การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) และการทดสอบการเลื่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบกระแทก (Impacting-sliding test) โดยดูจากค่าน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) และวัดค่าความแข็งจุลภาค (Microhardness measurement) ของชิ้นงาน ในการศึกษาทำการเปรียบเทียบกับวัสดุ 2 ประเภท คือ เหล็กกล้าแมงกานีสสูง (GX120Mn12) กับเหล็กทรงรถไฟ (R260) โดยมีค่าส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยในการทดสอบการเลื่อนแบบกระแทกนั้น ใช้การทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ด้วยการเคลื่อนที่แบบจานหมุน (Pin-on-disk) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 2.26 และ 2.27 ซึ่งผลจากการตรวจสอบพบว่าค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าแมงกานีสมีค่าน้อยกว่าเหล็กทรงรถไฟ ส่วนค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกจะมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบการเลื่อนแบบกระแทก ในวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่าความแข็งที่พอกันในการทดสอบแรงกระแทก ทำให้สรุปผลจากการทดสอบได้ว่าเหล็กกล้าแมงกานีสมีคุณสมบัติของอัตราการแข็งตัวที่สูง และความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) สูง อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติก (Plastic deformation) ที่น้อย และค่าน้ำหนักที่หายไปก็มีค่าน้อยเช่นกัน

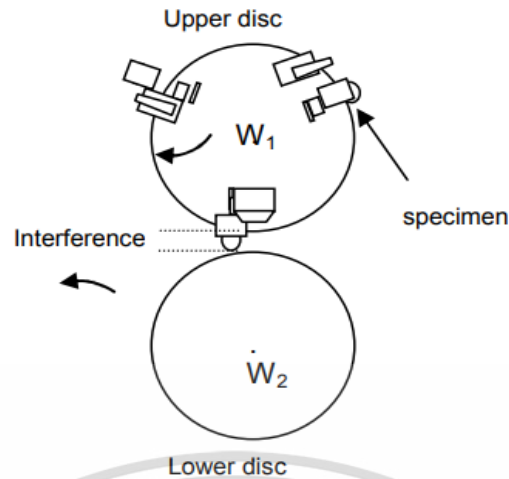
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (GX120Mn12) กับเหล็กทรงรถไฟ (R260) [35]

wt% วัสดุ	C	Si	Mn	P	S	Cr
GX120Mn12	1.138	0.46	12.89	0.033	0.008	0.18
R260	0.7	0.15	1	0.02	0.01	0.1

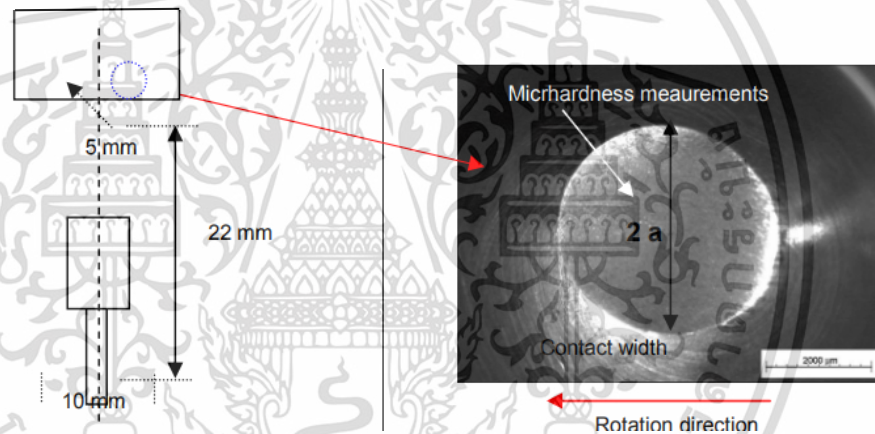


รูปที่ 2.25 เครื่องไทรโบมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบการเลื่อนแบบกระแทก [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ชิ้นทดสอบหมุนเคลื่อนที่บนตำแหน่งจานหมุนตัวล่าง (Lower disc) [35]



รูปที่ 2.27 ระยะห่างของการทดสอบบนจานหมุนตัวล่าง และหน้าสัมผัสของชิ้นงานทดสอบ (Contact area) [35]

Lencina และคณะ [36] ได้ศึกษาถึงการนำเหล็กกล้าแมงกานีสที่มีระดับธาตุคาร์บอนที่ใกล้เคียงกันแต่มีธาตุแมงกานีสที่ต่างกัน 2 ระดับมาใช้ในการบดหิน ในการศึกษาที่มีการทดสอบการสึกกร่อนของชิ้นงานที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าแมงกานีสสูงที่ระดับธาตุแมงกานีสที่ต่างกัน 2 ระดับ คือ 12Mn (ระดับแมงกานีส 12%) และ 16Mn (ระดับแมงกานีส 16%) โดยส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งชิ้นงานจากวัสดุทั้งสองชนิดที่ศึกษานี้ถูกออกแบบมาให้อยู่ในรูปร่าง Cone crusher liner จากการทดสอบและตรวจวัด ผลปรากฏว่าชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสสูง (16Mn) มีค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีธาตุแมงกานีสที่ต่ำ (12Mn) ชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสสูง (16Mn) จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) มาก นั้นหมายความว่า ชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสสูง มีอัตราการสึกหรอหรือความต้านทานการสึกหรอที่สูง ใช้อายุการใช้งานได้ยาวนานกว่า เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสต่ำ

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของเหล็กกล้าแมงกานีสที่ระดับแมงกานีส 12% และ 16% [36]

wt% วัสดุ	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P	S	Nb
12Mn	1.46	12.50	1.46	0.10	0.20	0.53	0.030	0.001	0.12
16Mn	1.41	16.68	1.53	0.08	0.13	0.48	0.034	0.003	0.11

Gurool และคณะ [37] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของคาร์บอนและแมงกานีสที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส โดยได้แบ่งระดับความเข้มข้นของคาร์บอนและแมงกานีสในหลายระดับดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งการศึกษานี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานทดสอบแล้วใช้เครื่องสเปคโตรมิเตอร์ทำการวัดค่าส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM E2209 ชิ้นงานทดสอบมีจำนวน 10 ชิ้น ขนาด 60x60x300 ลูกบาศก์เมตร หล่อโดยใช้แบบทรายดำ (Chromite sand mold) ที่อุณหภูมิในการเท 1440-1450°C หลังจากนั้นใช้กระบวนการทางความร้อนโดยทำการอบชิ้นงานทดสอบเพื่อให้โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบเป็นออสเตนไนต์ทั้งหมด ผลการทดสอบทางด้านโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน อีกทั้งเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้นยังทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากแมงกานีสทำให้เกรนหยาบเกิดการเติบโตมากขึ้น ตามตารางที่ 2.4 ส่วนด้านสมบัติทางกล ความแข็งทำการทดสอบแบบ Brinell ตามมาตรฐาน ASTM E10-18 พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนทางด้านแรงดึง ทำตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M พบว่าค่าความเค้นจุดคราก (yield strength) มีค่าสูงขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงขึ้นเช่นกัน ต่อมาได้ทำการทดสอบการสึกหรอแบบ ball on disc ตามมาตรฐาน ASTM G99-05 พบว่าอัตราการสึกหรอลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์แมงกานีสเพิ่มมากขึ้น และเป็นผลเกี่ยวข้องกับที่ความแข็งและความเค้นจุดครากที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ระดับแมงกานีส 13% 17% และ 21% [37]

วัสดุ \ wt%	C	Mn	Si	Mo	P,S	Fe
0.7C-17Mn	0.70	17.13	0.56	1.18	<0.05	Balance
1.0C-13Mn	1.00	12.11	0.53	1.15	<0.05	Balance
1.0C-17Mn	1.00	17.11	0.53	1.16	<0.05	Balance
1.0C-21Mn	1.03	20.79	0.56	1.18	<0.05	Balance
1.3C-17Mn	1.27	17.02	0.51	1.16	<0.05	Balance

ตารางที่ 2.4 ขนาดเกรนของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ผ่านกระบวนการหล่ออย่างเดียว และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพิ่มเติม หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm) [37]

	0.7C-17Mn	1.0C-13Mn	1.0C-17Mn	1.0C-21Mn	1.3C-17Mn
As-Cast Steels	197 \pm 3	172 \pm 11	243 \pm 20	412 \pm 29	427 \pm 24
Solution Annealed	281 \pm 18	215 \pm 10	338 \pm 26	619 \pm 27	589 \pm 38

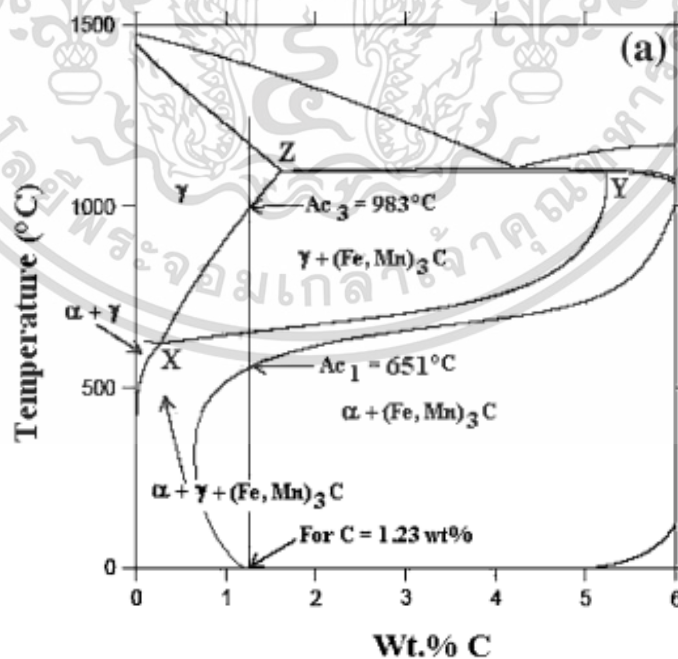
Kumar และคณะ [38] ได้ศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีส่วนผสมของคาร์บอนประมาณ 1.0-1.4% โดยน้ำหนัก และแมงกานีส 10-14% โดยน้ำหนัก ซึ่งชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1050 $^{\circ}\text{C}$ และผ่านกระบวนการชุบน้ำ ชิ้นงานทดสอบนี้มีขนาด 12x12x10 มิลลิเมตร ก่อนที่จะทำการตรวจดูโครงสร้างทางจุลภาคได้นำชิ้นงานทดสอบไปขัด และกัดกรดไนโตร 2% (2 มิลลิลิตร HNO_3 + 98 มิลลิลิตร เอทานอล) แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูโครงสร้างของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน เกิดคาร์ไบด์ขึ้นรอบ ๆ ขอบเกรนของออสเตนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 หลังจากนั้นได้ทำการดูเฟสไดอะแกรมของเหล็ก คาร์บอน และแมงกานีส (Fe-C-Mn) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 พบว่าอุณหภูมิ Ac_1 เท่ากับ 651 $^{\circ}\text{C}$ ส่วน Ac_3 เท่ากับ 983 $^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิสำหรับกระบวนการทางความร้อน คือ 1100 $^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้เหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้เกิดเป็นโครงสร้างออสเตนไนต์ที่สมบูรณ์เพียงเฟสเดียว และสำหรับการทดสอบการสึกหรอ จานหมุนมีขนาดเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร ความเร็ว 300 r.p.m. ระยะทางในการหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และแรงที่ทำการทดสอบ คือ 14.7 และ 24.5 นิวตัน อัตราการสึกหรอได้มาจากผลต่างของ น้ำหนักที่หายไปก่อนการทดสอบและหลังทดสอบ (weight loss) แล้วทำการแปลงเป็นปริมาตรที่หายไป (volume loss) พบว่าเมื่อขึ้นงานทดสอบที่ใช้แรงมากกระทำสูงทำให้เกิดผลรวมปริมาตรที่หายไปสูง และอัตราการสึกหรอก็สูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.30 และ 2.31

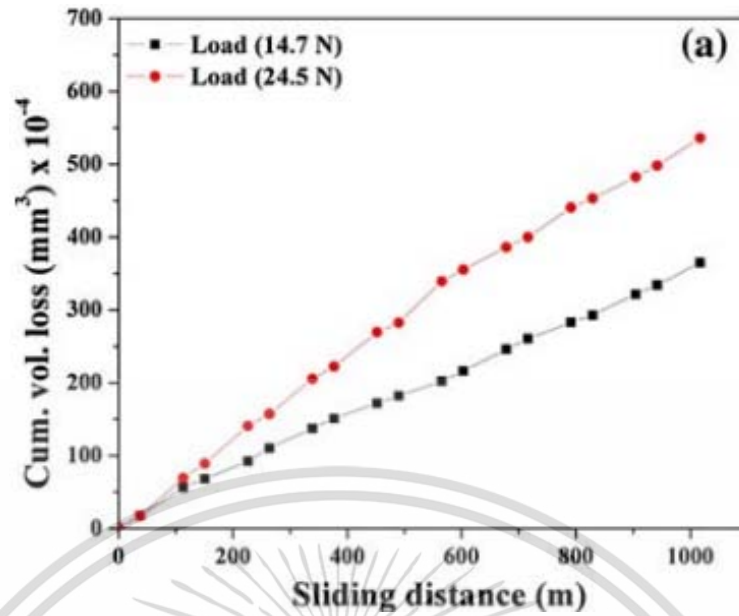


รูปที่ 2.28 โครงสร้างของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่เกิดคาร์ไบด์อยู่รอบขอบเกรนออสเทนไนต์ [38]

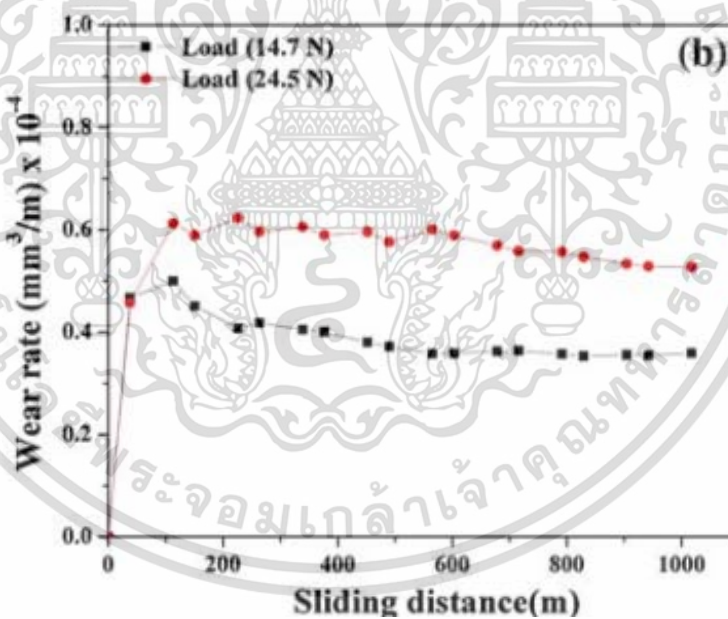


รูปที่ 2.29 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก คาร์บอน และแมงกานีส (Fe-C-Mn) [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ผลรวมปริมาตรที่หายไปของแรงที่กระทำต่างกัน [38]



รูปที่ 2.31 อัตราการสึกหรอของแรงที่กระทำต่างกัน [38]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า แมงกานีสเป็นธาตุเจือที่สร้างความเสถียรให้กับโครงสร้างอสเทนไนต์อย่างชัดเจน เมื่อโลหะผสมของเหล็กแมงกานีสเกิดการเสีรूपอย่างถาวร การลื่นไถลของระนาบส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบทวิน (Twin) ส่งผลให้เหล็กกล้าแมงกานีสมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งจากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอพบว่าปริมาณของแมงกานีสและความต้านทานการสึกหรอมีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรง โดยน้ำหนักที่หายไปหลังจากใช้งานมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเหล็กกล้าอื่น ๆ ที่มีปริมาณธาตุแมงกานีสที่ระดับต่ำ หรือแทบจะไม่มีเลย อย่างไรก็ตามปริมาณของแมงกานีสและความต้านทานการสึกหรอนั้นมีความสัมพันธ์ กล่าวคือ ความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของแมงกานีสมากขึ้นนั่นเอง

แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ระดับของแมงกานีสที่เจืออยู่ในโลหะผสมของเหล็กแมงกานีสส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 10-14% โดยน้ำหนัก ซึ่งในระดับดังกล่าวนี้สามารถจัดอยู่ในระดับแมงกานีสปกติที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ทางผู้วิจัยมีความเห็นว่าหากมีระดับแมงกานีสเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับสูงดังกล่าวแล้ว เช่น มากกว่า 14% โดยน้ำหนัก น่าจะส่งผลต่อสมบัติทางกลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความเค้น ความเครียด ความแข็งแรงความต้านทานการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น จึงเป็นที่มาว่าในการศึกษานี้ ระดับแมงกานีสในโลหะผสมเหล็กแมงกานีสจะสูงกว่าระดับปกติที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน หรืออาจเรียกได้ว่า Extra-high manganese alloys.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแมงกานีส ระดับความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 3 ระดับ โดยในวิทยานิพนธ์บทที่ 3 นี้ได้มีการเรียบเรียงเนื้อหาในส่วนของวิธีการดำเนินงานวิจัย และขั้นตอนต่าง ๆ โดยแบ่งไว้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุ (Materials)

3.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าผสมแมงกานีส โดยมีระดับความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด 3 ระดับ คือ 11 18 และ 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากระดับของแมงกานีสดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดชื่อของโลหะผสมเป็น 11Mn 18Mn และ 21Mn ตามลำดับ โดยทั่วไปความเข้มข้นของแมงกานีสอยู่ที่ 11-14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงเพิ่มระดับของความเข้มข้นอีก 2 ระดับ คือ 18 และ 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อจะได้ศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาค ตลอดจนสมบัติทางกลต่าง ๆ หลังจากนั้นมาข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลต่อไป นอกเหนือจากธาตุแมงกานีสได้มีการผสมธาตุเจืออื่น ๆ ลงไปอย่างเท่า ๆ กัน คือ โครเมียม (Cr) คาร์บอน (C) และ ซิลิกอน (Si) ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานทดสอบนี้ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง หน่วย เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)

ธาตุ วัสดุ	Mn	Cr	C	Si	Ni	P	S
11Mn	13.20	2.00	1.27	0.45	<0.1	<0.04	<0.03
18Mn	17.80	1.90	1.31	0.54	<0.1	<0.04	<0.03
21Mn	19.40	2.05	1.33	0.58	<0.1	<0.04	<0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 กระบวนการผลิตวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ส่วนผสมนี้ เริ่มด้วยการชั่งตวงโลหะบริสุทธิ์ตามสัดส่วนที่ต้องการ จากนั้นใส่โลหะและส่วนผสมทั้งหมดลงในเตาหลอมไฟฟ้าความถี่สูง (Induction furnace) ทำการหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อทราย (Sand mold) ที่เตรียมไว้ โดยแบบหล่อทรายนี้ในการหล่อถูกออกแบบให้มีช่องว่างภายในเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 30 มิลลิเมตร ยาว 260 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 เมื่อโลหะผสมแต่ละส่วนผสมแข็งตัวแล้ว ก็นำโลหะทั้ง 3 ชนิดนี้ไปทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ยี่ห้อ Baird รุ่น FSQ S/N 2712A ดังรูป 3.2 โดยตารางที่ 3.1 ได้แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแมงกานีสทั้ง 3 ชนิด ซึ่งจากการตรวจสอบระดับความเข้มข้นของแมงกานีสทั้ง 3 ชนิด มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับระดับที่ได้กำหนดไว้ คือ 11 18 และ 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

