

ผลของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงต่อ  
โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

นางสาวญาดา พลเสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECT OF CHROMIUM AND NICKEL IN P/M 316L STAINLESS STEEL ON  
MICROSTRUCTURE AND OXIDATION RESISTANCE

Ms. Yada Polsen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
โดย	นางสาวญดา พลเสน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วั่งยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. ณิชฐิตา ชวนเกริกกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วั่งยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร. ณิชฐิตา ชวนเกริกกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. เรืองเดช ธงศรี)

ญดา พลเสน : ผลของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน. (EFFECT OF CHROMIUM AND NICKEL IN P/M 316L STAINLESS STEEL ON MICROSTRUCTURE AND OXIDATION RESISTANCE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. ปัญญวัชร วัชยาว, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. ณัฐจิตา ชวนเกริกกุล , 91 หน้า.

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเนื่องด้วยสมบัติด้านความแข็งแรง ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิปานกลางจนถึงอุณหภูมิสูงโดยยังคงความแข็งแรงไว้ได้ อย่างไรก็ตามภายใต้การใช้งานที่มีสภาวะรุนแรง ต้องการความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่สูงขึ้นเพื่อให้วัสดุมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการที่จะพัฒนาวัสดุใหม่เพื่อให้มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะเหล่านั้นโดยปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงด้วยการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 15 ตันค้างไว้เป็นเวลา 30 วินาที แล้วขึ้นงานจะถูกเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน แล้วทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศปกติ

เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมโครเมียมจะให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะการทดสอบที่ดีที่สุด โดยความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีขึ้นเมื่อปริมาณการเติมโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันเพิ่มขึ้น ออกไซด์ที่เกิดจะเหมือนกันทั้งที่ผิวชิ้นงานและภายในชิ้นงานโดยพบว่าเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  การเติมธาตุมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงคล้ายกัน โดยชิ้นงานส่วนใหญ่มีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 83 HRB

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5370227321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : 316L / Stainless steel / Powder metallurgy / Oxidation behavior

YADA POLSEN: EFFECT OF CHROMIUM AND NICKEL IN P/M 316L STAINLESS STEEL ON MICROSTRUCTURE AND OXIDATION RESISTANCE.  
 ADVISOR : PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., CO-ADVISOR : NUTTHITA CHUANKRERKKUL, Ph.D., 91 pp.

Stainless steel 316L, an austenitic stainless steel, is widely used as structural components in various industries because of its good strength, good corrosion and oxidation resistance at medium – high temperatures. However, under more severe operating conditions, stainless steel needs higher oxidation resistance to reach longer service lifetime. Therefore, the present research had attempted to develop the new material to resist such conditions through modification of stainless steel 316L with nickel and/or chromium addition by powder metallurgy process. Nickel, chromium and nickel with chromium powders were added to 316L stainless steel powder with 1, 2, 3, 4 and 5 wt.%. After that, all mixed powders were compressed under pressure of 15 ton-force with 30-second hold duration. All compressed specimens were followed with sintering at 1300°C for 45 minutes under hydrogen atmosphere. From all results, it was found that specimens with chromium addition provide the highest oxidation resistance at 900°C tested up to 100 hours. The increasing of nickel and chromium content resulted in better oxidation resistance. The Oxides formed both on surface and inside the pores were similar types which were  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ . The effect of pure chromium addition on oxidation behavior is similar to both nickel and chromium addition and the effect of all element addition on hardness, almost all specimens, is also similar which their hardness is around 83 HRB.

Department : Metallurgical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Metallurgical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือของ อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร วัชยาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ อาจารย์ ดร. ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำทั้งลำดับขั้นตอน การทำงาน วิธีการคิดการแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบ วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร. เรืองเดช ธงศรี ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก มหาวิทยาลัยที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อ งานวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งใน ตำราและการใช้ชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุที่ให้ ความช่วยเหลือและดูแลในการใช้เครื่องอัดขึ้นงานไฮดรอลิก ขอขอบพระคุณ คุณมนภาส มรกฏ จินดา คุณภาณุ เวทยนุกูล และบุคลากรของหน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุผง ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความกรุณาในการเผ่าผืนนี้ขึ้นงานในเตาไฮโดรเจน ขอขอบพระคุณ คุณอรอินท์ สีหะกุลัง เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ช่วยเหลือใน การวัดความแข็งด้วยเครื่อง Rockwell สเกล B จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเป็น ค่าใช้จ่ายอุดหนุนงานวิจัยในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้ความรัก กำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่ร่วมศึกษาใน ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กับข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม.....	4
2.1.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	5
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	6
2.3 โลหวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	8
2.4 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	13
2.4.1 สมบัติทางกายภาพ.....	13
2.4.2 สมบัติทางกล.....	16
2.4.3 สมบัติด้านอื่นๆที่น่าสนใจ.....	18
2.5 อิทธิพลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	18
2.6 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชัน.....	22
2.6.1 จลนศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชัน.....	23
2.6.1.1 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง.....	23
2.6.1.2 ความสัมพันธ์แบบพาราโบลิก.....	24
2.6.1.3 ความสัมพันธ์แบบลอการิทึม.....	24

	หน้า
2.6.1.4 ความสัมพันธ์แบบผสม.....	25
2.7 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L.....	25
2.8 กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะผงในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	26
2.8.1 การผลิตผงโลหะ.....	27
2.8.2 การผสมผงโลหะ.....	28
2.8.3 การอัดขึ้นรูปผงโลหะ.....	28
2.8.4 การเผาผนึก.....	29
2.9 วัฏจักรวรรณกรรม.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 วัตถุประสงค์.....	32
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	32
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	33
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	33
3.4.2 การทดสอบการเกิดออกซิเดชัน.....	34
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	34
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกล.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	36
4.1 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของผงโลหะ.....	36
4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก.....	37
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	40
4.3.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	40
4.3.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก.....	40
4.3.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการทดสอบออกซิเดชัน.....	51
4.3.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกวาด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย Energy Dis persive X-Ray Spectroscopy (EDS).....	62
4.3.2.1 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม316L.....	63



	หน้า
4.3.2.2 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมที่ 5% โดยน้ำหนัก.....	64
4.3.2.3 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลที่ 5% โดยน้ำหนัก.....	65
4.3.2.4 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 5% โดยน้ำหนัก.....	66
4.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer.....	67
4.4.1 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และชิ้นงานที่ผ่านการ เติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ภายหลังจาก การเผาผนึกการเตรียมชิ้นงาน.....	67
4.4.2 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียม ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้อบร- ยากาศปกติ.....	70
4.4.3 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิล ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้อบร- ยากาศปกติ.....	73
4.4.4 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียม และนิกเกิลร่วมกัน ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซล- เซียส ภายใต้อบรยากาศปกติ.....	76
4.5 ผลจากการทดสอบออกซิเดชัน.....	79
4.6 ผลจากการทดสอบความแข็ง.....	84
บทที่ 5 บทสรุป.....	86
รายการอ้างอิง.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงสัดส่วนการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมในงานประเภทต่างๆ.....	4
2.2	ตารางแสดงช่วงของส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆ.....	5
2.3	แสดงค่าสมบัติทางกายภาพต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เฟอริติก ออสเทนิติกและเฟอริติก-ออสเทนิติก.....	14
2.4	แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีมาตรฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L .....	25
3.1	แสดงปริมาณสัดส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด316L ผงโครเมียม และผงนิกเกิล ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	33
4.1	โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 45 นาที ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน.....	50
4.2	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	61

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แผนภาพแสดงการแบ่งเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	7
2.2	แสดงผลของนิกเกิลต่อลักษณะของ gamma loop และรักษาความเสถียรของโครงสร้างออสเทนิต์ตั้งแต่อุณหภูมิจนลงมาถึงอุณหภูมิห้อง.....	10
2.3	แผนภูมิ Schaeffler-Dulong แสดงอิทธิพลของธาตุต่างๆที่มีต่อโครงสร้าง.....	11
2.4	แผนภูมิแสดงค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเทียบกับอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	14
2.5	แผนภูมิแสดงค่าการนำความร้อนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและดูเพล็กซ์.....	15
2.6	แผนภูมิแสดงค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและดูเพล็กซ์.....	15
2.7	แผนภูมิแสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain Curve) ของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆ.....	16
2.8	อิทธิพลของธาตุโครเมียมต่อการเกิดออกซิเดชัน.....	19
2.9	อิทธิพลของธาตุนิกเกิลต่อการเกิดออกซิเดชัน.....	20
2.10	ลักษณะโดยทั่วไปของกลไกการเกิดออกซิเดชัน.....	22
2.11	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะผง.....	12
4.1	รูปจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ก) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ข) ผงโครเมียม ค) ผงนิกเกิล.....	36
4.2	กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	37
4.3	กราฟแสดงความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	38
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างๆ เทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	39
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างๆ เทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L .....	40

ภาพที่	หน้า
4.6	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ภายหลังจากการเผา ผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่าและ 500 เท่า..... 41
4.7	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ ผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 43
4.8	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ ผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 44
4.9	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและผ่าน การผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็น เวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 45
4.10	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและผ่าน การผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็น เวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 46
4.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ นิกเกิลร่วมกันและผ่านการผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 48
4.12	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ นิกเกิลร่วมกันและผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 49
4.13	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ภายหลังจากทดสอบ ออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศปกติ เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่ กำลังขยาย 200 เท่าและ 500 เท่า..... 51
4.14	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่ กำลังขยาย 200 เท่า..... 52

ภาพที่	หน้า
4.15	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">53</div> </div>
4.16	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิดและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">55</div> </div>
4.17	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิดและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">56</div> </div>
4.18	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ निकเกิดร่วมกันและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">58</div> </div>
4.19	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและ निकเกิดร่วมกันและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">59</div> </div>
4.20	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS .....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">63</div> </div>
4.21	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS .....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">64</div> </div>
4.22	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติม निकเกิดที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS .....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">65</div> </div>
4.23	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;">                     ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติม निकเกิดที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS .....                 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">66</div> </div>

ภาพที่	หน้า	
4.24	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% – 5%โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% – 5% โดย น้ำหนัก และชิ้นงานที่โครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% – 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที่.....	68
4.25	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer บริเวณผิวชิ้นงาน ชิ้นงานของชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% – 5%โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% – 5% โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่โครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% – 5% โดย น้ำหนัก ภายหลังจากการการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที่.....	69
4.26	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียมที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	71
4.27	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียมที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	72
4.28	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมนิกเกิลที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	74
4.29	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมนิกเกิลที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	75
4.30	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการ เผาผนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	77
4.31	กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1-5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการ เผาผนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	78

ภาพที่	หน้า	
4.32	กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	79
4.33	กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมโครเมียม เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	80
4.34	กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมนิกเกิล เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	81
4.35	กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมโครเมียมและนิกเกิล เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	82
4.36	แผนภูมิแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และ โครเมียมและนิกเกิล ร่วมกัน.....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการใช้งานโลหะในทางวิศวกรรมนั้นมีให้พบเห็นโดยทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น และเนื่องจากมีการใช้กันมากแล้วทำให้การพัฒนาสมบัติของโลหะต่าง ๆ นั้นได้รับการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ยังมีโลหะอีกจำพวกที่ได้รับการพัฒนาและมีการใช้งานอยู่ อย่างกว้างขวางก็คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องด้วยคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับการปรับปรุงมา โดยให้มีความสามารถในการทนทานการเกิดการกัดกร่อนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าทั่วไป เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมสูง สามารถเกิดฟิล์มป้องกันจากบรรยากาศที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน และยังคงความสามารถทางกลเอาไว้ได้ จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นที่นิยม เกรดหนึ่งในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีใช้งานกันมากก็คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 316L ซึ่งมีการใช้งานในงานหลากหลายประเภททั้งงานโครงสร้าง งานเกี่ยวกับรถยนต์ งานด้านการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L นอกจากจะมีความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศปกติเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป ยังสามารถต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ด้วยเนื่องจากเกรดนี้มีการเติมโมลิบดีนัมเพิ่มเข้าไป อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำโดยที่ยังคงความแข็งแรงอยู่ สำหรับกระบวนการผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในงานต่างๆ เหล่านี้ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการผลิตที่เรียกว่าการขึ้นรูปโดยกรรมวิธีโลหะผงหรือ Powder Metallurgy โดยจะขึ้นรูปจากผงโลหะนำมาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ทำได้ง่าย สามารถกำหนดขนาดของเกรนอีกทั้งได้ขนาดของเกรนที่ค่อนข้างเท่ากันมากกว่าการหล่อและมีการลงทุนที่ต่ำจึงเป็นที่นิยมมากในวงการอุตสาหกรรม

เพื่อให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ถูกผลิตด้วยกรรมวิธีโลหะผงสามารถใช้งานได้ในช่วงที่กว้างขวางขึ้น จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเพิ่มขีดจำกัดการใช้งาน โดยยังอาศัยพื้นฐานจากสมบัติข้อดีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L แล้วนำมาปรับปรุงโดยการผสมธาตุโครเมียมและนิกเกิล



โดยจะทำการศึกษาผลของธาตุโครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาผลของธาตุโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
2. ศึกษาผลของธาตุนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
3. ศึกษาผลของธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
4. เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ได้ระหว่างชิ้นงานที่มีการผสมโครเมียม ผสมนิกเกิล และ ผสมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง

## 1.3 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลจากการผสมธาตุโครเมียมที่ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงและมีการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 100 ชั่วโมง
2. ศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลจากการผสมธาตุนิกเกิลที่ 1%, 2 %, 3%, 4% และ 5 % โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงและมีการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 100 ชั่วโมง
3. ศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลจากการผสมธาตุโครเมียมและนิกเกิลที่อย่างละ 1%, 2 %, 3%, 4% และ 5 % โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิด

ออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนิติกเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง และมีการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 100 ชั่วโมง

4. ศึกษาถึงความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันระหว่างชิ้นงานที่ผสมโครเมียม ผสมนิกเกิล และผสมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันในเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนิติก 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงและมีการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 100 ชั่วโมง
5. ศึกษาฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในชิ้นงานที่สนใจในช่วง 0 – 100 ชั่วโมง

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนิติกเกรด 316L ภายหลังจากการผสมธาตุโครเมียมและนิกเกิลปริมาณต่างๆ
2. ทราบถึงปริมาณที่เหมาะสมในการเติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลลงในเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนิติกเกรด 316L เพื่อให้ได้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดี
3. เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้มีคุณภาพและมีสมบัติด้านต่างๆที่ดีขึ้น ไม่เพียงแต่สมบัติด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชันแต่รวมไปถึงสมบัติด้านอื่นๆด้วยในอนาคต

## บทที่ 2

### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (Introduction to Stainless Steel) [1-2]

Stainless Steel หรือเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กกล้าที่ได้รับการปรับปรุงเหล็กกล้า เพื่อพัฒนาสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) เป็นหลัก โดยการเติมธาตุผสมหลักคือ โครเมียม (Cr) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% เป็นอย่างน้อย และอาจมีธาตุผสม (Alloying Elements) อย่างอื่นด้วย เช่น นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) ไททาเนียม (Ti) ไนโอเบียม (Nb) เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี เนื่องจากการเกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์บนผิว โดยฟิล์มจะมีลักษณะบางมาก มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ฉะนั้นการเกิดปฏิกิริยา และติดแน่นกับเหล็ก ดังนั้นจึงทำให้สามารถปกป้องเหล็กจากสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ในวงกว้าง อีกทั้งเมื่อฟิล์มเสียหายเมื่อเกิดการขัดสี การตัด หรือการกลึง และในบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็ว เหล็กกล้าไร้สนิมถือว่าได้รับความนิยมในการนำไปใช้งาน สามารถนำไปผลิตเป็นเครื่องมืออุปกรณ์ในงานหลากหลายสาขาดังตารางที่ 2.1

PRODUCT FORMS		APPLICATION CATEGORIES	
Cold rolled sheet	60 %	<b>Consumer items</b>	26 %
Bar and wire	20 %	Washing machines and dishwashers	8 %
Hot rolled plate	10 %	Pans, cutlery, etc.	9 %
Tube	6 %	Sinks and kitchen equipment	4 %
Castings and other	4 %	Other	5 %
		<b>Industrial equipment</b>	74 %
		Food industry and breweries	25 %
		Chemical, oil and gas industry	20 %
		Transport	8 %
		Energy production	7 %
		Pulp and paper, textile industry	6 %
		Building and general construction	5 %
		Other	5 %

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสัดส่วนการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมในงานประเภทต่างๆ [3]

### 2.1.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม (Classifications of Stainless Steels) [1-2]

Steel category	Composition (wt%)					Hardenable	Ferro-magnetism
	C	Cr	Ni	Mo	Others		
Martensitic	>0.10 >0.17	11-14 16-18	0-1 0-2	- 0-2	V	Hardenable	Magnetic
Martensitic-austenitic	<0.10	12-18	4-6	1-2		Hardenable	Magnetic
Precipitation hardening		15-17 12-17	7-8 4-8	0-2 0-2	Al, Al,Cu,Ti,Nb	Hardenable	Magnetic
Ferritic	<0.08 <0.25	12-19 24-28	0-5 -	<5 -	Ti	Not hardenable	Magnetic
Ferritic-austenitic (duplex)	<0.05	18-27	4-7	1-4	N, W	Not hardenable	Magnetic
Austenitic	<0.08	16-30	8-35	0-7	N,Cu,Ti,Nb	Not hardenable	Non-magnetic

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงช่วงของส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆ [3]

เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม โดย 4 กลุ่มแรกแบ่งโดยอาศัยลักษณะของโครงสร้างผลึกหรือโครงสร้างจุลภาค ส่วนในกลุ่มที่ 5 นั้นจะแบ่งโดยใช้การผ่านกระบวนการทางความร้อนมากกว่าที่จะใช้โครงสร้างจุลภาค

เหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 5 กลุ่ม มีดังนี้

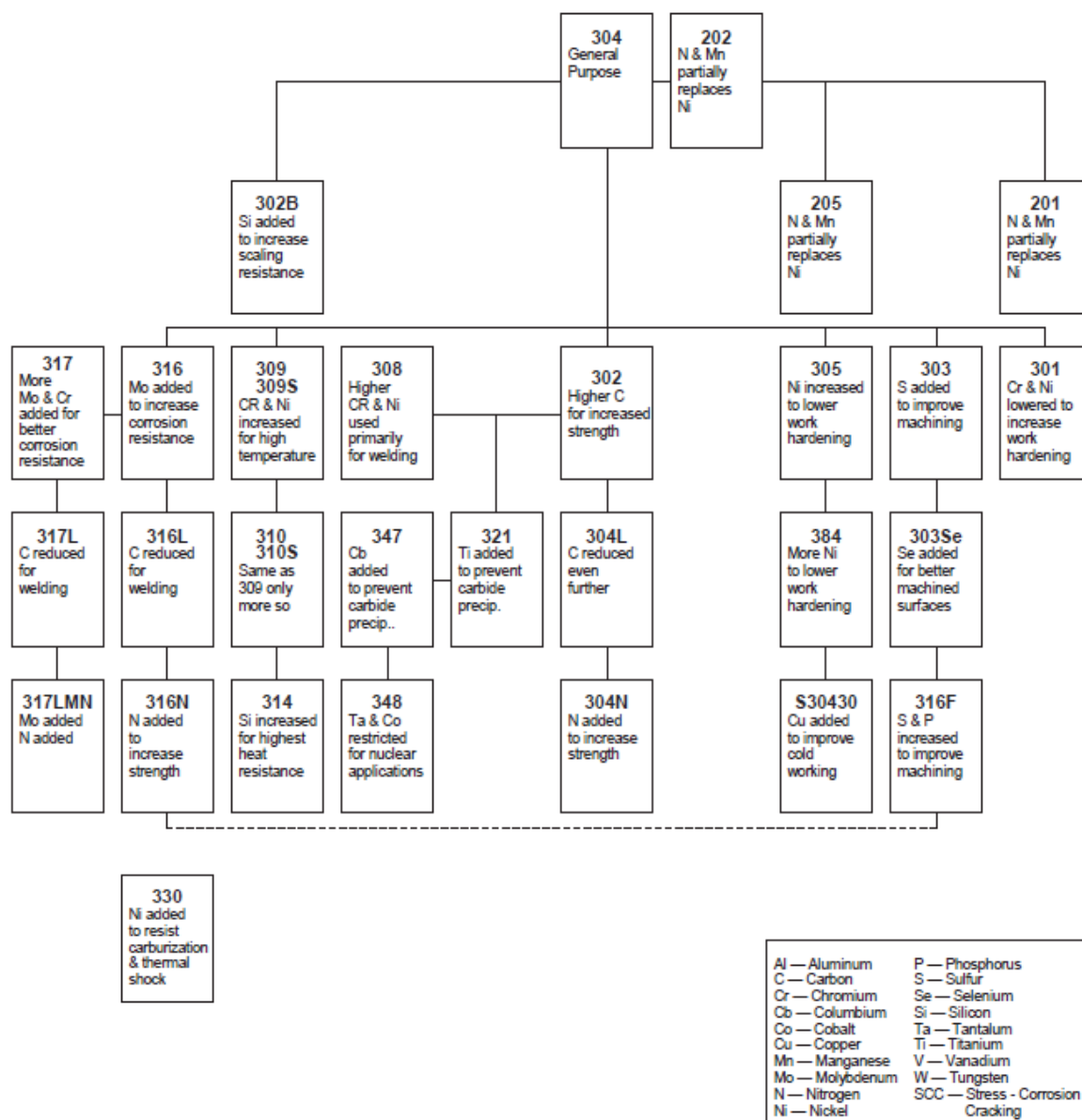
1. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติก (Austenitic Stainless Steels)
2. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steels)
3. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steels)
4. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steels)
5. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยกลไกการตกตะกอน (Precipitation Hardening Stainless Steels)

## 2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Austenitic Stainless Steel) [1-2]

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Face Centered Cubic (FCC) หรือ ออสเทนไนต์ (Austenite) ไม่ติดแม่เหล็ก ไม่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) สามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ดีเนื่องจากมีความเหนียวที่ดี ความสามารถในการขึ้นรูปและความแกร่งที่ดีมากแม้จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ (Cryogenic) สามารถทำให้แข็งขึ้นได้ด้วยการตามด้วยการขึ้นรูปเย็น เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีมากทั้งการกัดกร่อนทั่วไปและการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) หรือการกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ ธาตุโมลิบดีนัมยังเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เป็นทะเลและกรด อีกทั้งเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนในที่อับอีกด้วย และด้วยปริมาณนิกเกิลจึงมั่นใจได้ว่าในกลุ่มเกรด 300 มีการต้านทานการกัดกร่อนแบบมีความเค้น (Stress-corrosion) ที่ดีกว่าด้วย[4] ธาตุผสมหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ คือ นิกเกิล (Ni) ซึ่งจะช่วยทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียร คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกแบ่งออกย่อยอีก 2 กลุ่ม คือ

- 1.ผสมโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-Nickel Alloys) กลุ่ม 300 เช่น เกรด S30400 และ เกรด S31600
- 2.ผสมโครเมียม-แมงกานีส (Chromium-Manganese Alloys) กลุ่ม 200 เช่น เกรด S20100 และเกรด S24100



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงการแบ่งเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก[4]

กลุ่มเกรด 200 จะมีปริมาณนิกเกิลที่ผสมอยู่ต่ำกว่ากลุ่ม 300 และอาศัยธาตุไนโตรเจนที่มีปริมาณสูงในการคงสภาพโครงสร้างออสเทนิต และการที่มีปริมาณแมงกานีส (ปริมาณ 5 - 20%) เป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีปริมาณนิกเกิลผสมอยู่น้อย เนื่องจากแมงกานีสนั้นจะเพิ่มความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในโครงสร้างออสเทนิต และยังป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite Transformation) ด้วย นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีส่วนในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างออสเทนิตอีกด้วย สมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเท

นิติด ได้แก่ มีความสามารถต้านทานการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) และความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ที่ดีเยี่ยม สามารถทำให้แข็งขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น (Cold work) แต่ไม่สามารถทำได้โดยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) โดยทั่วไปมักนำมาใช้งานในสภาพที่ถูกอบอ่อนเต็มที่ (Full annealed) ไม่ติดแม่เหล็ก สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากและที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 องศาเซลเซียส หากใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ต้องคำนึงถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (Oxidation หรือ Scaling Resistance) สำหรับการใช้นั้นมีหลากหลาย เช่น ทำวัสดุก่อสร้าง ใช้เป็นอุปกรณ์ในระบบการผลิตเครื่องดื่มหรืออาหาร ที่ต้องการความสะอาดจากการมีความต้านทานการเกิดการกัดกร่อน ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ก๊าซเหลวซึ่งมีอุณหภูมิต่ำมากๆ ทำอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (Heat Exchanger)

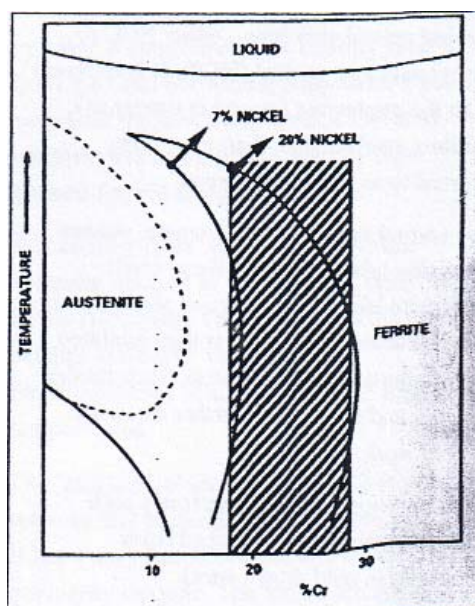
เมื่อนิกเกิลถูกเติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณที่เพียงพอ จะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์ ทำให้เกิดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคขึ้น ส่วนผสมพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคคือ โครเมียม 18% และนิกเกิล 8% ซึ่งคือเกรด 304 หากมีปริมาณนิกเกิลต่ำกว่า 8% จะทำให้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีกลุ่มของเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นภายใน ที่นิกเกิล 5% จะได้โครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์อย่างละ 50% และถ้านิกเกิลต่ำกว่า 3% จะทำให้โครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมด เกรด 304 จึงถือเป็นเกรดพื้นฐานสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคที่ราคาต้นทุนต่ำที่สุด[5] จากเกรด 304 มีการพัฒนาโดยต้องการการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มเติม อาศัยการเติมโมลิบดีนัมลงไปประมาณ 2-3% จะได้เป็นเกรด 316 และโดยปกติแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคจะมีคาร์บอนต่ำประมาณไม่เกิน 0.08% แต่หากต้องการคาร์บอนต่ำมากหรือเกรดที่ตามด้วยอักษร 'L' (Low Carbon) จะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.03% หากเป็นเกรดที่ต้องการความเสถียรจะเติมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมซึ่งช่วยป้องกันการเกิดการกัดกร่อนที่บริเวณใกล้รอยเชื่อม

## 2.3 โลหวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค (Metallurgy of Austenitic Stainless Steels) [1-2]

ปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมหากมีถึง 16% ก็จะทำให้มีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคมีโครงสร้างผลึกเป็นเฟอร์ไรต์ได้ดังภาพที่ 2.2 ต้องใช้ธาตุผสมที่สามารถปรับ gamma

loop ได้ทั้งขยายพื้นที่ของโครงสร้างออสเทนไนต์เข้าไปในพื้นที่ของเฟอไรต์ที่มีปริมาณของโครเมียมสูง แล้วยังต้องคงสภาพของโครงสร้างออสเทนไนต์ไว้ได้ที่อุณหภูมิต่ำด้วย ทัวไปมักอาศัยการเติมนิกเกิลในกลุ่มเกรด 300 แต่แมงกานีสจะถูกเติมในกลุ่มเกรด 200 แทนนิกเกิล วัตถุประสงค์เหล่านี้เป็นธาตุที่ให้ความเสถียรแก่ออสเทนไนต์หรือสร้างออสเทนไนต์ในลักษณะการเข้าไปแทนที่ (Substitutional Austenitic Stabilizers/Formers) โดยจะเข้าไปแทนตำแหน่งของอะตอมเหล็กในโครงสร้างผลึก ขนาดอะตอมที่ใหญ่ทำให้การแพร่เป็นไปได้ช้าๆ ฉะนั้นการจะทำให้สามารถคงสภาพเป็นออสเทนไนต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำได้นั้นอะตอมจะต้องมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่เพียงพอที่จะทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง ในบางเกรดมีการเติมไนโตรเจนเข้าไปเล็กน้อยเนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุผสมที่ช่วยให้ออสเทนไนต์เสถียรในลักษณะการแทรกที่ (Interstitial Austenite stabilizer) ช่วยนิกเกิลในการเพิ่มและคงสภาพของโครงสร้างออสเทนไนต์ ปริมาณนิกเกิลที่ต้องมีก็ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของแต่ละเกรด เช่น มีโครเมียม 17% ต้องมีนิกเกิล 7% เพื่อที่จะรักษาโครงสร้างออสเทนไนต์ไว้ได้ แต่ในบางเกรดที่ต้องการความต้านทานจากความร้อนจะมีโครเมียมสูงถึง 26% ก็ต้องมีนิกเกิลสูงถึง 20% เพื่อให้แน่ใจได้ว่าจะได้โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ที่เสถียร โมลิบดีนัมที่ถูกเติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์นั้น เป็นธาตุผสมที่มีผลทำให้เฟอไรต์เสถียรในลักษณะการเข้าไปแทนที่ (Substitutional Ferritic Stabilizer) ฉะนั้นปริมาณของนิกเกิลที่ต้องมีก็ต้องเพิ่มมากขึ้นเพื่อต้านผลจากโมลิบดีนัมและคาร์บอนเป็นธาตุผสมที่ทำให้ออสเทนไนต์เสถียรในลักษณะการแทรกที่ (Interstitial Austenite Stabilizer) แต่ในเกรด 'L' ปริมาณของคาร์บอนลดลง มีแนวโน้มที่ออสเทนไนต์จะเสถียรต่ำลงดังนั้นนิกเกิลจึงต้องมีปริมาณเพิ่มขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นสมบัติทัวไปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคจึงไม่ติดแม่เหล็ก โครงสร้างผลึกเสถียรมาก ความสามารถในการเชื่อมดีมากและไม่สามารถชุบแข็งได้ โดยกรรมวิธีทางความร้อนแต่จะแข็งขึ้นเมื่อทำไปผ่านการขึ้นรูปเย็น

