



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการทดลองและการอภิปรายผล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และการคลายความเค้นของสลักเกลียวที่ทำจากอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในงานวิจัยนี้ เนื่องด้วยต้องกล่าวอ้างถึงอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลายครั้ง จึงลดรูปหน่วยของอุณหภูมิและเวลาในกรรมวิธีทางความร้อน ตัวอย่างเช่น อบที่อุณหภูมิ 885 (24) หมายถึง อบที่อุณหภูมิ 885 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อความสะดวกต่อการอธิบายต่อไป

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ

##### 4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 วิเคราะห์ด้วย เครื่องอิมิสชันสเปกโตรสโกปี (Emission spectroscopy) แสดงในตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ธาตุ	Ni	Cr	Fe	Ti	Nb	Al	Co	Cu	C	Si
เฉลี่ย	73.07	14.71	6.902	2.609	0.991	0.662	0.897	0.075	0.044	0.08

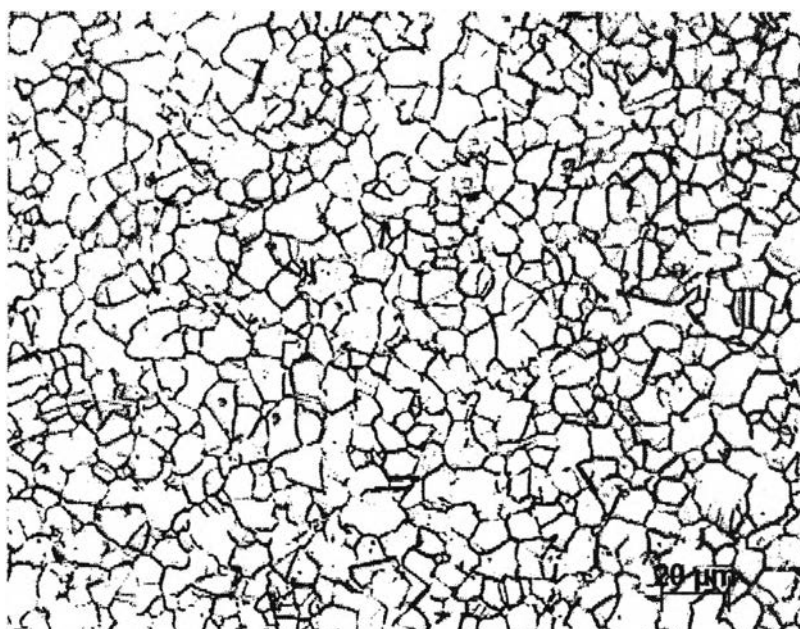
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ตามมาตรฐาน AMS 5667 [6]

ธาตุ	Ni	Cr	Fe	Ti	Nb	Al	Co	Cu	C	Si
ค่าสูงสุด	-	17.00	9.00	2.75	1.20	1.00	1.00	0.50	0.08	0.50
ค่าต่ำสุด	70.00	14.00	5.00	2.25	0.70	0.40	-	-	-	-

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย เมื่อเทียบกับส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐาน AMS 5667 ดังตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ตรงกับมาตรฐาน AMS 5667 จัดอยู่ในกลุ่มนิกเกิลเบสซูเปอร์อัลลอย [1,3]

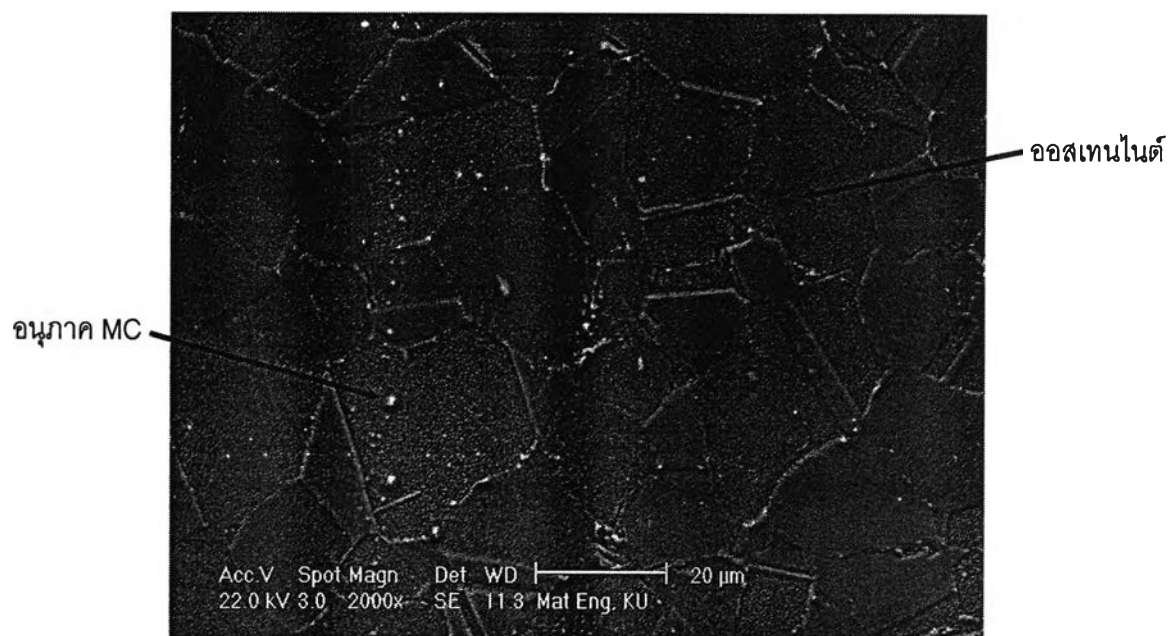
#### 4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อพื้นออสเทนไนต์ เพราะมีปริมาณนิกเกิลสูง เกรนออสเทนไนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM, G11 นิกเกิลเป็นธาตุทำให้ออสเทนไนต์เสถียร (Austenite stabilizer) มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ซึ่งเป็นระบบผลึกที่เกิดการเลื่อนระนาบของผลึก (Slip plane) ได้ง่าย ทำให้บางเกรนมีการจัดเรียงตัวของอะตอมบกพร่อง โดยมีทิศทางการจัดเรียงผลึกเป็นแนวเดียวกัน เกิดเป็นผลึกคู่แฝด (Twinning) ลักษณะเช่นนี้พบได้ระหว่างการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ในขั้นตอนการอบอ่อน [1]

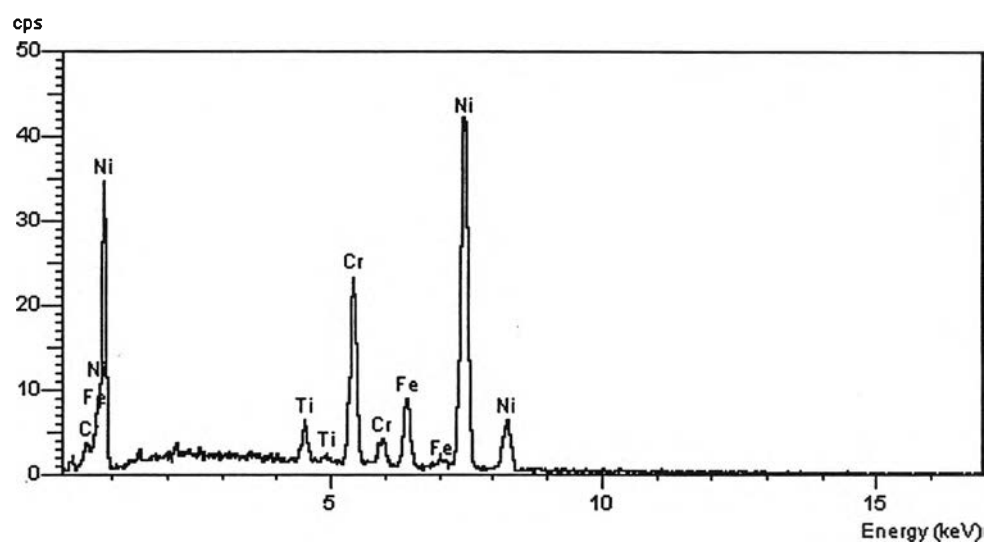


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

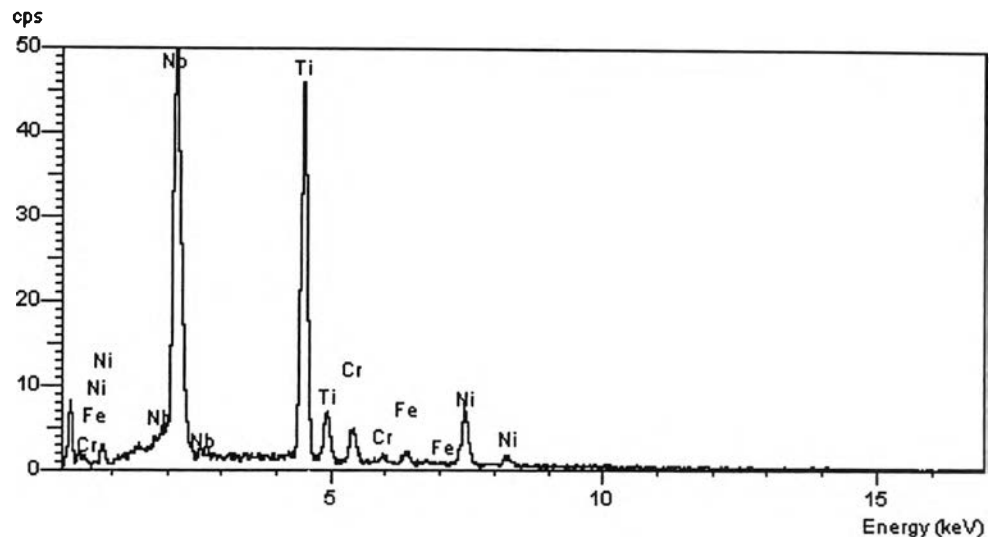
โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยายสูงชัน พบว่ามีอนุภาคกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นออสเทนไนต์ และก๊อนอนุภาคด้วยเทคนิคอีดีเอส (Energy dispersive spectrometry: EDS) ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าเนื้อพื้นออสเทนไนต์มีนิกเกิลปริมาณสูง และมีธาตุอื่นละลายอยู่ ได้แก่ โครเมียม เหล็ก และไททาเนียม สำหรับก๊อนอนุภาคที่กระจายอยู่ทั่วไปพบว่าปริมาณธาตุไนโอเบียม และไททาเนียมสูง ธาตุเหล่านี้สามารถรวมตัวสัมพันธ์ (Affinity) กับคาร์บอนได้สูง เป็นสารประกอบคาร์ไบด์ MC มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง [1-3, 9, 15-19]



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



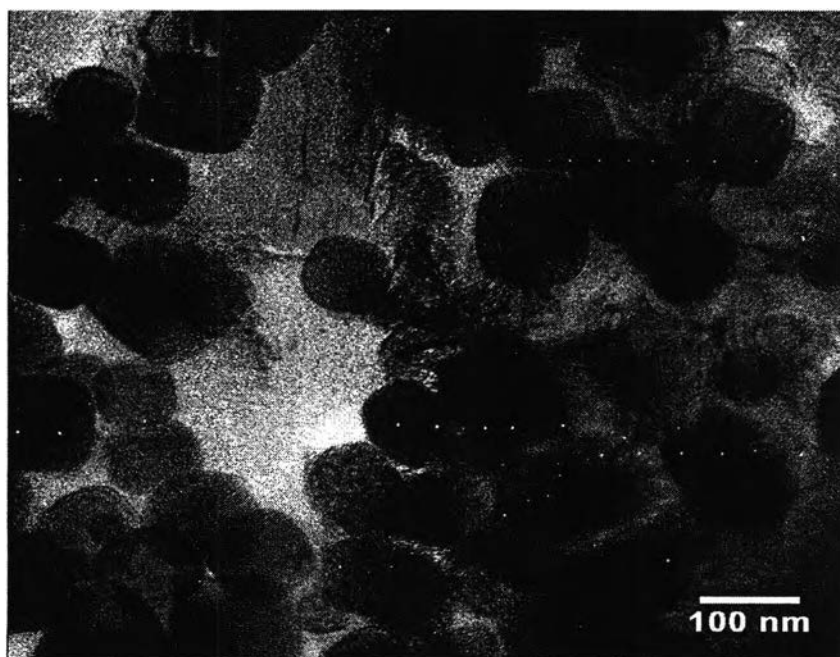
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณบริเวณเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



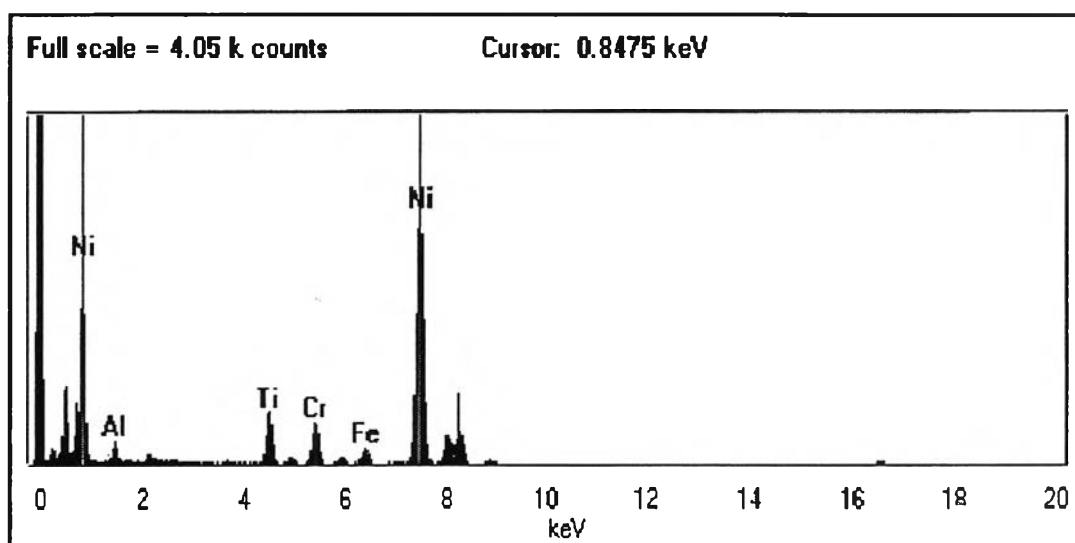
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก่อนอนุภาค MC ในรูปที่ 4.1 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ามีอนุภาคของแกมมาไพรมกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 112 นาโนเมตร จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์กับอนุภาคแกมมาไพรมด้วยเทคนิคอีดีเอส ขนาดหัวตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอีดีเอสในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ามีปริมาณธาตุหนักเกิดสูงรวมทั้งโครเมียมและเหล็ก ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ส่วนธาตุอะลูมิเนียมและไททาเนียม คาดว่ามาจากอนุภาคแกมมาไพรมที่มีสูตรทางเคมีเป็น  $Ni_3(Al,Ti)$  ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron diffraction pattern) บริเวณก่อนอนุภาคแกมมาไพรมกับเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ แสดงในรูปที่ 4.7 คำนวณค่าคงที่ของผลึก (Lattice constant:  $a$ ) [13,14] มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.3426 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข.) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดค่าคงที่ของผลึกแกมมาไพรมที่มีการรายงานไว้ คือ 0.3561 นาโนเมตร [10] จึงคาดว่าเป็นอนุภาคแกมมาไพรมอยู่ในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์

