

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ร้อนขึ้นอีกจนถึงการม้วนเก็บแสดงในตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,250 °C เป็นเวลา 30 นาที แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนต์ โดยวัดขนาดเกรนออสเทนไนต์ได้ 135 ไมครอน หลังการรีดหยาบที่ปริมาณ 42% ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ได้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนต์หลังการตกผลึกใหม่ โดยมีขนาดเกรนออสเทนไนต์ 54 ไมครอน โครงสร้างจุลภาคก่อนรีดละเอียดแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าขนาดเกรนออสเทนไนต์โตขึ้นเป็น 58 ไมครอน หลังจากรีดละเอียดที่ปริมาณ 53.3 % ที่อุณหภูมิ 860 °C ได้โครงสร้างออสเทนไนต์ที่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เกรนมีลักษณะรียาว โดยวัดขนาดเกรนออสเทนไนต์ตามแนวการรีดได้ 54 ไมครอน วัดขนาดเกรนออสเทนไนต์ตามแนวตั้งฉากการรีดได้ 36 ไมครอน ค่า $S_{v(gb+db)}$ คำนวณโดยลากเส้นความยาว 100 มิลลิเมตรผ่านเกรนตามแนวการรีดและผ่านเกรนตามแนวตั้งฉากการรีดบนรูปที่มีกำลังขยาย (z) 200 เท่า นับจุดตัดของเกรนกับเส้นตามแนวการรีด ($N_{L//}$) เฉลี่ยได้ 9 จุด จุดตัดของเกรนกับเส้นตามแนวตั้งฉากการรีด ($N_{L\perp}$) นับได้เฉลี่ย 14 จุด คำนวณค่า $S_{v(gb+db)}$ จากสมการ (2-6)

$$\begin{aligned} S_{v(gb+db)} &= (0.429 N_{L//} \cdot z + 1.571 N_{L\perp} \cdot z) \times 10^{-2} \\ &= [(0.429 \times 9 \times 200) + (1.571 \times 14 \times 200)] \times 10^{-2} \\ &= 52 \text{ mm}^{-1} \end{aligned}$$

หลังจำลองการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 - 670 °C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรท์กับเฟิร์ลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ ข.1 - ข.6 ที่ภาคผนวก ข. โดยมีเกรนเฟอร์ไรท์ลักษณะรูปทรงหลายเหลี่ยม มีเฟิร์ลไลต์ขนาดเล็กกระจายทั่วไป ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ผ่านการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 - 670 °C แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 °C ประมาณ 10 ไมครอน ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 550 °C และ 580 °C มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นเป็นประมาณ

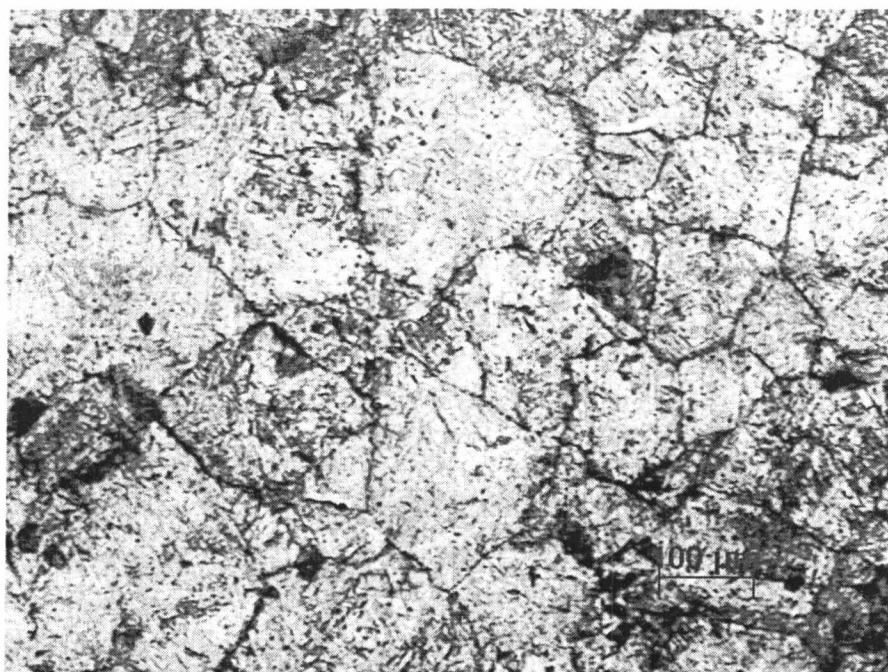
11 ไมครอน และเมื่ออุณหภูมิมีวณเก็บที่สูงขึ้นเป็น 610, 640 และ 670 °C ขนาดเกรนเพิ่มขึ้นเป็น 12 ไมครอน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับอุณหภูมิมีวณเก็บของชิ้นงานโดยรวมในรูปที่ 4.6 พบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรท์มีแนวโน้มแปรผันตามอุณหภูมิมีวณเก็บ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิมีวณเก็บสูงขึ้นขนาดเกรนเฟอร์ไรท์มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนออสเทนไนท์ระหว่างการรีดร้อนและขนาดเกรนเฟอร์ไรท์หลังการมีวณเก็บ