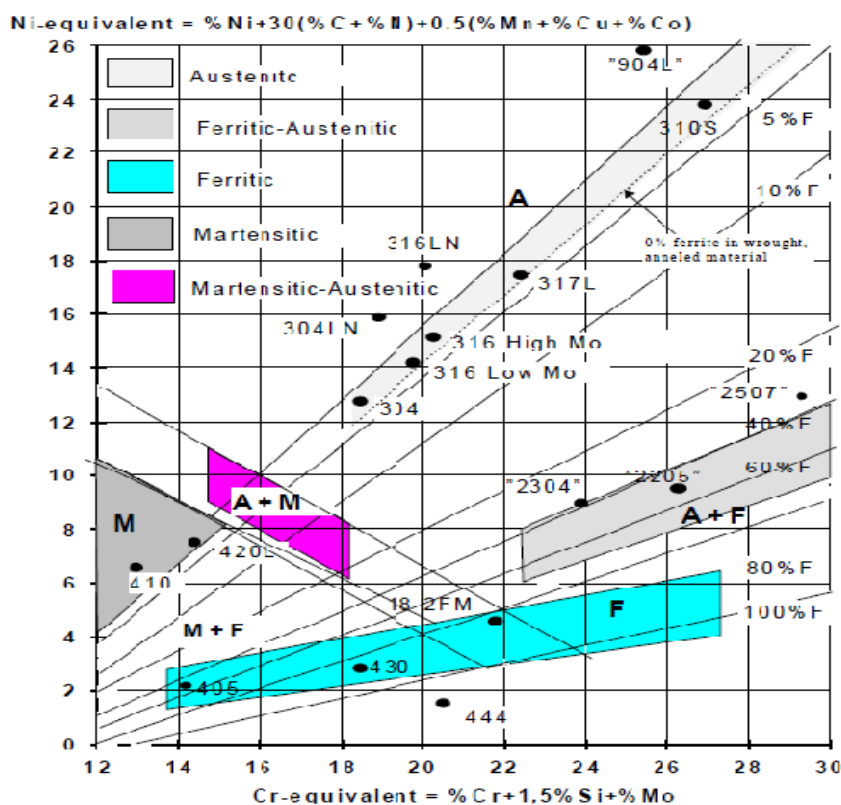




ภาพที่ 2.2 แสดงผลของนิกเกิลเกิดต่อลักษณะของ gamma loop และรักษาความเสถียรของโครงสร้างออสเทนไนต์ตั้งแต่อุณหภูมิสูงจนถึงอุณหภูมิต่ำ [2]

การแพร่ (Diffusion) ของนิกเกิลเป็นไปได้อย่างช้าๆแม้ว่าจะอยู่ที่อุณหภูมิสูง และการที่อยู่ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเกรน (Grain Growth) หรือการแข็งเปราะ (Embrittlement) ธาตุที่ช่วยให้ออสเทนไนต์เสถียรในลักษณะการแทนที่จะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเมื่อเย็นตัวตั้งนั้นการชุบแข็งโดยกรรมวิธีทางความร้อนจึงไม่มีผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแต่เนื่องจากโครงสร้างออสเทนไนต์ไม่ใช่โครงสร้างที่เสถียรคืออยู่ในรูปกึ่งเสถียร (Metastable) ต้องการจะเปลี่ยนโครงสร้าง ซึ่งจะเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อมีการนำไปขึ้นรูปเย็นเกิดการเคลื่อนที่ของสลิปเพลน (Slip Plane) ภายในเกรนและมีพลังงานมากกระทำที่เพียงพอ จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่จะเกิดขึ้นเฉพาะจุดบนสลิปเพลนจะเกิดเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นนี้ต่างจากมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกเนื่องจากมาร์เทนไซต์นี้จะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีความแกร่งและมีโครงสร้างหลากหลายเป็นได้ทั้ง BCC และ HCP (Hexagonal close-packed) จะเรียกกันว่าเป็น 'Quasi-Martensite' การเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์จะมีการขยายตัวของปริมาตร บริเวณที่เป็นก้อนมาร์เทนไซต์เล็กๆก็จะเป็นเหมือนตัวยับยั้งการเคลื่อนที่ของสลิปเพลน

และทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีความแข็งที่เพิ่มขึ้น อิทธิพลของธาตุผสมต่างๆสามารถดูได้จาก Schaeffler Diagram ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แผนภูมิ Schaeffler-Dulong แสดงอิทธิพลของธาตุต่างๆที่มีต่อโครงสร้าง[3]

### การตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Carbide Precipitation)

การตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรนหรือการเกิด Sensitization จะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกถูกให้ความร้อนไปที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 425-870 องศาเซลเซียส โดยโครเมียมคาร์ไบด์จะตกตะกอนออกมาส่งผลให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของโครเมียมลดลงทันที คาร์ไบด์ที่ตกตะกอนออกมานั้นจะอยู่ในรูป  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$  เมื่อการตกตะกอนเป็นไปในลักษณะต่อเนื่องจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมนั้นไวต่อการเกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) และยังลดความต้านทานการกัดกร่อนแบบอื่นๆด้วย เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) และการแตกหักเนื่องจากมีแรงกระทำร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking) สามารถหลีกเลี่ยงการเกิด

Sensitization ได้โดยการเลือกใช้เหล็กกล้าที่ถูกทำให้มีความเสถียร เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการเติมธาตุไทเทเนียมหรือนิโอเบียม เนื่องจากธาตุเหล่านี้พร้อมที่จับกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้ดีกว่าโครเมียม ทำให้โครเมียมยังคงอยู่ในสภาพสารละลายแม้ว่าจะอยู่ที่อุณหภูมิสูงในช่วงของการเกิด Sensitization เป็นเวลานานก็ตาม

### การตกตะกอนของเฟสสารประกอบระหว่างโลหะ (Precipitation of Intermetallic Phases)

การตกตะกอนของเฟส  $\sigma$  (Sigma-phase Precipitation) หรือเฟสสารประกอบระหว่างโลหะอื่น ๆ จะส่งผลให้เกิดความไวต่อการกัดกร่อนและทำให้เปราะเพิ่มมากขึ้น เฟส  $\sigma$  เป็นเฟสที่มีโครเมียมและโมลิบดีนัมประกอบอยู่มาก (Chromium-Molybdenum-rich Phase) ซึ่งทำให้ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนทั้งแบบระหว่างเกรน แบบจุด และแบบในที่อับ โดยทั่วไปเฟส  $\sigma$  จะตกตะกอนออกมาในช่วงอุณหภูมิประมาณ 565-980 องศาเซลเซียสและช่วงอุณหภูมิ 700-810 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีเฟส  $\sigma$  ตกตะกอนออกมาปริมาณมากที่สุด ธาตุที่เป็นตัวช่วยในการทำให้เฟส  $\sigma$  เสถียรทุกตัวจะยิ่งช่วยให้เกิดเฟส  $\sigma$  โมลิบดีนัมจะให้ผลมากเหมือนกับซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียมจะให้ผลน้อยกว่า ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เกิดเฟส  $\sigma$  เพิ่มขึ้น การที่มีนิกเกิลหรือแมงกานีสเพียงเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มอัตราในการเกิดเฟส  $\sigma$  แต่ถ้ามีปริมาณที่มากจะทำให้มีผลต่อความเสถียรของเฟสออสเทนไนต์มากกว่าซึ่งยับยั้งการเกิดของเฟส  $\sigma$  ได้ คาร์บอนนั้นช่วยลดการเกิดเฟส  $\sigma$  ได้เช่นกันโดยจะไปจับกับโครเมียมตะกอนเป็นคาร์ไบด์แทน แต่ก็ส่งผลให้โครเมียมที่ละลายอยู่ในเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลง การที่มีเกรนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งได้จากการทำการทำละลายที่อุณหภูมิสูงก็ช่วยยับยั้งการเกิดเฟส  $\sigma$  ได้เช่นกัน แต่การขึ้นรูปเย็นจะช่วยให้เกิดเฟส  $\sigma$  แต่จะขึ้นกับปริมาณการขึ้นรูปเย็นและผลของการขึ้นรูปเย็นต่อการเกิด recrystallization การมีเฟส  $\sigma$  ส่งผลให้เสียสมบัติด้านความแกร่งอย่างมากและสูญเสียสมบัติด้านความเหนียวด้วย แต่ก็มีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นผลรอง

## การเกิดของเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite Formation)

มาร์เทนไซต์สามารถเกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกได้เมื่อทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็วไปยังอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องหรือเมื่อทำการขึ้นรูปเย็น เป็นการทำให้เกิดโดยอาศัยกลไกทางความร้อนและกลไกทางกลตามลำดับ ผลจากคาร์บอนและไนโตรเจนมีผลต่อเส้น Martensite Start ( $M_s$ ) มากกว่าผลจากโครเมียมและนิกเกิล ไนโตรเจนและคาร์บอน เมื่ออยู่ด้วยกันจะมีอิทธิพลต่อการช่วยให้ออสเทนิตเสถียรมากกว่าการเกิดเป็นมาร์เทนไซต์ ดังนั้นเมื่อเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ที่บริเวณขอบเกรนของออสเทนิตทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณโครเมียมและคาร์บอนลดลง เส้น  $M_s$  สูงขึ้นทำให้มาร์เทนไซต์อาจเกิดได้ที่บริเวณขอบเกรน มาร์เทนไซต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1. มาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการเย็นตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องโดยจะได้ออกมา 2 โครงสร้างคือ Hexagonal close-packed (HCP),  $\epsilon$ -martensite และ BCC  $\alpha'$ -martensite 2. มาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการที่มีความเครียดหรือการเปลี่ยนรูปมาเหนี่ยวนำ (Strain-induced/Deformation-induced martensite) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีที่เกิดจากการเย็นตัว

## 2.4 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel) [1-3]

### 2.4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

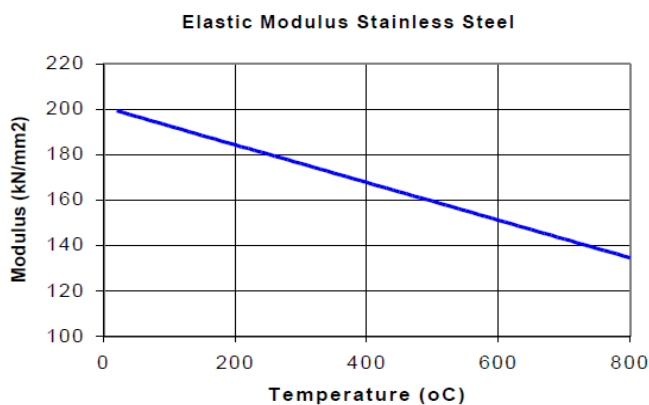
สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายอย่าง เช่น ความหนาแน่น ค่ามอดูลัส ความยืดหยุ่น สมบัติทางความร้อน เป็นต้น ซึ่งค่าสมบัติต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมจะแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

Property	Type of stainless steel			
	Martensitic*	Ferritic	Austenitic	Ferritic-austenitic
Density (g/cm <sup>3</sup> )	7.6-7.7	7.6-7.8	7.9-8.2	.8
Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> ) or (MPa)	220,000	220,000	195,000	200,000
Thermal expansion (x 10 <sup>-6</sup> /°C) 200-600°C	12-13	12-13	17-19	13
Thermal conductivity (W/m°C) 20°C	22-24	20-23	12-15	20
Heat capacity (J/kg°C) 20°C	460	460	440	400
Resistivity (mΩm) 20°C	600	600-750	850	700-850
Ferromagnetism	Yes	Yes	No	Yes

\* in the hardened and tempered condition

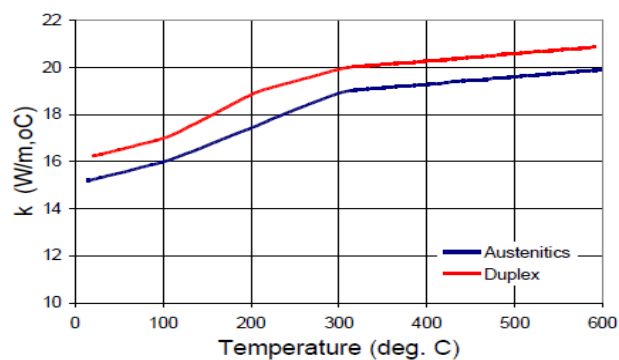
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสมบัติทางกายภาพต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เฟอริติก ออสเทนนิติกและเฟอริติก-ออสเทนนิติก [3]

โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะสูงกว่าเหล็กกล้าประเภทอื่น โดยที่ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากระดับปริมาณของธาตุผสมที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุที่เป็นธาตุหนัก เช่น โมลิบดีนัม จากตารางพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีความอดุลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น และค่าความอดุลัสยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2.4

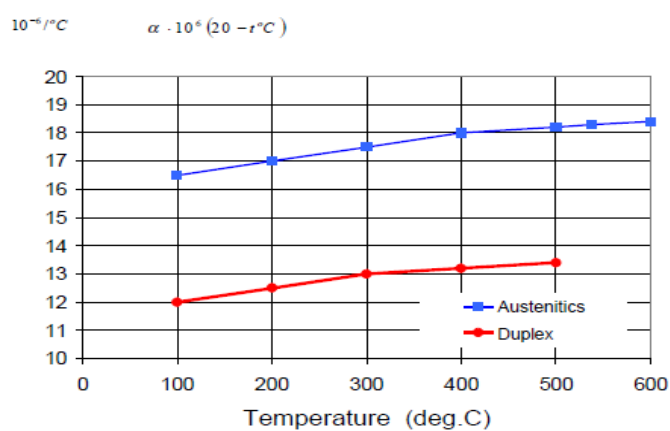


ภาพที่ 2.4 แผนภูมิแสดงค่าความอดุลัสยืดหยุ่นเทียบกับอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [3]

สำหรับค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ถือเป็นค่าที่ทำให้เห็นความแตกต่างของเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างเห็นได้ชัด เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่นซึ่งจะทำให้มีปัญหาเรื่องความเค้นจากความร้อน (Thermal stress) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดของวัสดุเมื่อมีการให้ความร้อนหรือเย็นตัว ส่วนค่าการนำความร้อนโดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมจะต่ำกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน และการเพิ่มขึ้นของธาตุผสมจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง ในเหล็กกล้าไร้สนิมค่าการนำความร้อนในมาร์เทนซิติกจะมากที่สุด ลดลงมาเป็นเฟอร์ริติก เฟอร์ริติก-ออสเทนิติก และออสเทนิติก ลดลงตามลำดับ



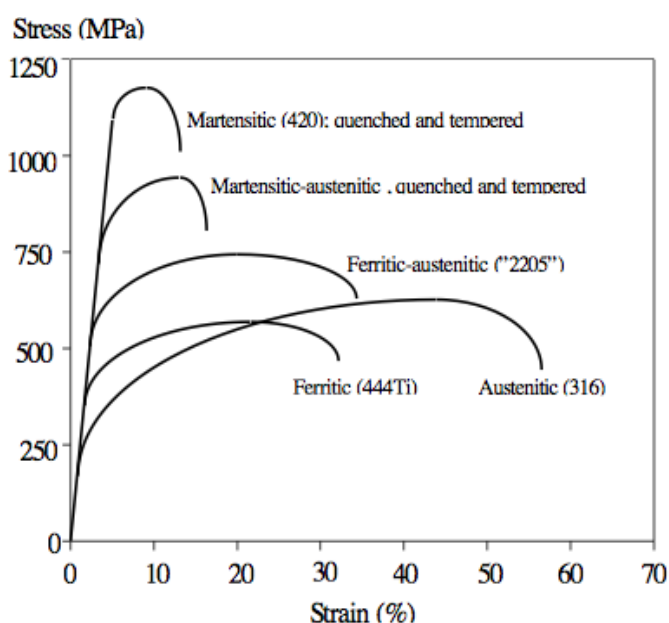
ภาพที่ 2.5 แผนภูมิแสดงค่าการนำความร้อนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและดูเพล็กซ์ [3]



ภาพที่ 2.6 แผนภูมิแสดงค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและดูเพล็กซ์ [3]

### 2.4.2 สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

โดยส่วนใหญ่การการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมจะเน้นด้านการต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าสมบัติทางกล[6] แต่นอกจากสมบัติเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เน้นด้านการต้านทานการกัดกร่อนแล้ว ด้านสมบัติทางกลก็ยังถือว่าเป็นข้อดีของเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นกัน สมบัติทางกลที่สำคัญมีอยู่หลายอย่าง ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความแกร่ง ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆสามารถทราบได้จากกราฟเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ( Stress-strain Curve) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แผนภูมิแสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain Curve) ของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆ[3]

**ความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรงจุดคราก (Tensile Strength and Yield Strength)**

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะมีค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength) ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น และความแข็งแรงแรงดึงก็ต่ำกว่าเหล็กกล้า

ไร้สนิมประเภทอื่นเช่นเดียวกันยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีค่าความแข็งแรงแรงดึงต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

### ความเหนียว (Ductility)

สำหรับความเหนียวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกถือว่ามีความเหนียวที่ดีมาก มีค่าการยืดตัวที่สูงมากเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปวิธีต่างๆ เช่น ดึงขึ้นรูป อัดขึ้นรูป เป็นต้น การขึ้นรูปเย็นจะส่งผลต่อความเหนียวโดยจะทำให้ความเหนียวลดลง

### ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งสำหรับกรณีที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกผ่านการอบอ่อนมาโดยทั่วไปจะมีความแข็งประมาณ 150-160 HB การผ่านการขึ้นรูปเย็นแม้เพียงเล็กน้อยจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้จนสามารถได้ความแข็งถึงประมาณ 250 HB การขึ้นรูปเย็นในช่วงหลังจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าตอนแรก

### ความแกร่ง (Toughness)

ความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกถือว่าดีมาก โดยทั่วไปจะมีความแกร่งจากการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy V ที่อุณหภูมิห้องสูงถึง 165 J การขึ้นรูปเย็นก็จะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงกระแทกจะทำให้มีค่าลดลงซึ่งจะขึ้นกับปริมาณการขึ้นรูปเย็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีความแกร่งลดลงต่อเมื่ออยู่ภายใต้ 2 สถานการณ์ คือ

1. เมื่อมีส่วนผสมทางเคมีที่จะทำให้เกิดเฟสที่เปราะหรือเฟสชิคมา ( $\sigma$ ) ขึ้นภายในโครงสร้างเมื่อให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600-850 องศาเซลเซียส ความเปราะของเฟส  $\sigma$  จะไม่ได้ลดความแกร่งในขณะที่อยู่ที่อุณหภูมิสูงแต่จะส่งผลให้ความแกร่งลดลงหลังจากการถูกทำให้เย็นตัวและทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง
2. เมื่อทำการขึ้นรูปเย็นมากประมาณหนึ่งแล้วตามด้วยการให้ความร้อนขึ้นไปอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Sensitization ช่วงอุณหภูมิประมาณ 550-850 องศาเซลเซียสในเวลา



เพียงพอ จะทำให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำให้สูญเสียความแกร่งเป็นอย่างมาก

### 2.4.3 สมบัติด้านอื่น ๆ ที่น่าสนใจ

#### ความสามารถในการเชื่อม

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกถือว่าเป็นกลุ่มที่นำมาทำการเชื่อมมากที่สุดในเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีนิเกิลและบางครั้งมีแมงกานีสเติมเข้าไปนอกเหนือจากโครเมียมซึ่งนิเกิลเป็นธาตุรองที่ถือว่ามีส่วนช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน แต่ข้อดีหลักของนิเกิลคือช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็กกล้าไร้สนิม จึงเป็นเกรดที่สามารถทำการขึ้นรูปทางกลและทำการเชื่อมได้ง่าย

#### ความต้านทานการกัดกร่อน

เหล็กกล้าไร้สนิมถือว่ามีได้รับการพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้ในทั้งกรณีที่อยู่ในบรรยากาศการกัดกร่อนที่อ่อนและรุนแรง และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสโดยที่ยังมีความแกร่งสูงและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 องศาเซลเซียสโดยที่ยังมีการต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Resistance) ที่ดี เนื่องจากในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกยากที่จะเพิ่มปริมาณของโครเมียมเพื่อจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน จะอาศัยการเติมโมลิบดีนัมเข้ามาช่วย นอกจากนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกสามารถเกิดเซนซีไทเซชันหรือการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนและบริเวณติดกันกับคาร์ไบด์นั้นมีปริมาณของโครเมียมต่ำซึ่งทำให้ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนเมื่อทำการเชื่อมหรือเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน สามารถทำให้เกิดซ้ำลงหรือป้องกันการเกิดเซนซีไทเซชันได้โดยการใช้เกรดคาร์บอนต่ำ (<0.03%C) หรือใช้เกรดที่มีการเติมธาตุที่เกิดเป็นคาร์ไบด์ที่เสถียร เช่น ไททาเนียมและไนโอเบียม

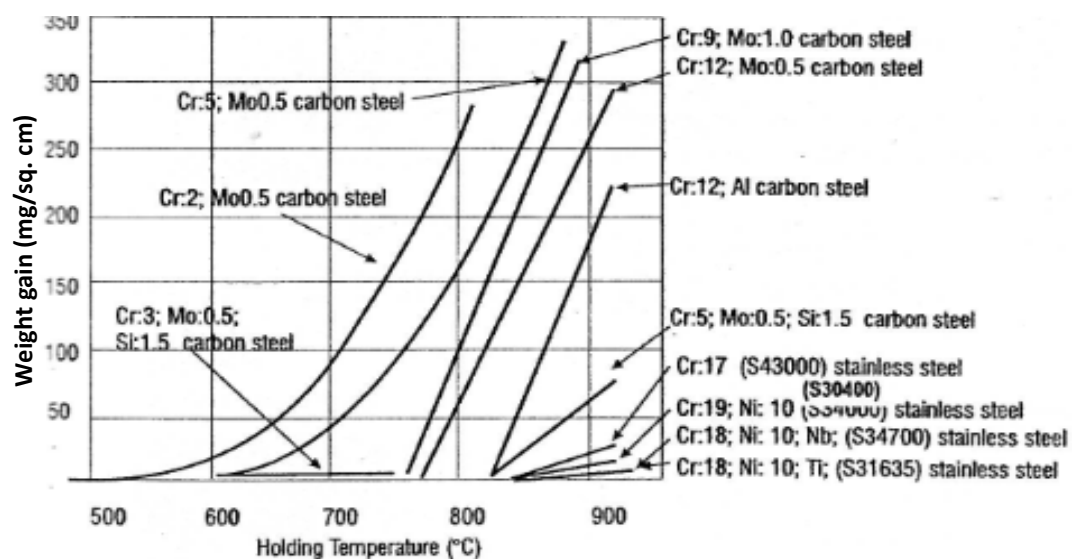
### 2.5 อิทธิพลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Effect of Alloying Elements in Austenitic Stainless Steel) [3],[7-8]

ธาตุผสมแต่ละธาตุจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมในลักษณะต่างๆกัน และเมื่อผลของแต่ละธาตุรวมเข้าด้วยกันก็จะเกิดเป็นสมบัติที่มีเฉพาะตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมในแต่ละ

เกรดเพราะแต่ละเกรดก็จะมีปริมาณของธาตุผสมแต่ละอย่างแตกต่างกันไป การที่ทราบถึงอิทธิพลของธาตุผสมจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและผลที่มีต่อสมบัติต่างๆ จะช่วยให้ทราบถึงสมบัติโดยรวมของวัสดุได้ ธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีดังนี้

### โครเมียม (Chromium; Cr)

เป็นธาตุผสมที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม โครเมียมเป็นธาตุที่ช่วยให้โครงสร้างเฟอไรต์เสถียร และเป็นธาตุหลักที่ช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัดกร่อน โดยจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ชั้นที่ผิว ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้การต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น รวมไปถึงการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Resistance) ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้โครเมียมยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงทางกลในรูปแบบกลไกให้ความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็งอีกด้วย

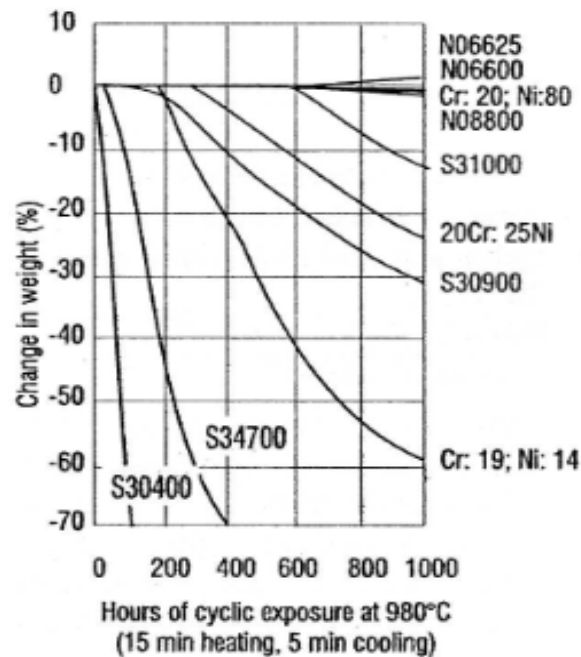


ภาพที่ 2.8 อิทธิพลของธาตุโครเมียมต่อการเกิดออกซิเดชัน [1]

### นิกเกิล (Nickel; Ni)

เหตุผลหลักในการเติมนิกเกิลเพื่อช่วยในการรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างออสเทนิต์ โดยทั่วไปนิกเกิลจะช่วยให้ความเหนียวและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมดีขึ้น อีกทั้งยังลดอัตราการกัดกร่อนโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด นิกเกิลในปริมาณสูงจะช่วยลดการกัดกร่อน

เนื่องจากความเครียด ในการชุบแข็งโดยการตกตะกอนนิเกิลยังเกิดเป็นสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound) ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และนิเกิลยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันโดยช่วยให้ฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นยึดแน่นกับเนื้อพื้นไม่หลุดร่อนได้ง่าย ดังภาพที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณนิเกิลเพิ่มขึ้นการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานจะน้อยลง



ภาพที่ 2.9 อิทธิพลของธาตุนิเกิลต่อการเกิดออกซิเดชัน [1]

### โมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo)

โมลิบดีนัมช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นทั้งแบบที่เกิดทั่วพื้นผิวและแบบที่เกิดขึ้นเฉพาะจุด โมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมที่มีส่วนช่วยอย่างมากในการเกิดโครงสร้างเฟอไรต์ และยังเกิดเป็นเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) ในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรติก, ดิวเพิลิกซ์ และออสเทนิติก ในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก โมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิเทมเปอริง (Tempering Temperature) สูงเนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์

### แมงกานีส (Manganese; Mn)

โดยทั่วไปจะเติมแมงกานีสเพื่อเพิ่มความเหนียวเมื่อร้อน (Hot Ductility) แต่อิทธิพลของแมงกานีสต่อสัดส่วนสมดุลของเฟสไรต์กับออสเทนไนต์จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ โดยที่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำแมงกานีสจะเป็นธาตุที่ช่วยให้ออสเทนไนต์เสถียร แต่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิสูงแมงกานีสจะกลายเป็นธาตุที่ช่วยให้เฟสไรต์เสถียร แมงกานีสจะช่วยให้ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนสูงขึ้นจึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถมีปริมาณของไนโตรเจนละลายอยู่ในปริมาณที่สูงได้

### ซิลิกอน (Silicon; Si)

ซิลิกอนจะช่วยให้มีความสามารถด้านการต้านทานการเกิดออกซิเดชันทั้งที่เป็นการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากอยู่ในสารละลายที่เป็นออกซิไดซิง (Oxidizing Solution) ที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดเฟสไรต์ด้วย

### คาร์บอน (Carbon; C)

คาร์บอนเป็นธาตุผสมที่ช่วยให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์และช่วยให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียรที่อุณหภูมิหนึ่ง มีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรง แต่คาร์บอนจะลดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกคาร์บอนจะเป็นธาตุที่ทำให้ความแกร่งและความต้านทานการกัดกร่อนลดลงอย่างรุนแรง สำหรับในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและดูเพล็กซ์นั้นคาร์บอนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรง แต่ในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงและความแข็งแรงจะเกิดพร้อมๆกับการลดลงของความแกร่งเพราะฉะนั้นคาร์บอนจึงถือว่าส่งผลให้ความแกร่งลดลงสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก

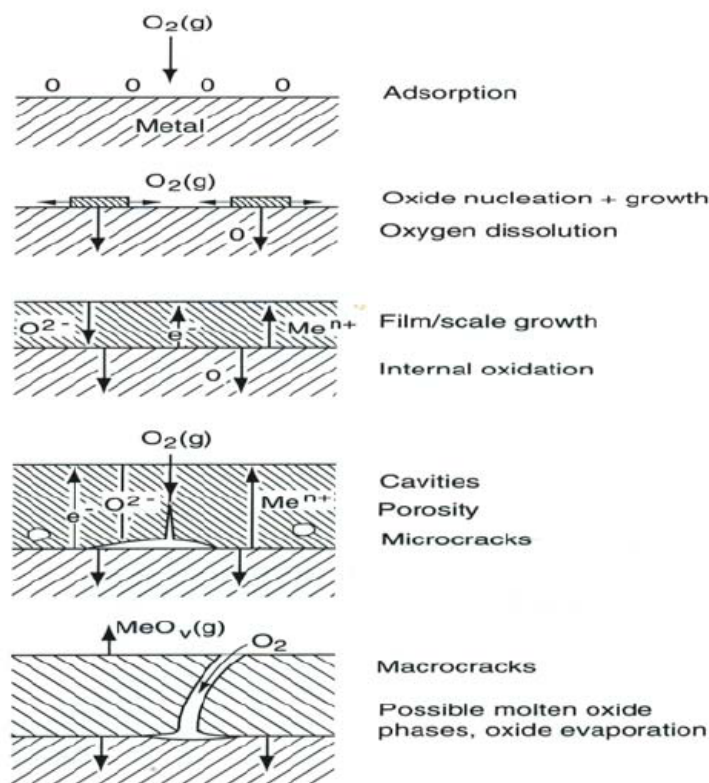
### ไนโตรเจน (Nitrogen; N)

ไนโตรเจนก็เป็นธาตุผสมที่ช่วยให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์และช่วยรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ไนโตรเจนจะเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะจุด

(Localized Corrosion) โดยเฉพาะเมื่อร่วมกับโมลิบดีนัม ถ้าในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกจะลดความแกร่งและความต้านทานการกัดกร่อนอย่างมาก แต่ถ้าในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและดูเพล็กซ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแต่ในทางกลับกันก็จะลดความแกร่งลง

## 2.6 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Behavior)[9]

เมื่อโลหะถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะพบว่ามีอาการเกิดออกซิเดชันขึ้น โดยลักษณะกลไกการเกิดออกซิเดชันเป็นไปดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะโดยทั่วไปของกลไกการเกิดออกซิเดชัน [9]

โดยทั่วไปกลไกการเกิดออกซิเดชันจะแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน

- (1) ออกซิเจนในบรรยากาศถูกดูดซับที่ผิวของชิ้นงาน
- (2) เกิดนิวเคลียสของออกไซด์ขึ้นที่ผิวและออกไซด์โตขึ้น รวมทั้งมีการแตกตัวของออกซิเจนแพร่เข้าไปบริเวณผิวชิ้นงาน

(3) ออกไซด์ที่เกิดขึ้นโตจนปิดผิวหน้าของชิ้นงานกลายเป็นฟิล์มหรือสเกล และมีการโตขึ้นของฟิล์มหรือสเกล ออกซิเจนที่แพร่เข้าไปในผิวชิ้นงานเกิดออกซิเดชันด้านใน (Internal oxidation)