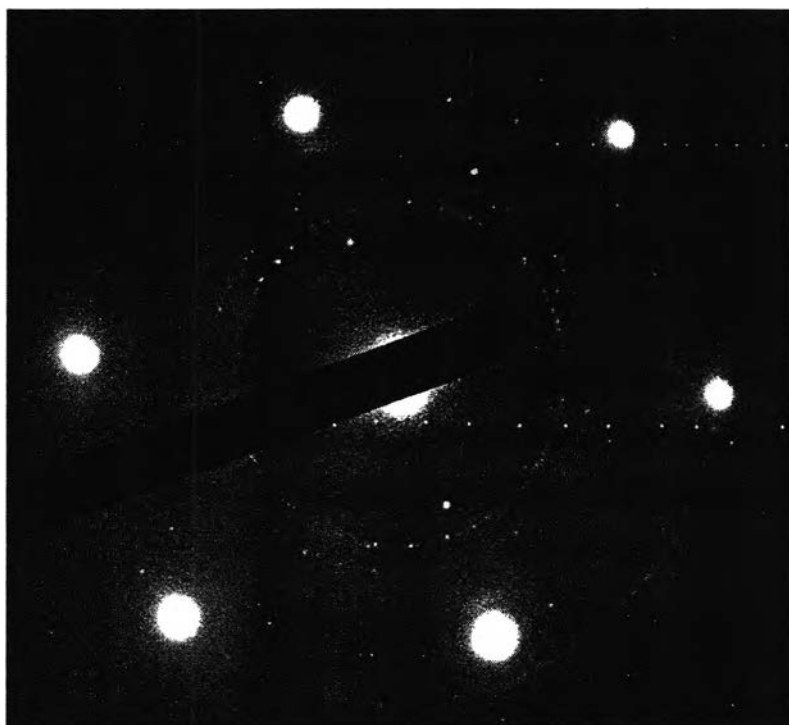
อย่างไรก็ตาม รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ส่องผ่านผลึกแกมมาไพรมและเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม ผลการคำนวณที่ได้จึงอาจไม่ถูกต้องนัก



รูปที่ 4.5 โครงสร้างแกมมาไพรมของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับที่กำลังขยาย 25,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณบริเวณเนื้อพื้นออกสเทนไนต์กับอนุภาคแกมมาไพรม ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนบริเวณแกมมาไพรม์กับเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

#### 4.1.3 ความแข็งของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานในสภาพที่ได้รับ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 500 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที พบว่าความแข็งมีค่า 263 HV<sub>500</sub> (ภาคผนวก ค.)

#### 4.1.4 ความต้านแรงดึงของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ

ทดสอบความต้านแรงดึงของชิ้นงานในสภาพที่ได้รับ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8 เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ความเค้นคราก (0.2% Yield stress) เปรอร์เซ็นต์การยืด และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 (ภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ

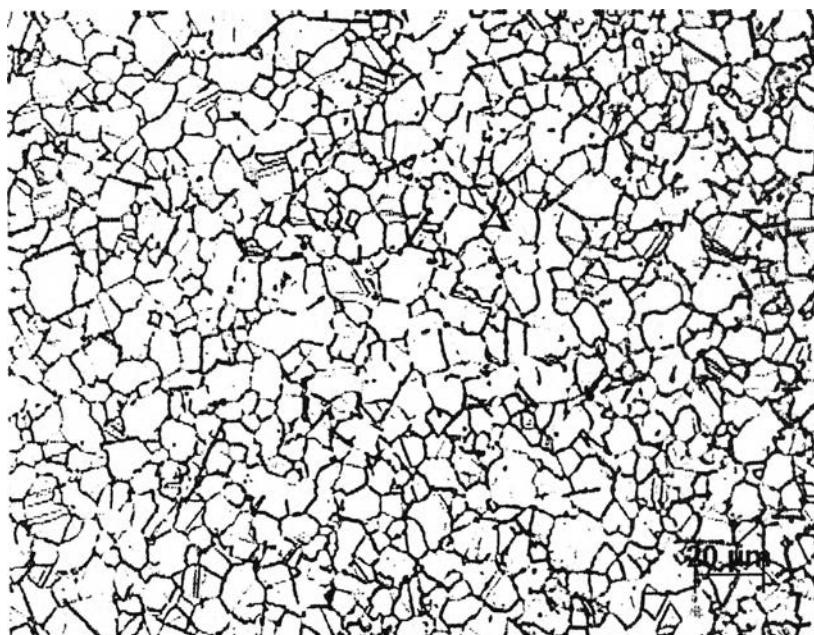
สถานะ	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคาล)	ความเค้นคราก (เมกะพาสคาล)	เปอร์เซ็นต์การยืด	มอดุลัสยืดหยุ่น (จิกะพาสคาล)
สภาพที่ได้รับ	964	677	8.19	212

## 4.2 ผลการอบละลายตามด้วยการบ่มแข็ง

ผลการทดลองกรรมวิธีทางความร้อนของสลักเกลียวที่ทำจากอินโคเนล เอ็กซ์ 750 โดยอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) และตามด้วยการบ่มแข็งอุณหภูมิช่วง 680 (20) – 760 (20) มีดังนี้

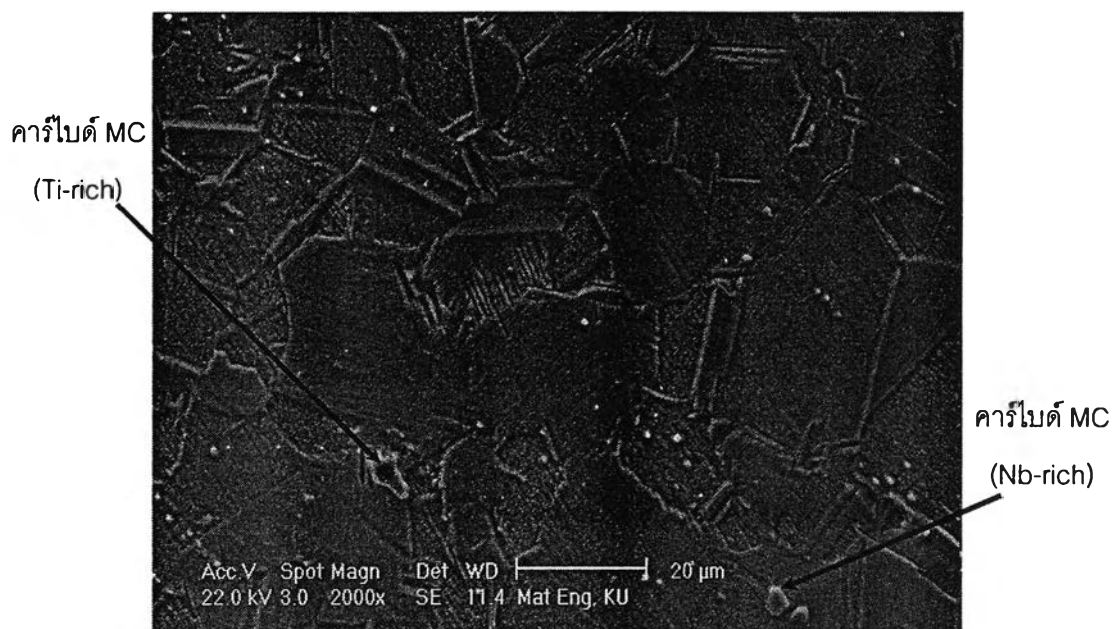
### 4.2.1 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของสลักเกลียว หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อพื้นออกสเตนไนต์ ขนาดของเกรนค่อนข้างสม่ำเสมอ (ASTM, G11) กระจายทั่วชิ้นงานเหมือนในสภาพที่ได้รับ

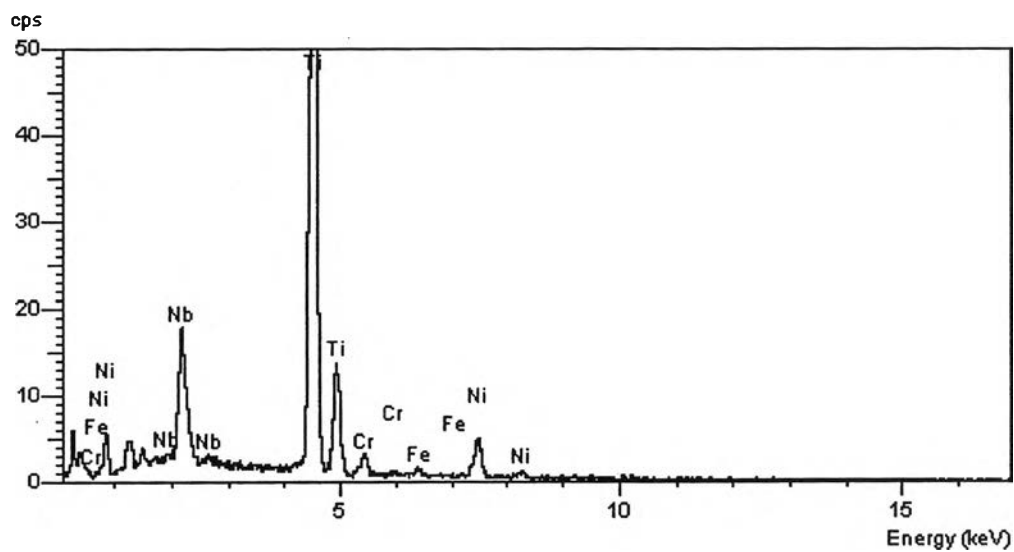


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงในรูปที่ 4.9 พบอนุภาคกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเกรนและบริเวณขอบเกรน ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคอีดีเอซของก้อนอนุภาคที่มีขนาด 3 ไมโครเมตรขึ้นไปที่กระจายตัวอยู่ในเกรน เป็นอนุภาคที่มีส่วนผสมไททาเนียม และไนโอเบียมสูง ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ โดยคาดว่าเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ MC ที่มีอยู่มาก่อนตั้งแต่ในสภาพที่ได้รับ หรือไม่ถูกละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ซึ่งเป็นคาร์ไบด์ MC ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง [1-3, 9, 15-19]

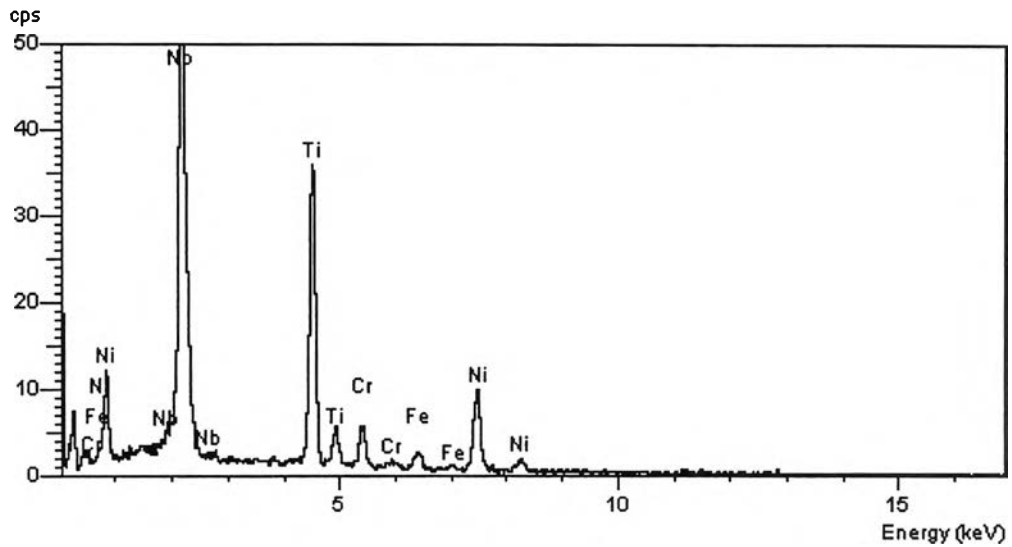


รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก่อนคาร์ไบด์ MC (Ti-rich) ในรูปที่ 4.9 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

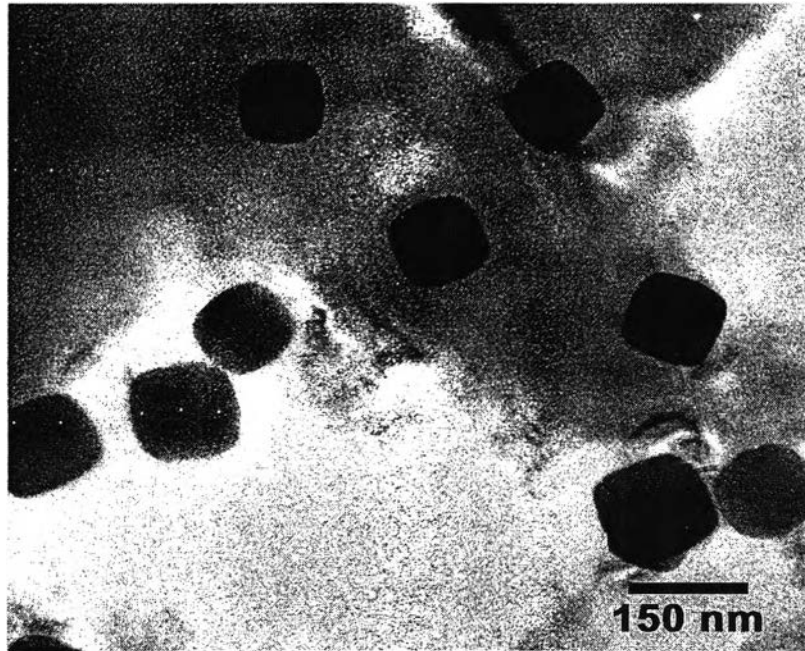




รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก้อนคาร์ไบด์ MC (Nb-rich) ในรูปที่ 4.9 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าแกมมาไพรมมีจำนวนน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับโครงสร้างจุลภาคในสภาพที่ได้รับ (รูปที่ 4.5) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้ การอบสลายกึ่งเหลวที่ทำจากอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิ 885 (24) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง เป็นการอบละลาย (Solution heat treatment) เพื่อให้โครงสร้างเนื้อพื้นออสเทนไนต์มีธาตุละลายอิมตัวยิ่งยวด มีสภาพกึ่งเสถียรที่อุณหภูมิห้อง เพราะเย็นตัวเร็วจากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิห้อง ชั้นตอนนี้อนุภาคแกมมาไพรมถูกละลายเข้าไปในเนื้อพื้น โดยยังมีบางส่วนที่ละลายไม่หมด แกมมาไพรมที่ไม่ละลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 138 นาโนเมตร การละลายของแกมมาไพรมอาจหมดที่อุณหภูมิอบสูงขึ้นหรือเวลาอบนานกว่านี้

การอบที่อุณหภูมิช่วง 800 - 980 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์ไบด์ MC ละลายในออสเทนไนต์และเกิดคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ( $MC + \gamma \leftrightarrow M_{23}C_6 + \gamma'$ ) ที่เสถียรและตกตะกอนอย่างไม่ต่อเนื่องที่ขอบเกรน ส่งผลให้ขนาดเกรนออสเทนไนต์หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) มีขนาดใกล้เคียงกับสภาพที่ได้รับ เพราะคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ที่ขอบเกรนขัดขวางการโตของเกรนออสเทนไนต์ [1-3, 8, 9, 15]



รูปที่ 4.12 โครงสร้างแกมมาไพรมของสล็กเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

#### 4.2.2 ความแข็งหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24)

ทดสอบความแข็งของสล็กเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 500 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที พบว่าความแข็งมีค่า 205 HV<sub>500</sub> (ภาคผนวก ค.)

