

ผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่อโครงสร้างจุลภาค
ความแข็ง และความต้านทานการดัดโค้ง

นางสาวนันทวัน พิชัยวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

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.

EFFECTS OF Ni AND Co IN P/M STAINLESS STEEL 316L ON MICROSTRUCTURES,
HARDNESS AND BENDING STRENGTH

Ms. Nantawan Pichaiwong

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานการดัดโค้ง
โดย	นางสาวนันทวัน พิชัยวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล)

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

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

นันทวัน พิษัยวงศ์ : ผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ในโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่อการเกิดเฟสซิกมา ความแข็ง และความต้านทานการดัดโค้ง. (EFFECTS OF Ni AND Co IN P/M STAINLESS STEEL 316L ON SIGMA PHASE FORMATION, HARDNESS AND BENDING STRENGTH) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. ปัญญวัชร วัชยาว,อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ. ดร.ณัฐจิตา ชวนเกริกกุล,125หน้า.

งานนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งถูกผลิตด้วยกรรมวิธีทางโลหะผสม เพื่อดูผลต่อปริมาณเฟสซิกมา และสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดัดโค้ง และความแข็ง โดยที่ผงที่ผสมแล้วจะถูกอัดแบบทิศทางเดียวด้วยแรงอัด 498 MPa แล้วเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน จากนั้นนำไปผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 50 75 100 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าธาตุโคบอลต์ และนิกเกิล สามารถช่วยลดปริมาณการเกิดเฟสซิกมาได้ ชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์รูปทรงแท่งในชิ้นงานมีขนาดเล็กสุด ประกอบกับธาตุโคบอลต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (stiffness) ให้กับเนื้อพื้น จึงทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งมากที่สุด นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนยังมีออกไซด์ที่ขึ้นมาปิดรูปทรงแท่ง ทำให้รูปทรงแท่งมีขนาดและปริมาณลดลง แต่แนวโน้มของขนาดและปริมาณรูปทรงแท่งยังคงมีแนวโน้มที่ลดลงเป็นสัดส่วนจากขนาดและปริมาณของรูปทรงแท่งเดิมอยู่ ซึ่งออกไซด์ที่พบหลักๆในเนื้อเมทริกซ์ได้แก่ Fe_3O_4 และ Cr_2O_3 ประกอบกับมีเฟสซิกมาเกิดขึ้นทำซึ่งมีสมบัติแข็งแต่เปราะ ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน แต่ทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งลดลง นอกจากนี้ยังเกิดออกไซด์ที่ผิวของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ซึ่งออกไซด์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้แก่ Cr_2O_3 ($Fe_{0.6}Cr_{0.4}$) $_2O_3$ Fe_3O_4 และ Fe_2O_3

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา..2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370267421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : 316L stainless steel / Sigma phase / Powder Metallurgy

NANTAWAN PICHAIWONG : EFFECTS OF Ni AND Co IN P/M STAINLESS STEEL 316L ON SIGMA PHASE FORMATION, HARDNESS AND BENDING STRENGTH. ADVISOR : Ing. PANYAWAT WANGYAO, Ph.D. , CO-ADVISOR : NUTTHITA CHUANKRERKKUL, Ph.D., 125 pp.

The effects of various Ni and Co additions in P/M 316L stainless steel on sigma phase formation and mechanical properties such as bending strength and hardness were investigated. Powder mixtures were compacted using single action press under 498 MPa and sintered at 1300 °C for 30 minutes in hydrogen atmosphere. Specimens were exposed at temperature of 800 °C and 900 °C for 25 50 75 and 100 hours. It was found that specimens with Co and Ni additions could reduce amount of sigma phase formation. Due to specimens with Co addition had minimum pores sizes and Co also increases matrix stiffness, thus the specimens have the highest average bending strength. After all heat treatments, oxide scale had grown in closed pores during heating, therefore, the amount and size of porosity were decreased. However, the amount and size of porosity of heated specimens still have same tendency as sintered specimens. The oxide scale in the matrix is composed of Fe_3O_4 and Cr_2O_3 in the closed pores. The reducing in amount and size of porosity and sigma phase formation after long-term heating provided in higher hardness comparing to those of sintered specimens. Furthermore, long-term heating at 900 °C for 100 hr provided slightly decreasing in bending strength. This was due to that the detrimental effect of an increase of sigma phase, which provides more brittle behavior. Furthermore, it has been shown that 100 hour-oxidation at 800 and 900 °C in the air atmosphere leading to the presence of Cr_2O_3 ($\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4}$) $_2\text{O}_3$ Fe_3O_4 and Fe_2O_3 in the oxide scales.

Department : Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study : Metallurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำ และความช่วยเหลือของ อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอด ความรู้ คำแนะนำทั้งลำดับขั้นตอนการทำงาน วิธีการคิดการแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทางการ ดำเนินงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรอง ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.เรืองเดช ธงศรี ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในตำราและการใช้ชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยให้ กำลังใจข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมาหาบัณฑิต ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณศรีไฉล ขุนทน เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง XRD คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเอื้อเฟื้อเครื่องอัดชิ้นงานและ เครื่องวัดความแข็ง Rockwell ขอขอบพระคุณ คุณภาณุ เวทยานุกุล คุณมนภาส มรกฏจินดา และ บุคลากรของหน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุผง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ช่วย เอื้อเฟื้อเตาเผาแบบไฮโดรเจน และขอขอบพระคุณ คุณภัทรญา สระบัว เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคุณพีรญา พิพัฒน์กุล เจ้าหน้าที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้า แห่งประเทศไทย ที่ช่วยวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง SEM-EDS จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้ความ รัก กำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่ร่วมศึกษา ในระดับปริญญาโทมาหาบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กับข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.1 การผลิตผง.....	3
2.2 เทคนิคในการหาขนาดผง.....	4
2.3 ความหนาแน่นของผง.....	8
2.4 การอัดผง.....	9
2.5 การเผาผนึก.....	10
2.6 อัตราการเย็นตัว.....	15
2.7 การควบคุมปริมาณคาร์บอน.....	16
2.8 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการเผาผนึก.....	16
2.9 การนำไปใช้งานและการเลือกโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม.....	19
2.10 เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง.....	23

บทที่	หน้า
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	33
3.1 วัสดุ.....	33
3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน.....	33
3.3 เครื่องวิเคราะห์ผล.....	34
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	39
4.1 ลักษณะทั่วไปของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	39
4.2 ผลของการเติมธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ต่อลักษณะทั่วไปของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	41
4.2.1 ลักษณะทั่วไปของผงนิกเกิล และโคบอลต์.....	41
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	43
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	44
4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิล 1 - 4%โดยมวล.....	45
4.2.5 ผลของธาตุโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	46
4.2.6 ผลของธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	47
4.2.7 ผลของธาตุนิกเกิลต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	48

4.2.8 ผลของธาตุникเกิดและโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความ แข็งและความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	50
4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	52
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ โคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	54
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุникเกิด 1 - 4%โดยมวล.....	56
4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุникเกิด และโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	56
4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความ ร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	59
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	60
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมธาตุникเกิด 1 - 4%โดยมวล.....	61
4.4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมธาตุникเกิด และโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล.....	64
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี EDS ในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	66
4.5 ผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ในเนื้อพื้น โลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	70
4.5.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดเฟสต่างๆในเนื้อพื้นโลหะผง เหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	74
4.5.2 ผลของธาตุникเกิดและโคบอลต์ต่อการเกิดเฟสต่างๆในเนื้อพื้นโลหะผง เหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	75

บทที่	ญ หน้า
4.6 ผลของธาตุต่อลักษณะรูปพรรณที่เกิดขึ้นในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลัง ผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส.....	79
4.7 ผลของธาตุต่อสมบัติทางกลในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	84
4.7.1 ผลของธาตุต่อความต้านทานแรงดัดโค้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	84
4.7.2 ผลของธาตุต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	85
4.7.3 ผลของธาตุต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	87
4.8 การวิเคราะห์ห่ออกไซด์ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	90
5 สรุปผลการทดลอง.....	96
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	107
ภาคผนวก ง.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบลักษณะของผงที่ได้ หลังผ่านกระบวนการผลิตผงที่แตกต่างกัน.....	4
2.2	ส่วนผสมของผงเหล็กกล้าไร้สนิม.....	16
2.3	สมบัติทางกลของผงเหล็กกล้าไร้สนิม.....	17
2.4	การใช้งานโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม.....	21
2.5	เวลาในการแตกหักที่อุณหภูมิและความเค้นต่างกัน.....	27
2.6	เฟสที่ตกตะกอนระหว่างการศึกษการบ่ม (Ageing) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	32
3.1	เงื่อนไขชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2	เงื่อนไขการทดลอง.....	37
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	40
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงโคบอลต์ และนิกเกิล.....	43
4.3	แสดงสมบัติทางกลของนิกเกิลเปรียบเทียบกับของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	50
4.4	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	55
4.5	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิล 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	57
4.6	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิล และโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	58
4.7	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	62

ตารางที่	หน้า	
4.8	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุไนคเกิล 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	63
4.9	ภาพโครงสร้าง จุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุไนคเกิลและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	65
4.10	ตารางเปรียบเทียบอัตราส่วนความสูงของพีคแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซด์กับความสูงพีคของเนื้อพื้น.....	77
4.11	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง.....	80
4.12	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง.....	81
ข.1	แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน.....	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงลักษณะกระบวนการ Sieve.....	5
2.2	แสดงผลของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผืนที่ต่อ อสมบัติทางกลของ เหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	11
2.3	แสดงผลของอุณหภูมิเผาผืนที่มีต่อความยืด (Elongation) และการเปลี่ยนแปลง ขนาดระหว่างการเผาผืนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	12
2.4	แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการเผาผืนที่มีต่อความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ของ เหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	12
2.5	แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการเผาผืนที่มีต่อความยืด (Elongation) และ การเปลี่ยนแปลงขนาดระหว่างการเผาผืนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	13
2.6	กราฟออกซิเดชัน – รีดักชันของโครเมียมออกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจน.....	15
2.7	สมบัติด้านแรงดึงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	18
2.8	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L.....	19
2.9	แสดงชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม.....	20
2.10	โลหะผงประเภทรูพรุน.....	22
2.11	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ejector pad ซึ่งถูกใช้ในตัวทำน้ำแข็งอัตโนมัติใน ตู้เย็น.....	22
2.12	ส่วนของเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์จากโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L.....	22
2.13	ผลของโครเมียมที่มีต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมที่อุณหภูมิคงที่.....	24
2.14	ความต้านทานการเกิดสเกลของโลหะผสมที่มีปริมาณนิกเกิลต่างกัน.....	24
2.15	ผลการบ่มของโลหะผสมที่มีโครเมียมต่างกันที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส.....	28
2.16	แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการบ่มต่อการเกิดเฟสซิกมา ในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 310 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (อบอ่อน).....	30
2.17	กราฟ TTP และ TTS ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	32
4.1	ภาพถ่ายลักษณะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ก) ที่กำลังขยาย 300 เท่าและ ข) ที่กำลังขยาย 700 เท่า.....	40

ภาพที่	หน้า
4.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน.....	40
4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน.....	41
4.4 ภาพถ่ายลักษณะผิงเกิด ก) ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ ข) ที่กำลังขยาย 300 เท่า.....	42
4.5 ภาพถ่ายลักษณะผิงโคบอลต์ ก) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ข) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	42
4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน..	44
4.7 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุผิงเกิดและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน.....	45
4.8 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุผิงเกิด 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน....	46
4.9 กราฟแสดงผลของธาตุโคบอลต์ในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	47
4.10 กราฟแสดงผลของธาตุทั้งโคบอลต์และผิงเกิดในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	48
4.11 กราฟแสดงผลของธาตุผิงเกิดในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	49

ภาพที่	หน้า
4.12 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุไนกเกิล 4%โดยมวล โดยผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	50
4.13 แสดงผลธาตุไนกเกิลและโคบอลต์ต่อสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	52
4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	53
4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง.....	54
4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	59
4.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง.....	60
4.18 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง.....	66
4.19 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจ จสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	67
4.20 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะ ผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุไนกเกิล 1% โดยมวล โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 ชั่วโมง.....	69

ภาพที่	หน้า	
4.21	แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	71
4.22	กราฟแสดงผลธาตุโครเมียมต่อการเกิดออกซิเดชัน และโครงสร้างออกไซด์.....	72
4.23	กราฟ Ellingham.....	73
4.24	แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 100 ชั่วโมง.....	74
4.25	แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	75
4.26	ผลของธาตุ निकเกิดและโคบอลต์ต่อสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	76
4.27	ผลของธาตุ निकเกิดและโคบอลต์ต่อสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	76
4.28	แสดงผลของธาตุต่อสัดส่วนโดยพื้นที่รูปพูนที่เกิดขึ้นในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	83
4.29	แสดงผลของธาตุต่อความต้านทานแรงดัดโค้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	85
4.30	กราฟแสดงค่าความแข็งของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	86
4.31	กราฟแสดงค่าความแข็งของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	88
4.32	แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) บริเวณผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	90
4.33	แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	92

ภาพที่	หน้า
4.34 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	92
4.35 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	93
4.36 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	93
4.37 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	94
4.38 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	94
4.39 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง...	95
4.40 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง...	95
ก.1 แสดงผลการวัดขนาดผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	102
ก.2 แสดงผลการวัดขนาดผงนิกเกิล.....	103
ก.3 แสดงผลการวัดขนาดผงโคบอลต์.....	104
ค.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	107

ภาพที่	หน้า
ค.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	107
ค.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	108
ค.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	108
ค.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	109
ค.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	109
ค.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	110
ค.8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	110
ค.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	111
ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันได้มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ มาใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกลและส่วนต่างๆ ในโรงงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงกว่าเหล็กและเหล็กกล้าประเภทต่างๆ [1-3] นอกจากนี้การนำเทคโนโลยีด้านโลหะผงเข้ามาใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิมยังสามารถปรับปรุงด้านความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Homogeneity) ทำให้ได้ให้ขนาดเกรนที่ละเอียด และให้ขนาดใกล้เคียงความต้องการมากที่สุด (Near-net shape) [3-5]

เหล็กกล้าไร้สนิมคือโลหะผสมที่มีนิกเกิลและโครเมียมสูง และเป็นตัวเลือกแรกที่จะนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากนิกเกิลมีความสำคัญต่อโลหะผสมที่มีความต้านทานที่อุณหภูมิสูงหลายชนิด [2-3] อย่างไรก็ตามการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ และส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีทางโลหะผงอาจให้ผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงแตกต่างออกไปจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตด้วยวิธีอื่น การเติมนิกเกิลและโคบอลต์ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับเฟสออสเทนไนต์ นอกจากนี้การเติมธาตุด้วยโคบอลต์เข้าไปยังช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากเนื้อจากความร้อน และสามารถเพิ่มความแข็งแรงในเนื้อพื้นได้อีกด้วย [2-3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานภาคอุตสาหกรรมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L หรือใช้งานเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น โดยการทดลองเติมนิกเกิลและโคบอลต์ในปริมาณต่างๆกันด้วยวิธีทางโลหะผง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูง และผลต่อสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็ง และความต้านทานการดัดโค้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L
- 1.2.2 ศึกษาผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ต่อค่าความแข็ง และความต้านทานการตัดโค้งแบบ 3 จุด
- 1.2.3 ศึกษาชนิดของออกไซด์ฟิล์มจากผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์

1.3 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาผลของธาตุผสมต่อการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน
- 1.3.2 ศึกษาผลของธาตุผสมต่อปริมาณรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L
- 1.3.3 ศึกษาผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ต่อลักษณะทั่วไป ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค และชนิดของออกไซด์ฟิล์ม
- 1.3.4 ศึกษาผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานการตัดโค้ง และค่าความแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L
- 1.4.2 ทราบผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ต่อค่าความแข็ง และความต้านทานการตัดโค้งแบบ 3 จุด
- 1.4.3 ทราบชนิดของออกไซด์ฟิล์มจากผลของธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

วิทยาการโลหะผงของเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นตัวแทนที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญและความรุ่งเรืองของอุตสาหกรรมโลหะผง ช่วงต้นศตวรรษอุตสาหกรรมโลหะผงในอเมริกาเหนือมีปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นเกือบ 20 เปอร์เซ็นต์คือประมาณ 2,000 ตัน/ปี (ปี 1987) ปัจจุบันผลผลิตของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมในทวีปอเมริกาเหนือประมาณ 3,000 ตัน/ปี [3]

ผงโลหะของเหล็กกล้าไร้สนิมทุกเกรดผลิตมาจากกระบวนการ (Atomization) ผงส่วนใหญ่ที่ถูกอัด แล้วเผาผนึก จะทำมาจากกระบวนการ water atomization ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ได้ผงที่มีรูปร่างไม่แน่นอนทั้งหมด gas (nitrogen) atomization จะให้ผงที่มีลักษณะเป็นทรงกลม สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการความหนาแน่นสูง [3]

2.1 การผลิตผง [5]

การผลิตผงแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- 2.1.1 วิธีทางกล (Mechanical methods) มักใช้ผลิตผงเซรามิก เช่น การใช้ลูกบด (Ball mill)
- 2.1.2 วิธีทางเคมี (Chemical methods) เป็นการทำผงโดยการเกิดปฏิกิริยา
- 2.1.3 วิธีทางฟิสิกส์ (Physical methods) ผงโลหะส่วนใหญ่ผลิตด้วยวิธีนี้ วิธีที่สำคัญในการผลิตคือ Atomization เทคโนโลยีนี้เริ่มในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยการทำให้วัสดุเหลวแตกกระจายออกเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งปกติต้องเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร ถ้าได้เม็ดใหญ่กว่านี้จะเรียกว่า Shooting atomization แบ่งเป็น 5 แบบใหญ่ๆคือ
 - 2.1.3.1 Water atomization คือการใช้น้ำที่มีความดันสูงเป็นตัวทำให้วัสดุแตกกระจาย
 - 2.1.3.2 Gas atomization คือการใช้อากาศที่มีความดันสูงเป็นตัวทำให้วัสดุเหลวแตกกระจาย แบบที่ 1 และแบบที่ 2 อาจเรียกรวมกันว่า Two fluid atomization

2.1.3.3 Centrifugal atomization คือแบบที่ใช้แรงเหวี่ยง มีหลายแบบเช่น Spinning disk, Spinning cup และ Rotating electrode

2.1.3.4 Vacuum atomization คือการทำ atomization ในสุญญากาศ

2.1.3.5 Ultrasonic atomization คือใช้พลังงาน Ultrasonic ไปทำให้เกิดการแตกกระจายของวัสดุเหลว

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะของผงที่ได้ หลังผ่านกระบวนการผลิตผงที่แตกต่างกัน [5]

Water atomization	Gas atomization
รูปร่างผิดปกติ	รูปร่างกลม
มีออกไซด์ที่ผิวมาก	ถ้าใช้ก๊าซเฉื่อยจะมีออกไซด์ที่ผิวน้อย
มีค่าใช้จ่ายสูง	ค่าใช้จ่ายต่ำ

2.2 เทคนิคในการหาขนาดผง [5]

2.2.1 กล้องจุลทรรศน์

2.2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope) ใช้หาผงที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5-100 ไมโครเมตร ข้อเสีย จำนวนผงที่ใช้มีจำนวนน้อย อาจไม่ใช่ตัวแทนของทั้งหมด

2.2.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy) ใช้หาขนาดของผงช่วง 1-0.1 ไมโครเมตร

2.2.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ใช้หาขนาดของผงที่มีขนาดในช่วง 0.001-5 ไมโครเมตร ข้อเสีย การเตรียมตัวอย่างยาก

2.2.2 การวิเคราะห์ผงด้วยตะแกรง (Sieve analysis)

ใช้ตะแกรงร่อนซึ่งรูตะแกรงมีหลายขนาด เรียกว่า Mesh number บอกว่าระยะ 1 นิ้วมีจำนวนกี่ช่อง ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งระหว่างการร่อนจะมีเครื่องช่วยสั่นตะแกรง ปัญหาที่พบคือ

- ผงขนาดใหญ่จะไปอุดรูไว้ทำให้ผงขนาดเล็กผ่านไปไม่ได้ เกิดการ overload
- ตะแกรงขาด
- ผงรูปร่างประหลาดอาจตกลงไปได้ในบางทิศทาง



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะกระบวนการ Sieve [5]

2.2.3 การวิเคราะห์ผงโดยการตกตะกอน (Sedimentation)

ปล่อยให้ผงค่อยๆตกตะกอนในของเหลวโดยตกลงมาด้วยความเร็วคงที่

ข้อเสียคือ

- ใช้กับผงที่มีขนาดเล็กได้ (น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร) เพราะผงขนาดใหญ่จะตกตะกอนเร็วเกินไป แต่ถ้าขนาดผงเล็กเกินไปก็จะตกตะกอนช้ามาก
- ผงที่มีรูพรุน ค่าที่คำนวณได้ขนาดจะเล็กกว่าของจริง
- อุณหภูมิขึ้นลงทำให้เกิดการแกว่งของผงขนาดเล็กได้

2.2.4 การวิเคราะห์ด้วยใช้แสง (Optical sensing)

2.2.4.1 การกระเจิงแสง (Light scattering)

หลักการ คือ มุมของแสงที่กระเจิง หรือหักเห จะเป็นสัดส่วนกลับกับขนาดของผง ขนาดของผงที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 0.1-200 ไมโครเมตร ใช้แสงเลเซอร์ฉายไปยังผงตัวอย่าง ซึ่งแขวนลอยอยู่ในของเหลว แสงที่หักเหออกมาจะถูกโฟกัสลงบนเครื่องตรวจจับ (detector) แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วประมวลผลออกมาเป็นตัวเลขของขนาดผง

ข้อเสีย

- ความหนาแน่นของผงต้องต่ำ เพื่อป้องกันการกระเจิงของแสงซ้ำซ้อน
- รูปร่างผงกลม
- ขนาดผงใหญ่เกินไปการกระเจิงของแสงจะน้อย หากเล็กใกล้เคียงกับความยาวคลื่นก็จะมีปัญหา

2.2.4.2 การบังแสง (Light blocking)

หลักการ คือ ผงที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวจะบังแสง แสงจะส่องผ่านช่องระหว่างผง ซึ่งความเข้มของแสงมาก จะขึ้นอยู่กับขนาดผง ถ้าความเข้มของแสงน้อย ขนาดผงใหญ่ ขนาดผงที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 2-400 ไมโครเมตร

ข้อเสีย

- ถ้ามีผงหลายผงเข้าบริเวณที่ทำการตรวจจับในเวลาเดียวกัน
- ขนาดผงใหญ่มักจะตกตะกอนก่อนทำให้ตรวจวัดไม่ทัน แก้โดยการกวนหรือใช้ความเร็วของของไหลหลายๆ
- ขนาดเท่ากันแต่รูปร่างต่างกันบ่งแสงไม่เท่ากัน

2.2.5 Electro-zone size analysis

ผงจะถูกแขวนลอยอยู่ในของเหลวซึ่งนำไฟฟ้า จากนั้นของเหลวจะถูกดูดเข้าไปใน Sampling chamber โดยผ่านรูเล็กๆซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จะอยู่คนละด้านกับรูนี้ เมื่อผงผ่านรูนี้จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยน เกิดเป็น voltage pulse ขนาดของ pulse ขึ้นกับปริมาตรของผง วัดออกมาเป็น equivalent spherical volume diameter ขนาดผงที่วัดได้ อยู่ในช่วง 0.4-400 ไมโครเมตร

ข้อเสีย

- อิเล็กโทรไลต์ต้องไม่มีสิ่งเจือปน
- ผงขนาดใหญ่จะแขวนลอยอยู่ในของเหลวแบบไม่สม่ำเสมอ
- ออกไซด์ที่ผิวของผงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด เพราะจะทำให้ Pulse มีขนาดเล็ก
- ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย
- Resolution สูง และเที่ยงตรงมากเพราะมีผลข้างเคียงน้อย

2.3 ความหนาแน่นของผง [5-6]

2.3.1 ความหนาแน่นทางทฤษฎี หมายถึง ความหนาแน่นของวัสดุที่ไม่รวมรูพรุนทุกชนิด

2.3.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk density; P_B) ค่าความหนาแน่นที่ได้จากน้ำหนักของวัสดุหารด้วยปริมาตรที่รวมรูพรุนเปิดและปิด โดยวิธีการหา (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 373) ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) เริ่มจากการวัดน้ำหนักแห้ง (dry weight) ของชิ้นงาน (W_1) ต้มในน้ำเป็นเวลาห้าชั่วโมงก่อนทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงให้อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งน้ำหนักแทนที่น้ำ (W_2) ซึ่งน้ำหนักอีกครั้งเป็นน้ำหนักอิมมersion (W_3) โดยเช็ดชิ้นงานกับฟองน้ำหมาดๆก่อนเพื่อซับน้ำส่วนที่เกินออก จากความสัมพันธ์

$$P_B = W_1 / (W_3 - W_2) \quad \text{g/cm}^3$$

2.3.3 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density; P_A) ค่าความหนาแน่นที่ได้จากน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรที่รวมรูพรุนปิดแต่ไม่รวมรูพรุนเปิด จากความสัมพันธ์

$$P_A = W_1 / (W_1 - W_2) \quad \text{g/cm}^3$$

ปัจจัยที่มีผลต่อ Apparent density ได้แก่

2.3.1.1 ขนาดผง ผงขนาดเล็ก Apparent density จะลดลง เพราะ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นทำให้ความเสียดทานมีมากขึ้น แต่ถ้าผงมีรูปร่างกลมความเสียดทานจะน้อย ขนาดของผงก็จะไม่ส่งผลต่อ Apparent density

2.3.1.2 รูปร่างผง ยิ่งเป็นทรงกลมมาก Apparent density ยิ่งมาก เพราะ ความเสียดทานลดลงและความเป็นระเบียบในการเรียงตัวมากขึ้น

2.3.1.3 ความเรียบของผิวลดลง Apparent density เพิ่มขึ้น

2.3.1.4 การกระจายตัวของขนาดผง (particle size distribution) ถ้ามีค่ามาก Apparent density เพิ่ม

2.3.2 Tap density คือ ความหนาแน่นหลังจากเคาะหรือสั่นผงการอัดผง (Powder compaction)

2.4 การอัดผง (Powder compaction) [5]

2.4.1 วิธีในการอัดผง

การอัดผงจากแรงภายนอกมี 4 วิธีหลักได้แก่

2.4.1.1 การอัดผงในทิศทางเดียว (Pressing powders in rigid dies)

2.4.1.2 การอัดผงรอบทิศทาง (Isostatic pressing of powders in flexible envelopes)

2.4.1.3 การอัดรีด (Roll compacting of powders into sheet or strip)

2.4.1.4 การอัดฉีด (Extrusion of powder products)

2.4.2 ลักษณะการแพคของผงเมื่อถูกอัด (Packing characteristics)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพคตัวของผง

2.4.2.1 ขนาดผง

2.4.2.2 รูปร่างของผง

2.4.2.3 ความเรียบผิวของผง

2.4.2.4 การกระจายตัวของขนาดผง (particle size distribution)

ปัจจัยทั้ง 4 จะมีผลต่อ Apparent density ผงที่มีขนาดเล็ก รูปร่างไม่กลม มีความเรียบผิวน้อย จะทำให้ความเสียดทานมีมาก และ Apparent density ต่ำ

2.4.3 การแพคตัวของผงขนาดเดียว (Packing mono-sized spherical powder)

2.4.4 การแพคตัวของผง 2 ขนาดต่างกัน (Packing in binary mixture)

2.4.4.1 มีผงขนาดเล็กอยู่มาก และมีผงขนาดใหญ่กระจายอยู่

2.4.4.2 มีผงขนาดใหญ่อยู่มาก และมีผงขนาดเล็กแทรกอยู่

2.4.5 ความเค้นแรงอัด และผลการกระจายตัวของความหนาแน่น

2.5 การเผาผนึก (Sintering) [3, 5]

การเผาผนึก คือ กระบวนการซึ่งผงที่อัดตัวกันแน่นเปลี่ยนเป็นเนื้อเดียวกัน แรงที่เป็นตัวผลักดันให้เกิดการเผาผนึกคือ ความแตกต่างกันของพลังงานพื้นที่ผิวของผง

2.5.1 กลไกการเผาผนึกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

2.5.1.1 การเกิดขึ้นของคอ มีการลดลงของพื้นที่ผิว แต่อาจจะเกิดหรือไม่เกิดการหดตัวหรือเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น โดยพื้นที่ผิวโค้งเป็นตัวขับเคลื่อน (driving force)

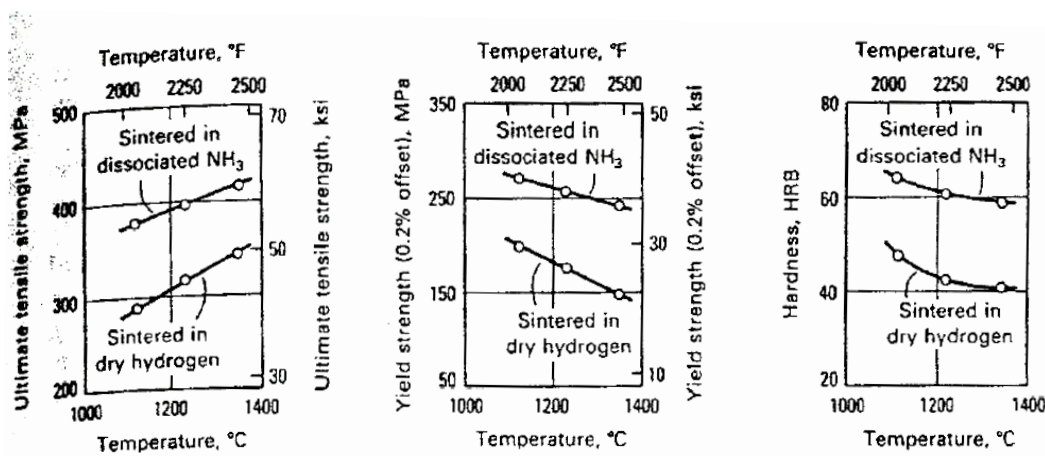
2.5.1.2 การโตขึ้นของคอ ช่องว่างมีความต่อเนื่องตามขอบเกรน โครงสร้างมีลักษณะของเกรนมากกว่าผง โดยมีการลดลงของพื้นที่ผิวและพลังงานของขอบเกรนเป็นตัวขับเคลื่อน (driving force)

2.5.1.3 การขจัดรูพรุน เป็นขั้นตอนที่ช้าสุด ช่องว่างแยกตัวและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำให้อัตราการเผาผนึกลดลงอย่างมาก เกรนโตขึ้น และการเผาผนึกเสร็จสมบูรณ์ในขั้นตอนนี้ [4]

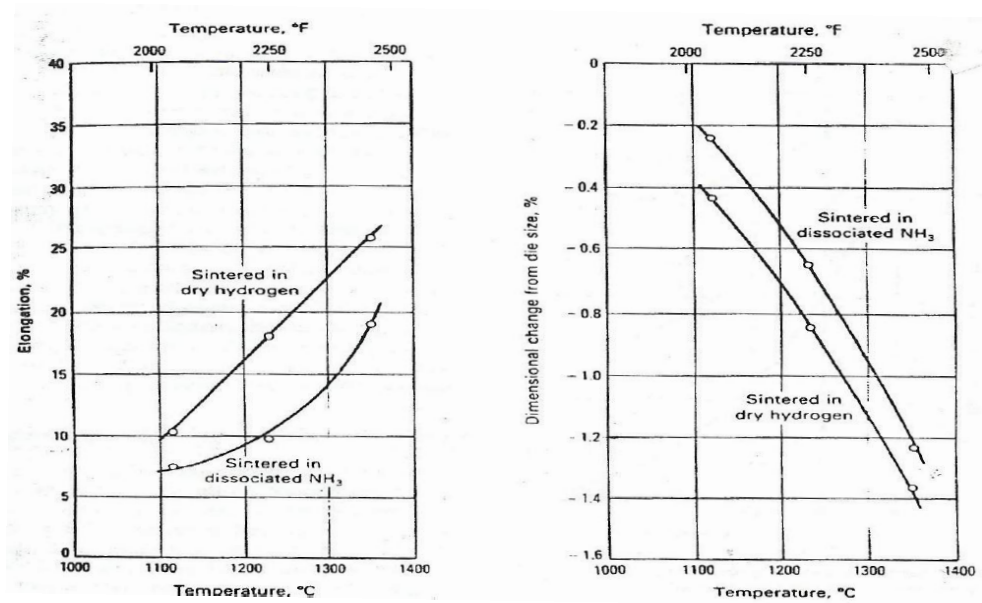
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการเผาผนึกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ลดเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการเผาผนึกเพิ่มขึ้น หลังจากที่ผิวออกไซด์ถูกทำให้ลดลงจากการโตขึ้นของคอ และทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น แต่อัตราการโตมีผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันในการเผาผนึก โดยการโตของคอขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิและเวลา ขนาดเกรนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การโตของคอทำให้ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) และ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากการเชื่อมกันของผงหรือการโตของคอ อย่างไรก็ตามความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield

strength) ลดลงเมื่อขนาดเกรนเพิ่มขึ้น ผลทั้งสองนี้รวมกันเพิ่มความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิการเผาผนึก และเพิ่มความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) เมื่อเพิ่มเวลา แต่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

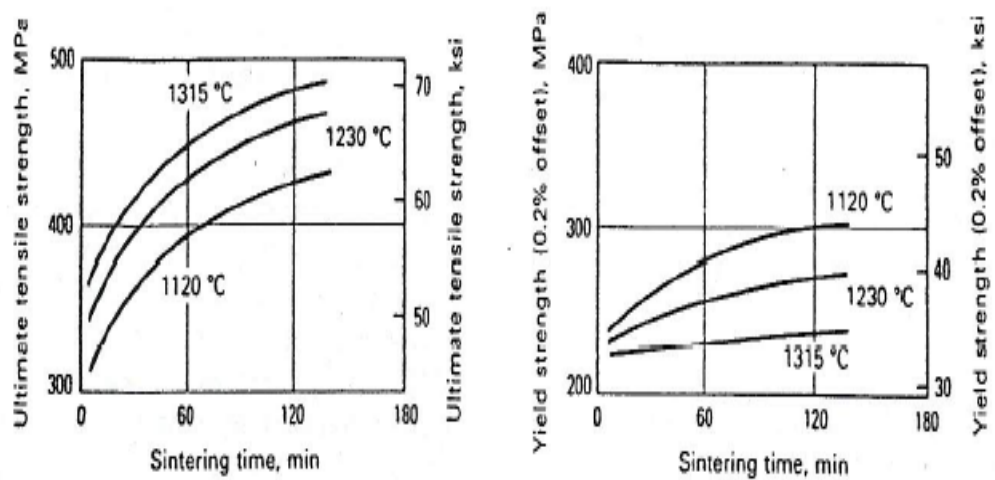
ภาพที่ 2.2 และ 2.3 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล และการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L การหดตัวสูงจะปรากฏเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในแก๊สไฮโดรเจน การเพิ่มเวลาในการเผาผนึกจะช่วยเพิ่มสมบัติด้านแรงดึงและการหดตัว ภาพที่ 2.4 และ 2.5 ตัวอย่างอิทธิพลของเวลาในการเผาผนึก ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ในบรรยากาศสารละลายแอมโมเนีย ซึ่งจะให้กราฟลักษณะเช่นเดียวกับการเผาในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนและสุญญากาศ



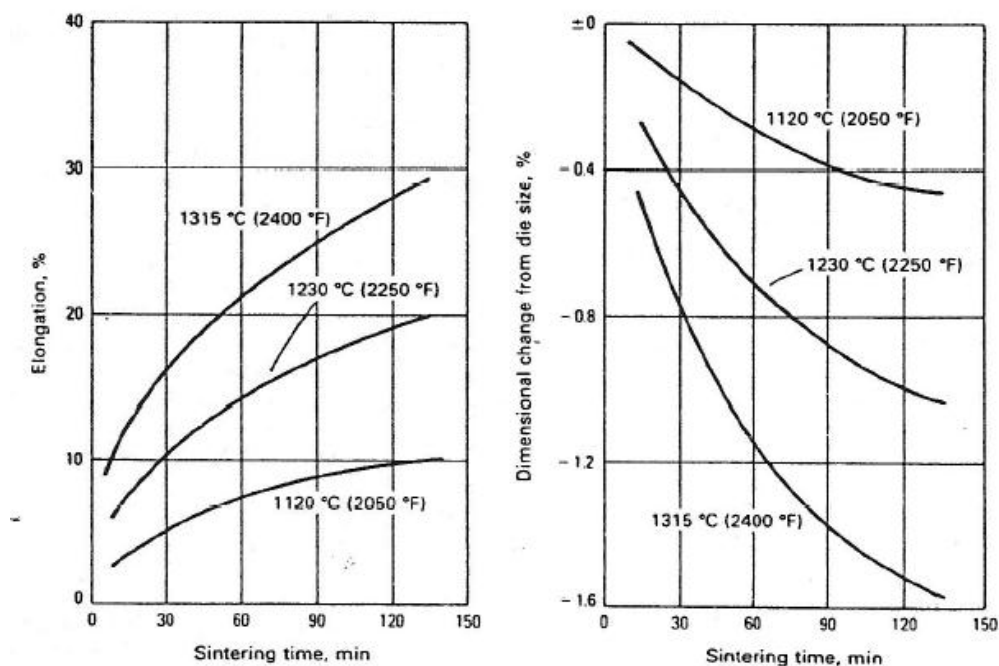
ภาพที่ 2.2 แสดงผลของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผนึกต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [3]



ภาพที่ 2.3 แสดงผลของอุณหภูมิเผาผนึกที่มีต่อความยืด (Elongation) และการเปลี่ยนแปลงขนาดระหว่างการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [3]



ภาพที่ 2.4 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการเผาผนึกที่มีต่อความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [3]



ภาพที่ 2.5 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการเผาผนึกที่มีต่อความยืด (Elongation) และการเปลี่ยนแปลงขนาดระหว่างการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [3]

2.5.2 บรรยากาศในการเผาผนึก

ชนิดของบรรยากาศที่เป็นที่นิยมในการเผาผนึกคือ สารละลายแอมโมเนีย (75% โดยปริมาตรของไฮโดรเจน และ 25% โดยปริมาตรของไนโตรเจน) แม้ว่าบรรยากาศชนิดไนโตรเจน-เบส ซึ่งมีไฮโดรเจนเป็นส่วนผสม 5-10% จะมีการใช้กันบ่อยก็ตาม การทำให้เป็นสุญญากาศก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนที่บรรยากาศชนิดสารละลายแอมโมเนียและไนโตรเจนเบส บรรยากาศชนิดไฮโดรเจนมีความหลากหลายแต่ไม่นิยมแพร่หลายในทางการค้าเพราะ ต้นทุนสูง อย่างไรก็ตามบรรยากาศไฮโดรเจนก็ยังคงใช้สำหรับเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์

2.5.2.1 สารละลายแอมโมเนีย เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมถูกเผาผนึกในสารละลายแอมโมเนีย dew point -45 ถึง -50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน กราฟออกซิเดชัน-รีดักชันสำหรับโครเมียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำจุดน้ำค้าง (dew point) ต่ำจะยังคงรักษาสภาพรีดักชันเพื่อให้แน่ใจไม่มีการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นระหว่างเย็นตัว และ to allow some

altitude ในการเผาผนึก สารละลายแอมโมเนียบางครั้งอาจแห้งที่จุดน้ำค้าง (dew point) - 60 องศาเซลเซียสหรือน้อยกว่านั้น ก่อนจะเข้าเตาเผา