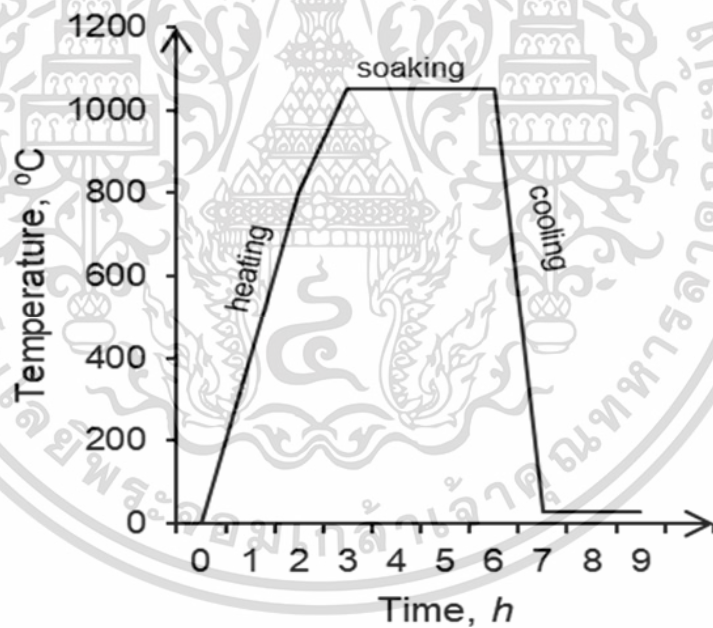
หลังจากกระบวนการหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น ก็วางชิ้นงานไว้จนกว่าชิ้นงานจะเย็นตัวลงทั้งหมดจนอุณหภูมิห้อง แล้วจึงแกะแบบหล่อทรายออกจากชิ้นงานเหล็ก นำชิ้นงานเหล็กนี้เข้าสู่กระบวนการตัดแต่ง เจียรชิ้นงาน ตัดทางเดินน้ำโลหะออก ให้เหลือแต่ชิ้นงานอย่างเดียว หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้นี้เข้าสู่กระบวนการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization heat treatment) ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยตัวแปรในกระบวนการอบเป็นไปตามแผนภาพแสดงดังรูปที่ 3.3 หลังจากผ่านกระบวนการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว เหล็กกล้าแมงกานีสถูกนำออกจากเตาอบและถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ (Water quenching)



รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานทรงกระบอกที่ใช้ในกระบวนการหล่อเหล็กกล้าแมงกานีส



รูปที่ 3.2 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ยี่ห้อ Baird รุ่น FSQ S/N 2712A



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวของเหล็กกล้าแมงกานีส

3.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure characterization)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ผ่านการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนั้น หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้แล้วซึ่งมีขนาดกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว มาตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) โดยใช้ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M ดังแสดงในรูปที่ 3.4 อย่างไรก็ตามได้มีการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron back-scattered diffraction, EBSD) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งการทดสอบแบบ EBSD นี้ใช้พลังงานขั้วอิเล็กตรอนขนาด 25 กิโลโวลต์ (kV) ขนาดระยะสแกน 8 ไมโครเมตร (μm) และกำลังขยาย 125 เท่า และนอกจากนี้ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น MiniFlex ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งการทดสอบแบบ XRD นี้ใช้รังสีเอ็กซ์จากเป้า (Target) ชนิด $\text{CuK}\alpha$ ซึ่งในความยาวคลื่นของรังสีเท่ากับ 0.1547 นาโนเมตร (nm) โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟที่ใช้มีขนาด 45 กิโลโวลต์ (kV) และ 40 มิลลิแอมแปร์ (mA) ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Thermo Fisher scientific รุ่น Apreo S

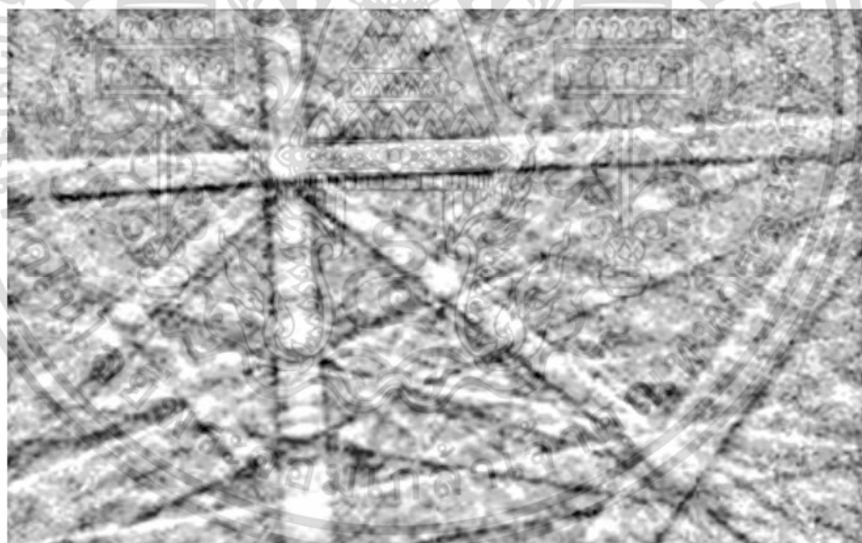


รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น MiniFlex

การตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) โดยกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ใช้แสงเป็นส่วนประกอบในการทำให้มองเห็นภาพมาสู่สายตาคนเรา ซึ่งหลักการทำงานมาจากแสงจะเริ่มวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์ และแสงนี้จะไปตกกระทบที่วัตถุ แล้วหลังจากนั้นแสงจะส่องผ่านเข้าสู่ลำกล้องจุลทรรศน์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

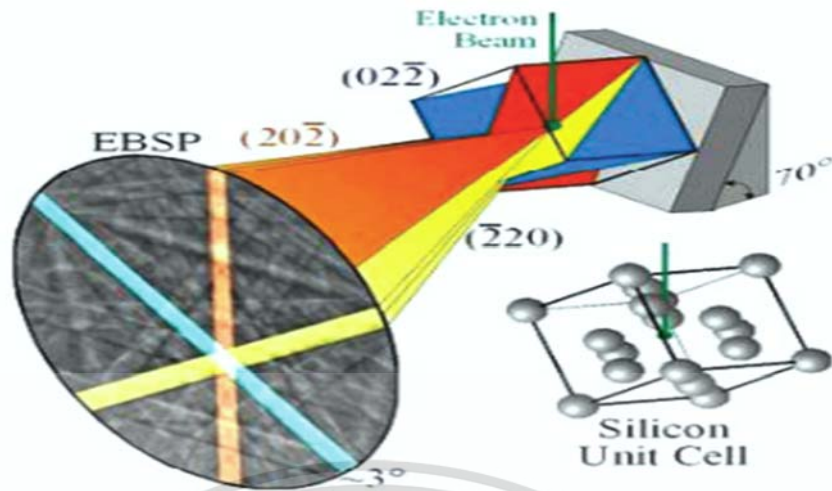
แล้วเข้าสู่สายตาผู้ตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบสามารถเห็นภาพต่าง ๆ ได้นั้นต้องทำการมองผ่านเลนส์ Eyepiece และกล้องจุลทรรศน์แบบแสงนี้ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบสองมิติตามกำลังขยายของเครื่อง โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นต้องผ่านกระบวนการเจียรนัย (Grinding) การขัดเงา (Polishing) และการกัดกร่อนด้วยกรด (Etching) ก่อน

เทคนิคการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron back-scattered diffraction, EBSD) เป็นเทคนิคในการศึกษาตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของโครงสร้างผลึกในชิ้นงานทดสอบ ในการทดสอบด้วยเทคนิคนี้เริ่มจากลำแสงของอิเล็กตรอนที่ยิงมาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) เกิดการเลี้ยวเบน (Diffracted) ไปที่ระนาบของผลึกแล้วเกิดการตกกระทบที่บนจอฟอสเฟอร์ (Phosphor screen) เกิดเป็นภาพที่เป็นแถบลาดหลายชั้น ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งภาพที่ปรากฏนี้ เรียกว่า แถบคิกูชิ (Kikuchi band) โดยในแต่ละอะตอมของวัสดุก็จะปรากฏเกิดแถบคิกูชิออกมาในแนวระนาบนั้นๆ การศึกษาดูแถบคิกูชินี้ทำให้ทราบข้อมูลถึงลักษณะของโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) และทิศทางการวางตัวของผลึก ดังในรูปที่ 3.8 [39]



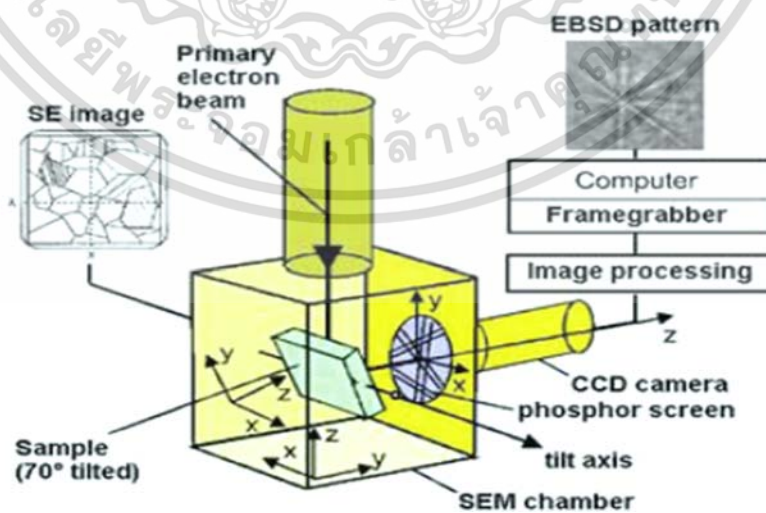
รูปที่ 3.7 ภาพแถบคิกูชิ (Kikuchi band) [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



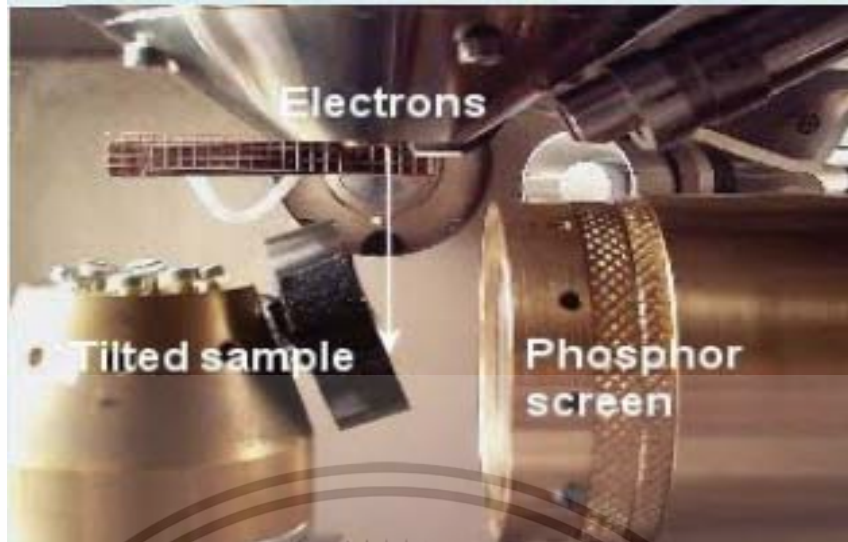
รูปที่ 3.8 แถบคึกิซิจากลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนเมื่อกระทบกับระนาบของผลึก [39]

ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) ที่มีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ของการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (EBSD) ตามรูปที่ 3.9 และ 3.10 โดยชุดอุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วย 2 สิ่งหลัก ๆ คือ จอฟอสเฟอร์ ซึ่งมีหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอนที่ถูกเลี้ยวเบนจากการกระทบในแนวระนาบจนทำให้เกิดภาพแถบคึกิซิจ และอีกสิ่ง คือ กล้องที่วางในแนวระดับ ซึ่งมีหน้าที่บันทึกภาพแถบคึกิซิจบนจอฟอสเฟอร์ แล้วส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อทำให้ทราบถึงลักษณะของโครงสร้างผลึก ตลอดจนทิศทางการวางตัวของผลึกที่แสดงในรูป 3.11

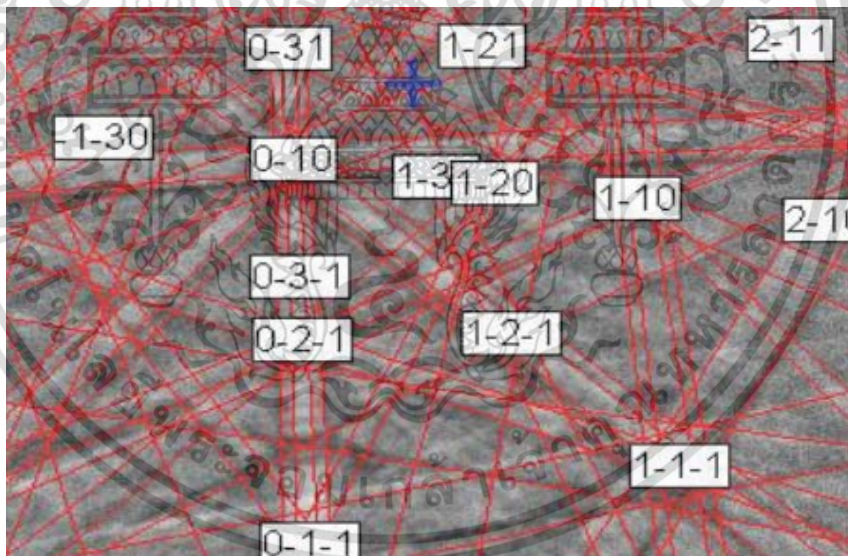


รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์ของการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (EBSD) [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายจากภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์ EBSD [39]



รูปที่ 3.11 การประมวลผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อบอกทิศทางการวางตัวของแต่ละระนาบของโครงสร้างผลึก [39]

การตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ซึ่งเครื่องชนิดนี้มีหลักการทำงานโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างอะตอมหรือโมเลกุลภายในของชิ้นงาน ต่อจากนั้นทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่อต่าง ๆ ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หักเหและเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แล้วทำการสะท้อนออกมาที่มุมองศาต่าง ๆ กับระนาบของอนุภาคที่เท่ากันกับมุมองศาของรังสีตกกระทบ โดยข้อมูลที่ได้หลังจากการวิเคราะห์และประมวลผลจากคอมพิวเตอร์แล้วนั้นสามารถแสดงโครงสร้างผลึกของวัสดุได้อย่างชัดเจน

3.3 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties)

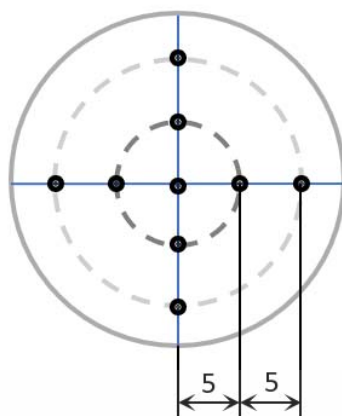
3.3.1 การตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness test)

การตรวจสอบค่าความแข็งของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสหลังการอบใช้การตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester) ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร ในแต่ละระดับของแมงกานีสที่ 11Mn 18Mn และ 21Mn ดังรูปที่ 3.12 การทดสอบความแข็งนี้ได้ทำการทดสอบในแต่ละชิ้นทดสอบทั้งหมด 9 ตำแหน่งที่บริเวณเดียวกันของทั้ง 3 ประเภทของระดับแมงกานีส เพื่อสร้างความแม่นยำให้กับผลทดสอบมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 3.13 เครื่องวัดความแข็งที่นำมาใช้ทดสอบนี้ ยี่ห้อ Innovatest รุ่น Nexus 3000 ดังในรูปที่ 3.14 ซึ่งใช้วิธีการวัดความแข็งแบบ Brinell หน่วยที่ใช้ในการวัด คือ HB เพราะค่าความแข็งชนิดนี้ได้ทำการทดสอบบนผิวชิ้นงานที่บริเวณกว้างทั้งชิ้นงานทดสอบ ค่าที่ได้จึงเป็นค่าความแข็งโดยรวมของทั้งวัสดุ โดยในการทดสอบที่ใช้เครื่องวัดความแข็งนี้ได้กระทำการทดสอบด้วยหัวกดขนาด 2.5 มิลลิเมตร ใช้แรงกดที่ 187.5 แกร์กิโลกรัม (kgf) และระยะเวลาในการกด 10 วินาที



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบทั้ง 3 ประเภท คือ 11Mn 18Mn และ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งของชั้นทดสอบทั้ง 3 ประเภท



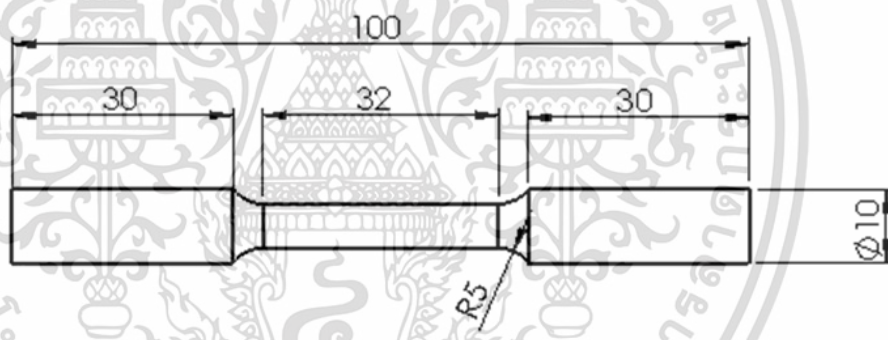
รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความแข็ง ยี่ห้อ Innovatest รุ่น Nexus 3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงนี้ทำเพื่อหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแมงกานีส โดยชิ้นงานทดสอบนี้จะถูกดึงให้ยืดจนขาดในแนวแกน ซึ่งกำหนดความเร็วในการดึงให้มีค่าที่ต่ำ และมีค่าที่คงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบการดึง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

การทดสอบความแข็งแรง (Strength) และ อัตราการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด (Strain hardening rate) ใช้กระบวนการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงถูกเตรียมให้มีขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 การทดสอบแรงดึงกระทำที่อุณหภูมิห้อง และใช้ความเร็วในการดึง 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังวัสดุแบบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG - 100KN ดังรูปที่ 3.17 หลังการทดสอบแรงดึงจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราการแข็งขึ้นเนื่องจากการเสียรูปต่อไป ซึ่งในการทดสอบแรงดึงนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าออกมาทั้งหมด 3 ชนิดคือ ความเค้นจุดคราก (Yield stress) ความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength) และการยืดตัวของวัสดุ (Elongation)



รูปที่ 3.15 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 [40]



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน E8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบกำลังวัสดุแบบเอนกประสงค์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG - 100KN

อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ผลการทดสอบแรงดึงที่แม่นยำมากขึ้น ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงได้มีการทดสอบแรงดึงจำนวน 3 ชั้นต่อหนึ่งประเภทของเหล็กกล้าแมงกานีส ในการทดสอบนี้มีประเภทเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้งหมด 3 ประเภท คือ 11 18 21 เปอร์เซนต์แมงกานีสโดยน้ำหนัก ค่าที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานแต่ละชั้นในแต่ละประเภทนำมาวิเคราะห์โดยใช้หลักการทางสถิติมาทำการหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การหาค่าเฉลี่ย คือ การนำข้อมูลตัวเลขทั้งหมดมาบวกรวมเข้าด้วยกัน แล้วหารด้วยจำนวนของชุดตัวเลขของกลุ่มนั้น ๆ ดังสมการที่ 25 นั้นหมายความว่า นำค่าที่ได้จากการทดสอบเหล็กกล้าแมงกานีส 11 เปอร์เซนต์แมงกานีสโดยน้ำหนักมีจำนวน 3 ครั้งการทดลองมาบวกรวมกันแล้วทำการหารด้วย 3 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของการทดสอบ หลังจากทำการหาค่าเฉลี่ยเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น นำข้อมูลที่ได้มาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าเฉลี่ยที่สามารถบอกได้ว่าข้อมูลตัวเลขแต่ละตัวนั้นมีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยอย่างไร ดังสมการที่ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\text{ข้อมูลทั้งหมด}}{\text{จำนวนของข้อมูล}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (25)$$