#### 4.2.3 ความต้านแรงดึงหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24)

ทดสอบความต้านแรงดึงของสล็กเกลียว หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8 เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ความเค้นคราก เปอร์เซ็นต์การยืด และมอดุลัสยืดหยุ่น ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของสล็กเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24)

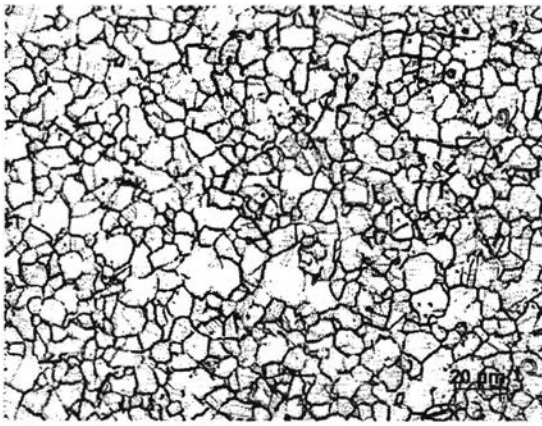
การอบละลาย	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคาล)	ความเค้นคราก (เมกะพาสคาล)	เปอร์เซ็นต์การยืด	มอดุลัสยืดหยุ่น (จิกะพาสคาล)
885 (24)	821	430	9.98	212

ผลการทดสอบสลักเกลียวในสภาพที่ได้รับ มีความแข็ง 263 HV<sub>500</sub> และความต้านแรงดึงสูงสุด 964 เมกะพาสคาล (ตารางที่ 4.3) เปรียบเทียบกับสลักเกลียวหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) มีความแข็ง 205 HV<sub>500</sub> และความต้านแรงดึงสูงสุด 821 เมกะพาสคาล (ตารางที่ 4.4) พบว่าสลักเกลียวภายหลังผ่านการอบละลาย มีความแข็งและความต้านแรงดึงต่ำกว่าสลักเกลียวในสภาพที่ได้รับ เป็นผลจากที่อุณหภูมิ 885 (24) เกิดการละลายของคาร์ไบด์ MC เพื่อตกตะกอนของคาร์ไบด์ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ที่บริเวณขอบเกรน หรือเกิดปฏิกิริยาของคาร์ไบด์ (Carbide reactions) และแกมมาไพรมส่วนใหญ่ละลายเข้าไปในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ทำให้จำนวนอนุภาคแกมมาไพรมโดยรวมลดลง เป็นผลให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันน้อยลง สมบัติเชิงกลจึงลดลง

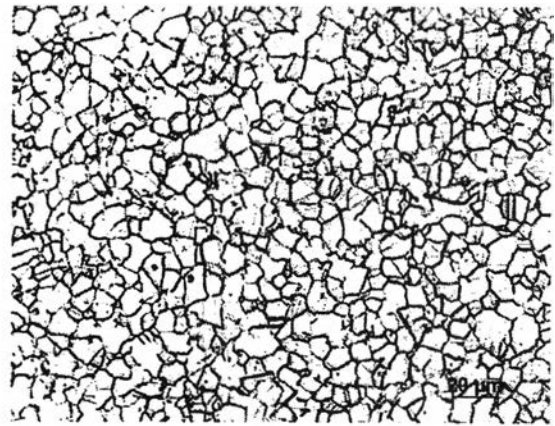
#### 4.2.4 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680(20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ปล้อยเย็นตัวในอากาศ

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของสลักเกลียวหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ขนาดของเกรนออสเทนไนต์มีขนาดใกล้เคียงกัน กระจายทั่วชิ้นงานเหมือนในสภาพที่ได้รับ เป็นผลมาจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) เกิดคาร์ไบด์ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ตกตะกอนที่ขอบเกรน ขัดขวางการโตของเกรนออสเทนไนต์ โดยเกรนออสเทนไนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM, G 11 [20, 21]

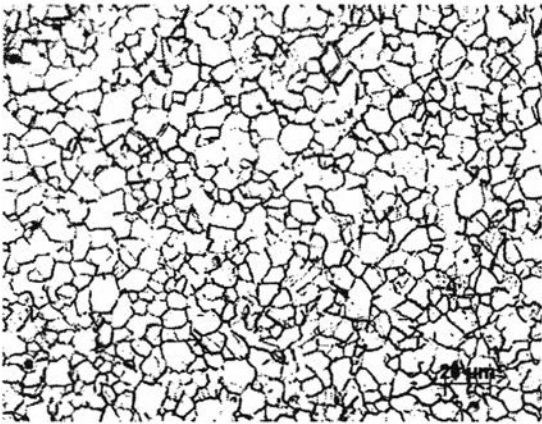
โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของสลักเกลียวหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) มีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน โครงสร้างจุลภาคยังคงประกอบด้วยเนื้อพื้นออสเทนไนต์ร่วมกับคาร์ไบด์ MC กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเกรนและบริเวณขอบเกรน และคาร์ไบด์ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ตกตะกอนที่ขอบเกรน [8, 9] ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 700 (20) แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15



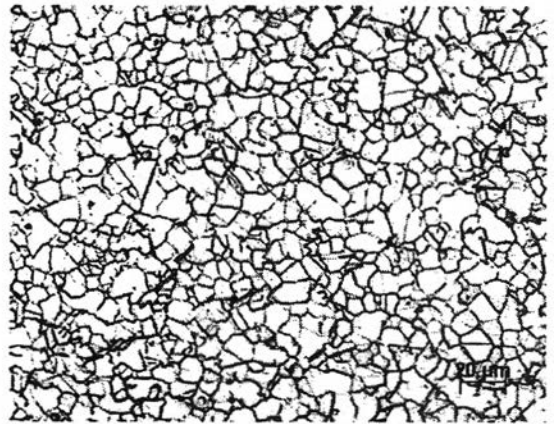
สภาพที่ได้รับ (As-receive)



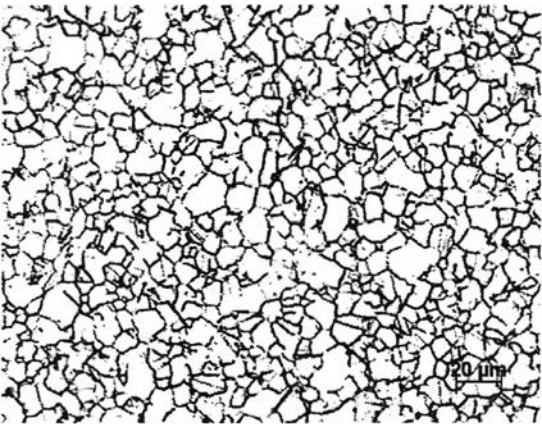
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20)



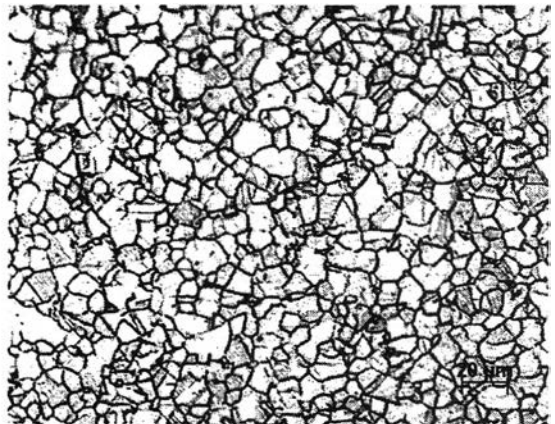
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 700 (20)



อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 720 (20)

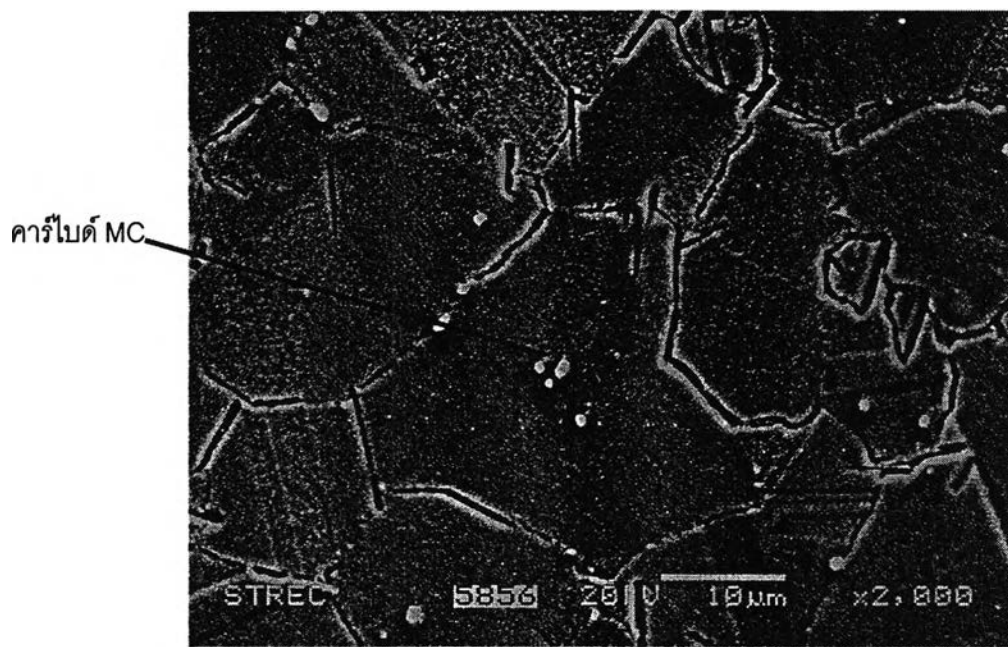


อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 740 (20)

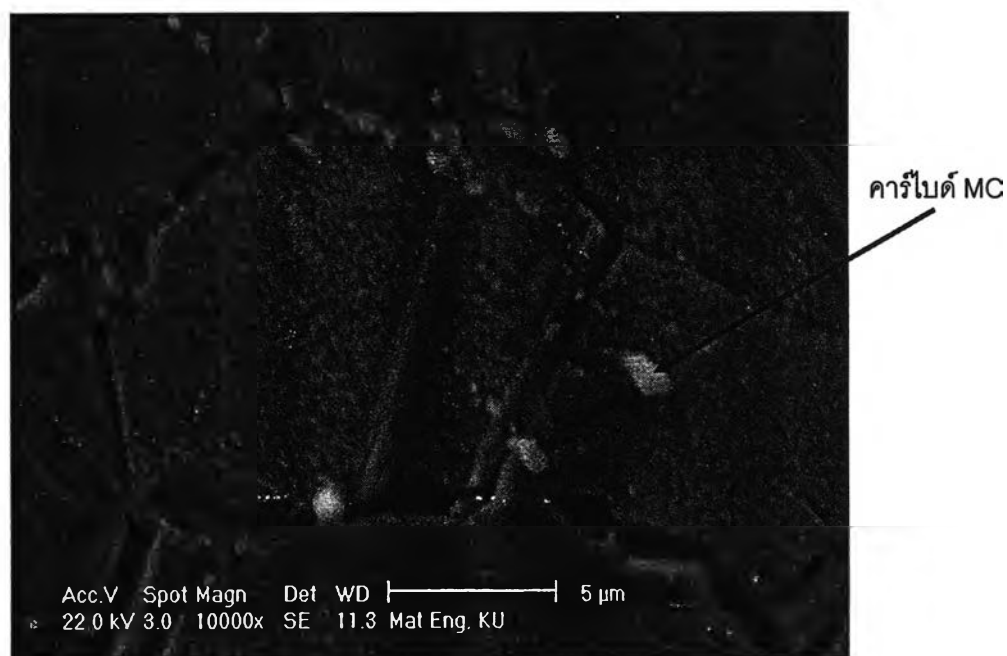


อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20)

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของสีกเก็ยวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



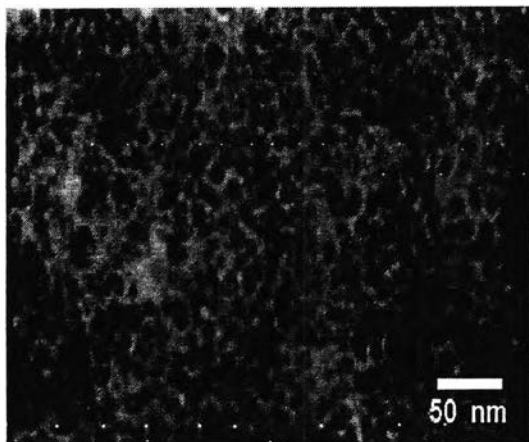
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของสีกเก็ยวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงในรูปที่ 4.16 พบแกมมาไพรมขนาดเล็กตกตะกอนกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยวัดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image analyzing program: ImageJ) จำนวนอย่างน้อย 100 ค่า ตามข้อมูลสถิติ [15] แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน มีขนาดต่างกัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิบ่มแข็งสูงขึ้น

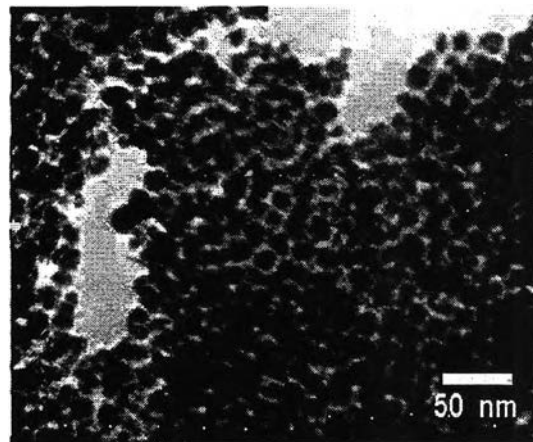
จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้ การบ่มแข็งสลักเกลียวที่ทำจากอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิบ่มแข็งสูงขึ้น เพราะที่อุณหภูมิสูงกว่าการแพร่ของธาตุมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า [9, 15, 24] ทำให้ธาตุมารวมกันเกิดเป็นตะกอนแกมมาไพรมได้มากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมจึงเพิ่มขึ้น ตะกอนแกมมาไพรมที่กระจายภายในเกรนเป็นแบบตะกอนอาพันธ์กับเนื้อพื้น (Coherent precipitate) ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้สลักเกลียวมีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลสูงขึ้น [22, 23]