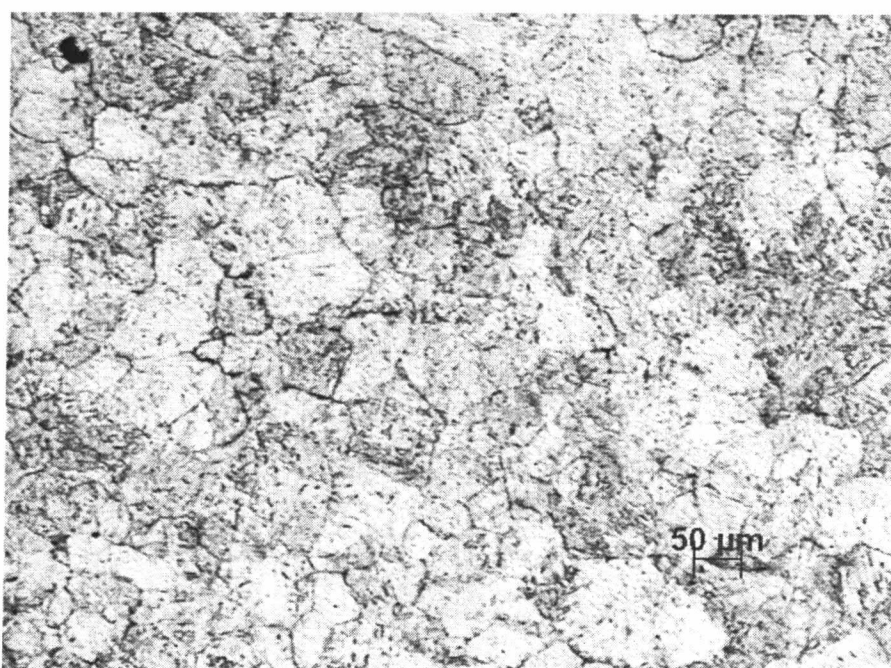
หน่วย : ไมครอน

ขนาดเกรนออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีก ที่อุณหภูมิ 1250 °C		135
ขนาดเกรนออสเทนไนท์หลังรีดหยาบที่ 1150 °C		54
ขนาดเกรนออสเทนไนท์ก่อนรีดละเอียดที่ 860 °C		58
ขนาดเกรนออสเทนไนท์หลังรีดละเอียดที่ 860 °C		*d _⊥ = 36, d _∥ = 51
ค่า S _v (mm ⁻¹)		52
ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์หลังมีวณเก็บแต่ ละอุณหภูมิ	510 °C	9.9
	550 °C	11.3
	580 °C	11.0
	610 °C	12.4
	640 °C	12.5
	670 °C	12.6