นอกจากเกิด 3 ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น การยึดเกาะของฟิล์ม ฐานฐานของออกไซด์ที่เกิดขึ้น หรือการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของฟิล์มและชิ้นงานที่แตกต่างอาจส่งผลให้พบโพรง รูพรุน หรือรอยแตกเล็กๆ (Microcrack) ที่ในชั้นฟิล์มหรือรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับฟิล์มได้ ซึ่งรอยแยกเหล่านี้จะเพิ่มพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศ อีกทั้งยังเป็นทางที่ทำให้ออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านเข้ามาทำให้เกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม

### 2.6.1 จลนศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชัน (Kinetics of Oxidation) [10]

การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันโดยทั่วไปมักจะศึกษาจลนศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล (Kinetics of Oxidation) ควบคู่ไปด้วย โดยศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาหรือที่เรียกว่า กฎอัตรา (Rate Law) ลักษณะที่พบบ่อยมีอยู่ 4 ประเภท

#### 2.6.1.1 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear Law)

ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาเป็นไปตามสมการเส้นตรง มักเกิดกับปฏิกิริยาที่ผิวหรือรอยต่อระหว่างเฟส เช่น การเกิดออกไซด์ที่ผิวรอยต่อของโลหะกับออกไซด์ในสภาวะคงที่, กระบวนการแพร่ผ่านชั้นป้องกัน (Protective Layer) เป็นต้น ความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ 2.1

$$W^{n-1} [dW/dt] = k_n \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n = 1$  อินทิเกรตสมการ 2.1 จะได้

$$W = k_n t + C \quad (2.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่

$t$  คือ เวลา

$k_n$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

#### 2.6.1.2 ความสัมพันธ์แบบพาราโบลา (Parabolic Law)

ความสัมพันธ์แบบพาราโบลานั้น โดยทั่วไปแล้วจะพบมากในการเกิดออกซิเดชันของโลหะ และโลหะผสมที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นจะแปรผกผันกับความหนาของออกไซด์หรือน้ำหนักของออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ตามสมการ 2.3

อินทิเกรตสมการ 2.1 เมื่อ  $n = 2$  จะได้

$$W^2 = k_n t + C \quad (2.3)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่

$t$  คือ เวลา

$k_n$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

#### 2.6.1.3 ความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithmic Law)

การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำมักจะพบว่ามีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม โดยมีลักษณะอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วในช่วงแรกและลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นไปตามสมการ 2.4

$$W = k_{n1} \log t + A \text{ หรือ } W^2 = k_{n2} \log t + B \quad (2.4)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่

$t$  คือ เวลา

$k_{n1}, k_{n2}$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

### 2.6.1.3 ความสัมพันธ์แบบผสม (Combination)

การเกิดออกซิเดชันในโลหะบางประเภทอาจมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบผสม เช่น ความสัมพันธ์เป็นแบบผสมระหว่างเส้นตรงกับแบบพาราโบลา ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบเส้นตรงในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นแบบพาราโบลาในช่วงหลัง หรือ ความสัมพันธ์เป็นแบบผสมระหว่างลอการิทึมกับพาราโบลา โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบลอการิทึมในช่วงแรกแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นแบบพาราโบลาในช่วงหลัง มักเกิดที่อุณหภูมิต่ำ

## 2.7 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L (Austenitic Stainless Steel 316L (ASTM SS31603))

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L หรือ ASTM SS31603 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่ได้รับความนิยมมากเกรดหนึ่ง เทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (18-8) เกรด 316L ได้รับการพัฒนาโดยการเติมโมลิบดีนัมเข้าไป ทำให้สมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนของเกรด 316L นั้นดีกว่าเกรด 304 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ โดยความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ทั้งแบบการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า การกัดกร่อนแบบรูเข็ม และการกัดกร่อนในที่อับเมื่อเทียบกับเกรด 304 แล้วเกรด 316L ให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่า[5],[11] มีการนำเอาไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น งานเกี่ยวกับอากาศยาน งานยานยนต์ งานก่อสร้างและอาคาร งานด้านเคมี งานการแพทย์ รวมไปถึงงานทางทะเล เป็นต้น จะเห็นได้ว่ามีการใช้งานอยู่รอบๆตัวเรา เนื่องด้วยคุณสมบัติที่ดีในด้านต่างๆ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L มีส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปดังตารางที่ 2.4

เกรด	UNS No.	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
316L	S31603	0.03	2.0	1.00	16.0- 18.0	10.0- 14.0	0.045	0.03	2.0- 3.0

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีมาตรฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด

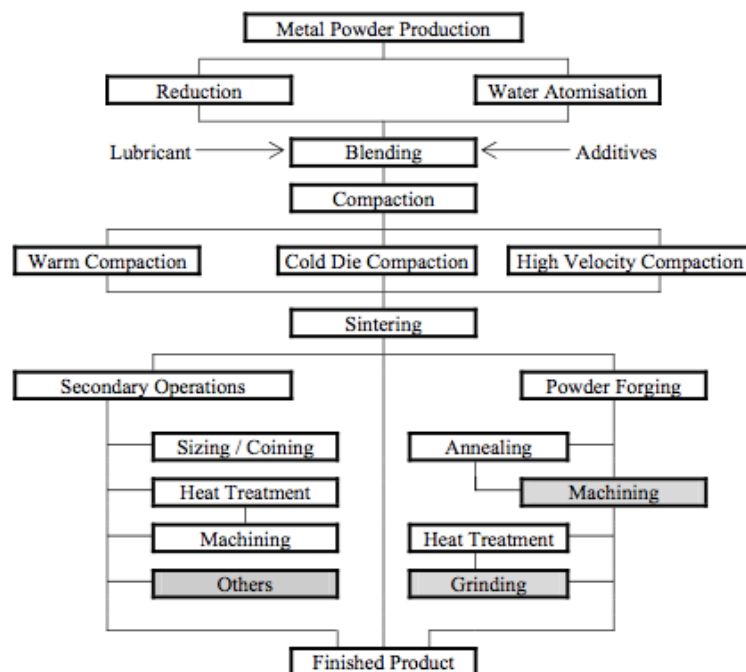
316L [1]



## 2.8 กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะผงในเหล็กกล้าไร้สนิม (Powder Metallurgy of Stainless Steel) [12]

กรรมวิธีขึ้นรูปโลหะผงเป็นวิธีขึ้นรูปที่นิยมวิธีหนึ่งในการใช้ขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย และมีข้อดีหลายประการ เช่น ส่วนผสมจะสามารถควบคุมได้จึงได้โครงสร้างที่สม่ำเสมอ ความแข็งแรงจะสูงเนื่องจากขนาดเกรนที่เล็ก การปรับเปลี่ยนส่วนผสมทำได้ง่าย ขึ้นรูปขึ้นงานที่ซับซ้อนได้ เป็นต้น แต่ก็มีข้อเสียอยู่เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น เนื่องจากการขึ้นรูปวิธีนี้มาจากผงเล็กๆผสมเข้าด้วยกัน ไม่ได้เกิดจากเนื้อเดียวกันทำให้มีปัญหาเรื่องรูพรุนภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความเหนียวลดลง อีกทั้งยังอาจเกิดคาร์บอนตกค้าง เกิดฟิล์มของคาร์ไบด์หรือออกไซด์ได้ ซึ่งข้อเสียเหล่านี้เห็นได้ว่าส่งผลต่อสมบัติทางกล เพราะเหตุนี้จึงต้องระมัดระวังในการผลิตให้เกิดสิ่งเจือปนเหล่านี้ให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ราคาของผงโลหะยังคงมีราคาที่สูงอยู่มาก

กรรมวิธีขึ้นรูปโลหะผงมีขั้นตอนคร่าวๆดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะผง [12]

ขั้นตอนจะแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก

### 2.8.1 การผลิตผงโลหะ (Powder Production)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ได้โลหะออกมาเป็นผง โดยจะแบ่งออกเป็น 3 วิธี

#### 2.8.1.1 กรรมวิธีทางกล

วิธีการพ่นเป็นละออง (Atomization) อาศัยการพ่นน้ำโลหะให้เป็นละอองหยดลงมาแล้วเย็นตัวเป็นของแข็งทำให้ได้ออกมาเป็นผงโลหะ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด โดยทั่วไปมักใช้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ดีบุก ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น

วิธีการกัดโดยเครื่องกัดโลหะ (Machining) เป็นการใช้เครื่องกัดออกมาให้ได้เป็นโลหะชิ้นเล็กๆ มักใช้กับโลหะผสม

วิธีการทำเป็นเม็ด (Granulation) เป็นการนำโลหะหลอมเหลวไปผ่านการกววนด้วยความเร็วสูงจนโลหะแยกตัวจากกันแล้วเย็นตัวเกิดเป็นเม็ดเล็กๆ

วิธี Shoting เป็นวิธีที่นำโลหะหลอมเหลวมาเทผ่านตะแกรงลงในน้ำ วิธีการนี้จะได้ผงที่มีลักษณะที่ค่อนข้างหยาบและยาวรี โดยขนาดจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ระยะทางและขนาดของรูตะแกรง แต่วิธีนี้สามารถใช้ได้กับโลหะเกือบทุกตัว

#### 2.8.1.2 กรรมวิธีทางเคมี

วิธีนี้จะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีให้ได้ของแข็งตกตะกอนออกมา แต่ลักษณะของผงที่ได้ออกมาจะค่อนข้างหยาบ นิยมใช้ในโลหะออกไซด์ เช่น เหล็กออกไซด์ โมลิบดีนัมออกไซด์ เป็นต้น

#### 2.8.1.3 กรรมวิธีทางไฟฟ้า

วิธีนี้จะใช้ขั้วโลหะเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วลบจะเป็นขั้วที่ให้ผงโลหะที่เกิดไปเกาะ แต่ผงที่ได้จะต้องนำไปอบอ่อนก่อนนำไปขึ้นรูปเนื่องจากผงที่เกิดจากกรรมวิธีทางไฟฟ้าจะค่อนข้างเปราะจึงต้องนำไปทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นก่อน โดยทั่วไปขนาดของผงที่ได้จะอยู่ที่ 0.1-30 ไมครอน

## 2.8.2 การผสมผงโลหะ (Mixing)

เป็นขั้นตอนที่ผสมผงโลหะเข้ากับสารหล่อลื่น สารเพิ่มการยึดเกาะ หรือผงโลหะอื่น

## 2.8.3 การอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Compaction)

การอัดขึ้นรูปผงโลหะเป็นการทำให้ผงโลหะที่ผ่านการผสมมาที่มีความแน่น ลดสิ่งเจือปน หรือสิ่งตกค้างที่เหลืออยู่ภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสิ่งตกค้างจำพวกก๊าซที่แทรกตามผิวหรือ อินทรีย์สารที่ปะปนมากับผงโลหะ การอัดขึ้นรูปมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน

### 2.8.3.1 Uniaxial Cold Pressing

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ต่ำ อัดขึ้นงานโดยให้แรงดันในแนวตั้งเพียงแนวเดียว ผงโลหะจะไหลไปในทิศทางเดียวกะทิศที่แรงมากกระทำ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือการที่ผงไหลอัดไปทางเดียวนั้นทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน อีกทั้งยังเกิดจากความเสียดทานระหว่างผงเองและความเสียดทานที่ผงกระทำกับผนังแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นต่างกัน ก็ส่งผลต่อความหนาแน่นด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเติมสารหล่อลื่นเข้าไปผสมกับผงก่อนที่จะนำมาอัดขึ้นรูป เป็นการลดผลจากความเสียดทานทำให้ความหนาแน่นมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

### 2.8.3.2 Cold Isostatic Pressure (CIP)

เป็นการอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงดันในการอัดผงโลหะโดยให้แรงที่เท่ากันทุกทิศทาง ที่อุณหภูมิห้อง วิธีการนี้จะให้ความหนาแน่นที่สม่ำเสมอมากกว่าการอัดขึ้นรูปแบบ Uniaxial Cold Pressing ส่วนใหญ่มักใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะที่ซับซ้อนได้

### 2.8.3.3 Hot Isostatic Pressing (HIP)

เป็นการอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงดันอัดผงชิ้นงานโดยให้แรงที่เท่ากันในทุกทิศทางเช่นเดียวกับใน CIP แต่ต่างกันว่าวิธีนี้จะอัดขึ้นงานในสุญญากาศจากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจากนั้นจึงมี

การปล่อยก๊าซเฉื่อยเข้าไปเป็นตัวส่งต่อแรงดันเข้าไปในชิ้นงาน วิธีการนี้จะสามารถอัดได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงและมีความสม่ำเสมอ มีปริมาณรูพรุนหรือโพรงอากาศต่ำ อัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี

#### 2.8.4 การเผาผนึก (Sintering)

ชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปจะเรียกว่า Green Compact หลังจากอัดแล้วชิ้นงานจะถูกนำมาเผาผนึกหรือ Sintering เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยเผาที่อุณหภูมิสูงแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเพื่อให้ผงชิ้นงานเกิดการหลอมเชื่อมหรือประสานกัน ในบางครั้งต้องมีการใส่ตัวประสานในขั้นตอนการผสมผงเพื่อให้ตอนเผาผนึกผงสามารถยึดติดกันได้ดีขึ้น หลังจากเผาผนึกแล้วโลหะที่ได้จะมีความแข็งแรงพร้อมที่จะนำไปใช้งานและมีสมบัติอื่นๆตามที่ต้องการ โดยทั่วไปจะได้ Tensile Strength ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ Yield Strength ลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรกออกไซด์ที่ผิวจะถูกทำให้ลดลง อนุภาคเริ่มเกิดพันธะกันโดยอาศัยการแพร่ขณะที่เป็นของแข็ง ปริมาณพันธะค่อยๆเพิ่มขึ้นและขนาดเกรนก็ค่อยๆมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งสองปรากฏการณ์จะเกิดขึ้นไปด้วยกันแต่อัตราการโตของเกรนนั้นจะขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกแตกต่างกันไป การโตของบริเวณที่เกิดพันธะขึ้นกับทั้งอุณหภูมิและเวลาในขณะที่ขนาดของเกรนขึ้นกับอุณหภูมิเป็นหลัก เมื่อบริเวณที่เกิดพันธะเพิ่มขึ้น Yield Strength และ Tensile Strength ก็เพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม Yield Strength จะลดลงเนื่องจากขนาดเกรนที่เพิ่มขึ้น โดยรวมแล้วอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกจะทำให้ Tensile Strength ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของ Yield Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น[1] ซึ่งสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมขั้นตอนการเผาผนึกถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นขั้นตอนจะต้องกำจัดสารหล่อลื่น (Lubricant) ที่ใส่ตอนผสมผงเพื่อให้ผงยึดเกาะกันออก ป้องกันมิให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน เพราะปริมาณคาร์บอนจะมีผลต่อสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนิติคจะขึ้นกับบรรยากาศที่ใช้ในการเผาผนึกด้วย โดยในทางการค้ามักใช้บรรยากาศ dissociated ammonia (75% ไฮโดรเจน, 25% ไนโตรเจน) เนื่องจากการที่มีไนโตรเจนเข้าไปในส่วนผสมทางเคมีประมาณ 0.3% จะส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวลดลง

ถึงแม้ว่าในงานวิจัยมีข้อมูลในการทำการเผาผนึกในบรรยากาศไฮโดรเจนอยู่มากแต่ในทางการค้าแล้วการใช้บรรยากาศไฮโดรเจนมีน้อยเนื่องจากมีต้นทุนที่สูง อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับบรรยากาศในการเผาผนึกคือใช้บรรยากาศสุญญากาศ หากใช้ก๊าซที่เป็น backfill เป็นก๊าซอาร์กอน จะได้สมบัติคล้ายกับการเผาผนึกในบรรยากาศไฮโดรเจน แต่ถ้าใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซ backfill สมบัติที่ได้จะเทียบเท่าได้กับการเผาผนึกในบรรยากาศ dissociated ammonia[13]

## 2.9 ปรีทัศน์วรรณกรรม

จากงานวิจัยของ N. Kurgan, R. Varol[14] ในปี 2010 ทำการศึกษาการเผาผนึกในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่อุณหภูมิ 1200, 1250, 1300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนพบว่าที่ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 86-88% ( $6.9 \text{ mg/m}^2$ ) โดยชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ทดสอบแรงดึง ทดสอบความล้า และทดสอบความแข็งพบว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียสจะมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 1200 และ 1250 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน โดยให้เหตุผลว่าเนื่องจากการเผาผนึกที่ระยะเวลาหรืออุณหภูมิไม่เพียงพอจะส่งผลให้พันธะที่เชื่อมกันของอนุภาคไม่แข็งแรง ความหนาแน่นน้อย รูพรุนที่ค้างอยู่ในชิ้นงานมีลักษณะไม่สมมาตร ไม่กลม ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

ในปี 2008 งานวิจัยของ H. Buscail et al.[15] ได้ทำการศึกษาบทบาทของโมลิบดีนัมต่อการเกิดออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดออกไซด์ขึ้นที่ผิวและมีลักษณะติดแน่นไม่หลุดร่วง หลังจากนำไปวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer พบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นคือ  $\text{Mn}_{1.5}\text{Cr}_{1.5}\text{O}_4$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสและการหลุดร่วงของออกไซด์ระหว่างการเย็นตัวมาที่อุณหภูมิห้องและไม่พบเหล็กอยู่ในออกไซด์ที่เกิดบนเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 แล้ว เกรด 316L ที่มีการเติมโมลิบดีนัม 2% จะมีพฤติกรรมการเกิดออกไซด์ชั้นที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาทางด้านจุลศาสตร์และลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยโมลิบดีนัมจะมีบทบาทต่อการปกป้องคล้ายกับซิลิกอน หากมีธาตุที่มีบทบาทในการปกป้องผสมอยู่มากจะช่วยขัดขวางไม่ให้เหล็กแพร่สู่ด้านนอกและทำให้ลดอัตราการโตของสเกลและการเกาะยึดของสเกลดีขึ้น ออกไซด์สเกลจะเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  และมี  $\text{Mn}_{1.5}\text{Cr}_{1.5}\text{O}_4$

เล็กน้อยอยู่ที่ผิวด้านนอก โมลิบดีนัมจะปรากฏอยู่ลึกลงไป 10 ไมครอนโดยจะอยู่ตามขอบเกรน โดยอาจอยู่ในรูป  $\text{NiMoO}_4$  เหมือนที่พบที่ 900 องศาเซลเซียส

ปี 2003 D.N. Wasnik et al.[16] ได้ทำการศึกษาถึงลำดับการตกตะกอนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L โดยนำเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ไปเผาที่ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 และ 1440 นาที แล้ววิเคราะห์โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ 4-Probe Resistivity Measurement พบว่าการตกตะกอนจะแบ่งเป็น 4 ชั้น โดยชั้นที่ 1 จะตกตะกอนออกมาแบบสอดคล้อง (Coherent) ตามธรรมชาติ ชั้นที่ 2 เฟสที่ตกตะกอนในชั้นที่ 1 มีการขยายตัวและจะเริ่มมีการตกตะกอนที่บริเวณขอบเกรน ชั้นที่ 3 เฟสซิกมาจะตกตะกอนออกมา และในชั้น 4 จะเป็นการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในรูปของ  $\text{M}_{23}\text{C}_6$

ในปี 2002 A. Bautista et al.[17] ได้ทำการศึกษาการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสในโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L เฟอร์ริติกเกรด 434L และดูเฟสที่ 3 ส่วนผสมแตกต่างกันพบว่าลักษณะรูพรุนจะมีผลมากต่อพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกจะต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณโครเมียมเท่ากัน โดยการที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีพฤติกรรมที่อุณหภูมิสูงที่ไม่ดีเนื่องจากเกิดนิเกิลออกไซด์ซึ่งการยึดเกาะของออกไซด์ไม่ดี ทำให้เกิดการหลุดร่วงและไม่ใช่ออกไซด์ที่ช่วยป้องกันวัสดุจากการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งทำให้ต้านทานการเกิดออกซิเดชันของวัสดุนั้นอ่อนแอมากขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบ

- 3.1.1 ผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L
- 3.1.2 ผงโลหะโครเมียม
- 3.1.3 ผงโลหะนิกเกิล

#### 3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องตัดชิ้นงานโลหะ Discotom
- 3.2.2 อุปกรณ์ทำตัวเรือนชนิดเย็น
- 3.3.3 กระจกทราย
- 3.2.4 ผ้าสักหลาด
- 3.2.5 ผงอะลูมินา
- 3.2.6 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
- 3.2.7 เครื่องอัดชิ้นงาน hydraulic press
- 3.2.8 เตาเผาผนึกบรรยากาศไฮโดรเจน
- 3.2.9 เตาเผาชิ้นงาน
- 3.2.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก

#### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.3.1 เครื่องวัดขนาดผง (Laser Particle Size Analyser)
- 3.3.2 อุปกรณ์สำหรับชั่งน้ำหนักโดยการแทนที่น้ำ (Water Displacement)
- 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
- 3.3.4 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- 3.3.5 เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell

## 3.3.6 X-Ray Diffractometer (XRD)

## 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

## 3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

3.4.1.1 นำผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ผงโครเมียม และผงนิกเกิล มาชั่งและผสมตามสัดส่วน เป็นร้อยละโดยน้ำหนักดังตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชิ้นน้ำหนักรวม 10 กรัม ทำเงื่อนไขละ 11 ชิ้น

Condition	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L	โครเมียม	นิกเกิล
P	100	-	-
1Cr	99	1	-
2Cr	98	2	-
3Cr	97	3	-
4Cr	96	4	-
5Cr	95	5	-
1Ni	99	-	1
2Ni	98	-	2
3Ni	97	-	3
4Ni	96	-	4
5Ni	95	-	5
1Cr1Ni	98	1	1
2Cr2Ni	96	2	2
3Cr3Ni	94	3	3
4Cr4Ni	92	4	4
5Cr5Ni	90	5	5

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสัดส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด316L

ผงโครเมียม และผงนิกเกิล ที่ส่วนผสมต่างๆ



3.4.1.2 นำผงโลหะที่ได้หลังจากการผสมแล้วไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง hydraulic press โดยใช้แรงที่ 15 tonf. ระยะเวลาในการอัด 30 วินาที จะได้ชิ้นงานขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตรและหนา 0.3 เซนติเมตร

3.4.1.3 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูปจะถูกนำไปผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที

### 3.4.2 การทดสอบการเกิดออกซิเดชัน

3.4.2.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 – 100 ชั่วโมง โดยจะทำการชั่งน้ำหนักภายในเตาในแต่ละเวลา

### 3.4.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.3.1 นำชิ้นงานมาตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ Discotom ให้เป็นชิ้นเล็กขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร และหนา 0.3 เซนติเมตร

3.4.3.2 ขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น โดยใช้เรซินหล่อใสผสมกับสารที่ทำให้แข็ง จากนั้นเทเรซินลงในแม่พิมพ์ที่มีชิ้นงานวางเรียงไว้แล้ว ทิ้งจนแข็งตัวแล้วจึงนำออกจากแม่พิมพ์

3.4.3.3 ใช้กระบวนการทาง metallography โดยการขัดชิ้นงานหยาบด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ตั้งแต่ความละเอียดเบอร์ 80-1200

3.4.3.4 หลังจากขัดหยาบแล้ว ตามด้วยการขัดละเอียดโดยใช้ผงอะลูมินา ขัดจนได้ผิวเรียบเป็นมันไม่มีรอยเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เพื่อเป็นการเตรียมชิ้นงานในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.4.3.5 นำไปกัดกรด (Etching) บนผิวที่ขัดแล้ว โดยใช้สารละลาย Marble เป็นสารละลายที่กัดกรด (Etchant) จะช่วยให้เห็นโครงสร้างผลึกที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

3.4.3.6 ใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พร้อมเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี EDS (Energy Disperse Spectroscopy) ในการศึกษาโครงสร้าง

จุลภาคและตรวจสอบฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่สนใจด้วย X-Ray Diffractometer (XRD)

#### 3.4.4 ทดสอบสมบัติทางกล

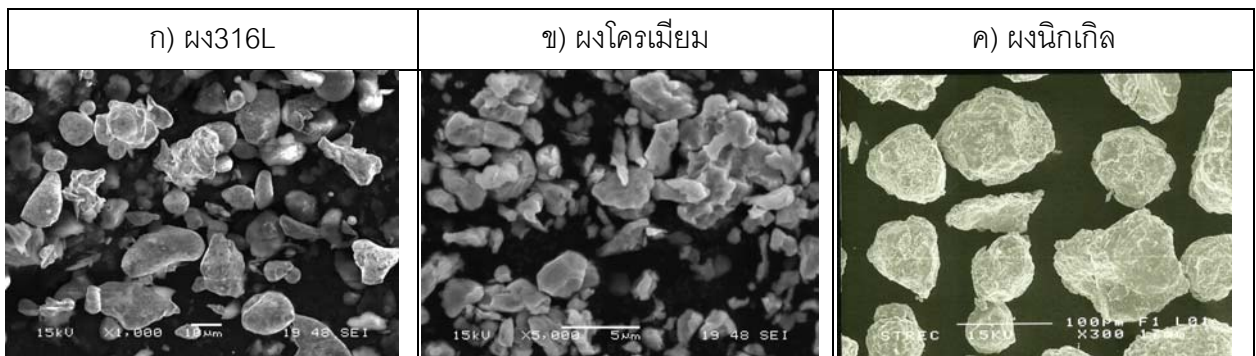
3.4.4.1 นำชิ้นงานไปวัดความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกล B

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของผงโลหะ

ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ผงโครเมียม และผงนิกเกิล ถูกนำไปถ่ายภาพเพื่อดูลักษณะของผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และนำไปหาขนาดของผงด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis



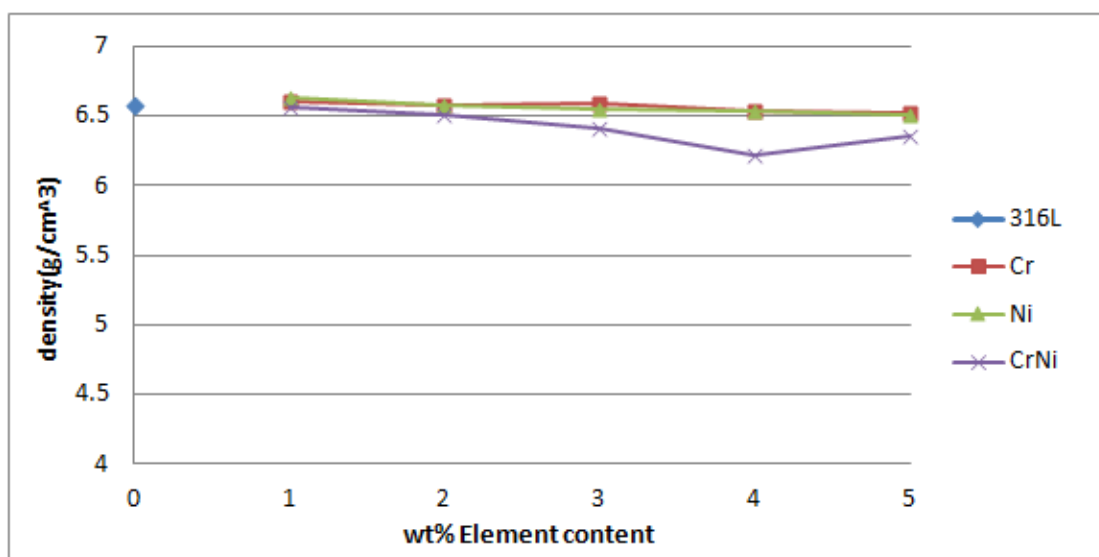
ภาพที่ 4.1 รูปจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ก) ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ข) ผงโครเมียม ค) ผงนิกเกิล

พบว่า ผงโครเมียมมีขนาดเล็กที่สุด ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L และผงนิกเกิลมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ ลักษณะของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L แสดงในภาพที่ 4.1ก ผงจะมีลักษณะเป็นแบบรูปร่างผิดปกติ (Irregular Shape) ไม่สมมาตร ขนาดของผงไม่สม่ำเสมอ ช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างกว้าง 19 – 154 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 68.44 ไมโครเมตร ภาพที่ 4.1ข แสดงลักษณะของผงโครเมียม พบว่าผงโครเมียมมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L และผงนิกเกิล มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 12 – 50 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ย 28.35 ไมโครเมตร ลักษณะของผงเป็นแบบรูปร่างผิดปกติและไม่สมมาตร สำหรับผงนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.1ค มีลักษณะของผงเป็นแบบรูปร่างผิดปกติเช่นเดียวกับผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผงโครเมียม แต่ผงนิกเกิลจะค่อนข้าง

สมมาตรและความสม่ำเสมอของขนาดผงมากกว่า มีขนาดของผงที่ใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางของผง มีขนาด 70 – 181 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 119.45 ไมโครเมตร

#### 4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก

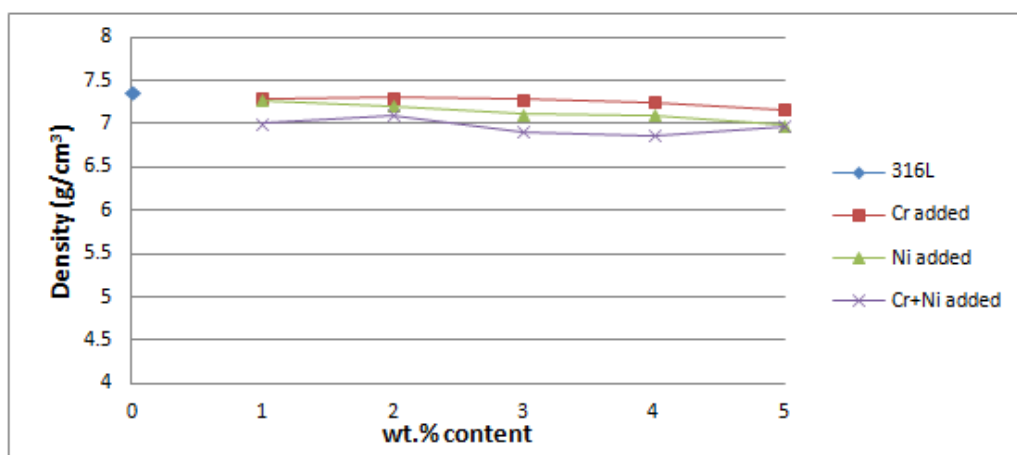
ภายหลังจากนำชิ้นงานไปผ่านการเผาผนึกเพื่อให้อนุภาคของผงเชื่อมติดกัน ส่งผลให้ปริมาณของช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง และชิ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหลังจากที่ผ่านการเผาผนึกเรียบร้อยแล้ว เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ส่วนผสมต่างๆ ภายหลังการเผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที มาคำนวณความหนาแน่นโดยวิธีการแทนที่น้ำ (Water Displacement Method) จะได้ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มดังภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ส่วนผสมต่างๆ

จากกราฟในภาพที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นรวมซึ่งเป็นความหนาแน่นที่พิจารณา รวมถึงรูพรุนทั้งหมดที่มีทั้งรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด พบว่าเมื่อมีการเติมผงธาตุโครเมียมและผงธาตุนิกเกิลในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L จะทำให้ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติมธาตุเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันจะมีความหนาแน่นต่ำ