ตารางที่ 4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

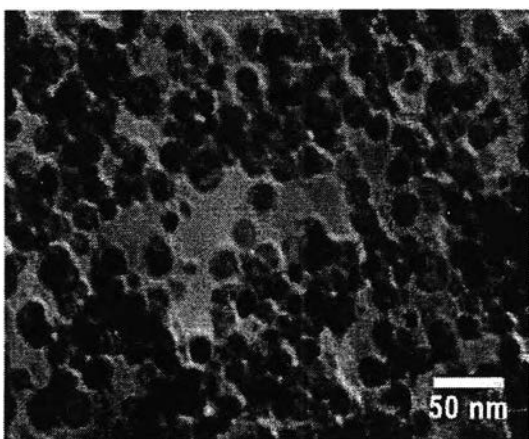
กรรมวิธีทางความร้อน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (นาโนเมตร)
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20)	10
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 700 (20)	12
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 720 (20)	16
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 740 (20)	22
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20)	33



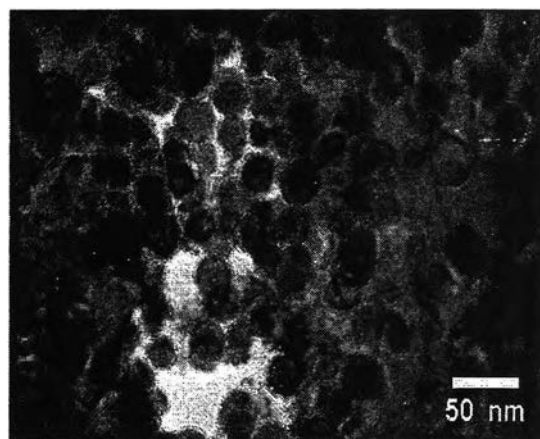
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20)



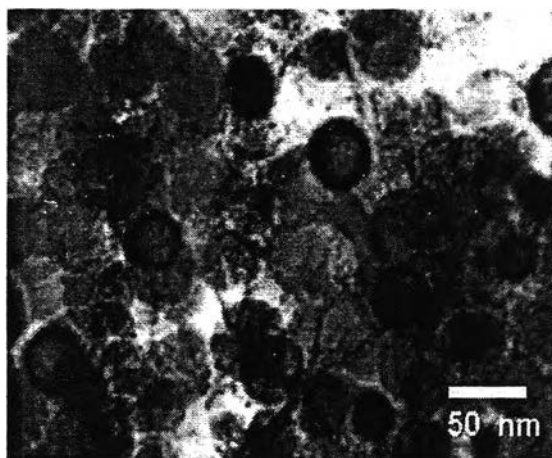
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 700 (20)



อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 720 (20)



อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 740 (20)



อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างแกมมาไมโครของสลิคเกิลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน  
ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

#### 4.2.5 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

ทดสอบความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 500 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6 (ภาคผนวก ค.)

ตารางที่ 4.6 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

กรรมวิธีทางความร้อน	ความแข็งเฉลี่ย (HV <sub>500</sub> )
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20)	324
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20)	329
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 720 (20)	316
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 740 (20)	305
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20)	293

#### 4.2.6 ความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

ทดสอบความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง มาตรฐาน ASTM E 8 เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ความเค้นคราก เปอร์เซ็นต์การยืด และมอดูลัสยืดหยุ่น ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.7 (ภาคผนวก ง.)

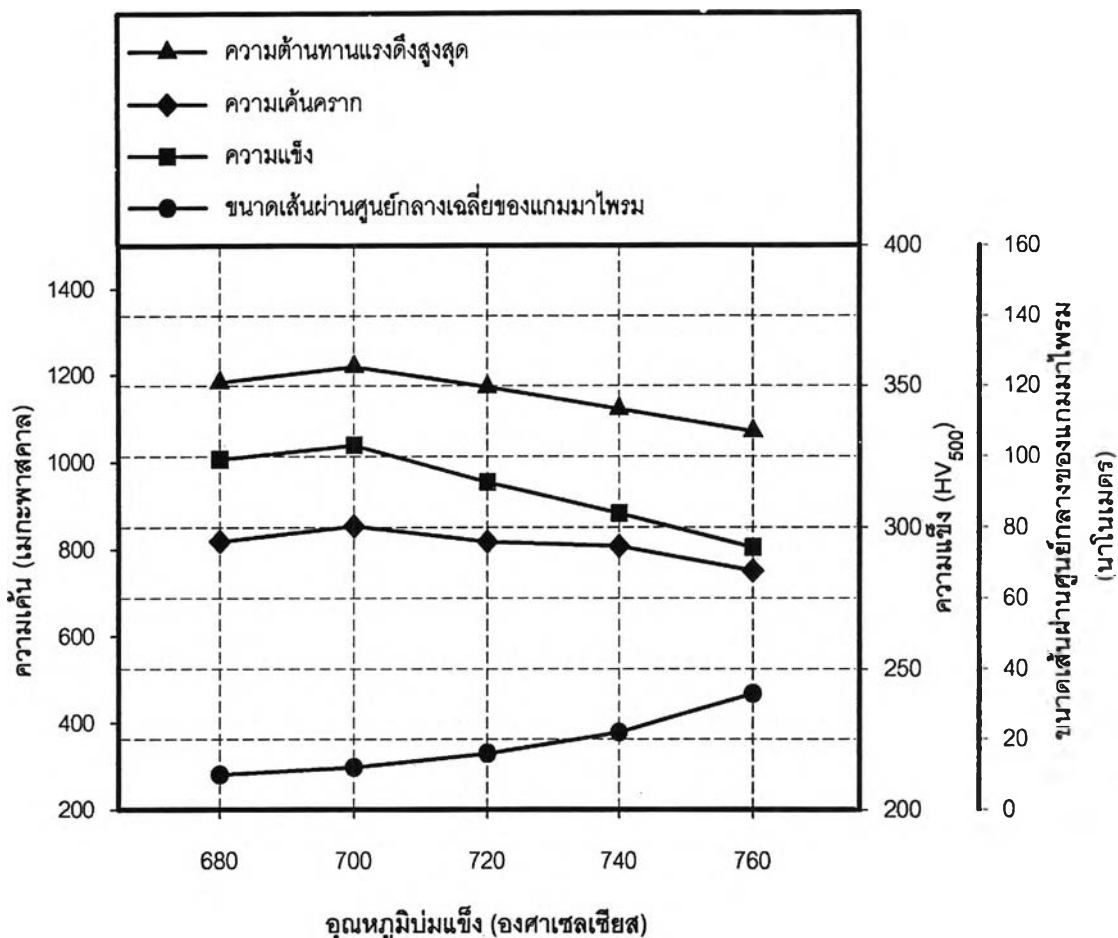
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

กรรมวิธีทางความร้อน	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคาล)	ความเค้นคราก (เมกะพาสคาล)	เปอร์เซ็นต์การยืด	มอดูลัสยืดหยุ่น (จิกะพาสคาล)
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20)	1,183	819	7.65	212
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20)	1,219	854	8.29	212
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 720 (20)	1,172	818	7.77	212
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 740 (20)	1,121	808	7.57	212
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20)	1,070	751	7.88	212



เปรียบเทียบผลทดสอบความแข็งและความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียว หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) – 760 (20) แสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ภายหลังจากการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งสลักเกลียวมีความแข็งและความต้านแรงดึงสูงขึ้น โดยสูงกว่าสลักเกลียวในสภาพที่ได้รับ (ความแข็ง 263 HV<sub>500</sub> และตารางที่ 4.3) และสูงกว่าสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24), (ความแข็ง 205 HV<sub>500</sub> และตารางที่ 4.4) เป็นผลมาจากการตกตะกอนใหม่ของแกมมาไพรม เพราะขนาดแกมมาไพรมเล็กลงและกระจายตัวดีกว่า สำหรับความแตกต่างของความแข็งและความต้านแรงดึงที่ต่างกันแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ดังนี้ การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) และ 700 (20) ความแข็งและความต้านแรงดึงที่ได้สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ตามลำดับ อาจเนื่องจากความแข็งและความต้านแรงดึงมีความสัมพันธ์กับขนาด ปริมาณ การกระจายตัวของตะกอนแกมมาไพรมในเกรน รวมทั้งคาร์ไบด์ MC และคาร์ไบด์ M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ที่กระจายตัวตามบริเวณขอบเกรนอย่างไม่ต่อเนื่อง [1,3,8] อุณหภูมิบ่มแข็ง 700 (20) ขนาดตะกอนแกมมาไพรมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 12 นาโนเมตร มีความแข็งและความต้านแรงดึงสูงสุด คาดว่ามาจากสลักเกลียวที่บ่มแข็งอุณหภูมิ 700 (20) เมื่อนำไปทดสอบความแข็งและความต้านแรงดึง ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ตัดอนุภาคแกมมาไพรมแบบแรงเฉือน (Particle cutting) และเมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ตามลำดับ ทำให้พลังงานการแพร่เพิ่มขึ้นหรือการแพร่เป็นไปได้ง่ายขึ้น ตะกอนแกมมาไพรมจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบความแข็งและความต้านแรงดึงอาจทำให้ดิสโลเคชันจะเคลื่อนที่แบบโอบรอบอนุภาคแกมมาไพรม (Particle looping) ตามกลไกของโอโรวาน (Orowan mechanism) ซึ่งดิสโลเคชันจะเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้ความแข็งและความต้านแรงดึงลดลง [18,19]

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมวัดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จำนวนอย่างน้อย 100 ค่า ตามข้อมูลสถิติ [15] แต่การวัดหาปริมาณและการกระจายตัวของแกมมาไพรมในเกรนหรือสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) เป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากต้องใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นจำนวนมาก ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม เพราะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมบัติเชิงกลสูง [1, 2, 8, 9]



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมกับอุณหภูมิการบ่มแข็ง

### 4.3 ผลทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส

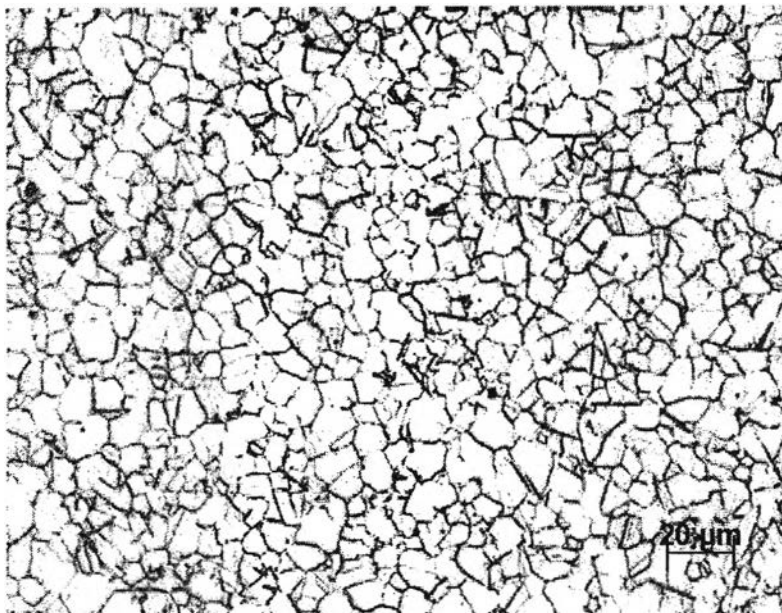
สลักเกลียวที่ทำจากอินโคเนล เอ็กซ์ 750 หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) – 760 (20) นำมาประกอบเข้ากับปลอกสวม และเป็นเกลียว ตามขั้นตอนทดสอบการคลายความเค้นข้อ 3.6.6 โดยสลักเกลียวทุกตัวรับความเค้นตั้งเริ่มต้น 450 เมกะพาสคาล [4] จากนั้นนำสลักเกลียวที่ประกอบเสร็จแล้ว อบทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ผลทดสอบมีดังนี้

#### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการทดสอบการคลายความเค้น ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง

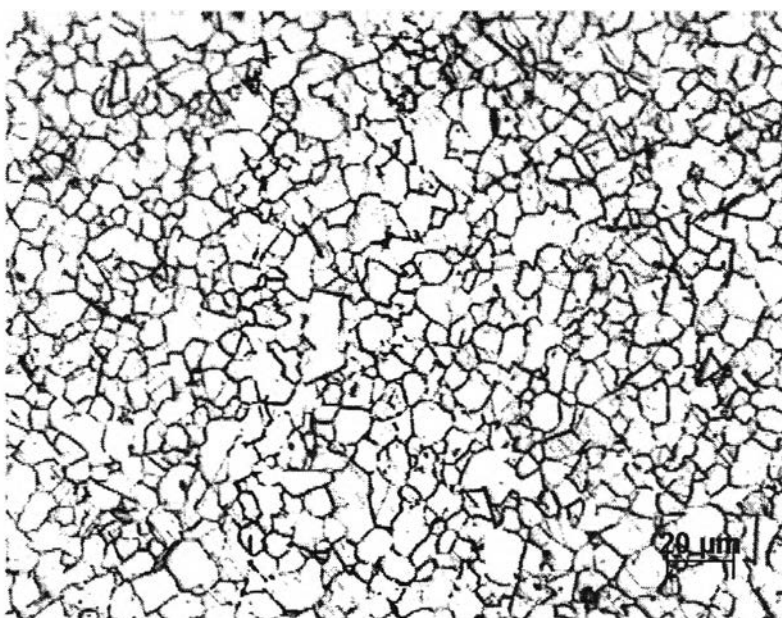
ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 และ 2,000 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.18 - 4.21 สำหรับเวลา 1,000 และ 1,500 ชั่วโมง แสดงในภาคผนวก ข. พบว่าเกรนออสเทนไนต์มีขนาดใกล้เคียงกัน (ขนาดเกรน ASTM, G11) กับสภาพก่อนทดสอบการคลายความเค้น (ขนาดเกรน ASTM, G11) คาดว่าเป็นผลมาจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) เกิดการตกตะกอนคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ที่ขอบเกรนขัดขวางการโตของเกรนออสเทนไนต์