2.5.2.2 ไนโตรเจน-เบส ได้มีการสาธิตว่าโลหะผงหลายชิ้นสามารถเผาผนึกได้สำเร็จด้วย ไฮโดรเจนในบรรยากาศเพียง 3% ซึ่งตรงกันข้ามกับ 75% ในสารละลายแอมโมเนีย

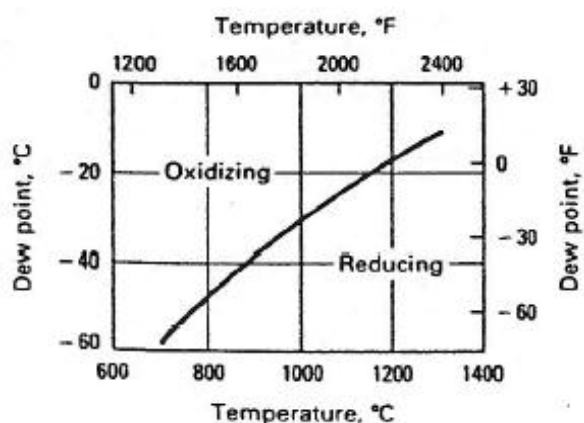
ส่วนผสมไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สองความดันบวกของไนโตรเจน ดังนั้นการเผาผนึกในบรรยากาศที่มีไนโตรเจนถึง 90% หรือมากกว่านั้น จะให้ผลเกือบ 2 เท่าของไนโตรเจนที่ได้จากสารละลายแอมโมเนีย การเย็นตัวช้าจะทำให้ไนโตรเจนส่วนเกิน เกิด Nitrogen pickup เนื่องจากที่อุณหภูมิ 1,095 องศาเซลเซียส ไนโตรเจนจะละลายได้น้อยลงและบางส่วนเป็นผลมาจากการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์

2.5.2.3 สูญญากาศ การใช้สูญญากาศเป็นอีกทางเลือกหนึ่งนอกเหนือจากสารละลายแอมโมเนีย หรือไนโตรเจนเบส การยอมรับและการใช้งานอย่างกว้างขวางของการเผาผนึกแบบสูญญากาศเพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการอนุรักษ์พลังงาน และการตระหนักถึงระบบนิเวศ หากจะอธิบายให้เหมาะสมควรใช้ว่า partial pressure sintering เพราะความดันไอของธาตุบางตัวที่อุณหภูมิเผาผนึกใกล้เคียงกับความดันที่จะทำการเผาผนึกแบบสูญญากาศ

การระเหยของโครเมียมในเตาที่ความดันต่ำกว่าความดันไอของตัวเอง จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงอย่างมาก ดังนั้นการเผาผนึกแบบสูญญากาศจึงต้องควบคุมความดันอย่างเหมาะสม ความดันแก๊ส 25 - 65 Pa (200 - 500 μ m Hg) นิยมใช้ในการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมที่ 1,315 องศาเซลเซียส (2,400 องศาฟาเรนไฮต์) ถ้าใช้แก๊สอาร์กอนในการเผาผนึกจะให้ผลเช่นเดียวกับแก๊สไฮโดรเจน เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนจะให้สมบัติหลังการเผาผนึกพอกับในสารละลายแอมโมเนีย

2.5.2.4 แก๊สไฮโดรเจน เป็นบรรยากาศที่ reducing มากที่สุดในบรรดาบรรยากาศที่ใช้เผาผนึก แต่มีข้อเสียคือราคาสูง ปกติแล้วอัตราแก๊สไฮโดรเจนต่อไอน้ำ คำนวณจากการขยายของผิวโครเมียมออกไซด์ขณะเผาผนึกและเย็นตัว จุดน้ำค้าง (dew point) ซึ่งควบคุม

ปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูง ค่าวิกฤตของจุดน้ำค้างก็จะลดลง ดังภาพที่ 2.6 ในการเผาผนึกควรรักษาสภาวะรีดักชันตลอดเวลา เพราะไอน้ำจะรวมตัวในสภาวะรีดักชัน หากมีแก๊สเพียงพอในระบบจะช่วยกำจัดน้ำเหล่านี้ออกไปได้



ภาพที่ 2.6 กราฟออกซิเดชัน-รีดักชันของโครเมียมออกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจน [3]

2.6 อัตราการเย็นตัว [3]

นอกจากบรรยากาศในการเผาผนึกแล้ว อัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิในการเผาผนึกก็มีความสำคัญต่อสมบัติหลังการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ อัตราการเย็นตัวที่เหมาะสมจะให้สมบัติทั้งด้านแรงดึงและความเหนียวที่ดีที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของคาร์บอน และเผาในบรรยากาศชนิดสวารละลายแอมโมเนีย จะพบไนโตรเจน ปริมาณของธาตุเหล่านี้มักจะพบที่เหนือกว่าขีดจำกัดความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่เย็นตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ และไนไตรด์ขนาดเล็ก การเย็นตัวที่ช้ามาก ๆ เช่น เย็นตัวในเตา การตกตะกอนมักจะเกิดขึ้นที่ขอบเกรน ซึ่งส่งผลช่วยเพิ่มความแข็งแรงแต่ลดความเหนียว แม้ปริมาณการตกตะกอนจะน้อย อย่างไรก็ตามการตกตะกอนของคาร์ไบด์เป็นอันตรายต่อความต้านทานการกัดกร่อน อัตราการเย็นตัวทั่วไปที่ใช้ในการผลิตโลหะผสม (10-30 นาที) ทำให้เกิดการตกตะกอนน้อยมากบริเวณขอบเกรน ดังนั้นความแข็งแรงจึงต่ำแต่ความเหนียวสูง การเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะช่วยให้ไม่เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ และไนไตรด์ ซึ่งจะทำให้ได้ความเหนียวสูง

2.7 การควบคุมปริมาณคาร์บอน [3]

เกรดของผงเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.03% ตามตารางที่ 2.2 เพื่อรักษาปริมาณคาร์บอนให้มีปริมาณเท่าเดิมหลังการเผาผืนิก ซึ่งทำให้แน่ใจว่าสมบัติความต้านทานด้านการกัดกร่อน การเชื่อม และการกลึง ไซ ตัด เจาะมีสูง ดังนั้นต้องหลีกเลี่ยง carbon pickup

สารหล่อลื่นที่เป็นสถานะของแข็งที่ถูกใช้ในกระบวนการอัดจะต้องถูกกำจัดก่อนเผาผืนิกอย่างสมบูรณ์ เพราะสเตรียเรตและแวกซ์เป็นแหล่งคาร์บอน บ่อยครั้งที่ไหลดน้อยสามารถเผาผืนิกได้โดยตรง โดยใช้บรรยากาศมากเกินไปเพื่อล้างสารหล่อลื่นที่ระเหยออกมา อย่างไรก็ตาม กระบวนการเผาสารหล่อลื่นแล้วตามด้วยเผาผืนิกก็ยังคงได้ผลมากที่สุดเ็นทางปฏิบัติ

แหล่งคาร์บอนอื่น ๆ รวมถึงเขม่า สารหล่อลื่นที่ตกค้างในเตา และร่องรอยของแก๊สในการเผาผืนิกก่อนหน้านี้ บรรยากาศที่เป็นสารละลายแอมโมเนีย หรือแก๊สไฮโดรเจน จะพัฒนาการเกิดคาร์บูไรส์แม้ว่าในเตามีวัสดุที่มีคาร์บอนเหลืออยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของผงเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

MPF designation	Composition, %									
	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P	Mo	N
SS-303N1, N2	rem	17.0-19.0	8.0-13.0	0-2.0	0-1.0	0.15-0.30	0-0.15	0-0.20	...	0.2-0.6
SS-303L	rem	17.0-19.0	8.0-13.0	0-2.0	0-1.0	0.15-0.30	0-0.03	0-0.20	...	...
SS-304N1, N2	rem	18.0-20.0	8.0-12.0	0-2.0	0-1.0	0-0.03	0-0.08	0-0.045	...	0.2-0.6
SS-304L	rem	18.0-20.0	8.0-12.0	0-2.0	0-1.0	0-0.03	0-0.03	0-0.045	...	...
SS-316N1, N2	rem	16.0-18.0	10.0-14.0	0-2.0	0-1.0	0-0.03	0-0.08	0-0.045	2.0-3.0	0.2-0.6
SS-316L	rem	16.0-18.0	10.0-14.0	0-2.0	0-1.0	0-0.03	0-0.03	0-0.045	2.0-3.0	...
SS-410	rem	11.5-13.0	...	0-1.0	0-1.0	0-0.03	0-0.25	0-0.04	...	0.2-0.6

2.8 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการเผาผืนิก [3]

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ขึ้นอยู่กับบรรยากาศในการเผาผืนิก ซึ่งสารละลายแอมโมเนียเป็นบรรยากาศที่นิยมในการเผาผืนิกเหล็กกล้าไร้สนิมมากที่สุด การเผาผืนิกในบรรยากาศนี้จะยอมให้มีไนโตรเจนได้มากที่สุด 0.3% ซึ่งจะไปเพิ่มความแข็งแรงแต่ลดความ

เนืยว ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติแรงดึงโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเผาผนึกด้วยสารละลายแอมโมเนีย

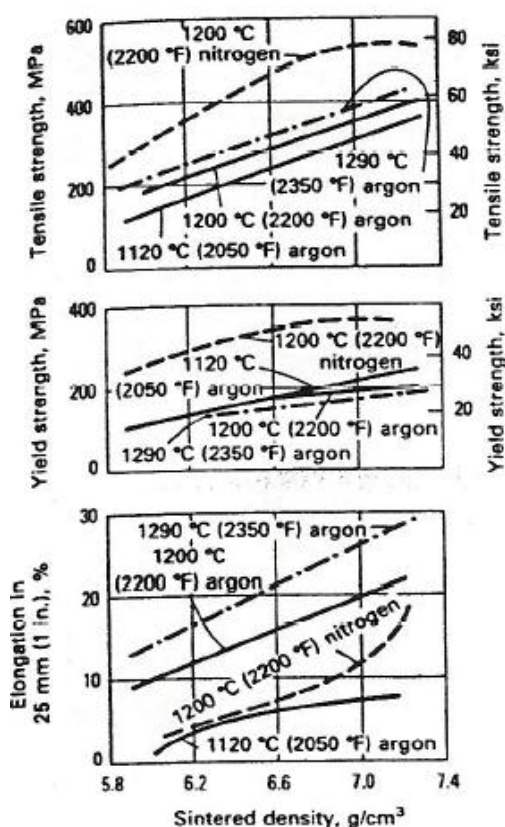
ผลของความหนาแน่นหลังการเผาผนึก อุณหภูมิที่เผาผนึก และบรรยากาศต่อความต้านทานแรงดึงในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ผ่านการเผาผนึกในสุญญากาศ แสดงในภาพที่ 2.7 ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเผาผนึกเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แก๊สอาร์กอนในการเผาผนึก (สุญญากาศ) นอกจากนี้การใช้แก๊สไนโตรเจนจะมีผลต่อแรงดึงสองเท่า โดยเฉพาะที่ความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นความหนาแน่นหลังเผาผนึกจึงไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ต้องคำนึงในการออกแบบโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อให้ได้ความแข็งแรงมากที่สุด แต่ยังมีอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผนึกที่ต้องคำนึงถึงด้วย

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของผงเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

Material designation code(a)	Ultimate strength		0.2% offset yield strength		Elongation in 25 mm (1 in.), %	0.1% compressive yield strength		Transverse rupture strength		Unnotched Charpy impact energy		Apparent hardness	Density, g/cm ³
	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi	J	ft-lbf		
SS-303N1-25(b)	270	39	220	32	0.5	262	38	593	86	4.7	3.5	62 HRB	6.4
SS-303N2-35(b)	380	55	290	42	5	317	46	675	98	26	19	63 HRB	6.5
SS-303L-12(b)	270	39	115	17	17.5	145	21	565	82	...	...	21 HRB	6.6
SS-304N1-30(b)	295	43	260	38	0.5	262	38	772	112	5.5	4	61 HRB	6.4
SS-304N2-33(b)	393	57	275	40	10	324	47	875	127	34	25	62 HRB	6.5
SS-304L-13(b)	295	43	125	18	23	152	22	...	...	...	...	...	6.6
SS-316N1-25(b)	283	41	235	34	0.5	248	36	745	108	6.8	5	59 HRB	6.4
SS-316N2-33(b)	415	60	270	39	10	303	44	860	125	38	28	62 HRB	6.5
SS-316L-15(b)	283	41	138	20	18.5	152	22	550	80	47	35	20 HRB	6.6
SS-410-WHT(c)	725	105	(e)	(e)	<0.5	641	93	780	113	3.5	2.5	23 HRC(d)	6.5

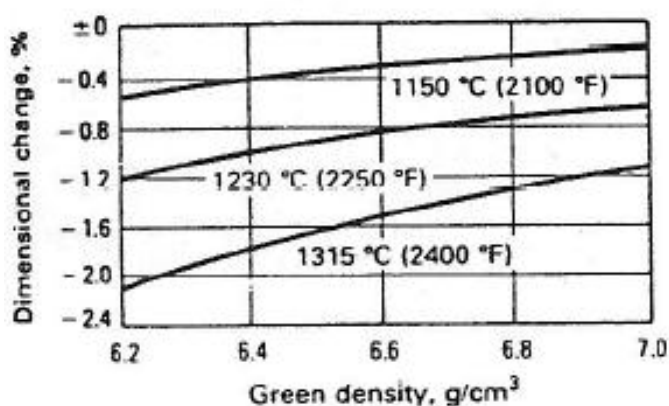
ผลของความแข็งแรง ณ จุดคราก ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.7 กรณีนี้ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อความต้านทานแรงดึงไม่ได้กล่าวถึงอย่างไรก็ตามการเพิ่มความแข็งแรงจากผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เป็นที่ชัดเจน กระบวนการยัดหรือทำให้แบน (flattening) จะใช้ความแข็งแรง ณ จุดครากที่สูงกว่าความหนาแน่น 6.8 g/cm³ แต่ต่ำกว่าสภาวะที่ใช้ไนโตรเจนในการเผาผนึก

สภาวะในการเผาผนึกส่งผลกระทบต่อความเหนียวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L อย่างมีนัยสำคัญดังภาพที่ 2.7 แม้ว่าอิทธิพลของความหนาแน่นจะควบคุมปัจจัยในการคำนวณความเหนียว แต่ผลของอุณหภูมิในการเผาผนึกก็ไม่ได้มีความสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบความเหนียวกราฟในภาพที่ 2.7 ความเหนียวที่ความหนาแน่น 7.2 g/cm^3 ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1,120 องศาเซลเซียส น้อยกว่าความหนาแน่นที่ 6.0 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความเหนียวที่อุณหภูมิเผาผนึก 1,290 องศาเซลเซียส สูงกว่าความหนาแน่น 7.0 g/cm^3 และที่ความหนาแน่นเหล่านี้ความเหนียวเริ่มใกล้เคียงกลุ่มเหล็กเกรด แก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการเผาผนึกเป็นตัวจำกัดความเหนียวโดยเฉพาะที่ความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามความแข็งแรง ณ จุดครากที่เหนือกว่าความหนาแน่น 6.8 g/cm^3 ความเหนียวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความเหนียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสในบรรยากาศที่เป็นแก๊สอาร์กอน



ภาพที่ 2.7 สมบัติด้านแรงดึงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [3]

การเปลี่ยนแปลงขนาด โลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมจะหดตัวระหว่างการเผาผนึกมากกว่าโลหะผงประเภทเหล็ก การเปลี่ยนแปลงขนาดสำหรับเกรด 304L ที่ถูกเผาผนึกในบรรยากาศสารละลายแอมโมเนียดังภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเผาผนึกในแก๊สไฮโดรเจนและในสุญญากาศจะให้หดตัวมากกว่า นอกจากนี้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็กกล้าไร้สนิมระหว่างกระบวนการเผาผนึกยังแสดงในภาพที่ 2.3 และ 2.5 ด้วย



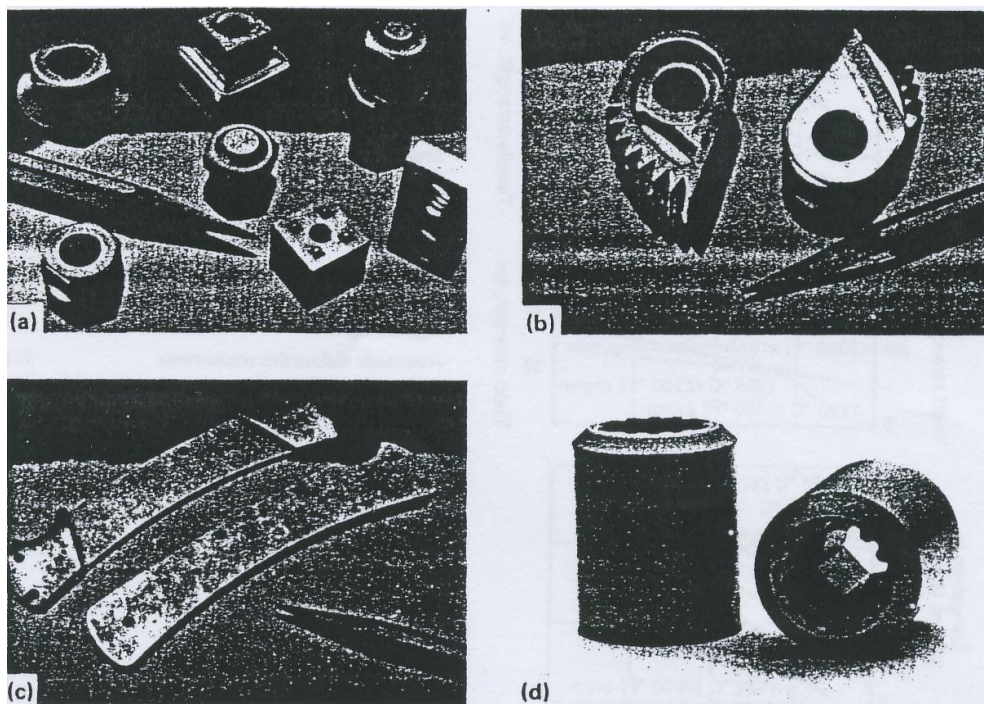
ภาพที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L [3]

2.9 การนำไปใช้งานและการเลือกโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

การเลือกโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้งานนั้นมีการเลือกเช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทรีดหรือหล่อ ดังนั้นในแง่ของความต้านทานการกัดกร่อนเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิตยังคงเป็นทางเลือกที่นิยมอยู่ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 401L มักถูกเลือกไปใช้งานเพราะสมบัติโดยรวมด้านความต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance) สมบัติทางกล ทางแม่เหล็ก และความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี แต่เนื่องจากความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นอยู่กับคุณภาพของผง และขั้นตอนการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพื่อความแน่ใจ

ตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นภาพรวมของกรการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม ในกลุ่มออสเทนิติก เกรด 300 ใช้งานประมาณสองในสามของการใช้งานทั้งหมด และท่ามกลางเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม

ออสเทนนิติก 316L เป็นเกรดที่มีความสำคัญมากที่สุด ในแง่ของความแพร่หลายในตลาด มากที่สุดในยานยนต์ ตามด้วยอุปกรณ์ก่อสร้าง และเครื่องมือ ตัวกรอง อุปกรณ์ใช้สอยภายในบ้าน เครื่องยนต์ในโรงงาน และส่วนของของใช้ขนาดใหญ่ทั่วไป ตัวอย่างของโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

ชิ้นส่วนรูพรุน เป็นหนึ่งในการใช้งานหลักๆของโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมการผลิตโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทั่วไปรูพรุนมักจะไม่เป็นที่ต้องการต่องานประเภทโครงสร้างแม้ว่าจะมีความทนทาน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะรูพรุนนี้ก็ยังเป็นข้อดีสำหรับงานประเภทที่ต้องมีของเหลวภายในเช่น ลูกปืน (Bearing) ตัวกรอง อุปกรณ์วัดของเหลวหรือแก๊ส และตัวลดเสียงในโทรศัพท์ ไมโครโฟน และเครื่องช่วยฟัง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เป็นที่นิยมในงานด้านรูพรุน แต่ก็ยังมีการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่ม 300 ด้วย วิธีที่ใช้ในการทำตัวกรองขึ้นอยู่กับรูปร่างสุดท้ายของตัวกรอง สำหรับการทำให้โลหะแผ่น นำผงที่ผสมกับเรซินให้ทั่วแม่พิมพ์ และกดเบาๆที่อุณหภูมิที่สามารถรักษาเรซินเอาไว้ได้และให้โลหะแผ่นที่ผ่านการเผาผนึก ซึ่งเรซินจะสลายตัวระหว่างการเผาผนึก โลหะแผ่นที่เป็นรูพรุนจะถูกทำให้แน่นด้วยการอัดและเผาผนึกซ้ำ

อีกครั้ง อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ผลิตโลหะผงประเภทพูนคือ cold isostatic pressing ตามด้วยการเผาผืนึก ตัวอย่างชิ้นงานแสดง ดังภาพที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 การใช้งานโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

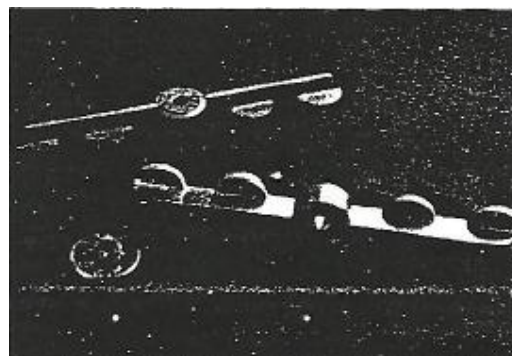
Part	Alloy	Part	Alloy
Aerospace		Hardware	
Seatback tray slides	316L	Lock components	304L, 316L
Galley latches	316L	Threaded fasteners	303L
Jet fuel refueling impellers	316L	Fasteners	316L
Foam generators	316L	Quick-disconnect levers	303L, 316L
Agriculture		Industrial	
Fungicide spray equipment	316L	Water and gas meter parts	316L
Appliances		Filters, liquid and gas	316L-Si
Automatic dishwasher components	304L	Recording fuel meters	303L
Automatic washer components	304L	Fuel flow meter devices	410L
Garbage disposal components	410L	Pipe flange clamps	316L
Pot handles	316L	High polymer filtering	316L-Si
Coffee filters	316L-Si	Jewelry	
Electric knives	316L	Coins, medals, medallions	316L
Blenders	303L	Watch cases	316L
Can opener gears	410L	Watch band parts	316L
Automotive		Marine	
Rearview mirror mounts	316L, 434L	Propeller thrust hubs	316L
Brake components	434L	Cam cleats	304L
Seat belt locks	304L	Medical	
Windshield wiper pinions	410L	Centrifugal drive couplings	316L
Windshield wiper arms	316L	Dental equipment	304L
Manifold heat control valves	304L	Hearing aids	316L
Building and construction		Anesthetic vaporizers	316L
Plumbing fixtures	303L	Office equipment	
Spacers and washers	316L	Nonmagnetic card stops	316L
Sprinkler system nozzles	316L	Dictating machine switches	316L
Shower heads	316L	Computer knobs	316L
Window hardware	304L, 316L	Recreation and leisure	
Thermostats	410L	Fishing rod guides	304L, 316L
Chemical		Fishing rod gear ratchets	316L
Filters	304L-Si, 316L	Photographic equipment	316L
High corrosion resistance filters	830	Soft drink vending machines	830, 316L
Cartridge assemblies	316L-Si	Travel trailer water pumps	316L
Electrical and electronic			
Limit switches	410L		
G-frame motor sleeves	303L		
Rotary switches	316L		
Magnetic clutches	410L, 440A		
Battery nuts	830		
Electrical testing probe jaws	316L		

อุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้าน ในส่วนของเครื่องใช้ภายในบ้านจะอยู่ในภาพของของใช้ที่มีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 2.11 ที่แสดงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ejector pad ซึ่งถูกใช้ในตัวทำน้ำแข็งอัตโนมัติในตู้เย็น



ภาพที่ 2.10 โลหะผงประเภททรูพูน [3]

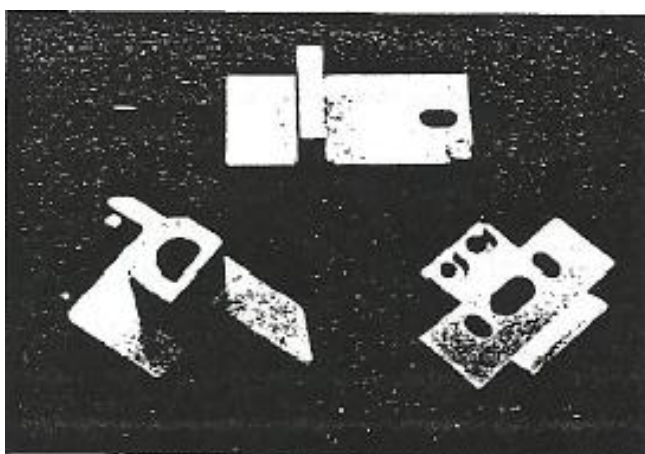
316L ejector pad ซึ่งถูกใช้ในตัวทำน้ำแข็งอัตโนมัติในตู้เย็น [3]



ภาพที่ 2.11 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด

อุปกรณ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนจะต้องการความเรียบ และความตรงที่แม่นยำ ส่วนกลางกันที่รองจะต้องขนาดเท่ากับกันของอันอื่น ๆ ตั้งแต่ตรงกลางไปจนถึงขอบ และต้องตรง

เครื่องจักร ภาพที่ 2.12 แสดงความหลากหลายของโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมในเครื่องถ่ายเอกสาร โลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมมากกว่า 100 ตันที่ถูกใช้ในแต่ละปีในการผลิตเครื่องจักร เนื่องจากการใช้โลหะผงจะได้ขนาดที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้



ภาพที่ 2.12 ส่วนของเครื่องถ่ายเอกสารจากโลหะผงประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L [3]

2.10 เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง [2]

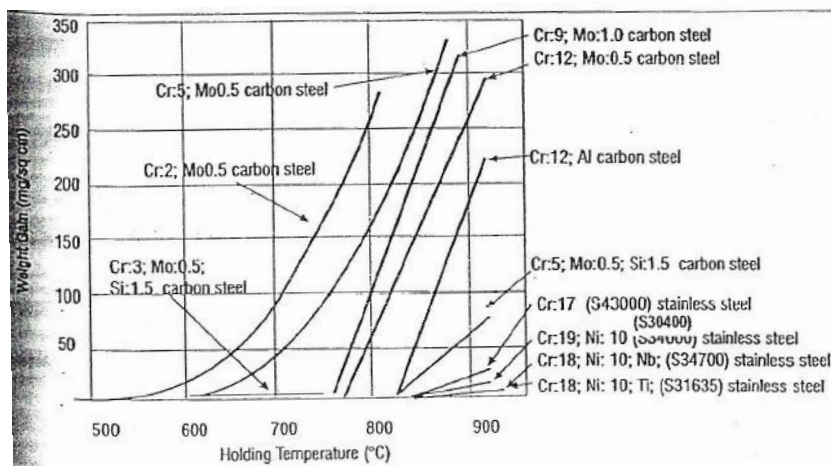
ที่อุณหภูมิสูงจะแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ Elevated temperature อุณหภูมิในช่วง 350-650 องศาเซลเซียส และ High temperature คืออุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมคือโลหะผสมที่มีนิกเกิลและโครเมียมสูง และเป็นตัวเลือกแรกที่จะนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งานได้แก่

- การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง
- ลักษณะการขยายตัว
- ความคืบ เช่น ความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของลักษณะแบบพลาสติก
- ความเปราะ เช่น การลดลงของความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ

วิธีที่นิยมใช้เพื่อมีความต้านทานความร้อน คือเติมธาตุผสมโครเมียม เพราะโครเมียมจะเป็นฟิล์มออกไซด์ที่เกาะติดพื้นผิวดีและสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากออกซิเจนซึ่งฟิล์มชนิดนี้จะยังคงเสถียรจนถึงที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ในบางกรณีฟิล์มโครเมียมออกไซด์อาจถูกช่วยโดยการเติมซิลิกอน หรือ อลูมิเนียม ธาตุทั้งสองจะฟอร์มเป็นฟิล์มออกไซด์ซึ่งต้านทานการกัดกร่อนจากแก๊สที่อุณหภูมิสูง แต่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์ยังคงใช้ในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันเป็นหลัก ซึ่งสามารถเห็นได้ในภาพที่ 2.13 ยังมีปริมาณธาตุผสมโครเมียมมากน้ำหนักที่หายไปก็ยิ่งลดลงที่อุณหภูมิสูง

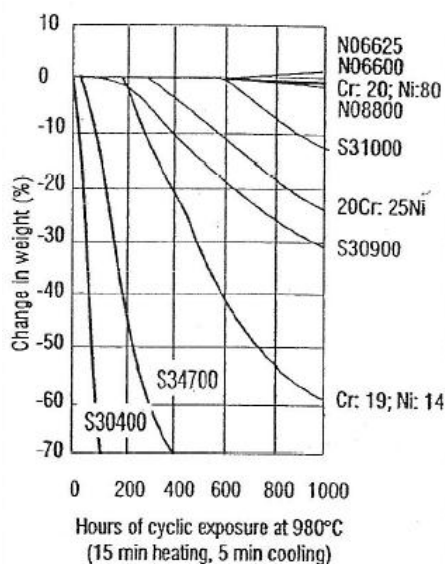
นิกเกิลมีความสำคัญต่อโลหะผสมที่มีความต้านทานที่อุณหภูมิสูงหลายชนิด การเติมนิกเกิลจะทำให้ฟิล์มออกไซด์เกาะติดดีขึ้น และมีการหลุดร่อนน้อยลง การเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุทั่วไปในการทำให้เกิดการหลุดร่อน สาเหตุนี้มาจากปัญหาในเรื่องของการขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนของสเกล เมื่อเทียบกับเนื้อพื้น ถ้าพันธะระหว่างสเกลกับเนื้อพื้นต่ำจะทำให้ง่ายต่อการหลุดร่อน ความต้านทานการหลุดร่อนแสดงโดยการคำนวณความต้านทาน

การเกิดออกซิเดชันจากปริมาณนิกเกิลที่แตกต่างกัน แต่ปริมาณของโครเมียม 20% เท่ากัน ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 ผลของโครเมียมที่มีต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมที่อุณหภูมิคงที่ [2]

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆจะเพิ่มความเสถียรของฟิล์มออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง เช่นการเติมธาตุหายาก บางครั้งอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากๆเช่น กังหันใบพัด (Gas turbine blades) จะเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มโดยการเคลือบผิว



ภาพที่ 2.14 ความต้านทานการเกิดสเกลของโลหะผสมที่มีปริมาณนิกเกิลต่างกัน [2]

2.10.1 การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

สาเหตุของการกัดกร่อน

- ออกซิเจนในอากาศ และออกซิไดซิงแก๊ส
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์จากการเผาไหม้ของแก๊ส
- ไฮโดรเจนจากแก๊สที่เผาไหม้ไม่หมด หรือการแตกตัวของไอน้ำร้อน
- ฮาโลเจน เช่นพวกคลอไรด์หรือฟลูออไรด์ จากถ่าน หรือสารเคมี
- แอมโมเนีย/ไนโตรเจน จากเชื้อเพลิง หรือสารเคมี
- โลหะหลอมเหลวจากความร้อนที่สูงเกินไป หรือโลหะหลอมเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน
- เกลือหลอมเหลวจากสารเคมี
- แก๊สเชื้อเพลิง ถ่าน ถ่าน ไอเสียจากเครื่องยนต์

มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกัดกร่อนหลายสาเหตุรวมกันและซับซ้อน การออกแบบเพื่อต้านทานการกัดกร่อนในหลายๆกรณียังต้องใช้ประสบการณ์และการลองผิดลองถูกอยู่

2.10.2 การออกซิเดชันอย่างรุนแรง

เหล็กที่มีโมลิบดีนัม ทั้งสแตน หรือ วาเนเดียมผสมอยู่ภายใต้สภาวะเฉพาะจะเกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง ปัญหานี้เพิ่มขึ้นเมื่อบรรยากาศในเตาหุุดหนึ่ง โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) จะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์ซึ่งเป็นฟิล์มที่ป้องกันการกัดกร่อนเช่น Cr_2O_3 NiO และ Fe_2O_3 ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลงไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้โลหะถูกออกซิไดซ์ กุญแจสำคัญคือการฟอร์ม MoO_3 แต่โชคดีที่ออกไซด์ชนิดนี้ค่อนข้างอ่อนแอ ถ้ามีการไหลเวียนของบรรยากาศเพียงพอ MoO_3 จะถูกกำจัดออกและลดการเกิดการออกซิเดชัน

2.10.3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion)

การบิดเบี้ยวบางบริเวณที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้เกิดปัญหารุนแรงตามมาได้ แต่บ่อยครั้งที่เกี่ยวข้องกับความเค้นให้การขยายตัวไม่ต่อเนื่อง เมื่อนำชิ้นส่วนที่เกิดการบิดเบี้ยวหรือวัสดุชนิดอื่นมาเชื่อมต่อกัน กรณีที่ดีความเค้นนี้จะทำให้เกิดแค่ความบิดเบี้ยวหากกรณีที่ไม่ดีจะส่งผลให้เกิดความเสียหายก่อนเวลาอันสมควร

2.10.4 ความคืบ (Creep strength)

การทดสอบการแตกหักเนื่องจากความคืบ (Creep - Rupture Test) บ่งบอกถึงค่าความเค้นที่ทำให้เกิดความเสียหายจากการใช้งาน ตัวอย่างของค่าประมาณอัตราความคืบสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมหลังผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 600 และ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10,000 ชั่วโมง ความแข็งแรงต่อการแตกหักเป็นอีกสมบัติหนึ่งที่กล่าวถึงบ่อยเมื่อใช้อธิบายโลหะผสมต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมักอ้างอิงถึงความเค้นที่เป็นสาเหตุให้เกิดการแตกหักหลังผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงดังตารางที่ 2.5 ความเสียหายเนื่องจากความคืบสามารถวัดที่ความรุนแรงจากจุดบกพร่อง (defect) เช่นโพรงภายใน ชิ้นงานหล่อ รอยเชื่อม รูพรุน และความเข้มข้นของความเค้นที่จุดบกพร่อง ขนาดเกรนก็มีผลต่อความคืบด้วยเช่นกันเพราะหากขนาดเกรนใหญ่ขอบเกรนก็มีน้อยดังนั้นโอกาสที่โลหะจะเคลื่อนที่ (metal flow) ก็น้อยลง การปรับปรุงความแข็งแรงต่อความคืบที่อุณหภูมิสูงได้มาโดยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffening) ให้เนื้อพื้นด้วยนิกเกิลหรือโคบอลต์ ธาตุอื่นๆอาจเติมลงไปเพิ่มเพื่อความแข็งแรงโดยการตกตะกอน ที่อุณหภูมิสูงมากๆการเพิ่มความแข็งแรงอาจทำได้โดยการเสริมแรงแบบพิเศษ (specialized reinforcing) หรือกระบวนการทางโลหะผงแบบพิเศษ (specialized powder metallurgical processes) แต่เนื่องจากกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงหลายกระบวนการทำให้เกิดการเปราะที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจึงทนการกระแทกได้น้อยมากที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.5 เวลาในการแตกหักที่อุณหภูมิและความเค้นต่างกัน [2]

Alloy	Estimated Rupture Life for the Temperature and Stress Indicated		
	760°C /100 MPa	875°C /35 MPa	980°C /15 MPa
N06230	8200	65000	5000
HAYNES 214	6000	20000	550
N06601	50	1200	1000
N06617	11000	10000	8000
R30556	5000	10000	10000
N08330	30	230	130
N06600	15	280	580
S30815	140	900	720
N08810	130	1200	920
S31600	100	240	130
S30400	10	100	72
S44600	<1	<1	<1

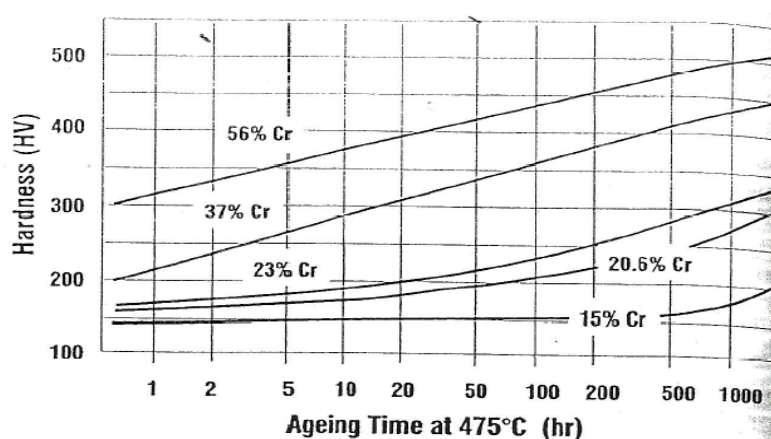
2.10.5 การแตกเปราะ

เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิวิกฤตของช่วงอุณหภูมิ ความแกร่งจะลดลงเมื่อเย็นตัวไปที่อุณหภูมิต่ำ การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงปกติแล้วจะไม่ใช่มีความสำคัญและสามารถมองข้ามได้ แต่อย่างไรก็ตามจะส่งผลเมื่อหลังจากเย็นตัวแล้วถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ การตกตะกอนก็เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำในสถานะที่มีความชื้น ซึ่งผลเหล่านี้มาจากการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ทาง

2.10.5.1 การแตกเปราะที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส

ความเสียหายชนิดนี้จำกัดอยู่ที่เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์ และดูเพล็กซ์ จะไม่เกิดกับออสเทนิติก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิในช่วง 400-565 องศาเซลเซียส หรือเย็นตัวอย่างช้าๆผ่านอุณหภูมินี้ การแตกเปราะจะรุนแรงขึ้นเมื่อมีปริมาณ

โครเมียมมากขึ้น เช่นโครเมียม 13% น้อยมากที่จะมีผล แต่หาก 18% จะต้องเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ส่งผลต่อความเหนียว ถ้าชิ้นงานใหญ่อาจต้องเย็นตัวด้วยน้ำ (water quench) แต่ถ้าชิ้นงานเล็กการทำใหเย็นตัวในอากาศก็เพียงพอ ภาพที่ 2.15 แสดงความแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อทำการบ่ม (aging) ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมากจากการตกตะกอนของโครเมียม (Chromium rich intermetallic phase) ส่งผลให้ความเหนียวลดลง



ภาพที่ 2.15 ผลการบ่มของโลหะผสมที่มีโครเมียมต่างกันที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส [2]

2.10.5.2 การแตกเปราะเนื่องจากเฟสซิกมา

เฟสซิกมาประกอบด้วยโลหะผสมเหล็กและโครเมียมซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อโลหะผสมเย็นตัวอย่างช้าๆผ่านอุณหภูมิในช่วง 570-870 องศาเซลเซียส การเกิดขึ้นของซิกมาเฟสจะทำให้ความเหนียวและความแข็งแรงต่อการกระแทกลดลง ดังภาพที่ 2.16 มีความเป็นไปได้ว่าการปรากฏของเฟสซิกมาได้รับอิทธิพลมาจากธาตุที่ทำให้เฟสของเฟอร์ไรต์เสถียร เช่นโมลิบดีนัม ซิลิกอน ทังสแตน วาเนเดียม ไทเทเนียม และไนโอเบียม นิกเกิลหากมีปริมาณน้อยก็สามารถทำให้เกิดเฟสซิกมาได้เช่นกันแต่หากมีปริมาณมากจะช่วยให้เฟสออสเทนไนต์เสถียร และขัดขวางการเกิดเฟสซิกมา ดังที่กล่าวมาแล้วว่าโอกาสที่จะเกิดในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคมีน้อย แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าจะไม่เกิด มีการพบเฟสซิก