กว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติมธาตุเล็กน้อย โดยชิ้นงาน 316L ที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียมจะทำให้ความหนาแน่นรวมที่ได้สูงที่สุด รองลงมาเป็นชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันตามลำดับ โดยเมื่อยิ่งเติมธาตุมากขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นรวมลดลงแต่โดยทั่วไปยังคงมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันหรือมีแนวโน้มให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติมธาตุ ยกเว้นชิ้นงานที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน โดยเฉพาะที่ 4% – 5% โดยน้ำหนักที่จะให้ความหนาแน่นต่ำกว่า เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของผงและการกระจายตัวของขนาดของผง ซึ่งการที่มีขนาดผงที่แตกต่างกันจะทำให้ผงของโลหะที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกตัวระหว่างช่องว่างของผงที่มีขนาดใหญ่ได้ เป็นการลดปริมาตรช่องว่างที่เกิดขึ้น [19]

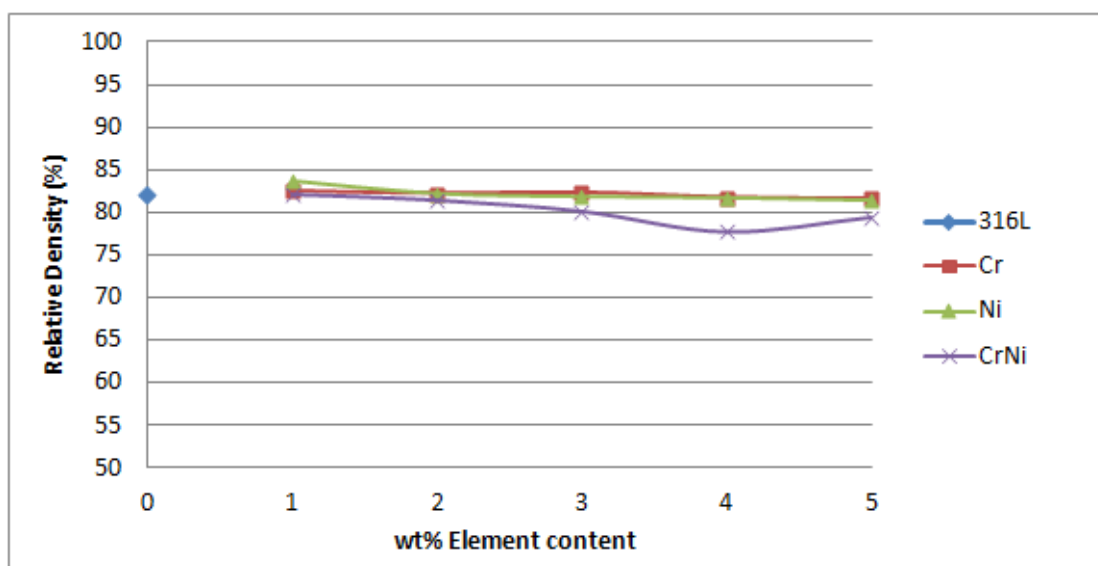


ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ส่วนผสมต่างๆ

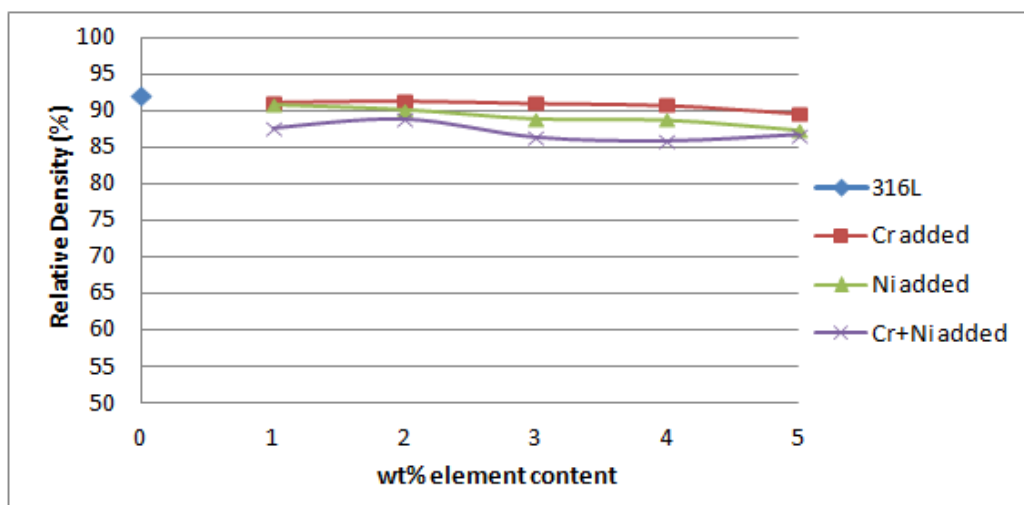
สำหรับกราฟในภาพที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นปรากฏซึ่งเป็นความหนาแน่นที่พิจารณาเฉพาะรูพรุนปิด พบว่าชิ้นงาน 316L ที่ไม่ได้ผ่านการเติมธาตุจะมีความหนาแน่นสูงที่สุด ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมธาตุเพิ่มเข้าไปจะมีความหนาแน่นปรากฏใกล้เคียงหรือลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติมธาตุ เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการเติมธาตุจะเห็นว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะให้ความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุด รองลงมาเป็นชิ้นงานที่เติมนิกเกิล และเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันตามลำดับ โดยยิ่งปริมาณการเติมมากขึ้นยิ่งทำให้ความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานลดลงเช่นเดียวกับลักษณะแนวโน้มที่เกิดในความหนาแน่นรวมในภาพที่ 4.2 แต่โดยทั่วไปแล้วค่าความหนาแน่นปรากฏของแต่ละชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณา

เปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นรวมและค่าความหนาแน่นปรากฏ จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานจะให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงว่าปริมาณรูพรุนเปิดที่มีในชิ้นงานมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยถ้ายิ่งปริมาณรูพรุนเปิดมากค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าความหนาแน่นรวมก็ยิ่งต่างกันมาก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมกับความหนาแน่นปรากฏกับความหนาแน่นตามทฤษฎี เป็นค่าความหนาแน่นของชิ้นงานรูปทรงตันของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $8 \text{ g/cm}^3$  จะได้ว่าความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นปรากฏมีค่าอยู่ในช่วง 79% – 83% และ 86% – 92% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 ตามลำดับ จากงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ประมาณ 83% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี [17, 18] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างๆ เทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างๆ เทียบกับ ความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

จากผลการทดลองนี้อาจบอกได้ว่าการเติมธาตุ Cr และ Ni มีส่วนช่วยในการลดปริมาณ รูพรุนเปิดของชิ้นงาน แต่การเติมธาตุ Cr และ Ni กลับส่งผลต่อรูพรุนปิดที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยจะทำให้ปริมาณรูพรุนมีมากขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น จากการทดลองหากเปรียบเทียบระหว่าง โครเมียมและนิกเกิล โครเมียมจะส่งผลดีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานมากกว่านิกเกิล สำหรับ นิกเกิลจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้มีการทำการทดลองผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นและรูพรุนโดยให้ผลมีแนวโน้มแบบเดียวกันคือเมื่อนิกเกิลเพิ่มขึ้นปริมาณรูพรุนในชิ้นงานจะมากขึ้น [17]

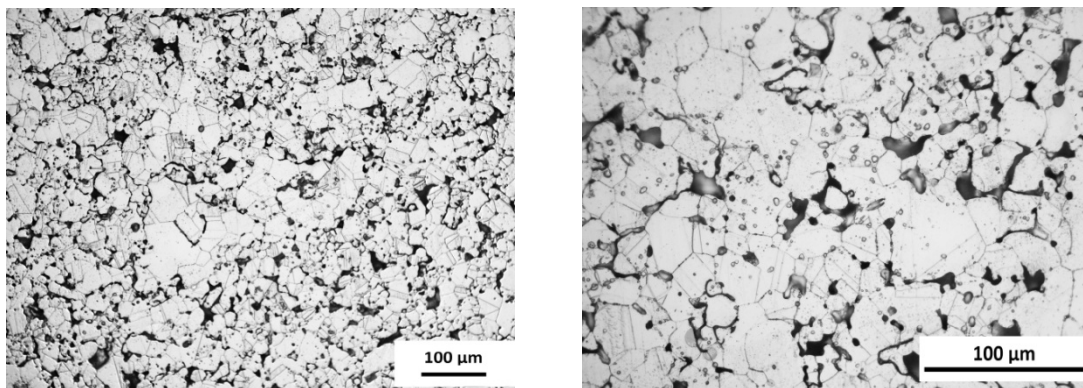
#### 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

##### 4.3.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แสง

###### 4.3.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเผาผืนิก

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ภายหลังจากผ่านการเผาผืนิกที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที จะมีโครงสร้างจุลภาคลักษณะดังภาพที่ 4.6 มีรูพรุนขนาดเล็กและกระจัดกระจายทั่วไป ภายในชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ และมีการตกตะกอนของเฟสสีขาวที่มีลักษณะเล็กละเอียดขึ้น เล็กน้อยภายในเกรน และเนื่องจากการอัดขึ้นรูป ซึ่งเหมือนชิ้นงานผ่านการขึ้นรูปเย็นมา ทำให้เกิด

ความเค้นตกค้างขึ้นภายในเกรนเมื่อผ่านการเผาผนึกซึ่งเป็นการให้ความร้อนเสมือนการอบคืนตัว ทำให้ภายในเกรนปรากฏแถบแอนนีลิ่งทวิน (Annealing twins) ขึ้นภายในหลังจากเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization)

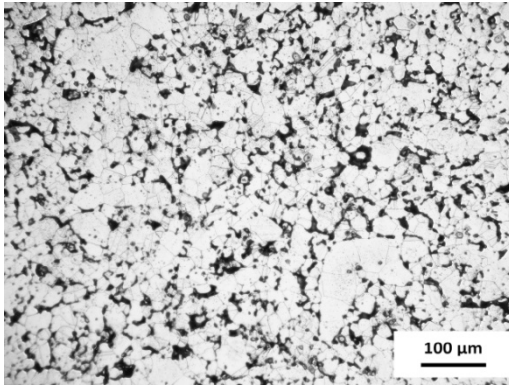


ภาพที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังจากการเผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่าและ 500 เท่า

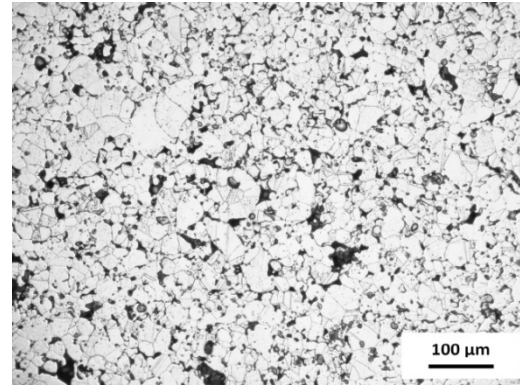
ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน เมื่อผ่านการเผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที นำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM) จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในภาพที่ 4.7 – 4.12 และ ตารางที่ 4.1

โครงสร้างจุลภาคในภาพที่ 4.7 – 4.8 เป็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก พบว่ามีรูพรุนเกิดอยู่ภายในที่ปริมาณโครเมียมต่ำที่ 1% – 2% โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กและกระจายทั่วไปในชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ไม่ผ่านการเติมธาตุ โดยที่เมื่อปริมาณการเติมโครเมียมเพิ่มขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก สังเกตได้จากชิ้นงานที่เติมโครเมียมเพียง 1% โดยน้ำหนักจะพบเพียงแต่รูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงานแต่เมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นจะเริ่มพบรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นและความสม่ำเสมอของขนาดของรูพรุนลดลง โดยชิ้นงานที่เติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนัก จะพบว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เกิดขึ้นทั่วไปในชิ้นงานและยังพบเฟสสีขาวขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นภายในเกรนของเนื้อพื้นเล็กน้อยและพบแอนนีลิ่งทวินเนื่องจากการขึ้นรูปเย็นด้วยเช่นกัน

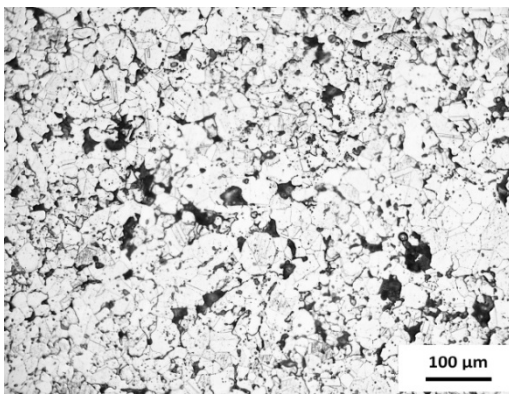




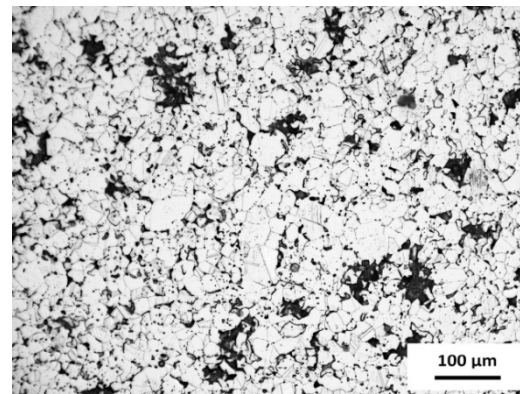
ก) 1Cr



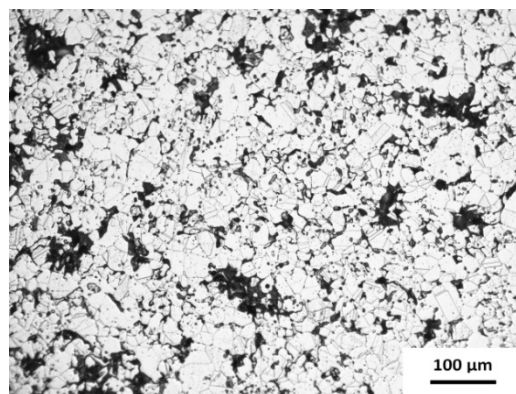
ข) 2Cr



ค) 3Cr

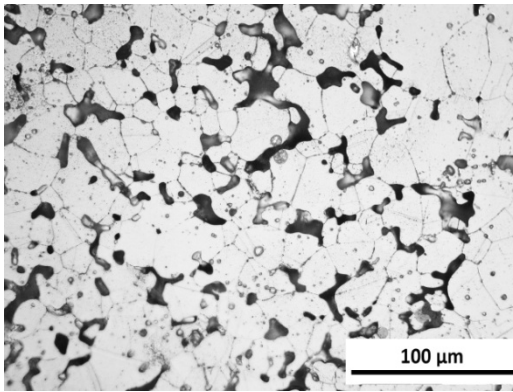


ง) 4Cr

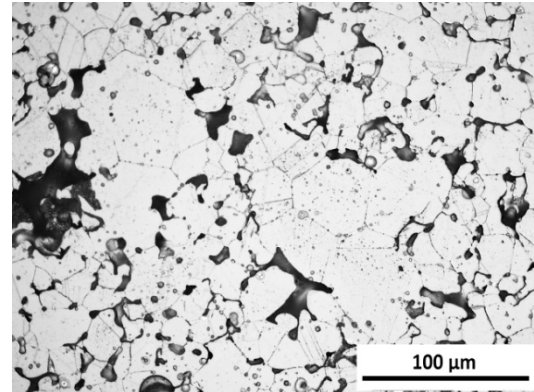


จ) 5Cr

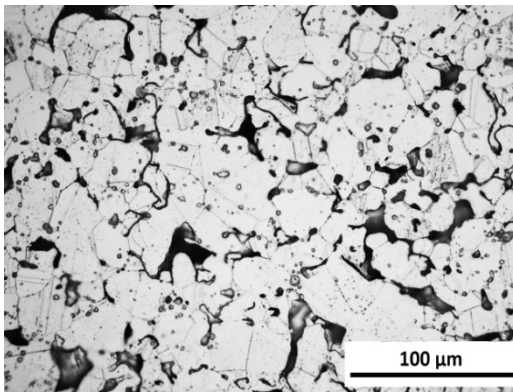
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและผ่านการเผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า



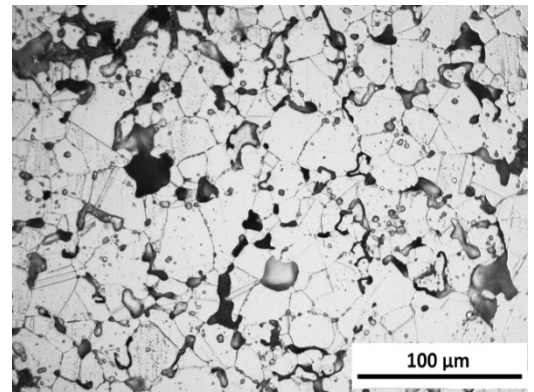
ก) 1Cr



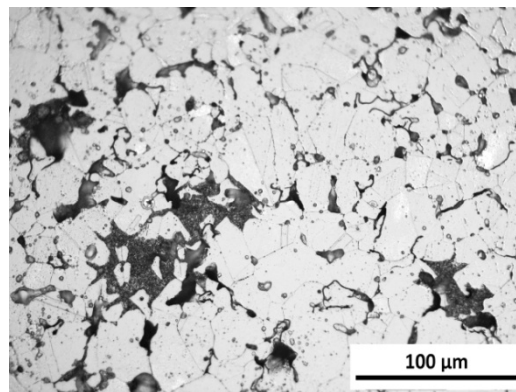
ข) 2Cr



ค) 3Cr



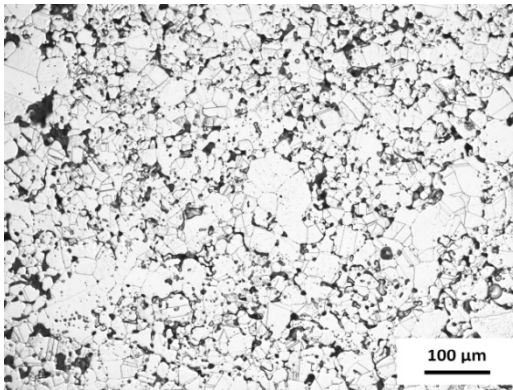
ง) 4Cr



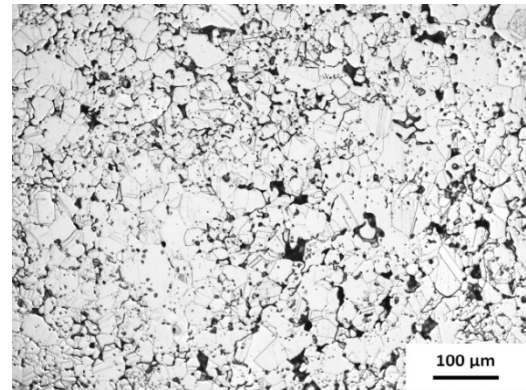
จ) 5Cr

ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า

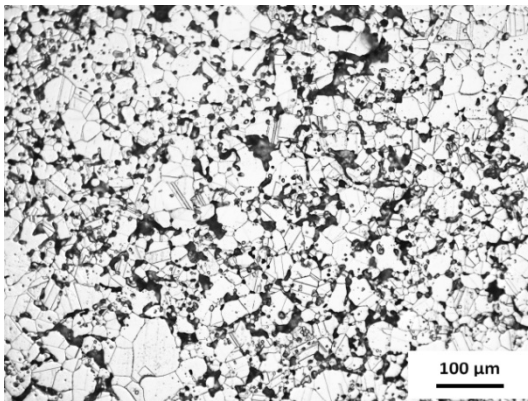
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.9 – 4.10 พบว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียม และความสม่ำเสมอของขนาดของรูพรุนต่ำ ยิ่งปริมาณการเติมนิกเกิลเพิ่มขึ้นรูพรุนจะยิ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและความไม่สม่ำเสมอของขนาดของรูพรุนยิ่งมีมากขึ้น อีกทั้งความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของรูพรุนลดลงเมื่อปริมาณการเติมนิกเกิลเพิ่มขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก โดยเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ 1% โดยน้ำหนัก จะพบรูพรุนขนาดใหญ่บ้างแต่พื้นที่โดยส่วนใหญ่จะพบรูพรุนมีขนาดเล็กและการกระจายตัวของรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 5% โดยน้ำหนักจะเห็นได้ว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ก็จะใหญ่ขึ้นมากตามปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นและมักพบว่าบริเวณที่ใกล้เคียงรูพรุนขนาดใหญ่จะมีบริเวณที่เนื้อแน่นไม่ค่อยมีรูพรุนเล็กๆรอบดั่งนั้นจึงเห็นได้ว่าการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานจะสม่ำเสมอกว่าชิ้นงานที่ปริมาณการเติมนิกเกิลต่ำกว่า นอกจากนั้นภายในเกรนของเนื้อพื้นก็พบว่ามีเฟสสีขาวขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นและพบแอนนิลลิงทวินเช่นเดียวกัน



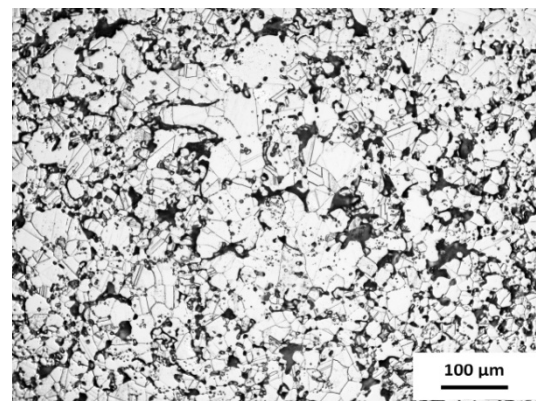
ก) 1Ni



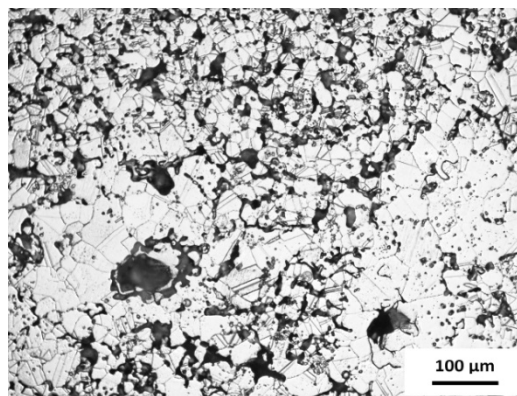
ข) 2Ni



ค) 3Ni

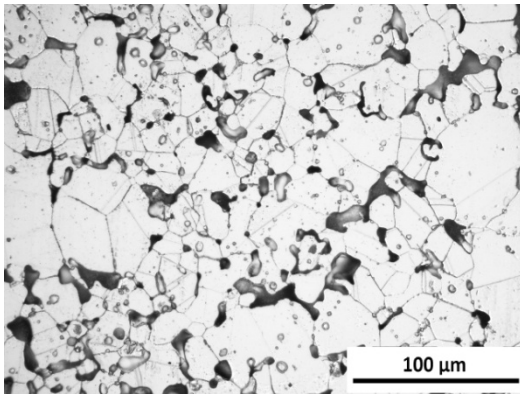


ง) 4Ni

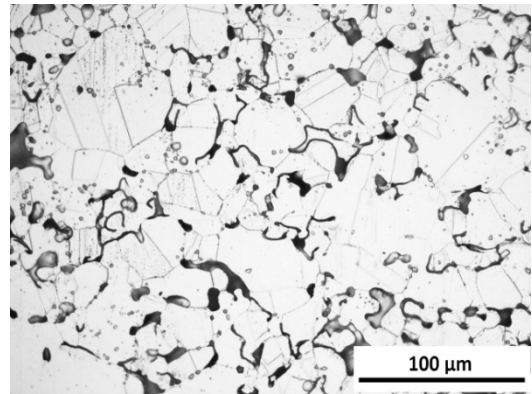


จ) 5Ni

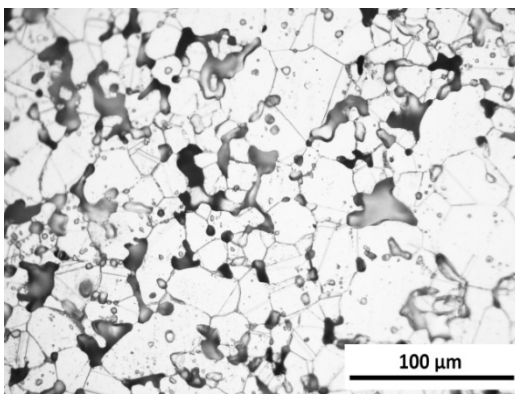
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิดและผ่านการเผาผืนที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า



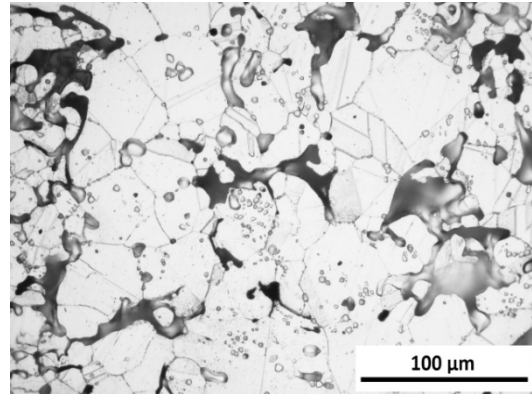
ก) 1Ni



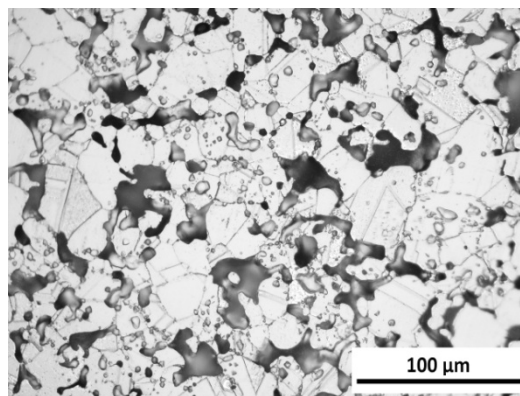
ข) 2Ni



ค) 3Ni



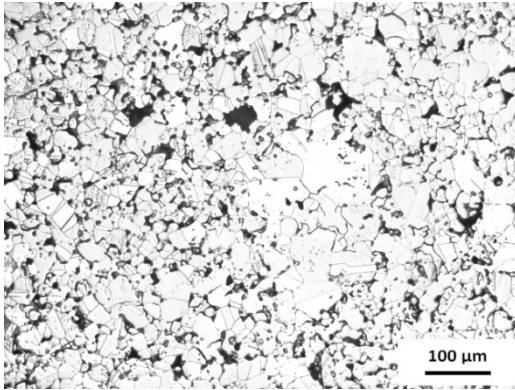
ง) 4Ni



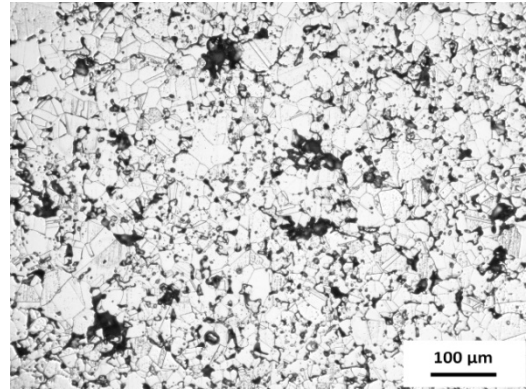
จ) 5Ni

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิดและผ่านการเผาขึ้นที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า

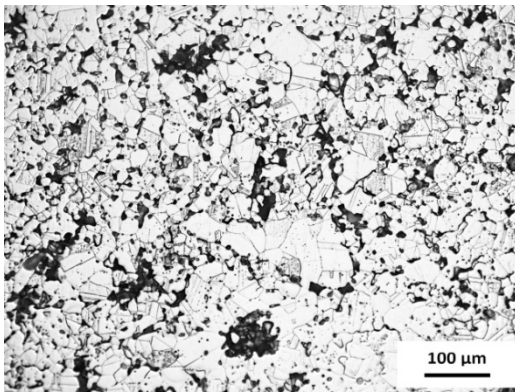
ภาพที่ 4.11 - 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผืนึก พบว่า ชิ้นงานปรากฏรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นแม้จะเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันเพียง 1% โดยน้ำหนักแต่ยังมีขนาดไม่ใหญ่มากและปริมาณน้อย ความสม่ำเสมอของขนาดและการกระจายตัวยังคงค่อนข้างสูง แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่มากขึ้นจะพบว่าปริมาณรูพรุนที่มีขนาดใหญ่นั้นจะใหญ่ขึ้นและมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสม่ำเสมอของขนาดของรูพรุนลดลงอีกทั้งการกระจายตัวของรูพรุนจะมีความสม่ำเสมอต่ำ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมโครเมียมและชิ้นงานที่เติมนิกเกิลจะเห็นว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียมหรือนิกเกิลหรือโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1% - 2% โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเติมโครเมียม หรือนิกเกิลหรือโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 3% - 5% โดยน้ำหนัก จะเห็นความแตกต่างค่อนข้างชัดเจนในแต่ละกลุ่มชิ้นงาน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกันที่ปริมาณการเติมที่ 5% โดยน้ำหนัก ในชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะให้รูพรุนที่เล็กกว่า ชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ขนาดจะมีความสม่ำเสมอมากกว่าและไม่ปรากฏให้เห็นรูพรุนขนาดใหญ่ที่แตกต่างจากรูพรุนอื่น แต่ในชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันจะปรากฏรูพรุนขนาดใหญ่ที่มีขนาดแตกต่างจากรูพรุนขนาดเล็กอย่างเห็นได้ชัด ความสม่ำเสมอของขนาดต่ำ โดยชิ้นงานที่เติมนิกเกิลจะพบรูพรุนขนาดใหญ่น้อยกว่ากรณีชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ซึ่งผลที่ได้นี้ก็สอดคล้องกับผลจากการวัดความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.2 ที่พบว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะให้ค่าความหนาแน่นสูงที่สุด รองมาก็เป็นชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันตามลำดับ และที่ปริมาณการเติมเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะลดลงซึ่งโครงสร้างจุลภาคที่ได้ก็สนับสนุนผลการทดลองในทิศทางเดียวกันคือพบปริมาณและขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมโลหะต่างๆเพิ่มขึ้นด้วย และในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันก็พบเฟสสีขาวและแอนนิลลิงทวินเช่นเดียวกัน