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

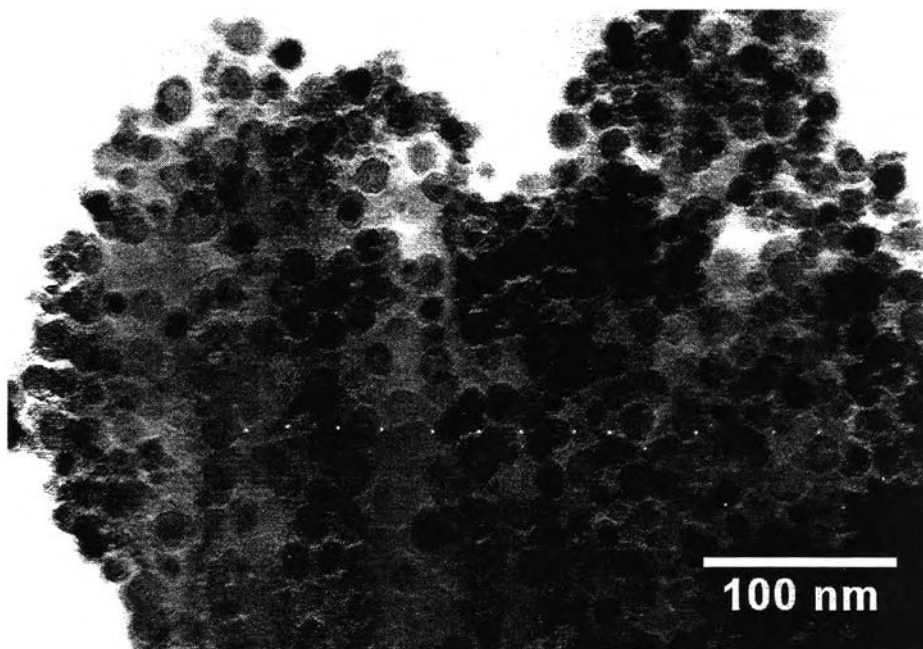


รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

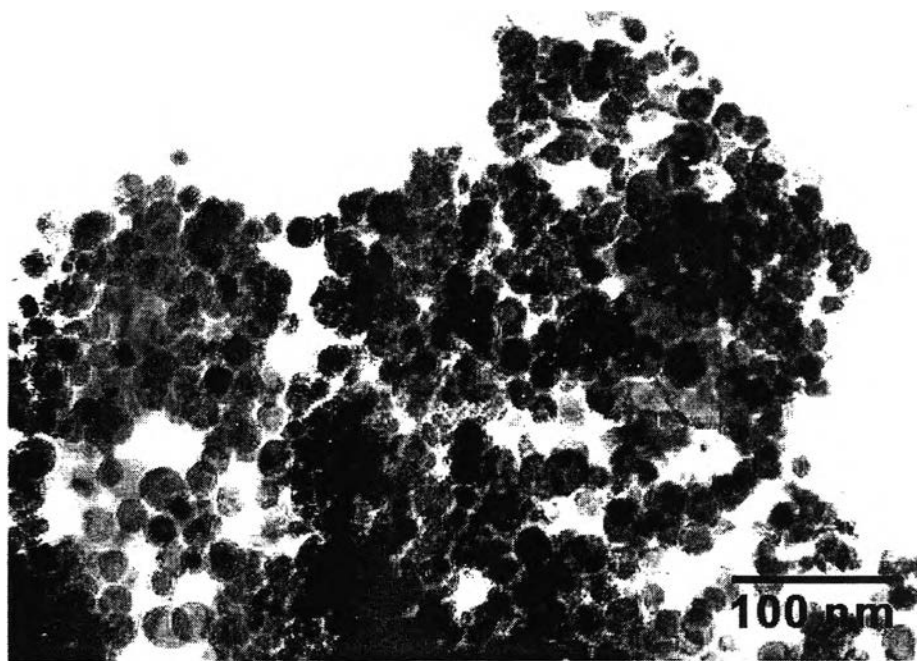
โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้น เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้นตามเวลาทดสอบ ดังผลสรุปในตารางที่ 4.8 ตัวอย่างโครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.22 - 4.25 และตัวอย่างโครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.26 - 4.29

ตารางที่ 4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียว หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

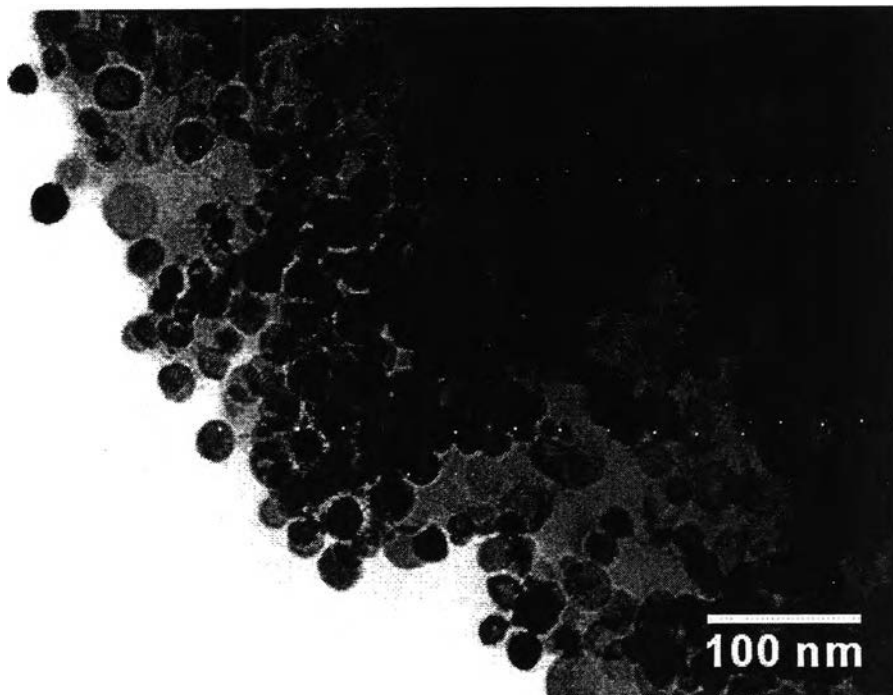
กรรมวิธีทางความร้อน	เริ่มต้น (นาโนเมตร)	500 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	1,000 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	1,500 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	2,000 ชั่วโมง (นาโนเมตร)
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20)	10	17	21	24	25
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20)	33	36	39	40	41



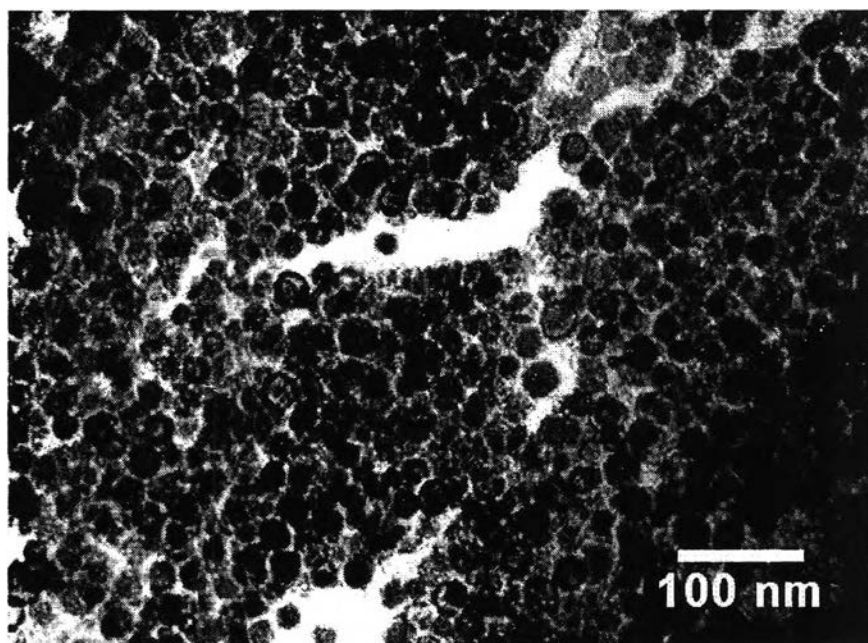
รูปที่ 4.22 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.23 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

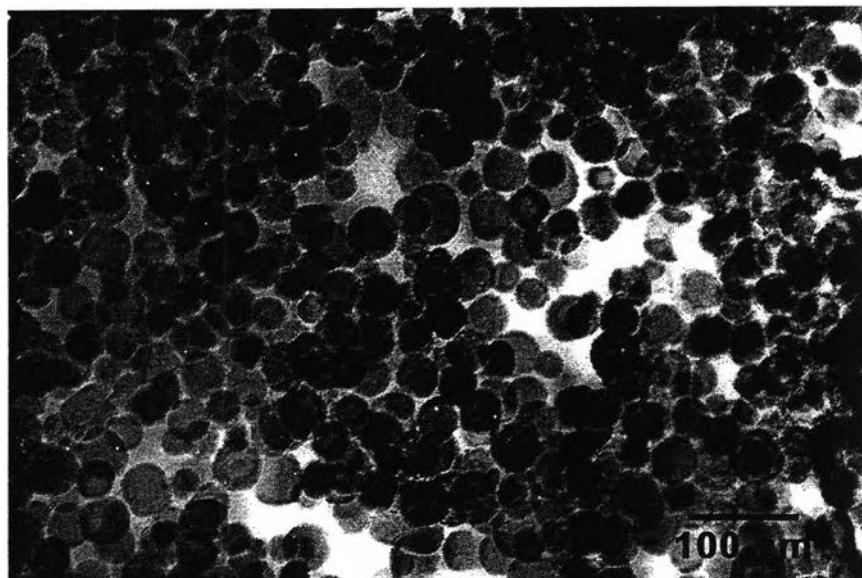


รูปที่ 4.24 โครงสร้างแกมมาไมโครของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

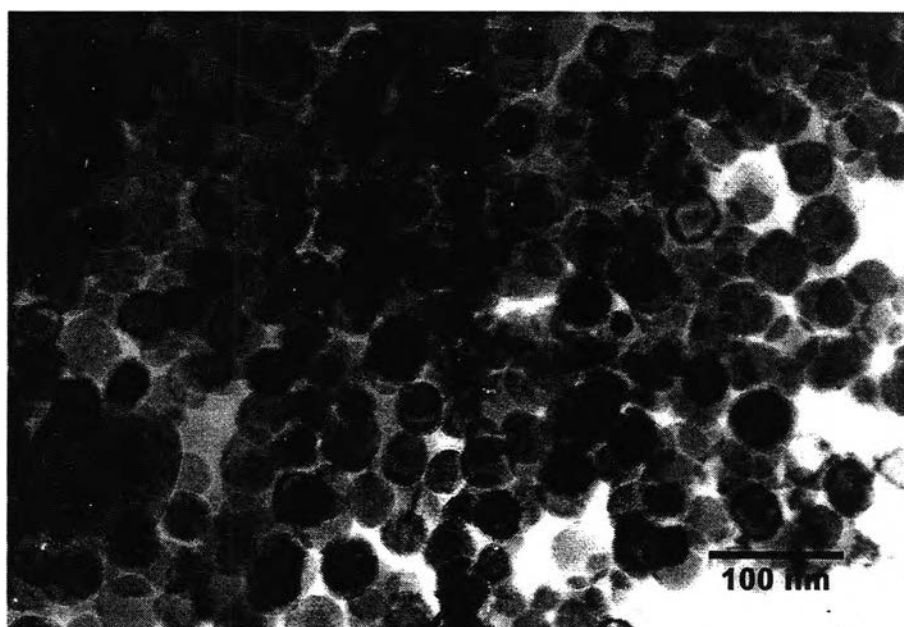


รูปที่ 4.25 โครงสร้างแกมมาไมโครของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



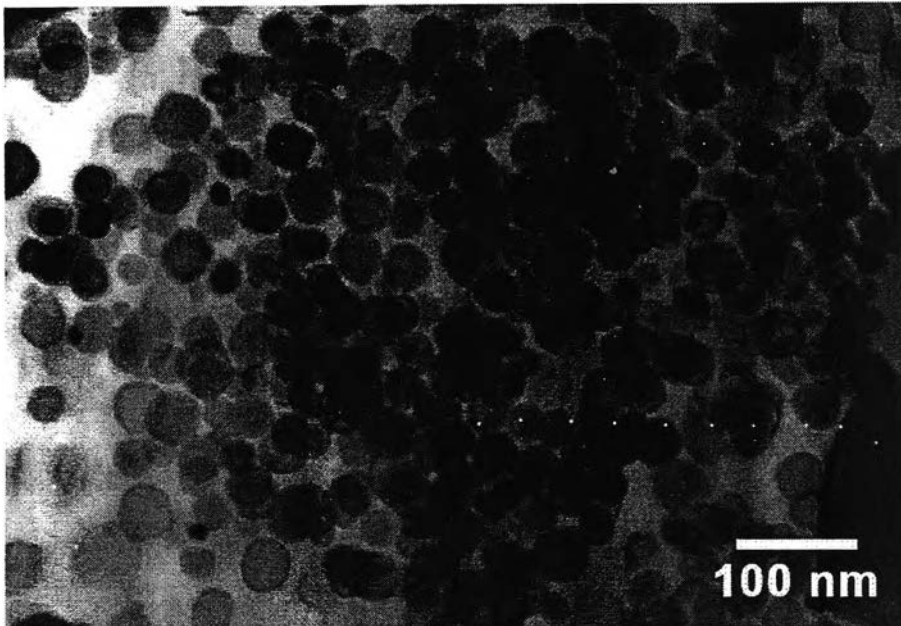


รูปที่ 4.26 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

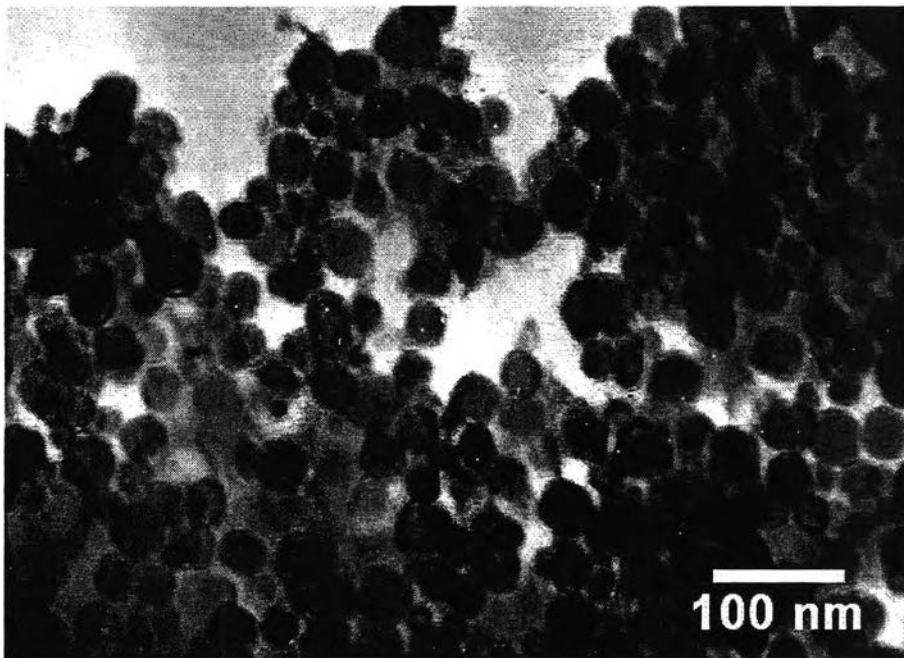


รูปที่ 4.27 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



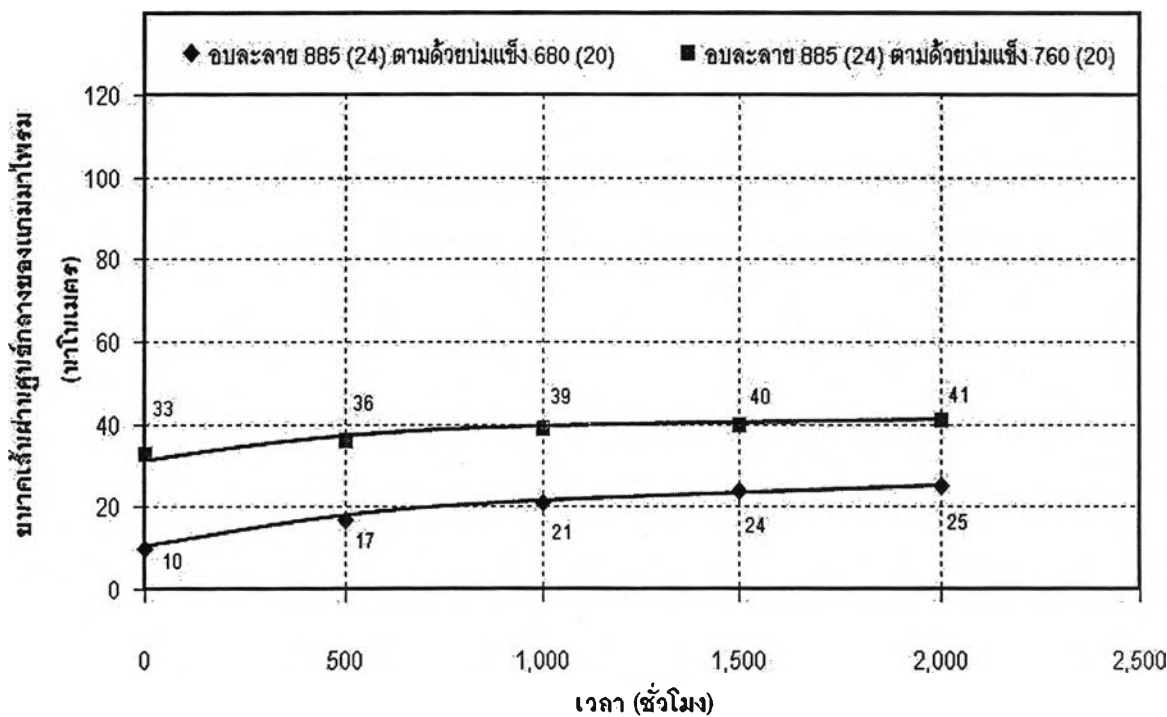


รูปที่ 4.28 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลิคเกิลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.29 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลิคเกิลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