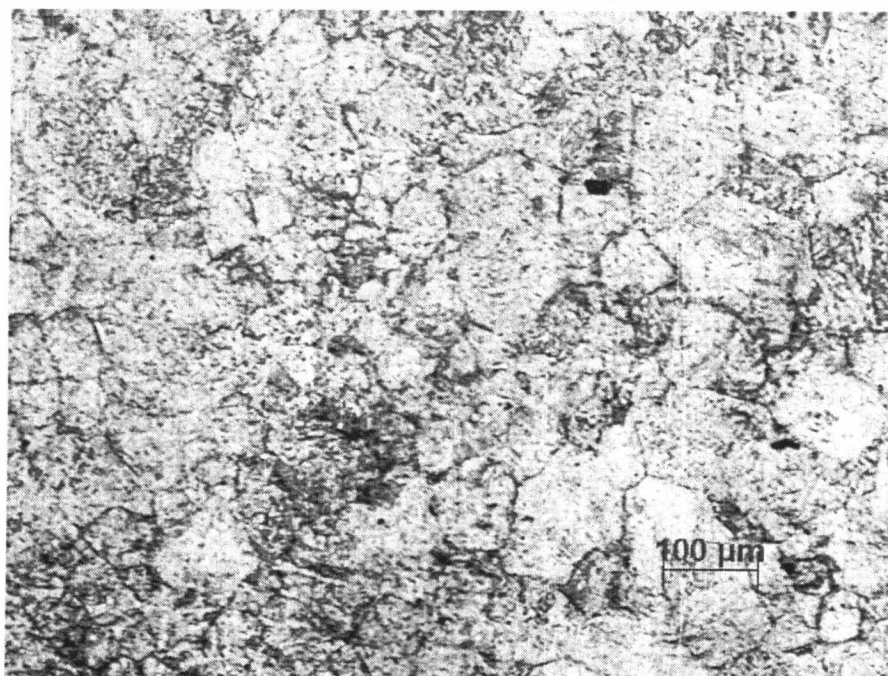
* d_⊥ ขนาดเกรนออสเทนไนท์ตามแนวตั้งฉากการรีด d_∥ ขนาดเกรนออสเทนไนท์ตามแนวขนานการรีด



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,250 °C 30 นาที



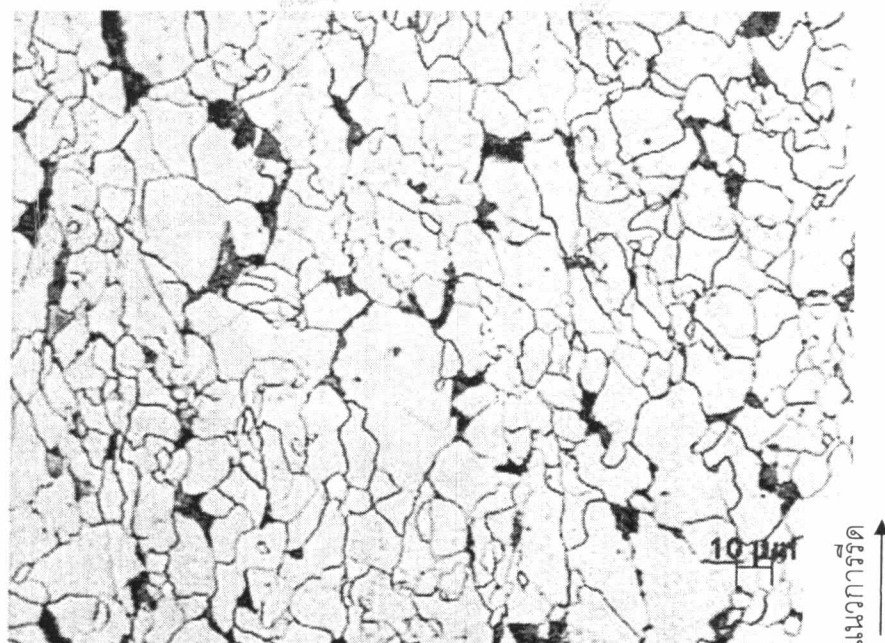
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดหยาบที่อุณหภูมิ 1,150 °C ปริมาณการรีด 42%