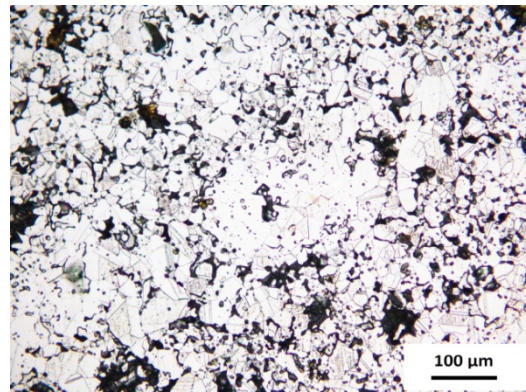
ก) 1Cr1Ni



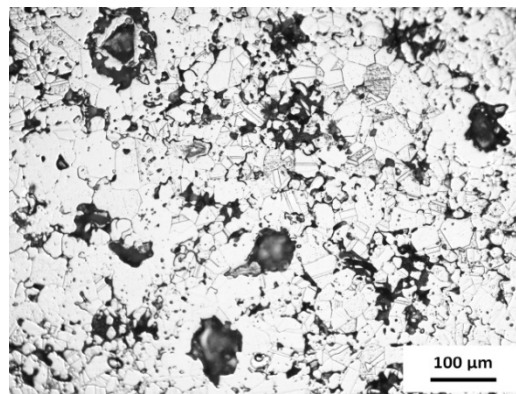
ข) 2Cr2Ni



ค) 3Cr3Ni

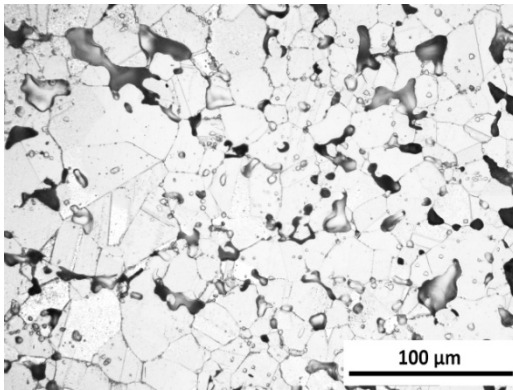


ง) 4Cr4Ni

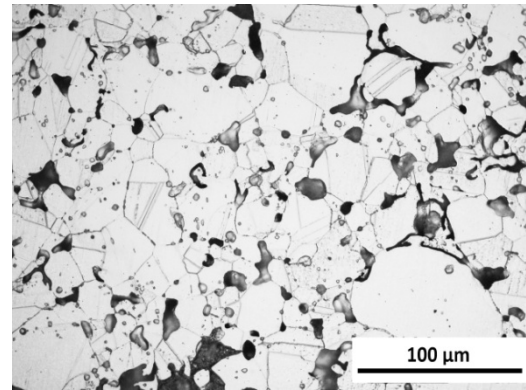


จ) 5Cr5Ni

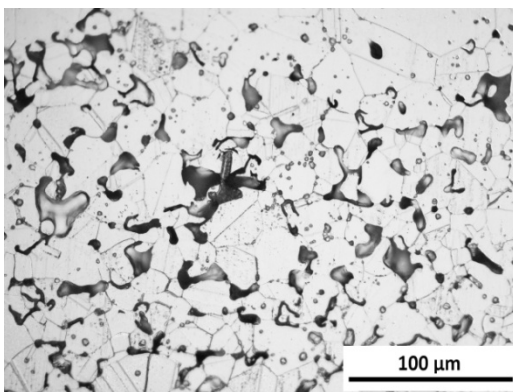
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันและผ่านการเผาขึ้นที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า



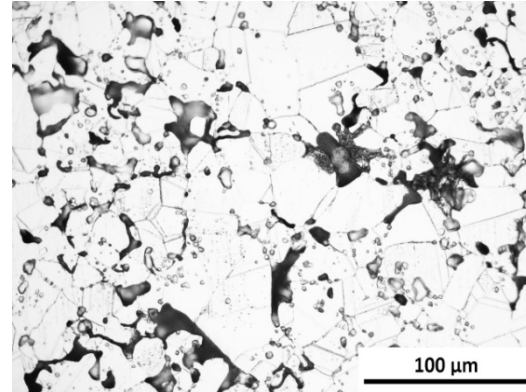
ก) 1Cr1Ni



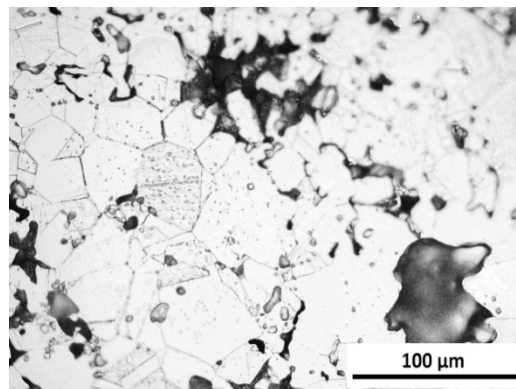
ข) 2Cr2Ni



ค) 3Cr3Ni



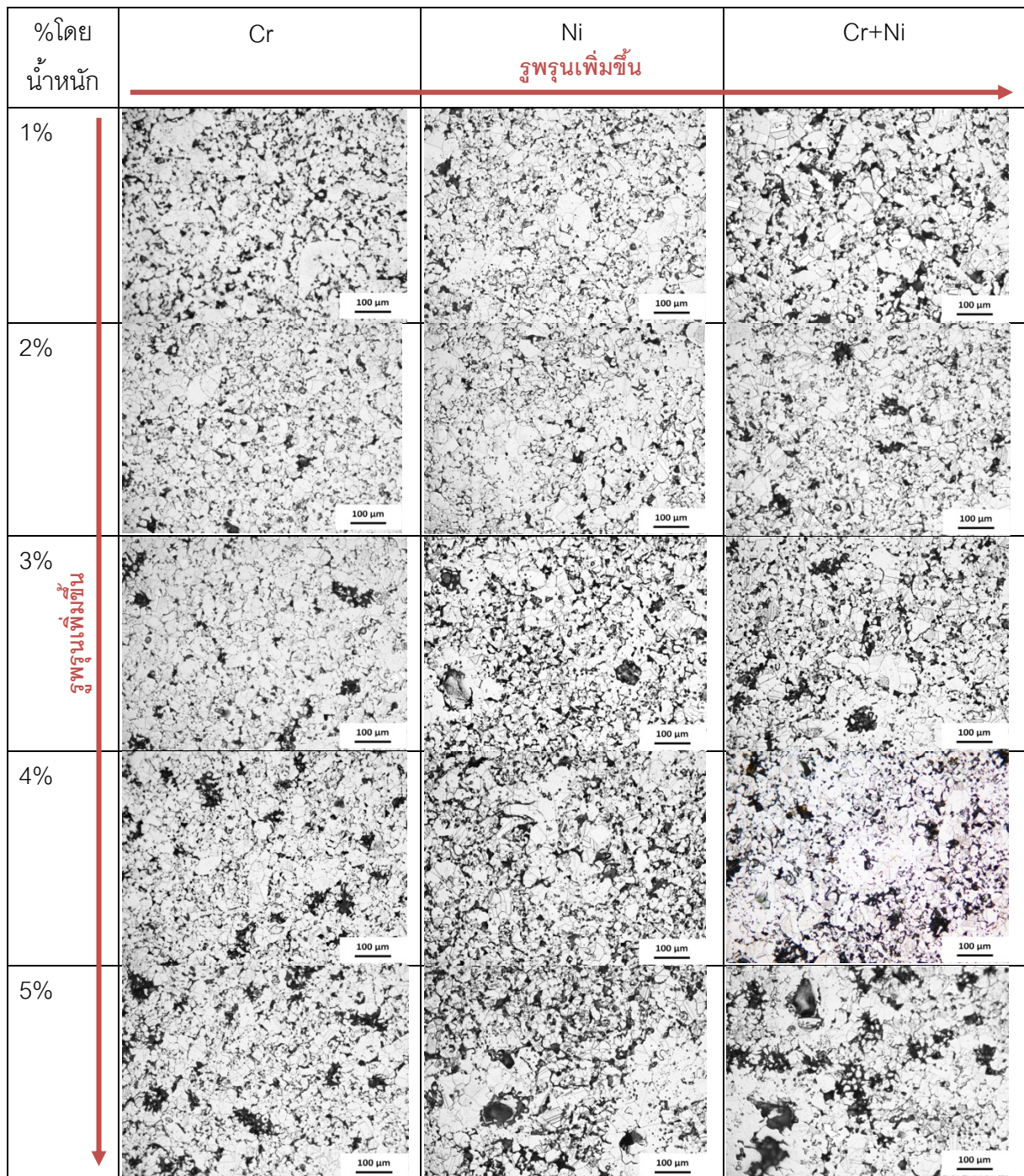
ง) 4Cr4Ni



จ) 5Cr5Ni

ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันและผ่านการเผาผืนิกที่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า

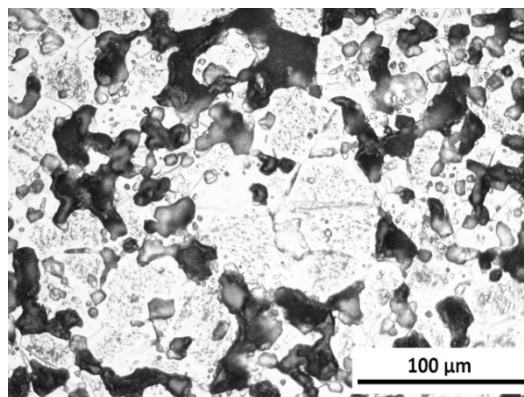
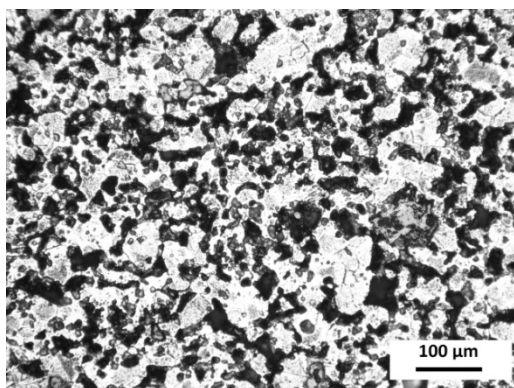




ตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 45 นาที  
ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน

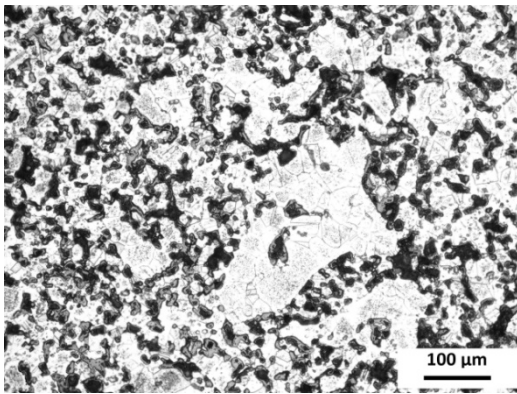
#### 4.3.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการทดสอบออกซิเดชัน

หลังจากทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่บรรยากาศปกติ เมื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่ามีออกไซด์เกิดขึ้นภายในรูพรุน ซึ่งขนาดของออกไซด์จะมีขนาดเล็กกระจายทั่วโครงสร้างของชิ้นงานเนื่องจากขนาดของรูพรุนที่มีมาก่อนตั้งแต่การเผาผนึกที่มีขนาดเล็กและกระจายทั่วชิ้นงานอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ยังคงพบรูพรุนอยู่ในชิ้นงานเพราะออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาไม่ได้เกิดและโตขึ้นจนเต็มปิดรูพรุนได้ทั้งหมด อีกทั้งยังพบเฟสที่มีสีขาวรูปทรงเหลี่ยมเกิดขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปภายในเกรนของเนื้อพื้น และยังคงพบแอนนิลลิงทวินซึ่งเกิดขึ้นมาตั้งแต่ขั้นตอนการเผาผนึกด้วยเช่นกัน

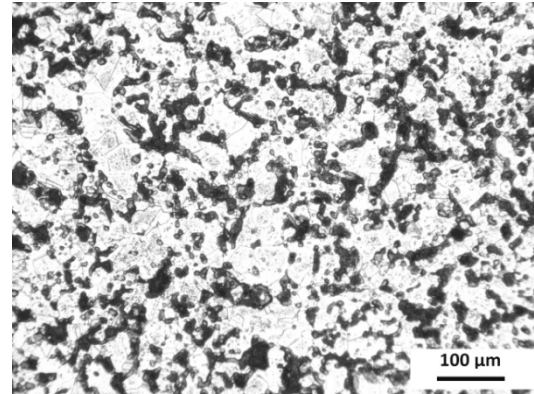


**ภาพที่ 4.13** แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ภายหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่าและ 500 เท่า

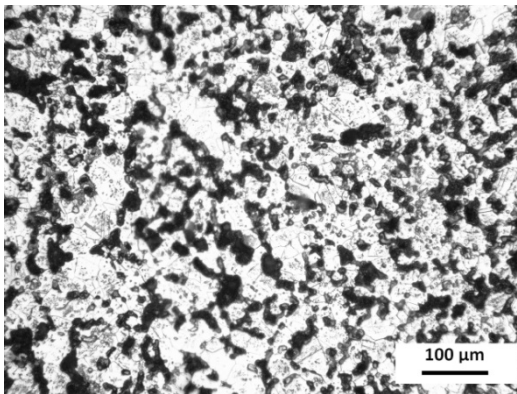
เมื่อนำชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ โครเมียม, นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ผ่านการเผาผนึกเรียบร้อยแล้วมาทำการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน โดยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดยแสดงในภาพที่ 4.14 – 4.19 และตารางที่ 4.2



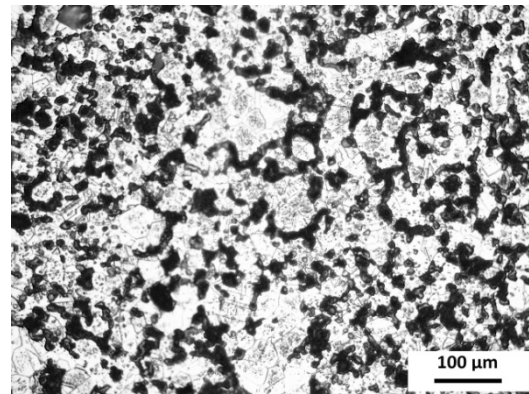
น) 1Cr



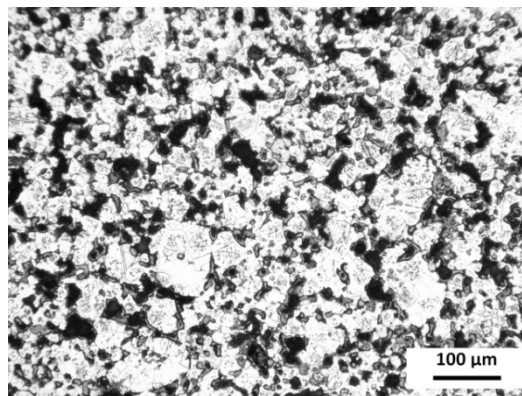
ข) 2Cr



ค) 3Cr

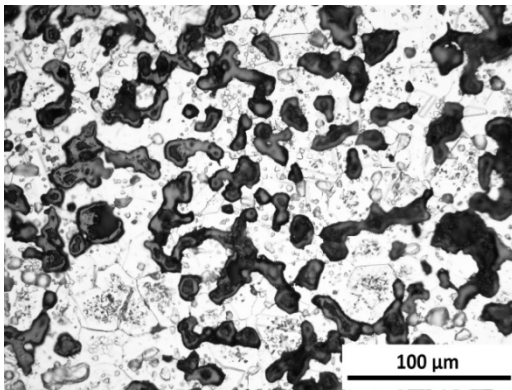


ง) 4Cr

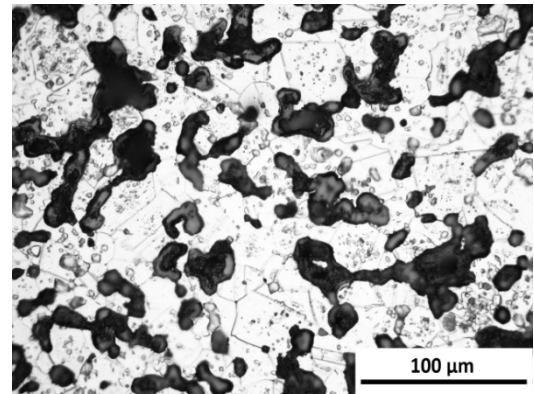


จ) 5Cr

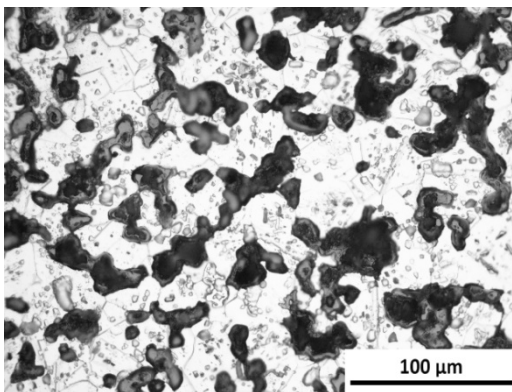
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า



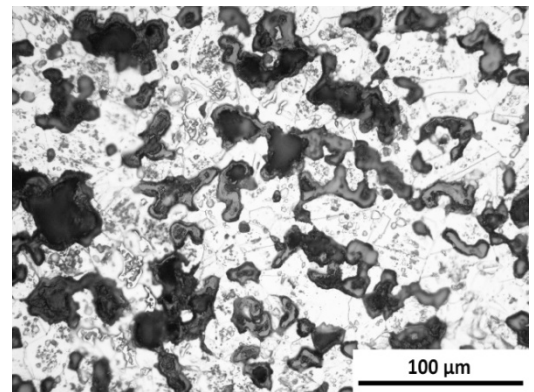
ก) 1Cr



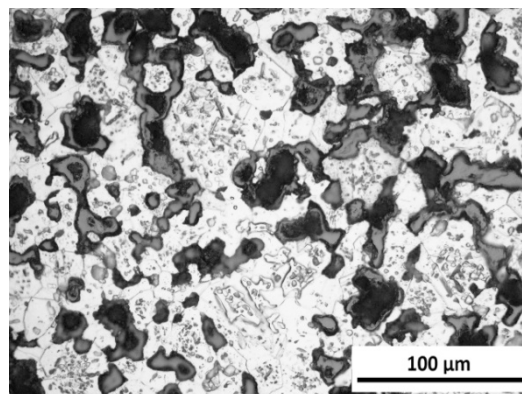
ข) 2Cr



ค) 3Cr



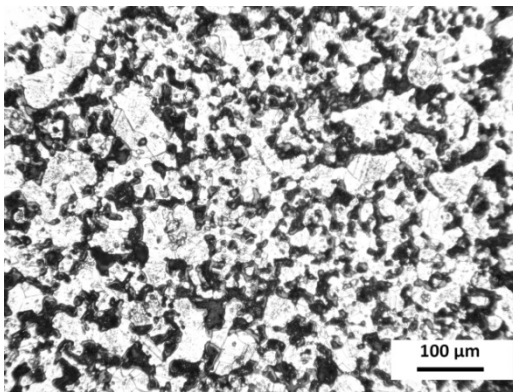
ง) 4Cr



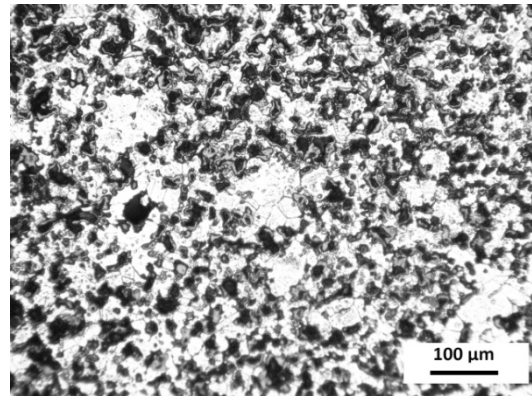
จ) 5Cr

ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า

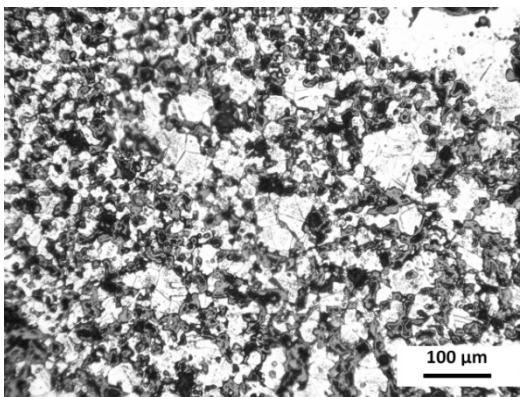
ในภาพที่ 4.14 และ 4.15 เป็นภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม 1% – 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ามีออกไซด์เกิดขึ้นในชิ้นงานโดยเกิดขึ้นในรูพรุนของชิ้นงาน แต่ยังคงมีรูพรุนหลงเหลืออยู่เนื่องจากการเกิดขึ้นของออกไซด์ไม่สามารถโตขึ้นจนเต็มเต็มรูพรุนได้ทั้งหมด แต่เนื่องจากชิ้นงานที่เติมโครเมียมมีรูพรุนค่อนข้างเล็กและมีการกระจายตัวของรูพรุนที่มีมาก่อนภายหลังจากการเผาผนึกค่อนข้างดี ทำให้ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในรูพรุนภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันมีการกระจายตัวที่ดีตามไปด้วย และเนื่องจากชิ้นงานที่เติมโครเมียมมีขนาดของรูพรุนภายหลังจากการเผาผนึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโครเมียมที่เติมเพิ่มขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% โดยน้ำหนักกับชิ้นงานที่ 5% โดยน้ำหนัก จึงทำให้พบปริมาณรูพรุนที่ยังคงเหลือหลังจากการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นความสม่ำเสมอของขนาดลดลงเช่นเดียวกับลักษณะของรูพรุนในชิ้นงานภายหลังจากการเผาผนึก อีกทั้งยังพบเฟสสีขาวลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นแท่งหรือรูปทรงผิวดัดปกรกติขนาดเล็กกระจายอยู่ในเฟสที่เป็นเนื้อพื้นซึ่งพบว่าเกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมทุกกรณี โดยพบมากขึ้นจากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก ส่วนแอนนิลลิ่งทวินที่เกิดขึ้นภายหลังจากการเผาผนึกก็ยังสามารถพบเห็นว่ามีในโครงสร้างจุลภาคอยู่เช่นเดิมภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชัน



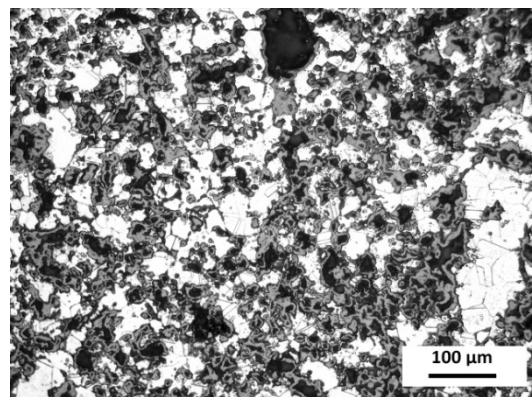
ก) 1Ni



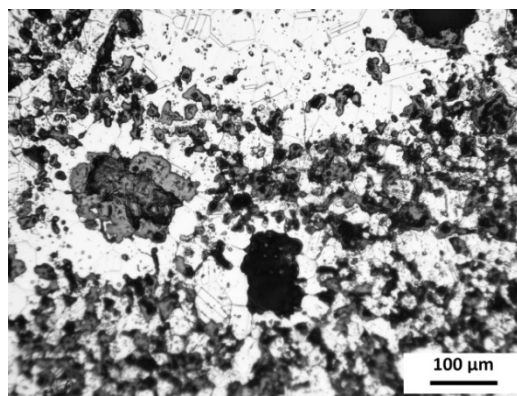
ข) 2Ni



ค) 3Ni

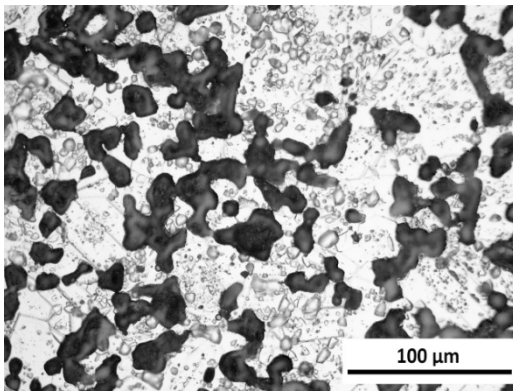


ง) 4Ni

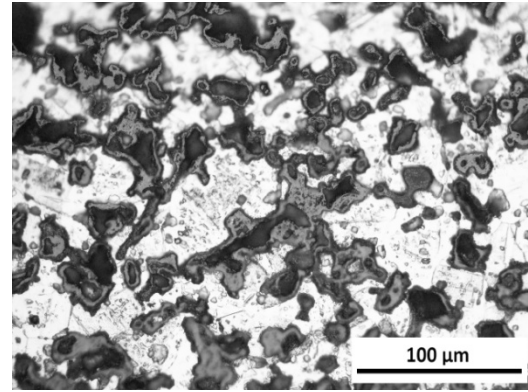


จ) 5Ni

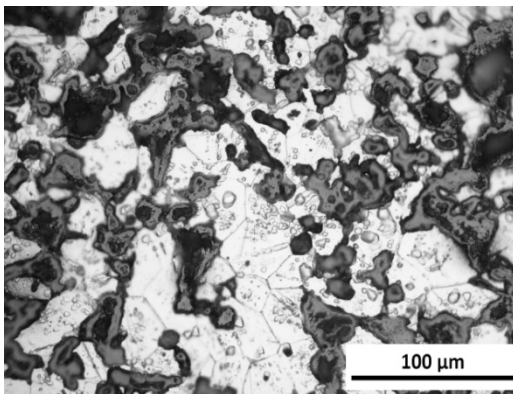
ภาพที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकิล และผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า



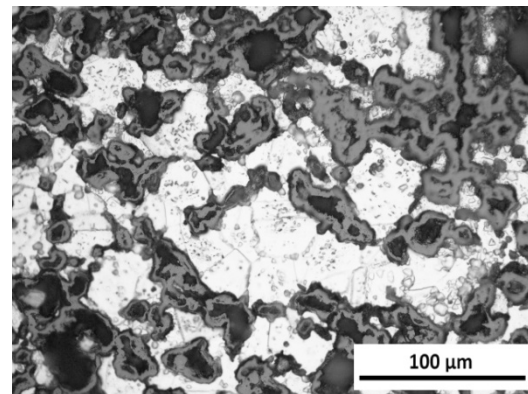
ก) 1Ni



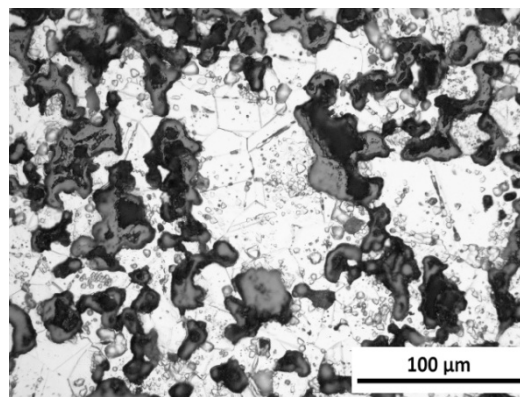
ข) 2Ni



ค) 3Ni



ง) 4Ni

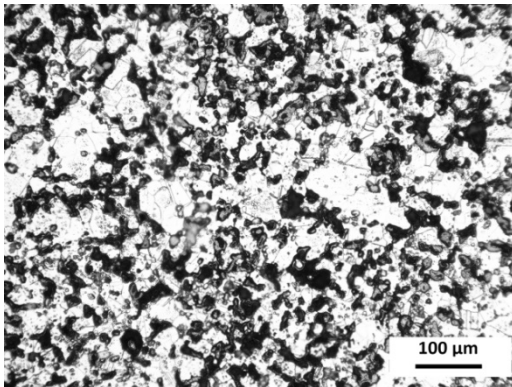


จ) 5Ni

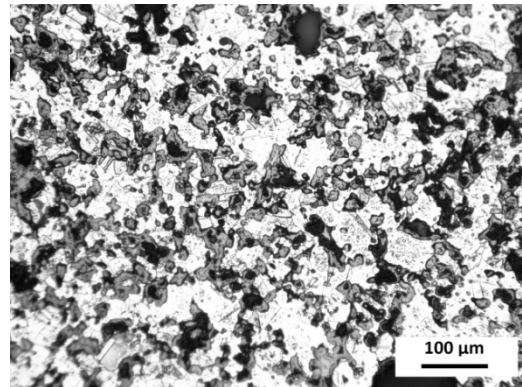
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เต็ม निकเกิดและผ่านการทดสอบออกซิเดชันจากที่แสดงในภาพที่ 4.16 – 4.17 พบว่าออกไซด์เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยเกิดภายในของรูพรุนเช่นเดียวกันและยังคงพบว่ามีรูพรุนที่หลงเหลืออยู่โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับรูพรุนที่มีในชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะของรูพรุนที่มีมาตั้งแต่ขั้นตอนการเผาผนึกของชิ้นงานที่เต็ม निकเกิดมีขนาดใหญ่และความสม่ำเสมอของขนาดของรูพรุนและการกระจายตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียม และออกไซด์ที่เกิดขึ้นในช่วงการทดสอบออกซิเดชันไม่ได้เกิดขึ้นจนสามารถเติมเต็มรูพรุนได้ทั้งหมด ขนาดของออกไซด์และขนาดของรูพรุนที่ยังคงเหลืออยู่ในชิ้นงานภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันจึงมีความสม่ำเสมอทั้งขนาดและการกระจายตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียม จากการเปรียบเทียบชิ้นงานที่เต็ม निकเกิด 1% – 5% โดยน้ำหนัก จากที่ชิ้นงานที่เต็ม निकเกิดเพิ่มขึ้นจะมีรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการเผาผนึก จึงส่งผลกับขนาดออกไซด์และขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังจากการทดสอบออกซิเดชันในแนวโน้มเดียวกัน นอกจากนี้ชิ้นงานที่เต็ม निकเกิดก็พบว่ามีเฟสสีขาวลักษณะเหลี่ยมหรือเป็นแท่งหรือรูปทรงผิดปกติขนาดเล็กเกิดขึ้นภายในเกรนของเนื้อพื้นเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกและแอนนีลลิ่งทวินก็ยังคงปรากฏในโครงสร้างจุลภาคเช่นเดียวกัน