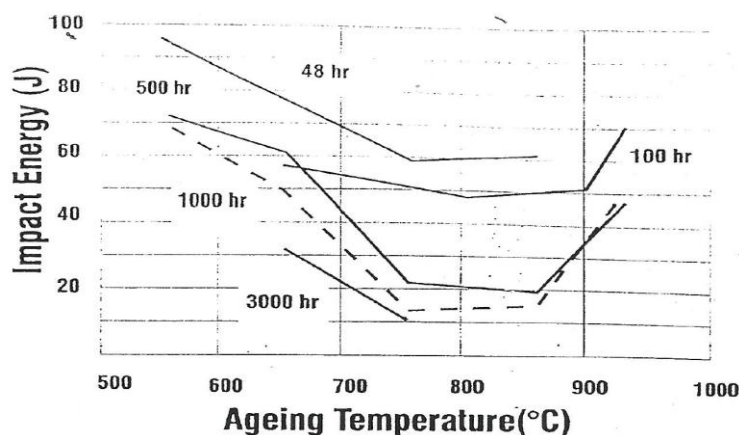
มาในเกรด 316 และ 317 สาเหตุมาจากมีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสม โดยเฉพาะในเกรด 310 ซึ่งมีปริมาณโครเมียมมากกว่าจึงมีโอกาสเกิดมากขึ้น

นอกจากนี้เฟสซิกมายังมีโอกาสพบในโครงสร้างที่ผ่านการเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ เนื่องจากมาจากการเชื่อมที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็น เดลต้า-เฟอไรต์และพบในเหล็กดูเพล็กซ์ด้วยเหตุผลเดียวกัน และอีกความเป็นไปได้ที่จะพบเฟสซิกมาคือโลหะที่ผ่านการรีดเย็นมากพอจนทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation)

การเกิดซิกมาเฟสทำให้ความแกร่งลดลงแต่ในบางกรณีก็ยอมรับได้หากต้องการเพิ่มความแข็งและความต้านทานแรงดึง และเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการการทนต่อความสึกกร่อนจะถูกออกแบบให้มีเฟสซิกมา เช่น วาล์วท่อไอเสีย

2.10.5.3 การตกตะกอนของคาร์ไบด์

แม้ว่าจะทำให้เกิดความเสียหายไม่เท่าสองกรณีก่อนหน้านี้นี้ แต่เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนสูงสามารถเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ซึ่งทำให้เกิดความอ่อนแอต่อการกัดกร่อน (Sensitization) ซึ่งมักเกิดกับเหล็กที่ถูกให้ความร้อนหรือเย็นตัวผ่านอุณหภูมิในช่วง 480-815 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์จะฟอร์มตัวบริเวณขอบเกรน ยกตัวอย่างการทดสอบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 พบว่าความแข็งแรงต่อการกระแทกลดลง 60% เมื่อทดสอบในอุณหภูมิไนโตรเจนเหลว จึงทำให้การตกตะกอนของคาร์ไบด์มีผลรุนแรงต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่คาร์ไบด์ก็ยังเป็นที่ต้องการเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.16 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการบ่มต่อการเกิดเฟสซิกมาในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (อบอ่อน) [2]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

ในปี 2010 N. Kurgan และ R. Varol [4] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งมีส่วนผสม 0.015%C 1.75%Mn 17.24%Cr 2.79%Mo 14.65%Ni และเหล็ก ผงที่ผสมแล้วจะถูกนำมาอัดด้วยวิธี compressed cold แบบ single action press ด้วยความดัน 800 MPa แล้วนำไปเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,200 1,250 และ 1,300 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จุดประสงค์เพื่อคำนวณสมบัติทางกลของชิ้นงานได้แก่ ทดสอบความล้า ทดสอบแรงดึง ทดสอบการดัดงอ (three-point bending) ทดสอบการกระแทก และทดสอบความแข็ง โดยผลของการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติใน ASTM F138-G2 นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรายด้วย ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

- เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ถูกเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,200 1,250 และ 1,300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะได้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) 86% (6.90 Mg/m^3) หลังเผาผืน
- ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่าชิ้นงานอื่น และมากที่สุดที่ 300 MPa

- จากการทดสอบความล้าพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานต่อความล้าอยู่ที่ 65-72 MPa โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสจะให้ค่าความต้านทานความล้าที่สูงกว่าในระดับ 165 MPa
- เหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป (full density stainless steel) อัตราความต้านทานความล้าต่อความต้านทานแรงดึงมีค่าประมาณ 0.5-0.6 แต่ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสอัตราส่วนอยู่ที่ 0.54 และ 0.55
- เหล็กกล้าไร้สนิม 316L จะให้ค่าของสมบัติทางกลสูงเมื่อผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จึงดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

ในปี 2003 D.N. Wasnik, G.K. Dey, V. Kain และ I. Samajdar [7] ศึกษาการตกตะกอนในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยสรุปได้ว่าการตกตะกอนแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งถูกบ่งชี้อย่างชัดเจนจากการรวมกันของผลจากเครื่อง differential scanning calorimetry (DSC) และ 4-probe resistivity ในอุณหภูมิช่วง 400-500 องศาเซลเซียส การตกตะกอนขั้นแรกเป็นแบบสอดคล้อง (coherent) ตามธรรมชาติ ซึ่งทำโดยเครื่อง electrical resistivity และ HRTEM ขั้นที่ 2 เริ่มตกตะกอนบริเวณขอบเกรน ขั้นที่ 3 มีการตกตะกอนของเฟสซิกมา และขั้นสุดท้ายเกิดการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ ($M_{23}C_6$)

ในปี 2002 A. Bautista, F. Velasco, M. Campos, M.E. Rabanal และ J.M. Torralba [8] ได้ศึกษาความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์เกรด 316L เฟร์ไรต์เกรด 434L และดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมต่างกัน 3 แบบ พบว่าลักษณะของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมที่อุณหภูมิสูง ในปริมาณโครเมียมเท่ากันโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดีแสดงให้เห็นจากดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณของเฟร์ไรต์มากกว่า ลักษณะไม่ดีที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์นั้นมาจากการ

เทคนิคแก๊สออกไซด์ที่มีการยึดเกาะไม่ดี และไม่ใช้สารประกอบที่ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งจะไปเพิ่มความอ่อนแอต่อการเกิดออกซิเดชันในวัสดุได้

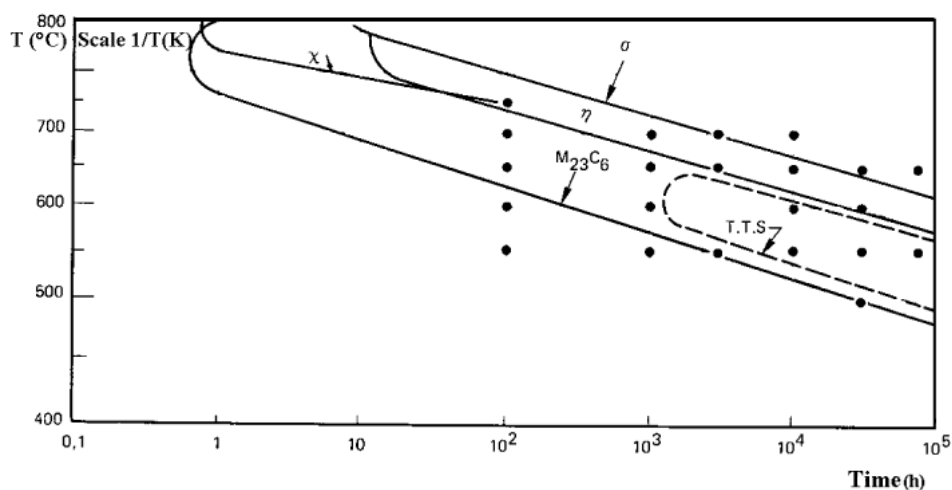
ในปี 2003 H. Sajaoui K. Makhlof H. Sidhom และ J.Philibert [9] ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการบ่ม (ageing) ต่อการวิวัฒนาการของการตกตะกอน การการกัดกร่อนขาดแคลนโครเมียม (Chromium depletion) และการกัดกร่อนระหว่างเกรน ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งผลของการตกตะกอนในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นดังตารางที่ 2.6 และภาพที่ 2.17

ตารางที่ 2.6 เฟสที่ตกตะกอนระหว่างการบ่ม (ageing) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [9]

Nature of the phases formed during ageing of studied AISI 316L

Time (h)	Temperature (°C)							
	550		600		650		700	
	Intergr.	Intragr.	Intergr.	Intragr.	Intergr.	Intragr.	Intergr.	Intragr.
1	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	(M ₂₃ C ₆)	-
100	-	-	-	-	M ₂₃ C ₆	-	M ₂₃ C ₆	(M ₂₃ C ₆)
1000	-	-	M ₂₃ C ₆	(M ₂₃ C ₆)	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆
3000	(M ₂₃ C ₆)	-	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆ η, (σ)	M ₂₃ C ₆ η
10000	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆ (η)	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆ η, σ	M ₂₃ C ₆ η, (σ)
30000	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆ η, σ	M ₂₃ C ₆ (η)	N.E.	N.E.
80000	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆ η	M ₂₃ C ₆ η	M ₂₃ C ₆ η, σ	M ₂₃ C ₆ η	N.E.	N.E.

Intergr.: intergranular; Intragr.: intragranular; (phase): beginning of precipitation in the indicated site of the phase; -: no precipitates observed; N.E.: not examined state.



ภาพที่ 2.17 กราฟ TTP และ TTS ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [9]

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุ

3.1.1 ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L (ขนาดน้อยกว่า 150 μm)

3.1.2 ผงนิกเกิล (ขนาดน้อยกว่า 200 μm)

3.1.3 ผงโคบอลต์ (ขนาดน้อยกว่า 20 μm)

3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

3.2.1 เครื่องตัดชิ้นงานโลหะ

3.2.2 อุปกรณ์ทำตัวเรือนชนิดเย็น

3.2.3 กระดาษทราย ผ้าสักหลาด และผงอะลูมินา

3.2.4 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3.2.5 เครื่องอัดชิ้นงานไฮดรอลิก

3.2.6 เต้าไฮดรเจนสำหรับเผาผนึก

3.2.7 เต้าอบชิ้นงาน

3.2.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.9 เครื่องวัดอย่างละเอียดเวอร์เนียร์คาลิเปอร์

3.3 เครื่องวิเคราะห์ผล

- 3.3.1 เครื่องวัดขนาดผง (Laser Size Analyzer)
- 3.3.2 ชุดอุปกรณ์เครื่องซึ่งสำหรับซึ่งน้ำหนักขณะแช่น้ำ เปียก และแห้ง
- 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกวาด พร้อมเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Scanning Electron Microscope equip with Energy Disperse Spectroscopy, SEM-EDS)
- 3.3.4 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness)
- 3.3.5 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope)
- 3.3.6 X-ray diffractometer (XRD)
- 3.3.7 เครื่องทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด (Three - point bending testing machine)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.4.1 นำผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ผงนิกเกิล และผงโคบอลต์ ไปวิเคราะห์หาขนาดด้วยเครื่อง Laser Size Analyzer และถ่ายภาพลักษณะของผง และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกวาดพร้อมเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Scanning Electron Microscope equip with Energy Disperse Spectroscopy, SEM-EDS)
- 3.4.2 การเตรียมชิ้นงาน
 - 3.4.2.1 ชั่งผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L
 - 3.4.2.2 ชั่งผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L มาผสมกับ
 - ผงนิกเกิลในอัตราส่วน 1% 2% 3% และ 4%

- ผงโคบอลต์ในอัตราส่วน 1% 2% 3% และ 4%
- ผงนิกเกิลและโคบอลต์รวมกันในอัตราส่วน 1% 2% 3% และ 4%

ชิ้นงานมีทั้งหมด 13 สูตร สูตรละ 11 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ที่	ชื่อสูตร	น้ำหนักผงธาตุที่เติม (g)	น้ำหนักผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L (g)	จำนวนชิ้นงาน
1	100% 316L	0	10	11
2	1%Ni	Ni 0.1	9.9	11
3	2%Ni	Ni 0.2	9.8	11
4	3%Ni	Ni 0.3	9.7	11
5	4%Ni	Ni 0.4	9.6	11
6	1%Co	Co 0.1	9.9	11
7	2%Co	Co 0.2	9.8	11
8	3%Co	Co 0.3	9.7	11
9	4%Co	Co 0.4	9.6	11
10	1%(Ni+Co)	Ni 0.05 Co 0.05	9.9	11
11	2%(Ni+Co)	Ni 0.1 Co 0.1	9.8	11
12	3%(Ni+Co)	Ni 0.15 Co 0.15	9.7	11
13	4%(Ni+Co)	Ni 0.2 Co 0.2	9.6	11

3.4.2.2 นำผงในอัตราส่วนต่างๆที่ผสมเสร็จแล้ว มาอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัด (Single Action Pressing) 498.2 MPa จะได้ชิ้นงานที่มีขนาดประมาณ 1cm x 3 cm x 0.4 cm

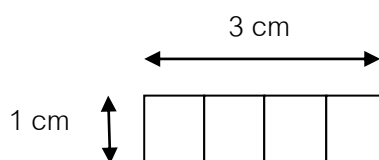
3.4.2.3 นำชิ้นงานไปเผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน 100 % ซึ่งวิธีการเผาผนึกจะเผาครั้งละ 13 สูตรสูตรละ

1 ชิ้นเนื่องจากเตามีขนาดเล็ก และเพื่อจะได้ทราบว่าหากเกิดกรณีผิดปกติเนื่องจากเตาจะ
ได้รู้ว่าเป็นผลของตัววัสดุเองหรือ ตัวชิ้นงาน ซึ่งจะเผาทั้งหมด 5 ชุด ที่อุณหภูมิ 700 องศา
เซลเซียส จะเริ่มปล่อยไฮโดรเจน เพราะเป็นอุณหภูมิที่ปลอดภัย หากต่ำกว่านี้อาจเกิดการ
ระเบิดได้ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที ให้ความร้อนจนถึง 1300 องศาเซลเซียส แล้วทิ้ง
ไว้นาน 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นในเตา

3.4.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกไปหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เทียบกับความ
หนาแน่นทางทฤษฎี (Theory Density)

3.4.4 นำชิ้นงานไปทำการทดสอบ การดัดโค้งแบบ 3 จุด (Three point bending) 13 สูตรโดย
แบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกหลังเผาผนึก สูตรละ 3 ชิ้น และชุดที่สองหลังนำไปผ่านกรรมวิธี
ทางความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง สูตรละ 3 ชิ้นเช่นเดียวกัน
ทั้งหมด 78 ชิ้น

3.4.5 นำชิ้นงานที่เหลือจากการทดสอบ การดัดโค้งแบบ 3 จุด (Three point bending) ทั้ง 65
ชิ้นไปตัดแบ่งเป็น 4 ส่วน จะได้ทั้งหมด 260 ชิ้น



3.4.6 แบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชุด

ชุดที่ 1 คือชุดหลังเผาผนึก 13 สูตร สูตรละ 2 ชิ้น ทั้งหมด 26 ชิ้น

ชุดที่ 2 นำชิ้นงานทั้ง 13 สูตรไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 800 และ 900 องศา
เซลเซียสเป็นเวลา 25 50 75 และ 100 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งหมด 208 ชิ้น ดังแสดงใน
ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลอง

ที่	ชื่อสูตร	0 (หลังเผาผนึก)	800 °C				900 °C			
			25	50	75	100	25	50	75	100
1	100% 316L	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	1%Ni	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2%Ni	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	3%Ni	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	4%Ni	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	1%Co	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2%Co	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	3%Co	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	4%Co	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	1%(Ni+Co)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2%(Ni+Co)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	3%(Ni+Co)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	4%(Ni+Co)	2	2	2	2	2	2	2	2	2

หมายเหตุ 2 คือจำนวนชิ้นงาน

3.4.7 นำชิ้นงานมาวิเคราะห์ผลดังนี้

3.4.5.1 นำชิ้นงานมาขึ้นรูปตัวเรือน โดยใช้เรซินใสหล่อแบบเย็น

3.4.5.2 นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปตัวเรือนแล้วมาขัดหยาบและขัดละเอียดด้วยเครื่องขัด

ตามลำดับ โดยการขัดหยาบจะใช้กระดาษทรายเรียงจากเบอร์หยาบไปละเอียด คือ 80

120 240 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และนำไปขัดละเอียดโดยขัดด้วยผ้า

สักหลาดและผงอะลูมินา และนำไปกัดกรดเพื่อดูโครงสร้างต่อไป

3.4.5.3 นำไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical microscope

3.4.5.4 นำไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาค และตรวจ องค์ประกอบทางเคมีด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกวาดพร้อมเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบ ทางเคมี (Scanning

Electron Microscope equip with Energy Disperse Spectroscopy, SEM-EDS)

3.4.5.5 นำไปวัดความแข็งด้วยเครื่อง Rockwell scale F และ B

3.4.5.6 ตรวจสอบชนิดของเฟสบนเนื้อพื้น และสเกลออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray

diffractometer (XRD)

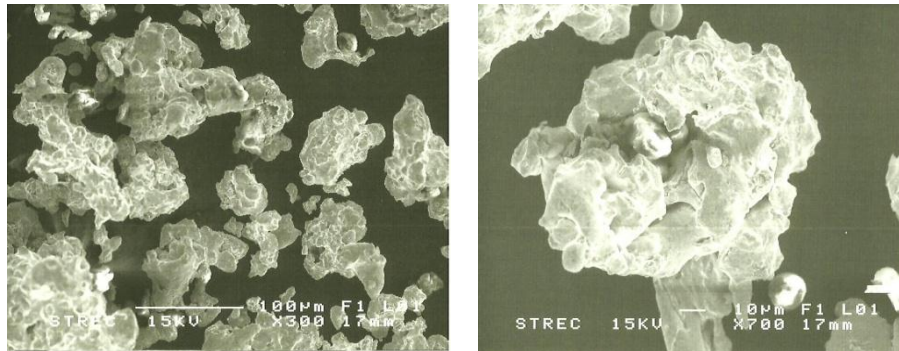
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ลักษณะทั่วไปของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากภาพถ่ายของลักษณะผงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังแสดงในภาพที่ 4.1 ลักษณะผงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่กำลังขยาย 300 และ 700 เท่า ซึ่งมีรูปร่างแบบผิดปกติ (Irregular shape) และจากการวัดขนาดผงด้วยเครื่องวัดขนาดผง (Laser Size Analyzer) ผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีขนาดของผงอยู่ในช่วง 29 – 125 ไมโครเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยของขนาดผงอยู่ที่ประมาณ 66.22 ไมโครเมตร และเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีธาตุหลักคืออนิกเกิลอยู่ที่ประมาณ 10.47%โดยมวล ธาตุโครเมียมประมาณ 19.99%โดยมวล และธาตุเหล็กประมาณ 66.49%โดยมวล ดังตารางที่ 4.1

เมื่อนำผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ไปอัดขึ้นรูปและผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน จะได้ชิ้นงานที่มีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร หนา 0.4 เซนติเมตร ซึ่งโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะดังภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเนื้อพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์มีลักษณะของ annealing twin ปรากฏอยู่ อยู่ซึ่งเกิดจากการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในขณะที่ทำการเผาผนึก เนื่องจากพลังงานภายในที่สะสมจากกระบวนการอัดขึ้นงาน (Compression) เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในขณะที่เผาผนึก และมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้น ซึ่งลักษณะของรูพรุนนี้สามารถพบได้ง่ายในกระบวนการผลิตโลหะผงที่มีความหนาแน่นไม่ถึง 100% และลักษณะรูพรุนดังกล่าวสามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นในภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ดังภาพที่ 4.3



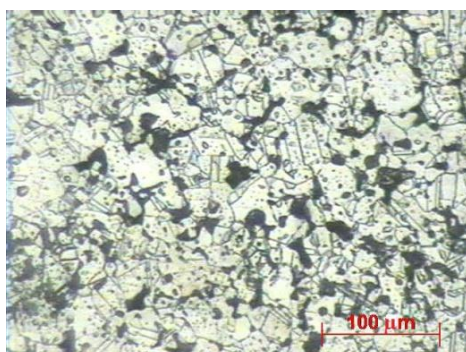
ก) กำลังขยาย 300 เท่า

ข) กำลังขยาย 700 เท่า

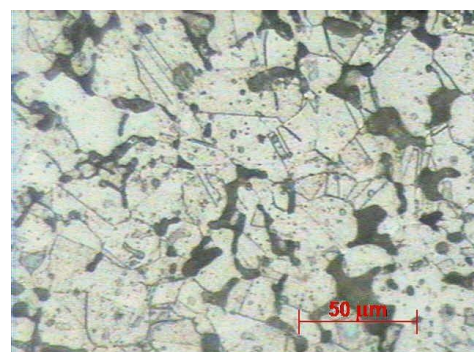
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ก) ที่กำลังขยาย 300 เท่าและ ข) ที่กำลังขยาย 700 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

ผงที่ถูกรวบรวม	ธาตุ	%โดยมวลของธาตุ			เฉลี่ย
		1	2	3	
ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L	Si	1.55	1.89	1.98	1.81
	S	1.04	1.22	1.47	1.24
	Cr	20.49	19.88	19.6	19.99
	Fe	67.53	66.08	65.86	66.49
	Ni	9.4	10.94	11.08	10.47

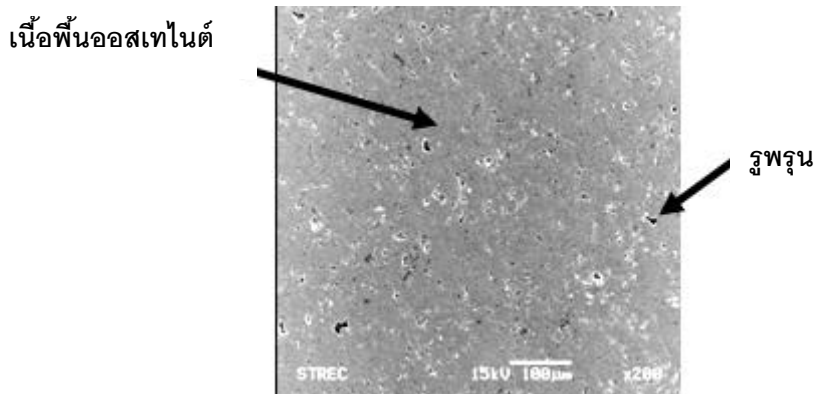


ก.) กำลังขยาย 100 เท่า



ข.) กำลังขยาย 200 เท่า

ภาพที่ 4.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน

4.2 ผลของการเติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ต่อลักษณะทั่วไปของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

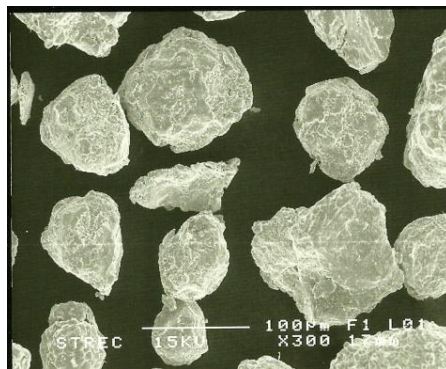
เนื่องจากต้องปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งาน หรือเพิ่มอายุการใช้งานที่อุณหภูมิสูงให้นานขึ้น จึงได้มีการเติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ด้วยกรรมวิธีทางโลหะผสม เนื่องจากธาตุ निकิลและโคบอลต์ช่วยให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรที่อุณหภูมิสูง และนอกจากนี้โคบอลต์ยังช่วยลดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูงและสามารถเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) ให้กับเนื้อพื้น [2-3]

4.2.1 ลักษณะทั่วไปของผง निकิล และโคบอลต์

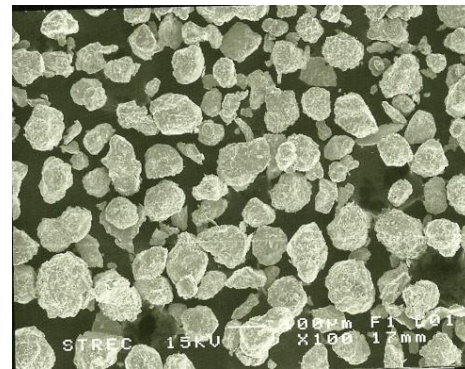
จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผง निकิลมีขนาดอยู่ในช่วง 70 – 180 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดผงประมาณ 119.44 ไมโครเมตร และผงโคบอลต์ซึ่งมีขนาดของผงอยู่ในช่วง 6 – 20 ไมโครเมตร โดยค่าเฉลี่ยของขนาดผงประมาณ 11.2 ไมโครเมตร จากขนาดของผงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเมื่อนำผงมาเปรียบเทียบกันพบว่าผง निकิลมีขนาดค่อนข้างใหญ่ รองลงมาเป็นผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ส่วนผงโคบอลต์จะมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก และจากภาพจะเห็นได้ว่าลักษณะของผง निकิล และผงโคบอลต์ มีรูปร่างผิดปกติ (Irregular

shape) โดยผงนิกเกิลมีลักษณะของผงแยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจน และมีหลายขนาด ส่วนผงโคบอลต์ผงจะเกาะรวมกลุ่มกันเป็นกึ่งก้อนสาขา

โดยองค์ประกอบทางเคมีของผงนิกเกิลและผงโคบอลต์ด้วยเครื่อง EDS ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของโคบอลต์มีธาตุโคบอลต์ประมาณ 93.85%โดยมวล มีธาตุออกซิเจนผสมอยู่เล็กน้อยประมาณ 6.15%โดยมวล ผงนิกเกิลมีธาตุนิกเกิลประมาณ 95.12%โดยมวล มีธาตุออกซิเจนผสมอยู่เล็กน้อยเช่นเดียวกันกับผงโคบอลต์ประมาณ 4.79%โดยมวล โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในครั้งนี้อาจมีความแตกต่างจากค่ามาตรฐานทั่วไป เนื่องมาจากออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นได้ที่ผิวของผงโลหะในกระบวนการผลิตผง



กำลังขยาย 100 เท่า



ข) กำลังขยาย 300 เท่า

ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายลักษณะผงนิกเกิล ก) ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ ข) ที่กำลังขยาย 300 เท่า



ก) กำลังขยาย 5000 เท่า



ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

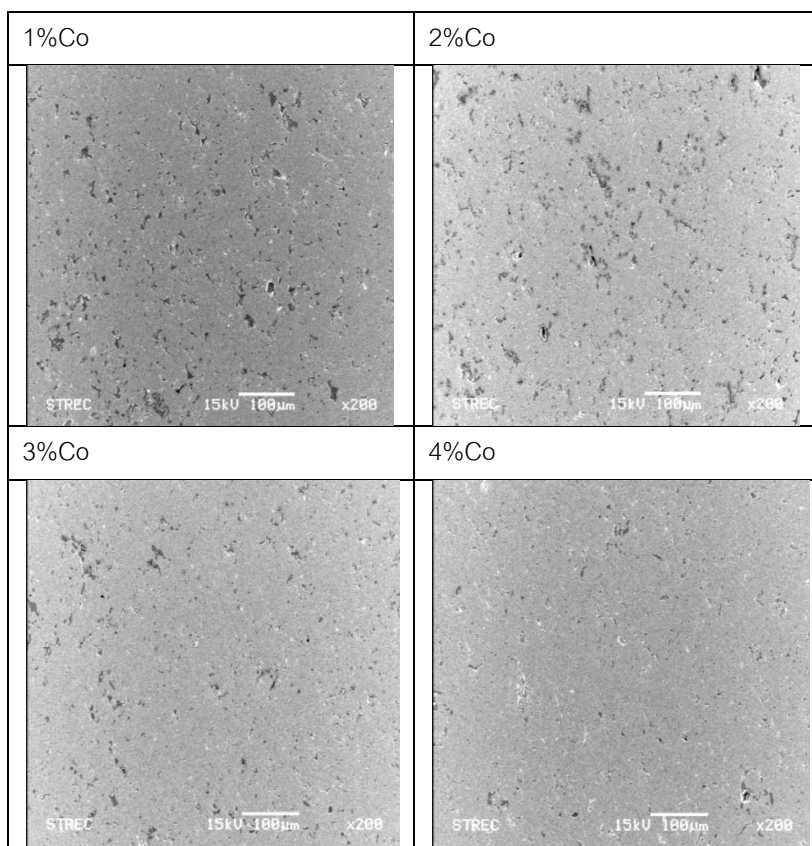
ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายลักษณะผงโคบอลต์ ก) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ข) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงโคบอลต์ และนิกเกิล

ผงที่ถูก ตรวจสอบ	ธาตุ	%โดยมวลของธาตุ			เฉลี่ย
		1	2	3	
ผงโคบอลต์	Co	94.83	95.17	91.56	93.85
	O	5.17	4.83	8.44	6.15
ผงนิกเกิล	Ni	95.94	95.84	93.59	95.12
	O	4.06	4.16	6.14	4.79

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบ ไฮโดรเจน ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังภาพที่ 4.6 เป็นโครงสร้างที่ยังไม่ได้ทำการกัดกรด เนื่องจากต้องการให้เห็นถึงความแตกต่างของรูพรุนขึ้น จะเห็นว่าเนื้อพื้น เป็นเฟสออสเทนไนต์และมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้น ซึ่งลักษณะของรูพรุนนี้สามารถพบได้ง่ายใน กระบวนการผลิตโลหะผงที่มีความหนาแน่นไม่ถึง 100% ลักษณะของรูพรุนเมื่อเติมธาตุโคบอลต์ มากขึ้น จะมีปริมาณและขนาดของรูพรุนที่ลดลง เนื่องจากขนาดผงที่เล็กของโคบอลต์จะไปแทรก ตามช่องว่างระหว่างผงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [5, 10-12] ทำให้รูพรุนที่ได้มีขนาดเล็กกว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ

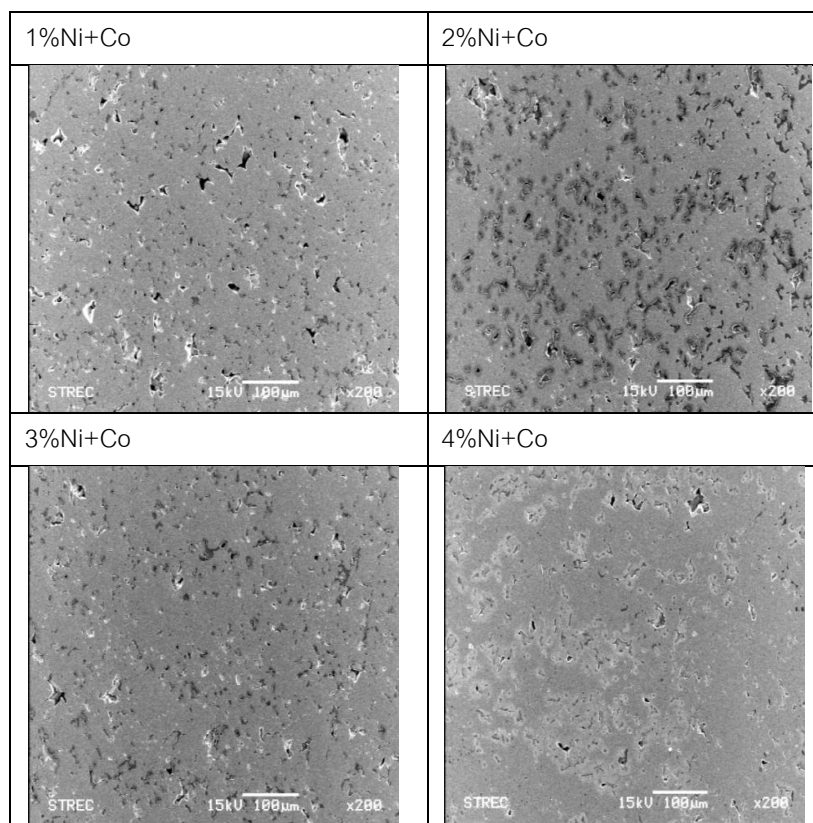


ภาพที่ 4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1- 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ 1 – 4% โดยมวล

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังภาพที่ 4.7 เป็นโครงสร้างที่ยังไม่ได้ทำการกัดกรวดเนื่องจากต้องการให้เห็นถึงความแตกต่างของรูพรุนชัดเจนขึ้น จะเห็นได้ว่าเนื้อพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์และมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้น ซึ่งเมื่อเติมธาตุ निकิลและโคบอลต์มากขึ้น จะมีค่าของขนาดและปริมาณของรูพรุนอยู่ระหว่างชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์และชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิล และเมื่อเติมธาตุทั้ง निकิลและโคบอลต์ในปริมาณมากขึ้นแนวโน้ม

ของขนาดและปริมาณรูพรุนในชิ้นงานก็ลดลงด้วย เช่นเดียวกับกับชิ้นงานที่เติมธาตุ निकเกิด และ ชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์

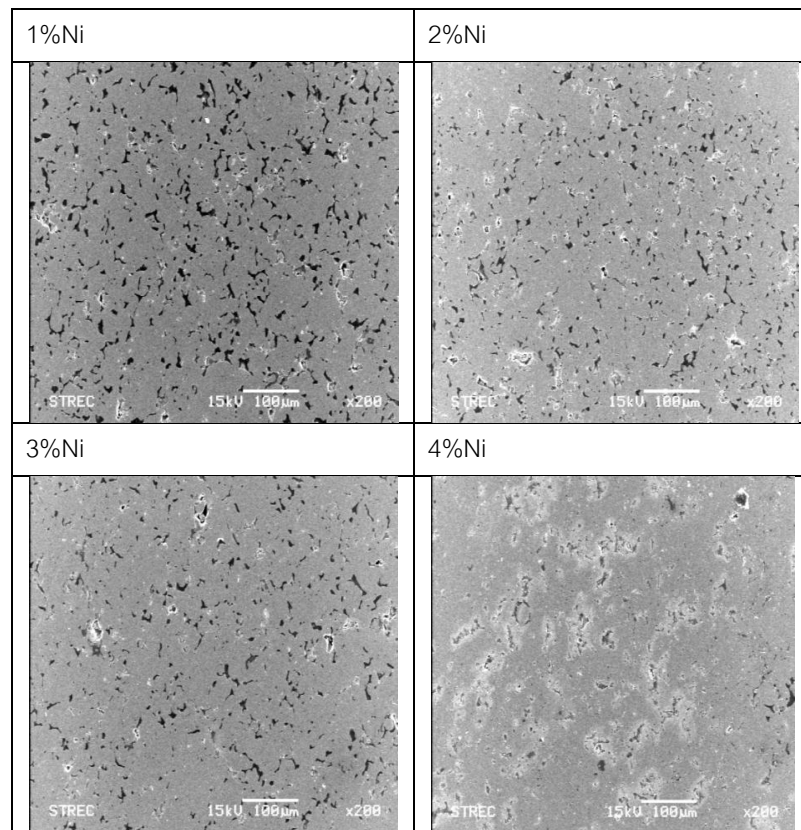


ภาพที่ 4.7 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผง เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิดและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาขึ้นที่ อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน

4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิด 1 - 4%โดยมวล

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิด 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบ ไฮโดรเจน ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังภาพที่ 4.8 เป็นโครงสร้างที่ยัง ไม่ได้ทำการกัดกรด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเนื้อพื้นเป็นเฟสออกไซด์และมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้น เมื่อเติมธาตุ निकเกิดมากขึ้นจะมีขนาดและปริมาณรูพรุนลดลง โดยลักษณะของรูพรุนมีขนาดใหญ่

กว่าชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์และชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะผองผองของผองที่เกิดที่ใหญ่กว่าผองเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผองโคบอลต์ จึงทำให้รูพรุนของชิ้นงานที่เติมธาตุเกิดมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุและชิ้นงานที่เติมโคบอลต์

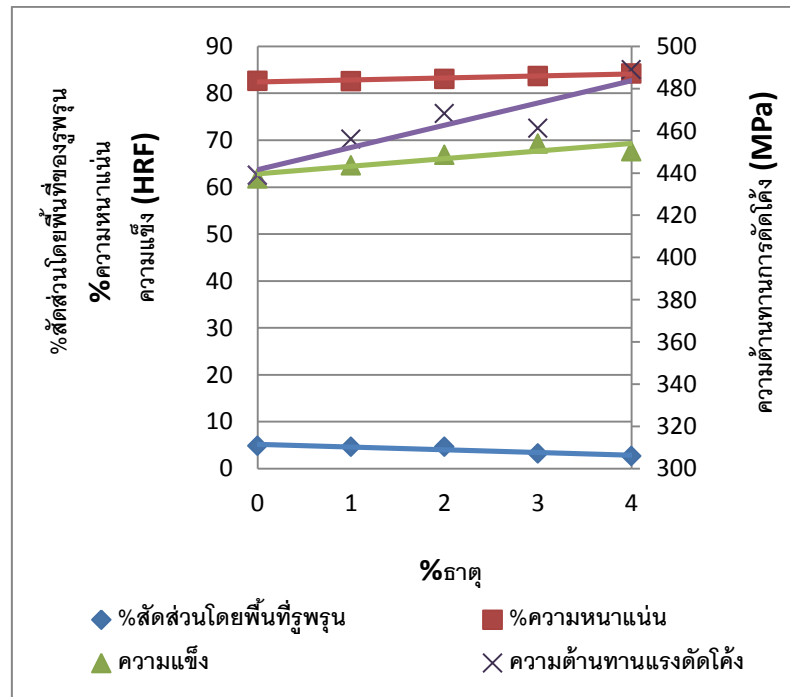


ภาพที่ 4.8 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของโลหะผองเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุผองเกิด 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการเผาผองที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศแบบไฮโดรเจน

4.2.5 ผลของธาตุโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานการตัดโค้ง

จากภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุโคบอลต์ สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลงทำให้ความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เช่นเดียวกับค่าความต้านทานการตัดโค้งก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนต่ำกว่าในชิ้นงานที่เติมธาตุ

โคบอลต์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความแข็งและค่าความต้านทานการตัดโค้งที่มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ เนื่องจากสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนที่ลดลงนั่นเอง

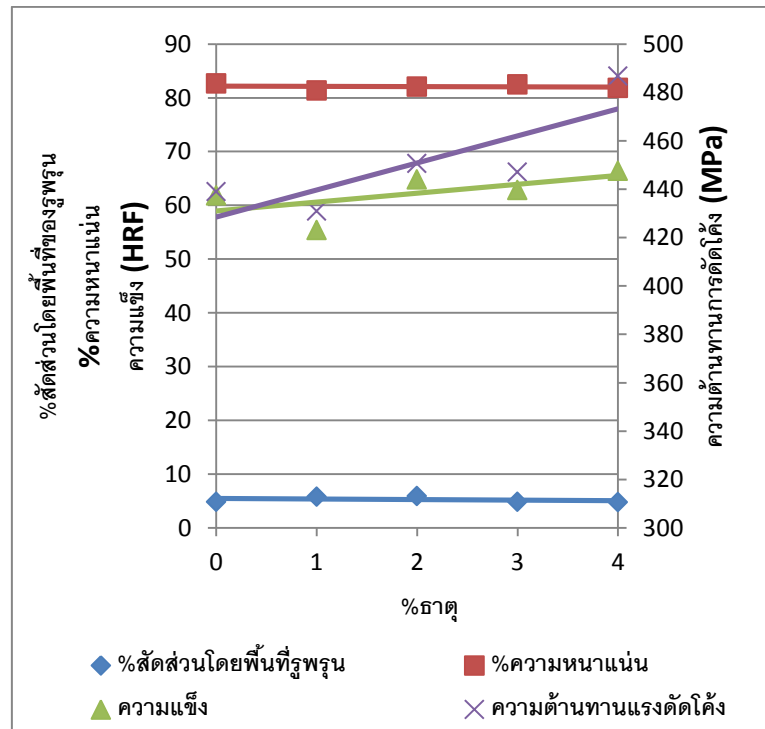


ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงผลของธาตุโคบอลต์ในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.2.6 ผลของธาตุ निकิล และโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานการตัดโค้ง

จากภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ निकิล และโคบอลต์ สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลงเล็กน้อยค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้ความแข็งและค่าความต้านทานการตัดโค้งมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุพบว่าค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนของชิ้นงานที่เติมธาตุทั้งสอง 1-2%โดยมวล มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย และทำให้ค่าความหนาแน่นในชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิล และโคบอลต์ 1-2%โดยมวล มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุเล็กน้อย แต่เมื่อเติมธาตุในปริมาณ 3-4%โดยมวล พบว่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุและทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุด้วย โดยแนวโน้มของความแข็งและค่าความต้านทานการตัดโค้งก็เป็นไปในทิศทาง

เดียวกับค่าความหนาแน่น โดยสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากรูปทรงที่ลดลงและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

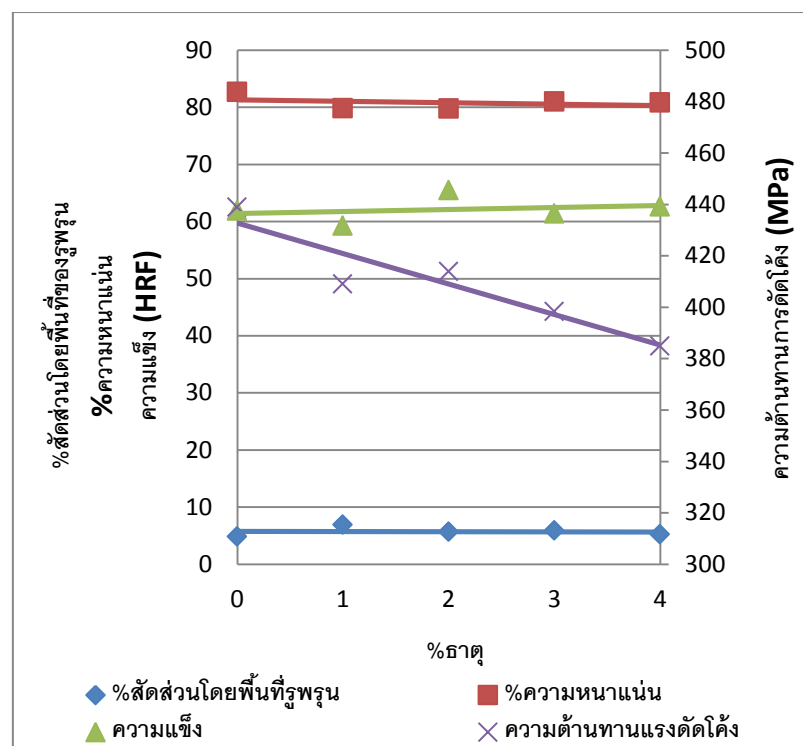


ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงผลของธาตุทั้งโคบอลต์และนิกเกิลในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

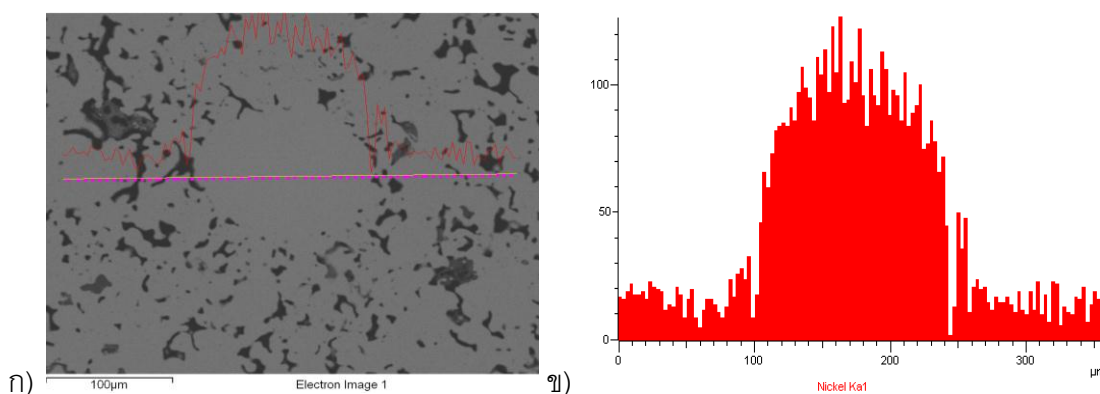
4.2.7 ผลของธาตุนิกเกิลต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งแรงและความต้านทานการดัดโค้ง

จากภาพที่ 4.11 ผลการเติมธาตุนิกเกิลทำให้สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลง และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมธาตุนิกเกิลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุพบว่าสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยและมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดผงของนิกเกิลที่มีขนาดใหญ่กว่าผงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มากจึงทำให้สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุนิกเกิล สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนลดลง และค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจึงทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้สัดส่วนโดยรูพรุนที่มีค่ามากยังทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลมีค่า

ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ निकเกิดกลับทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งลดลง เนื่องมาจากเฟส निकเกิดที่เกิดจากผลของ निकเกิดซึ่งมีขนาดใหญ่จึงทำให้ไม่สามารถแพร่ในเนื้อพื้นจนหมดได้ในขั้นตอนการเผาขึ้นนี้แสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งเฟส निकเกิดที่เกิดขึ้นนี้มีสมบัติทางกลต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [13-14] ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่เติมธาตุ निकเกิดในปริมาณเพิ่มขึ้นมีค่าลดลง และค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงผลของธาตุ निकเกิดในโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.12 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิล 4%โดยมวล โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางกลของนิกเกิลเปรียบเทียบกับของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L [13-14]

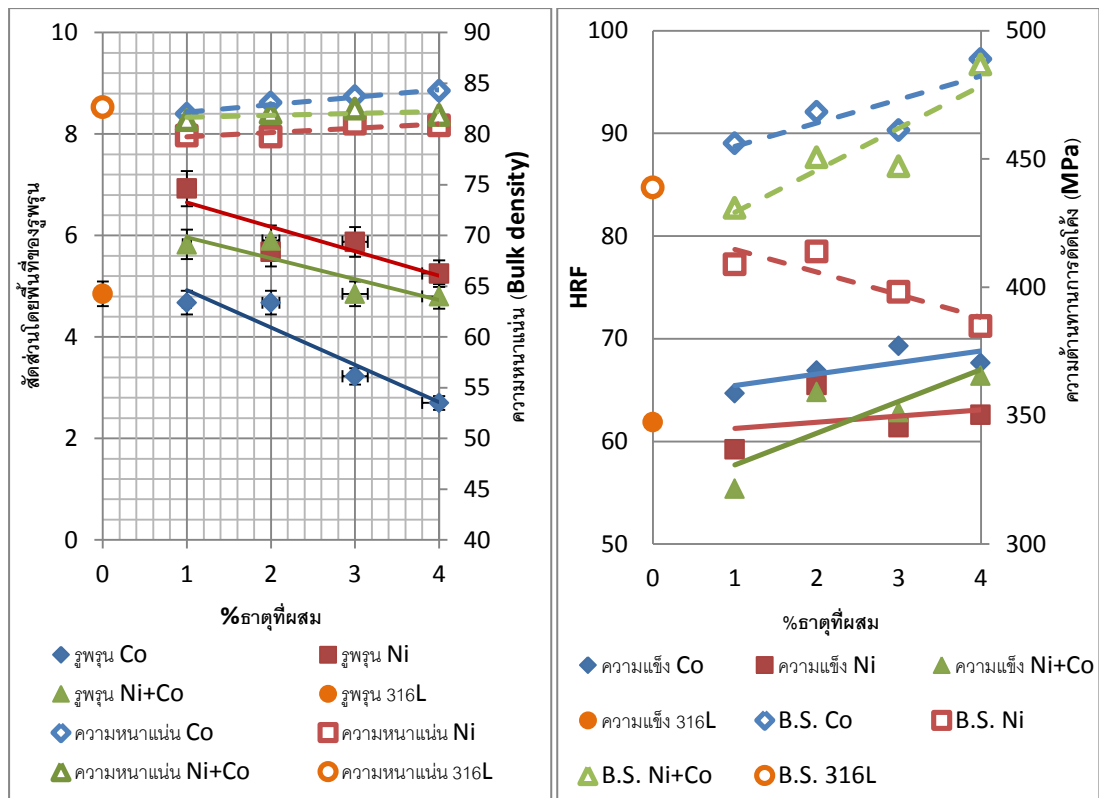
สมบัติทางกล	นิกเกิล	316L
Hardness (HRB)	35	79
Tensile Strength, Ultimate (MPa)	317	558
Tensile Strength, 0.2%YS (MPa)	59	290
Elongation (2 inches)	30%	50%
Modulus of Elasticity (tension)	207	193
Modulus of Elasticity (torsion)	76	77

4.2.8 ผลของธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อน

จากภาพที่ 4.13 ก) เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุทำให้สัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนลดลงและทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนน้อยที่สุดและน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ รองลงมาเป็นชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ และสุดท้ายคือชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลมีค่าสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดของผงโคบอลต์ที่มีขนาดเล็กไปแทรกตามช่องว่างระหว่างผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L จึงทำให้มีสัดส่วน

โดยพื้นที่ของรูพรุนน้อยที่สุด ส่วนผกเกิดที่มีขนาดใหญ่ทำให้รูพรุนเริ่มต้นมีขนาดใหญ่กว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ และเนื่องจากขนาดผกเกิดมีหลายขนาดทำให้เมื่อเติมธาตุผกเกิดเพิ่มขึ้น สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนจึงลดลง [10-12] ในทำนองเดียวกันเมื่อสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่า ลดลงความหนาแน่นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยชิ้นงานที่เติมโคบอลต์มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ รองลงมาเป็นชิ้นงานที่เติมทั้งนิกเกิลและโคบอลต์ และชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ

ส่วนภาพที่ 4.13 ข) แสดงให้เห็นผลของธาตุ สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนและค่าความ หนาแน่นมีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผาผนึก โดยชิ้นงานที่มีสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนน้อย มีค่าความหนาแน่นมาก จะทำให้ได้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดัดสูงขึ้นด้วย ซึ่งค่า ความต้านทานการดัดโค้งและค่าความแข็งของชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีค่ามากที่สุด รองลงมา เป็นชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ และชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่ม ปริมาณธาตุค่าความต้านทานการดัดโค้งและค่าความแข็งจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ยกเว้นค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลจะมีค่าลดลงเนื่องจากเฟสที่เกิด ที่ละลายเข้าไปในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ได้ไม่หมด ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แล้วนั่นเอง



ก)

ข)

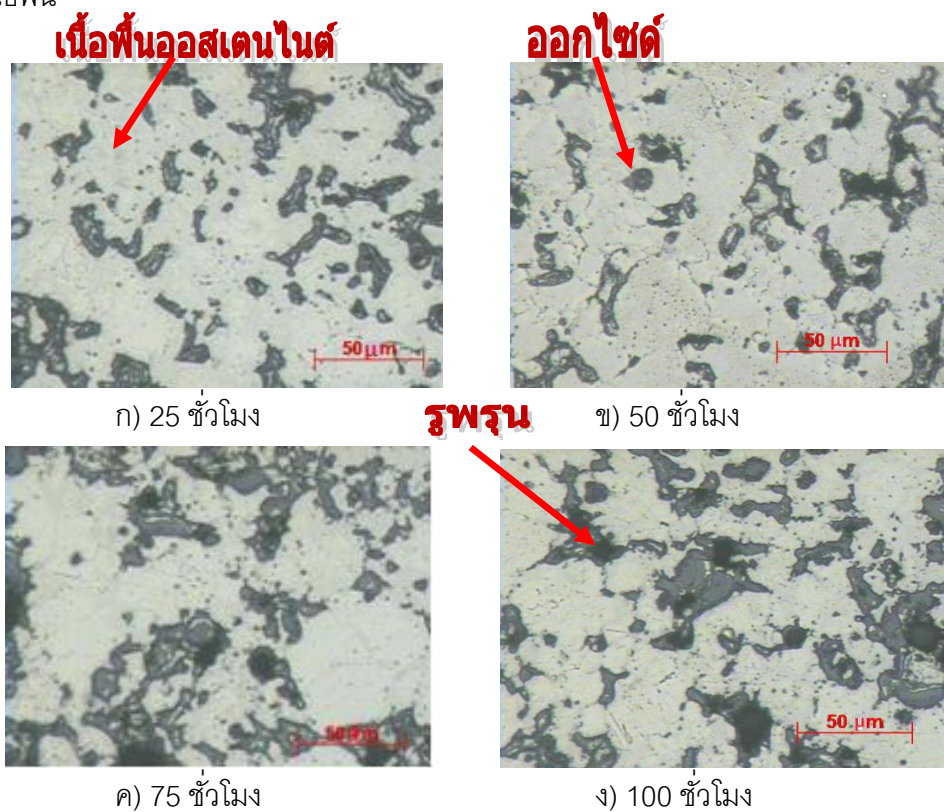
ภาพที่ 4.13 แสดงผลธาตุникเกิดและโคบอลต์ต่อสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความต้านทานการตัดโค้ง (B.S. คือ ความต้านทานการตัดโค้ง)

4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

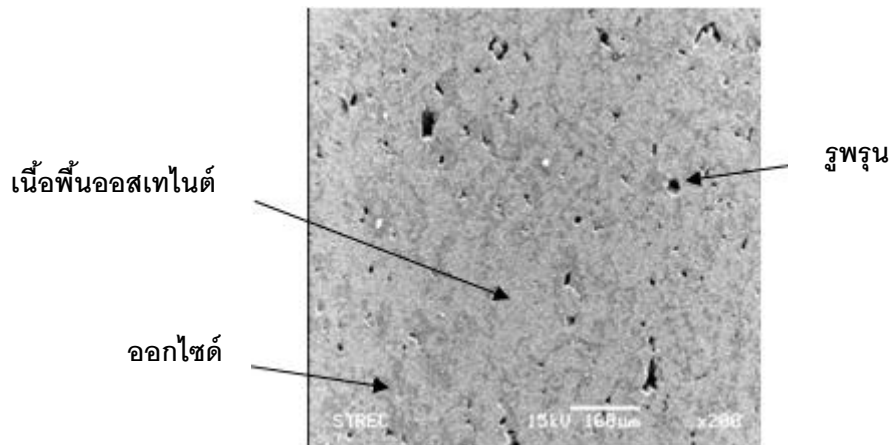
เพื่อศึกษาความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังมีการปรับปรุงโดยการเติมธาตุникเกิด และโคบอลต์ ซึ่งมีสมบัติช่วยให้เฟสออสเทนไนต์ เสถียร และนอกจากนี้ธาตุโคบอลต์ยังช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงและช่วยเพิ่มความแข็งดิ่ง (stiffness) ให้กับเนื้อพื้น [2-3, 16]

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.14 แสดงให้เห็นลักษณะของเนื้อพื้นเป็นออสเทนไนต์ ซึ่งมีออกไซด์ลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจาก

บริเวณรูพรุนเดิม บางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ และจะเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังภาพที่ 4.15 คือเนื้อพื้นบริเวณที่เป็นสีดำจะเป็นรูพรุนที่เหลืออยู่ สีเทาเข้มจะเป็นสีของออกไซด์ที่โตขึ้นมาบริเวณรูพรุนจากการนำชิ้นงานไปผ่านการให้ความร้อน ส่วนบริเวณที่เป็นสีเทาอ่อนจะเป็นสีของเนื้อพื้น และพบว่าเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ขนาดของออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบการตกตะกอนของเฟสทุกติยภูมิ เป็นเฟสสีเทาขนาดเล็กกระจายอยู่ที่เนื้อพื้น



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

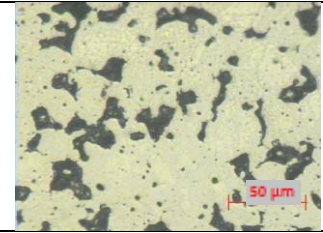
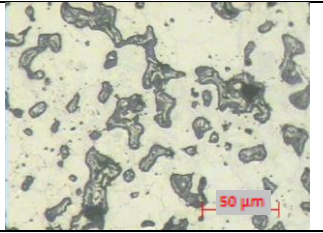
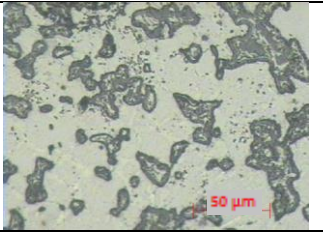
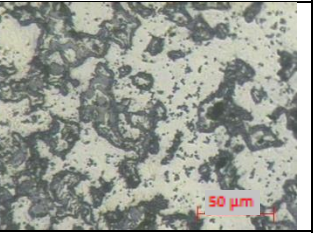
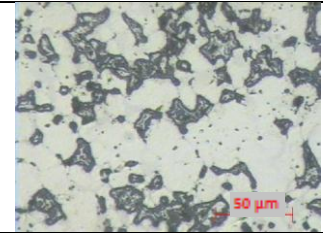
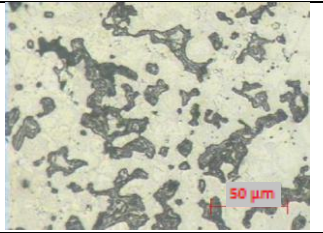
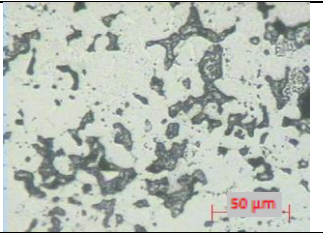
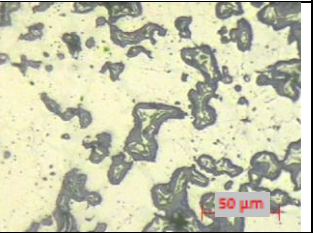
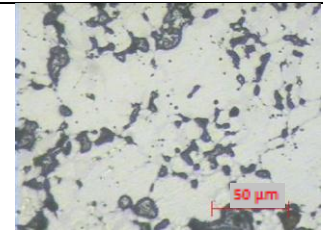
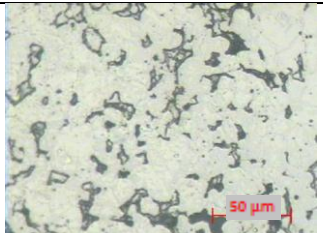
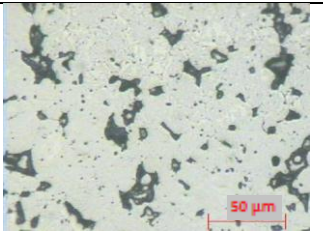
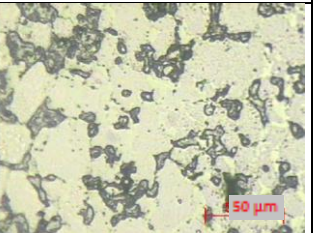
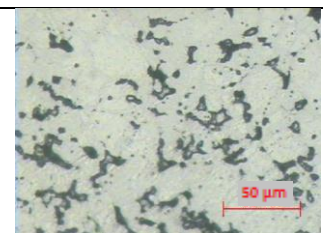
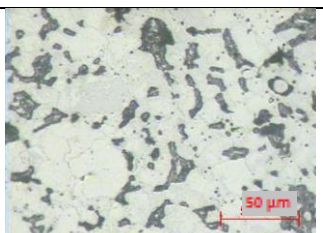
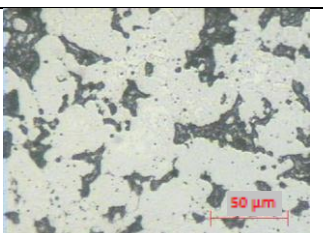
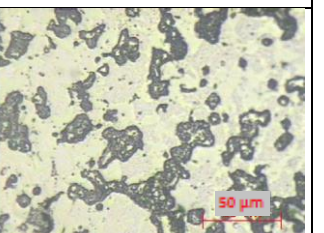


ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.4 ลักษณะเนื้อพื้นจะเห็นออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม บางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุโคบอลต์ที่เติมลงไป พบว่ายิ่งเติมธาตุโคบอลต์ในปริมาณมากขึ้นในเวลาเดียวกันขนาดของออกไซด์ในรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากผลของรูพรุนที่มีมาก่อนหน้านั้น นอกจากนี้ยังพบการตกตะกอนของเฟสทุติยภูมิ เป็นเฟสสีเทาขนาดเล็กกระจายอยู่ที่เนื้อพื้นในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจากภาพโครงสร้างจุลภาคจะเห็นได้ว่าการจำลองการให้ความร้อนที่อุณหภูมินี้ การเติมธาตุโคบอลต์ในปริมาณที่มากขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้น

ตารางที่ 4.4 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

1%Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

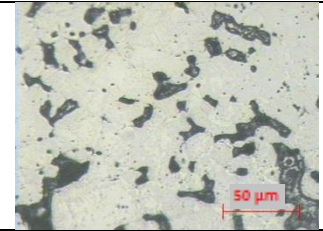
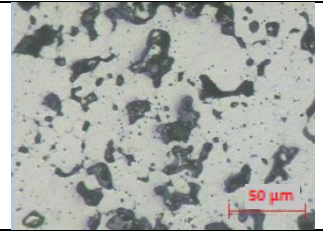
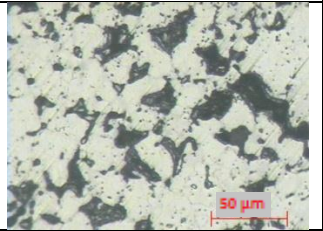
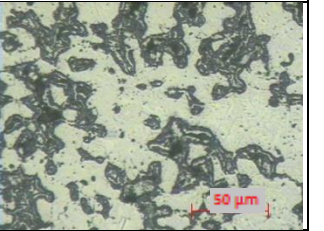
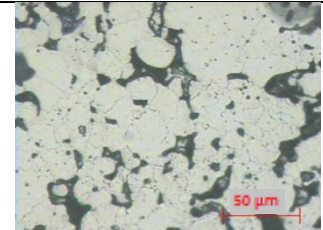
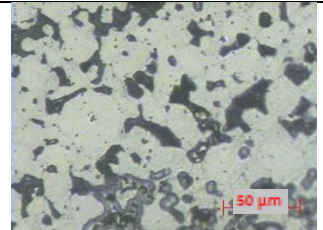
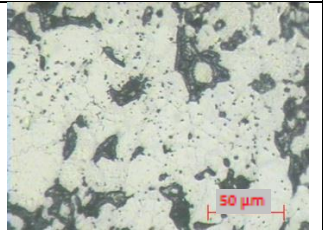
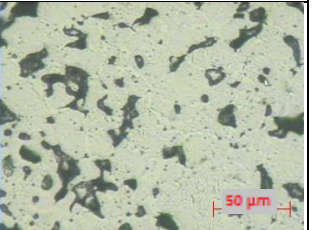
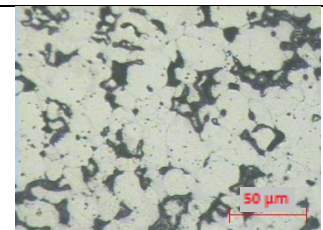
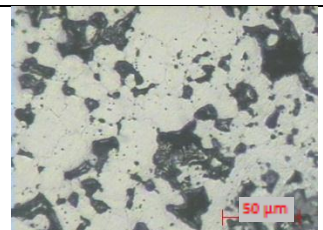
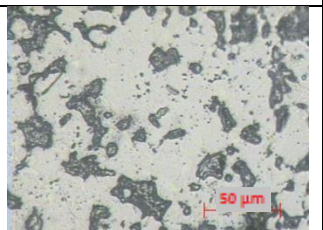
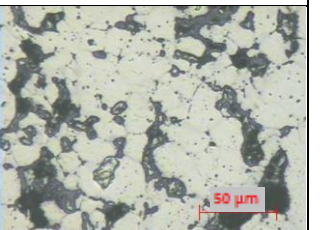
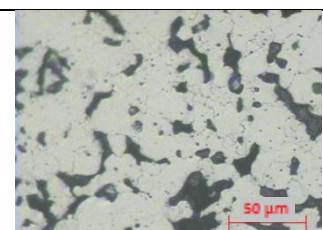
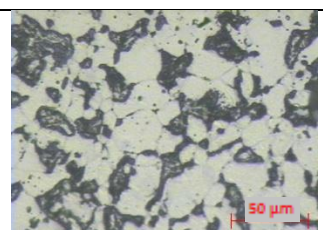
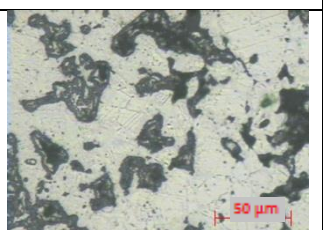
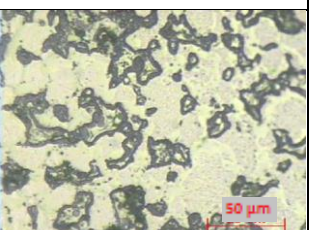
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิล 1 - 4% โดยมวล

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิล 1 - 4% โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.5 ลักษณะเนื้อพื้นจะเห็นออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม ซึ่งบางบริเวณออกไซด์สามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณก็ไม่สามารถเติมเต็มได้หมด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีการตกตะกอนของเฟสสีเทาขนาดเล็กที่กระจายอยู่บนเนื้อพื้นในปริมาณเล็กน้อย โดยจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจะเห็นว่า การเติมธาตุ निकเกิล ในปริมาณที่มากขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณเฟสที่ตกตะกอนออกมาในเนื้อพื้น

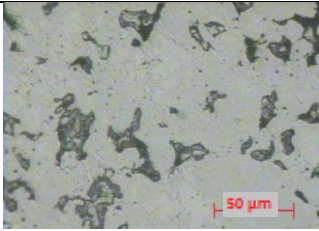
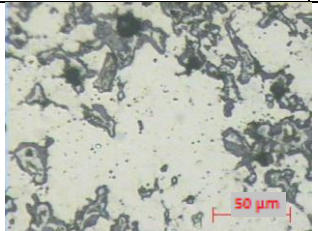
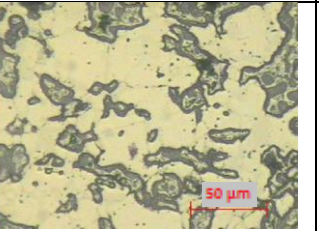
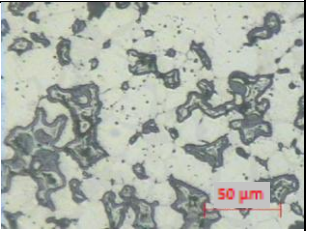
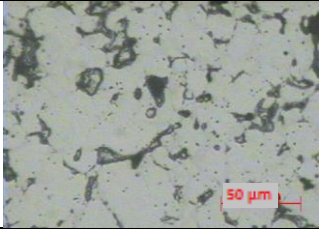
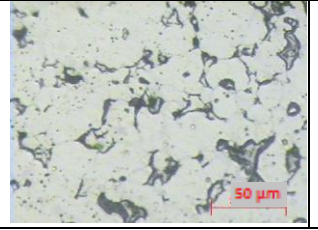
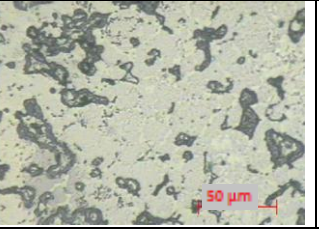
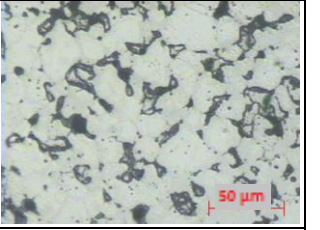
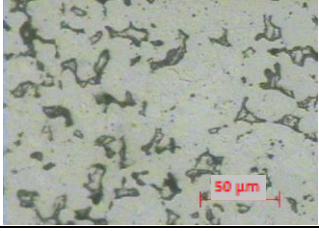
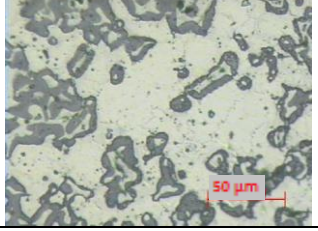
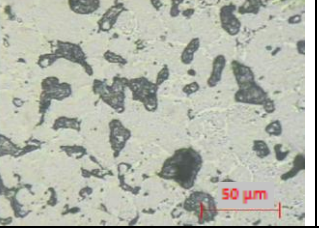
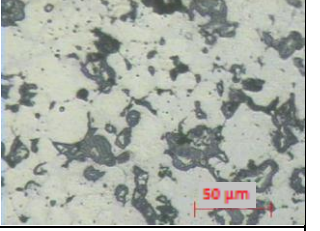
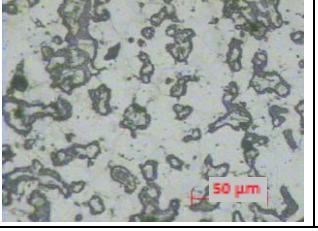
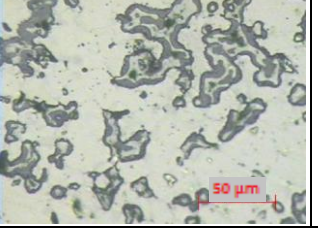
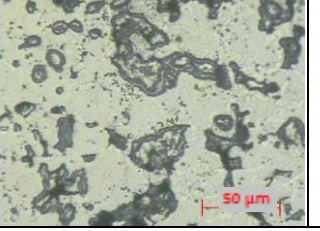
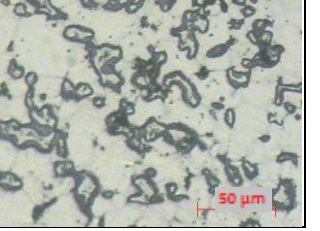
4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิลและโคบอลต์ 1 - 4% โดยมวล

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิลและโคบอลต์ 1 - 4% โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.6 ลักษณะเนื้อพื้นจะเห็นออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม บางรูพรุนออกไซด์สามารถเติมเต็มได้หมดแต่ในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ มากออกไซด์ก็ไม่สามารถโตขึ้นมาปิดรูพรุนได้หมด และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการโตของออกไซด์จะมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบการตกตะกอนของเฟสสีเทาขนาดเล็กกระจายอยู่ที่เนื้อพื้นเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคการเติมธาตุ निकเกิลและโคบอลต์ในปริมาณที่มากขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณเฟสสีเทาที่ตกตะกอนออกมาในเนื้อพื้น

ตารางที่ 4.5 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิเกิล 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

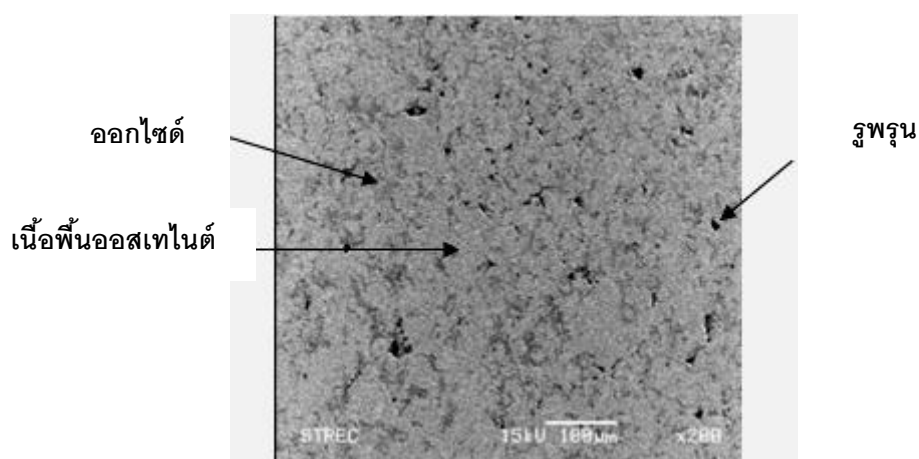
1%Ni 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Ni 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Ni 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Ni 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

ตารางที่ 4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

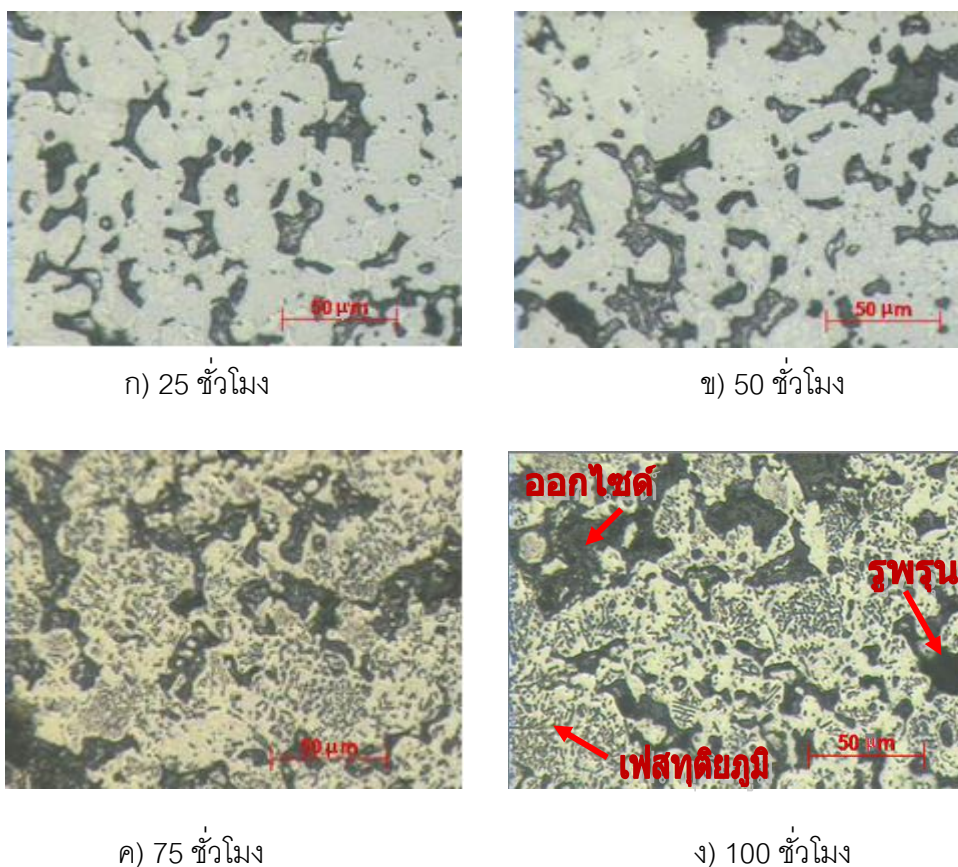
1%Ni+Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Ni+Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Ni+Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Ni+Co 800°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังภาพที่ 4.16 ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง สามารถสังเกตเห็นถึงรูพรุนที่ชัดเจน โดยเนื้อพื้นบริเวณที่เป็นสีดำจะเป็นรูพรุนที่เหลืออยู่ สีเทาเข้มจะเป็นสีของออกไซด์ที่โตบริเวณรูพรุน ส่วนภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงดังภาพที่ 4.17 บริเวณเนื้อพื้นจะพบออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม บางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ จากการนำชิ้นงานไปผ่านการให้ความร้อน โดยพบว่าการโตของออกไซด์ในรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น จากส่วนบริเวณที่เป็นสีเทาอ่อนจะเป็นสีของเนื้อพื้นออสเทนไนต์ นอกจากนี้ยังพบเฟสสีเทาขนาดเล็กตกตะกอนกระจายอยู่ที่เนื้อพื้น โดยภาพรวมของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นว่าพบเฟสสีเทาในปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 75 และ 100 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นปริมาณเฟสสีเทาเพิ่มขึ้นปริมาณมาก



ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

4.4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล

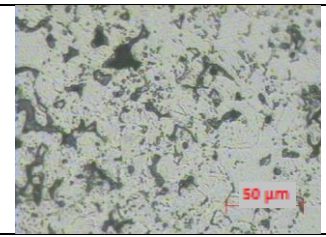
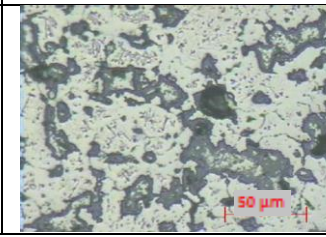
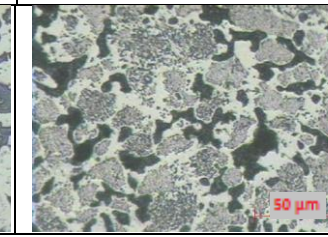
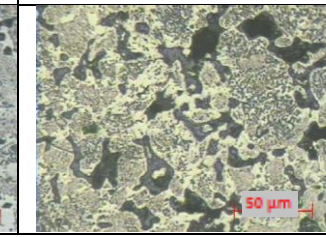
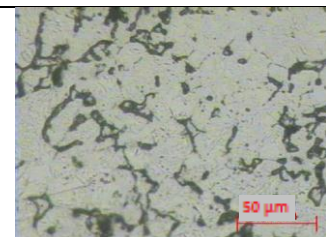
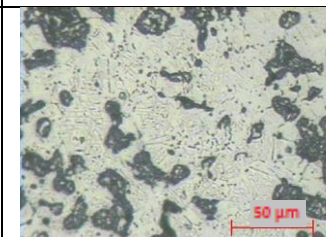
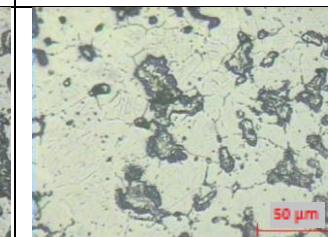
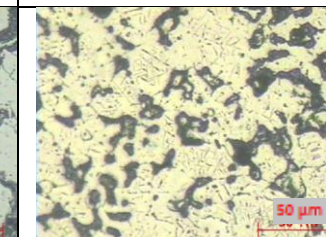
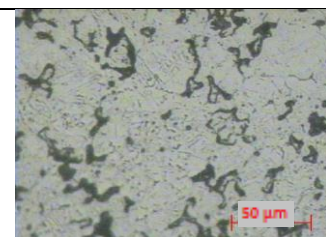
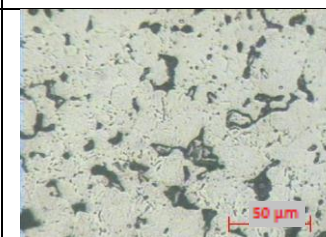
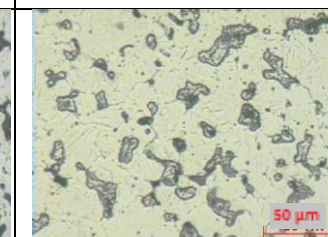
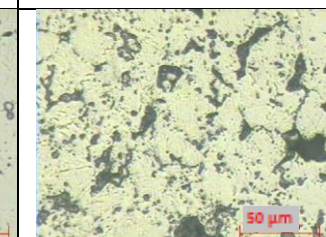
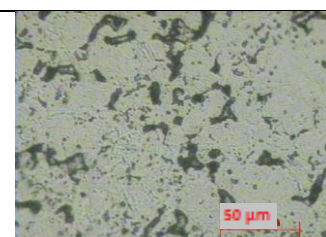
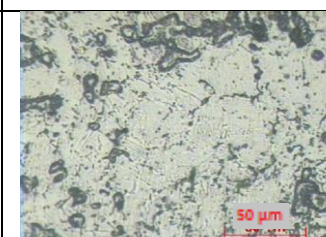
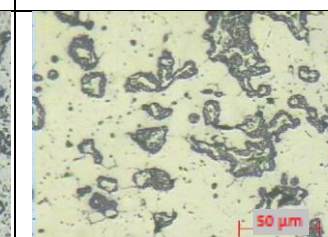
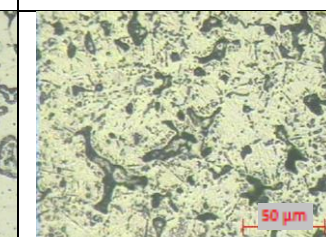
โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ลักษณะเนื้อพื้นประกอบด้วยเฟสออสเทนไนต์สีเทาอ่อน และออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม ซึ่งบางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของออกไซด์ก็มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบการตกตะกอนของเฟสสีเทาขนาดเล็กที่กระจายอยู่บนเนื้อพื้น โดยในชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ที่ 1%โดยมวล และผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลา 25 และ 50 ชั่วโมง พบว่ามีการตกตะกอนของเฟสทุติยภูมิเพียงเล็กน้อย และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 75 และ 100 ชั่วโมง เฟสทุติยภูมียิ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็น