โดยที่ \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

x_i = ค่าของข้อมูลแต่ละชุด

n = จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (26)$$

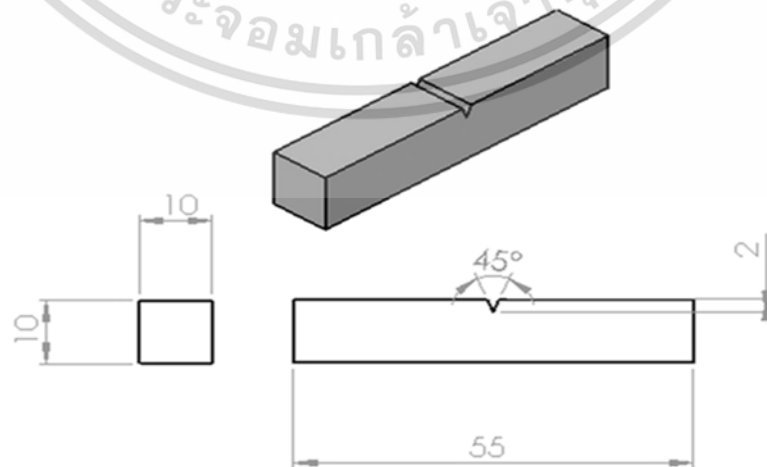
โดยที่ x_i = ค่าของข้อมูลแต่ละชุด

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

n = จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

3.3.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

ความแข็งแรงของวัสดุ (Toughness) ใช้การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) ตามมาตรฐาน ASTM E23 ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการวางชิ้นงานทดสอบในแกนแนวระดับ การทดสอบแรงกระแทกกระทำที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก Amster RKP 300 ดังรูปที่ 3.19 หลังจากการทดสอบนี้ จะได้ค่า Impact energy มีหน่วยเป็นจูล (J)



รูปที่ 3.18 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E23 [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

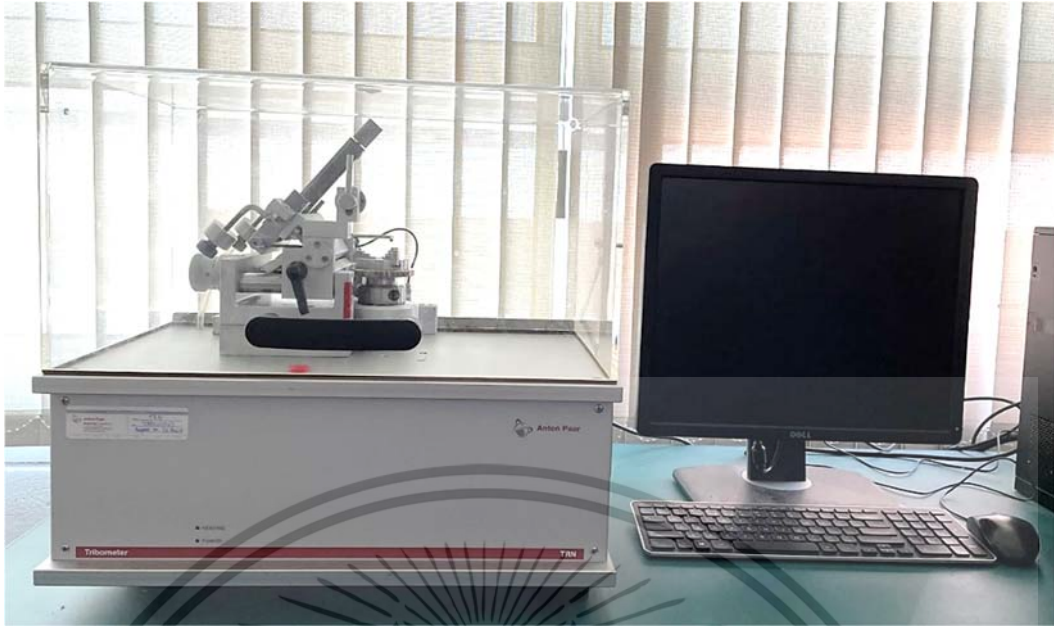


รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบแรงกระแทก Amster RKP 300

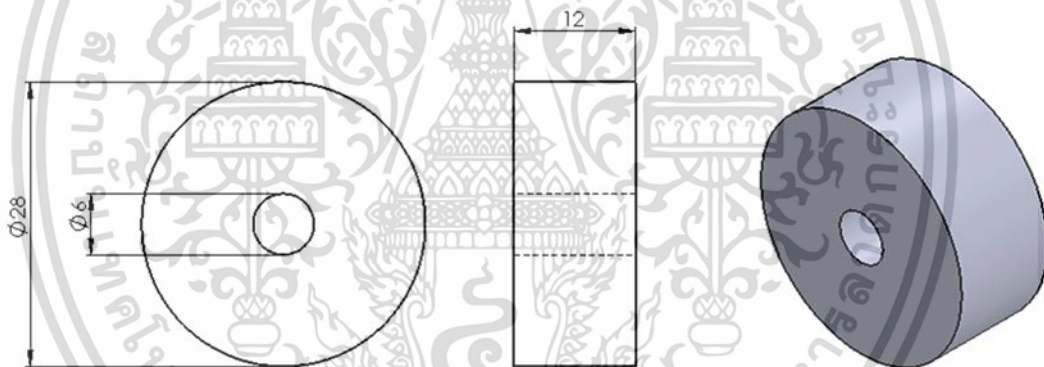
3.3.4 การทดสอบการสึกกร่อน (Wear test)

การทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุทำโดยการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) รุ่น Anton paar TRN ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ตามมาตรฐาน ASTM G99 โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร มีรูตรงตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.21 และ 3.22 ซึ่งในการทดสอบทำในรูปแบบการชูดบนวัสดุหมุน (Pin-on-disk) ซึ่งมีคาร์ซีมี (Radius) เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ด้วยแรงกระทำ (Load) เท่ากับ 5 นิวตัน ความเร็วในแนวเส้นตรง (Linear speed) เท่ากับ 20 เซนติเมตรต่อวินาที ในระยะทาง (Distance) เท่ากับ 1,000 เมตร และกระทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยผลการทดลองที่ได้ คือน้ำหนักที่หายไปจากการสึกกร่อนของชิ้นงานทดสอบ และหลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ต่อเพื่อดูความสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุตามสมการ Archard ดังสมการที่ 24 (ในบทที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 เครื่องไทรโบมิเตอร์ (Tribometer) รุ่น Anton Paar TRN



รูปที่ 3.21 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM G99 [42]

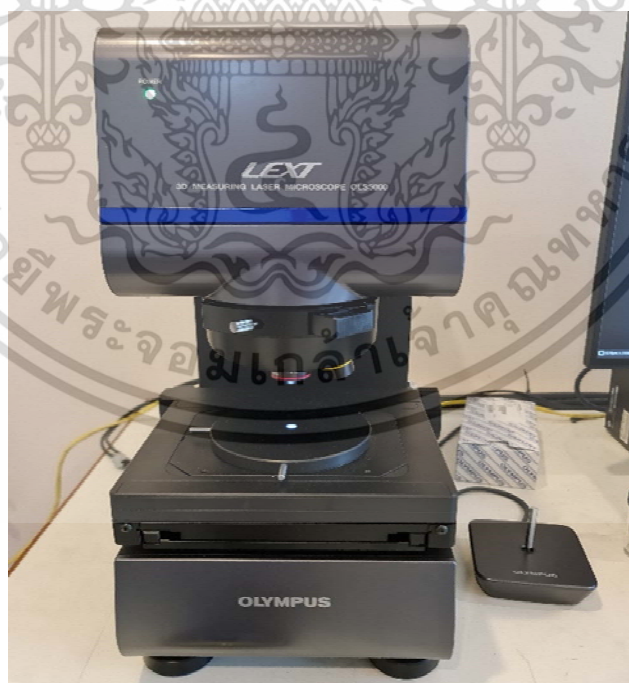


รูปที่ 3.22 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสก่อนการทดสอบของ 11Mn 18Mn และ 21Mn
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปเข้าเครื่องทดสอบวัดหาความลึกหรือระดับจุลภาค (3D Measuring microscope) รุ่น Olympus OLS 500 LEXT ดังแสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24 เพื่อหาข้อมูลว่าชิ้นงานมีความลึกเว้าเพียงใด ภายหลังจากการทดสอบการชุบบนวัสดุหมุน (Pin-on-disk)



รูปที่ 3.23 ชุดเครื่องวัดทดสอบหาความลึกหรือระดับจุลภาค



รูปที่ 3.24 เครื่อง 3D Measuring Laser Microscope รุ่น Olympus OLS 500 LEXT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการสึกหรอบนวัสดุหมุน (Pin-on-disk) หรือการทดสอบการสึกหรอแบบไถลนั้น เป็นการทดสอบที่มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยในการทดสอบนั้นใช้วัสดุ 2 ชนิดทดสอบคู่กัน ซึ่ง วัสดุชิ้นที่หนึ่งจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกหรือทรงกลม เปรียบเสมือนเป็นเข็ม หรือตัวกด เรียกว่า พิน (Pin) จะถูกสวมด้วยลูกตุ้ม เพื่อเป็นการเพิ่มแรงกดในแนวตั้งฉากและให้สัมผัสกับวัสดุชิ้นที่สองที่มีลักษณะเป็นจานแบน หรือเรียกว่า ดิสก์ (Disk) ในการทำการทดสอบนั้นจะต้องมีการให้ดิสก์ หมุนในลักษณะเป็นวงกลมรอบตัวเองแล้วเกิดการเสียดสีที่ระหว่างผิวของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จนกระทั่ง เกิดเป็นร่องรอยของการเสียดสี หรือเรียกว่ารอยสึก จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบนี้มาวิเคราะห์ การสึกหรอ สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณเนื้อวัสดุที่หายไป ดังสมการที่ 27

ปริมาณเนื้อวัสดุที่หายไปสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$v_l = \frac{m_l}{d} \times 1000 \quad (27)$$

โดยที่ v_l = ปริมาตรเนื้อวัสดุที่หายไป หน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
 m_l = น้ำหนักของวัสดุที่หายไป หน่วยเป็น กรัม (g)
 d = ความหนาแน่นของวัสดุ หน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

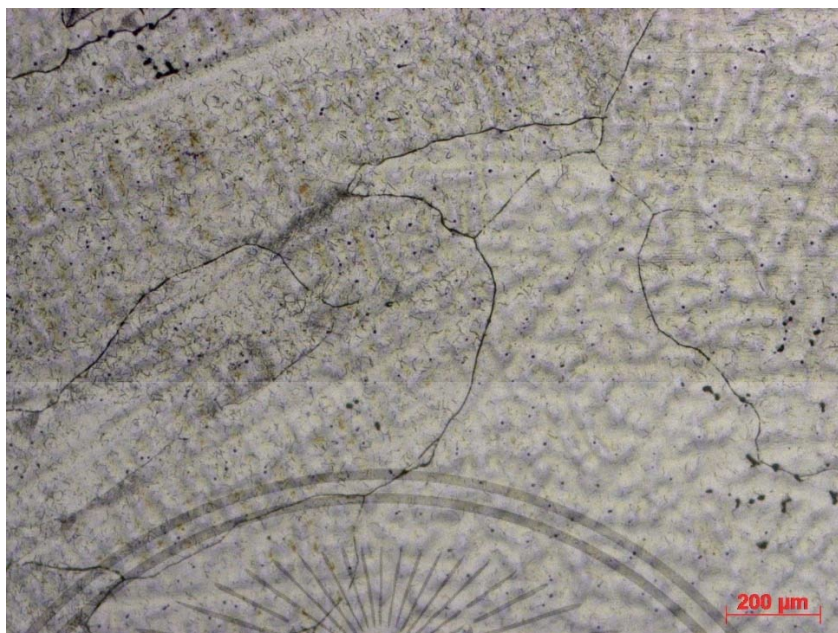
4.1 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

จากการนำชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ (11Mn 18Mn และ 21Mn) ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) แล้วนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ภาพถ่ายพบว่าโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ มีเกรนขนาดใหญ่และหยาบ โดยที่ขนาดเกรนนั้น มีขนาดตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับขนาดมิลลิเมตร

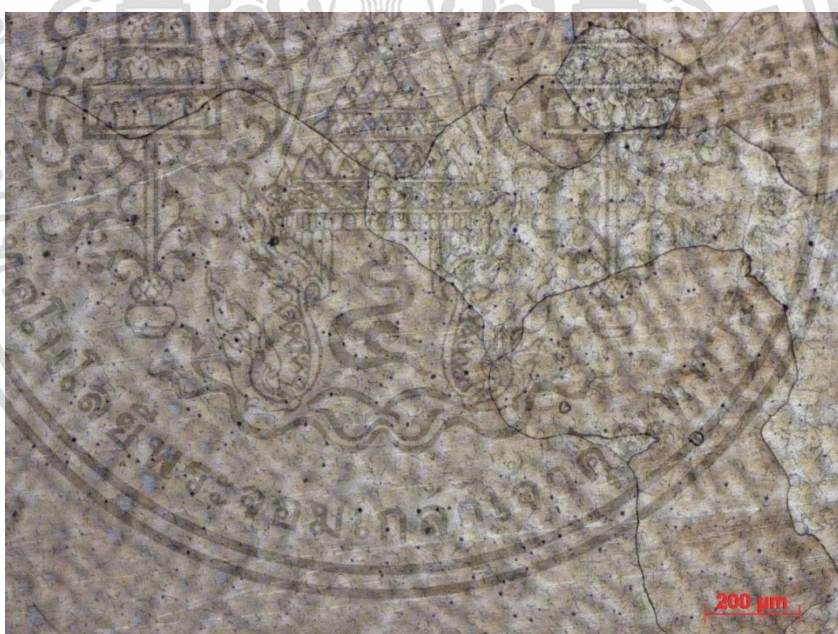


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



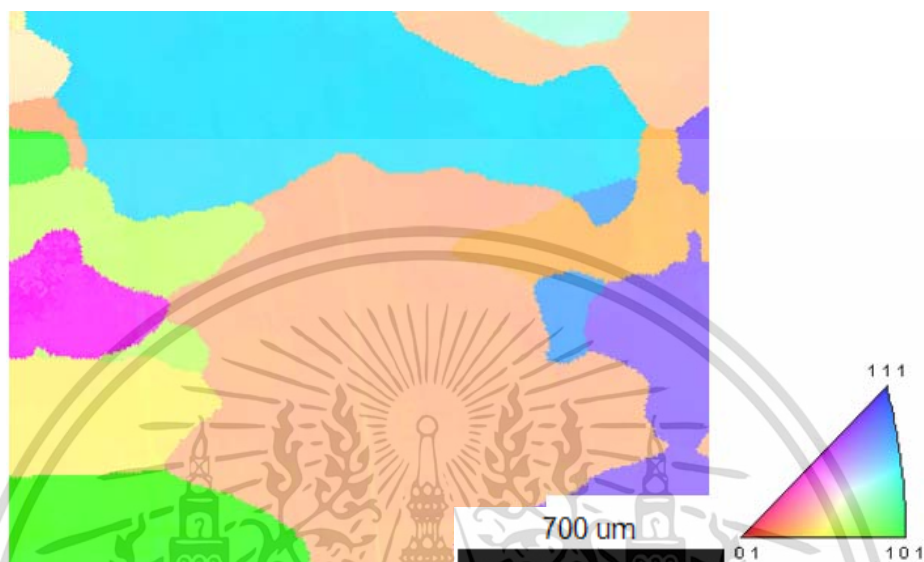
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn

รูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 แสดงแผนภาพ Inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวแล้ว จากแผนภาพ IPF พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ (11Mn 18Mn และ 21Mn) ที่ได้จากกระบวนการหล่อนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีโครงสร้างเป็นวัสดุหลายผลึก (Polycrystalline structure) และมีทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึกที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยอ้างอิงจากจากสีที่ปรากฏในภาพและดัชนีทิศทางตามที่แสดงไว้ในรูป



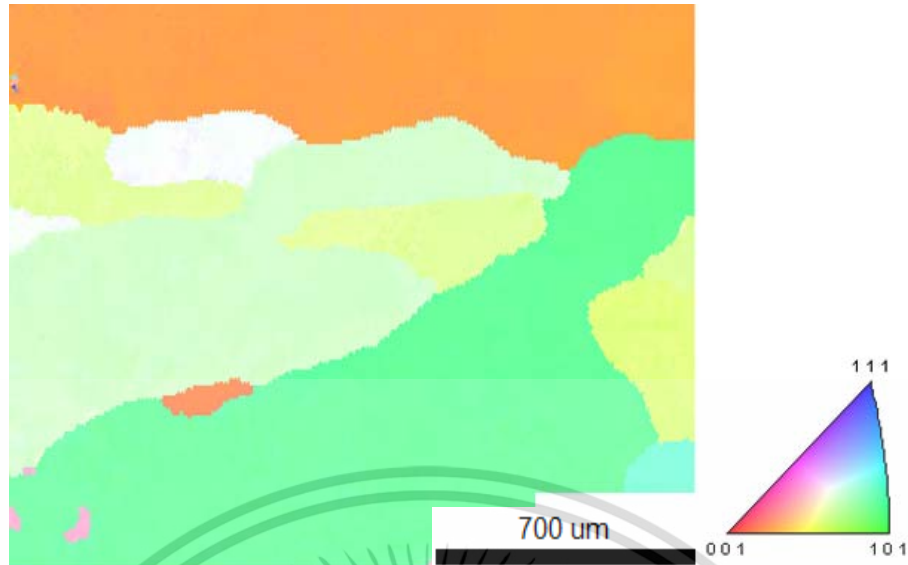
รูปที่ 4.4 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn



รูปที่ 4.5 แผนภาพ EBSD inverse pole

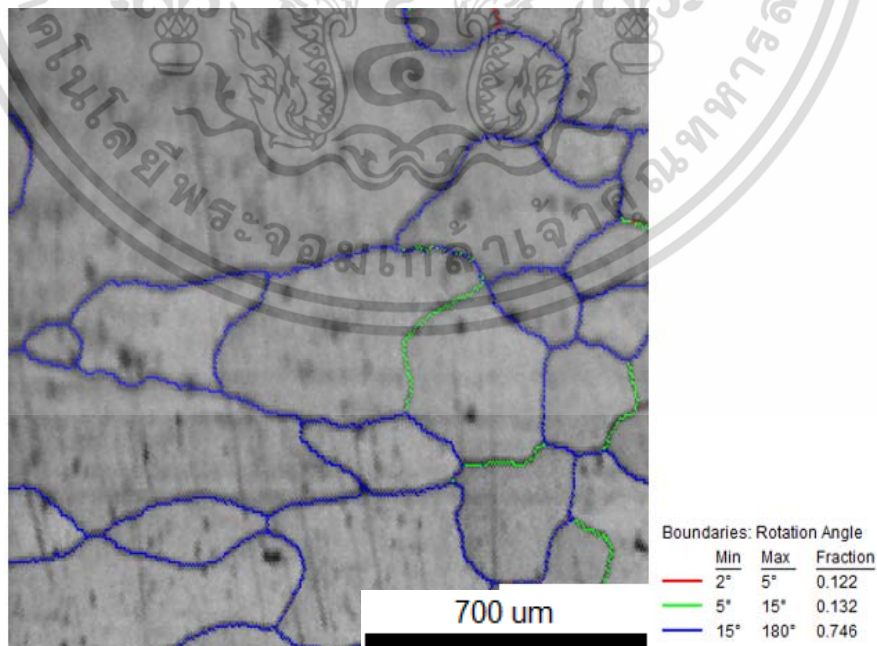
รูปที่ 4.5 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



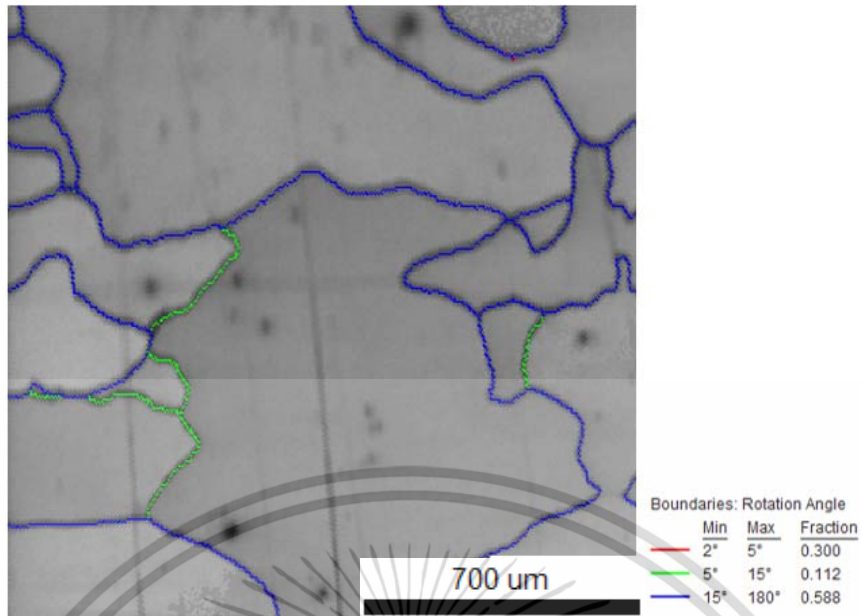
รูปที่ 4.6 แผนภาพ EBSD inverse pole figure (IPF) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn

รูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 แสดงแผนภาพ Image quality (IQ) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn ตามลำดับ ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวแล้ว เมื่อพิจารณาจากแผนภาพ IQ พบว่าขนาดและรูปร่างของเกรนปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนกว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

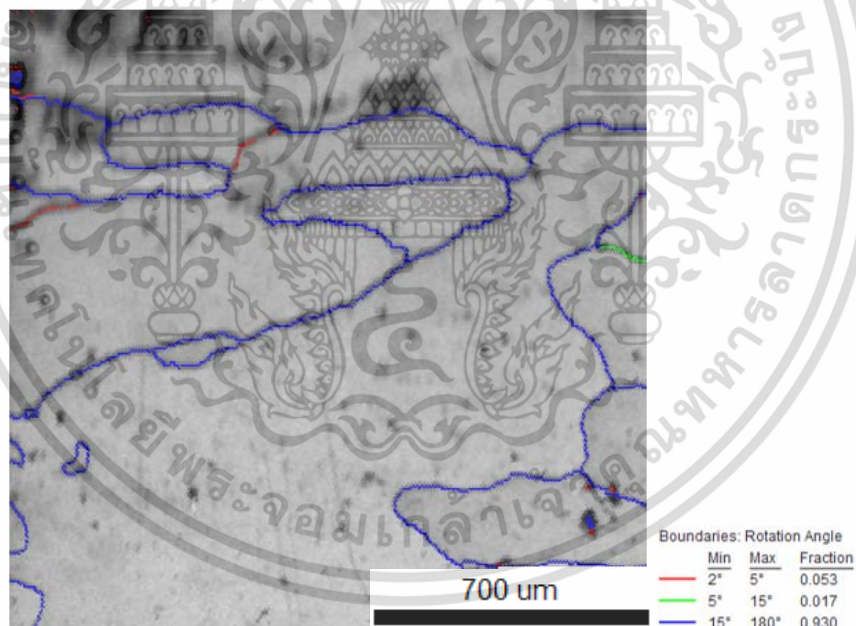


รูปที่ 4.7 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



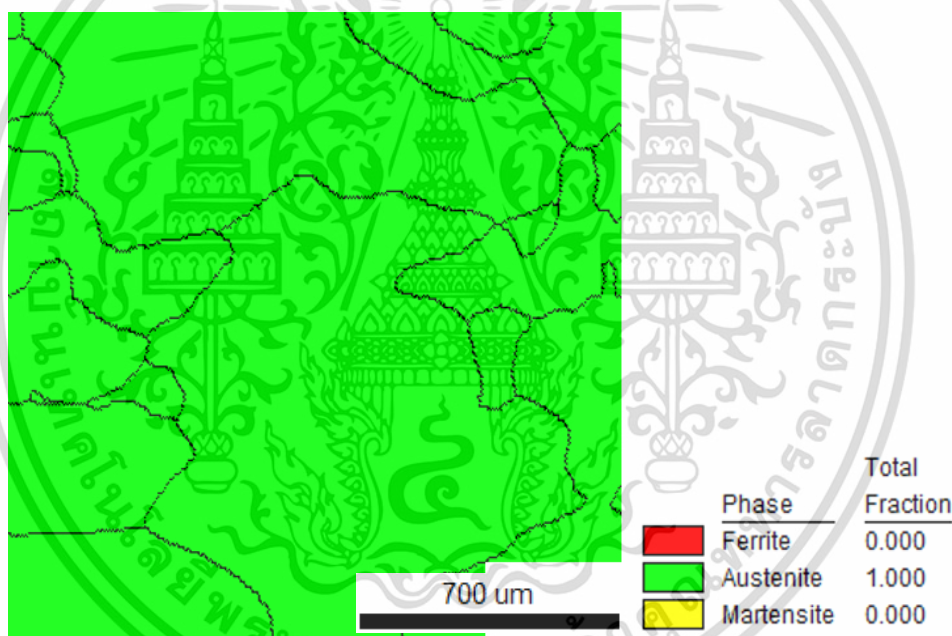
รูปที่ 4.8 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn



รูปที่ 4.9 แผนภาพ EBSD image quality (IQ) map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn

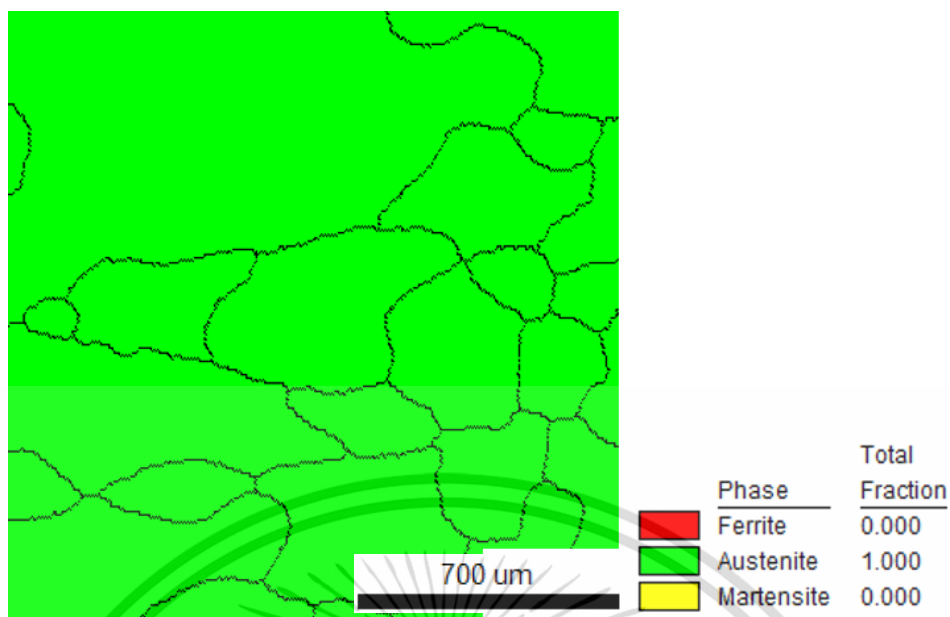
นอกจากนั้น แผนภาพ IQ แสดงให้เห็นถึงองศาความแตกต่างระหว่างผลึกแต่ละผลึก (Misorientation angle) ซึ่งจากข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้พบว่า ผลึกแต่ละผลึกมีมุมความแตกต่างกันระหว่างผลึกมากกว่า 15 องศาเป็นส่วนใหญ่ (แสดงตามเส้นสีน้ำเงินตามขอบเกรน) และผลที่ปรากฏเช่นนี้มีแนวโน้มไม่ไปในทางเดียวกันทั้ง 3 ชนิดของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ในกรณีนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 แสดงแผนภาพเฟส (Phase Map) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn ตามลำดับที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EBSD ทั้งนี้ในการตรวจสอบเฟสของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ ได้กำหนดให้มีการตรวจสอบเฟสทั้งหมด 3 เฟส คือ เฟอร์ไรต์ (Ferrite, α), ออสเตนไนต์ (Austenite, γ) และ มาร์เทนไซต์ (Martensite, ϵ) ซึ่งเฟสทั้ง 3 นี้ เป็นเฟสที่คาดว่าจะปรากฏขึ้นหลังการอบเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ผลจากการทดสอบ ดังรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ปรากฏว่ามีเพียงเฟสออสเตนไนต์ (Austenite) เกิดขึ้นเพียงเฟสเดียว ในสัดส่วน 100% ซึ่งแสดงตามสีที่ได้เป็นสีเขียวทั้งหมด ผลที่ได้นี้เป็นการเน้นย้ำว่าเหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) แล้วนั้น ยังคงมีโครงสร้างออสเตนไนต์ (Austenite) ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากผลของแมงกานีสที่ถูกเติมลงไปในเหล็กกล้าเป็นธาตุที่เพิ่มความเสถียรให้กับเฟสออสเตนไนต์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

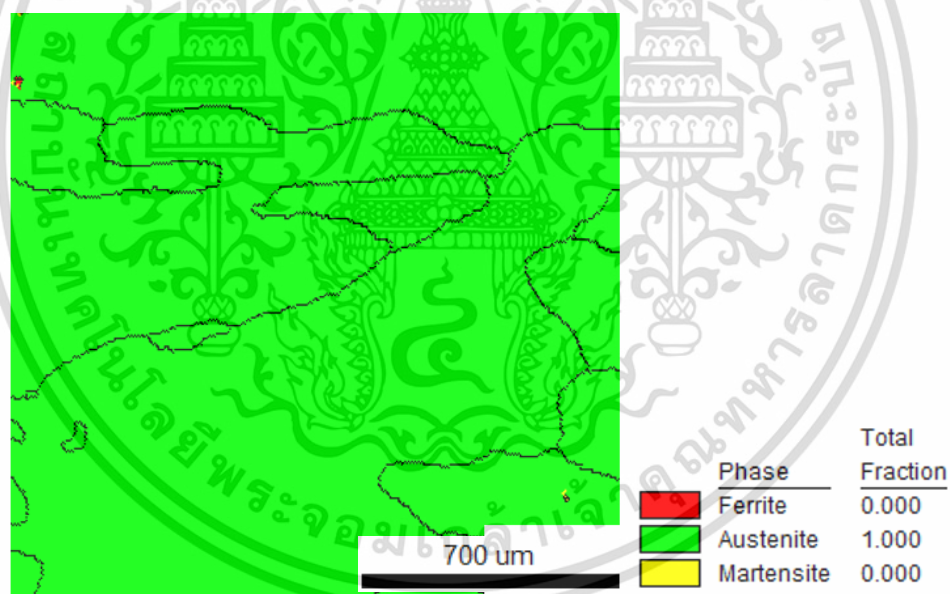


รูปที่ 4.10 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



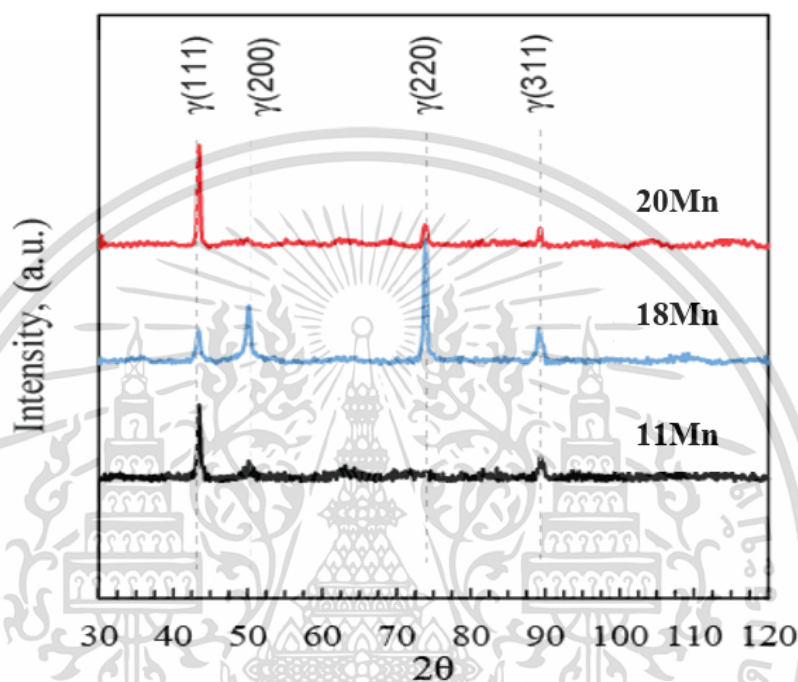
รูปที่ 4.11 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn



รูปที่ 4.12 แผนภาพ EBSD phase map ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn

เฟสของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับนี้ถูกตรวจสอบซ้ำโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) โดยผลการตรวจสอบและวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.13 โดยจากผลการวิเคราะห์นี้พบว่าโครงสร้างของผลึกทั้งหมดของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn และ 21Mn มีเฟสปรากฏเพียงเฟสเดียว คือ ออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับการตรวจสอบเฟสโดยเทคนิค EBSD และจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เกี่ยวข้องกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ทราบว่าไม่มีการปรากฏของเฟสคาร์ไบด์ ซึ่งมักปรากฏโดยทั่วไปในเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากหลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน เหล็กกล้าแมงกานีสทั้ง 3 ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ (Quenching) ซึ่งทำให้การเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องที่รวดเร็วนี้นอกจากจะส่งผลให้เฟสที่ปรากฏยังคงเป็นเฟสออสเทนไนต์แล้ว เวลาในการก่อตัวของเฟสคาร์ไบด์จะถูกจำกัด จนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทันที่อุณหภูมิสูงนั่นเอง



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์เฟสของเหล็กกล้าแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

4.2 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

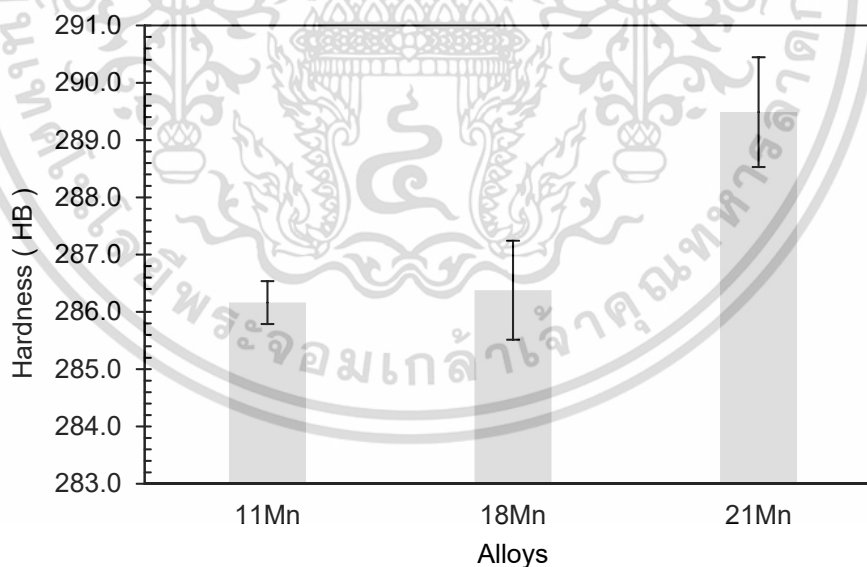
4.2.1 ความแข็ง (Hardness)

เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization heat treatment) ถูกนำมาทดสอบค่าความแข็งด้วยเทคนิค Brinell โดยในการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าที่มีระดับแมงกานีสแตกต่างกัน กระทำการทดสอบทั้งหมด 9 ตำแหน่งตามรูปที่ 3.13 ที่แสดงข้างต้นแล้วในบทที่ 3 และหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งนำค่าความแข็งทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์หาค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% 18% และ 21% มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 286.16 286.38 และ 289.49 HB ตามลำดับ และค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ คือ $\pm 2.77 \pm 2.0$ และ ± 2.36 HB ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลค่าความแข็งเฉลี่ยนี้มาแสดงในกราฟแท่ง ซึ่งจากกราฟที่ได้มีค่าความแข็งในรูปแบบกราฟแท่ง พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีระดับความสูงของกราฟแท่งมากที่สุด รองลงมาคือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn และกราฟแท่งที่ต่ำสุด คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn และที่มีค่าความแข็งต่ำที่สุด คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง หน่วย (HB)

วัสดุ	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
11Mn	286.16	± 2.77
18Mn	286.38	± 2.00
21Mn	289.49	± 2.36



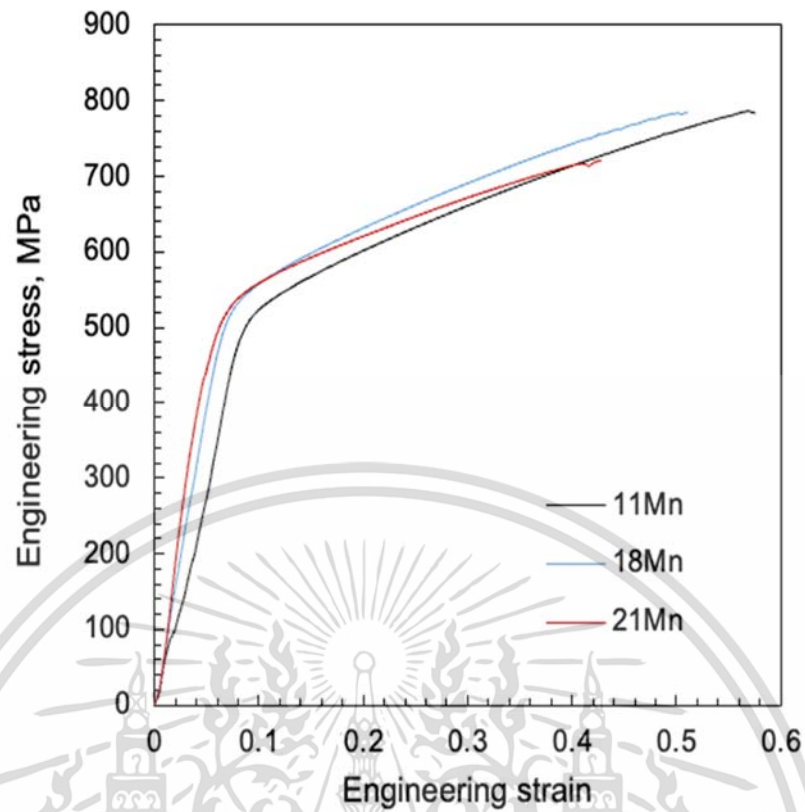
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัดความแข็งแบบ Brinell ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นที่แมงกานีสต่างกันนั้น พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีระดับแมงกานีสที่สูงขึ้น ทำให้มีค่าความแข็งที่สูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากโครงสร้างอะตอมของแมงกานีสเข้าไปแทนที่โครงสร้างอะตอมของเหล็ก ส่งผลให้โครงสร้างอะตอมเกิดการบิดเบี้ยวมากขึ้น ดังนั้น สรุปได้ว่าระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

4.2.2 แรงดึง (Tensile)

ในการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ คือ 11Mn 18Mn และ 21Mn ได้ผลจากการทดสอบแรงดึงแสดงในรูปที่ 4.15 ในรูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ จากนั้นได้มีการทดสอบเพื่อพิจารณาค่าสมบัติแรงดึงต่าง ๆ โดยประกอบไปด้วย ความเค้นจุดคราก (Yield stress) ความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength) และการยืดตัวของวัสดุ (Elongation) ซึ่งค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 โดยเริ่มจากเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn มีค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยอยู่ที่ 481.41 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 25.0 MPa ค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 786.34 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 86.4 MPa และค่าการยืดตัวของวัสดุเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 39.73% ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 5.3\%$ ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn มีค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยอยู่ที่ 480.07 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 36.5 MPa ค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 784.01 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 26.4 MPa และค่าการยืดตัวของวัสดุเฉลี่ย คือ 39.92% ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 5.6\%$ และสุดท้ายเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยอยู่ที่ 452.38 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 38.2 MPa ค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 720.17 MPa ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 66.4 MPa และค่าการยืดตัวของวัสดุเฉลี่ย คือ 32.50% ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 12.8\%$ ต่อจากนั้นนำค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดคราก ความแข็งแรงสูงสุด และการยืดตัวของวัสดุที่ได้มาพล็อตกราฟ แสดงในรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 โดยพิจารณาจากกราฟทั้ง 3 แบบ คือ ค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดคราก ค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยืดตัวของวัสดุแล้วนั้น ความสูงของทุกกราฟทั้งหมดในแต่ละประเภทของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสไม่ว่าจะเป็น 11Mn 18Mn และ 21Mn นั้น มีความสูงของกราฟที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ก็พบว่าค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดครากของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับก็มีค่าตัวเลขที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงสูงสุด และค่าเฉลี่ยของการยืดตัวของวัสดุก็เป็นในทิศทางที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn มีผลของการทดสอบในค่าต่าง ๆ อยู่ในช่วงตัวเลขที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