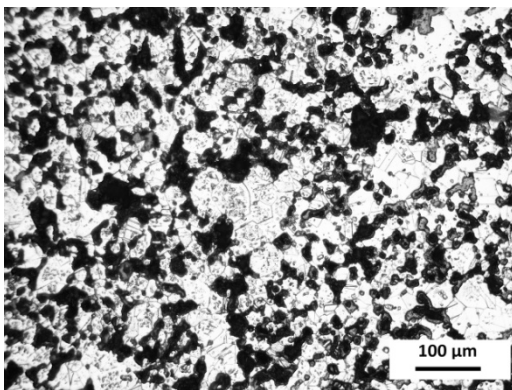




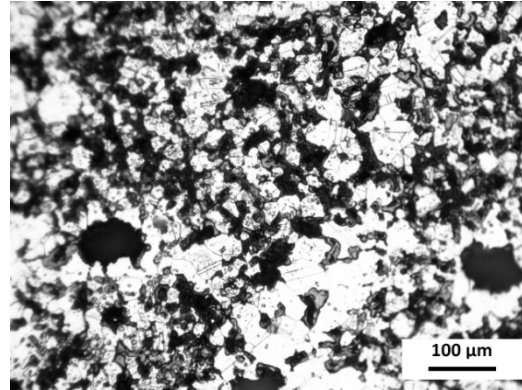
ก) 1Cr1Ni



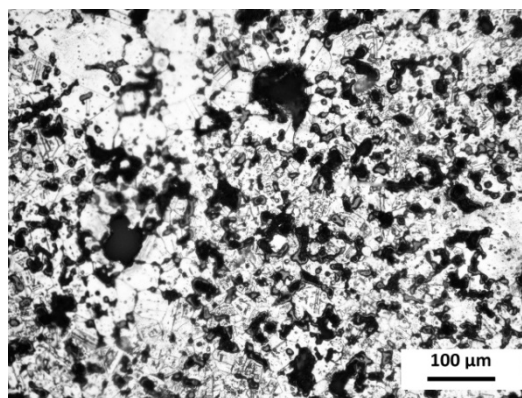
ข) 2Cr2Ni



ค) 3Cr3Ni

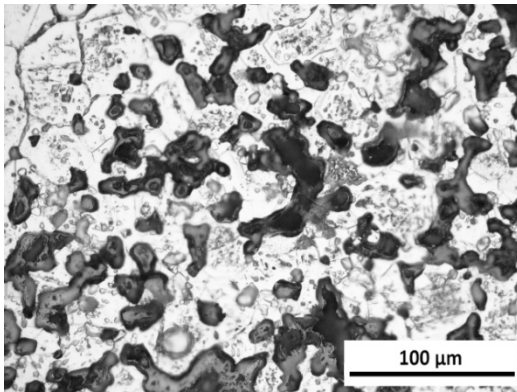


ง) 4Cr4Ni

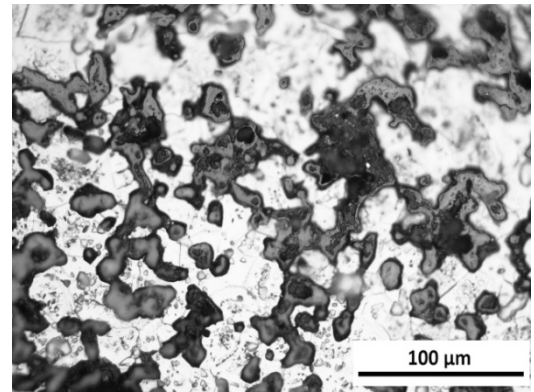


จ) 5Cr5Ni

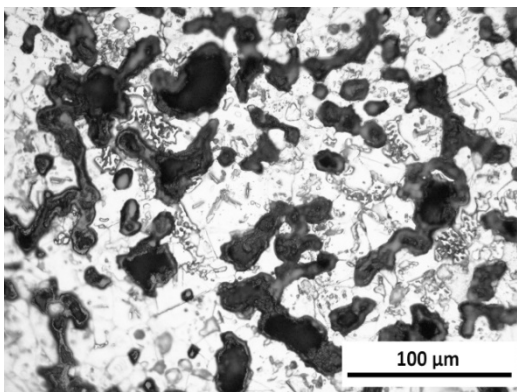
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 200 เท่า



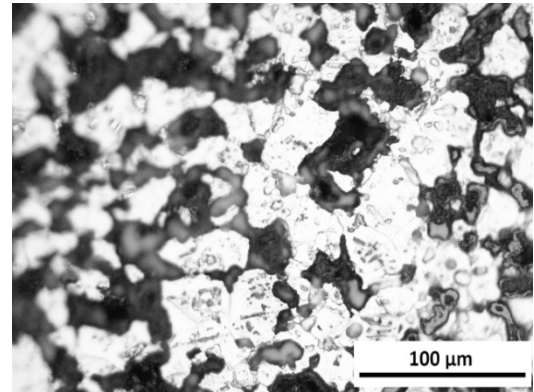
ก) 1Cr1Ni



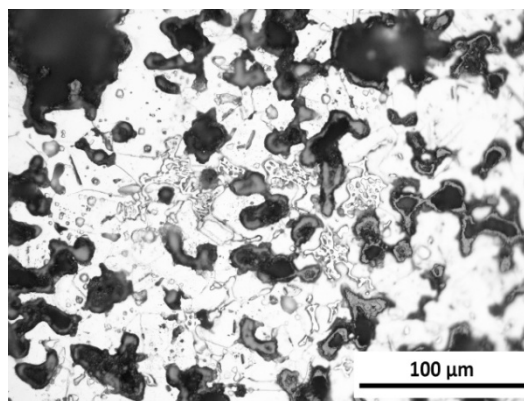
ข) 2Cr2Ni



ค) 3Cr3Ni



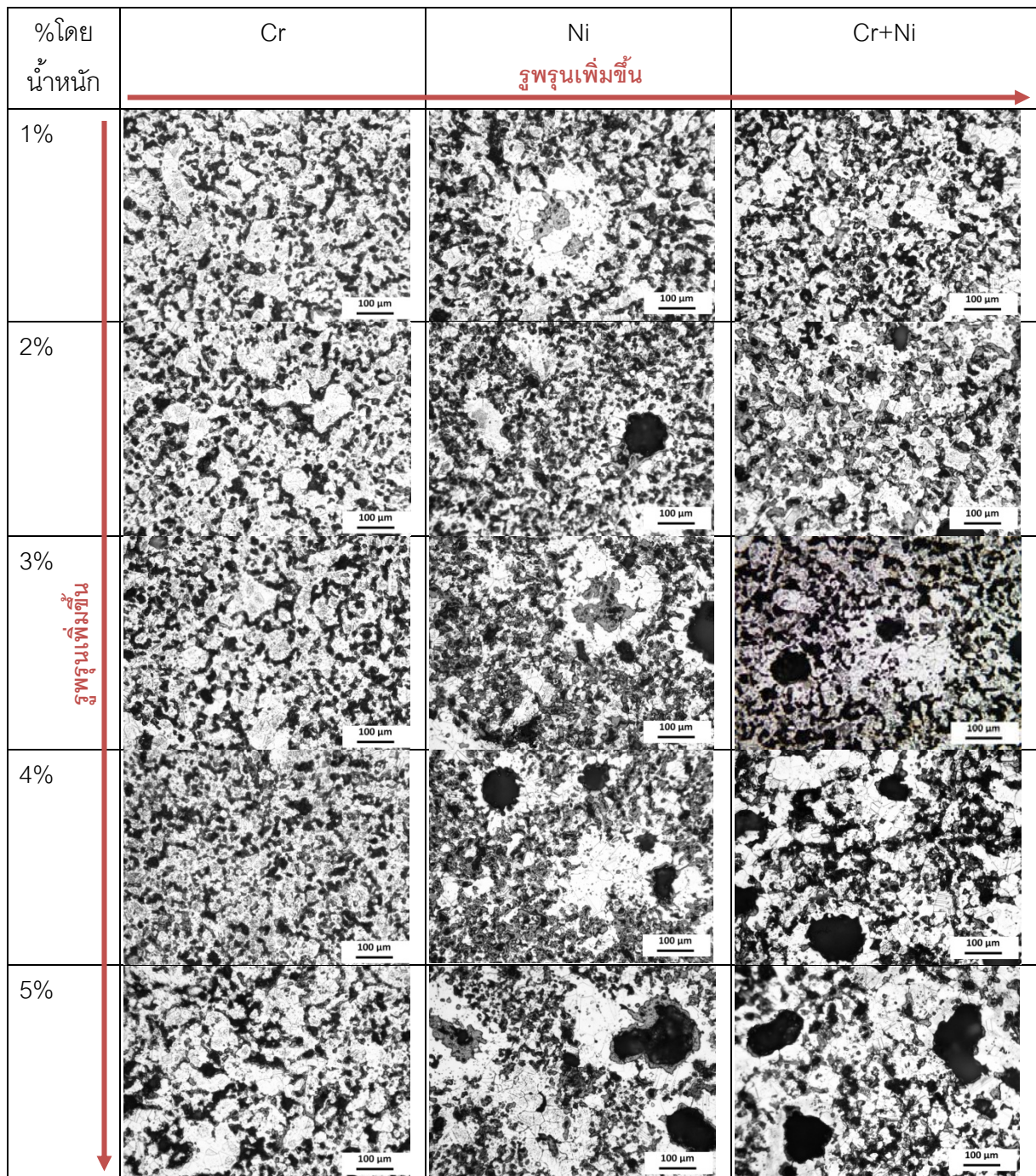
ง) 4Cr4Ni



จ) 5Cr5Ni

ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันและผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพที่ 4.18 – 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกันกับทั้งชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมและชิ้นงานที่ผ่านการเติมนิกเกิล ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันก็พบเกิดออกไซด์ขึ้นในรูปของรูพรุน ความสม่ำเสมอและขนาดของออกไซด์ก็ขึ้นกับลักษณะรูพรุนที่มีมาก่อนในขั้นตอนการเผาผืนิก ซึ่งเนื่องจากความสม่ำเสมอของขนาดรูพรุนคล้ายกับชิ้นงานนิกเกิลคือขนาดของรูพรุนค่อนข้างไม่สม่ำเสมอและการกระจายตัวก็ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน มีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคภายหลังการเผาผืนิก ทำให้เกิดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและรูพรุนที่เหลือค้างอยู่ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชัน มีความสม่ำเสมอน้อยกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียมเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับชิ้นงานที่เติมนิกเกิล เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณโครเมียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีความสม่ำเสมอของขนาดออกไซด์และรูพรุนที่เหลือค้างภายหลังจากทดสอบออกซิเดชันลดลง และพบเฟสสีขาวลักษณะเหลี่ยมหรือเป็นแท่งหรือรูปทรงผิดปกติขนาดเล็กเกิดขึ้นกระจายอยู่ในเนื้อพื้น และมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานภายหลังการเผาผืนิกเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่เติมโครเมียมและชิ้นงานที่เติมนิกเกิล อีกทั้งแอนนิลลิ่งทวินที่มีอยู่ในโครงสร้างจุลภาคหลังจากการเผาผืนิกก็ยังคงพบในโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันด้วย แต่ทั้งนี้ในทุกชิ้นงานทั้งชิ้นงานที่เติมโครเมียมหรือชิ้นงานที่เติมนิกเกิลหรือชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันสำหรับเฟสสีขาวที่เกิดขึ้นไม่พบความแตกต่างของขนาดและปริมาณอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณการเติมโครเมียมหรือนิกเกิลหรือทั้งโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันเพิ่มมากขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก



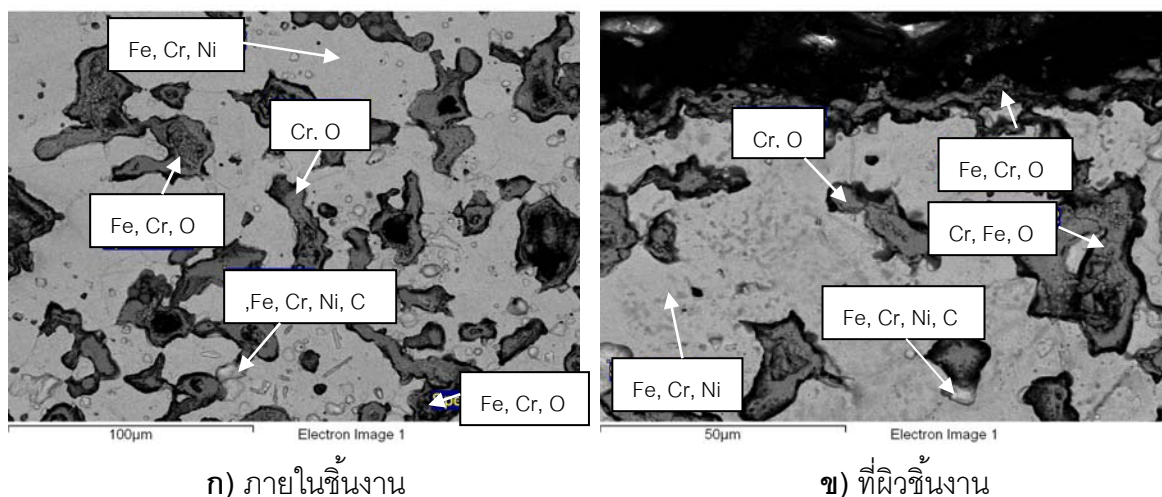
ตารางที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

สำหรับชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะเห็นว่าออกไซด์ในชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะมีขนาดเล็ก และกระจายตัวทั่วชิ้นงานได้ดีกว่าชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่ ออกไซด์ในรูพรุนขนาดใหญ่พบว่ามีทั้งที่เกิดออกไซด์หนาจนเกือบปิดรูพรุนและออกไซด์บางหรืออาจจะไม่พบออกไซด์ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เหลือค้างภายในรูพรุนมากน้อยต่างกันและความใกล้เคียงผิวที่จะเพิ่มโอกาสให้ออกซิเจนได้แพร่เข้ามาตามช่องว่างได้ เนื่องจากมีรูพรุนเปิดเป็นช่องทางให้ออกซิเจนเข้ามาภายในชิ้นงานได้ ทั้งนี้ปริมาณของรูพรุนเปิดที่ผิวชิ้นงานจึงมีผลต่อปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

4.3.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)

ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ทั้งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติมธาตุและผ่านการเติมโครเมียมเติมนิกเกิลและเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันภายหลังจากถูกทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิคงที่แล้ว ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสและออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งบริเวณภายในชิ้นงานและบริเวณผิวชิ้นงาน

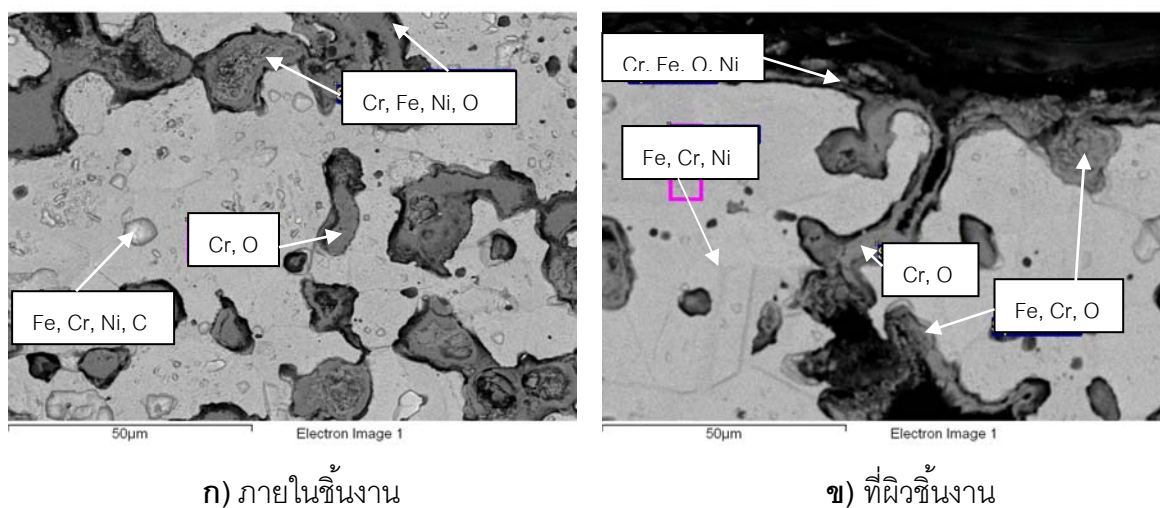
#### 4.3.2.1 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L



ภาพที่ 4.20 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

จากภาพที่ 4.20ก) แสดงบริเวณภายในชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS ได้ผลว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีองค์ประกอบของธาตุโครเมียม เหล็ก และออกซิเจน โดยบริเวณที่เป็นเฟสสีเทาเนื้อแน่นมีเพียงธาตุโครเมียมและออกซิเจนเท่านั้น ส่วนบริเวณออกไซด์ที่มีลักษณะค่อนข้างพรุนจะพบธาตุโครเมียมและออกซิเจนอีกทั้งยังพบเหล็กด้วย ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ที่จะเป็นทั้งออกไซด์ของเหล็กหรือออกไซด์ของโครเมียมหรือออกไซด์ของเหล็กโครเมียม ส่วนบริเวณเนื้อพื้นจะเป็นบริเวณสีขาวพบองค์ประกอบของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.20ข) แสดงบริเวณผิวชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS ออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานมีลักษณะสีเทาพรุนเล็กน้อยจะพบองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียมและออกซิเจน สามารถเป็นไปได้ทั้งออกไซด์ของโครเมียมหรือออกไซด์ของเหล็กหรือออกไซด์ของเหล็กโครเมียม ซึ่งอาจเกิดออกไซด์ของทั้ง 3 ชนิดร่วมกันก็ได้

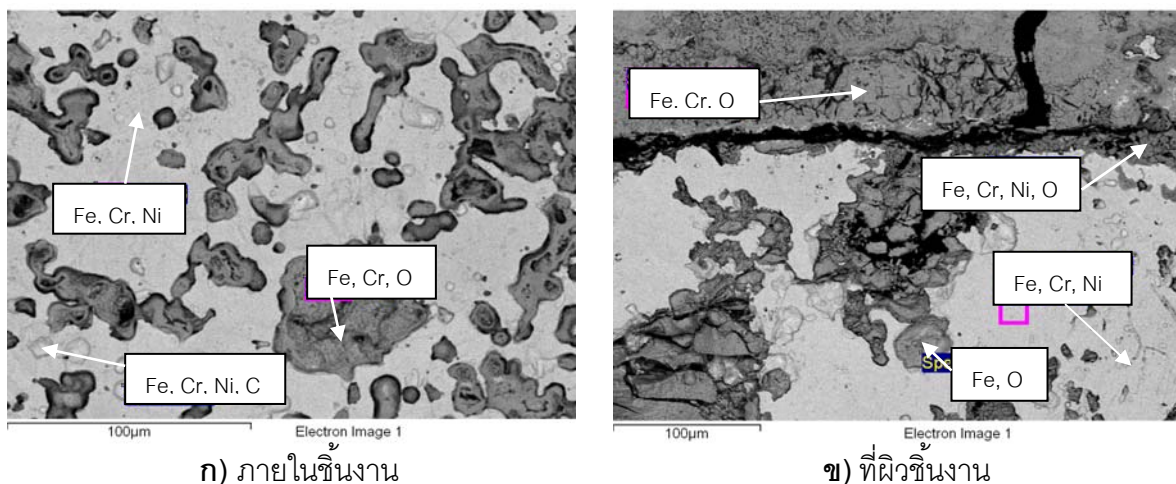
#### 4.3.2.2 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมที่ 5% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.21 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

จากภาพที่ 4.21ก) แสดงบริเวณภายในชิ้นงานที่เติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนัก พบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใน บริเวณออกไซด์สี่เหลี่ยมที่มีลักษณะพรุณเล็กน้อยพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียม และออกซิเจนเป็นหลัก และจะพบธาตุนิกเกิลปนเล็กน้อย ในบริเวณออกไซด์สี่เหลี่ยมเนื้อแน่นพบเพียงธาตุโครเมียมและออกซิเจน เป็นไปได้ว่าเป็นออกไซด์ของโครเมียมเท่านั้น พิจารณาที่ผิวชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.21ข) บริเวณออกไซด์ที่เกิดติดกับผิวชิ้นงานสีเข้มจะมีองค์ประกอบของโครเมียมปริมาณมาก เหล็ก ออกซิเจน และนิกเกิล ในรูพรุณเปิดออกไซด์สี่เหลี่ยมจากชั้นสีเทาเข้มพบว่ามีเหล็ก โครเมียม และออกซิเจน ส่วนบริเวณออกไซด์ที่เป็นรูพรุณเล็กน้อยพบว่ามีโครเมียม เหล็ก และ ออกซิเจน จากผลวิเคราะห์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นไปได้ที่จะเกิดทั้งออกไซด์ของโครเมียม ออกไซด์ของเหล็ก หรือออกไซด์ของเหล็กโครเมียม และจากการที่พบนิกเกิลจึงสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดออกไซด์ของเหล็กนิกเกิลด้วยเล็กน้อย สำหรับบริเวณที่เป็นเฟสสี่เหลี่ยมอ่อนที่พบในเกรนของเนื้อพื้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า มีเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล คล้ายกับบริเวณเกรนของเนื้อพื้นแต่พบว่ามีคาร์บอนด้วย

#### 4.3.2.3 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลที่ 5% โดยน้ำหนัก



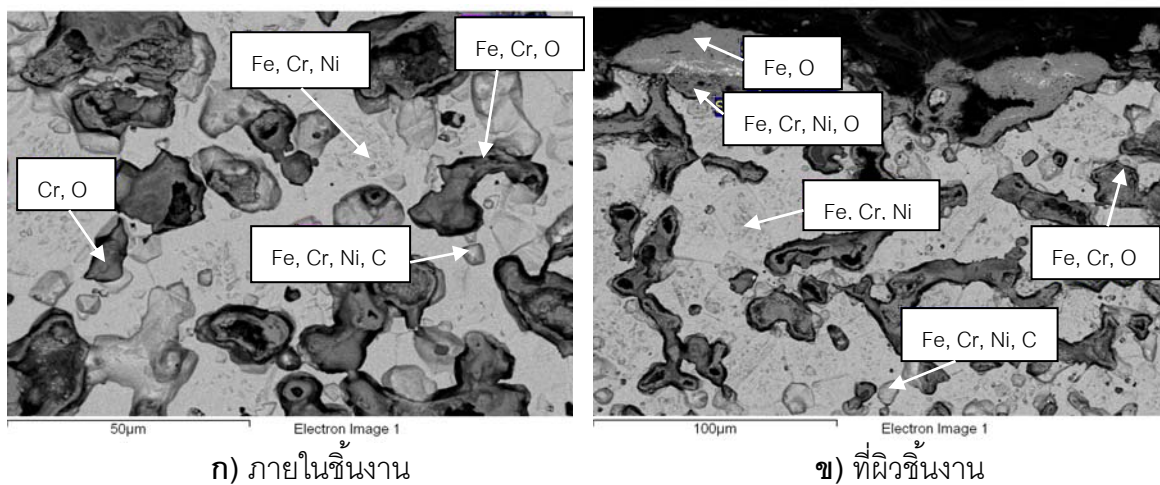
ภาพที่ 4.22 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

จากภาพโครงสร้างจุลภาคที่วิเคราะห์โดย SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของชิ้นงานที่เติมนิกเกิลที่ 5% โดยน้ำหนักดังแสดงในภาพที่ 4.22ก) และภาพที่ 4.22ข) พบว่า จากภาพที่ 4.22ก) ภายในชิ้นงานออกไซด์ที่พบน้อยจะพบองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียมและออกซิเจน โดยเหล็กพบในปริมาณที่มากกว่า เป็นไปได้ว่าเกิดออกไซด์ของเหล็กเป็นหลัก และมีออกไซด์ของโครเมียมเกิดด้วยกันหรืออาจเป็นออกไซด์ของเหล็กโครเมียม ในบริเวณออกไซด์ที่สีเทาอ่อนลักษณะพบน้อยพบเพียงองค์ประกอบของเหล็กและออกซิเจนเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.22ข) ในบริเวณออกไซด์ที่เกิดที่ผิวพบว่ามีธาตุเหล็กและออกซิเจนเป็นหลัก พบโครเมียมในปริมาณที่น้อยกว่า จึงเป็นไปได้ว่าที่ผิวเกิดออกไซด์ของเหล็กเป็นหลักแทนที่จะเกิดออกไซด์ของโครเมียมเป็นหลัก ส่วนออกไซด์ที่ติดกับผิวชิ้นงานมีสีเข้ม มีลักษณะพบน้อยจะพบธาตุเหล็กและออกไซด์เป็นหลัก อีกทั้งยังพบนิกเกิลและโครเมียมอีกด้วย ออกไซด์บริเวณนี้อาจเป็นออกไซด์ของเหล็กเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับชั้นออกไซด์ที่ติดออกไปด้านนอกและอาจมีออกไซด์ของเหล็กโครเมียมหรือออกไซด์ของเหล็กนิกเกิลบ้าง เนื่องจากงานวิจัยของ A. Bautista et al.[18] มีรายงานว่าพบออกไซด์ของเหล็กนิกเกิลเกิดในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เช่นเดียวกัน ส่วน



บริเวณเนื้อพื้นพบเพียงองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อพื้นออสเทนไนต์เหล็กกล้าไร้สนิม 316L และบริเวณเฟสสีขาวพบว่ามีองค์ประกอบของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิลเช่นกัน แต่ปริมาณของนิกเกิลจะสูงกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อพื้น

#### 4.3.2.4 ผลวิเคราะห์ SEM และ EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลรวมกันที่ 5% โดยน้ำหนัก



**ภาพที่ 4.23** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลรวมกันที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

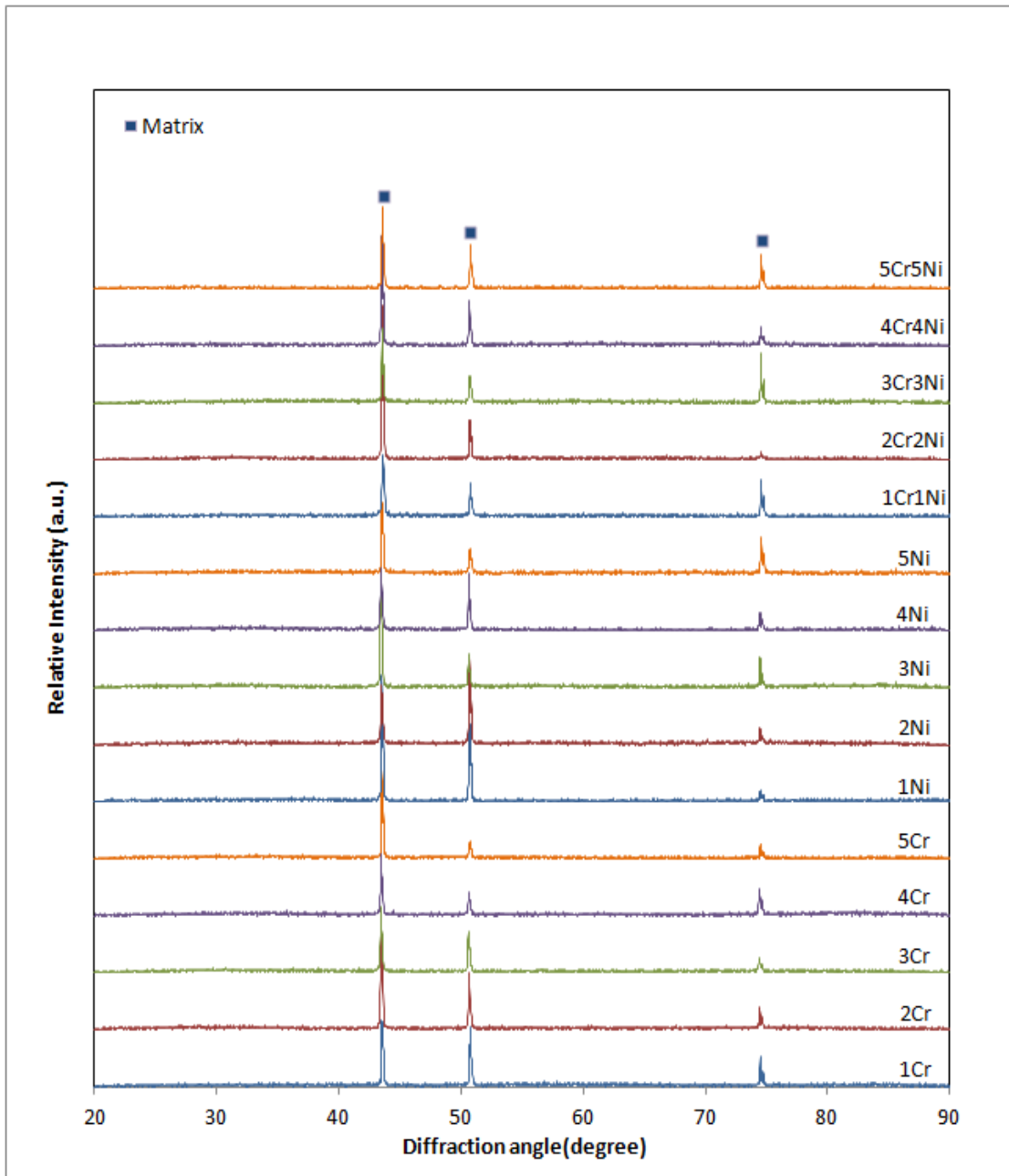
จากภาพที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่วิเคราะห์ด้วย SEM และวิเคราะห์ด้วย EDS ของชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลรวมกันที่ 5% โดยน้ำหนัก โดยในภาพที่ 4.23ก) เป็นโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงาน ออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจะพบ 3 ลักษณะ บริเวณออกไซด์ที่มีลักษณะพรุณเล็กน้อยจะพบว่ามีธาตุโครเมียม เหล็ก และออกซิเจนเป็นหลัก โดยมีโครเมียมมากกว่าเหล็ก จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดออกไซด์ของโครเมียมเป็นหลักและเกิดออกไซด์ของเหล็กควบคู่ไปด้วย อีกทั้งยังอาจจะเป็นออกไซด์ของเหล็กโครเมียมก็ได้ บริเวณออกไซด์สีเทาเนื้อแน่นจะพบว่ามีเพียงโครเมียมและออกซิเจน น่าจะเป็นออกไซด์ของโครเมียม บริเวณของเนื้อพื้น ก็พบเพียงธาตุเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ส่วนในบริเวณที่เป็นเฟสสีขาวพบว่ามีเหล็ก โครเมียมและนิกเกิลเช่นเดียวกับเนื้อพื้นแต่พบคาร์บอนขึ้นเพิ่มขึ้นมาเช่นเดียวกับ 316L ที่เติมโครเมียม เมื่อ

พิจารณาที่ผิวของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.23ข) ออกไซด์ที่ผิวนอกสุดพบเพียงเหล็กและออกซิเจน ซึ่งในบริเวณนี้เป็นไปได้ว่าเกิดออกไซด์ของเหล็ก ส่วนบริเวณออกไซด์สีเทาเข้มลักษณะค่อนข้างพรุนจะพบโครเมียมและออกซิเจนมาก พบเหล็กและนิกเกิลปริมาณปานกลาง ฉะนั้นบริเวณนี้อาจจะเกิดออกไซด์ของโครเมียมเป็นส่วนใหญ่และอาจเกิดออกไซด์ของเหล็กหรือออกไซด์ของเหล็กโครเมียมหรือออกไซด์ของเหล็กนิกเกิล