ได้ชัดเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ส่วนชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ 2-4%โดยมวล เมื่อนำไปผ่านความร้อนที่เวลา 25 ชั่วโมง ปริมาณเฟสทุติยภูมิที่พบจะมีปริมาณน้อยและไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 50-100 ชั่วโมง ปริมาณเฟสทุติยภูมิมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากเติมธาตุโคบอลต์ตั้งแต่ 2%โดยมวลขึ้นไปสามารถช่วยลดการเกิดเฟสทุติยภูมิได้ในสภาวะที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่ 75-100 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เพราะธาตุโคบอลต์ช่วยเพิ่มความเสถียรของเฟสออสเทนไนต์ได้ดังตารางที่ 4.7 [2-3, 13]

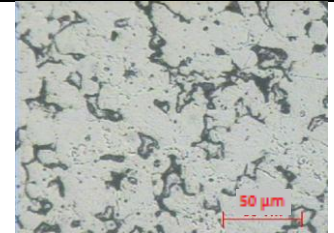
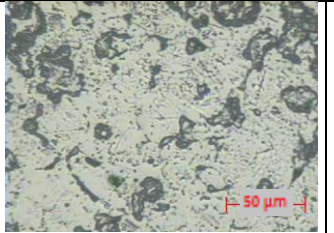
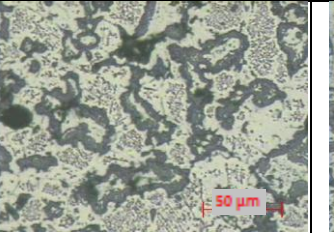
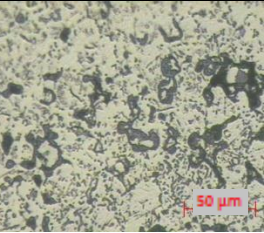
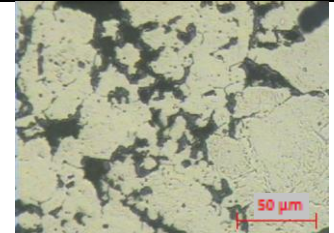
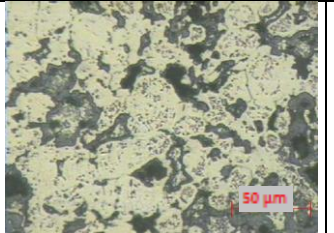
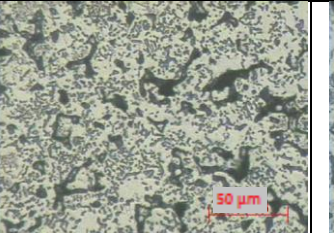
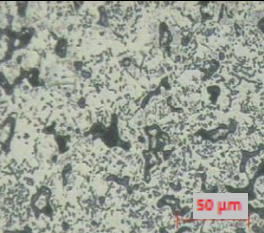
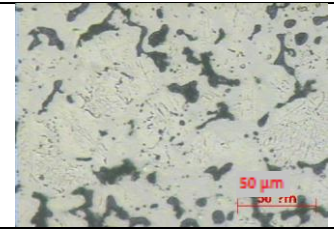
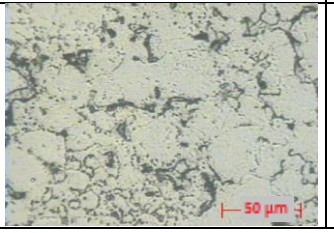
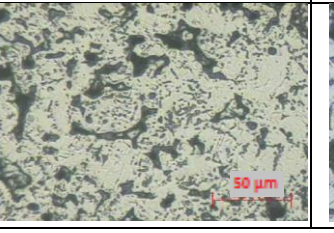
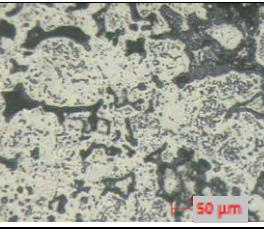
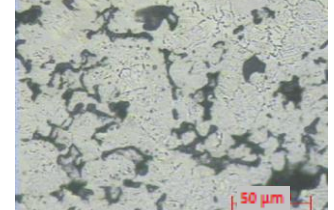
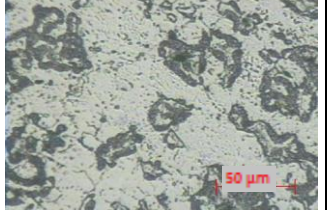
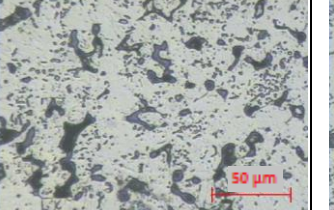
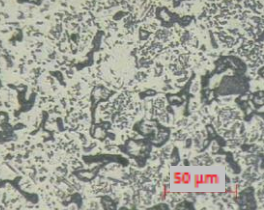
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมธาตุ निकเกิด 1 - 4%โดยมวล

จากตารางที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ลักษณะเนื้อพื้นประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟสออสเทนไนต์ จะเห็นออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสี่เหลี่ยมโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม บางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบเฟสทุติยภูมิซึ่งเป็นเฟสสี่เหลี่ยมขนาดเล็กตกตะกอนกระจายอยู่ที่เนื้อพื้น ชิ้นงานที่เติมธาตุ निकเกิด 1% โดยมวล เริ่มพบเฟสทุติยภูมิตั้งแต่ให้ความร้อนเป็นเวลา 25 ชั่วโมง และเมื่อเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นปริมาณเฟสทุติยภูมิก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ เมื่อเติมธาตุ निकเกิดในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่าเมื่อเทียบเวลาในการให้ความร้อนที่เท่ากันปริมาณเฟสทุติยภูมิลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนเฟสทุติยภูมิยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุจะเห็นว่าปริมาณเฟสทุติยภูมิน้อยกว่าโดยเฉพาะที่เวลา 75 และ 100 ชั่วโมง ดังนั้นการเติมธาตุ निकเกิดในปริมาณเพียง 1%โดยมวล ก็สามารถช่วยลดการเกิดเฟสทุติยภูมิได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นเฟสทุติยภูมิยังคงมีการเพิ่มขึ้นอยู่ อย่างไรก็ตามการเกิดเพิ่มขึ้นของเฟสทุติยภูมิในชิ้นงานที่เติมธาตุ निकเกิดยังมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ และผลจากการเติมธาตุ निकเกิดในปริมาณมากขึ้นก็ให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก การที่เฟสทุติยภูมิลดลงจากการเติมธาตุ निकเกิดเนื่องจากธาตุ निकเกิดสามารถช่วยให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรได้มากขึ้นนั่นเอง [2-3, 13]

ตารางที่ 4.7 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

1%Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

ตารางที่ 4.8 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุไนคิล 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

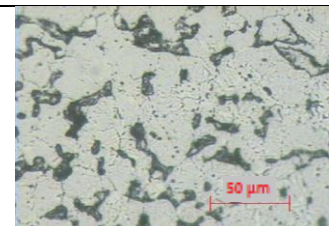
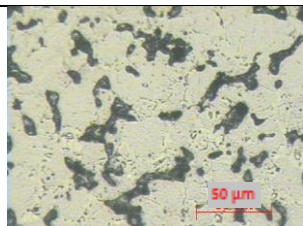
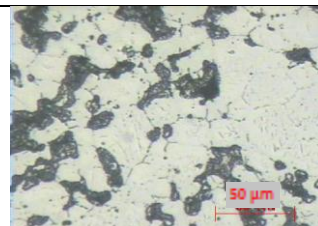
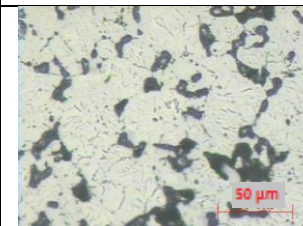
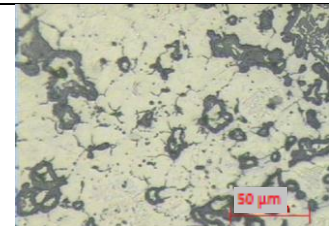
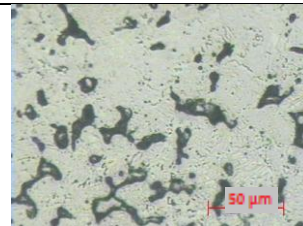
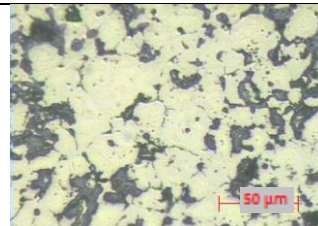
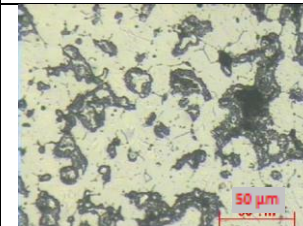
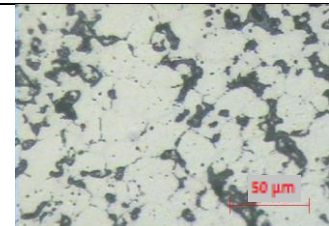
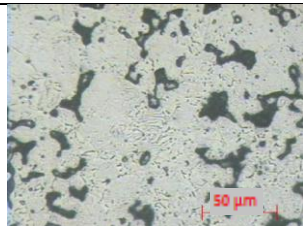
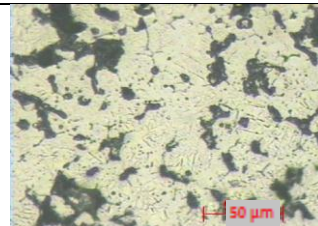
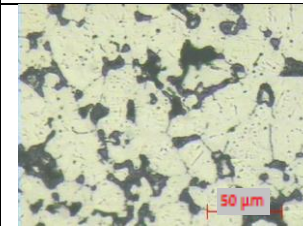
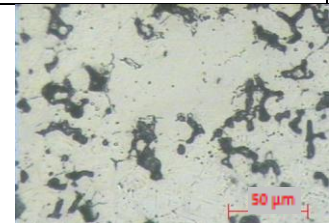
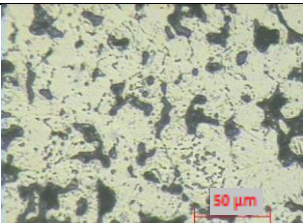
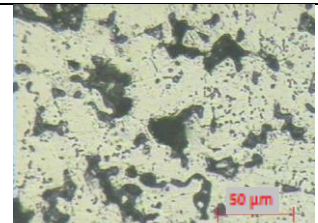
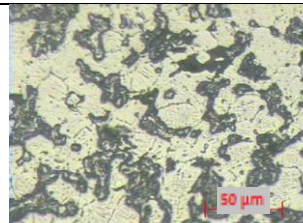
1%Ni 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Ni 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Ni 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Ni 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

4.4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เติมหาตุณิกเกิดและโคบอลต์ 1 - 4% โดยมวล

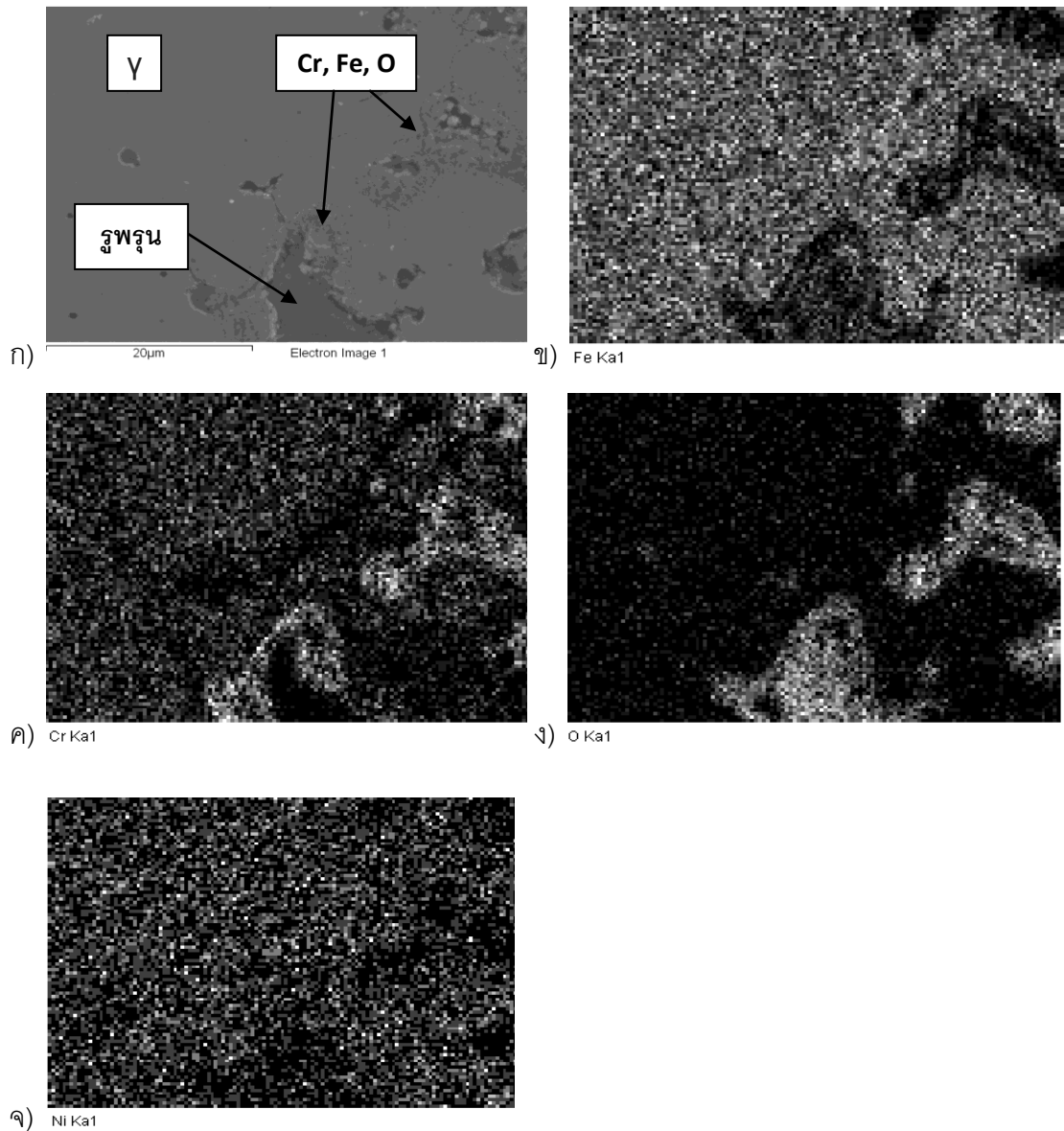
ภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมทั้งฮาตุณิกเกิดและโครเมียม หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ลักษณะเนื้อพื้นประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟสออสเทนไนต์ จะเห็นออกไซด์ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มโตขึ้นมาจากบริเวณรูพรุนเดิม บางบริเวณสามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีอยู่เดิมได้หมดแต่บางบริเวณยังสังเกตเห็นถึงรูพรุนอยู่ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเฟสสีเทาขนาดเล็กกระจายอยู่ที่เนื้อพื้นซึ่งเป็นการตกตะกอนของเฟสทุดิยุมิ เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เติมทั้งฮาตุณิกเกิดและโคบอลต์ 1%โดยมวล พบว่าเมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนที่เวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง พบเฟสทุดิยุมิในปริมาณเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเฟสทุดิยุมิก็ยังคงมีปริมาณน้อยเช่นเดิม โดยปริมาณเฟสทุดิยุมิจากตารางที่ 4.9 ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงมีปริมาณไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นผลจากสมบัติในการทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรของฮาตุณิกเกิดและธาตุโคบอลต์ [2-3, 13, 16] สามารถช่วยลดการเกิดเฟสทุดิยุมิเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้

กล่าวโดยสรุปการเติมธาตุโคบอลต์ การเติมฮาตุณิกเกิด และการเติมธาตุทั้งโคบอลต์และฮาตุณิกเกิด จะช่วยยับยั้งการเกิดเฟสทุดิยุมิ หรือทำให้การเพิ่มขึ้นของเฟสทุดิยุมิช้าลงได้ โดยการเติมธาตุโคบอลต์หากเติมมากกว่า 1%โดยมวลขึ้นไปจะช่วยลดการเกิดเฟสทุดิยุมิอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 75 และ 100 ชั่วโมง ส่วนการเติมฮาตุณิกเกิดจะสามารถช่วยลดการเกิดเฟสทุดิยุมิได้ตั้งแต่ 1%โดยมวล โดยการเติมธาตุในปริมาณเพิ่มขึ้นไม่ได้ให้ผลแตกต่างกันนัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมธาตุโคบอลต์ที่มากกว่า 1%โดยมวล ธาตุโคบอลต์จะให้ผลในการลดปริมาณเฟสทุดิยุมิได้มากกว่าการเติมฮาตุณิกเกิด ส่วนชิ้นงานที่เติมทั้งฮาตุณิกเกิดและธาตุโคบอลต์จะสามารถช่วยลดการเกิดของเฟสทุดิยุมิได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ 1%โดยมวล ทั้งนี้เป็นเพราะสมบัติการทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรของฮาตุณิกเกิดและธาตุโคบอลต์นั่นเอง [2-3, 13, 16]

ตารางที่ 4.9 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 1 - 4%โดยมวล หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

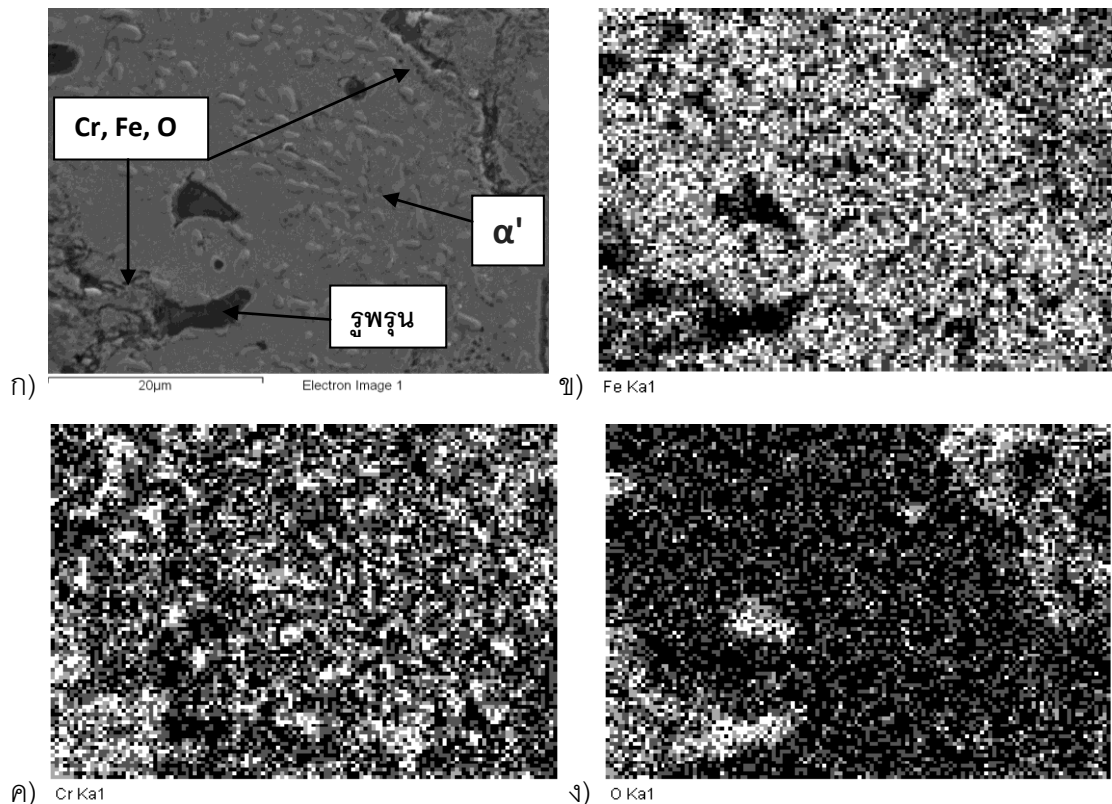
1%Ni+Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
2%Ni+Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
3%Ni+Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			
4%Ni+Co 900°C			
25 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง	75 ชั่วโมง	100 ชั่วโมง
			

4.4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี EDS ในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L



ภาพที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง ก) ภาพถ่ายลักษณะเนื้อพื้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ข) ผลการวิเคราะห์ของธาตุเหล็ก ค) ผลการวิเคราะห์ของธาตุโครเมียม ง) ผลการวิเคราะห์ของธาตุออกซิเจน จ) ผลการวิเคราะห์ของธาตุนิกเกิล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ด้วยวิธี Map scanning คือบริเวณใดมีธาตุที่ทำการตรวจสอบอยู่ก็จะสว่างขึ้นมาในภาพ ซึ่งหากมีปริมาณของธาตุบริเวณที่ทำการตรวจสอบมากภาพที่เห็นก็จะยิ่งสว่างมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.18 โดยจะพบว่าบริเวณที่เป็นเนื้อพื้นออสเทนไนต์มีการกระจายตัวของธาตุเหล็ก โครเมียม และ นิกเกิลสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจะมีธาตุออกซิเจนอยู่ปริมาณมากซึ่งบ่งบอกได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง มีออกไซด์เกิดขึ้นบริเวณรูพรุน โดยบริเวณที่เป็นขอบรูพรุนจะมีธาตุโครเมียมมากกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อพื้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าบริเวณที่เป็นขอบรูพรุนจะเป็นออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูง และนอกจากนี้บริเวณรูพรุนยังพบธาตุเหล็กปริมาณเล็กน้อยกระจายอยู่ซึ่งแสดงว่าอาจเกิดออกไซด์ของเหล็กร่วมกับการเกิดออกไซด์ของโครเมียมด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นในรูพรุนยังคงเป็นออกไซด์ของโครเมียมเป็นหลัก โดยมีออกไซด์ของเหล็กเกิดร่วมด้วยอยู่กับออกไซด์ของโครเมียมปริมาณเล็กน้อย

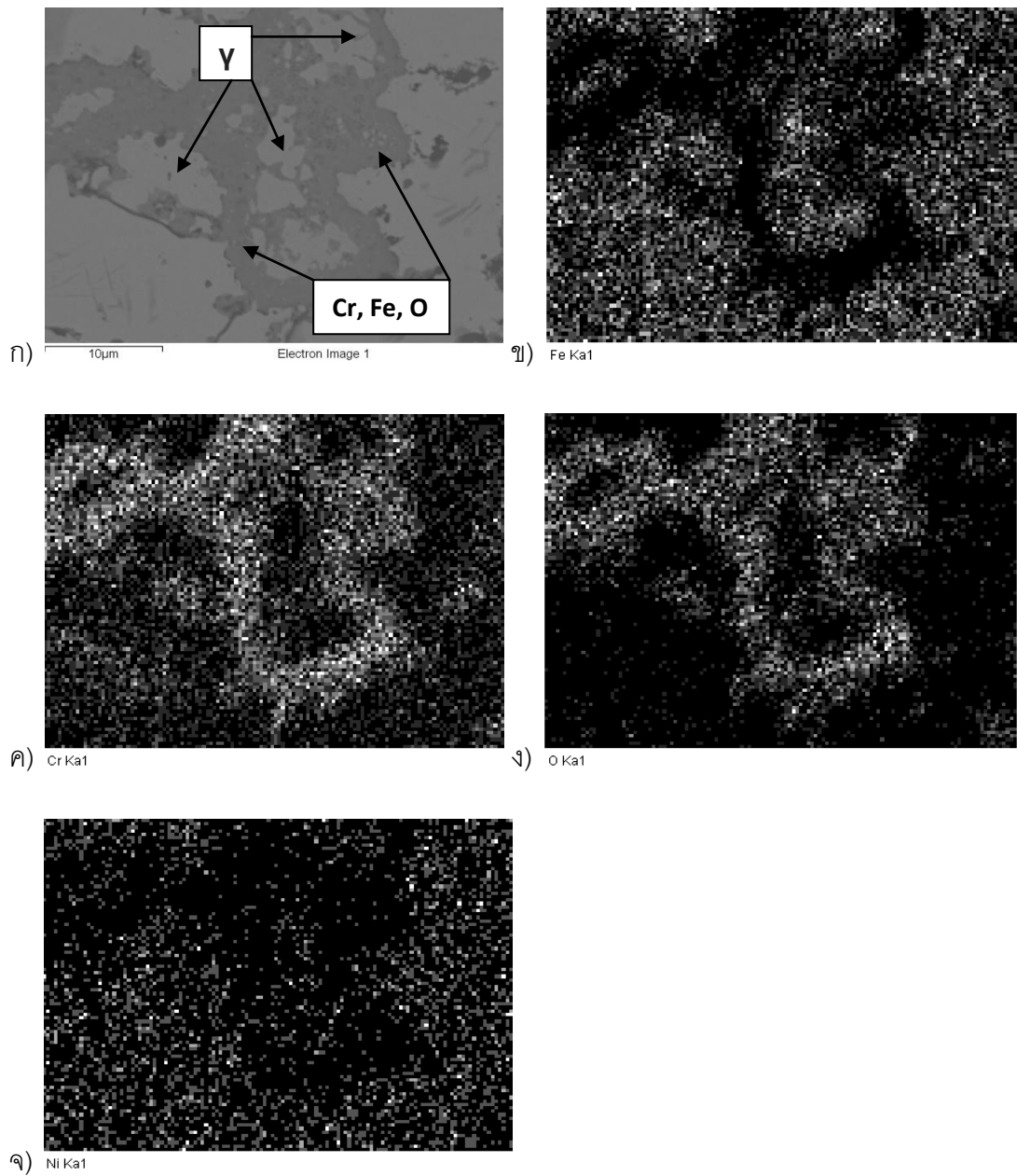




จ) Ni Ka1

ภาพที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ก) ภาพถ่ายลักษณะเนื้อพื้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ข) ผลการวิเคราะห์ของธาตุเหล็ก ค) ผลการวิเคราะห์ของธาตุโครเมียม ง) ผลการวิเคราะห์ของธาตุออกซิเจน จ) ผลการวิเคราะห์ของธาตุนิกเกิล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง จากภาพที่ 4.19 พบว่าเนื้อพื้นออกสเตนตีมีการกระจายตัวของธาตุเหล็ก โครเมียมและนิกเกิลอย่างสม่ำเสมอ และจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนบริเวณเนื้อพื้นออกสเตนตีมีการตกตะกอนของเฟสทุติยภูมิจำนวนมากซึ่งเฟสสี่เทาที่ตกตะกอนออกมานั้นมีปริมาณธาตุโครเมียมสูง ส่วนบริเวณที่เป็นรูพรุนมีปริมาณของธาตุออกซิเจนและโครเมียมสูง จึงน่าจะเกิดออกไซด์ของโครเมียมขึ้นบริเวณนี้ นอกจากนี้บริเวณรูพรุนยังมีธาตุเหล็กอยู่ด้วยเล็กน้อยซึ่งแสดงว่ามีออกไซด์ของเหล็กเกิดขึ้นร่วมกับออกไซด์ของโครเมียมในบริเวณรูพรุนด้วย โดยปริมาณออกไซด์ของเหล็กมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) ในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิล 1%โดยมวล โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 ชั่วโมง ก) ภาพถ่ายลักษณะเนื้อพื้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ข) ผลการวิเคราะห์ของธาตุเหล็ก ค) ผลการวิเคราะห์ของธาตุโครเมียม ง) ผลการวิเคราะห์ของธาตุออกซิเจน จ) ผลการวิเคราะห์ของธาตุนิกเกิล

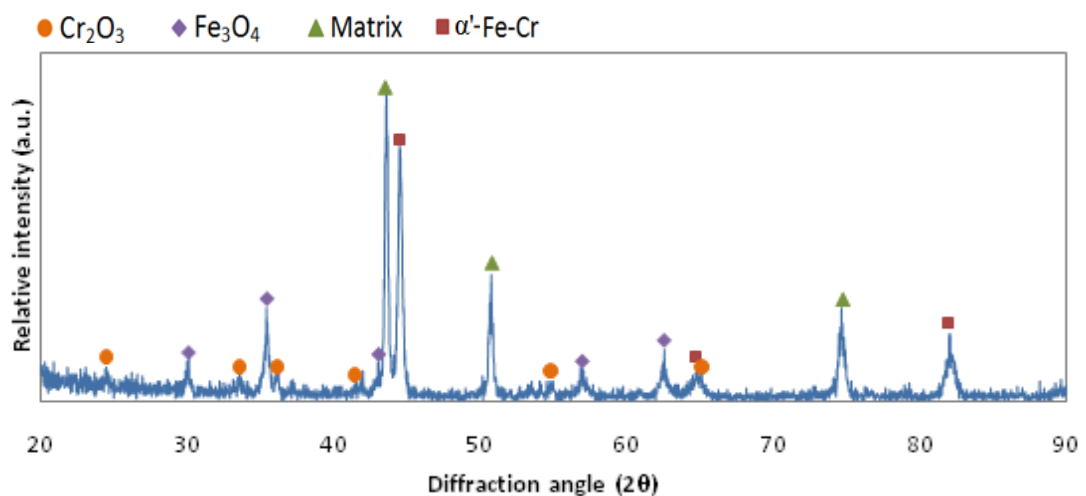
จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ นิกเกิล 1%โดยมวล โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 ชั่วโมง จะเห็นว่ามีลักษณะของออกไซด์ล้อมรอบบริเวณที่มีลักษณะเป็นเนื้อพื้น จึงได้นำชิ้นงานนี้มาหา องค์ประกอบทางเคมี โดยผลที่ได้พบว่าบริเวณสีเทาอ่อนที่เป็นเนื้อพื้นออสเทนไนต์มีการกระจายตัวของธาตุเหล็ก โครเมียม และ นิกเกิลอย่างสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณสีเทาเข้มจะเป็นบริเวณที่มีธาตุ โครเมียม และออกซิเจนสูง ซึ่งน่าจะเป็นออกไซด์ของโครเมียม นอกจากนี้จะเห็นว่าบริเวณที่เป็น สีเทาอ่อนถูกล้อมรอบด้วยด้วยสีเทาเข้มซึ่งน่าจะเป็นออกไซด์ บริเวณสีเทาอ่อนนี้มีปริมาณเหล็ก โครเมียมและนิกเกิลใกล้เคียงกับเนื้อพื้นดังภาพที่ 4.20 ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าบริเวณที่เป็นสีเทา อ่อนก็เป็นเนื้อพื้นออสเทนไนต์ซึ่งเกิดจากการที่ออกไซด์โตแทรกตามขอบเกรนจนล้อมรอบเฟสที่เป็น เนื้อพื้น

4.5 ผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ในเนื้อพื้นโลหะผง เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

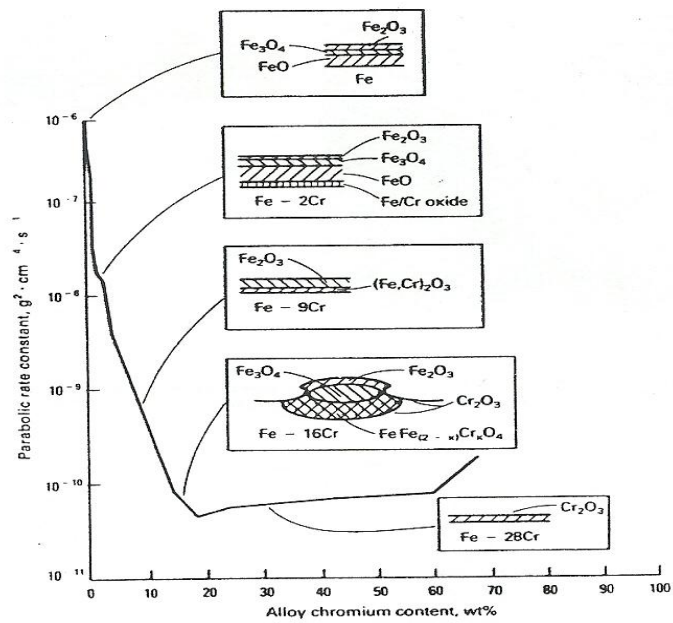
เมื่อนำโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง มาตรวจสอบสารประกอบในเนื้อพื้น สารประกอบที่พบในเนื้อพื้น ได้แก่ α' -Fe-Cr, Cr_2O_3 และ Fe_3O_4 ดังภาพที่ 4.21 ซึ่ง α' -Fe-Cr คือเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ (α' martensite) ซึ่งพีคมีความสูงค่อนข้างมากใกล้เคียงกับเนื้อพื้น โดยเฟสนี้ก็คือเฟสสีเทาขนาดเล็กที่พบกระจายอยู่ที่เนื้อพื้นในโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยโครเมียมและเหล็ก ซึ่งจากการ ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่า เป็นเฟสที่มีโครเมียมสูง และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ bcc มีค่าพารามิเตอร์ของ unit cell คือ a เท่ากับ 2.876 ซึ่งการเกิดขึ้นของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ ในเนื้อพื้นออสเทนไนต์สามารถเกิดขึ้นได้ในชิ้นงานที่ผ่านการเกิดเปลี่ยนรูป (deformation) หรือมีความเครียดเกิดขึ้นในชิ้นงาน (strain) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเกิดขึ้นของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทน ไซต์จะเพิ่มความแข็ง แต่ทำให้ความเหนียวลดลง [3, 17-20] โดยสาเหตุของการเกิดเฟสแอลฟา ไพร์มมาร์เทนไซต์ในงานวิจัยนี้เกิดจากออกไซด์ที่โตขึ้นมาในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิดความเค้นในเนื้อพื้น

โดยยิ่งขนาดรูพรุนเริ่มต้นมีขนาดเล็กมากก็จะมีแนวโน้มความเค้นจากการโตของออกไซด์ในรูพรุนเบียดกับเนื้อพื้นมากขึ้น และทำให้เกิดแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ในชั้นงานมากขึ้น

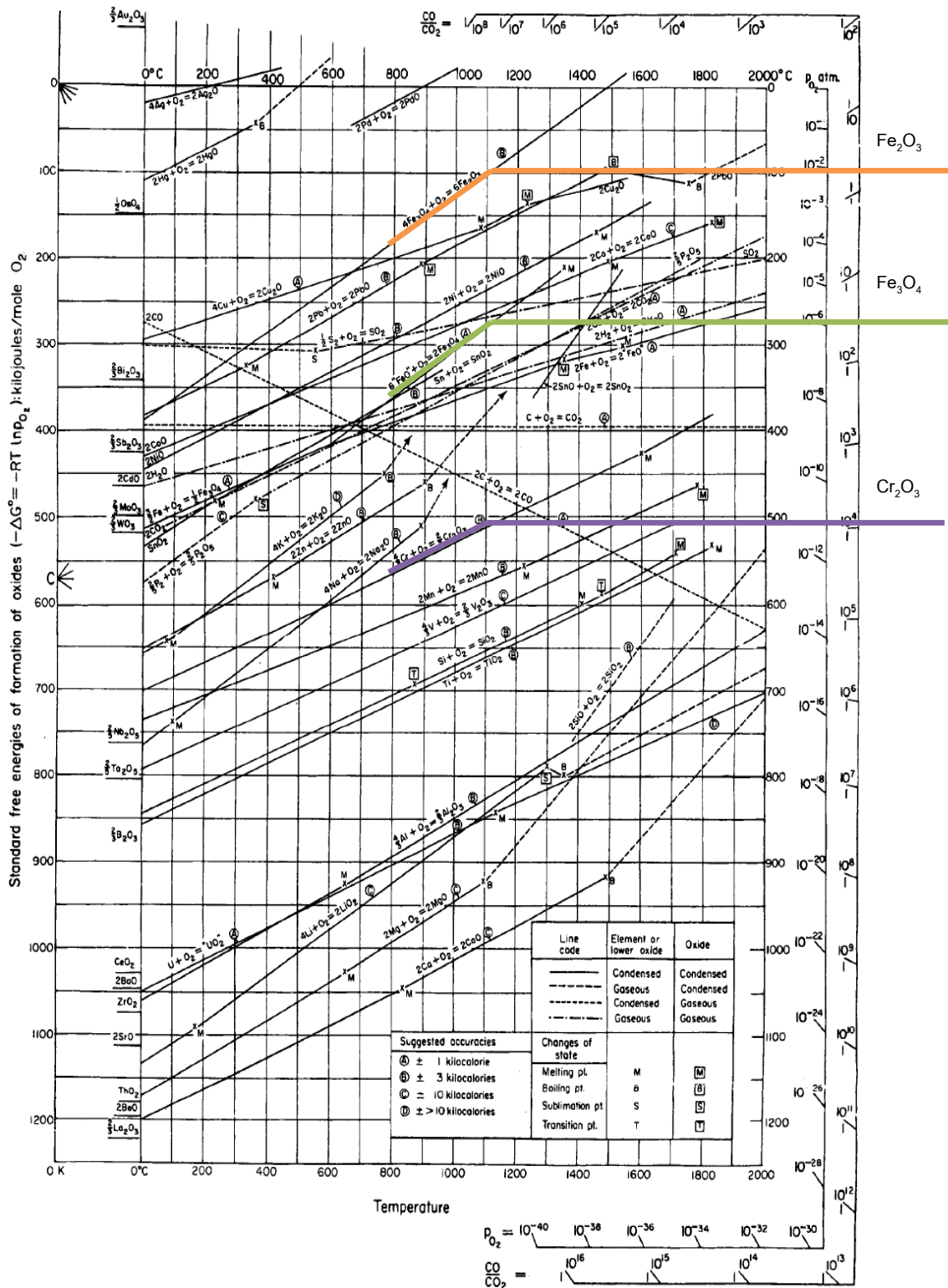
ส่วน Cr_2O_3 และ Fe_3O_4 (Magnetite) คือออกไซด์ที่โตขึ้นมาปิดรูพรุนซึ่งลักษณะของพีคที่พบมีความสูงเพียงเล็กน้อย โดยออกไซด์ดังกล่าวเกิดจากการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในรูพรุนเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง [8] ซึ่งความเป็นไปได้ของออกไซด์ที่สามารถพบได้ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีธาตุโครเมียมไม่เกิน 20% โดยมวลได้แก่ Fe_2O_3 , Fe_3O_4 และ Cr_2O_3 หรือ $\text{Fe}_{(2-x)}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ดังภาพที่ 4.22 [3, 8] แต่ชนิดของออกไซด์ที่พบมีไม่ครบทุกชนิด เนื่องจากหากดูจากกราฟ Ellingham ดังภาพที่ 4.23 จะพบว่า การเกิดของออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนโดย Cr_2O_3 เกิดได้ง่ายสุดเพราะมีค่า Gibbs free energy ต่ำสุดและเกิดได้แม้มีออกซิเจนน้อย รองลงมาคือ Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก Fe_2O_3 เป็นออกไซด์ชนิดที่ต้องการสภาวะที่มีออกซิเจนสูง ดังนั้นในรูพรุนเป็นสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยจึงไม่พบออกไซด์ดังกล่าว