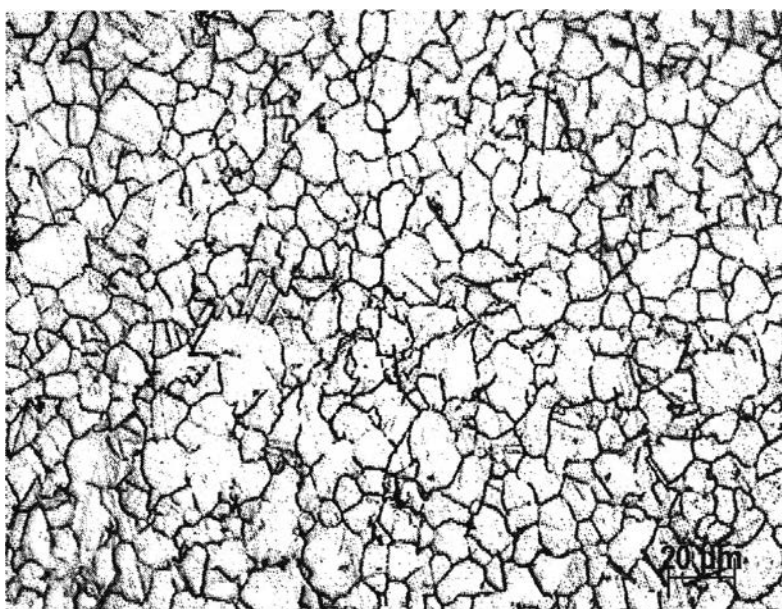
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์กับเวลาทดสอบการคลายความเค้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์ในสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเริ่มต้น 10 นาโนเมตร หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 21 นาโนเมตร และเวลา 2,000 ชั่วโมง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 25 นาโนเมตร เปรียบเทียบกราฟรูปที่ 4.30 ในทำนองเดียวกัน ต่างกันที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 760 (20) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเริ่มต้น 33 นาโนเมตร หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 39 นาโนเมตร และเวลา 2,000 ชั่วโมง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 41 นาโนเมตร การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 (20) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยใหญ่กว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเริ่มต้นที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 760 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 680 (20) เมื่อเวลาทดสอบการคลายความเค้นมากขึ้น ขนาดแกมมาไพรม์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเวลาการแพร่มากขึ้น ธาตุองค์ประกอบของแกมมาไพรม์มีเวลารวมตัวกันได้แกมมาไพรม์ที่ใหญ่ขึ้น ตามเวลาทดสอบการคลายความเค้นที่มากขึ้น [15]



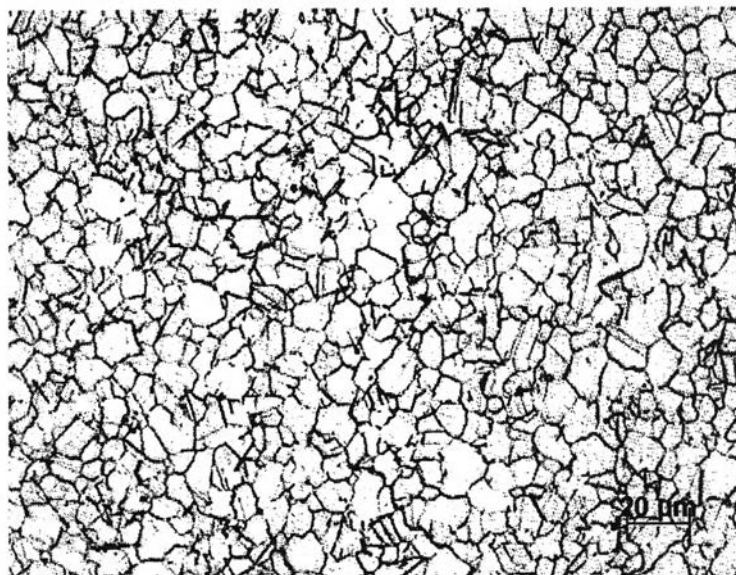
รูปที่ 4.30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์ หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่างๆ

#### 4.3.2 โครงสร้างจุลภาคหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง

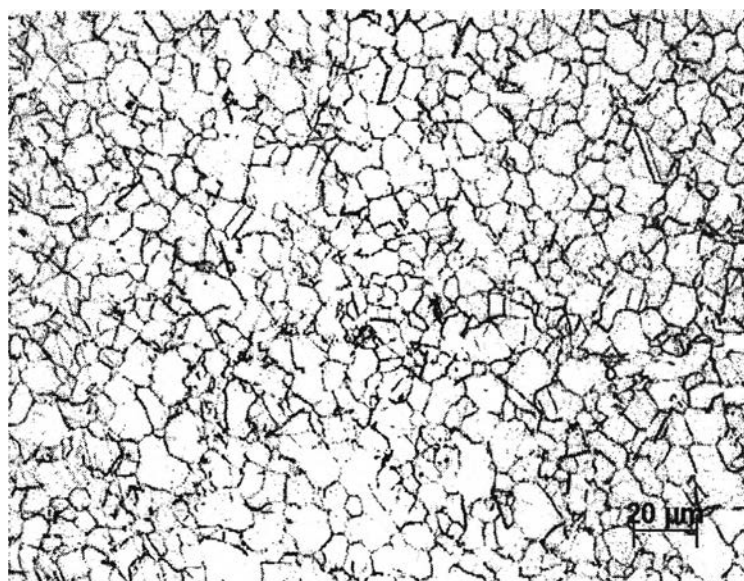
ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 และ 2,000 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.31 - 4.34 สำหรับเวลา 1,000 และ 1,500 ชั่วโมง แสดงในภาคผนวก จ. พบว่าเกรนออสเทนไนต์มีขนาดใกล้เคียงกัน (ขนาดเกรน ASTM, G11) กับสภาพก่อนทดสอบการคลายความเค้น (ขนาดเกรน ASTM, G11) คาดว่าเป็นผลมาจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) เกิดการตกตะกอนคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  ที่ขอบเกรนขัดขวางการโตของเกรนออสเทนไนต์



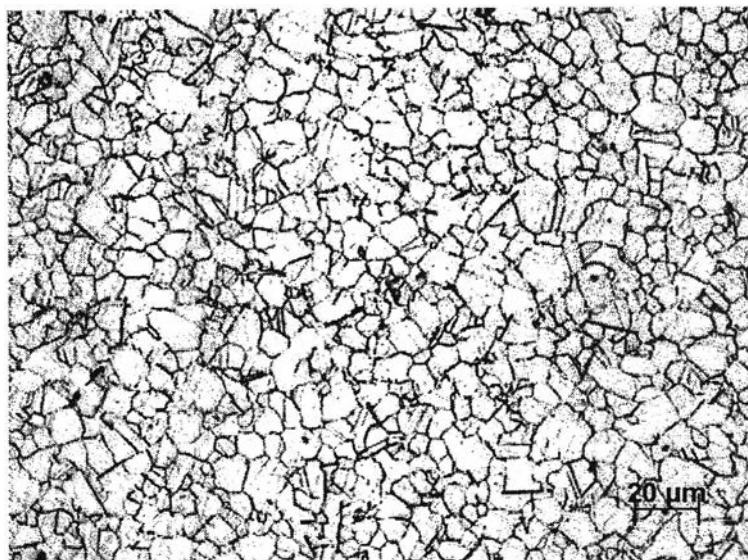
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยปมแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยปมแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

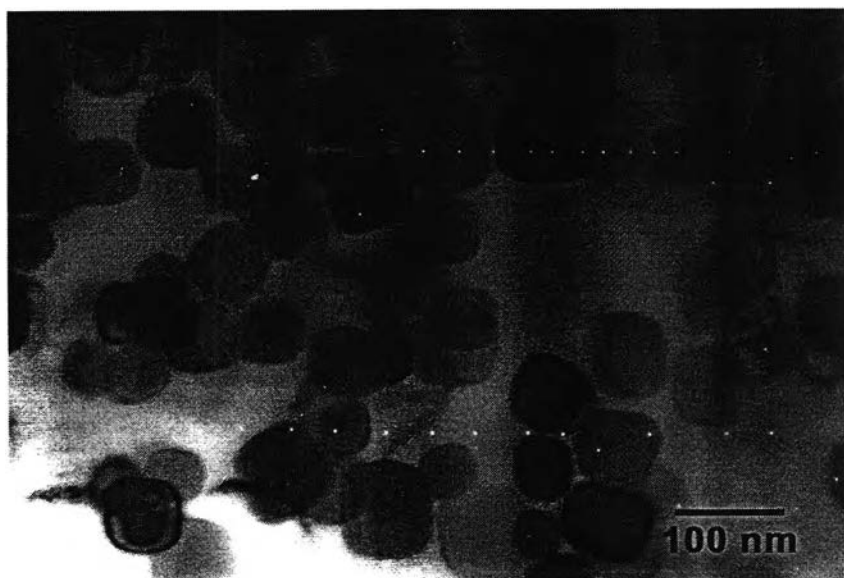


รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

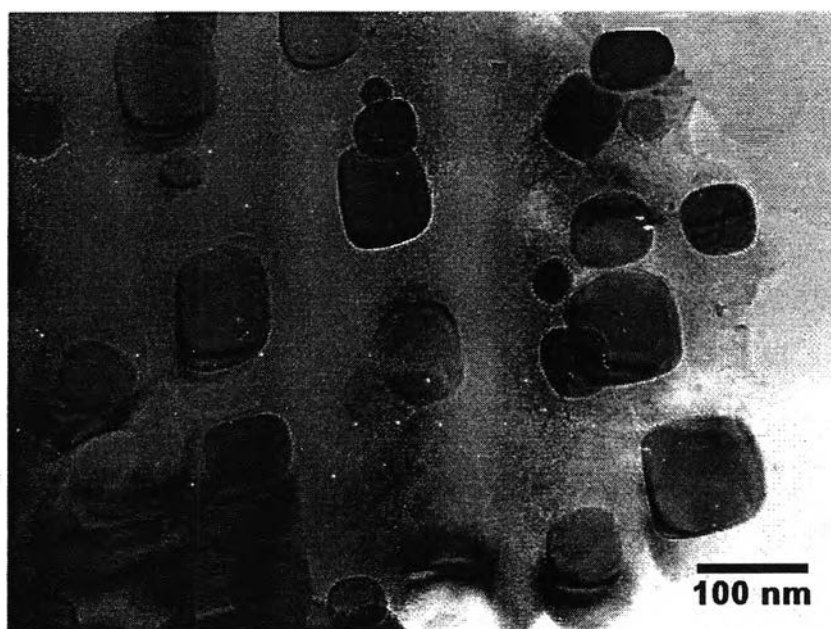
โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านหลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้น เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้นจากขนาดเริ่มต้น ตามเวลาทดสอบ ดังผลสรุปในตารางที่ 4.9 ตัวอย่างโครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.35 – 4.38 ตัวอย่างโครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.39 – 4.42

ตารางที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียว หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

กรรมวิธีทางความร้อน	เริ่มต้น (นาโนเมตร)	500 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	1,000 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	1,500 ชั่วโมง (นาโนเมตร)	2,000 ชั่วโมง (นาโนเมตร)
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 680 (20)	10	73	80	95	96
อบละลาย 885 (24) ตามด้วยบ่มแข็ง 760 (20)	33	80	88	104	106



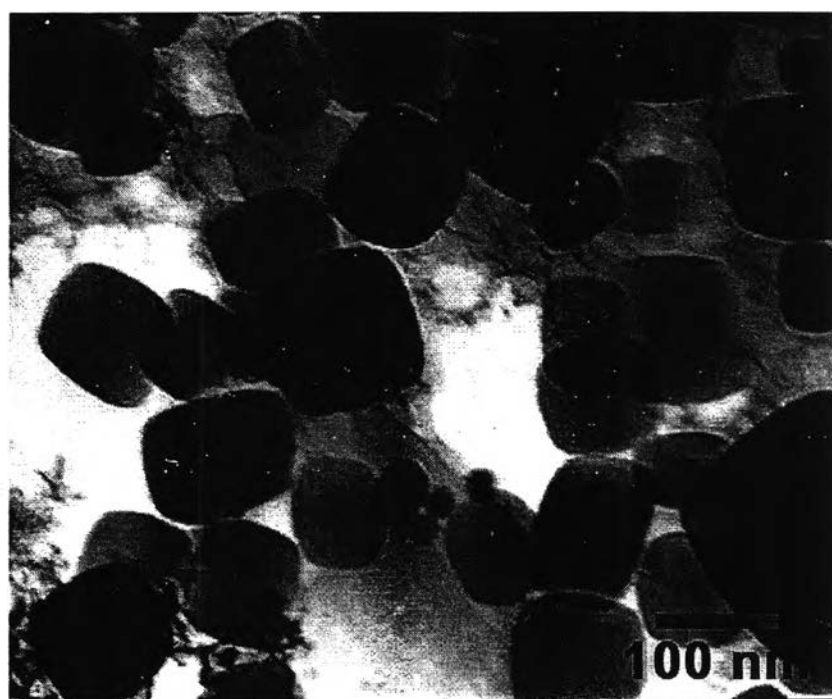
รูปที่ 4.35 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลิคเกิลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.36 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลิคเกิลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