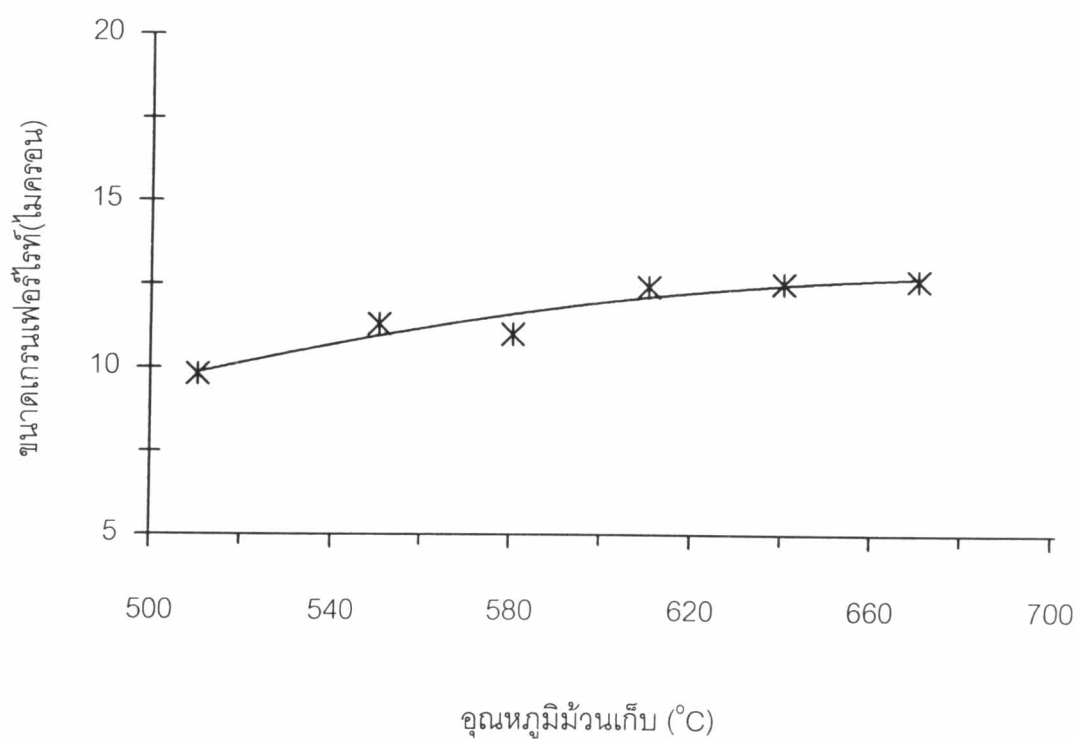
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการรีดละเอียดที่อุณหภูมิ 860 °C ปริมาณการรีด 53.3%



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดละเอียดที่อุณหภูมิ 860 °C ปริมาณการรีด 53.3%



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C (ภาพดังกล่าวเป็นโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 °C)



รูปที่ 4.6 ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C

4.1.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บ

จากตารางที่ 4.2 – 4.4 พบว่า ค่าความเค้นแรงดึง ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานชุดที่ 1 และ 2 ที่ทดสอบแรงดึงที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานชุดที่ 3 ที่ทดสอบแรงดึงจากประเทศสโลวาเกีย ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจาก

1. ผิวชิ้นงานทดสอบไม่เรียบ ซึ่งเป็นผลจากการกลิ้ง ทำให้ผิวเกิดร่องลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งที่ร่องลึกนั้นจะเป็นแหล่งรวมของความเค้น (stress concentration) ที่จะมีโอกาสขยายตัวเป็นรอยแตก ทำให้วัสดุนั้นเสียหายเร็วขึ้น และเนื่องจากชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็ก(เส้นผ่านศูนย์กลางช่วง gauge length ประมาณ 4 มิลลิเมตร) ทำให้ร่องลึกเหล่านี้มีโอกาสทำให้วัสดุเสียหายมากขึ้น ข้อสังเกตผลจากการเตรียมผิวไม่ดีที่พบในรูปที่ 4.8 คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นแรงดึงส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10 – 15% แต่มีบางชิ้นงานที่แตกต่างประมาณ 6% ซึ่งอาจเป็นเพราะผิวของชิ้นงานมีร่องลึกน้อยกว่าชิ้นงานส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งพบว่าค่าความเค้นแรงดึงจะสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นแรงดึง โดยค่าความเค้นแรงดึงมาก เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นแรงดึงก็จะมากด้วย ซึ่งสอดคล้องกับกลศาสตร์การแตกหักที่กล่าวว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงจะแสดงผลจากการมี notch มากกว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่ำ
2. เครื่องทดสอบแรงดึงอ่านค่าต่ำกว่าปกติ แม้ว่า Stress-Strain curve ที่แสดงในรูปที่ 4.9 ไม่พบว่าเครื่องทดสอบแรงดึงเกิดการขัดข้องระหว่างการทดสอบ แต่ผลการทดสอบความเค้นแรงดึงเปรียบเทียบกับสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทศไทย (ว.ว.) พบว่า เครื่องทดสอบแรงดึงของว.ว. ได้ค่าความเค้นแรงดึงของวัสดุ 380 MPa (3800 Kgf) ในขณะที่เครื่องทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ ได้ 370 MPa (3700 Kgf) ดังนั้นเครื่องของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ น่าจะมีปัญหาการอ่านค่าต่ำกว่าปกติ จากการทดสอบนี้พบว่าต่ำลงประมาณ 3 % สาเหตุที่เป็นไปได้ คือ มีการเยื้องศูนย์เกิดขึ้น การเยื้องศูนย์อาจเป็นปัญหาทั้งการเยื้องศูนย์ของหัวจับหรือปัญหาจากชิ้นงานที่เอียง ผลการเยื้องศูนย์ทำให้เกิดความเค้นเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดการแปรรูปถาวรเฉพาะที่ (localized microplastic flow) บริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดเริ่มของการเสียหายแม้ว่าแรงที่กระทำจะยังต่ำกว่าแรงที่ทำให้เกิดการเสียหายตามปกติ ผลก็คือวัสดุจะสามารถรับแรงได้น้อยลง