ภาพที่ 4.21 แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



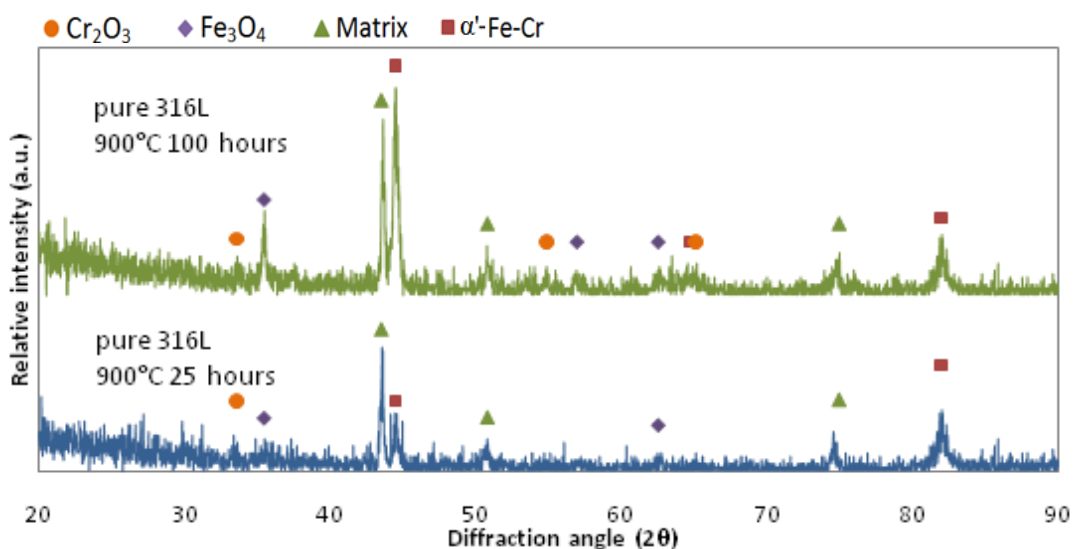
ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงผลธาตุโครเมียมต่อการเกิดออกไซด์ชั้น และโครงสร้างออกไซด์ [3]



ภาพที่ 4.23 กราฟ Ellingham [15]

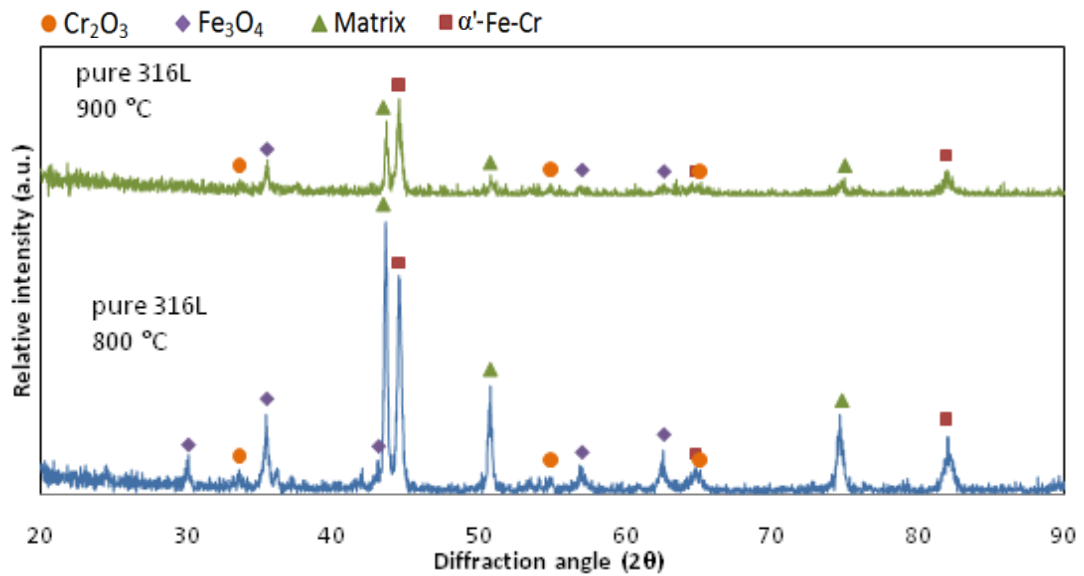
4.5.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดเฟสต่างๆในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

เมื่อนำโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 100 ชั่วโมง มาตรวจสอบสารประกอบในเนื้อพื้น พบว่าสารประกอบในเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L คือ α '-Fe-Cr, Cr_2O_3 และ Fe_3O_4 ซึ่ง α '-Fe-Cr คือเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ซึ่งลักษณะของพีกค่อนข้างสูง ส่วน Fe_3O_4 (Magnetite) และ Cr_2O_3 คือออกไซด์ที่โตขึ้นมาป็นรูพรุนซึ่งมีความสูงของพีกไม่มากนักดังภาพที่ 4.24 และเมื่อเปรียบเทียบพีกของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์เมื่อให้ความร้อนที่ 25 และ 100 ชั่วโมง พบว่าพีกของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ที่ 25 ชั่วโมง ต่ำกว่าพีกของเนื้อพื้น ส่วนพีกของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ที่ 100 ชั่วโมงสูงกว่าพีกของเนื้อพื้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมินี้จะทำให้การเกิดขึ้นของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.24 แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 100 ชั่วโมง

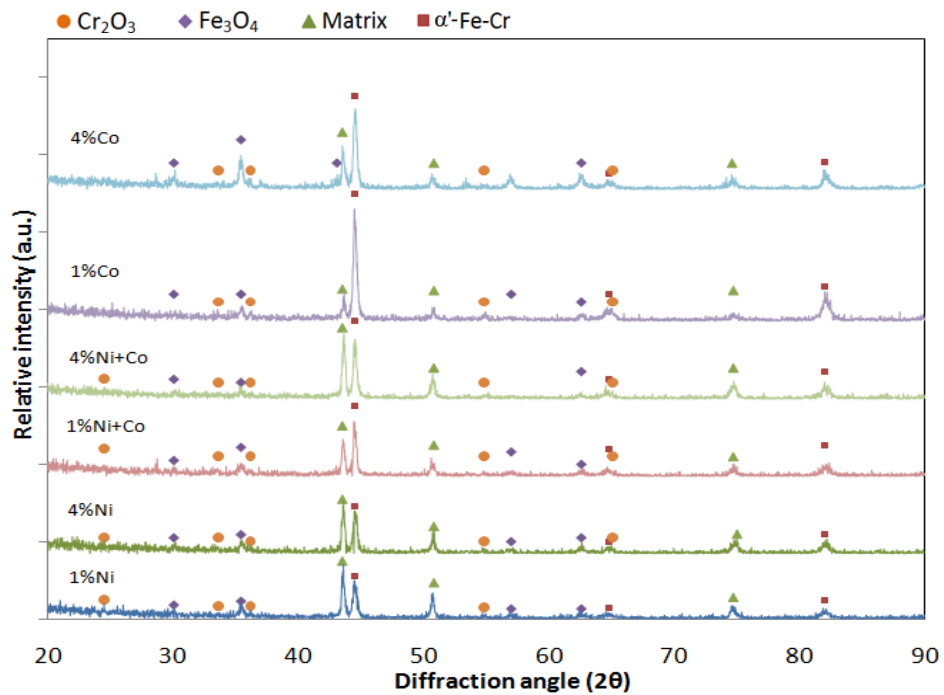
โดยเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส สารประกอบที่พบยังคงเป็นชนิดเดียวกัน แต่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พีกของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์สูงขึ้นกว่าเดิมมาก แสดงว่าหากเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากขึ้นจาก 800 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส การเกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ก็เพิ่มขึ้นด้วยดังภาพที่ 4.25



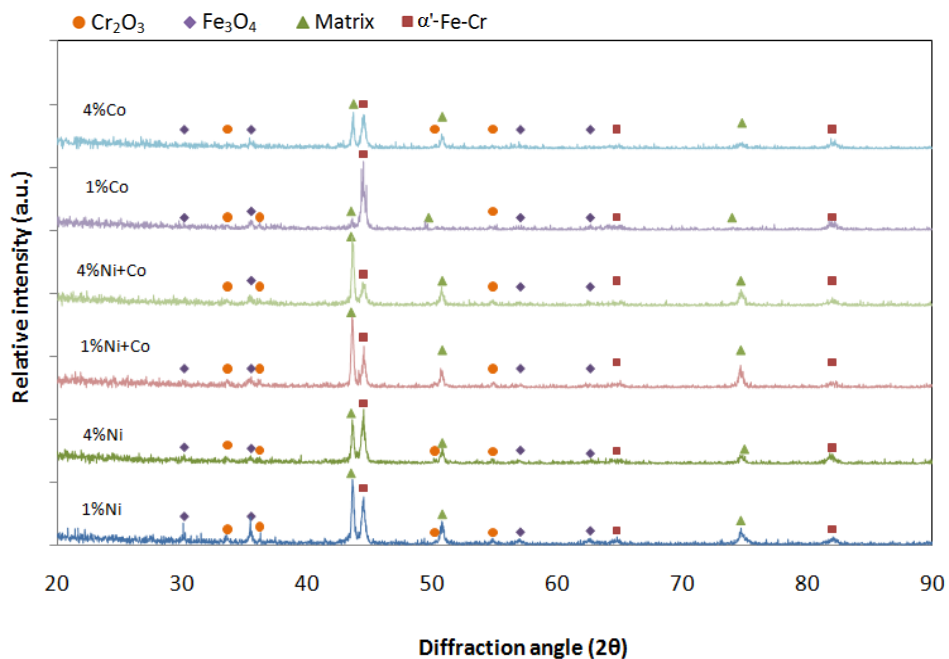
ภาพที่ 4.25 แสดงชนิดสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

4.5.2 ผลของธาตุ निकิลและโคบอลต์ต่อการเกิดเฟสต่างๆในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

จากภาพที่ 4.26 และ 4.27 ผลของธาตุในอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นได้แก่ α' -Fe-Cr, Cr_2O_3 และ Fe_3O_4 ซึ่ง α' -Fe-Cr คือเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ซึ่งมีลักษณะของพีคค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับความสูงพีคของเนื้อพื้น ส่วน Fe_3O_4 (Magnetite) และ Cr_2O_3 คือออกไซด์ที่โตขึ้นมาปิดรูพรุนโดยมีลักษณะของพีคค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการเติมธาตุมีผลต่อความสูงของพีคแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ซึ่งนั่นก็หมายความว่าธาตุที่เติมลงไปมีผลต่อปริมาณแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์นั่นเอง โดยจะสามารถเห็นความแตกต่างความสูงของพีคแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์และสาเหตุได้จากตารางที่ 4.10 ที่แสดงการเปรียบเทียบของอัตราส่วนความสูงของพีคแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ต่อความสูงพีคของเนื้อพื้นในสภาวะที่มีการเติมธาตุต่างชนิดกันและปริมาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.26 ผลของธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ต่อสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.27 ผลของธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ต่อสารประกอบในเนื้อพื้นโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบอัตราส่วนความสูงของพีคแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์กับความสูงพีคของเนื้อพื้น

	800°C	900°C	สาเหตุ	อิทธิพลของขนาดรูพรุนหลังเผาผนิก
Pure 316L	0.8	1.3	ที่อุณหภูมิสูงขึ้นการโตของออกไซด์และการขยายตัวของเนื้อพื้นมีมากขึ้น ทำให้ความเครียดในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น	รูพรุนมีขนาดปานกลาง
1%Co	3.67	6.33	ธาตุโคบอลต์ช่วยลดการขยายตัวของเนื้อพื้นเนื่องจากความร้อน	รูพรุนมีขนาดเล็ก
4%Co	1.85	0.95		
1%Ni+Co	1.46	0.59	ธาตุนิกเกิลช่วยทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรร่วมกับธาตุโคบอลต์ที่ช่วยลดการขยายตัวของเนื้อพื้นเนื่องจากความร้อน	รูพรุนมีขนาดปานกลาง
4%Ni+Co	0.71	0.32		
1%Ni	0.71	0.67	นิกเกิลช่วยทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียร ที่ 4%Ni มีการลดลงของขนาดและปริมาณรูพรุน และที่ 900°C การขยายตัวของออกไซด์และเนื้อพื้นมากกว่าที่ 800°C	รูพรุนมีขนาดใหญ่
4%Ni	0.81	1.24		

เนื่องจากอัตราส่วนความสูงของพีคในกราฟ XRD สามารถเปรียบเทียบปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นได้ ดังนั้นจากตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนจาก 800 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการโตของออกไซด์และการขยายตัวของเนื้อพื้นมีมากขึ้น ทำให้ความเครียดในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณธาตุที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนเดียวกันพบว่า ชีงงานที่เติมธาตุโคบอลต์เพิ่มขึ้นมีปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ลดลงทั้งที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากธาตุโคบอลต์ช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้จึงลดช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นได้ โดยธาตุโคบอลต์มีค่าการขยายตัว (Thermal Expansion Coefficient ($/10^{-6}K^{-1}$) ที่อุณหภูมิ 827 องศาเซลเซียส เท่ากับ 17 แต่อย่างไรก็ตามรูปพรรณเริ่มต้นในชีงงานที่เติมธาตุโคบอลต์ต่ำกว่าชีงงานที่ไม่ได้เติมธาตุมากจึงทำให้เกิดความเค้นในชีงงานเนื่องจากการโตของออกไซด์มาเบียดกับเนื้อพื้นได้มากกว่าชีงงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ส่วนที่อุณหภูมิ 900 ชีงงานที่เติมธาตุโคบอลต์ 1%โดยมวล มีปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มากกว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่าออกไซด์โตได้ดีกว่าจึงทำให้เกิดความเค้นในเนื้อพื้นมากขึ้นและทำให้เกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ได้มากกว่า แต่การเติมธาตุโคบอลต์ที่ 4%โดยมวล ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ธาตุโคบอลต์มีการแพร่ไปในเนื้อพื้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จึงทำให้เฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลงมากกว่าชีงงานที่เติมธาตุโคบอลต์ในปริมาณเดียวกันที่ 800 องศาเซลเซียส

การเติม निकิลช่วยทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรประกอบกับขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่เพียงพอให้ออกไซด์ขยายตัวในรูพรุนได้ จึงทำให้ชีงงานที่เติมธาตุนิกิลเพียง 1%โดยมวล มีปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ต่ำกว่าชีงงานที่ไม่ได้เติมธาตุที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามการเติมธาตุนิกิลที่ 4%โดยมวล ทำให้ทำให้สัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลง ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการเติม निकิลเพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดการเกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสซึ่งมีการโตของออกไซด์มากกว่าชีงงานที่เติมธาตุนิกิล 4%โดยมวลจึงอาจไม่เพียงพอที่จะไปช่วยลดการเกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ได้ ทำให้เฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

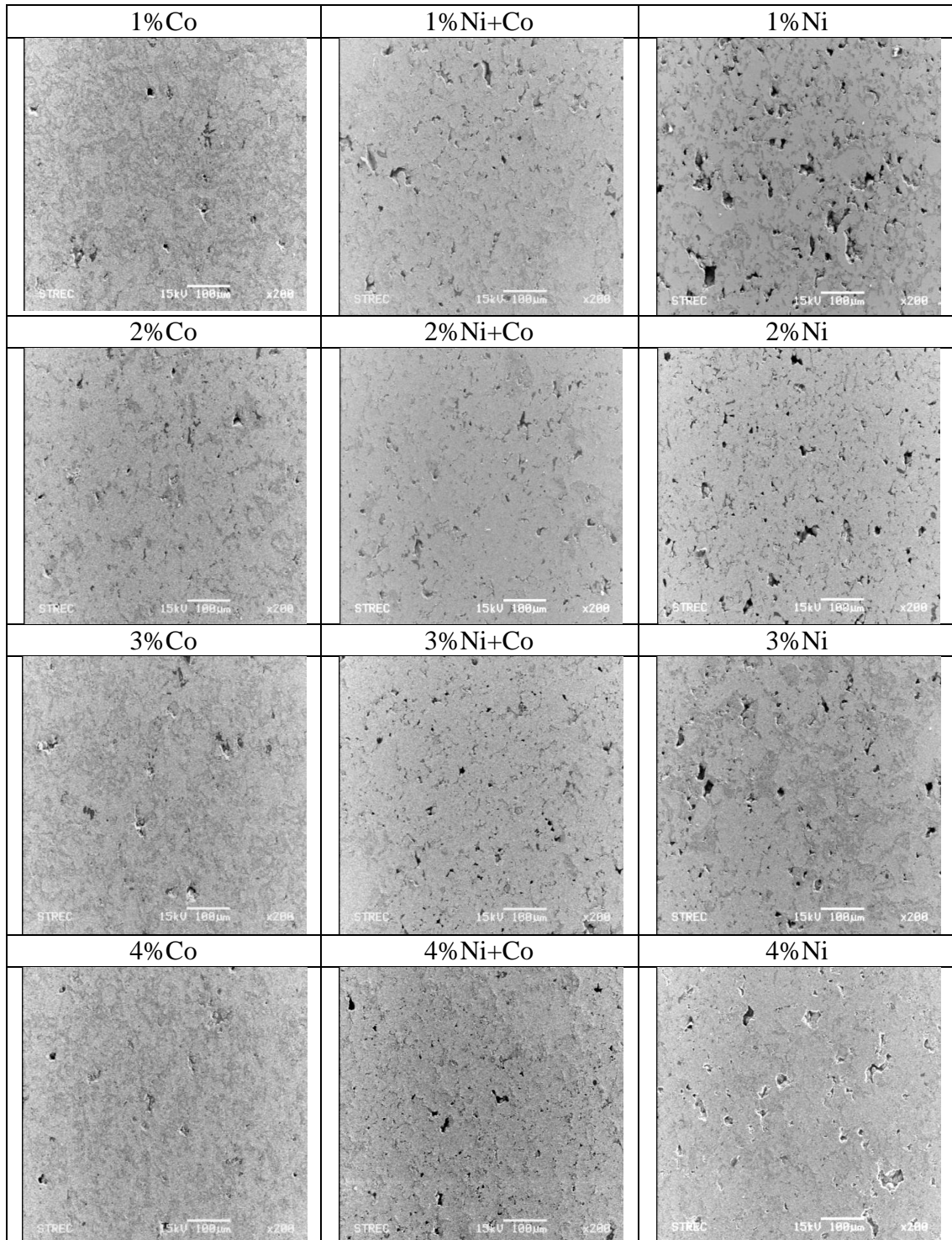
ส่วนชีงงานที่เติมทั้งธาตุนิกิลและโคบอลต์เมื่อให้ความร้อนอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุนิกิลและโคบอลต์เฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง เป็นผลมาจากธาตุนิกิลที่ช่วยให้เฟสออสเทนไนต์เสถียร

และผลของโคบอลต์ที่ช่วยให้ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมินี้มีการแพร่ของธาตุ निकิลเกิดและโคบอลต์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

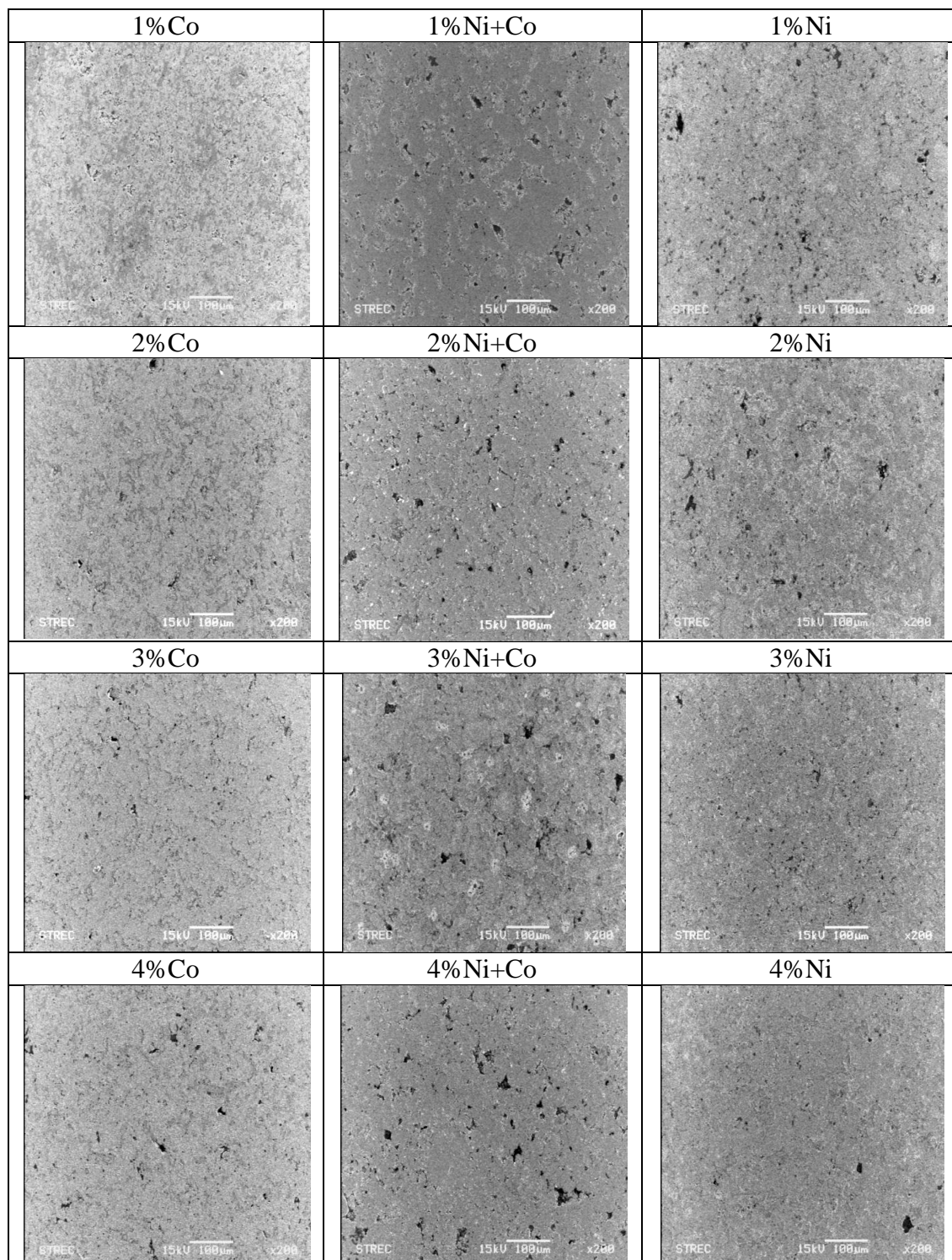
4.6 ผลของธาตุต่อลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L จะเห็นปริมาณและขนาดรูพรุนได้ชัดเจน โดยเนื้อพื้นบริเวณที่เป็นสีดำจะเป็นรูพรุนที่เหลืออยู่ สีเทาเข้มจะเป็นสีของออกไซด์ที่โตขึ้นมาบริเวณรูพรุนจากการนำชิ้นงานไปผ่านการให้ความร้อน ส่วนบริเวณที่เป็นสีเทาอ่อนจะเป็นสีของเนื้อพื้นออกสเตนไนต์ จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง เหลือรูพรุนในเนื้อพื้นอยู่ โดยขนาดและปริมาณรูพรุนยังคงเป็นไปตามลักษณะรูพรุนเดิมที่มีมาก่อนหน้านี้ นั่นคือชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีขนาดรูพรุนเล็กสุด รองลงมาคือชิ้นงานที่เติมทั้ง निकิลเกิดและโคบอลต์ และชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลเกิดตามลำดับ และเมื่อเติมธาตุมากขึ้นรูพรุนมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาลักษณะรูพรุนเมื่อชิ้นงานผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ลักษณะรูพรุนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส คือชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีขนาดรูพรุนเล็กสุด รองลงมาคือชิ้นงานที่เติมทั้ง निकิลเกิดและโคบอลต์และชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลเกิดตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมินี้ปริมาณธาตุต่อปริมาณรูพรุนไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบขนาดและปริมาณรูพรุนกับชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่ารูพรุนมีขนาดและปริมาณลดลงเนื่องจากออกไซด์ที่โตได้ดีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง



ตารางที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส 100 ชั่วโมง

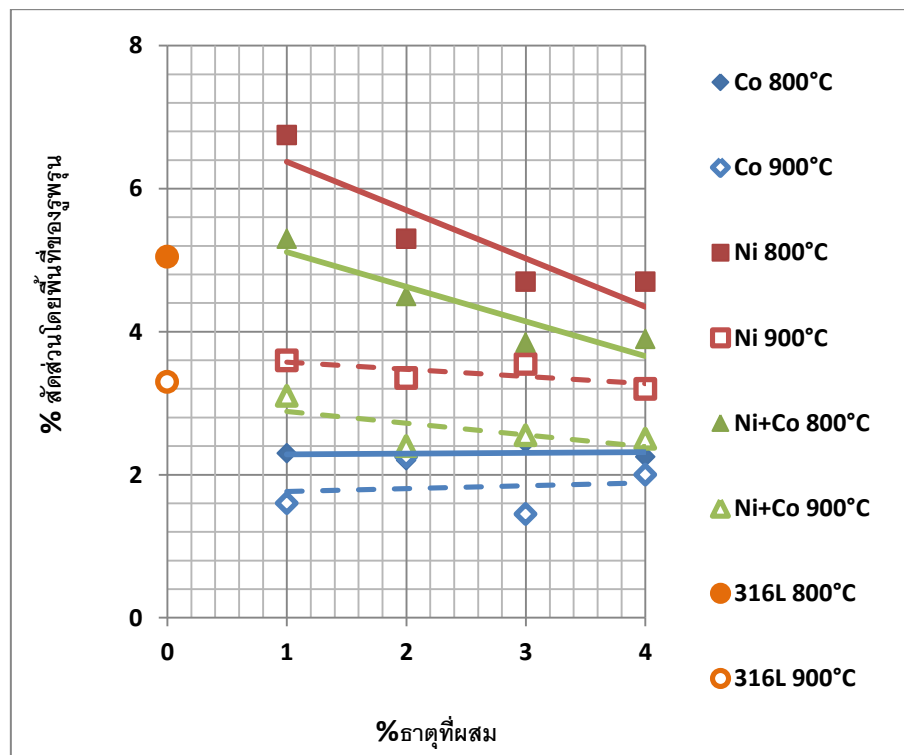


จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L จะเห็นได้ว่าการโตของออกไซด์ในเนื้อพินขึ้นมากับปริมาตรของรูพรุน ลักษณะการโตของออกไซด์ในชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลจะยังคงเหลือรูพรุนมากกว่าชิ้นงานที่เติมทั้งนิกเกิลและโคบอลต์ และชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ โดยเมื่อเติมธาตุนิกเกิลมากขึ้นจะเห็นว่าค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมีค่าลดลง ซึ่งแนวโน้มนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ และชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ และเป็นไปตามแนวโน้มของรูพรุนเดิมที่มีมาตั้งแต่ตอนเผาพูนิก แต่การลดลงของรูพรุนในชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีการลดลงมากกว่าชิ้นงานอื่นดังภาพที่ 4.28 ที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องมาจากการวัดปริมาณรูพรุนเป็นการวัดจากสัดส่วนพื้นที่หรือเป็นการวัดแบบ 2 มิติ ดังนั้นการลดลงของรูพรุนจะมาจากรูพรุนที่ถูกเติมเต็มโดยสมบูรณ์เท่านั้น ซึ่งหากชิ้นงานมีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ออกไซด์ก็ไม่สามารถเติมเต็มได้หมดจึงทำให้มีการลดลงของรูพรุนน้อย แต่หากชิ้นงานมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งออกไซด์สามารถเติมเต็มได้อย่างสมบูรณ์ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานนั้นก็จะสามารถลดลงได้อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนในชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิลจากภาพถ่ายที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีรูพรุนที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก ดังนั้นการลดลงอย่างเห็นได้ชัดของสัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ก็มาจากการเติมเต็มของออกไซด์ในรูพรุนที่มีขนาดเล็กนั่นเอง

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนในชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์กับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ พบว่าจะให้ค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนน้อยกว่า ส่วนชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิล และชิ้นงานที่เติมทั้งนิกเกิลและโคบอลต์ใน 1-2% โดยมวลจะให้ค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ และเมื่อเติมธาตุลงไปเพิ่มขึ้นที่ 3-4 % โดยมวล จะพบว่าปริมาณสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนลดลงต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ให้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียสที่เวลาเดียวกัน จะเห็นได้ว่าปริมาณและขนาดรูพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีขนาด

ของรูพรุนเล็กที่สุดและลดลงจากที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเล็กน้อย รองลงมาเป็นชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุ निकิลและโคบอลต์ซึ่งลดลงจากที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสค่อนข้างมาก และสุดท้ายคือชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลจะพบว่าขนาดของรูพรุนใหญ่สุด ซึ่งจะเห็นว่าแนวโน้มของการเติมธาตุต่างชนิดยังคงมีแนวโน้มจากรูพรุนที่มีมาก่อนหน้านี้อยู่ ส่วนสาเหตุที่รูพรุนของชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลและเติมทั้ง निकิลและโคบอลต์ลดลงอย่างมากเป็นเพราะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ออกไซด์สามารถโตได้เร็วจนที่เวลา 100 ชั่วโมง ออกไซด์สามารถเติมเต็มรูพรุนที่มีขนาดเล็กรวมไปถึงรูพรุนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากด้วย นอกจากนี้การโตของออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นที่อุณหภูมินี้ยังส่งผลให้ปริมาณของธาตุที่เติมลงไปชิ้นงานแทบจะไม่มีผลต่อสัดส่วนโดยพื้นที่ของรูพรุนด้วย



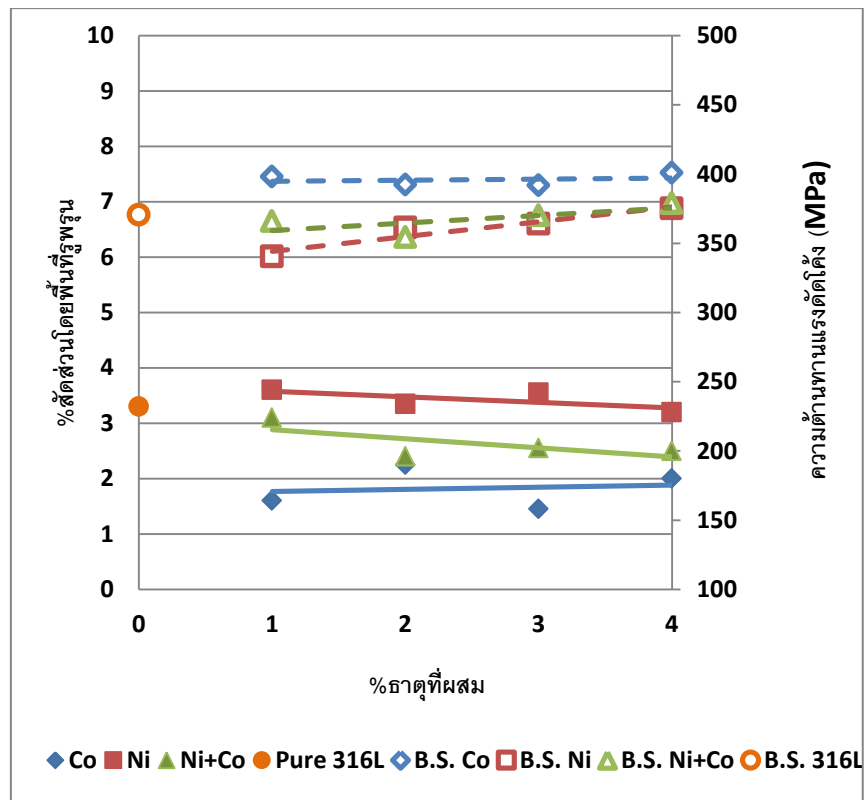
ภาพที่ 4.28 แสดงผลของธาตุต่อสัดส่วนโดยพื้นที่รูพรุนที่เกิดขึ้นในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

4.7 ผลของธาตุต่อสมบัติทางกลในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

4.7.1 ผลของธาตุต่อความต้านทานการดัดโค้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เมื่อนำโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบความต้านทานการดัดโค้ง ชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์เพิ่มขึ้น แนวโน้มค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าคงที่ และมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิล ชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ และชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ส่วนชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิล และชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุนิกเกิลและโคบอลต์มีแนวโน้มของค่าความต้านทานการดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีค่าความต้านทานการดัดโค้งใกล้เคียงกันมาก และใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุด้วย ดังภาพที่ 4.29 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าเป็นไปตามปริมาณรูพรุน ซึ่งการที่ค่าความต้านทานการดัดโค้งมีแนวโน้มเป็นไปตามปริมาณรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เนื่องจากค่าความต้านทานการดัดโค้งขึ้นกับลักษณะของรูพรุน [4] โดยเมื่อเติมธาตุเพิ่มขึ้น รูพรุนมีแนวโน้มของค่าความต้านทานการดัดโค้งคงที่ จึงทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าคงที่ หรือหากเพิ่มขึ้นก็เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และนอกจากนี้การเติมธาตุโคบอลต์ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffening) ให้กับเนื้อพื้นได้อีกด้วย [2] จึงทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุโคบอลต์

เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลานานดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนลดลง เนื่องมาจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งที่ผิวและในรูพรุนเกิดการเชื่อมต่อกันมากขึ้นหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

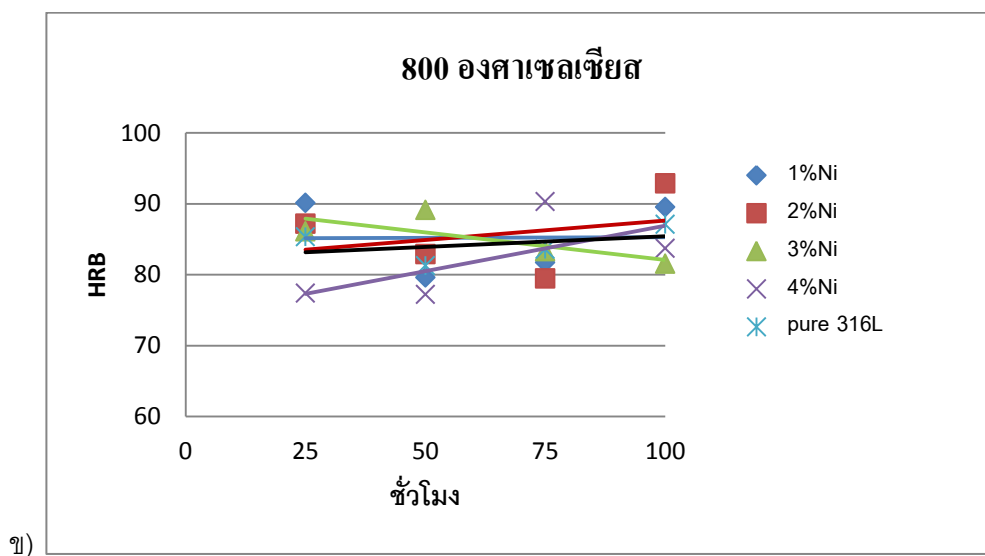
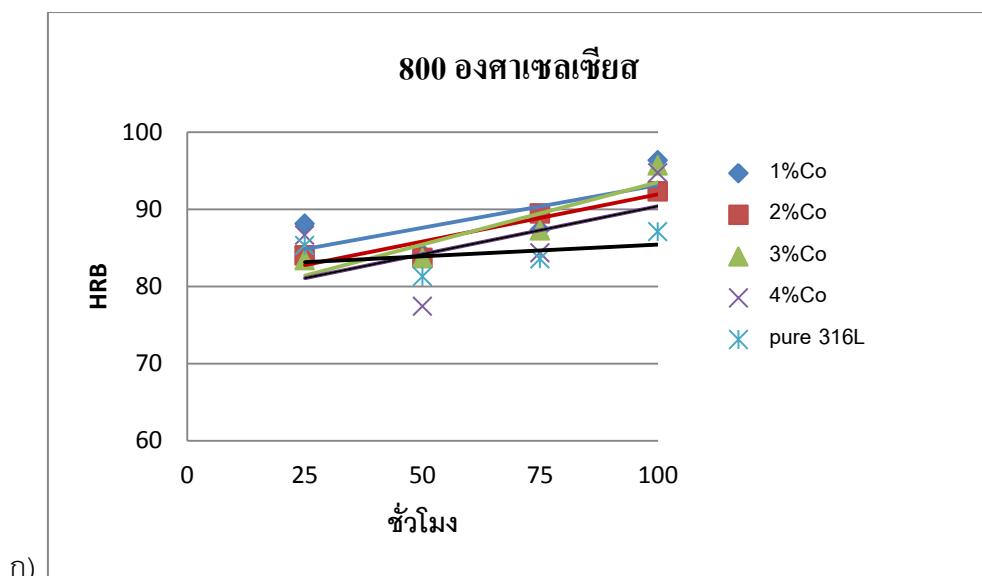


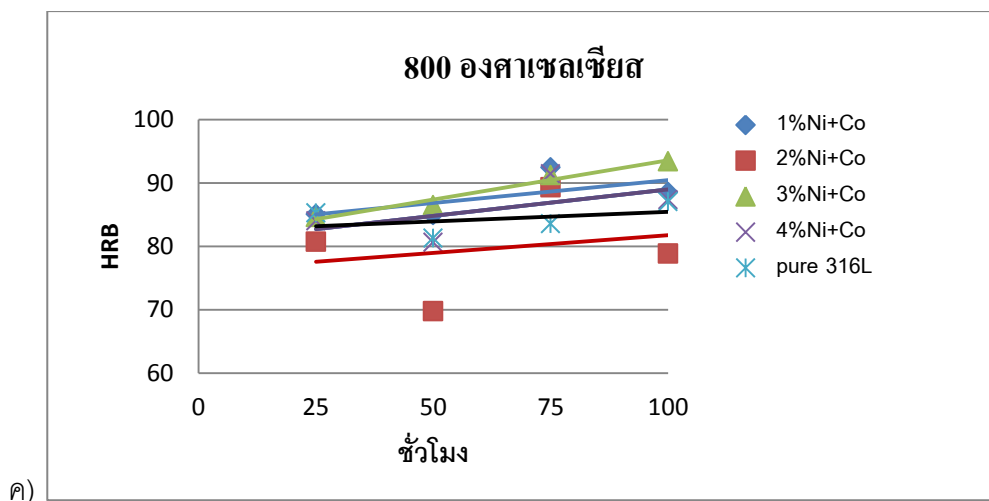
ภาพที่ 4.29 แสดงผลของธาตุต่อความต้านทานการดัดโค้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

4.7.2 ผลของธาตุต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

ผลจากการทดสอบความแข็งด้วย Rockwell scale B ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ไปผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้นค่าความแข็งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มนี้จะไปในทิศทางเดียวกันในชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ 1% 2% 3% และ 4% โดยมวล โดยที่ค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ในปริมาณแตกต่างกันก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังภาพที่ 4.30 ก) และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งในกลุ่มของชิ้นงานที่เติมธาตุ निकเกิด และชิ้นงานที่เติมธาตุทั้งนิกเกิดกับโคบอลต์ หลังนำไปผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันพบว่าแนวโน้มจะเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับกลุ่มชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ คือเมื่อเพิ่มเวลา ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น และการเติมธาตุในปริมาณต่างกันจะให้ค่าความแข็ง

ใกล้เคียงกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 4.30 ข) และ ค) ทั้งนี้ค่าความแข็งที่ได้เป็นไปตามขนาดและปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน และผลของออกไซด์ที่โตมาป็นรูพรุน จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนออกไซด์ในรูพรุนยังมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นค่าความแข็งจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน ยังทำให้เกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ ซึ่งการเกิดขึ้นของเฟสนี้จะทำให้มีผลไปเพิ่มค่าความแข็งของเนื้อพื้นได้





ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความแข็งของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ก) เต็มธาตุโคบอลต์ ข) ธาตุ निकเกิด และ ค) เต็มธาตุ निकเกิดและโคบอลต์ และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

กล่าวโดยสรุปคือแนวโน้มของค่าความแข็งของชิ้นงานที่เต็มธาตุ และไม่ได้เต็มธาตุที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเติมธาตุในปริมาณแตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าความแข็งมากนัก ทั้งนี้แนวโน้มของค่าความแข็งดังกล่าวมีสาเหตุมาจากปริมาณรูปพูนที่ลดลงจากปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นในรูปพูนและปริมาณการเกิดเฟสแอลฟาไพรมมาร์เทนไซต์ที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น [3-4]