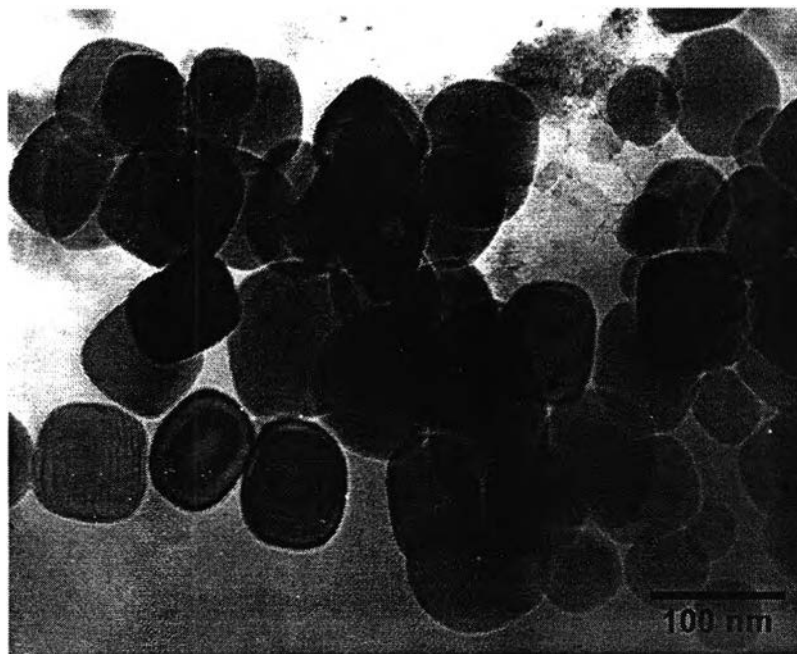


รูปที่ 4.37 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

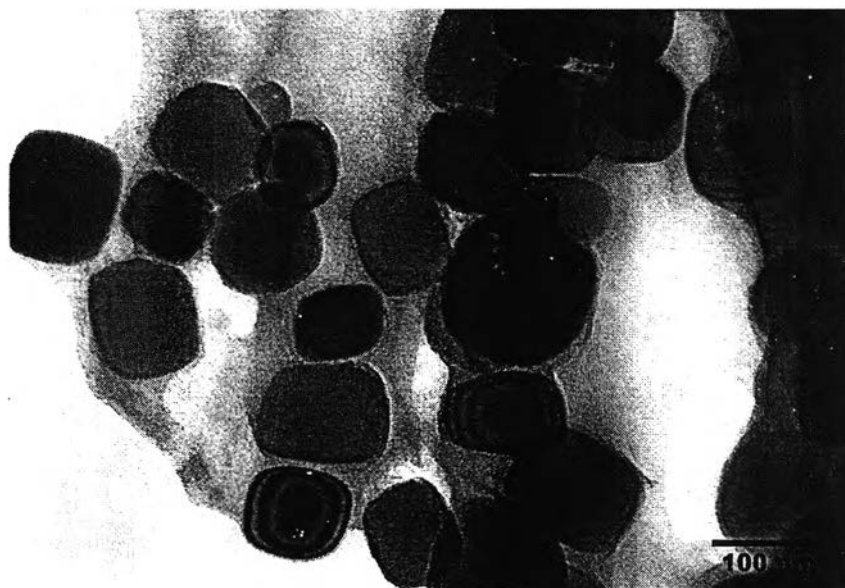


รูปที่ 4.38 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



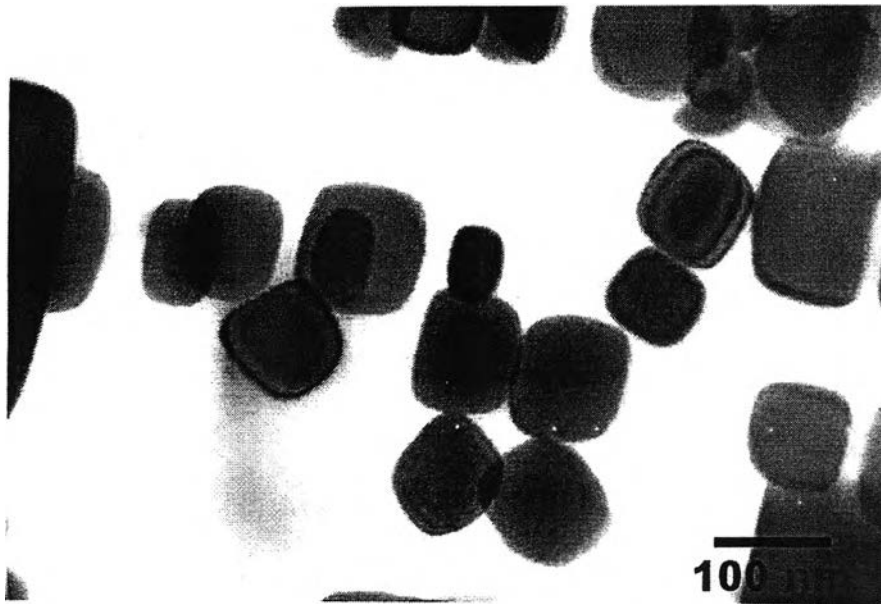


รูปที่ 4.39 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการป้อนแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

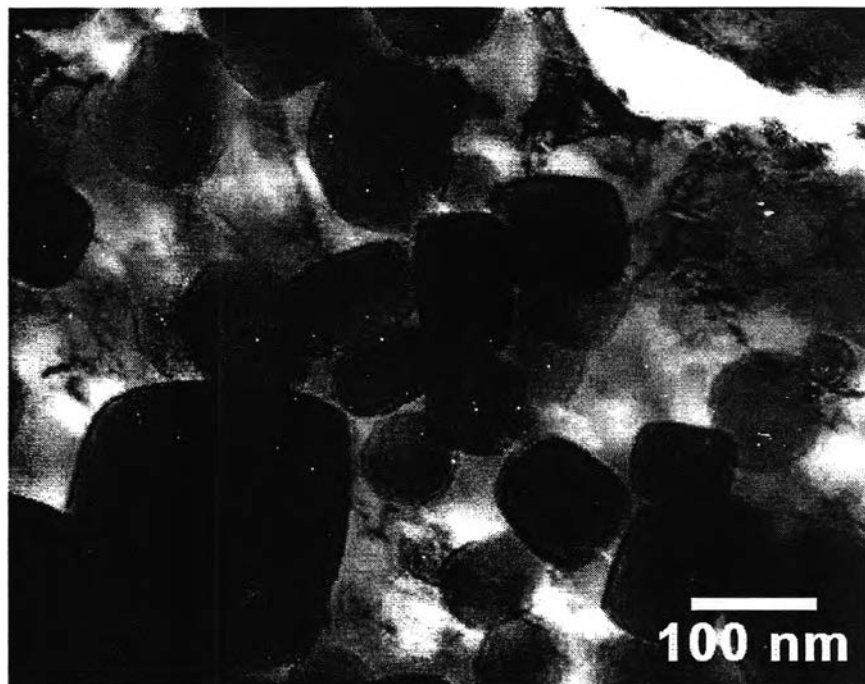


รูปที่ 4.40 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการป้อนแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน





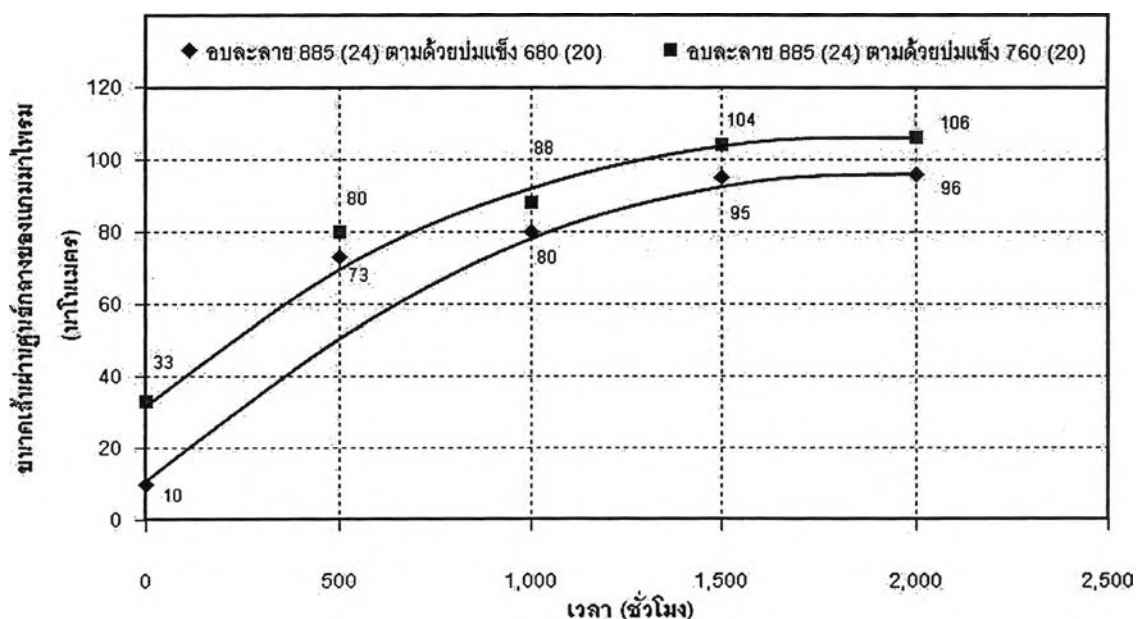
รูปที่ 4.41 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.42 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมกับเวลาทดสอบการคลายความเค้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเริ่มต้น 10 นาโนเมตร หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้น ผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีสลักเกลียวอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 (20) แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 760 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 680 (20) เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเริ่มต้นที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 760 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 680 (20) เมื่อเวลาทดสอบการคลายความเค้นมากขึ้น ขนาดแกมมาไพรมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเวลาการแพร่มากขึ้น ตามเวลาทดสอบการคลายความเค้นที่มากขึ้น [15]

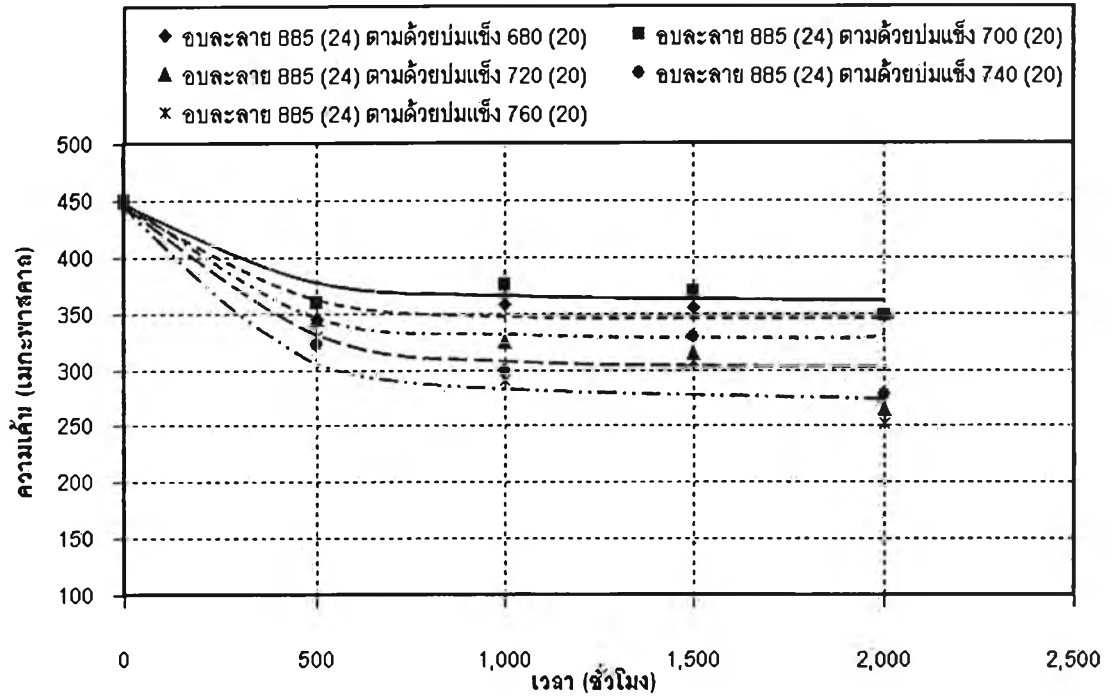
เมื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม ทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าทดสอบอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่าง (รูปที่ 4.30 และ 4.43) อุณหภูมิทดสอบ 760 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกัน 110 องศาเซลเซียส ในกรณีนี้ อุณหภูมิทดสอบมีผลต่อการเพิ่มขนาดของแกมมาไพรมอย่างมาก ในช่วงเวลา 2,000 ชั่วโมง อุณหภูมิทดสอบ 760 องศาเซลเซียส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลจากอัตราการแพร่ที่อุณหภูมิสูงกว่ามีค่ามากกว่า



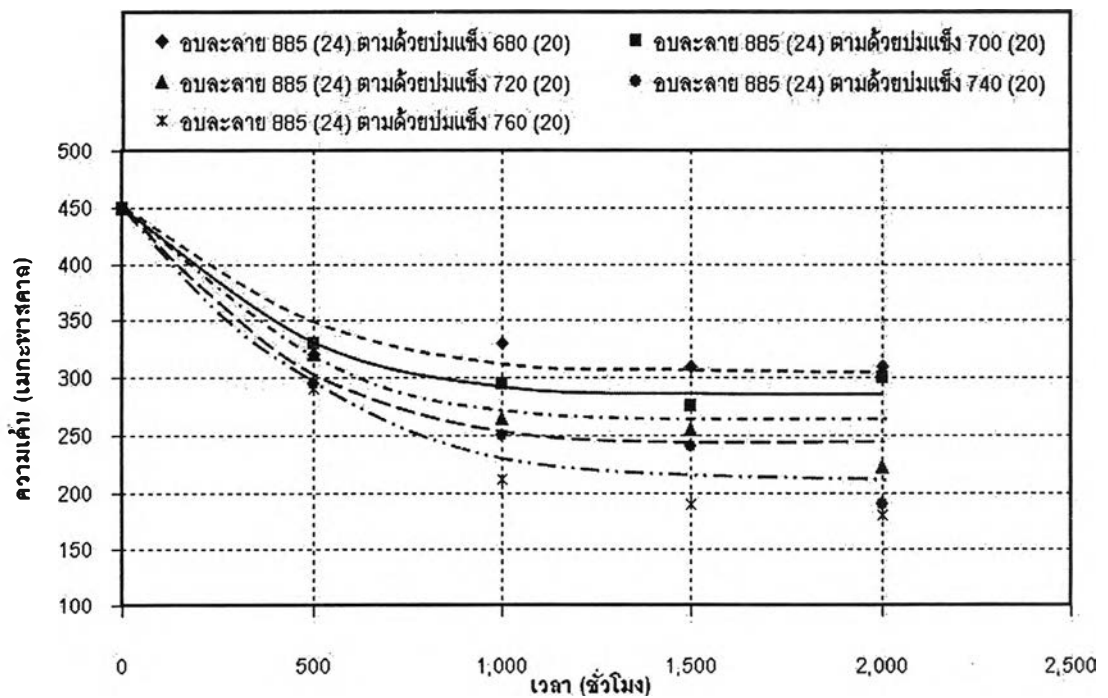
รูปที่ 4.43 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่างๆ