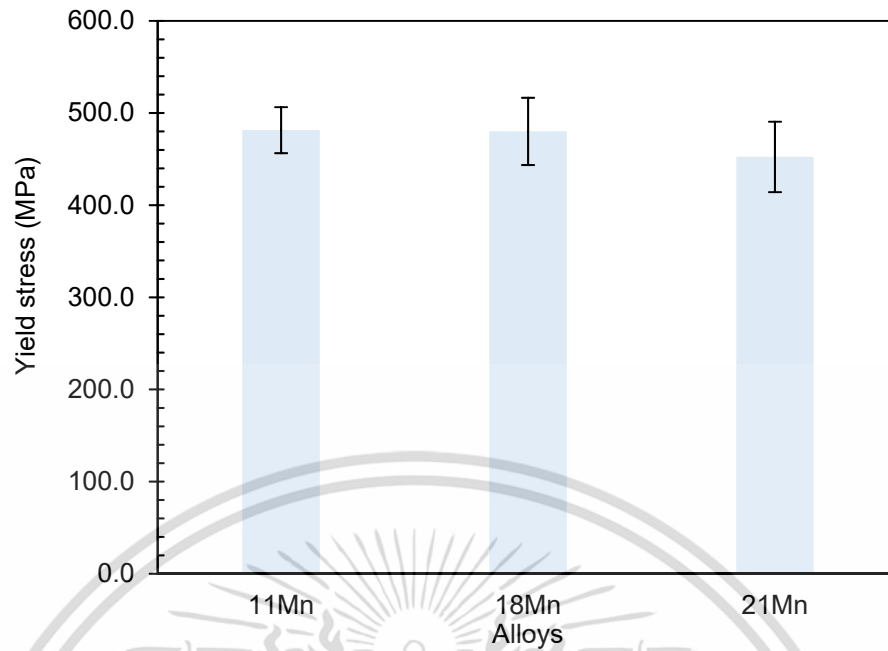


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดวิศวกรรมของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

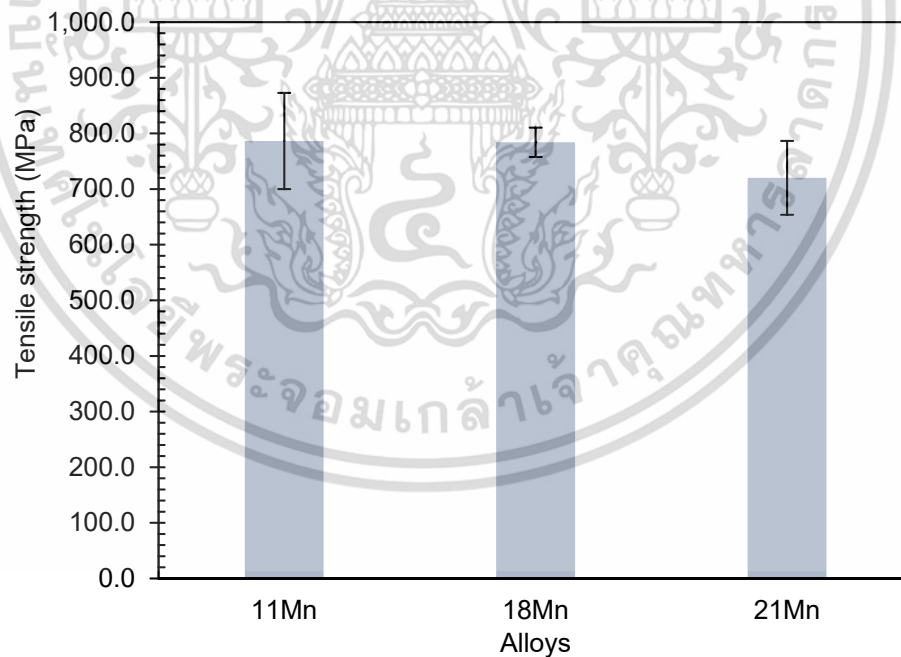
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง

วัสดุ	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
11Mn	481.41 ± 25.0	786.34 ± 86.4	39.73 ± 5.3
18Mn	480.07 ± 36.5	784.01 ± 26.4	39.92 ± 5.6
21Mn	452.38 ± 38.2	720.17 ± 66.4	32.50 ± 12.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

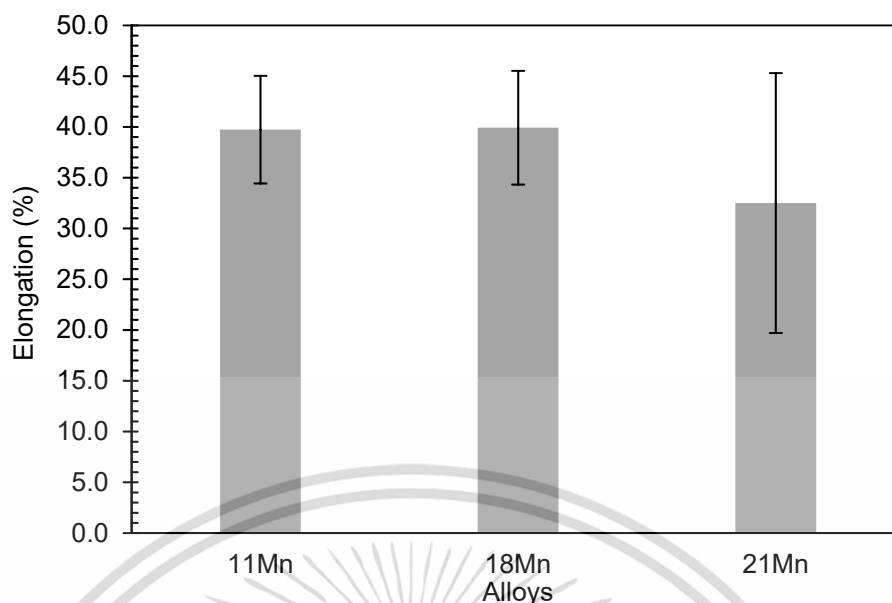


รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดครากของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn



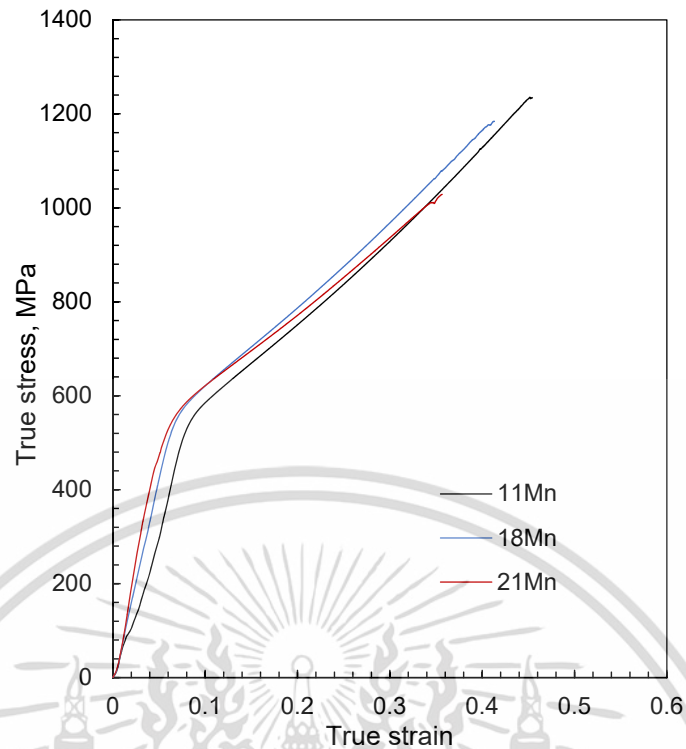
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการยืดตัวของวัสดุของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

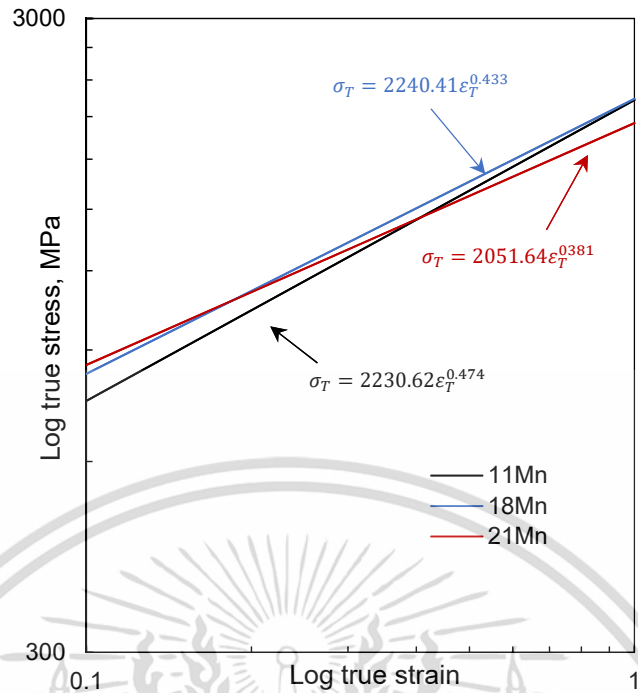
หลังจากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ดัชนีส่วนผสม 11Mn 18Mn และ 21Mn แล้วนั้น ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมถูกแปลงให้เป็นความเค้นและความเครียดจริง (True stress - true strain) โดยอาศัยสมการที่ 13 และ 17 (บทที่ 2) เพื่อทำการวิเคราะห์อัตราของการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงแสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่าความเค้นและความเครียดจริงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ประเภทนี้มีลักษณะของกราฟที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม โดยช่วงความเครียดแบบคืนรูป (Elastic strain) หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) มีค่าความเค้นจริงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.7 ส่วนช่วงความเครียดแบบคงรูป (Plastic strain) หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) มีค่าความเครียดจริงตั้งแต่ 0.7 เป็นต้นไปจนกระทั่งขึ้นงานทดสอบเกิดการฉีกขาด



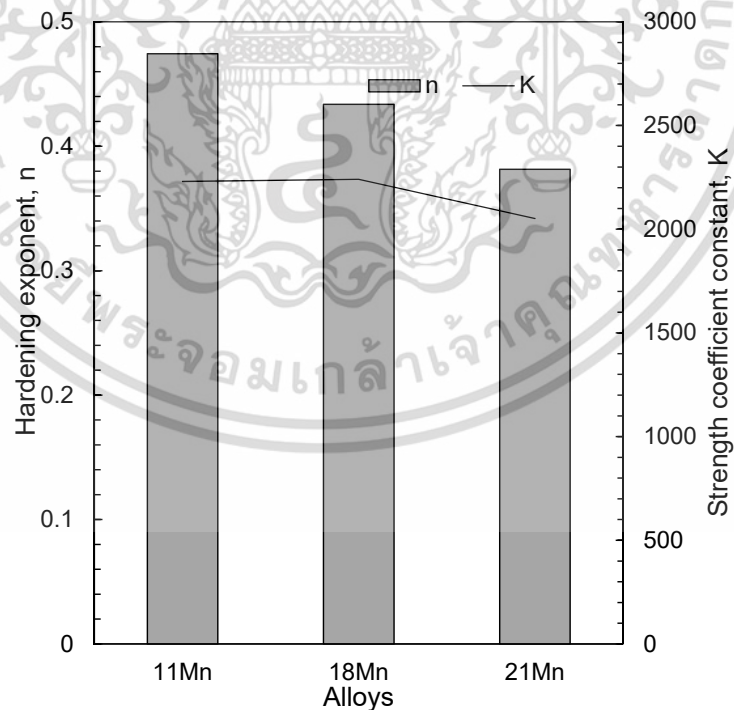
รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจริงและความเครียดจริงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

ในพลวัตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร หรือการเสียรูปแบบพลาสติกนี้สามารถวิเคราะห์ต่อได้โดยใช้สมการ Power-law ตามสมการที่ 18 (บทที่ 2) ทำให้ทราบค่า K คือ Strength coefficient และ n คือ Strain-hardening exponent ซึ่งค่า K และ n สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของความเค้นและความเครียดจริง ดังแสดงในกราฟ log ตามรูปที่ 4.20 โดยผลของความสัมพันธ์ของสมการ Power-law กับความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงนั้น ทำให้ได้ค่าสมการของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn คือ $\sigma_T = 2230.62\varepsilon_T^{0.474}$ ค่า K คือ 2,230.62 และค่า n คือ 0.474 ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn คือ $\sigma_T = 2240.41\varepsilon_T^{0.433}$ ค่า K คือ 2,240.41 และค่า n คือ 0.433 และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn คือ $\sigma_T = 2051.64\varepsilon_T^{0.381}$ ค่า K คือ 2,051.64 และค่า n คือ 0.381 ผลการเปรียบเทียบค่า K และ n ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ประเภท แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่า ค่า K และ n จะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อระดับความเข้มข้นของแมงกานีสมีค่าสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วค่า n จะบ่งบอกถึงความสามารถในการแข็งตัวของวัสดุ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น ส่งผลให้ความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป หรือไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นหมายความว่า วัสดุมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจาก ความเปราะหรือการแตกหัก

เมื่อมีความแข็งมากขึ้นในระหว่างการใช้งานที่ลดลง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



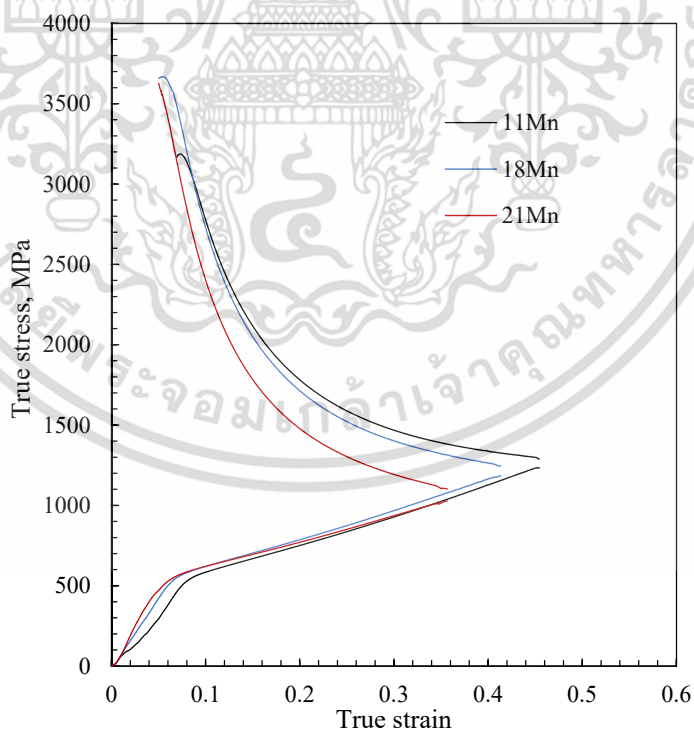
รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจริงและความเครียดจริงในรูปแบบของ log ที่มีค่า K และ n ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn



รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่า K และ n ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain hardening behavior) โดยอาศัยสมการอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด สมการที่ 22 (บทที่ 2) ซึ่งจากการพล็อตอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความเค้นและความเครียด จะได้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate) แสดงในกราฟ ดังรูปที่ 4.22 ผลจากการศึกษาพบว่ากราฟของอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดแบ่งออกเป็น 2 ช่วงระยะ ซึ่งระยะเริ่มต้นของการเสียรูปแบบพลาสติกนั้นมีความเค้นจริงอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 ทำให้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดมีค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็วนี้เกิดการเคลื่อนที่แบบ slip (Slip deformation) จากข้อมูลในหัวข้อ 2.1.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (บทที่ 2) และในช่วงระยะที่ 2 เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกที่มากขึ้น มีความเค้นจริงตั้งแต่ 0.2 เป็นต้นไป ทำให้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดมีค่าที่ลดลงอย่างช้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าแมงกานีสระดับ 21Mn ดังนั้นการเพิ่มระดับเปอร์เซ็นต์ของแมงกานีสในเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้มีแนวโน้มทำให้เกิดอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากระดับแมงกานีสจะช่วยให้เพิ่ม Stacking fault energy (SFE) ให้สูงขึ้น ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเกิดขึ้นไปข้างล่าง ทำให้เกิดการเสียหายที่ข้างล่างด้วยเช่นกัน เป็นการยืดอายุการใช้งานของวัสดุให้ยาวนานขึ้น



รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate)

ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับนั้น ทำให้ได้ค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength) และค่าการยืดตัวของวัสดุ (Elongation) พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับนี้ได้ค่าแต่ละประเภทใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเป็รค่าความเค้นจุดคราก ค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่าการยืดตัวของวัสดุ ซึ่งหมายความว่าระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อค่าแรงดึงทั้ง 3 ประเภทดังที่กล่าวมาในข้างต้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อในเรื่องพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร หรือการเสียรูปแบบพลาสติกที่ใช้สมการ Power-law ตามสมการที่ 18 (บทที่ 2) ทำให้ทราบค่า K คือ Strength coefficient และ n คือ Strain-hardening exponent จากการคำนวณพบว่าค่า Strength coefficient (K) และ Strain-hardening exponent (n) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่า K และค่า n ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn คือ ค่าที่ได้ของทั้งสองประเภทนี้มีแนวโน้มค่าที่ลดลง นั่นหมายความว่าเมื่อระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้นของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ จะทำให้ค่า K และค่า n มีค่าลดลง ผลทดสอบที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลกระทบมาจากค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้น เมื่อระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลต่ออัตราการแข็งตัวของเนื้อจากจากความเครียด (Strain-hardening rate) ให้มีค่าที่ต่ำลง ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป หรือเกิดความเสียหายที่ช้าลง ซึ่งอาจส่งผลให้อายุการใช้งานของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ให้ยาวนานมากขึ้นเมื่อระดับแมงกานีสมีค่าสูงขึ้น

4.2.3 แรงกระแทก (Impact test)

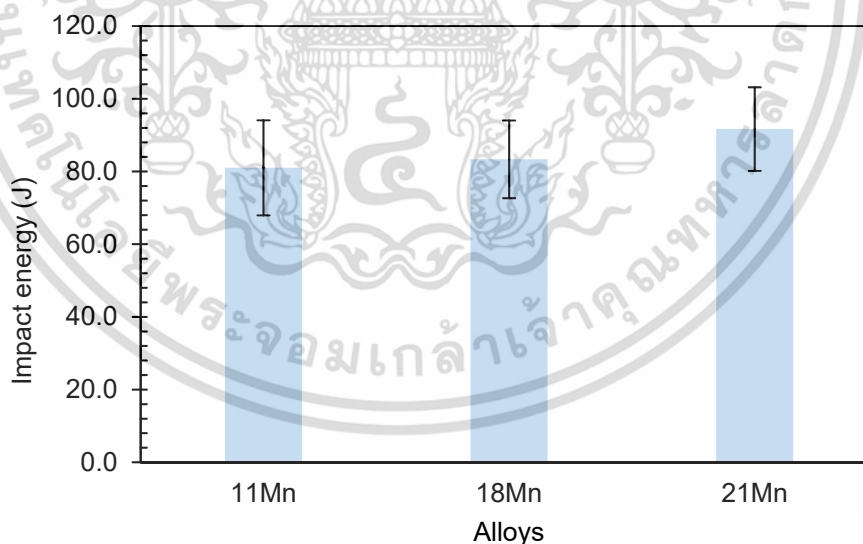
การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Toughness) ใช้วิธีการทดสอบแรงกระแทกแบบแบบชาร์ปี (Charpy impact test) โดยในการทดสอบได้ทำการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ 11Mn 18Mn และ 21Mn ในแต่ละระดับแมงกานีสได้ทำการทดสอบการกระแทกจำนวน 3 ชิ้น หลังจากการทดสอบนี้จะได้ค่า Impact energy มีหน่วยเป็นจูล (J) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของ Impact energy ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn มีค่าเท่ากับ 81 J มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 13.08 J เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83.33 J มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 10.69 J และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.67 J มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 11.50 J ทำการวิเคราะห์จากข้อมูลทั้งหมดนี้แล้วเห็นว่าค่าเฉลี่ยของ Impact energy ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีค่ามากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นี้มาแสดงในกราฟ ดังรูป 4.23 ซึ่งความสูงกราฟที่ได้ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับนี้

พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21Mn มีความสูงมากที่สุด รองลงมา คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18Mn และต่ำที่สุด คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุที่สูงขึ้น เกิดการเสียรูปได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุในข้างต้นที่ระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น วัสดุเกิดการเสียรูปได้ยากเช่นกัน และยังสอดคล้องกับอัตราการแข็งตัวของความเครียดที่ลดต่ำลง วัสดุเสียรูปได้ยากเหมือนกัน เมื่อระดับเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่า Impact energy ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ได้จากการทดลอง หน่วย จูล (J)

วัสดุ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
11Mn	87.00	66.00	90.00	81.00	± 13.08
18Mn	74.00	95.00	81.00	83.33	± 10.69
21Mn	92.00	80.00	103.00	91.67	± 11.50



รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระแทกเฉลี่ยของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การสึกหรอ (Wear Test)

การทดสอบการสึกหรอของวัสดุนั้นทำโดยการทดสอบด้วยวิธีแบบการชูดบนวัสดุหมุน (Pin-on-disk) โดยเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) ในการทดสอบการสึกหรอได้ทำการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ คือ 11Mn 18Mn และ 21Mn จำนวนระดับละ 2 ชิ้น ดังรูปที่ 4.24 เมื่อนำชิ้นงานผ่านกระบวนการทดสอบการสึกหรอแล้วนั้น ชิ้นงานทดสอบจะเกิดรอยขีดข่วนที่บนผิวของชิ้นงานทดสอบ มีลักษณะเป็นเส้นวงกลมรอบชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 4.25 4.26 และ 4.27 โดยรูปชิ้นงานทดสอบนี้เป็นรูปที่ได้จากการใช้เครื่องทดสอบวัดหาความสึกหรอระดับจุลภาค (3D Measuring microscope) ตรวจสอบดู หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบแบบการชูดบนวัสดุหมุนแล้ว



รูปที่ 4.24 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสก่อนการทดสอบของ 11Mn 18Mn และ 21Mn จำนวน 2 ชิ้นของแต่ละประเภท



รูปที่ 4.25 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% หลังการทดสอบการสึกหรอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



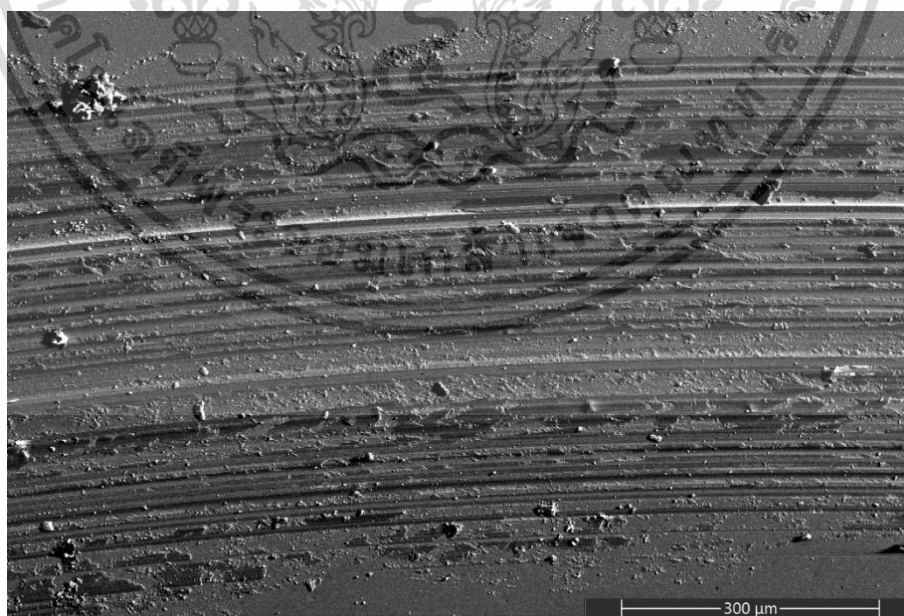
รูปที่ 4.26 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% หลังการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 4.27 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% หลังการทดสอบการสึกหรอ

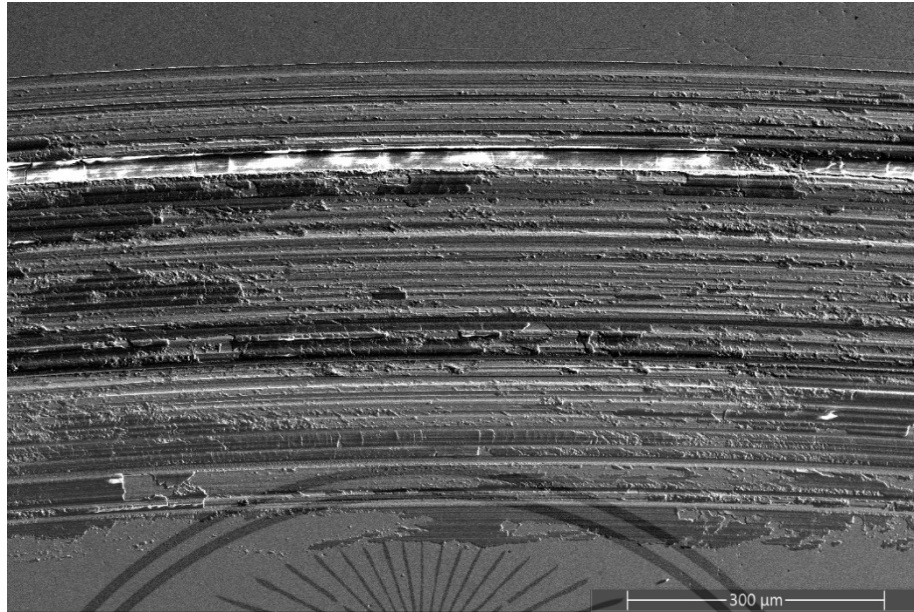
อย่างไรก็ตามนำชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอแล้วนี้ มาตรวจสอบเพิ่มเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสว.น.ว.ส.สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยใช้กำลังขยายที่ 120X ดังรูปที่ 4.28 4.29 และ 4.30 พบว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% เกิดความเสียหายน้อยที่สุด รองลงมา คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% และความเสียหายที่มากที่สุด คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% เพื่อเป็นการเน้นย้ำผลที่ได้จากการตรวจสอบที่ชัดเจนมากขึ้น จึงได้ทำการตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายที่มากขึ้นถึง 2000X ดังรูปที่ 4.31 4.32 และ 4.33 ทำให้เห็นการสึกหรอที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น พบว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% เกิดความเสียหายน้อยที่สุด และเป็นรอยขีดแตกน้อยที่สุด ทำให้ชิ้นส่วนที่หลุดออกมาจากการถูกรอยขีดมีปริมาณและจำนวนน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% นั้น พบความเสียหายที่เกิดขึ้นน้อยรองลงมา และเกิดเป็นรอยร้าวที่ผิวชิ้นงานทดสอบเพียงเล็กน้อย ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% พบว่าเกิดความเสียหายมากที่สุด เกิดเป็นรอยร้าวที่ผิวชิ้นงานทดสอบที่ชัดเจนและเป็นจำนวนมาก ทำให้ชิ้นส่วนที่หลุดออกมาจากการถูกรอยขีดมีปริมาณและจำนวนมากที่สุดด้วยเช่นกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีระดับเปอร์เซ็นต์ที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวที่น้อยลง เนื่องมาจากการเสียรูปของวัสดุเกิดช้าลง ซึ่งต้องใช้พลังงานมากในการให้วัสดุเกิดความเสียหาย หรือรอยแตกร้าว ทำให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ทั้งนี้การแตกร้าวที่ลดลงเมื่อระดับของแมงกานีสสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากสมบัติทางกลก่อนหน้าที่ได้ทำการศึกษาคือ ความแข็งและการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด เมื่อวัสดุมีระดับความแข็งสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอจะสูงขึ้นตาม และอีกทั้งการเสียดสีในระหว่างการทดสอบการสึกหรอทำให้วัสดุแข็งขึ้นได้ช้า (ในกรณีที่มีระดับแมงกานีสสูงขึ้น) ส่งผลให้เกิดการแตกและเสียหายได้ช้าลงเนื่องจากความเปราะ



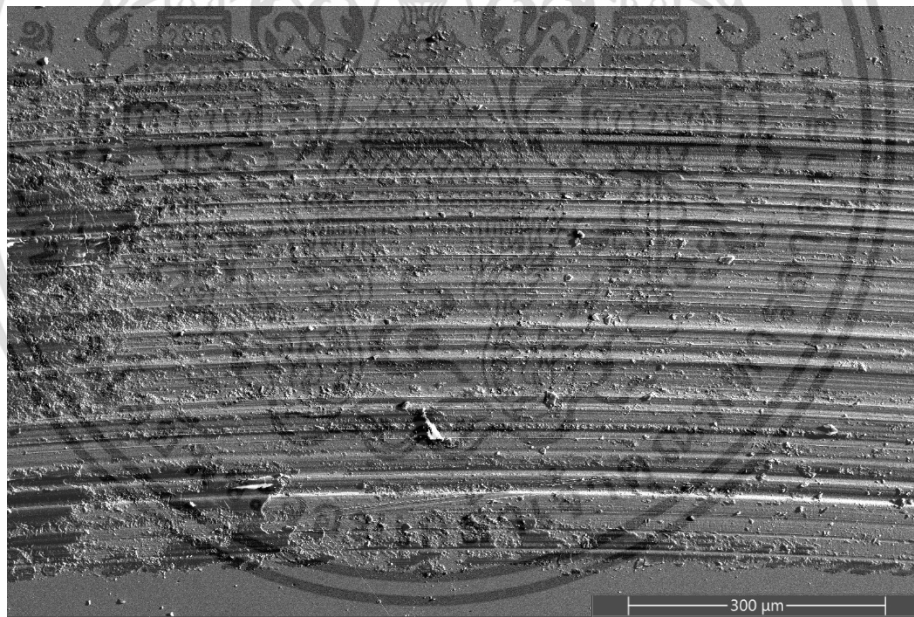
รูปที่ 4.28 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 11Mn ay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



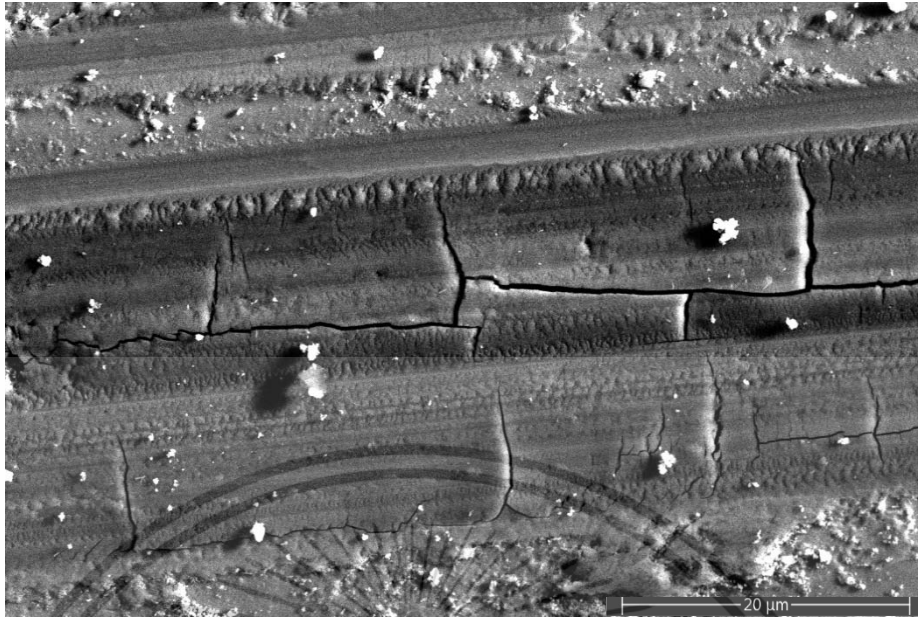
120X ของ 11Mn

รูปที่ 4.29 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 18Mn

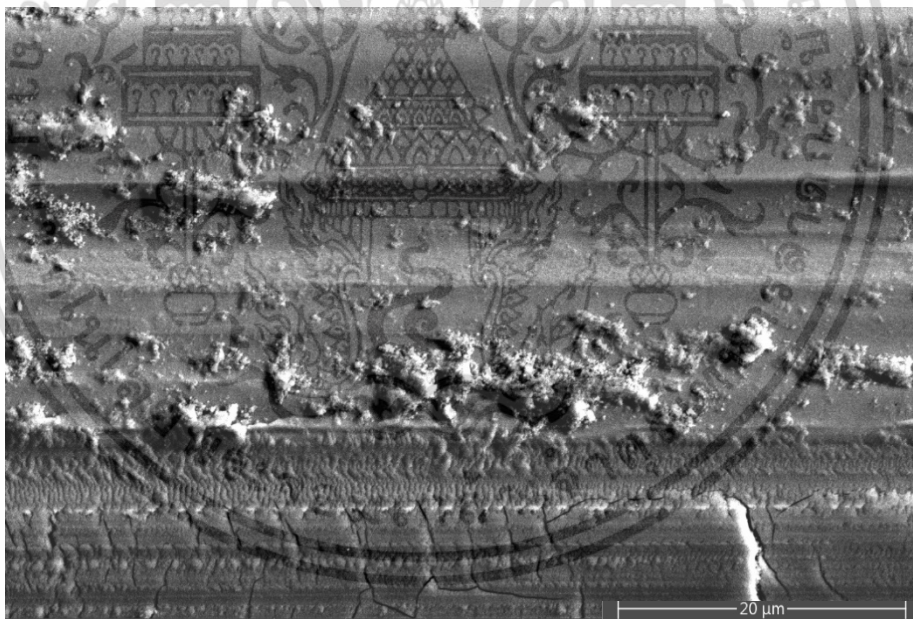


รูปที่ 4.30 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 120X ของ 21Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

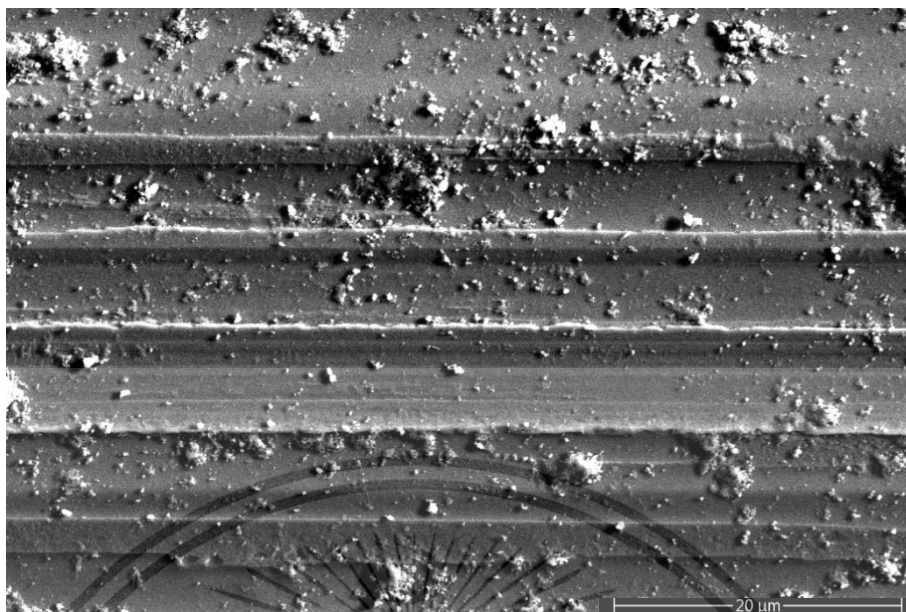


รูปที่ 4.31 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 11Mn



รูปที่ 4.32 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 18Mn

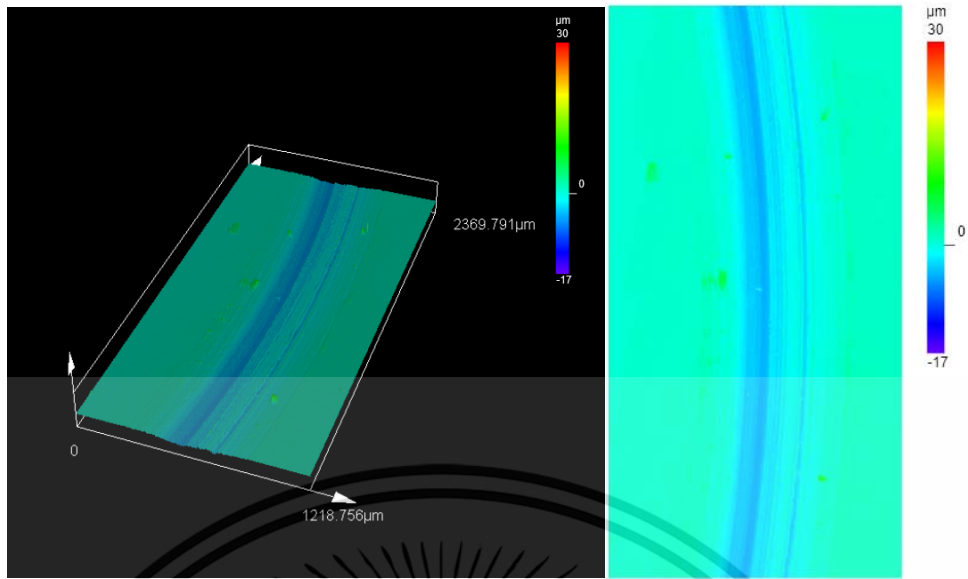
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



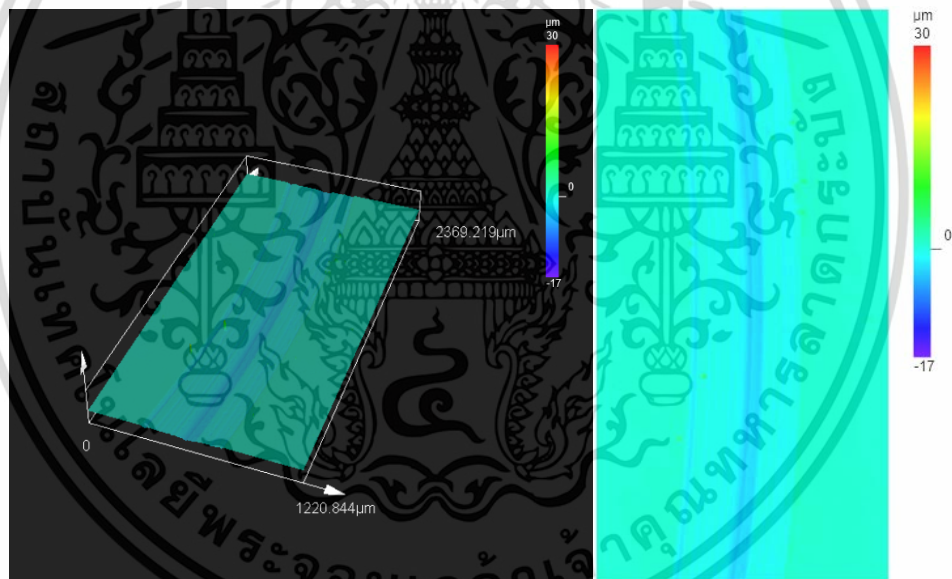
รูปที่ 4.33 การสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอที่กำลังขยาย 2000X ของ 21Mn

นอกจากนี้การทดสอบวัดหาความสึกหรอระดับจุลภาค (3D Measuring microscope) สามารถตรวจสอบการสึกหรอเพิ่มเติมของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ (11Mn 18Mn และ 21Mn) โดยทำการวิเคราะห์หาความหยาบผิว (Surface roughness) ซึ่งจากรูปที่ 4.34 4.35 และ 4.36 แสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานจากบริเวณหนึ่งของเส้นที่ได้หลังการทดสอบการสึกหรอ เมื่อพิจารณาจากรูปที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าชิ้นงานทดสอบ 11Mn มีสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มที่โดดเด่นขึ้นมาจากบริเวณรอบ ๆ พื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบ 18Mn มีสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มลดน้อยลงมาในบริเวณรอบ ๆ พื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ และชิ้นงานทดสอบ 21Mn มีสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มน้อยที่สุด หรือจางที่สุดในบริเวณรอบ ๆ พื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งค่าสีนี้สามารถบ่งบอกระดับความลึกของผิวชิ้นงานได้ โดยดูได้จากแถบสีด้านข้างที่ปรากฏในรูปที่ 4.34 4.35 และ 4.36 ถ้าสีน้ำเงินที่มีระดับความเข้มมากขึ้นเท่าไร ก็จะบ่งบอกได้ว่าชิ้นงานนั้นมีระดับความลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบมากเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้วิเคราะห์ในเบื้องต้นได้ว่าชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงกว่าจะเกิดระดับความลึกของผิวชิ้นงานที่ตื้นกว่า นั่นหมายความว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่มีเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงกว่าจะเกิดการสึกหรอที่น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