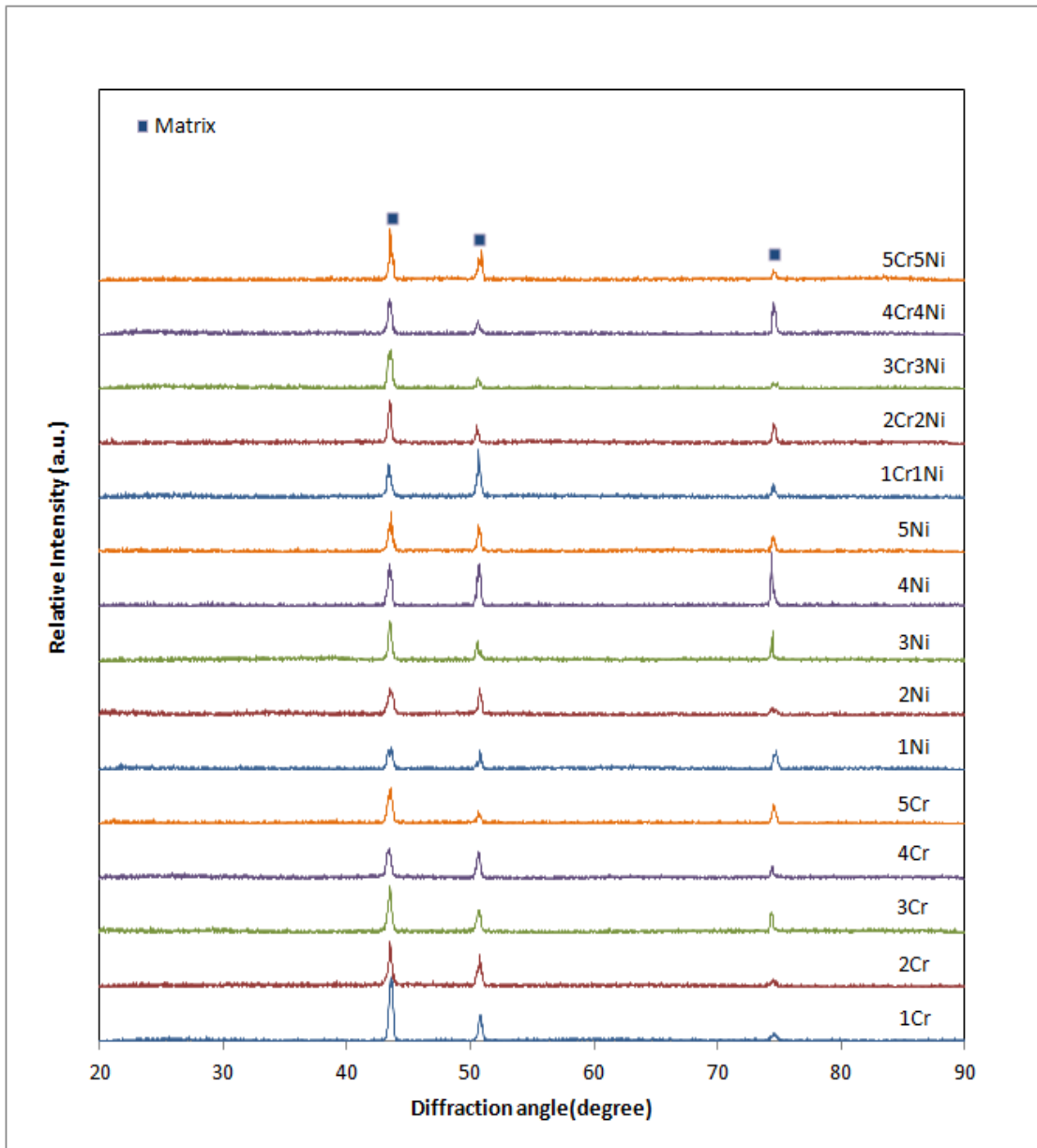
#### 4.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer

4.4.1 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และชิ้นงานที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ภายหลังจากการเผาผืนิก

จากการวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งที่ผิวชิ้นงานและภายในเนื้อชิ้นงานของชิ้นงานภายหลังจากการเผาผืนิกโดยที่ยังไม่ได้ผ่านการเผาขาวที่ 900 องศาเซลเซียส ด้วยวิธี X-Ray Diffraction พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ทั้งที่ไม่ผ่านการเติมธาตุและผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันในทุกกรณี ภายหลังจากการเผาผืนิกแล้วการตรวจสอบทั้งภายในชิ้นงานและที่ผิวชิ้นงานปรากฏเฉพาะพีคของเฟสที่เป็นเนื้อพื้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งก็คือโครงสร้างออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเท่านั้น เนื่องจากการเผาผืนิกนั้นเป็นเพียงการเผาเพื่อเชื่อมอนุภาคของผงให้ติดกันเพื่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ระยะเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดออกไซด์หรือสารประกอบอื่น ๆ ขึ้นที่ชิ้นงานหรืออาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจนไม่เพียงพอที่จะสามารถตรวจพบจึงไม่ปรากฏพีคอื่น ๆ ขึ้นซึ่งในหัวข้อ 4.3 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมในทุกกรณีภายหลังจากการเผาผืนิกจะพบว่ามีเฟสอื่นเกิดขึ้นด้วยเช่นกันแต่เนื่องจากมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงทำให้ไม่ปรากฏพีคของเฟสอื่นขึ้นมาใน XRD pattern ดังแสดงในภาพที่ 4.24 – 4.25



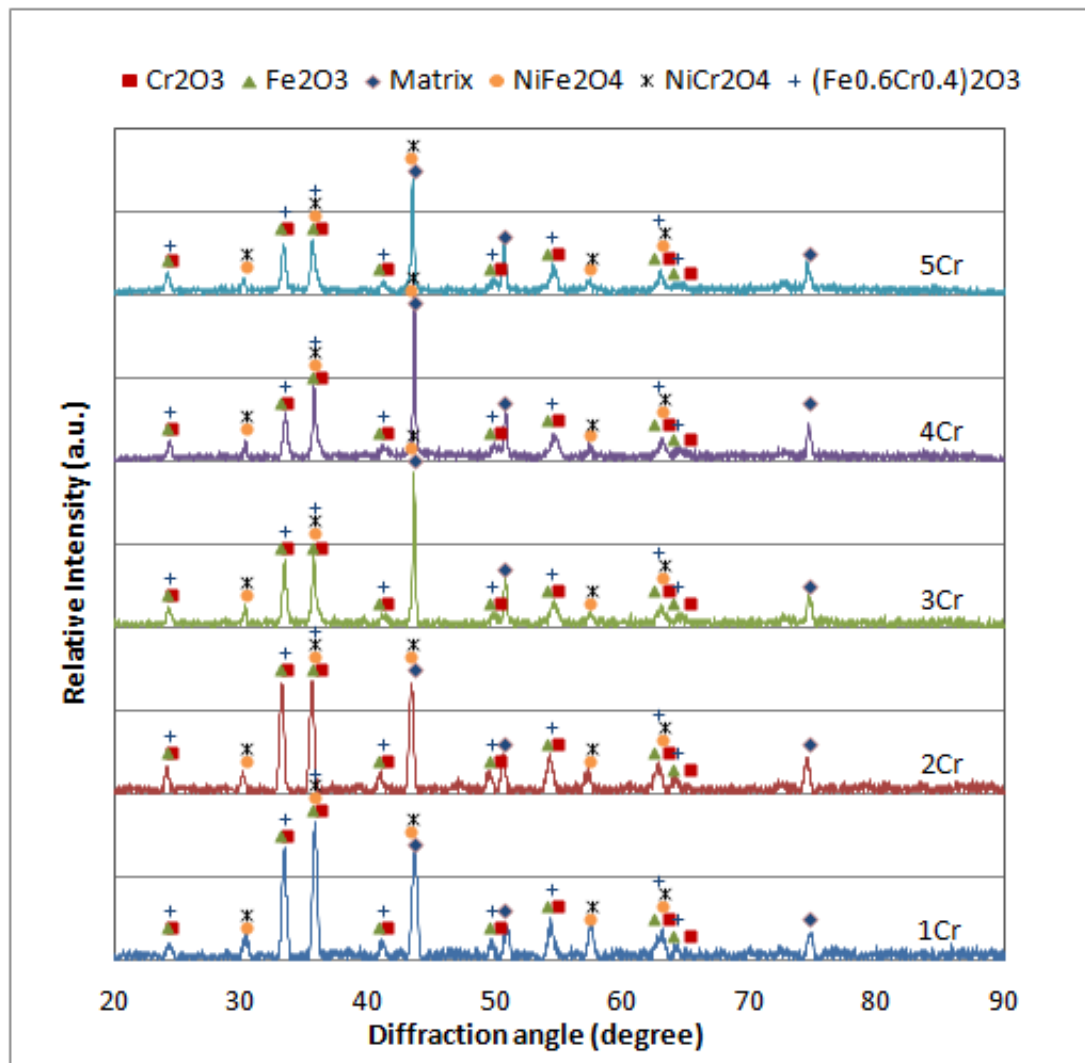
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% - 5%โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% - 5% โดยน้ำหนัก และ ชิ้นงานที่โครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที



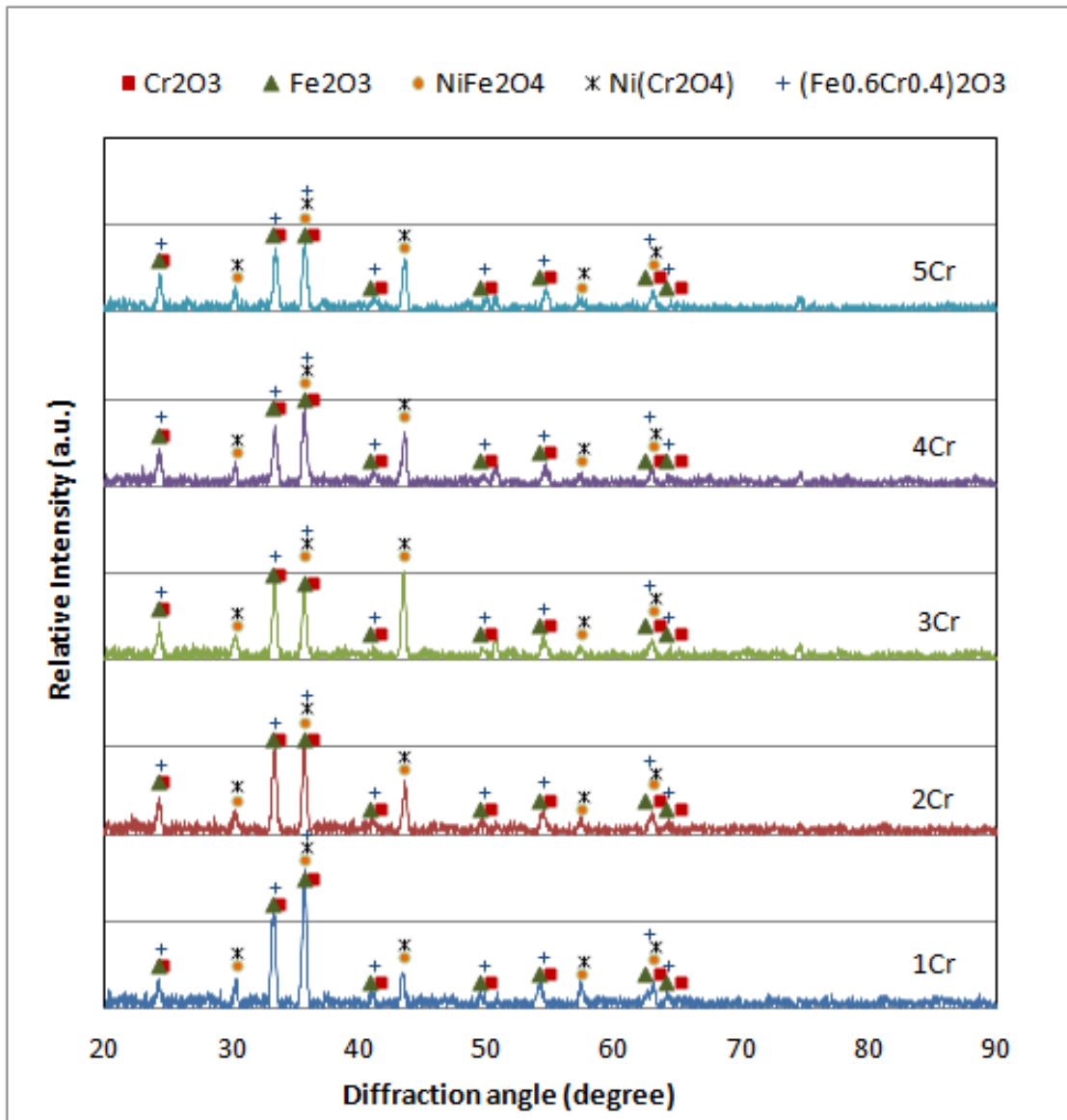
ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer บริเวณผิวชิ้นงานของ ชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% - 5%โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% - 5% โดยน้ำหนัก และ ชิ้นงานที่โครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที

4.4.2 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศปกติ

เมื่อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเติมโครเมียมถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย XRD ได้ผลดังภาพที่ 4.26 (โดยภาพที่ 4.26ก) เป็นผล XRD pattern ภายในชิ้นงาน พบว่ามีเฟสที่เป็นเนื้อพื้นที่พบพิกปรากฏขึ้น และพบออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เป็นไปได้ คือ โครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) เหล็ก(II)ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และออกไซด์ของเหล็กโครเมียม ( $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ) ซึ่งพิกของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดนี้ทับซ้อนกัน ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็นพิกของออกไซด์ชนิดใด และ XRD pattern ของชิ้นงานที่บริเวณผิวก็ปรากฏพิกของออกไซด์ชนิดเดียวกันกับที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน คือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  เมื่อพิจารณาพร้อมกับผล SEM และ EDS ของชิ้นงานที่เติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนักดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.2.2 แล้วพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดออกไซด์ขึ้นทั้ง 3 ชนิดขึ้นในชิ้นงาน เนื่องจากผล EDS พบทั้งธาตุเหล็ก โครเมียม และออกซิเจน โดยในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่เติมโครเมียมจะเกิด  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก เพราะผลจาก EDS ที่วิเคราะห์บริเวณออกไซด์จะพบว่ามีองค์ประกอบของโครเมียมเป็นส่วนใหญ่และเหล็กรองลงมา นอกจากนี้ยังพบพิกของ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  พิกของออกไซด์ 2 ชนิดทับซ้อนกันจึงไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็นออกไซด์ตัวใดเป็นไปได้ว่าเกิดออกไซด์ขึ้นทั้ง 2 ชนิด ในงานวิจัยของ A.Bautista et al. ในปี ค.ศ. 2002 และ 2003 [17, 18] ก็พบว่ามีการรายงานไว้ว่าในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่นำไปผ่านการเผาทดสอบออกซิเดชันทั้งที่ 600 700 หรือ 900 องศาเซลเซียสพบว่ามีเกิด  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  และ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  ขึ้นในโครงสร้างจุลภาคด้วยเช่นเดียวกัน จึงเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชั้นงานของ ชั้นงานที่เติมโครเมียมที่ 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



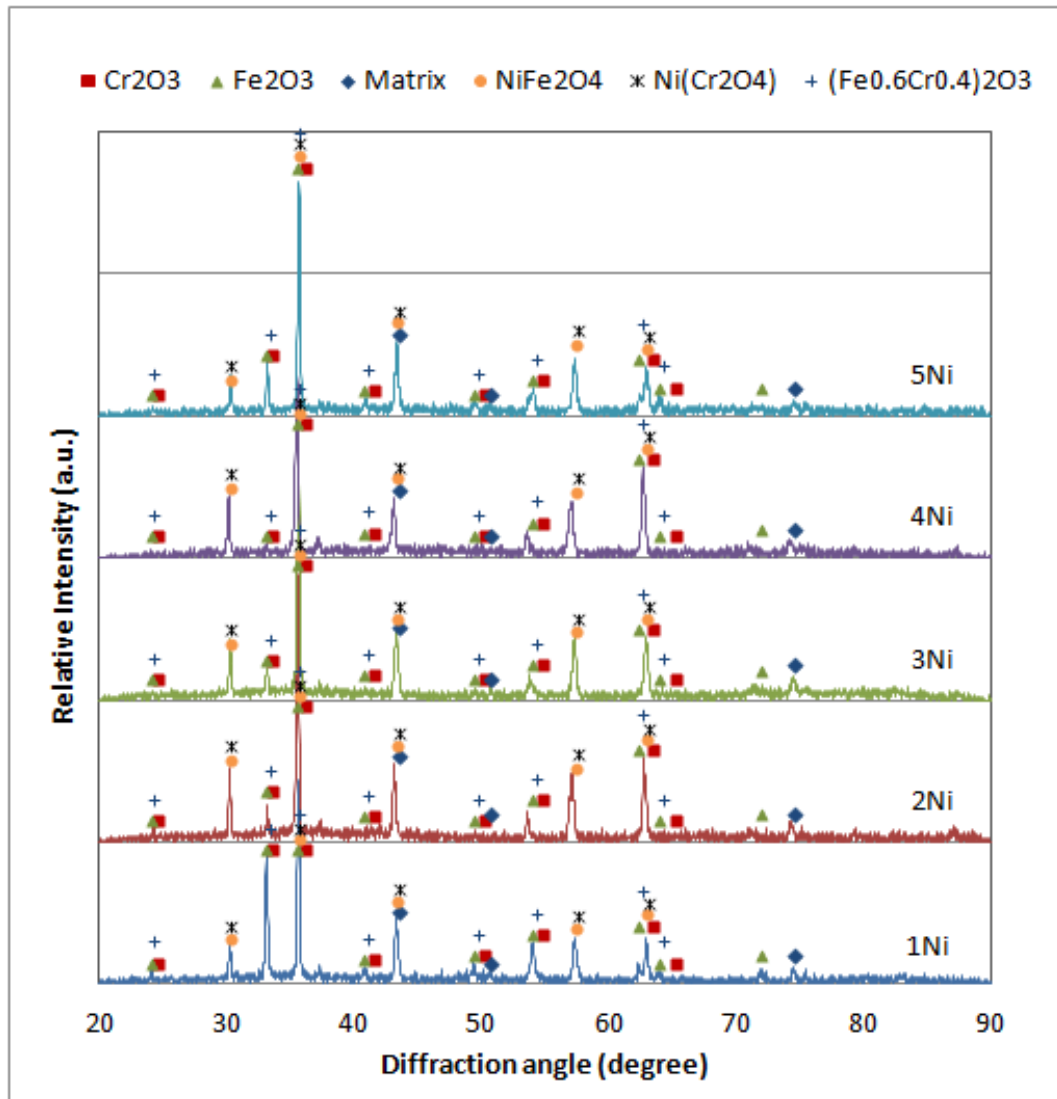
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชั้นงานของชิ้นงานที่เติมโครเมียมที่ 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

4.4.3 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลเกิดภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ

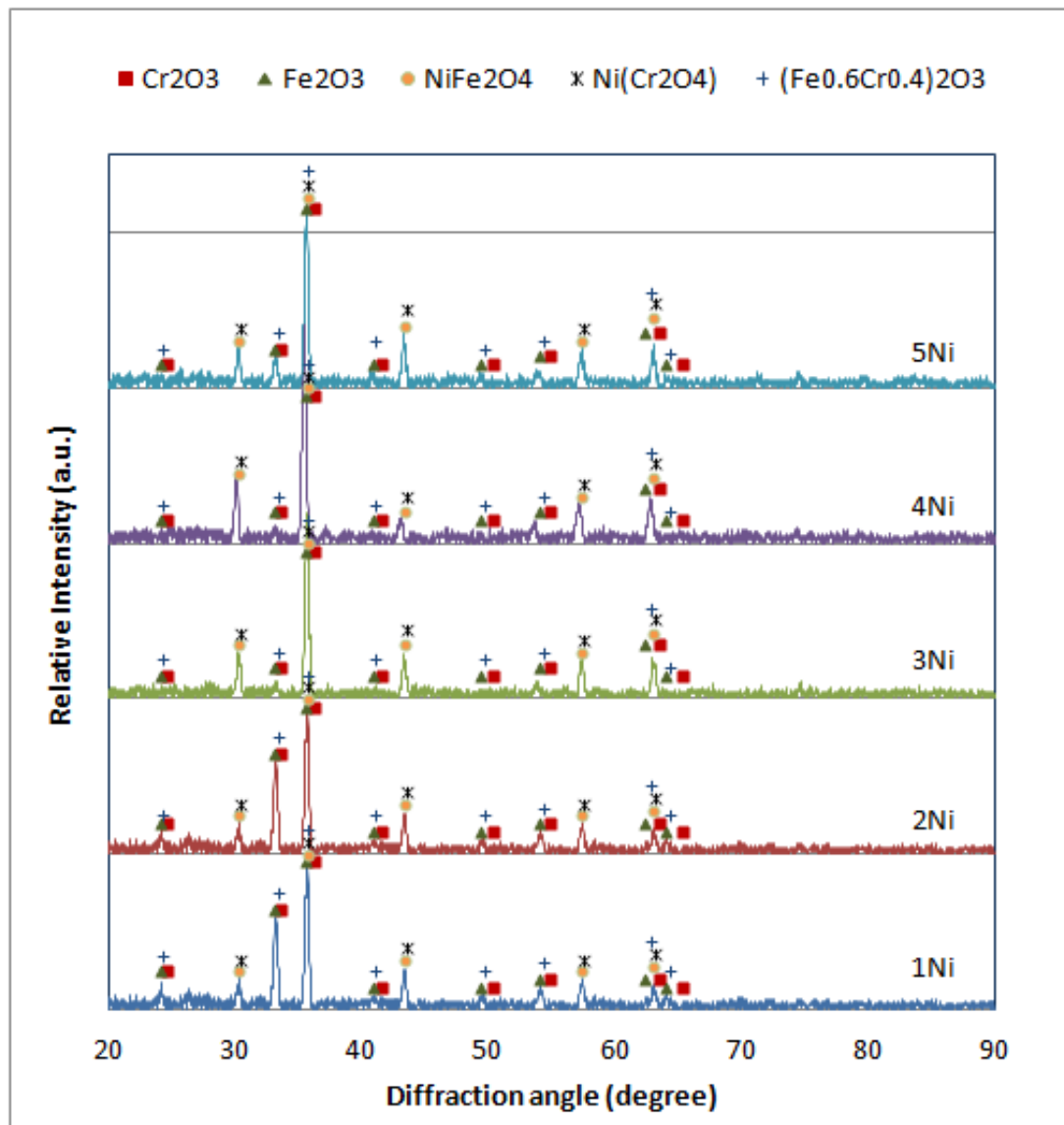
เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่เติมนิกเกิลมาวิเคราะห์ด้วย XRD และพิจารณาผลร่วมกับผล SEM และ EDS ของชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 5% โดยน้ำหนักที่ได้รายงานไว้ในหัวข้อ 4.3.2.3 ผล XRD pattern แสดงในภาพที่ 4.27 พบว่าภายในชิ้นงาน ผล XRD pattern ดังภาพที่ 4.27ก) มีพีคของเนื้อพื้นออกไซด์และออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในเป็นออกไซด์ของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  อีกทั้งยังพบว่ามีพีคซึ่งอาจเป็น  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  หรือ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  ซึ่งมีพีคที่ทับซ้อนกันเช่นเดียวกับ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  และ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  จึงไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็นพีคของออกไซด์ชนิดใดหรืออาจเกิดเป็นออกไซด์ได้ทั้ง 3 ชนิด พิจารณาออกไซด์บริเวณผิวชิ้นงาน ในภาพที่ 4.27ข) พบว่าเป็นออกไซด์ชนิดเดียวกันกับออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานคือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับผล EDS ของชิ้นงานที่เติมนิกเกิลจากในหัวข้อที่ 4.3.2.3 ออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เนื่องจากปริมาณของเหล็กที่พบในออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งภายในชิ้นงานและที่ผิวชิ้นงานจะมากกว่าโครเมียมและนิกเกิล แต่สำหรับ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  เคยได้มีการรายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ว่าเมื่อเผาชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ 600 700 หรือ 900 องศาเซลเซียสพบออกไซด์  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  และ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน [17, 18]

จากการวิเคราะห์ผล XRD และ EDS ร่วมกันในกรณีชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมนิกเกิล จะเห็นได้ว่านิกเกิลจะลดการฟอร์มตัวของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ที่จะทำหน้าที่เป็นฟิล์มปกป้องผิวชิ้นงาน โดยจะเกิดเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  แทน ซึ่งออกไซด์ชนิดนี้จะมีความสามารถในการปกป้องผิวที่ต่ำกว่า  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  จึงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลงได้ [20, 21]





ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชั้นงานของ ชั้นงานที่เติม निकเกิดที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

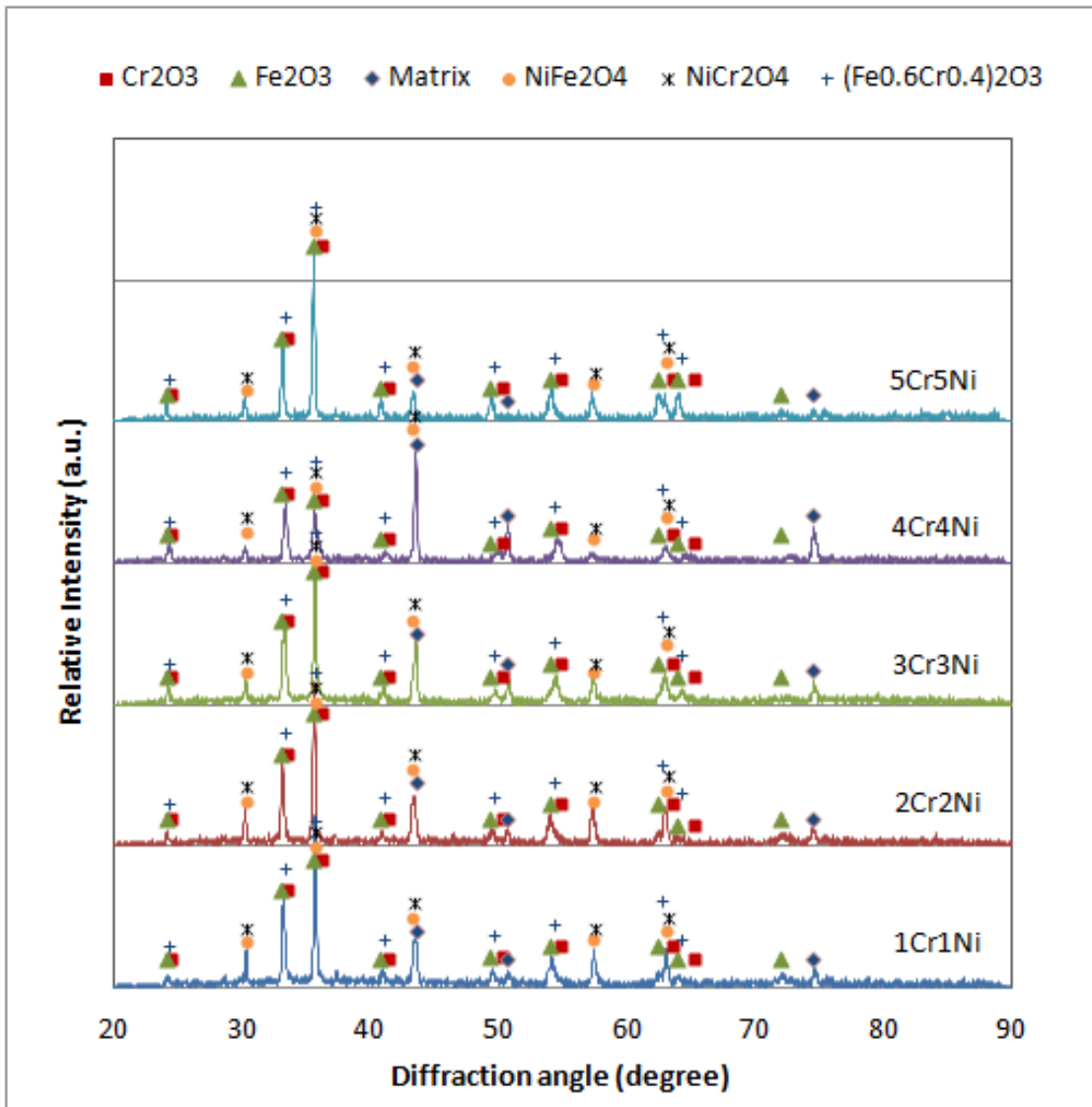


ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชั้นงานของชั้นงานที่เติม निकเกิดที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก หลังจากการเผาผืนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

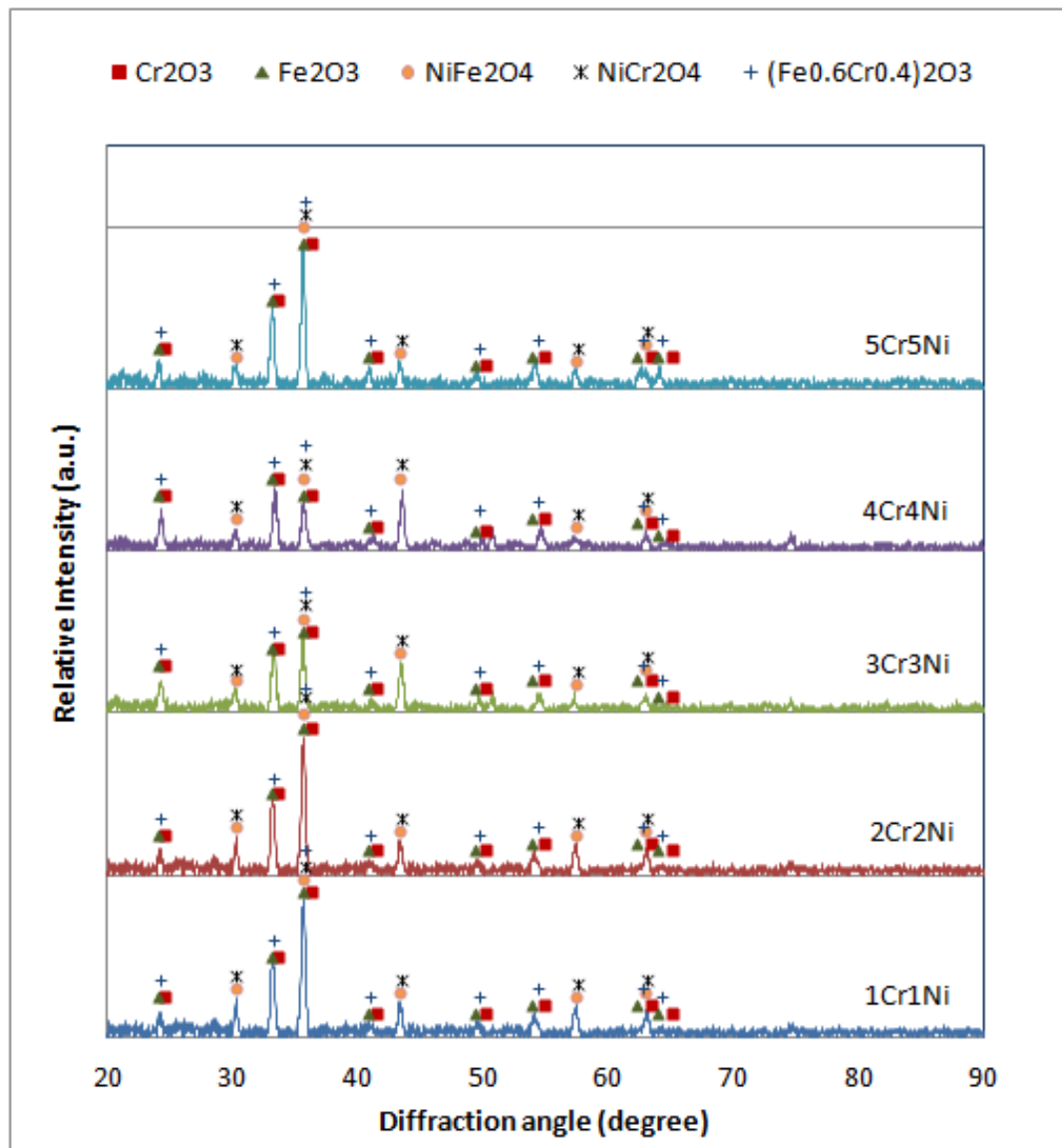
4.4.4 XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศปกติ

XRD pattern ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.28 ภายใต้อากาศปกติ (ภาพ 4.28ก) ปรากฏพีคของเนื้อพื้นและออกไซด์ โดยออกไซด์ที่พบคือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  ส่วนที่บริเวณผิวชิ้นงานผล XRD pattern ดังแสดงในภาพที่ 4.28ข) จะเห็นว่าเกิด  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  จะเห็นว่าเกิดออกไซด์คล้ายกับออกไซด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เติมนิกเกิลเนื่องจากการเติมธาตุนิกเกิลเข้าไปเพิ่มเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับผล EDS ของชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ได้จากในหัวข้อที่ 4.3.2.4 ก็พบว่ามีองค์ประกอบของเหล็ก โครเมียม นิกเกิล และออกซิเจน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดออกไซด์เหล่านี้ทั้งหมด โดยน่าจะเกิด  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  เป็นหลักเนื่องจากปริมาณที่พบองค์ประกอบของเหล็กและโครเมียมบริเวณออกไซด์ ส่วนธาตุอื่นๆที่ปรากฏในผล EDS อาจเป็นธาตุหรือสารประกอบปะปนมาในปริมาณน้อยมากและอาจพบเฉพาะจุดดังนั้นจึงไม่ปรากฏพีคอื่นขึ้นใน XRD pattern

เนื่องจากชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน นิกเกิลยังคงมีบทบาททำให้ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีออกไซด์ของเหล็กเกิดมากขึ้นซึ่งความสามารถในการปกป้องผิวต่ำกว่าออกไซด์ของโครเมียม จึงอาจส่งผลทำให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลงได้



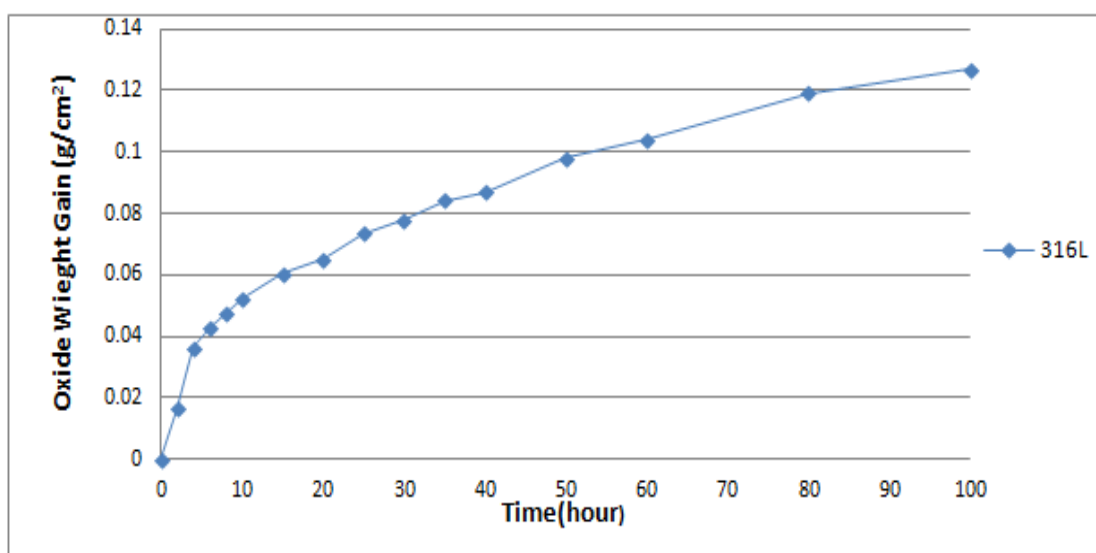
ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ภายในชั้นงานของ ชั้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลรวมกันที่ 1% – 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผืนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer ที่ผิวชิ้นงานของชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลรวมกันที่ 1% - 5% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการเผาผืนึกและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

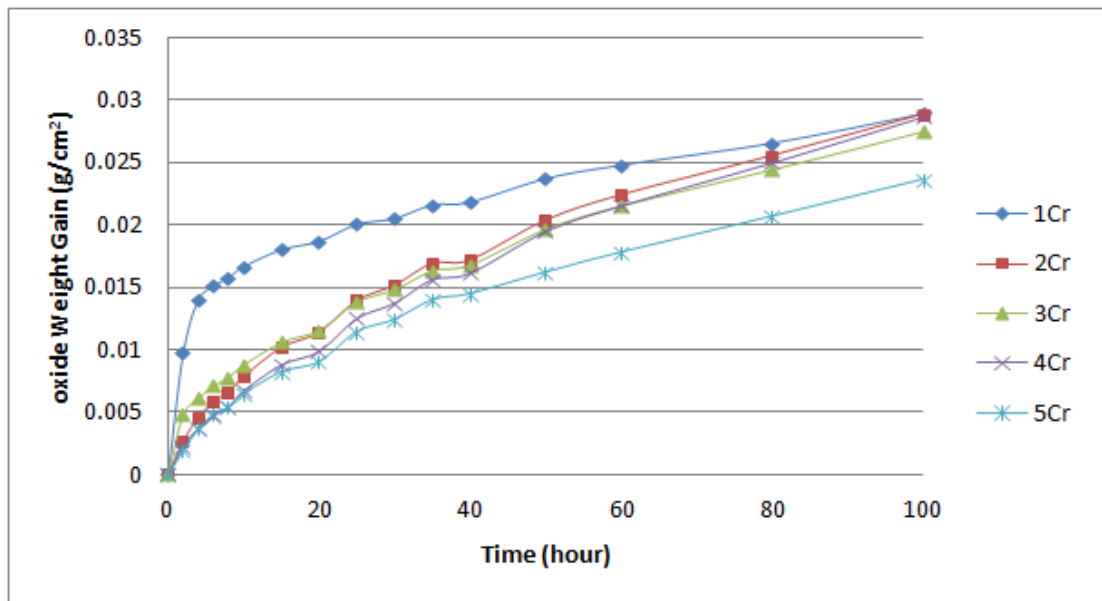
#### 4.5 ผลจากการทดสอบออกซิเดชัน

เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังจากการเผาผืนึกมาทำการเผาทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบ่งบอกว่าการเกิดออกไซด์ขึ้นที่ชิ้นงานและได้ทำการวิเคราะห์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ระยะเวลาต่างๆกันจนครบ 100 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงจะมีน้ำหนักของชิ้นงานภายหลังการทดสอบออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ดังแสดงในกราฟภาพที่ 4.29



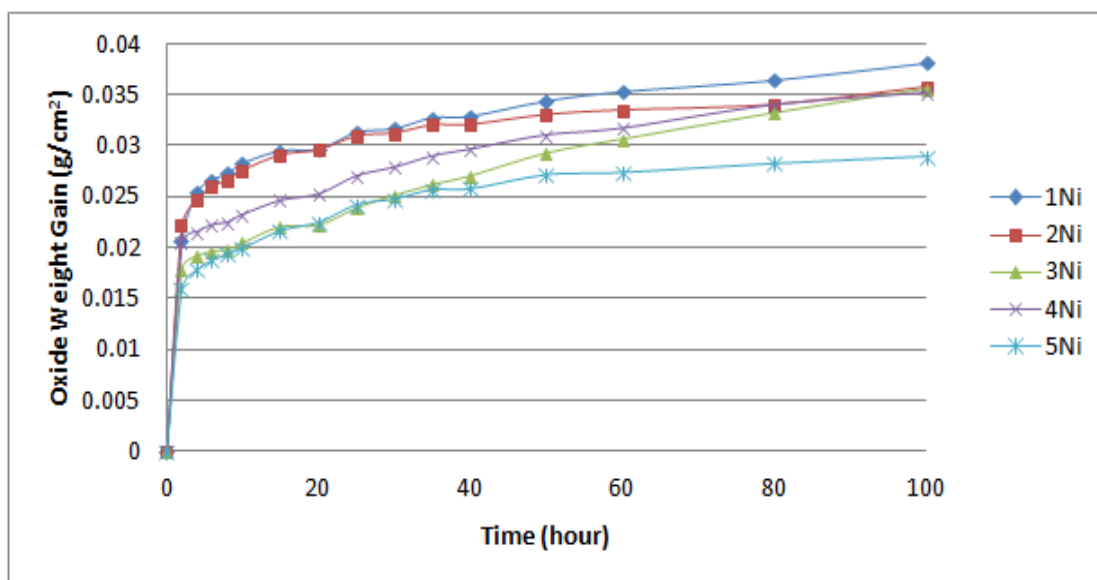
ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากกราฟในภาพที่ 4.29 พบว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นพาราโบลา (Parabolic Curve) โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสูงในช่วง 10 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจะลดลงเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเมื่อวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอัตราการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ไม่ได้ผ่านการเติมธาตุ จะได้ว่าค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชัน ( $k_p$ ) มีค่า  $2.77 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4 \text{ s}$  จากงานวิจัยที่มีมาก่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง พบว่าการเกิดออกซิเดชันการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นพาราโบลาเช่นเดียวกัน [17]



ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมโครเมียม เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

พิจารณากรณีชิ้นงานที่มีการเติมโครเมียม 1% – 5% โดยน้ำหนัก โดยเมื่อเปรียบเทียบโดยระหว่างปริมาณที่เติมเข้าไปในชิ้นงาน จะพบว่าชิ้นงานที่มีการเติมโครเมียมเข้าไปเป็นปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วง 40 ชั่วโมงแรกสูงกว่าชิ้นงาน 2% – 5% โดยน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 2% – 5% โดยน้ำหนัก ในช่วง 40 ชั่วโมงแรกจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงชั่วโมงที่ 60 – 100 ชั่วโมงค่าของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% – 4% โดยน้ำหนักจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานที่เติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนัก พบว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักต่ำที่สุด แสดงในกราฟภาพที่ 4.30 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมีลักษณะเป็นพาราโบลาเช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อนำกราฟมาคำนวณหาอัตราการเกิดออกซิเดชันจะได้ว่าค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันมีค่าอยู่ในช่วง  $1.54 \times 10^{-3} - 2.34 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$  ซึ่งพบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผ่านการเติมโครเมียมจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเติม โดยที่ชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนักจะมีค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุดอยู่ที่  $1.54 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$

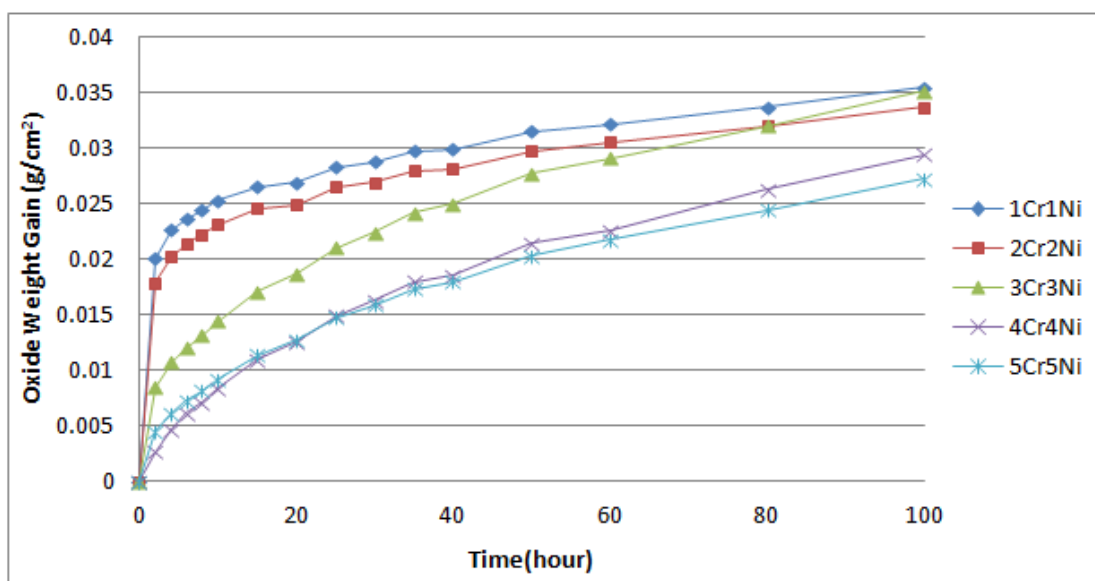


ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมนิกเกิล เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% – 5% โดยน้ำหนัก หลังจากชิ้นงานถูกเผาทดสอบแล้วจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นโดยจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วง 40 ชั่วโมงแรกในทุกปริมาณการเติม แต่ในชั่วโมงที่ 40 – 100 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% – 4% โดยน้ำหนัก จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน ส่วนในชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 5% โดยน้ำหนัก เมื่อครบ 100 ชั่วโมง จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่น้อยกว่ากรณีอื่นชัดเจน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจะสูงมากในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ จากนั้นอัตราจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการทำการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยยังเป็นลักษณะของเส้นโค้งพาราโบลาเช่นเดียวกัน ดังแสดงในกราฟภาพที่ 4.31 เมื่อพิจารณาจากกราฟและลักษณะโครงสร้างจุลภาคจาก SEM และ EDS และ XRD pattern ของชิ้นงานที่เติมนิกเกิลในหัวข้อที่ 4.3.2.3 และพบว่าฟิล์มออกไซด์ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผ่านการเติมนิกเกิลจะมีลักษณะหนากว่ากรณีอื่นอาจเนื่องมาจากเมื่อเติม นิกเกิลเข้าไปทำให้สัดส่วนโดยน้ำหนักของโครเมียมลดลง โดยจากงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่า นิกเกิลมีผลยับยั้งการฟอร์มตัวของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [17] โดยแทนที่จะเกิดเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไปกลับพบว่าเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  อยู่ที่ผิวปริมาณมากแทน และเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เพียงเล็กน้อยแทน ซึ่งประสิทธิภาพในการปกป้องผิวของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะต่ำกว่า  $\text{Cr}_2\text{O}_3$



[20, 21] เป็นสาเหตุทำให้ในช่วงแรกของการทดสอบออกซิเดชันกราฟมีลักษณะชันมากเพราะเกิดออกซิเดชันมาก แต่หลังจากเกิดออกไซด์ขึ้นหนาทำให้การแพร่ของออกซิเจนและโลหะผ่านชั้นออกไซด์จะยากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานลดลงในภายหลัง และเมื่อพิจารณาทางจลนศาสตร์แล้วพบว่า การเกิดออกซิเดชันก็ค่อนข้างเป็นไปตามลักษณะเส้นโค้งพาราโบลา โดยเมื่อคำนวณอัตราการเกิดออกซิเดชันจะได้ว่าค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันจะอยู่ในช่วง  $1.88 \times 10^{-3} - 2.93 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$  โดยชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 5% โดยน้ำหนักมีค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุดอยู่ที่  $1.88 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$  และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดออกซิเดชันระหว่างชิ้นงานที่เติมโครเมียมและชิ้นงานที่เติมนิกเกิลจะเห็นว่าอัตราการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่เติมโครเมียมจะต่ำกว่าชิ้นงานที่เติมนิกเกิล



ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่มีการเติมโครเมียมและนิกเกิล เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1-5% โดยน้ำหนัก ในภาพที่ 4.32 เมื่อผ่านการทดสอบออกซิเดชัน พบว่า ได้ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งพาราโบลาเช่นเดียวกับในกรณีชิ้นงานที่เติมโครเมียมและชิ้นงานที่เติมนิกเกิล โดยลักษณะกราฟของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% และ 2% โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะแนวโน้มคล้ายกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่เกิดขึ้นในกรณีชิ้นงานที่เติมนิกเกิล โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วง 10

ชั่วโมงแรกของการทดสอบ จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจะลดลงเมื่อเวลาที่ทำกรทดสอบเพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 3% – 5% โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะกราฟของการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักคล้ายกับกรณีชิ้นงานที่มีการเติมโครเมียม โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น และเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันเพิ่มขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานจะลดลง แสดงว่าเมื่อปริมาณการเติมธาตุเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีขึ้น เมื่อคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันจะได้ว่าค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันอยู่ในช่วง  $2.09 \times 10^{-3} - 3.40 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$  ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ 5% โดยน้ำหนักจะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุดที่  $2.09 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$  เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลในปริมาณที่ต่ำกว่า

จากลักษณะของกราฟที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการเติม โดยที่ชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% – 2% โดยน้ำหนัก มีลักษณะกราฟคล้ายกับกราฟออกซิเดชันที่เกิดกับชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและ 3% – 5% โดยน้ำหนัก มีลักษณะกราฟคล้ายกับกราฟออกซิเดชันที่เกิดกับชิ้นงานที่เติมโครเมียม อาจพิจารณาได้ว่าหากเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันที่ปริมาณน้อยๆ นิกเกิลจะส่งผลต่อพฤติกรรมของการเกิดออกไซด์มากกว่าโครเมียมโดยจะส่งผลให้เกิดเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  เป็นส่วนใหญ่แทนที่จะเกิดเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เพื่อเป็นฟิล์มปกป้องผิว ในช่วงแรกของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานที่เติม 1% – 2% โดยน้ำหนักจึงให้กราฟที่มีความชันสูงเหมือนกับที่เกิดในชิ้นงานที่เติมนิกเกิล แต่เมื่อเติมปริมาณที่สูงขึ้นโครเมียมจะมีผลต่อพฤติกรรมของการเกิดมากกว่านิกเกิล ซึ่งน่าจะทำให้เกิด  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ได้มากขึ้นในชั้นออกไซด์ จึงทำให้ลักษณะของกราฟออกซิเดชันมีลักษณะคล้ายกับกราฟออกซิเดชันที่เกิดกับชิ้นงานที่เติมโครเมียมมากกว่าแต่ก็ยังพบว่าเกิด  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  เช่นกันเนื่องจากผลของนิกเกิลที่เติมเข้าไปด้วย

โดยการทดลองสำหรับการทดสอบออกซิเดชันนั้นจะเป็นการวัดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ของพื้นที่ผิวชิ้นงาน โดยที่พื้นที่ผิวชิ้นงานได้มาจากการวัดพื้นที่ผิวปรากฏ (Apparent Surface) ซึ่งง่ายต่อการวัด แต่หากจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพื้นที่ผิวจริงของชิ้นงาน (Real Surface) จะมีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวที่วัดได้เนื่องจากผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกรรมวิธีโลหะผงจะมี

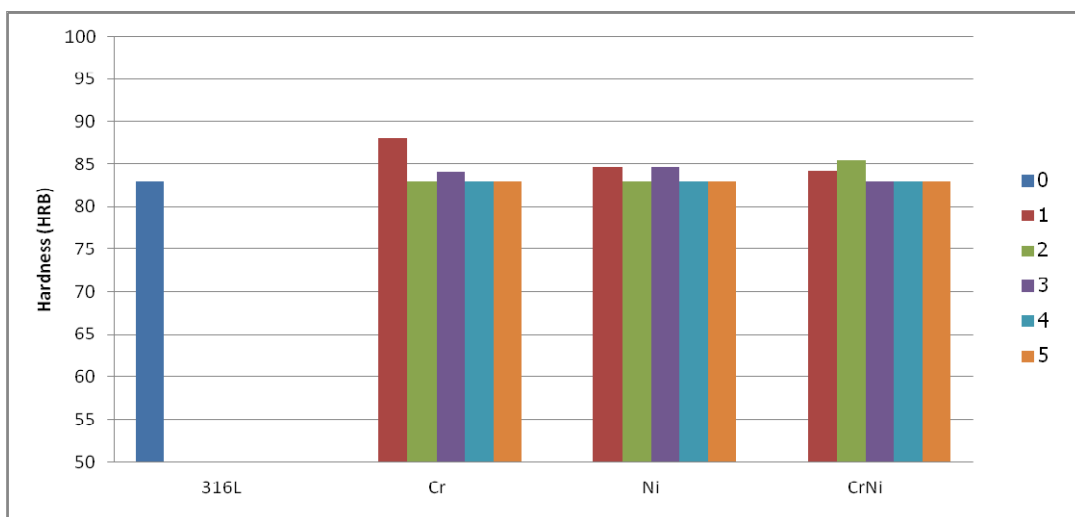
ความหนาแน่นต่ำและมีรูพรุนเปิดซึ่งทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับบรรยากาศภายนอกเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดออกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ผิวนี้ไม่รวมถึงพื้นที่ผิวของรูพรุนที่อยู่ภายในชิ้นงานไม่สามารถวัดได้ซึ่งพบว่ามี การเกิดออกซิเดชันเช่นเดียวกัน ดังนั้นหากจะบอกปริมาณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่จริง ค่าที่ได้คาดว่าจะออกมาต่ำกว่าค่าที่นำมาแสดงผลการทดลอง และหากทำการทดลองในระยะเวลาที่นานขึ้นชิ้นงานที่เติมนิกเกิลอาจให้ผลในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีกว่าเนื่องจากลักษณะกราฟที่เริ่มจะคงที่ในช่วงหลังมากกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียมหรือชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน [17]

#### 4.6 ผลจากการทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงมาแล้ว จะถูกนำมาผ่านการทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell โดยใช้สเกล B ผลที่ได้จากการวัดความแข็งเป็นไปดังกราฟในภาพที่ 4.33

พิจารณาชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% – 5% โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นความแข็งของชิ้นงานจะลดลง โดยชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียม 1% โดยน้ำหนักจะให้ค่าความแข็งที่สูงถึง 88 HRB แต่เมื่อเพิ่มโครเมียมเป็น 2% – 5% โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าค่าความแข็งที่ได้จะลดลงโดยให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 83 HRB ในกรณีชิ้นงานที่เติมนิกเกิลแนวโน้มก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเติมนิกเกิลปริมาณมากขึ้นความแข็งจะลดลง โดยที่ชิ้นงานที่เติมนิกเกิล 1% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าสูงสุดในกลุ่มชิ้นงานที่เติมนิกเกิลแต่ยังให้ค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% โดยน้ำหนัก ซึ่งค่าความแข็งของชิ้นงานนี้อยู่ที่ 84.63 HRB เมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นเป็น 2% – 5% โดยน้ำหนักค่าความแข็งจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 83 HRB ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับชิ้นงานที่เติมโครเมียมและชิ้นงานที่เติมนิกเกิล คือ เมื่อเติมปริมาณโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันเพิ่มขึ้นความแข็งของชิ้นงานจะลดลง ที่ปริมาณโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน 1% และ 2% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งที่ 84.13 HRB และ 85.4 HRB ตามลำดับ เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 3% – 5% โดยน้ำหนักค่าความแข็งก็จะลดลงมาที่ประมาณ 83 HRB ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณและขนาดของรูพรุนและออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน สังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณรูพรุนต่ำกว่าจะให้ค่าความ

แข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณรูพรุนสูง และจากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.3 ลักษณะของรูพรุนในชิ้นงานที่มีมาตั้งแต่ขั้นตอนการเผาผนึก หากมีรูพรุนขนาดใหญ่การเกิดของออกไซด์จะไม่สม่ำเสมอและยังคงเหลือรูพรุนขนาดใหญ่แม้ว่าจะเกิดออกไซด์ขึ้นที่ผิวของรูพรุนก็ตามแต่ไม่สามารถเติมเต็มได้ทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เติมโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิล จะสังเกตได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมให้ค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอของขนาดและการกระจายตัวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน และความแข็งของชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันและชิ้นงานที่เติมนิกเกิลก็มีค่าความแข็งลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 4.36 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และ โครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน

## บทที่ 5

### บทสรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของธาตุโครเมียมและนิกเกิลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยศึกษาการเกิดออกซิเดชันใช้ระยะเวลา 100 ชั่วโมง อีกทั้งยังศึกษาผลต่อความแข็งแรงภายหลังการทดสอบออกซิเดชันด้วย โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ขึ้นรูปโดยกรรมวิธีโลหะผง เมื่อผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ภายหลังจากการเผาขึ้นงานจะมีความหนาแน่นลดลง เมื่อปริมาณการเติมธาตุเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันในทุกกรณี

2. ภายหลังจากการเผาขึ้นงานที่เติมโครเมียมจะให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด รองมาเป็นขึ้นงานที่เติมนิกเกิลและขึ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันตามลำดับ โดยขึ้นงานที่เติมโครเมียมจะมีรูพรุนที่ขนาดเล็ก มีความสม่ำเสมอของขนาดที่สูงกว่ากรณีอื่นและมีปริมาณรูพรุนต่ำที่สุด จึงส่งผลให้ความหนาแน่นสูงและมีค่าความแข็งแรงสูงสุด

3. ภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันขึ้นงานที่ผ่านการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน พบว่าการเกิดออกซิเดชันแปรผกผันกับปริมาณการเติมธาตุโดยเมื่อเติมธาตุเพิ่มขึ้นจาก 1% – 5% โดยน้ำหนัก การเกิดออกซิเดชันจะลดลง

4. ขึ้นงานที่เติมโครเมียมจะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่สูงที่สุด เทียบกับขึ้นงานที่เติมนิกเกิลและขึ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ซึ่งขึ้นงานที่เติมโครเมียม 5% โดยน้ำหนักจะให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด โดยมีค่าอัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุดอยู่ที่  $1.54 \times 10^{-3} \text{ mg}^2/\text{cm}^4 \text{ s}$

5. ขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่เติมโครเมียม นิกเกิล และโครเมียมและนิกเกิลร่วมกันจะให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับขึ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเติมธาตุ โดยขึ้นงานที่

เติมโครเมียมที่ 5% โดยน้ำหนักจะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด รองมาเป็นชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน และชิ้นงานที่เติมนิกเกิลตามลำดับ

6. ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เป็นส่วนใหญ่และมี  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$  เกิดร่วมด้วย โดยพบเหมือนกันทั้งออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนภายในชิ้นงานและออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิว

7. กรณีชิ้นงานที่ผ่านการเติมนิกเกิลและชิ้นงานที่ผ่านการเติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน เมื่อนำไปทดสอบออกซิเดชันแล้วจะพบว่าเมื่อออกไซด์ที่เกิดขึ้นเหมือนกันทั้งออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนภายในชิ้นงานและที่ผิวชิ้นงาน คือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$

8. การเติมนิกเกิลส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยจะยับยั้งการเกิด  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  โดยจะทำให้เกิด  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เป็นหลักแทนซึ่งความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ต่ำกว่า  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ทำให้อัตราการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่เติมนิกเกิลจะสูงกว่าชิ้นงานที่เติมโครเมียม

9. ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเติมโครเมียมจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด โดยรองมาเป็นชิ้นงานที่เติมนิกเกิลและชิ้นงานที่เติมโครเมียมและนิกเกิลร่วมกัน ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณการเติมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งชิ้นงานที่เติมโครเมียม 1% โดยน้ำหนักจะมีความแข็งแรงที่สุด เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กและความสม่ำเสมอของขนาดและการกระจายตัวที่ดี เมื่อเกิดออกไซด์ขึ้นภายในรูพรุนจึงมีขนาดเล็กและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ จึงทำให้มีความแข็งแรงที่สูงกว่าชิ้นงานอื่นๆ

## รายการอ้างอิง

- [1] Davis, J.R. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steels**. Material Park. OH: ASM International, 1996.
- [2] **Stainless Steel Spacialist Course 'Understanding Stainless Steel and Its Properties'**. Brussels: International Stainless steel Forum, 2002. (Unpublished Manuscript)
- [3] Béla, L. **Stainless-stainless steels and their properties**. (Unpublished Manuscript)
- [4] Cheng, X.N., Dai, Q.X., Wang, A.D., and Cheng, L. **Effect of alloying elements and temperature on impact toughness of cryogenic austenitic steels**. Department of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, 2000.
- [5] Elnura, G. **Comparison of Corrosion Resistance between 316 and Different Duplex Stainless Steel**. Master's Thesis, University of Stavanger, 2001.
- [6] Kelly, J. **Heat resistance alloys ra<sup>®</sup> ROLLED ALLOYS The world's heat corrosion, Titanium and aerospace alloy specialists**. Director of Technology.
- [7] Kovach, C.W. **High Performance Stainless Steels**. Pittsburgh: Nickel Development Institute.
- [8] Jones, R.H., Bruemmerand, S.M., and Danielson, M.J. **Austenitic Stainless Steels**, Washington: Pacific Northwest National Laboratory.
- [9] Khanna, A.S. **High Temperature Oxidation and Corrosion**. United States of America: ASM International. 2002.
- [10] Per Kofstad. **High Temperature Oxidation of Metal**. United States of America: John Wiley & Sons, 1966.

- [11] Tverberg, J.C. **The Role of Alloying Elements on The Fabricability of Austenitic Stainless Steel**. Wisconsin: Metals and Materials consulting Engineers.
- [12] Salak, A., Selecka, M., and Danninger, H. **Machinability of powder metallurgy steels**. Vienna: Vienna Technical University.
- [13] Cubberly, W.H. et al. **ASM Handbook : Metals Handbook Volume 7 Powder Metallurgy**. United States of America: ASM International, 1993.
- [14] Kurgan, N., and Varol, R. Mechanical Properties of P/M 316L Stainless steel materials. **Powder Technology** 201 (2010): 242-247.
- [15] Buscail, H. et al. (2008). Characterization of the Oxides Formed at 1000°C on the AISI 316L Stainless Steel – Role of Molybdenum. **Material Chemistry and Physics** 111 (2008): 491-498.
- [16] Wasnik, D.N., Dey, G.K., Kain, V., and Samajdar, I. Precipitations Stages in 316L Austenitic Stainless Steel. **Scripta Materialia** 49 (2003): 135-141.
- [17] Bautista, A., Velasco, F., Campos, M., Rabanal, M.E., and Torralba, J.M. Oxidation Behavior at 900°C of Austenitic Ferritic and Duplex Stainless Steels Manufactured by Powder Metallurgy. **Oxidation of Metal** 59 (2002): 373-393.
- [18] Bautista, A., Velasco, F., and Abenojar, J. (2003) Oxidation Resistance of Sintered Stainless Steels: Effect of Yttria Additions. **Corrosion Science** 45 (2003): 1343-1345.
- [19] ไสว ด่านชัยวิจิตร. **เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 2109533 Powder Metallurgy**. (เอกสาร  
ไม่ตีพิมพ์)



- [20] Habib, K.A., Damra, M.S., Saura, J.J., Cervera, I., and Belles, J. Breakdown and Evolution of the Protective Oxide Scales of AISI 304 and AISI 316 Stainless steels under High-Temperature Oxidation. **International Journal of Corrosion**. (2011)
- [21] Asteman, H., Svensson, J.E., and Johansson, J.G. Evidence for Chromium Evaporation Influencing the Oxidation of 304L: Effect of Temperature and Flow Rate. **Oxidation of Metal** 57 (2002): 193 – 216.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล** : นางสาวญดา พลเสน
- วัน - เดือน - ปีเกิด** : วันศุกร์ที่ 10 กรกฎาคม 2530
- ที่อยู่** : บ้านเลขที่ 117/62 ซอยงามวงศ์วาน แยก 6-2-9 ถนนงามวงศ์วาน  
แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
- วุฒิการศึกษา** : เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนหอวัง ปีการศึกษา 2543  
: เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549  
: เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553
- อีเมล** : yada\_polsen@hotmail.com