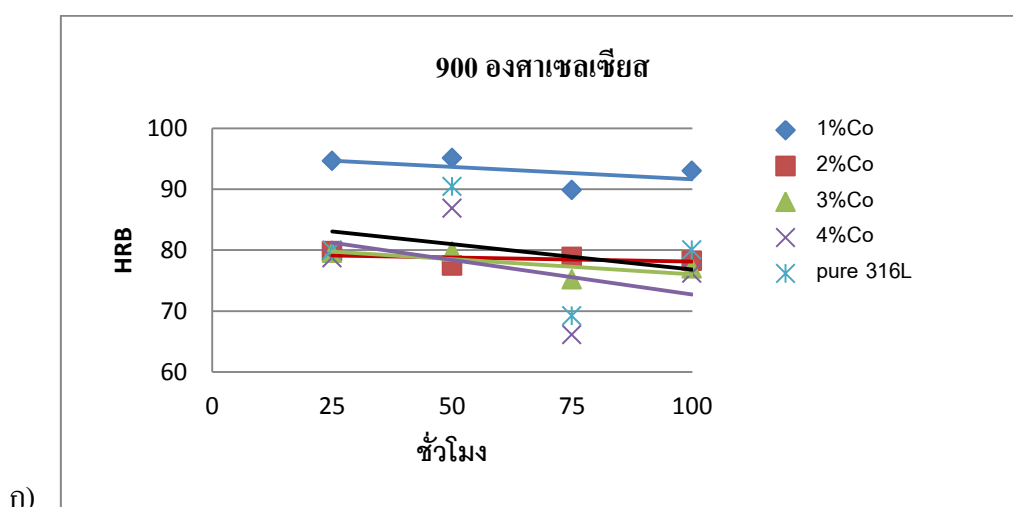
4.7.3 ผลของธาตุต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

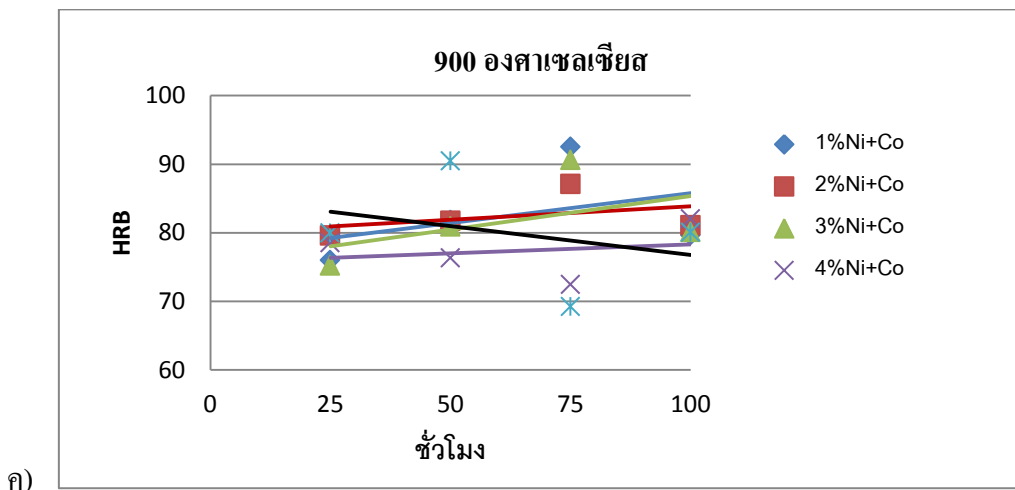
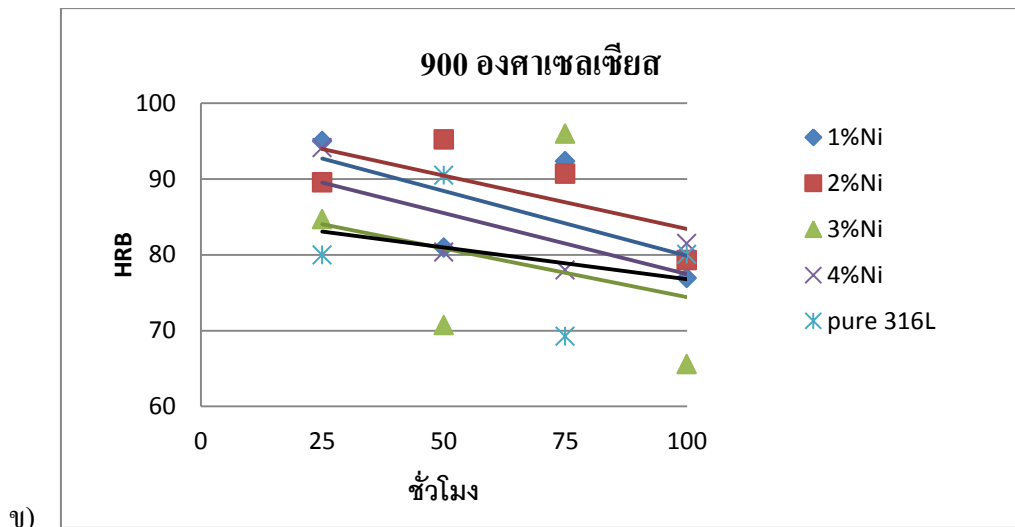
ผลจากการทดสอบความแข็งด้วย Rockwell scale B ของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่เต็มธาตุโคบอลต์ไปผ่านการให้ความร้อนดังกล่าวเวลานั้นค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แนวโน้มนี้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกันในชิ้นงานที่เต็มธาตุโคบอลต์ 1% 2% 3% และ 4%โดยมวล โดยที่ค่าความแข็งที่ได้จากชิ้นงานที่เต็มธาตุโคบอลต์ในปริมาณ

แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ 1%โดยมวล มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานอื่น แนวโน้มของค่าความแข็งแรงที่ได้รับอิทธิพลมาจากลักษณะของรูพรุนในชิ้นงาน ออกไซด์ที่โตขึ้นมาปิดรูพรุน ปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมินี้มีการโตของออกไซด์ขึ้นมาปิดรูพรุนโดยมากตั้งแต่ให้ความร้อนเป็นเวลา 25 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนการโตของออกไซด์จึงมีน้อยมากจนทำให้เวลาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง ดังภาพที่ 4.31 ก)

พิจารณาค่าความแข็งแรงในกลุ่มของชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลพบว่ามีแนวโน้มลดลง และชิ้นงานที่เติมธาตุในปริมาณแตกต่างกันจะมีค่าความแข็งแรงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยชิ้นงานที่เติมธาตุ निकิลมากขึ้นค่าความแข็งแรงจะลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ निकิลสามารถแพร่ในเนื้อพื้นได้ดีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้เนื้อพื้นออสเทนไนต์นิ่มลง [3] ดังภาพที่ 4.31 ข)

และเมื่อพิจารณาในชิ้นงานที่เติมทั้งธาตุ निकิลและโคบอลต์พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับชิ้นงานที่งานที่เติมธาตุปริมาณ 1-4%โดยมวล โดยชิ้นงานที่เติมธาตุทั้งสองในปริมาณ 4%โดยมวลมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าชิ้นงานอื่น เนื่องจากการลดลงของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์นั่นเอง ดังภาพที่ 4.31 ค)

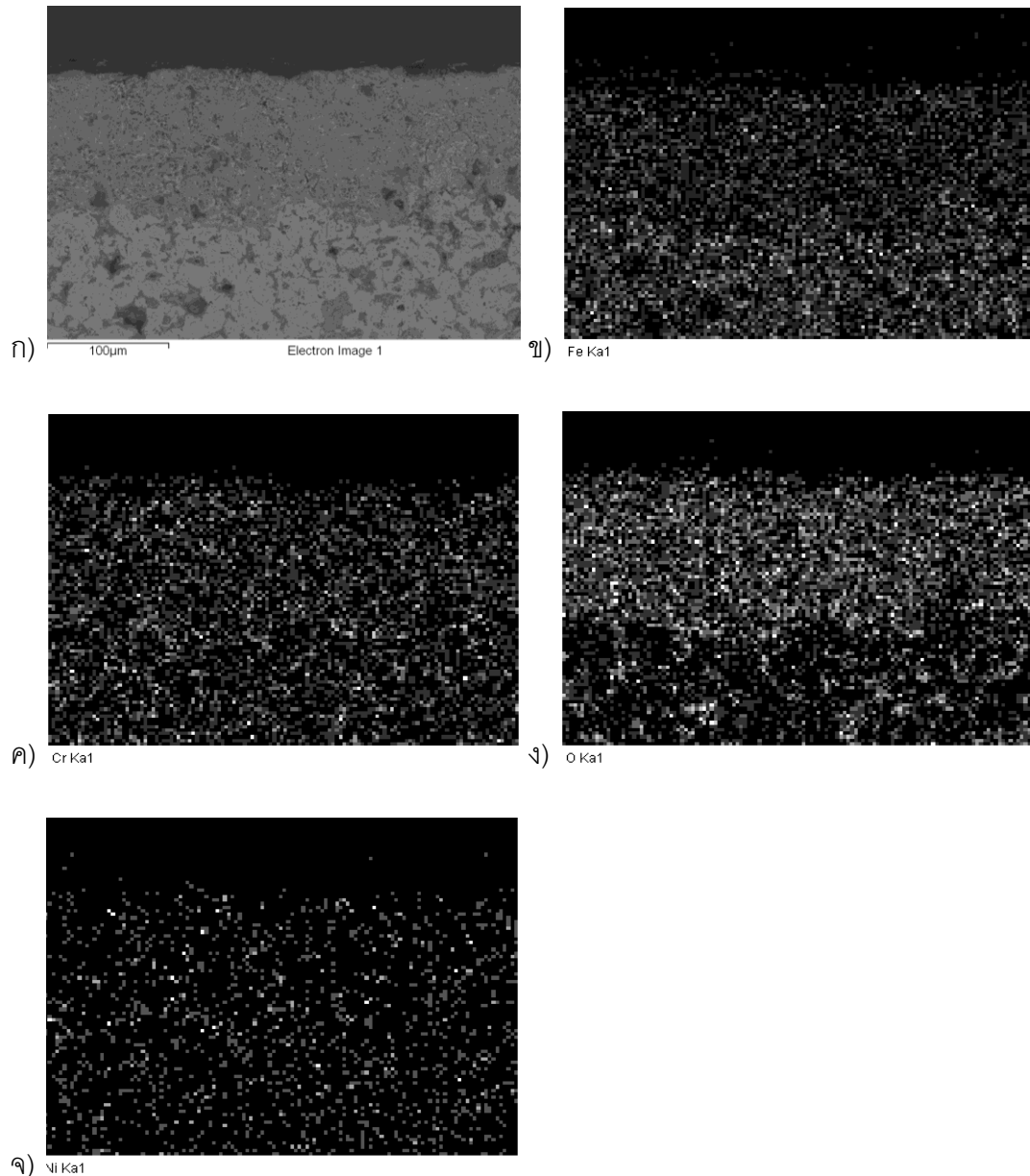




ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงค่าความแข็งของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ก) เติมธาตุโคบอลต์ ข) ธาตุ निकิล และ ค) เติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยค่าความแข็งที่ 900 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความแข็งที่ 800 องศาเซลเซียสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลานานปรากฏว่าชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลานานมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจาก การเกิดออกไซด์ในรูพรุนทำให้รูพรุนมีปริมาณน้อยลง รวมทั้งการเกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ที่มีผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวลดลงอีกด้วย

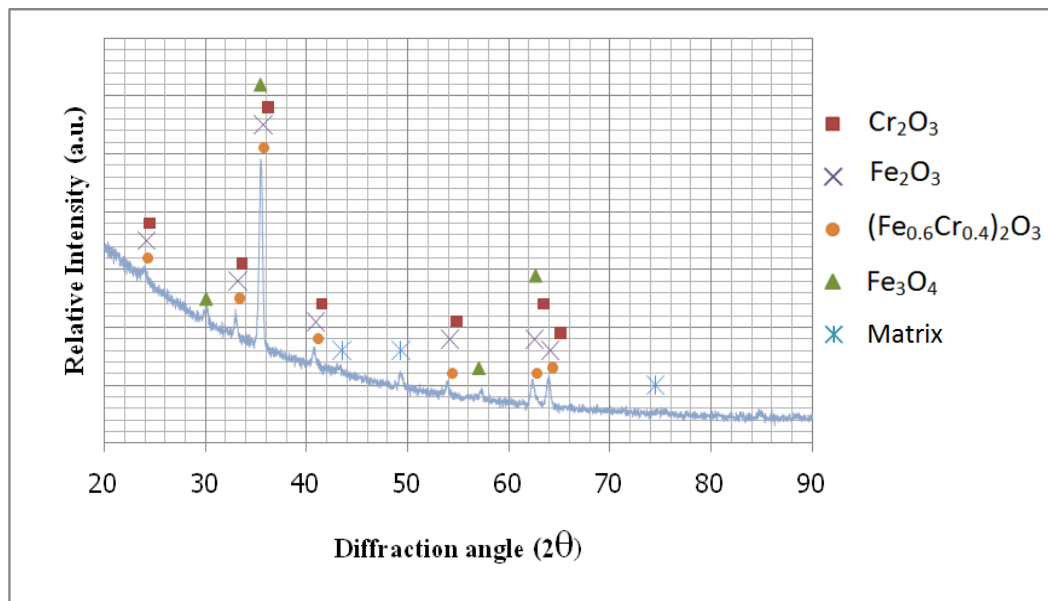
4.8 การวิเคราะห์ออกไซด์ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



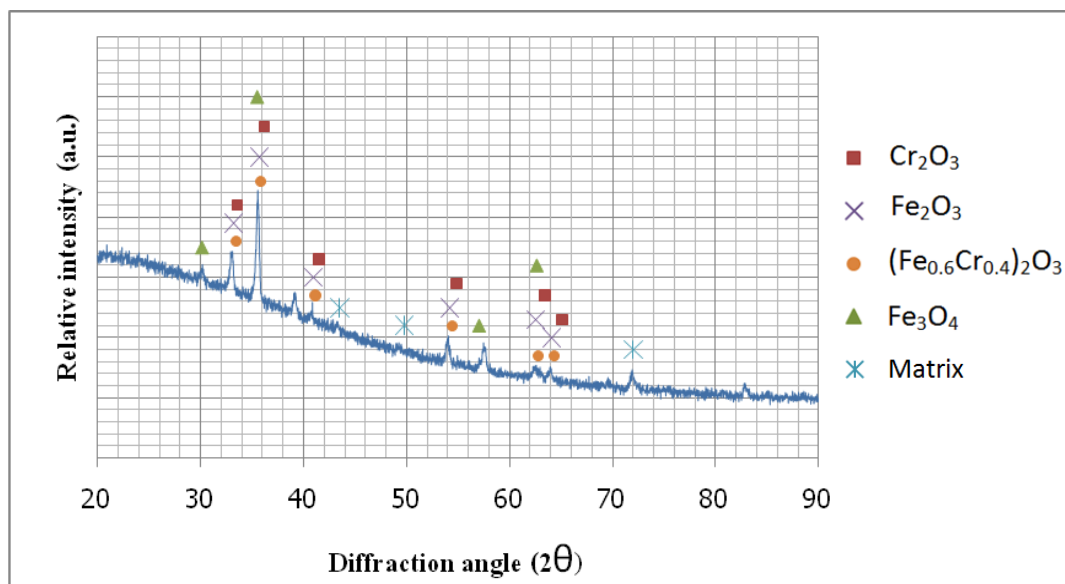
ภาพที่ 4.32 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (EDS) บริเวณผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ก) ภาพถ่ายลักษณะเนื้อพื้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ข) ผลการวิเคราะห์ของธาตุเหล็ก ค) ผลการวิเคราะห์ของธาตุโครเมียม ง) ผลการวิเคราะห์ของธาตุออกซิเจน จ) ผลการวิเคราะห์ธาตุนิกเกิล

ภาพที่ 4.32 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีบริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าบริเวณสี่เทาอ่อนมีการกระจายตัวของธาตุเหล็กและโครเมียมสม่ำเสมอโดยมีธาตุออกซิเจนอยู่เพียงเล็กน้อยดังนั้นบริเวณนี้ควรจะเป็นเนื้อพื้นออกไซด์ ส่วนบริเวณผิวของชิ้นงานบริเวณที่เป็นสี่เทาเข้มมีปริมาณธาตุออกซิเจนอยู่มาก มีปริมาณธาตุโครเมียมใกล้เคียงกับเนื้อพื้น และมีธาตุเหล็กรวมอยู่ด้วย และแทบจะไม่มีธาตุ निकเกิดอยู่เลย ดังนั้นบริเวณสี่เทาเข้มจึงควรจะเป็นออกไซด์ของโครเมียมเกิดขึ้นร่วมกับออกไซด์ของเหล็กนั่นเอง

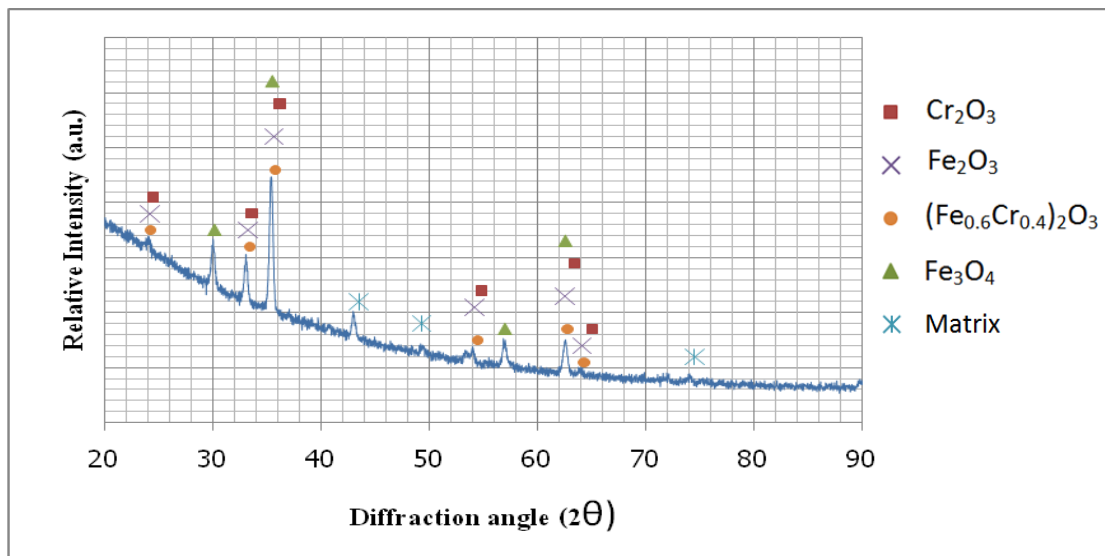
และเมื่อได้ทำการตรวจสอบชนิดของออกไซด์ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.33-3.40 โดยชิ้นงานที่เติมธาตุและไม่ได้เติมธาตุมีความน่าจะเป็นที่จะพบออกไซด์ชนิดเดียวกันดังนี้ Cr_2O_3 , $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$, Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 เนื่องจากออกไซด์ดังกล่าวมีพีคซ้อนกัน จึงไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นพีคของออกไซด์ใดได้อย่างชัดเจน ซึ่ง Cr_2O_3 , Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 สามารถพบได้ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียมประมาณ 16-18%โดยมวล เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียม 16-18%โดยมวล Cr_2O_3 ไม่สามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีออกไซด์ชนิดอื่นเกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.31 [3, 8] ประกอบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ได้ทำการวิเคราะห์ออกไซด์ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ออกไซด์ที่พบได้แก่ $NiFe_2O_4$, $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$ และ Fe_2O_3 แต่จากหัวข้อ 4.5 ที่ผ่านมาแทบจะไม่มีธาตุนิกเกิดบริเวณที่เป็นออกไซด์เลย ดังนั้นออกไซด์ที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานคือ Cr_2O_3 , $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$, Fe_3O_4 และ Fe_2O_3



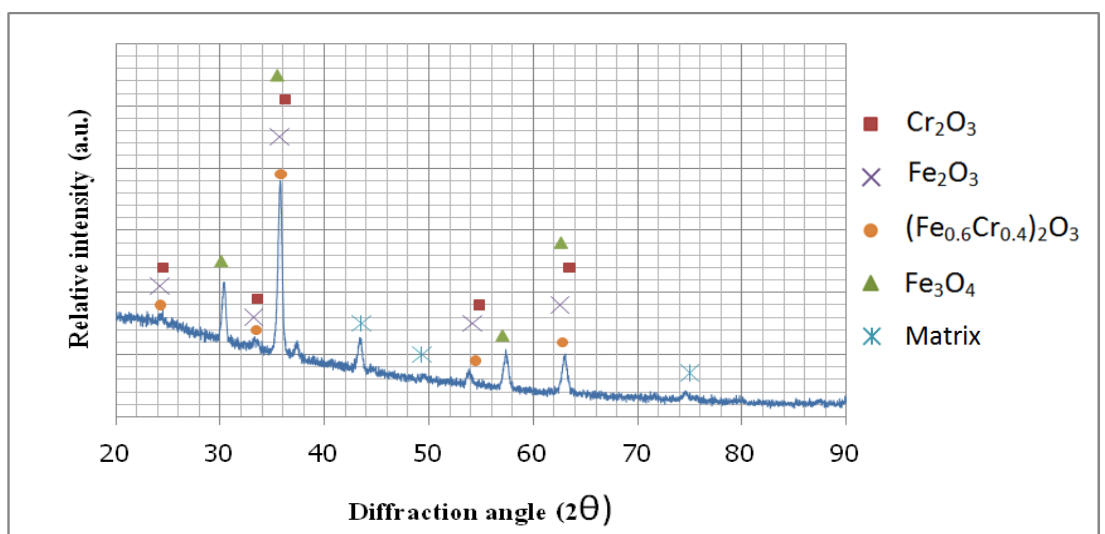
ภาพที่ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



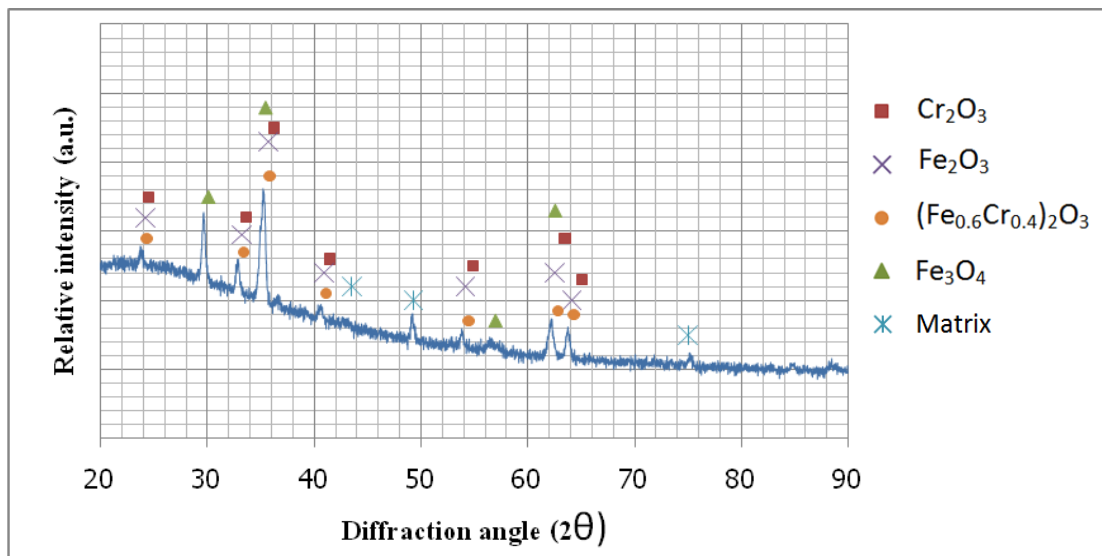
ภาพที่ 4.34 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



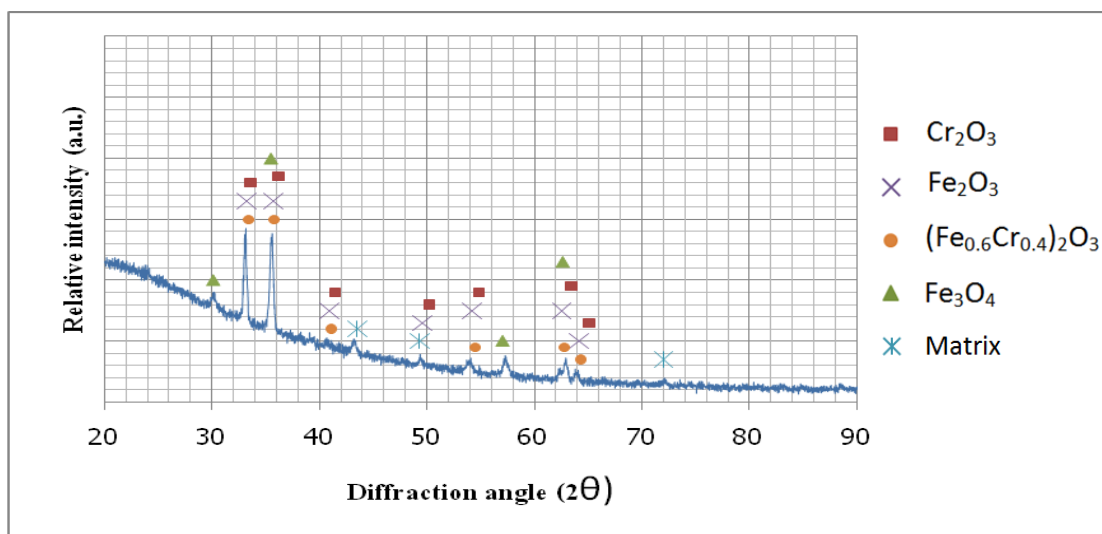
ภาพที่ 4.35 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



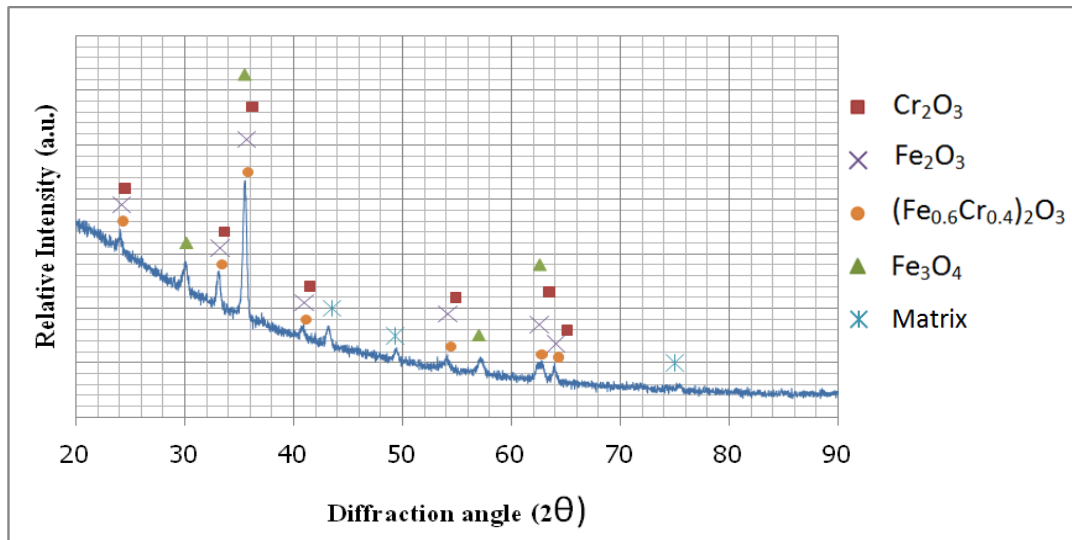
ภาพที่ 4.36 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



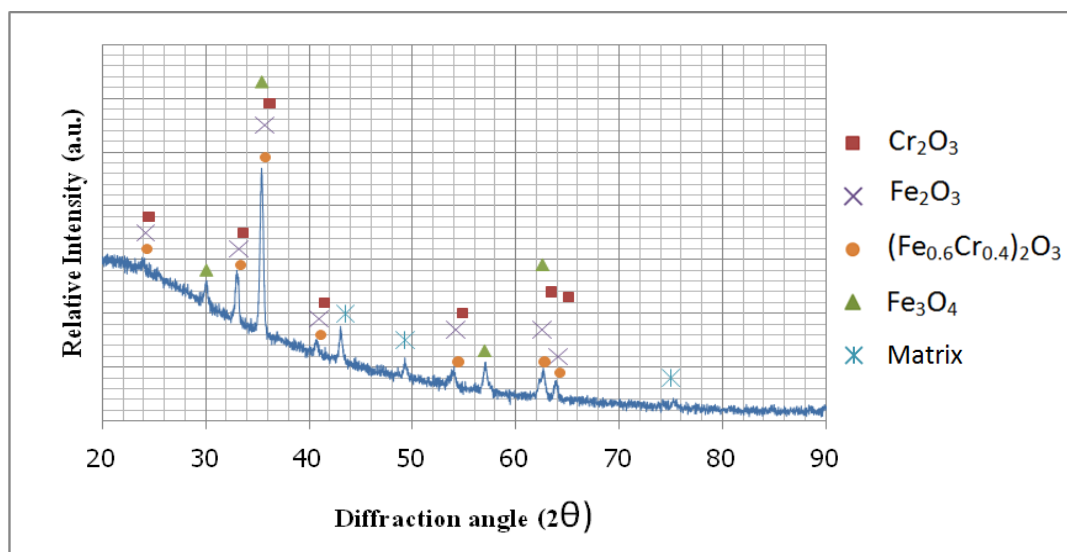
ภาพที่ 4.37 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิด 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.38 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุ निकเกิด 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.39 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.40 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสต่างๆด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เติมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ 4%โดยมวล และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลการเติมธาตุ निकิล และโคบอลต์ ต่อโครงสร้างจุลภาค หลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่แตกต่างกันคือ 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง และผลต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานการดัดโค้ง และค่าความแข็งแรง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน ลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์มีขนาดและปริมาณรูพรุนน้อยสุด จึงทำให้มีค่าความต้านทานการดัดโค้ง และค่าความแข็งแรงสูงสุด

2. การเกิดออกไซด์ในรูพรุนทำให้เกิดความเครียดขึ้นในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ทำการให้ความร้อนและเป็นสาเหตุให้เกิดเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์

3. ปริมาณเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์ในโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าปริมาณเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์เมื่อให้ความร้อนอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเมื่อเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นปริมาณเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4. การเติมธาตุโคบอลต์ทำให้ชิ้นงานมีขนาดและปริมาณรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุจึงทำให้เกิดความเค้นในเนื้อพื้นและเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การเติมธาตุโคบอลต์มากกว่า 1%โดยมวลจะสามารถช่วยลดการเกิดเฟสแอลฟาไพริม มาร์เทนไซต์ได้ เนื่องจากธาตุโคบอลต์ช่วยลดการขยายตัวด้วยความร้อนและทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรมากขึ้น

5. การเติมธาตุ निकิลทำให้ชิ้นงานมีขนาดและปริมาณรูพรุนใหญ่กว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ निकิลจึงทำให้เกิดความเค้นในเนื้อพื้นและเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์น้อยกว่า นิกิลมีผลน้อยมากต่อการลดลงของเฟสแอลฟาไพริมมาร์เทนไซต์

6. การเติมธาตุทั้งนิกเกิลและโคบอลต์จะมีขนาดและปริมาณรูพรุนอยู่ระหว่างชิ้นงานที่เติมธาตุนิกเกิล และชิ้นงานที่เติมธาตุโคบอลต์ ซึ่งปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ลดลงจากการเติมธาตุเพิ่มทั้งนิกเกิลและโคบอลต์ และมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ ดังนั้นการเติมธาตุทั้งนิกเกิลและโคบอลต์จึงสามารถช่วยลดการเกิดเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์ได้

7. เมื่อนำโลหะผงเหล็กไร้สนิม 316L ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 – 100 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น การโตของออกไซด์ในรูพรุนจะยิ่งมากขึ้น โดยชนิดของออกไซด์ที่พบได้แก่ Cr_2O_3 และ Fe_3O_4 (Magnetite)

8. การเพิ่มปริมาณธาตุโคบอลต์ทำให้ความต้านทานการดัดโค้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็น 100 ชั่วโมง มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขนาดและปริมาณรูพรุนมีค่าลดลง แต่เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าลดลงเนื่องจากการโตเชื่อมถึงกันของออกไซด์ที่เกิดเพิ่มขึ้นในรูพรุน

9. ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ชิ้นงานที่มีปริมาณเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์มากจะมีค่าความแข็งมาก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนแล้วพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากปริมาณรูพรุนลดลงจากการโตของออกไซด์ในรูพรุนและการเกิดขึ้นของเฟสแอลฟาไพร์มมาร์เทนไซต์

รายการอ้างอิง

- [1] Buscail, H., and others. Characterization of the oxides formed at 1000°C on the AISI 316L stainless steel-Role of molybdenum. Materials Chemistry and Physics 111 (2008) : 491-496.
- [2] Stainless Steel: Specialist Course. International Stainless Steel Forum (ISSF). 2002. (Unpublished Manuscript)
- [3] Davis, J.R., ed. ASM Specialty Handbook: Stainless Steels. Materials Park, OH: ASM International, 1994.
- [4] Kurgan, N., and Varol, R. Mechanical properties of P/M 316L stainless steel materials. Powder Technology 201 (2010) : 242-247.
- [5] ไสว ด่านชัยวิจิตร. เอกสารประกอบการสอน Powder Metallurgy. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [6] MTEC. Ceraparts Group, ลักษณะทางกายภาพ [Online]. 2004. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/research/ceraparts/mea_phisical.html [2012, March 3]
- [7] Wasnik, D.N., Dey, G.K., Kain, V., and Samajdar, I. Precipitation stages in 316L austenitic stainless steel. Scripta Materialia 49 (2003) : 135-141.
- [8] 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 Metals 59 (2002) : 373-393
- [9] Sahlaoui, H., Makhlof, K., Sidhom, H., and Philibert, J. Effects of ageing conditions on the precipitates evolution, chromium depletion and intergranular corrosion susceptibility of AISI 316L: experimental and modeling results. Material Science and Engineering 327 (2004) : 98-108.

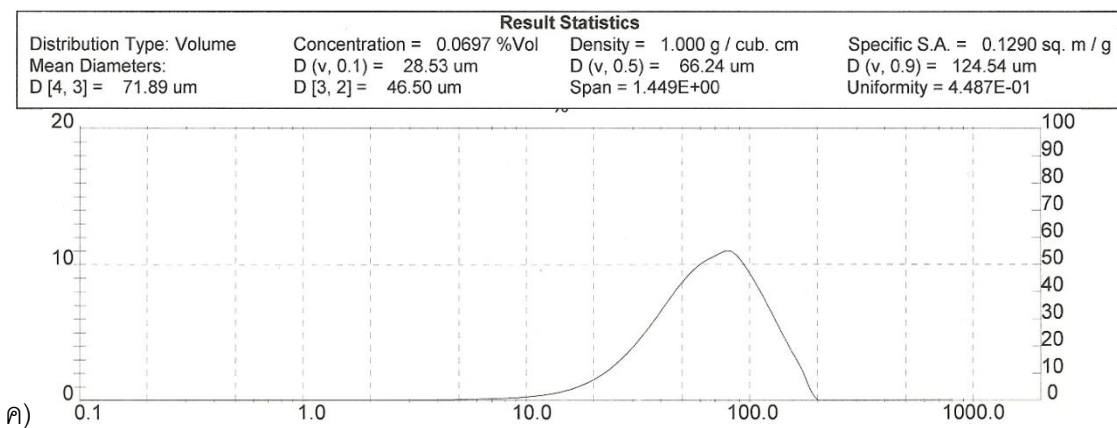
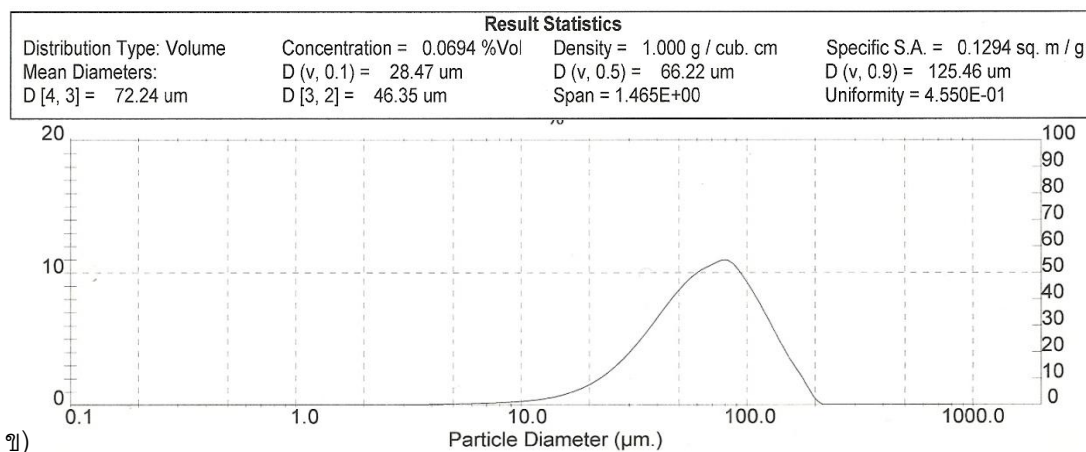
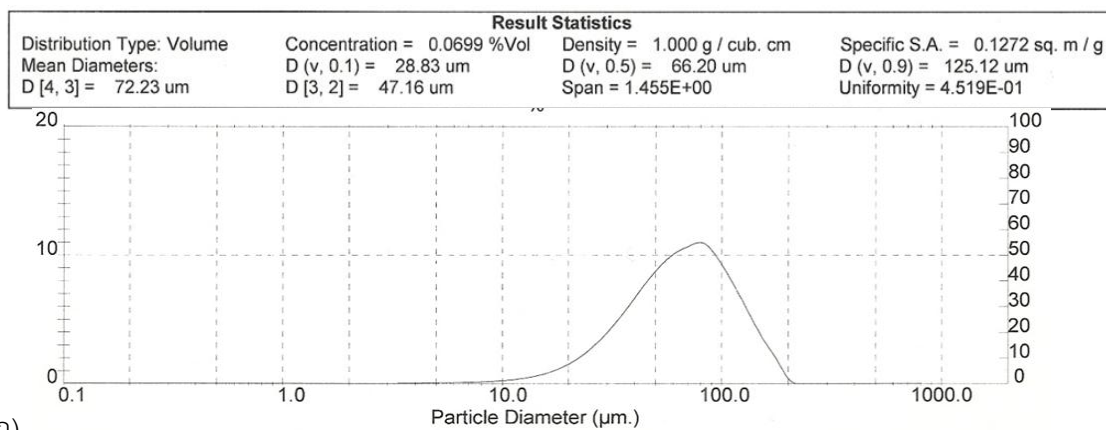
- [10] Buatista, A., Moral, C., Velasco, F., Simal, C., and Guzman, S. Density-improved powder metallurgical ferritic stainless steels for high-temperature applications. Material Processing Technology 189 (2007) : 344-351.
- [11] Shu-hua D., Feng-man S., and Ai-bing Y. Granule Size Distribution and Porosity of Granule Packing Iron and Steel Research 15(2008) : 1-5.
- [12] Ma, J., and Lim, L.C. Effect of particle size distribution on sintering of agglomerate-free submicron alumina powder compacts. European Ceramic Society 22 (2002) : 2197-2208.
- [13] Davis, J.R., ed. Nickel, Cobalt, and Their Alloys Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- [14] Lenntech. Stainless Steel 316L [Online]. 1998. Available from : <http://www.lenntech.com/stainless-steel-316l.htm> [2012, May 1]
- [15] Dokuz Eylul Universitesi. Ellingham Diagrams [Online]. Available from : <http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/MMM2003MetalurjiTermodinamigi/EllinghamKaynak2.pdf> [2012, May 1]
- [16] Peckner, D., and Bernstein, I.M. Handbook of stainless steels New York: Mcgraw-Hill book company, 1997
- [17] Tien-Wei S., Jing-Wen S., Shih-Ju H., Shun-Tung Y., and Weng-Sing H. Phase transformation of 316L stainless steel from wire to fiber. Materials Chemistry and Physics 122 (2010) : 273-277.