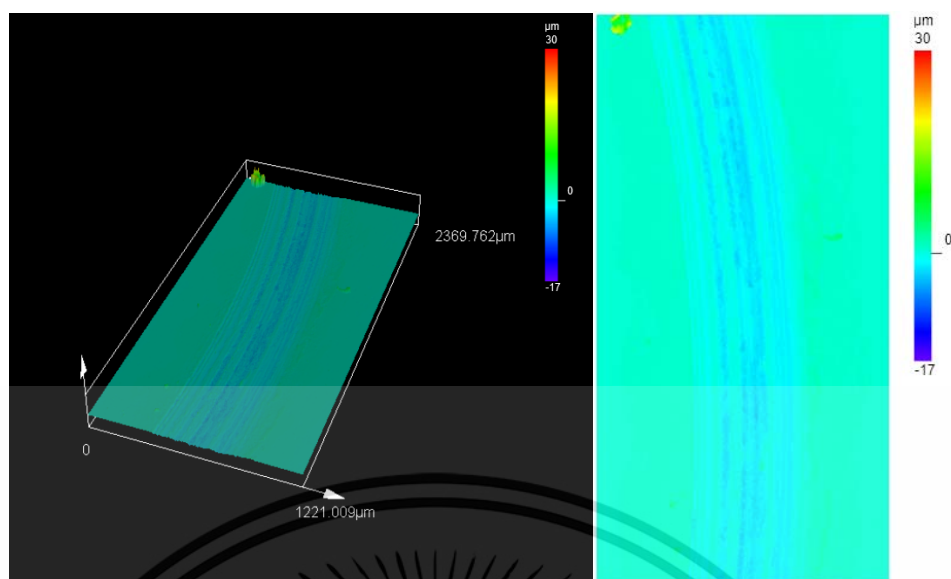


รูปที่ 4.34 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn



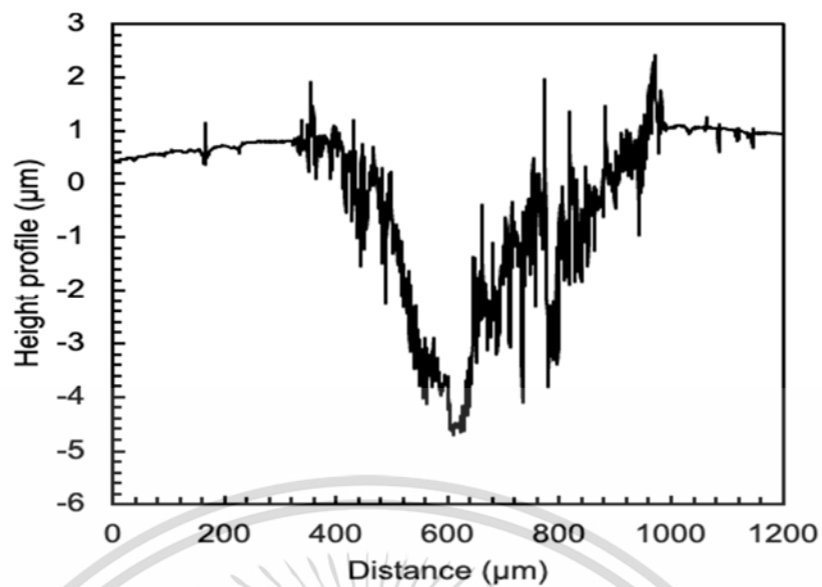
รูปที่ 4.35 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 18Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

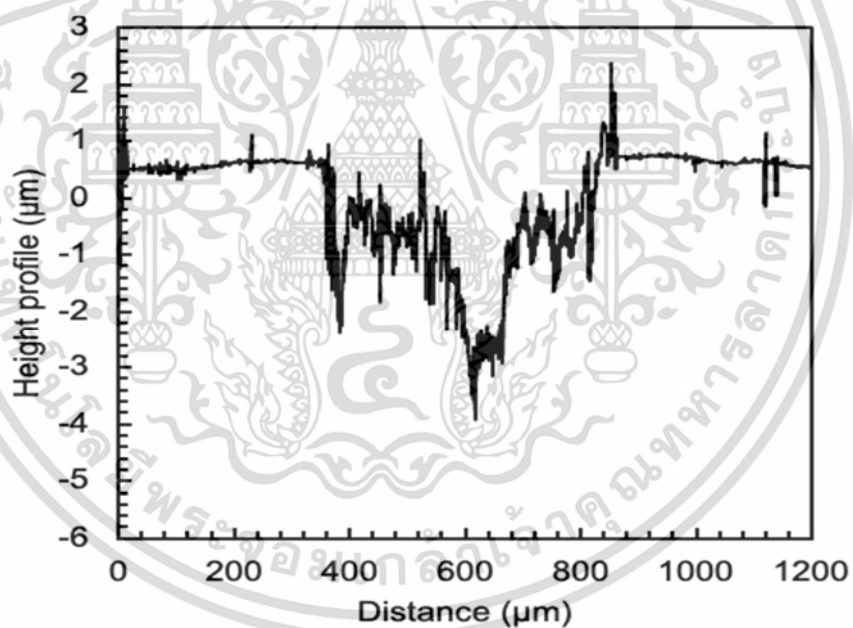


รูปที่ 4.36 ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 21Mn

ต่อมาได้นำชิ้นงานเหล็กกล้าแมงกานีส 11Mn 18Mn และ 21Mn มาศึกษาเพิ่มเติมในด้านความหยาบผิว (Surface roughness) อีก เพื่อจะศึกษาระดับความลึกในรูปแบบของรอยลึกหลังจากการทดสอบในลักษณะของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 4.38 และ 4.39 ผลจากการวิเคราะห์กราฟความลึกกับระยะทางของการทดสอบ พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% มีระดับความลึกที่สุดประมาณ 5 ไมโครเมตร (μm) ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% มีระดับความลึกที่สุดประมาณ 4 ไมโครเมตร (μm) และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% มีระดับความลึกที่สุดประมาณ 3 ไมโครเมตร (μm) แนวโน้มระดับความลึกมีค่าลดลง หรือมีความตื้นมากขึ้น ทำให้ทราบได้ว่าระดับความลึกของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการสึกหรอนี้ มีระดับที่ตื้นมากขึ้น เมื่อเหล็กกล้าผสมแมงกานีสมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่กล่าวมาแล้วในช่วงต้นที่แสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบโดยใช้ระดับความเข้มข้นของสีน้ำเงินเป็นตัวบ่งชี้ ตามรูปที่ 4.34 4.35 และ 4.36

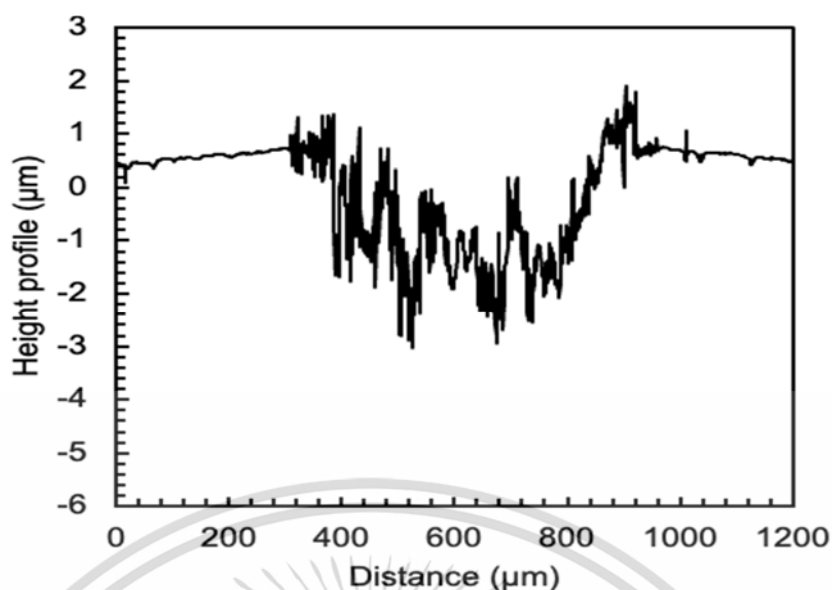


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 18Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

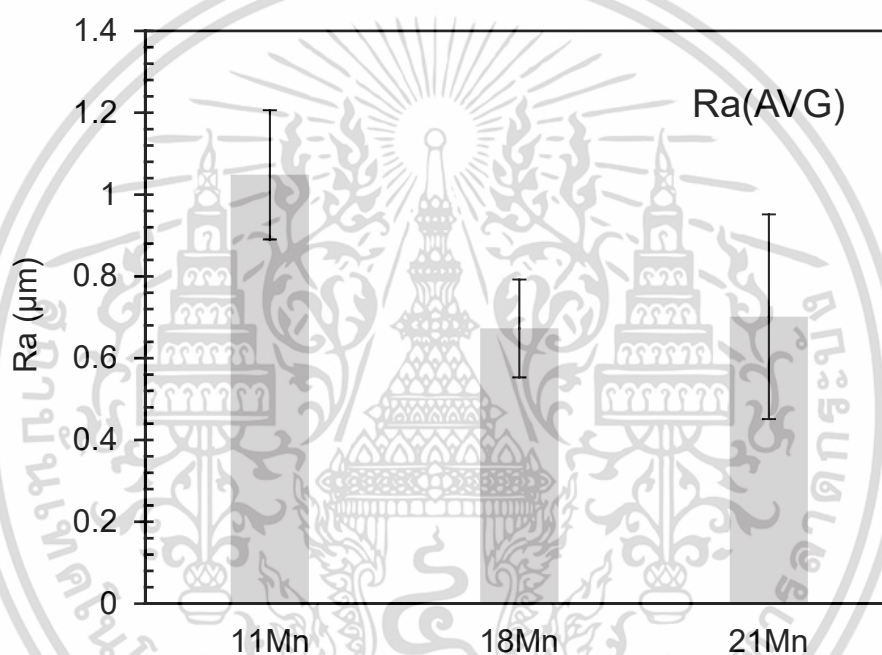


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 21Mn

จากกราฟแสดงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ 11Mn 18Mn และ 21Mn ตามรูปที่ 4.37 4.38 และ 4.39 นำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Arithmetical roughness mean, Ra) ดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% มีค่า 1.048 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 0.158 ไมโครเมตร (μm) ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% และ 21% มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.672 และ 0.701 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 0.12 และ ± 0.25 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับเช่นกัน และถ้าเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของทั้ง 2 ระดับนี้ มีค่าที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดนี้ไปแสดงในกราฟ ดังรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% มีความสูงของกราฟที่สูงที่สุด บ่งบอกถึงระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบมีระดับลึกที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% และ 21% มีระดับความสูงของกราฟที่ลดลง ทำให้บ่งชี้ว่าระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบ มีค่าที่ลดลงจากชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการเติมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นสามารถช่วยลดอัตราการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบ เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันกับการวิเคราะห์ระดับความลึกของผิวชิ้นงานทดสอบในข้างต้น

ตารางที่ 4.4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส หน่วย ไมโครเมตร (μm)

วัสดุ	Ra (AVG)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน Ra
11Mn	1.048	0.158
18Mn	0.672	0.120
21Mn	0.701	0.250



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 11Mn, 18Mn และ 21Mn

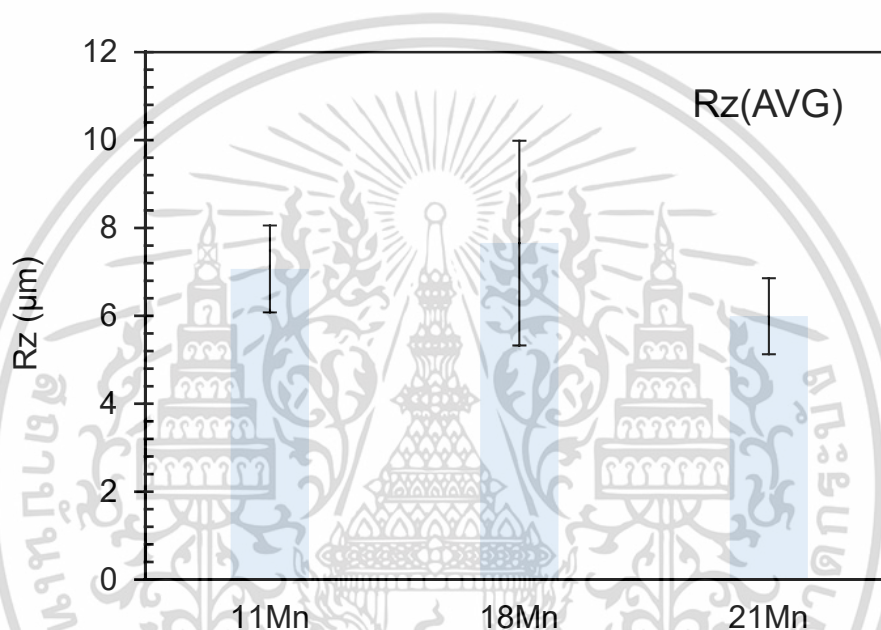
หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอีกแบบ คือ Rz (Ten-point mean roughness) โดยพิจารณาจุดที่มีค่าสูงสุดของกราฟ จำนวน 5 จุด และจุดที่ต่ำสุดของกราฟจำนวน 5 จุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความหยาบผิว ดังตารางที่ 4.5 โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz) ของเหล็กกล้าผสมทั้ง 3 ระดับมีค่า 7.067, 7.656 และ 5.992 ตามลำดับ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.988, 2.329 และ 0.865 ตามลำดับ ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้นี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 6-7 ไมโครเมตร (μm) และนำข้อมูลค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้นี้มาแสดงในกราฟ ดังรูปที่ 4.41 โดยสังเกตได้ว่ากราฟของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง

3 ระดับนี้ มีความสูงที่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz) ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส หน่วย ไมโครเมตร (μm)

วัสดุ	Rz (AVG)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน Rz
11Mn	7.067	0.988
18Mn	7.656	2.329
21Mn	5.992	0.865



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 11Mn, 18Mn และ 21Mn

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความสึกหรอจะมีการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ จะได้ค่าแสดงดังตารางที่ 4.6 โดยชิ้นงาน 11Mn มีค่าน้ำหนักก่อนการทดสอบ ทั้งสองชิ้นอยู่ที่ 50.1572 กับ 51.2703 กรัม และค่าน้ำหนักหลังการทดสอบทั้งสองชิ้นอยู่ที่ 50.1568 กับ 51.2699 กรัม ซึ่งมีค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบอยู่ที่ 0.0004 กรัม (0.4 มิลลิกรัม) ของทั้งสองชิ้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ (%Weight loss) มีค่าอยู่ที่ 0.797×10^{-3} กับ 0.78×10^{-3} ส่วนชิ้นงาน 18Mn มีค่าน้ำหนักก่อนการทดสอบทั้งสองชิ้นอยู่ที่ 53.4451 กับ 53.3919 กรัม และค่าน้ำหนักหลังการทดสอบทั้งสองชิ้นอยู่ที่ 53.4448 กับ 53.3916 กรัม ซึ่งมีค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ อยู่ที่ 0.0003 กรัม (0.3 มิลลิกรัม) ของทั้งสองชิ้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักก่อนการ

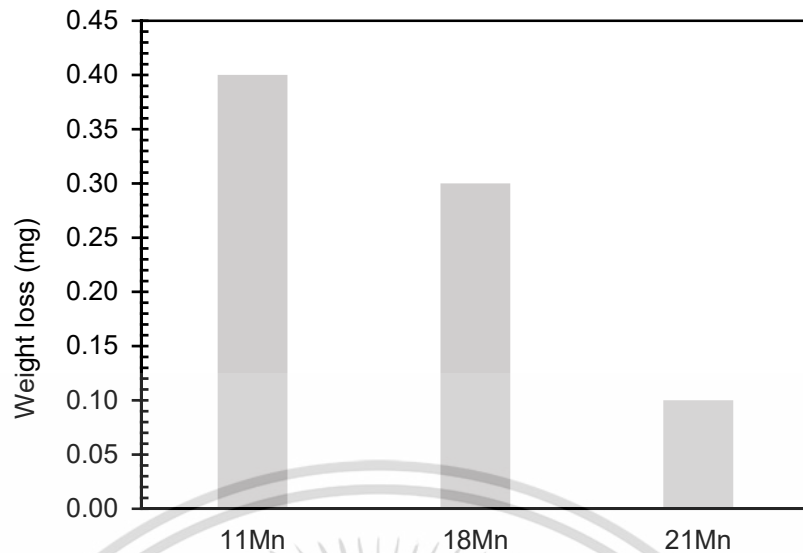
ทดสอบและหลังการทดสอบ (%Weight loss) มีค่าอยู่ที่ 0.561×10^{-3} กับ 0.562×10^{-3} และชิ้นงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21Mn มีค่าน้ำหนักก่อนการทดสอบทั้งสองชั้นอยู่ที่ 47.4696 กับ 48.0255 กรัม และค่าน้ำหนักหลังการทดสอบทั้งสองชั้นอยู่ที่ 47.4695 กับ 48.0254 กรัม ซึ่งมีค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบอยู่ที่ 0.0001 กรัม (0.1 มิลลิกรัม) ของทั้งสองชั้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ (%Weight loss) มีค่าอยู่ที่ 0.211×10^{-3} กับ 0.208×10^{-3} จากการสังเกตจะพบว่าน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบของทั้งสองชั้นในแต่ละระดับของแมงกานีสนั้นมีค่าที่เท่ากัน ทำให้ค่าที่ได้เกิดความแม่นยำ ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเกิดขึ้น นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบมาแสดงในกราฟได้ดังรูปที่ 4.42 และข้อมูลเปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ (%Weight loss) แสดงในกราฟได้ดังรูปที่ 4.43 จากข้อมูลของกราฟทั้งสองพบว่ากราฟแท่งมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่หายไปนั้นมีค่าที่ลดลง นั่นหมายความว่า การทดลองนี้มีการสึกหรอที่ลดลง ซึ่งการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงชันนั้นจะส่งผลให้การสึกหรอลดลง

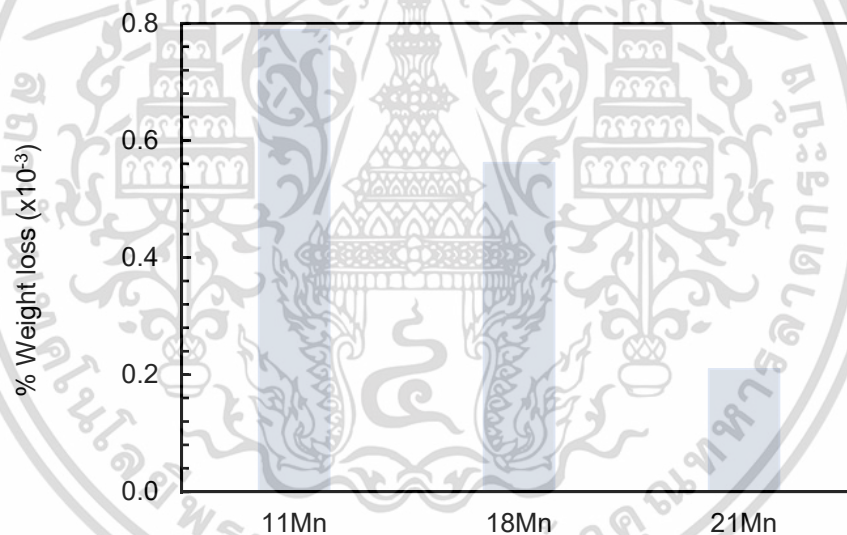
ตารางที่ 4.6 น้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