### 4.3.3 การคลายความเค้น

ผลทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45



รูปที่ 4.44 การคลายความเค้นสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่าง ๆ

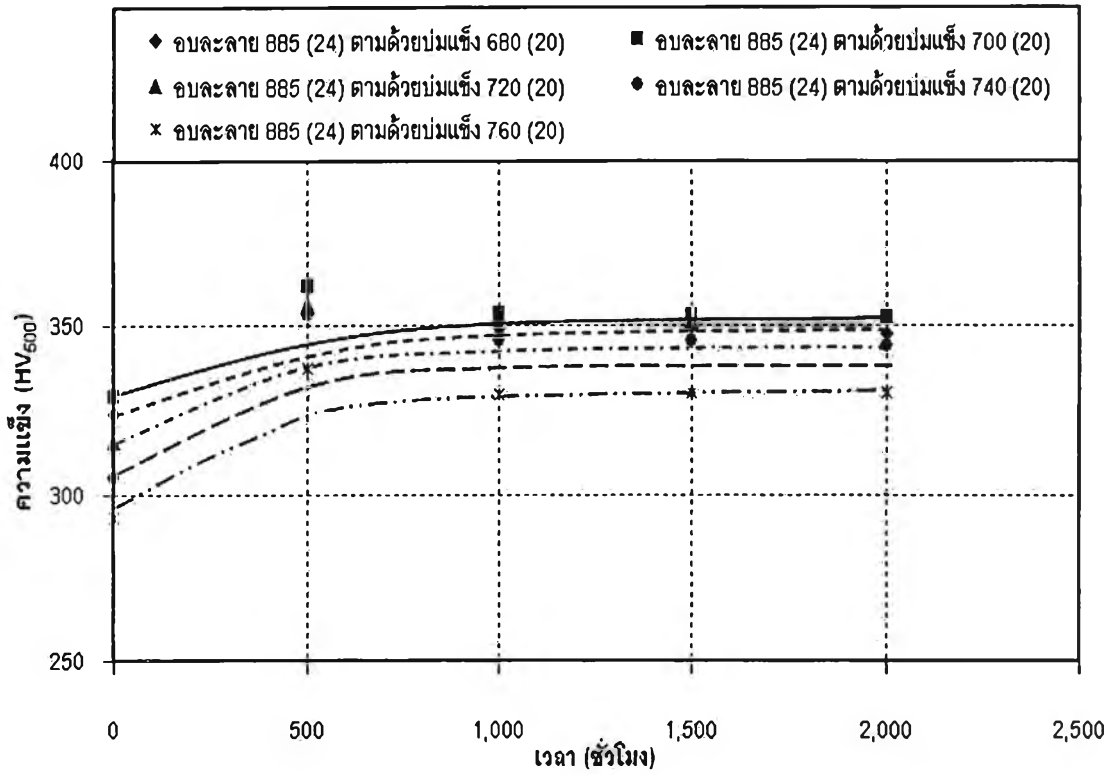


รูปที่ 4.45 การคลายความเค้นสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่าง ๆ

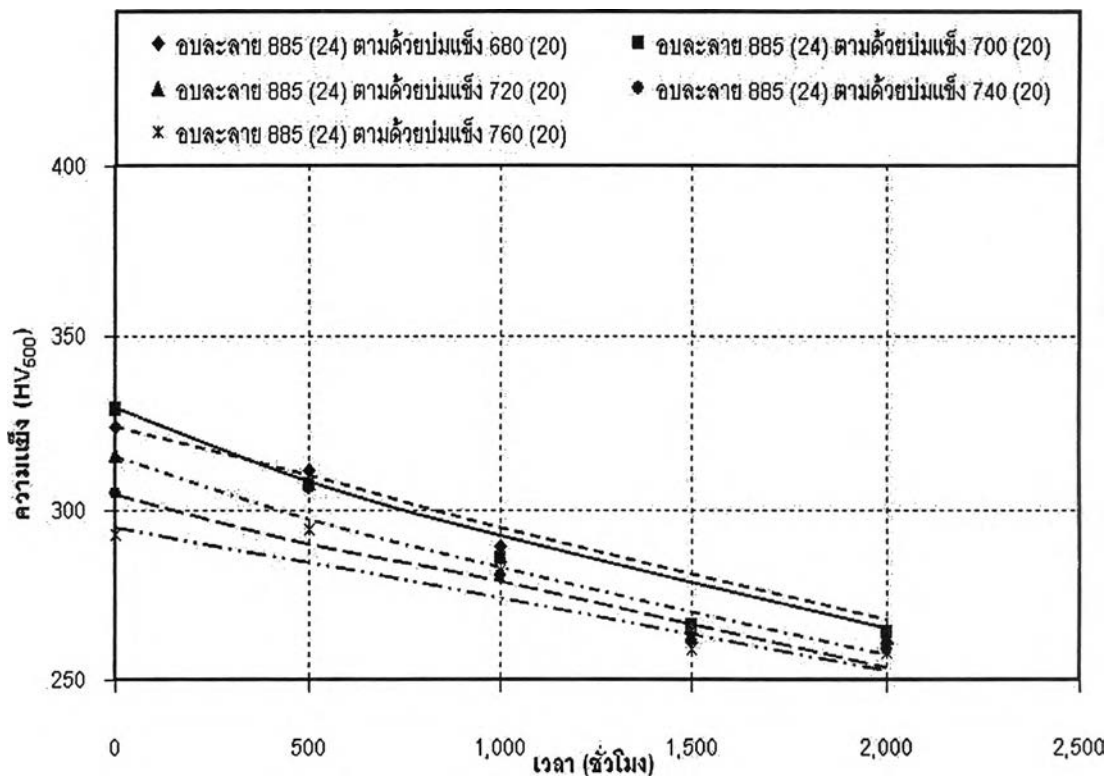
ผลทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน อุณหภูมิบ่มแข็งช่วง 680 (20) – 760 (20) สลักเกลียวทุกตัวอย่างได้รับความเค้นเริ่มต้น 450 เมกะพาสคาล เมื่อผ่านการทดสอบการคลายความเค้น เป็นระยะเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส ความเค้นเริ่มต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้คาดว่ามีความสัมพันธ์มาจากโครงสร้างจุลภาคและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์ที่เพิ่มขึ้น ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น (หัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2) ทำให้ส่งผลต่อการคลายความเค้นและการยึดตัวของสลักเกลียว ในเวลา 500 – 1,000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส มีอัตราการคลายความเค้นของสลักเกลียวสูงกว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส คาดว่ามาจากขนาดแกมมาไพรม์ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เพราะการแพร่ที่อุณหภูมิสูงกว่า จึงเกิดการคลายความเค้นภายในโครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวได้มากกว่า และเมื่อเวลาผ่านไป 1,500 – 2,000 ชั่วโมง ความเค้นลดลงเรื่อย ๆ แต่มีความชันของกราฟลดลง (รูปที่ 4.44 และ 4.45) อัตราการคลายความเค้นมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการปรับตัวของโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์ที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามเวลาทดสอบ (รูปที่ 4.30 และ 4.43 )

#### 4.3.4 ความแข็งของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้น

ทดสอบความแข็งของสลักเกลียว หลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 500 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4.46 และ 4.47 (ภาคผนวก ค.) การวิเคราะห์ผลในหัวข้อนี้ จะอธิบายรวมกันกับผลทดสอบความต้านแรงดึงในหัวข้อ 4.3.5



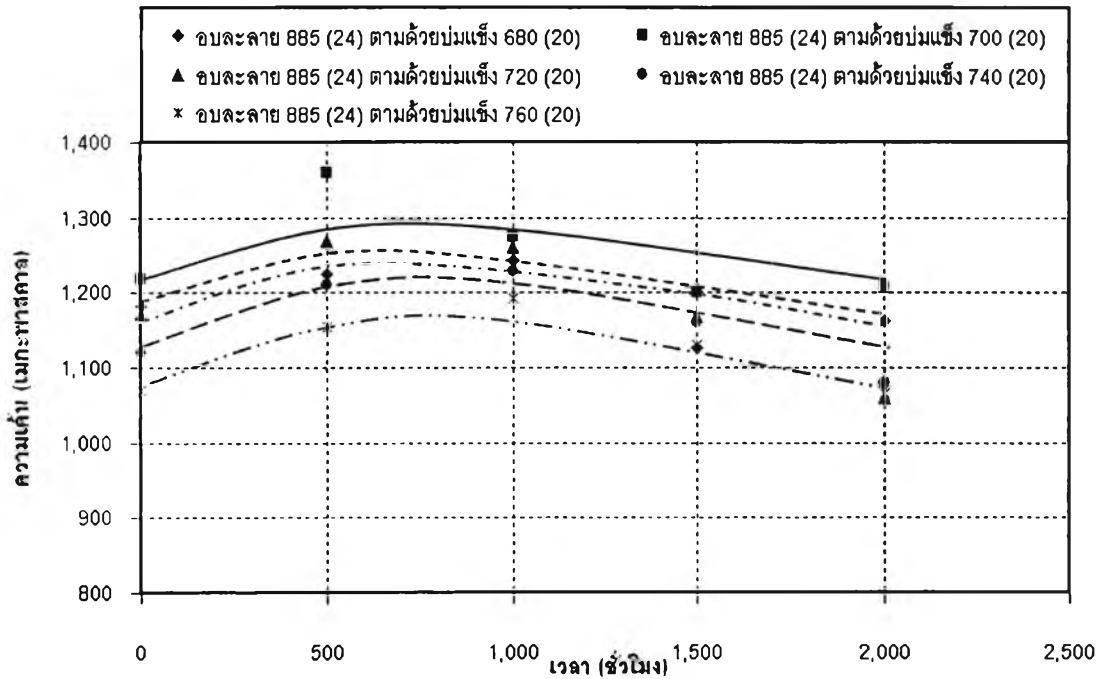
รูปที่ 4.46 ความแข็งแรงของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส



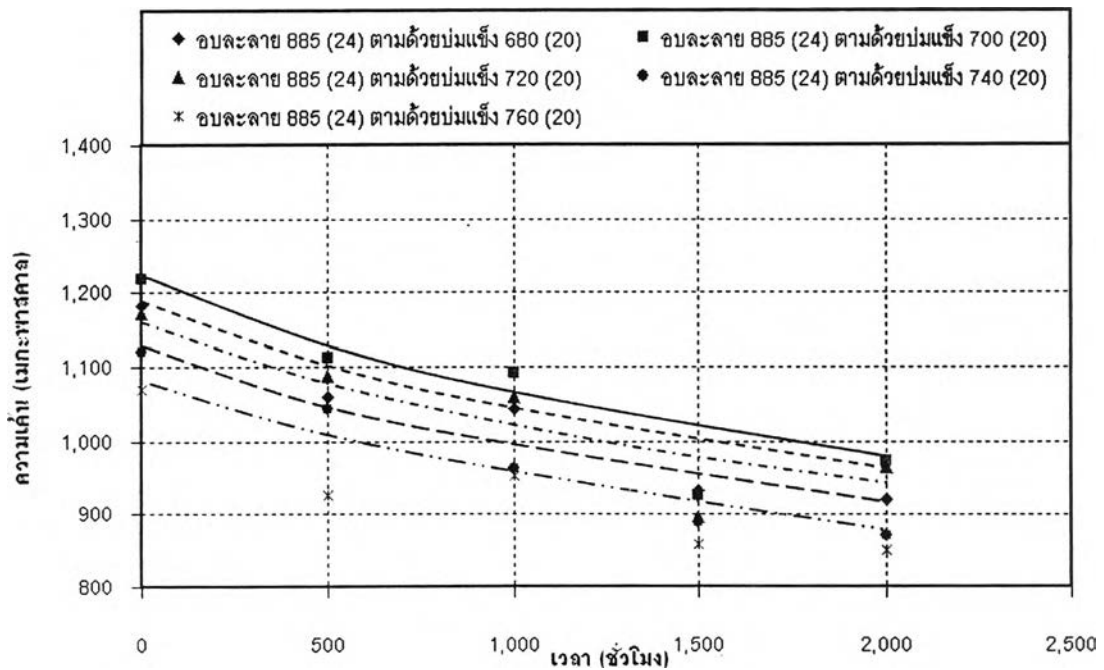
รูปที่ 4.47 ความแข็งแรงของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

#### 4.3.5 ความต้านแรงดึงหลังทดสอบการคลายความเค้น

ทดสอบความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8 เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4.48 และ 4.49 (ภาคผนวก ง.)



รูปที่ 4.48 ความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.49 ความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

การทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ความแข็งและความต้านแรงดึงของสลักเกลียว ให้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกัน ในช่วงเวลา 500 – 1,000 ชั่วโมง สลักเกลียวมีความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น (รูปที่ 4.46 และ 4.48) สาเหตุที่สลักเกลียวมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น อาจมีการตกตะกอนใหม่ของแกมมาไพรม์ขึ้น เพราะอุณหภูมิทดสอบ 650 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมั้มแข็ง แม้ว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการแพร่จะช้า แต่มีระยะเวลาที่นานพอที่จะเกิดจุดเริ่มต้นการตกตะกอนแกมมาไพรม์ใหม่ขึ้นมาได้ [1, 3, 24] ซึ่งตะกอนแกมมาไพรม์จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้ความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น เมื่อผ่านไป 1,500 – 2,000 ชั่วโมง ความแข็งและความต้านทานแรงดึงเริ่มลดลง อาจเนื่องจากขนาดตะกอนแกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.30) จำนวนของแกมมาไพรม์โดยรวมลดลง ทำให้ปริมาณที่จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันน้อยลง ความแข็งและความต้านทานแรงดึงจึงลดลง

การทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง ความแข็งและความต้านแรงดึงของสลักเกลียว ให้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกัน (รูปที่ 4.47 และ 4.49) สาเหตุที่สลักเกลียวมีสมบัติเชิงกลลดลง ทั้งความแข็งและความต้านแรงดึง เนื่องจากอุณหภูมิตดสอบ 760 องศาเซลเซียส สูงกว่าอุณหภูมิมั้มแข็งของกรรมวิธีทางความร้อน ส่งผลให้ตะกอนแกมมาไพรม์มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะมีอัตราการแพร่ที่สูงขึ้น อาจเกิดการบ่มเกิน (Over aging) ทำให้ความแข็งและความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมาก เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.43) การคลายความเค้นของสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง พบว่าสลักเกลียวมีค่าความแข็งและความต้านแรงดึงสูงสุดลดลง แต่การยึดตัวและการคลายความเค้นเพิ่มขึ้น คาดว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรม์ ทำให้สลักเกลียวคลายความเค้นเกิดการคืบ (Creep) และการยึดตัวถาวร (Permanent strain) นอกจากนี้การคลายความเค้นยังขึ้นกับความซับซ้อนของเนื้อพื้น ออสเทนไนต์กับตะกอนของแกมมาไพรม์และคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งปริมาณ การกระจายตัวของตะกอนแกมมาไพรม์และอนุภาคคาร์ไบด์ชนิดต่าง ๆ ด้วย