- [18] Ghosh, S. K., Mallick, P., and Chattopadhyay, P. P. Effect of Cold Deformation on Phase Evolution and Mechanical Properties in an Austenitic Stainless Steel for Structural and Safety Applications, Iron and steel research international 4 (2012) : 63 - 68
- [19] Hedström, P. Deformation and Martensitic Phase Transformation in Stainless Steels, Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Engineering Materials (2007)
- [20] Kurc-Lisiecka, A., and Kalinowska-Ozgowicz E. Structure and mechanical properties of austenitic steel after cold rolling, Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 44 (2011) : 148 – 153

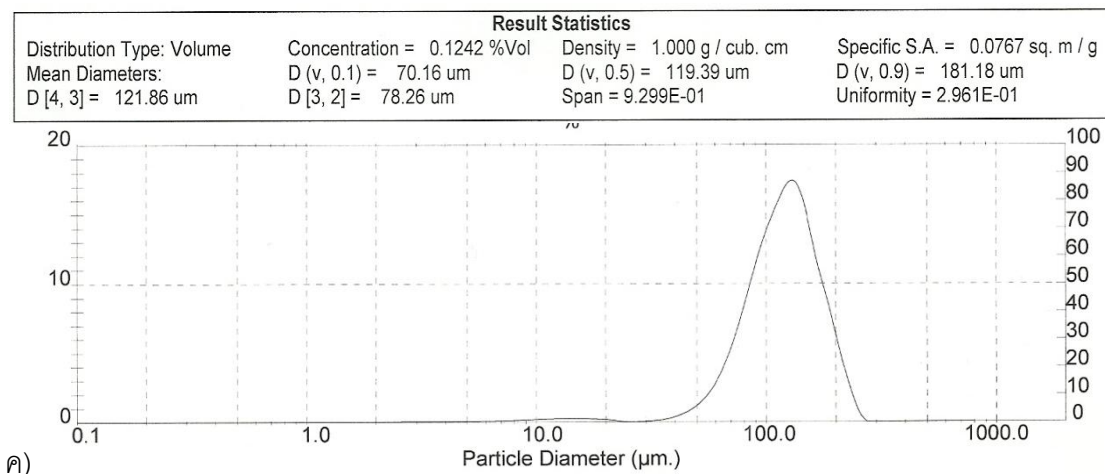
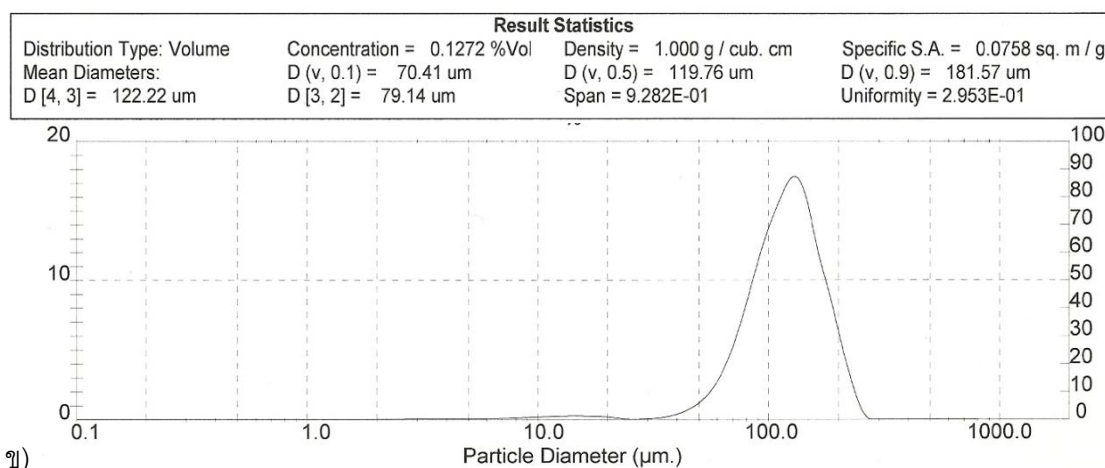
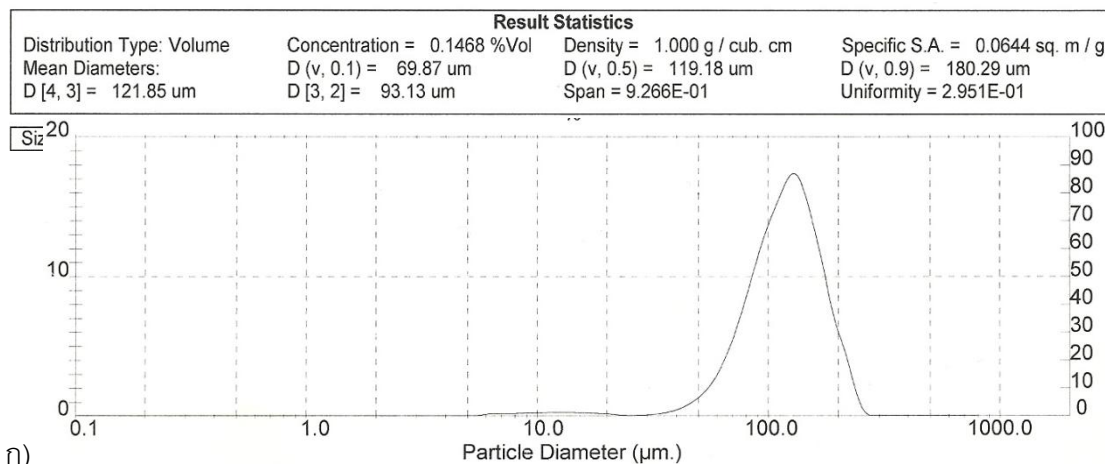
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

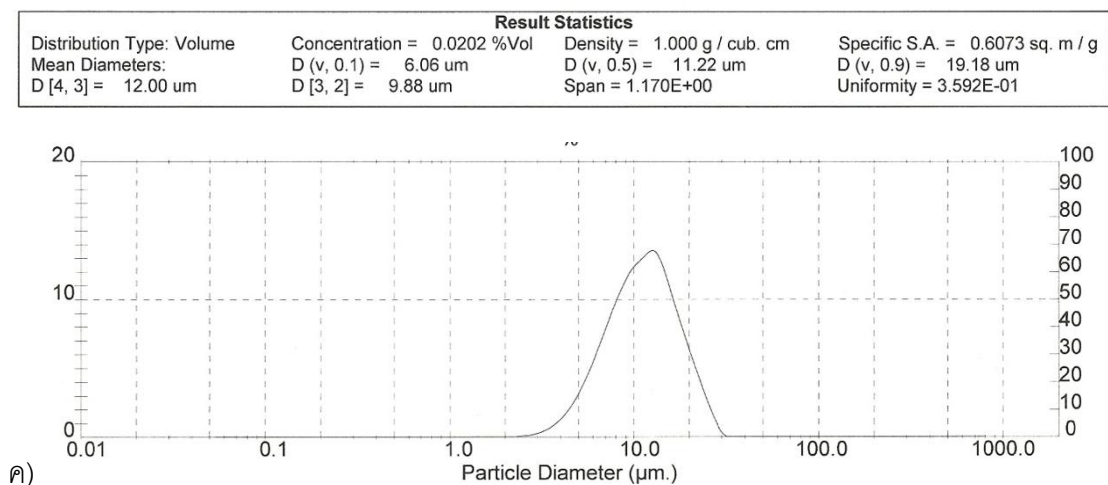
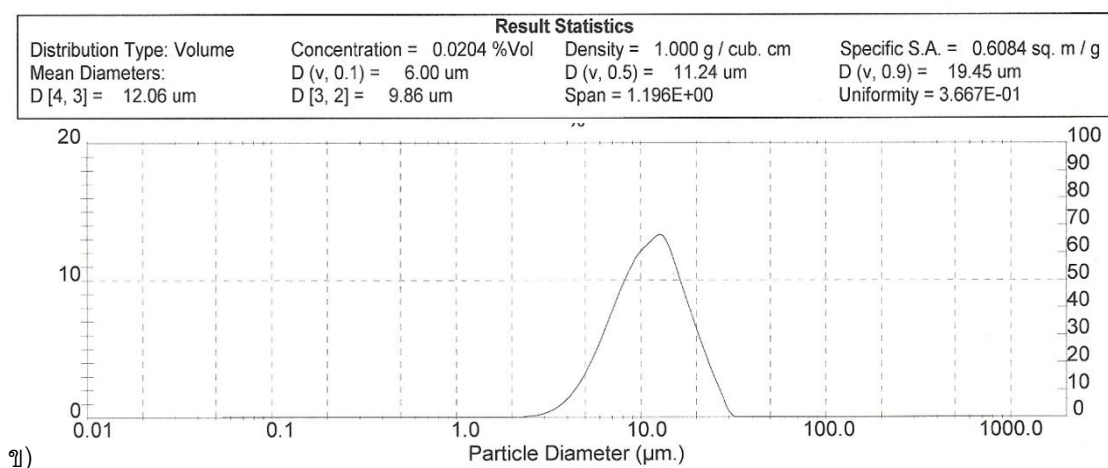
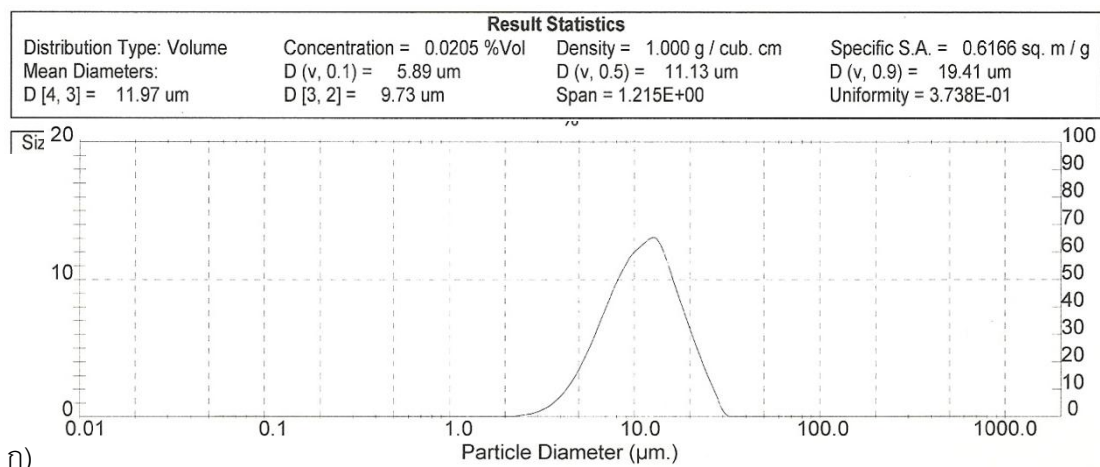
ผลการวัดขนาดผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ผงนิกเกิล และผงโคบอลต์ด้วยเครื่อง Laser Size Analyzer



ภาพที่ ก.1 แสดงผลการวัดขนาดผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ก) ครั้งที่ 1 ข) ครั้งที่ 2 ค) ครั้งที่ 3



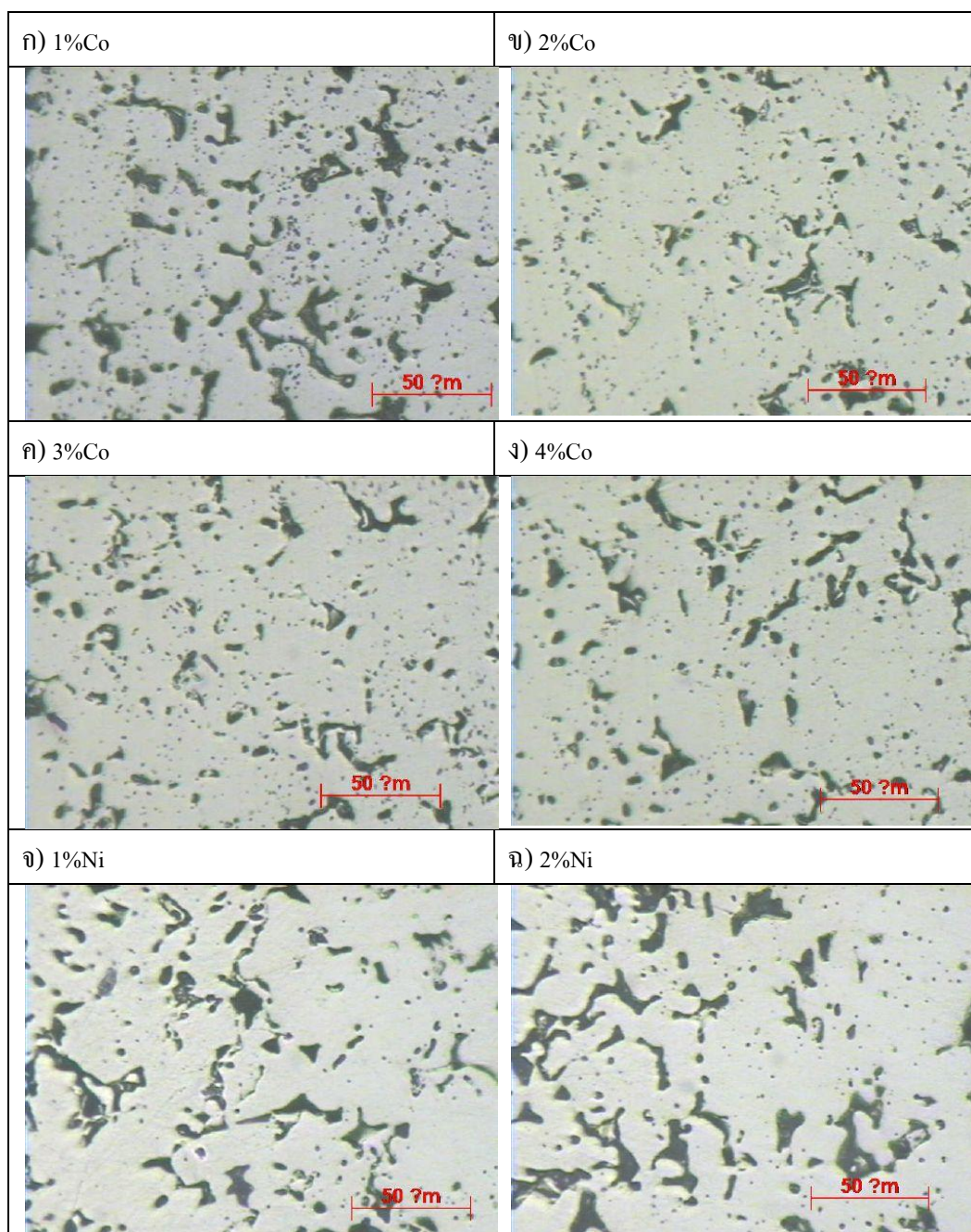
ภาพที่ ก.2 แสดงผลการวัดขนาดผงนิกเกิล ก) ครั้งที่ 1 ข) ครั้งที่ 2 ค) ครั้งที่ 3

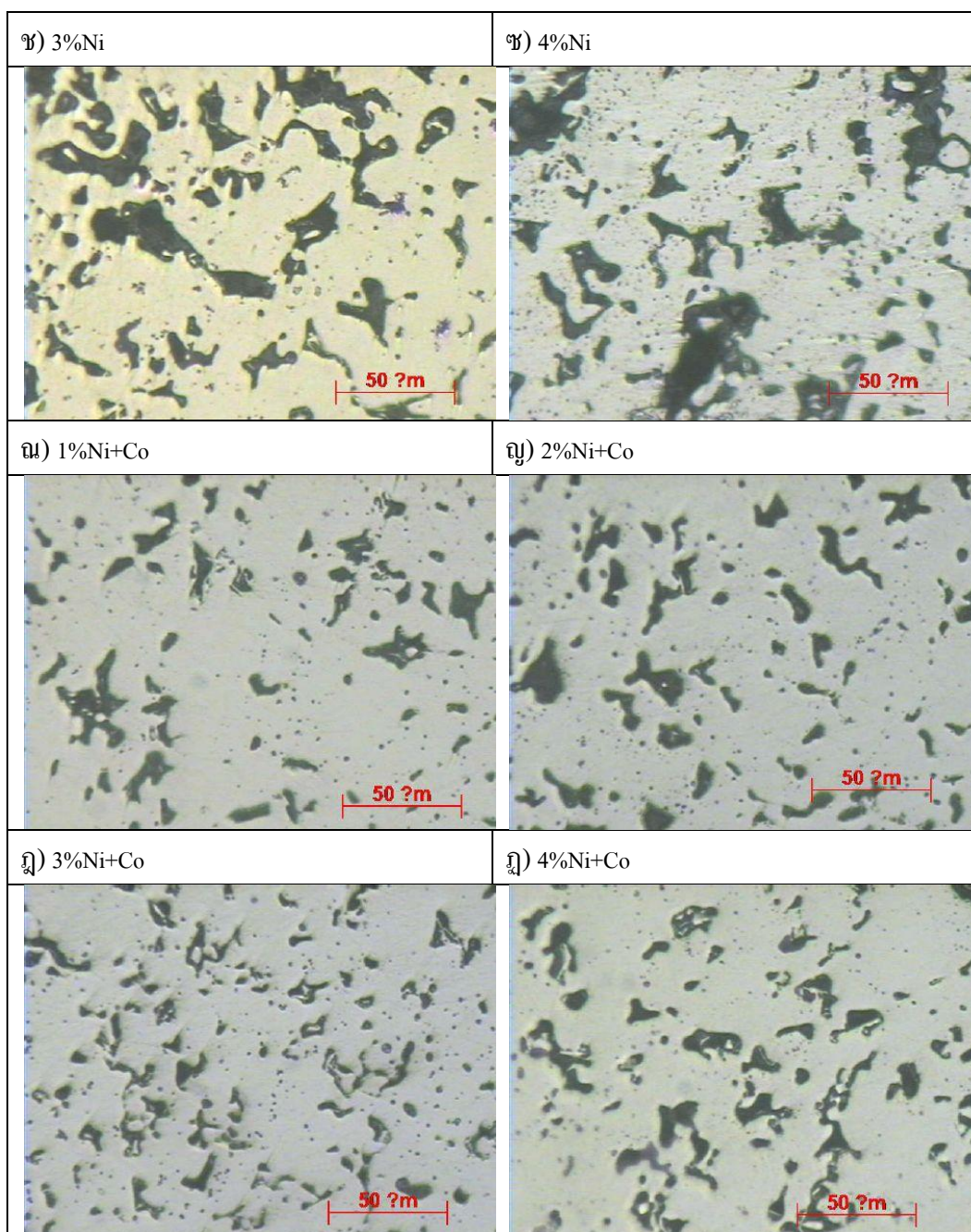


ภาพที่ ก.3 แสดงผลการวัดขนาดผงโคบอลต์ ก) ครั้งที่ 1 ข) ครั้งที่ 2 ค) ครั้งที่ 3

ภาคผนวก ข

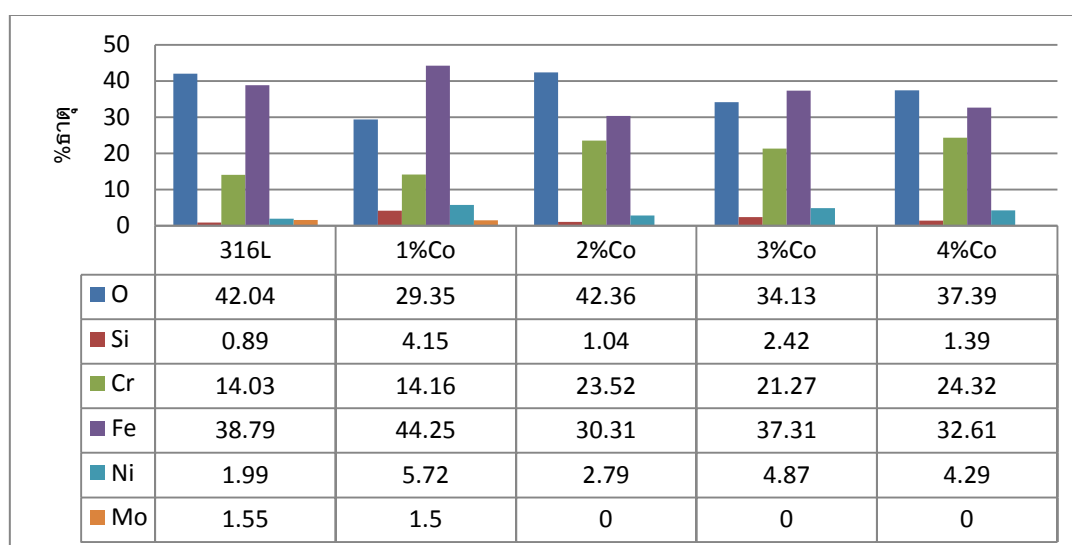
ตารางที่ ข.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน



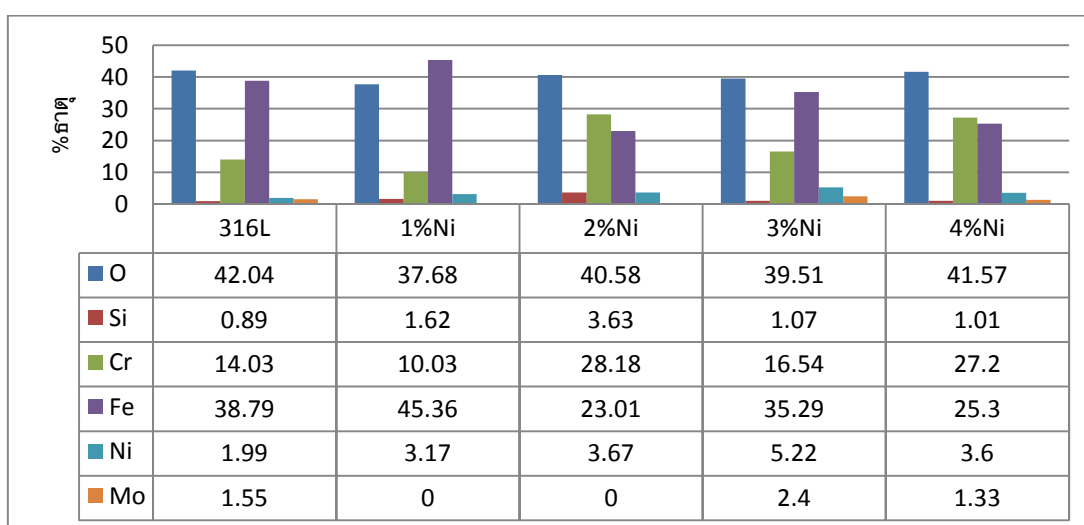


ภาคผนวก ค

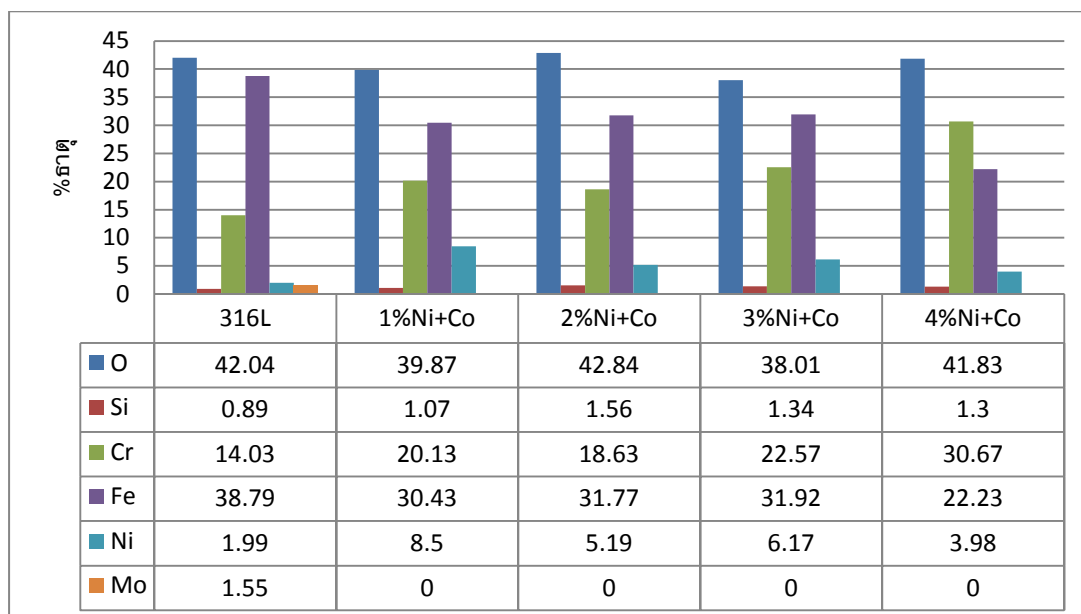
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์บริเวณรูพรุนในเนื้อพื้นของโลหะผง เหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี EDS



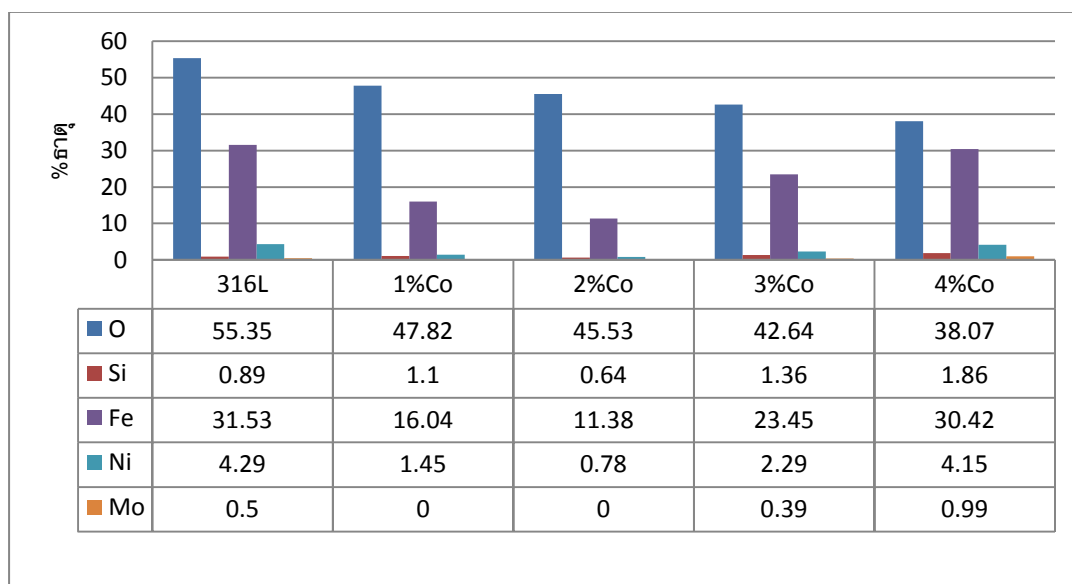
ภาพที่ ค.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



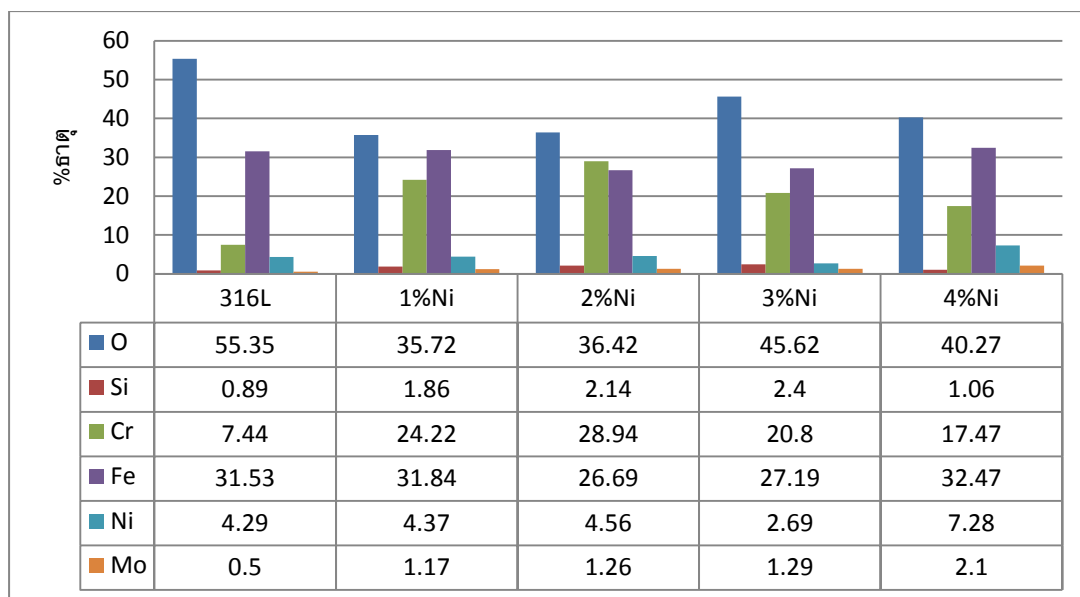
ภาพที่ ค.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



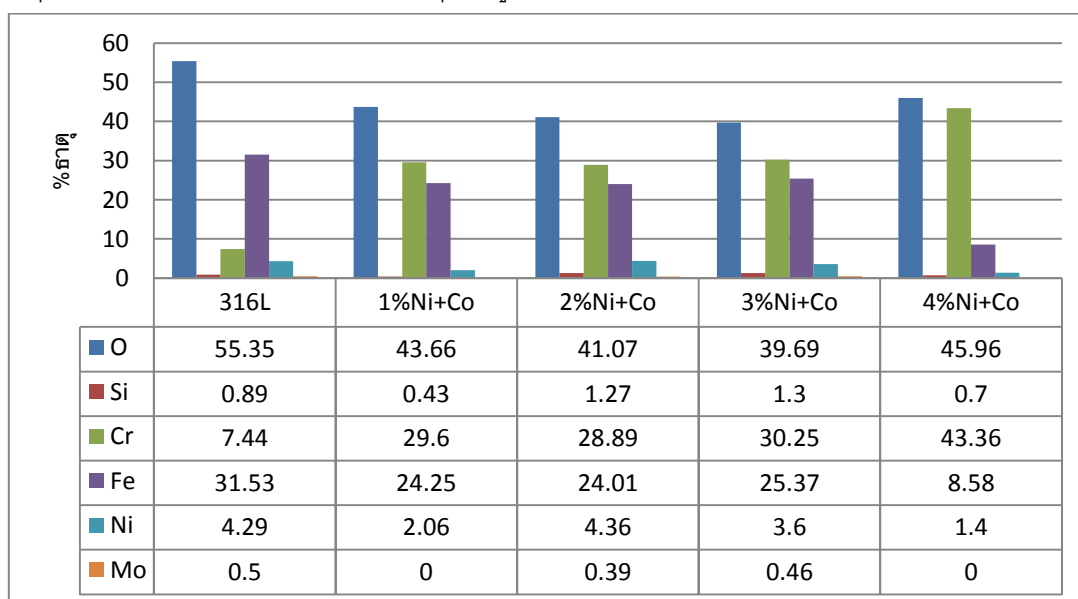
ภาพที่ ค.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุ निकิลและโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ ค.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

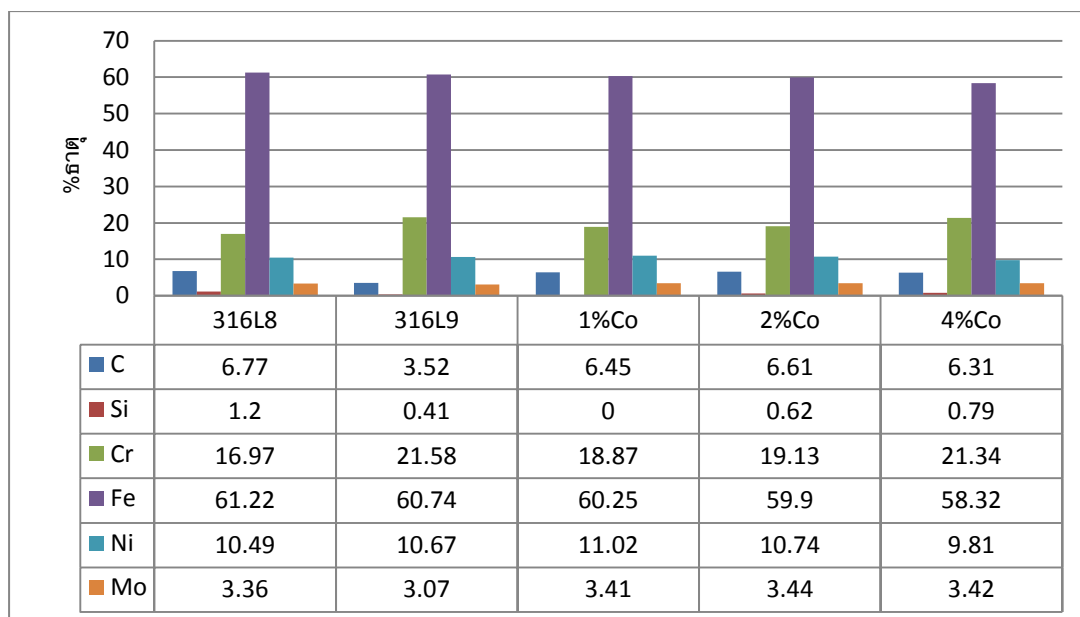


ภาพที่ ค.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุ निकเกิด เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

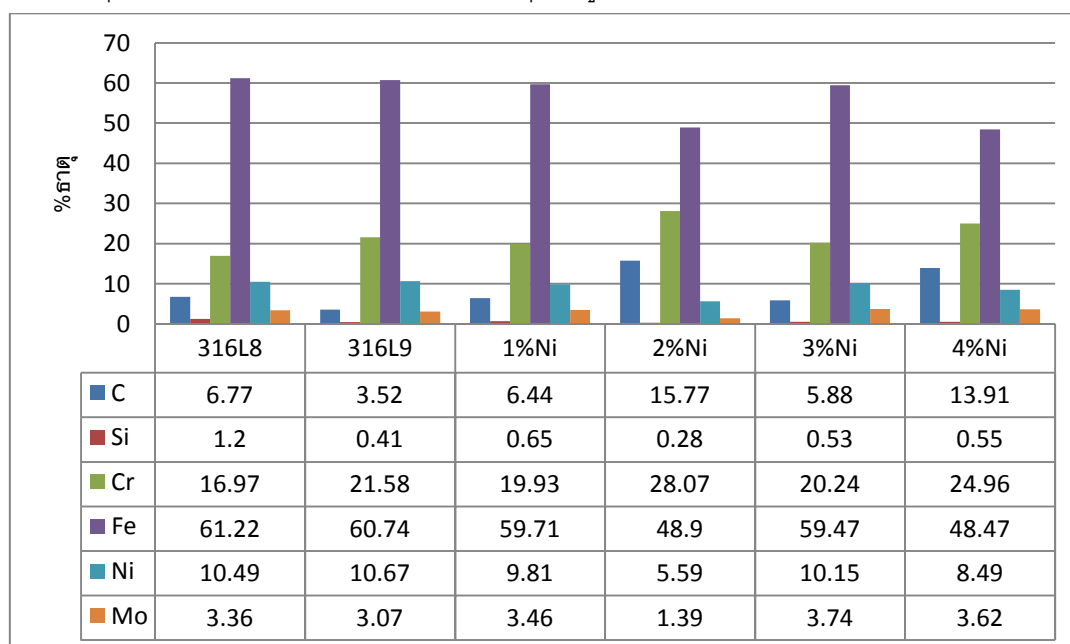


ภาพที่ ค.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ในรูปพูนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุ निकเกิดและโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

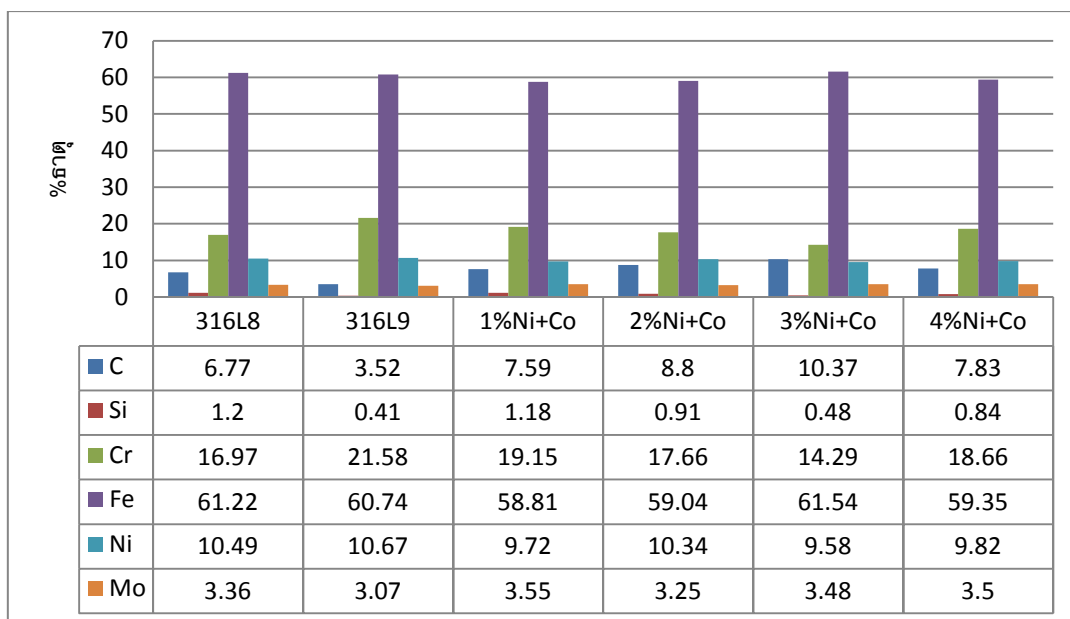
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนบนเนื้อพื้นของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี EDS



ภาพที่ ค.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุโคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



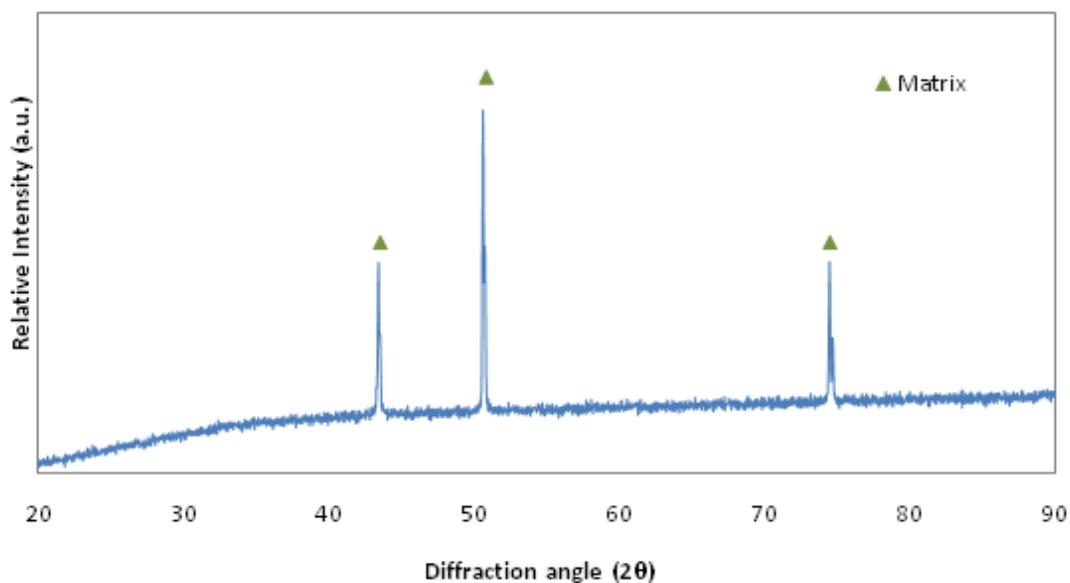
ภาพที่ ค.8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมธาตุนิกเกิล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ ค.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่ตกตะกอนในเนื้อพื้น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผสมทั้งธาตุนิกเกิลและ โคบอลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน



ภาพที่ ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ที่ผิวของโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแบบไฮโดรเจน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล** : นางสาวนันทวัน พิชัยวงศ์
- วัน - เดือน - ปีเกิด** : วันจันทร์ที่ 28 ธันวาคม 2530
- ที่อยู่** : บ้านเลขที่ 99/76 ซอยประดิพัทธ์ 25 ถนนประดิพัทธ์
แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
- วุฒิการศึกษา** : สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนฤนาถวิทยวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548
- : สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552
- : กำลังศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554
- อีเมล** : n.pichaiwong@gmail.com