ชิ้นงาน	น้ำหนัก (g)			ผลต่าง (mg)	%Weight loss ($\times 10^{-3}$)
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ	ผลต่าง		
11Mn-1	50.1572	50.1568	0.0004	0.4	0.797
11Mn-2	51.2703	51.2699	0.0004	0.4	0.780
18Mn-1	53.4451	53.4448	0.0003	0.3	0.561
18Mn-2	53.3919	53.3916	0.0003	0.3	0.562
21Mn-1	47.4696	47.4695	0.0001	0.1	0.211
21Mn-2	48.0255	48.0254	0.0001	0.1	0.208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



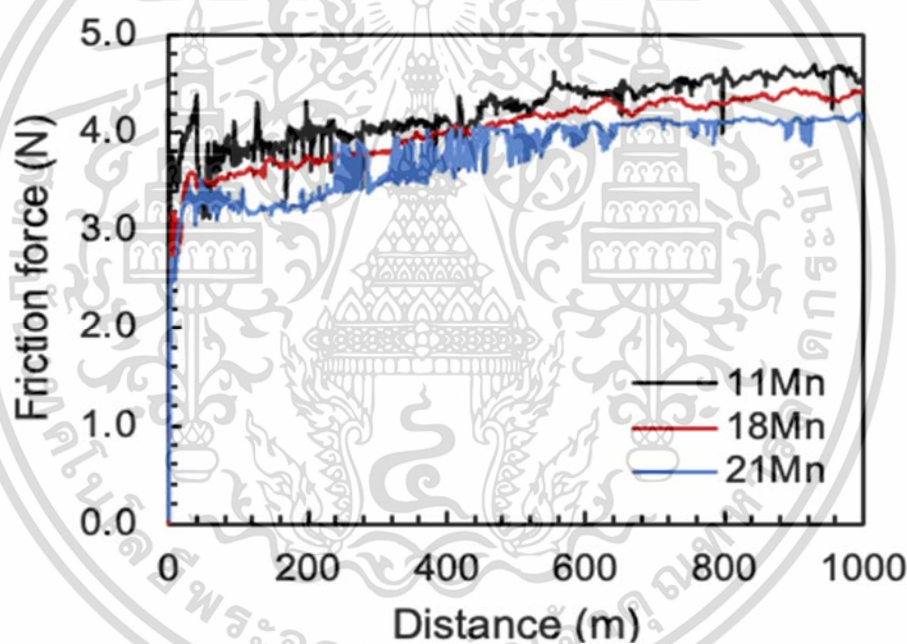
รูปที่ 4.42 ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส



รูปที่ 4.43 เปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

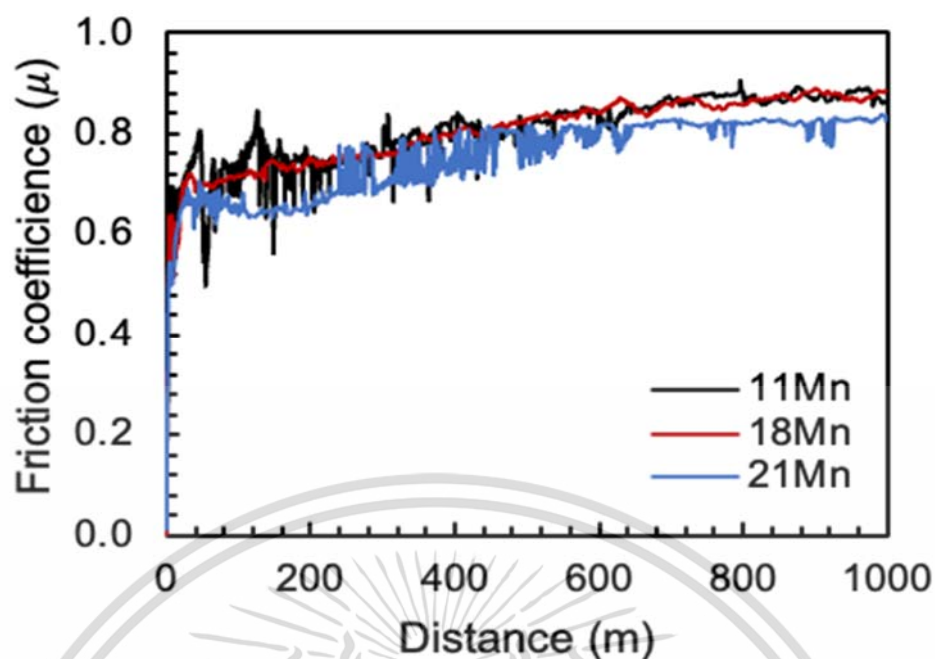
การทดสอบการสึกหรอในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้การทดสอบการสึกหรอแบบบนวัสดุหมุน (Pin-on-disk) หรือการทดสอบการสึกหรอแบบไถ ซึ่งการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ได้มีความสัมพันธ์กับความเสียดทาน เพราะกลไกของการสึกหรอนั้น ทำให้เกิดความเสียดทานเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากมีแรงกระทำที่ชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นข้อมูลของการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ นำมาวิเคราะห์ต่อทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเสียดทาน (Friction force) กับระยะทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทำการทดสอบการสึกหรอ ดังรูปที่ 4.44 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Friction coefficient) กับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ ดังรูปที่ 4.45 จากทั้งสองกราฟนี้ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของแรงเสียดทานที่สูงขึ้น หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่สูงขึ้น เมื่อระยะทางที่ทำการทดสอบเพิ่มมากขึ้น ในการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% เกิดแรงเสียดทานที่ระดับสูงสุด หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระดับสูงสุด รองลงมาคือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% เกิดแรงเสียดทานที่ระดับต่ำที่สุด หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระดับต่ำที่สุด นั่นหมายความว่า เมื่อชิ้นงานทดสอบเกิดการหมุนเป็นวงกลมมากขึ้นเท่าใด ก็ส่งผลทำให้เกิดรอยขีดมากขึ้นเท่านั้น ส่งผลกระทบต่อให้เกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้น ส่งผลกระทบให้เกิดแรงเสียดทานที่น้อยลง หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่น้อยลง เนื่องมาจากเกิดรอยขีดบนพื้นผิวชิ้นทดสอบที่น้อยลง



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ

นอกจากนี้การวิเคราะห์การสึกหรอนี้ ได้ศึกษาถึงข้อมูลของระดับความลึก (Penetration depth) ในการทดสอบการสึกหรอที่ระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ ได้กราฟดังรูป 4.46 โดยแนวโน้มของกราฟนั้น มีระดับความลึกที่ต่ำลง ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เมื่อระยะทางในการทดสอบการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น และหลังจากนั้นระดับความลึกจะคงที่ ถึงแม้ว่าระยะทางในการทดสอบจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม จากการเปรียบเทียบเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับนี้ พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% มีค่าระดับความลึกที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% ที่มีค่าระดับความลึกที่ต่ำรองลงมา และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% มีค่าระดับความลึกที่ต่ำที่สุด หรือตื้นที่สุด เมื่อชิ้นงานมาทดสอบในระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นก็ตาม นั้นสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้นนั้น ทำให้เกิดรอยขีดที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอที่ตื้นที่สุด มีร่องรอยของความเสียหายน้อยที่สุด จึงเกิดแรงเสียดทาน หรือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากกราฟในรูปที่ 4.44 และ 4.45 ในข้างต้น

โครงสร้างอะตอมของเหล็ก จึงส่งผลต่อระดับความแข็งที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ค่า Strength coefficient (K) และ Strain-hardening exponent (n) มีค่าที่ต่ำลง ส่งผลให้อัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain-hardening rate) มีค่าที่ลดลงด้วยเช่นกัน ส่วนความแข็งแรงของวัสดุก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เกิดการเสียรูปของวัสดุที่ยากขึ้น และสุดท้ายส่งผลให้อัตราการสึกหรอที่ลดลง อันเนื่องมาจากความแข็งที่เพิ่มขึ้น ชิ้นงานทดสอบเกิดความเสียรูปช้าลง ยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับและการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron back-scattered diffraction, EBSD) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% โดยน้ำหนัก พบว่ามุมความแตกต่างระหว่างผลึกมากกว่า 15 องศาเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้ง 3 ชนิด จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) พบว่ามีเฟสปรากฏเพียงเฟสเดียว คือ ออสเทนไนต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นสามารถเพิ่มความเสถียรให้กับเฟสออสเทนไนต์ การวิเคราะห์สมบัติทางกลด้วยเทคนิคความแข็ง (Hardness) พบว่าการเติมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสมีค่าที่สูงขึ้น เพราะโครงสร้างอะตอมของแมงกานีสที่มากขึ้นเข้าไปแทนที่โครงสร้างอะตอมของเหล็ก การวิเคราะห์สมบัติทางกลด้วยเทคนิคแรงดึง (Tensile) พบว่าการเติมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสใกล้เคียงกัน เปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ค่าแรงดึงของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสแตกต่าง นำผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนี้ มาวิเคราะห์ต่อจะได้ค่าความเค้นจริง (True stress) ความเครียดจริง (True strain) ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อค่า K (Strength coefficient) และ n (Strain-hardening exponent) โดยเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแกร่งของวัสดุสูงขึ้นด้วยเช่นกัน มีผลให้วัสดุเกิดความคงทนต่อการผิรูดที่สูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วงการเสียรูปแบบพลาสติก และการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแมงกานีสในเหล็กกล้าผสมแมงกานีสนี้ มีส่วนช่วยให้เกิดอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่ลดลง เพื่อให้เกิดการเสียรูปที่ช้าลง ซึ่งจะเกิดความเสียหายที่วัสดุช้าลงด้วยเช่นกัน ส่วนการทดสอบแรงกระแทก พบว่าค่าเฉลี่ยของ Impact energy ที่ได้ของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสทั้ง 3 ระดับ มีค่าที่สูงขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์แมงกานีสมีค่าที่เพิ่มขึ้น และการวิเคราะห์สมบัติทางกลด้วยเทคนิคสึกหรอ (Wear test) จากการวิเคราะห์ความสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยเครื่องทดสอบวัดหาความสึกหรอระดับจุลภาค (3D Measuring microscope) พบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นไปจะมีสีที่อ่อนลงเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นไปมีระดับความลึกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวชิ้นงานน้อยลง ทำให้สรุปในเบื้องต้นได้ว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นเกิดการสึกหรอน้อยลง และจากการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Surface roughness, Ra) พบว่าค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงจากเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% โดยน้ำหนัก ซึ่งให้เห็นว่าการเติมแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์สูงขึ้นสามารถช่วยลดอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสได้ นอกจากนี้จากการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอพบว่าเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% โดยน้ำหนัก มีน้ำหนักที่หายไปลดลงมากที่สุด และเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบวัดหาความสึกหรอระดับจุลภาคในข้างต้น

จากผลการวิเคราะห์การทดสอบที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% โดยน้ำหนักทำให้โครงสร้างทางจุลภาคเกิดความเสถียรมากยิ่งขึ้น ความแข็งของวัสดุและความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้ยากขึ้น และลดอัตราการเกิดการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสได้ ผลลัพธ์ที่ได้คือ ชิ้นงานสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น ประหยัดเวลาในการเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ และประโยชน์อื่น ๆ อีกมากมาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าแมงกานีสแต่ละประเภทไม่ว่าจะเป็น 11Mn 18Mn และ 21Mn อาจจะต้องมีการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างที่มากขึ้น โดยอาจจะเป็น 5 ชิ้นงานตัวอย่างของแต่ละประเภทของแมงกานีส เพื่อจะได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น และสามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์อัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น อาจจะต้องมีการทดสอบและวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยเปอร์เซ็นต์ปกติเทียบกับเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 11% โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าผสมแมงกานีส 18% โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมแมงกานีส 21% โดยน้ำหนัก เพื่อการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอที่แม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Bayraktar, F. A. Khalid, and C. Levaillant, “Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 147, no. 2, pp. 145–154, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.007.
- [2] D. Xiaodong, S. Guodong, W. Yifei, W. Jianfeng, and Y. Haoyu, “Abrasion behavior of high manganese steel under low impact energy and corrosive conditions,” *Adv. Tribol.*, vol. 2009, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1155/2009/685648.
- [3] W. Bleck, “High Manganese Steel 2016,” *Steel Res. Int.*, vol. 89, no. 9, p. 1800390, 2018, doi: 10.1002/srin.201800390.
- [4] A. Grajcar, A. Kozłowska, and B. Grzegorzczak, “Strain hardening behavior and microstructure evolution of high-manganese steel subjected to interrupted tensile tests,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 2, 2018, doi: 10.3390/met8020122.
- [5] W. S. Owen and M. Grujicic, “Strain aging of austenitic hadfield manganese steel,” *Acta Mater.*, vol. 47, no. 1, pp. 111–126, 1998, doi: 10.1016/S1359-6454(98)00347-4.
- [6] รศ.มนัส สตรีจินดา, “เหล็กกล้าทนทานการเสียดสีและรับการกระแทก (Wear Resistant Steel),” in *เหล็กกล้า STEEL*, 4th ed., โรงพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542, pp. 70–71.
- [7] Y. H. Wen, H. B. Peng, H. T. Si, R. L. Xiong, and D. Raabe, “A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 798–804, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.057.
- [8] B. Hu, B. Bin He, G. J. Cheng, H. W. Yen, M. X. Huang, and H. W. Luo, “Super-high-strength and formable medium Mn steel manufactured by warm rolling process,” *Acta Mater.*, vol. 174, pp. 131–141, 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2019.05.043.
- [9] B. Sun *et al.*, “Microstructural characteristics and tensile behavior of medium manganese steels with different manganese additions,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 729, no. April, pp. 496–507, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.04.115.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] R. Prava Dalai, S. Das, and K. Das, “Development of TiC reinforced austenitic manganese steel,” *Can. Metall. Q.*, vol. 53, no. 3, pp. 317–325, 2014, doi: 10.1179/1879139514Y.0000000140.
- [11] F. Kies *et al.*, “Design of high-manganese steels for additive manufacturing applications with energy-absorption functionality,” *Mater. Des.*, vol. 160, pp. 1250–1264, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.10.051.
- [12] a Grajcar, W. Borek, and S. Materials, “Microstructure evolution and phase composition of high-manganese austenitic steels,” *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 218–225, 2008.
- [13] R.L. Lula, “High Manganese Austenitic steels:Past, Present and Future,” in *High Manganese High Nitrogen Austenitic Steels*, 1993, pp. 1–12.
- [14] รศ.มนัส สติรจินดา, “เหล็กกล้าหล่อผสมสูงทนการสึกหรอ,” in *เหล็กกล้า STEEL*, 4th ed., โรงพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542, pp. 130–137.
- [15] รศ.มนัส สติรจินดา, “การอบชุบเหล็กกล้าพิเศษ,” in *วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก IRON & STEEL HEAT-TREATMENT ENGINEERING*, 1st ed., โรงพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2531, pp. 237–240.
- [16] J. William D. Callister, “Phase Diagrams,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 299–305.
- [17] Benjamin James Sutton, “Solidification Behavior and Hot Cracking Susceptibility of High Manganese Steel Weld Metals,” 2013.
- [18] J. William D. Callister, “Isothermal Transformation Diagrams,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 328–338.
- [19] J. William D. Callister, “Continuous Cooling Transformation Diagrams,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. S85-86.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] C. Mesplont, “Phase Transformations and Microstructure - Mechanical Properties Relations in Complex Phase High Strength Steels,” *Processing*, pp. 25–27, 2002.
- [21] รศ.แมน อมรสิทธิ์ และ รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, “ความแข็งและการทดสอบความแข็ง,” in *วัสดุวิศวกรรม*, Revised., William F. Smith, Ed. สำนักพิมพ์ท็อป, 2546, pp. 181–184.
- [22] Danielle Collins, “Mechanical Properties of Materials: Stress and Strain,” *Linear Motion Tips*, 2019. [Online]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/mechanical-properties-of-materials-stress-and-strain/>.
- [23] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid, “Stress-Strain Curves,” in *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th, Interna ed., Prentice Hall International, 2001, p. 57.
- [24] สิริศักดิ์ ปโยธรสิริ, “ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด,” in *กำลังวัสดุ Strength of Materials*, 4th ed., โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์, 2536, pp. 10–11.
- [25] J. William D. Callister, “Stress-Strain Behavior,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 153–155.
- [26] George E. Dieter, “True Stress and True Strain,” in *Mechanical metallurgy*, 3rd ed., McGraw Hill Education, 1988, pp. 73–76.
- [27] J. William D. Callister, “True Stress and Strain,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 167–169.
- [28] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid, “Construction of Stress-Strain Curves,” in *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th, Interna ed., Prentice Hall International, 2001, pp. 60–61.
- [29] George E. Dieter, “True Local Necking Strain,” in *Mechanical metallurgy*, 3rd ed., McGraw Hill Education, 1988, pp. 286–289.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] รศ.แมน อมรสิทธิ์ และ รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, “ความแข็งแรง หรือความเหนียวของวัสดุ,” in *วัสดุวิศวกรรม*, Revised., William F. Smith, Ed. สำนักพิมพ์ท็อป, 2546, pp. 195–197.
- [31] อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร, “ความแข็งแรงหรือความเหนียว (Toughness),” in *เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material*, pp. 8–9.
- [32] J. William D. Callister, “Impact Fracture Testing,” in *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5th ed., Fundamentals of Materials Science and Engineering, 2000, pp. 250–252.
- [33] สยาม แก้วคำไสย์, “รูปแบบการเสียหายของวัสดุ: การสึกหรอ (Wear),” 2554. [Online]. Available: <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2011/01/wear.html>.
- [34] P. H. Adler, G. B. Olson, and W. S. Owen, “Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 17, no. 10, pp. 1725–1737, 1986, doi: 10.1007/BF02817271.
- [35] R. Harzallah, A. Mouftiez, S. Hariri, E. Felder, and J. Maujean, “Impact and sliding wear resistance of Hadfield and rail steel,” vol. 146, pp. 112–123, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.146.112.
- [36] R. Lencina, C. Caletti, K. Brunelli, and R. Micone, “Assessing Wear Performance of Two High-carbon Hadfield Steels Through Field Tests in the Mining Industry,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 9, no. December, pp. 358–366, 2015, doi: 10.1016/j.mspro.2015.05.005.
- [37] U. Gürol and S. C. Kurnaz, “Effect of carbon and manganese content on the microstructure and mechanical properties of high manganese austenitic steel,” vol. 56, no. 2, pp. 171–182, 2020.
- [38] A. K. Srivastava and K. Das, “Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel,” *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 16, pp. 5654–5658, 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2759-y.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] ดร.สมบุรณ์ โอตรวรรณะ, “การใช้เทคนิค Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD) ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมอัลลอย ที่ขึ้นรูปจากการหล่อด้วยแรงดันสูง,” *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*, no. เมษายน-มิถุนายน, pp. 42–48, 2557.
- [40] An American National Standard, “ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1,” *Annu. B. ASTM Stand.* 4, no. C, p. 4, 2010, doi: 10.1520/E0008.
- [41] An American National Standard, “Norma E23-07a - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” *Am. Soc. Test. Mater. Handb.*, vol. 14, no. C, p. 28, 2015, doi: 10.1520/E0023-07AE01.2.
- [42] ASTM, “G99-04 - Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus,” *Wear*, vol. v, no. 2016, pp. 1–5, 2004, doi: 10.1520/G0099-17.Copyright.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางกุลศิริ โปธิกำจร
วัน เดือน ปีเกิด	22 ตุลาคม 2526 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	1 ถ.เฉลิมพระเกียรติ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร 10250
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2552 Master of Business Administration, Long Island University – C.W. Post Campus, New York, USA
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2548-2548	ตำแหน่ง นักศึกษาฝึกงาน ในแผนกคลังพัสดุ บริษัทบางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)
พ.ศ.2549-2550	ตำแหน่ง วิศวกรโรงงาน บริษัท สามมิตรเมทัลเวิร์ค จำกัด
พ.ศ.2550-2551	ตำแหน่ง ผู้ช่วยประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสารสนเทศ Long Island University – C.W. Post Campus
พ.ศ.2551-2552	ตำแหน่ง ผู้ช่วยอาจารย์ผู้สอนระดับปริญญาโท Long Island University – C.W. Post Campus
พ.ศ.2552-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ บริษัท สามมิตรเมทัลเวิร์ค จำกัด
พ.ศ.2558-2562	ตำแหน่ง ผู้ช่วยอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้