เนื่องจากความผิดพลาดดังกล่าวมาข้างต้น การวิเคราะห์ข้อมูลจึงใช้ข้อมูลชุดที่ 3 ที่ทำการทดสอบที่ประเทศสโลวาเกียเท่านั้น

4.1.3 ผลของอุณหภูมิมีว่นเก็บต่อสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.5 แสดงความเค้นจุดคราก, ความเค้นแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และ เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่ที่อุณหภูมิมีว่นเก็บต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจุดครากกับอุณหภูมิมีว่นเก็บแสดงในรูปที่ 4.10 ความเค้นจุดครากของชิ้นงานหลังการมีว่นเก็บมีค่าเท่ากับ 394 , 396 และ 415 MPa เมื่ออุณหภูมิมีว่นเก็บเป็น 510, 550 และ 580 °C ตามลำดับ หลังจากนั้นความเค้นจุดครากลดลงเป็น 406, 372 และ 351 MPa เมื่ออุณหภูมิมีว่นเก็บเพิ่มขึ้นเป็น 610, 640 และ 670 °C ตามลำดับ ที่อุณหภูมิมีว่นเก็บ 580 °C ซึ่งให้ค่าความเค้นจุดครากสูงสุด 415 MPa นั้น น่าจะเป็นผลจากอนุภาคตะกอนไนโอเบียมคาร์ไบด์ ซึ่งเกิดเนื่องจากยังมีไนโอเบียมคงเหลือจากการตกตะกอนก่อนการมีว่นเก็บ โดยตั้งแต่ขั้นตอนการอบให้ร้อนขึ้นอีก อนุภาคตะกอนของไนโอเบียมจะถูกสลาย ทำให้ได้ไนโอเบียมละลายอยู่ในรูปสารละลายของแข็งในออสเทนไนท์ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงซึ่งเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิในช่วงตกผลึกใหม่ประมาณ 1,200 °C ความสามารถในการละลายของไนโอเบียมในออสเทนไนท์จะลดลง ทำให้ไนโอเบียมบางส่วนตกตะกอนออกมาเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ในทรายด์หรือไนโอเบียมคาร์ไบด์ เมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงช่วงประมาณ 900 –700 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนท์เป็นเฟอร์ไรท์ จะเกิดการตกตะกอนระหว่างการเปลี่ยนเฟส (interphase precipitation) เนื่องจากในขณะที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรท์นั้น เฟอร์ไรท์ละลายคาร์บอนได้น้อยกว่าออสเทนไนท์มาก ที่ interface ของเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์จึงมีปริมาณคาร์บอนมากซึ่งส่งผลให้เกิดอนุภาคตะกอนขึ้นที่บริเวณ interface นี้ ซึ่งในกรณีที่มีไนโอเบียมก็จะเกิดการตกตะกอนของไนโอเบียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ และเมื่อมีว่นเก็บ ไนโอเบียมที่ยังคงเหลือที่อยู่ในรูปสารละลายของแข็งก็จะตกตะกอนในรูปไนโอเบียมคาร์ไบด์²⁰ ความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิมีว่นเก็บต่ำกว่า 580 °C อาจมีสาเหตุจากอุณหภูมิที่ต่ำ การเกิดและโตของนิวเคลียสเป็นไปได้ยาก อนุภาคตะกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก ซึ่งไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงจากการตกตะกอน ในขณะที่อุณหภูมิมีว่นเก็บที่สูงกว่า 580 °C ความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงอาจเป็นเพราะผลของอุณหภูมิสูงและพลังงานที่เกิดจากการขึ้นรูปทำให้อนุภาคตะกอนรวมตัวกันได้ง่าย อนุภาคตะกอนจึงมีปริมาณน้อยและมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ความเค้นจุดครากลดลง²⁹ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับอุณหภูมิมีว่นเก็บในรูปที่ 4.10 พบว่า ความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิมีว่นเก็บสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ ผลการทดลองพบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิมีว่นเก็บ 670 °C มีขนาดประมาณ 13 ไมครอน แล้วลดลงเป็นประมาณ 10 ไมครอนที่อุณหภูมิมีว่นเก็บ 510 °C ส่งผลให้ความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 30 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผล

ของ Bramfitt³⁰ ที่ได้ว่าผลของขนาดเกรนตามที่กล่าวมาจะส่งผลให้เพิ่มความเค้นจุดครากขึ้นประมาณ 25 MPa

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวค่อนข้างคงที่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิม้วนเก็บโดยมีปริมาณการยึดตัวประมาณ 34 % ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่กับอุณหภูมิม้วนเก็บในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิม้วนเก็บไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่โดยปริมาณการลดขนาดพื้นที่มีค่าประมาณ 77 %

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นจุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ ม้วนเก็บ 510 - 670 °C

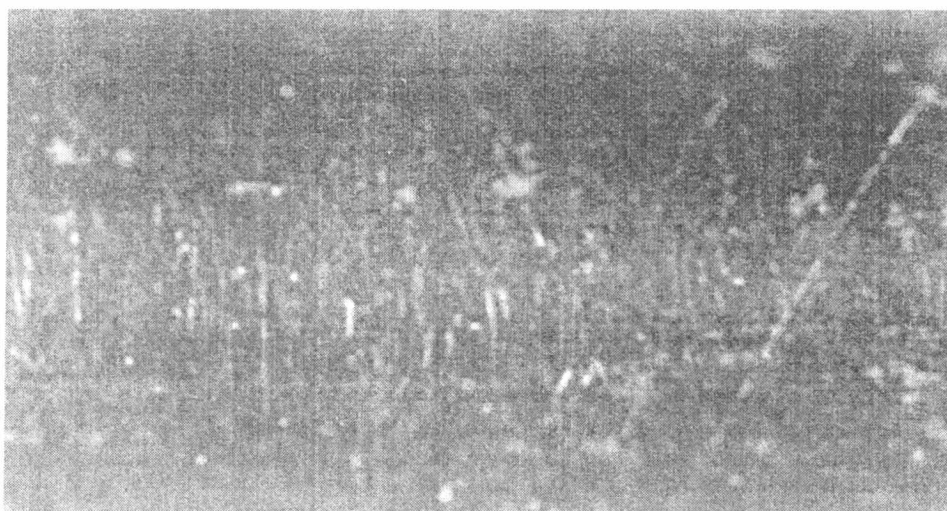
อุณหภูมิ ม้วนเก็บ(°C)	ความเค้นจุดคราก(MPa)		
	ชิ้นงานชุดที่ 1	ชิ้นงานชุดที่ 2	ชิ้นงานชุดที่ 3
510	325	325	394
550	338	328	396
580	337	-	415
610	332	320	406
640	347	321	372
670	346	331	351

ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ ม้วนเก็บ 510 - 670 °C

อุณหภูมิ ม้วนเก็บ(°C)	ความเค้นแรงดึง(MPa)		
	ชิ้นงานชุดที่ 1	ชิ้นงานชุดที่ 2	ชิ้นงานชุดที่ 3
510	443	421	486
550	436	430	504
580	417	-	472
610	418	420	484
640	442	421	470
670	439	433	467

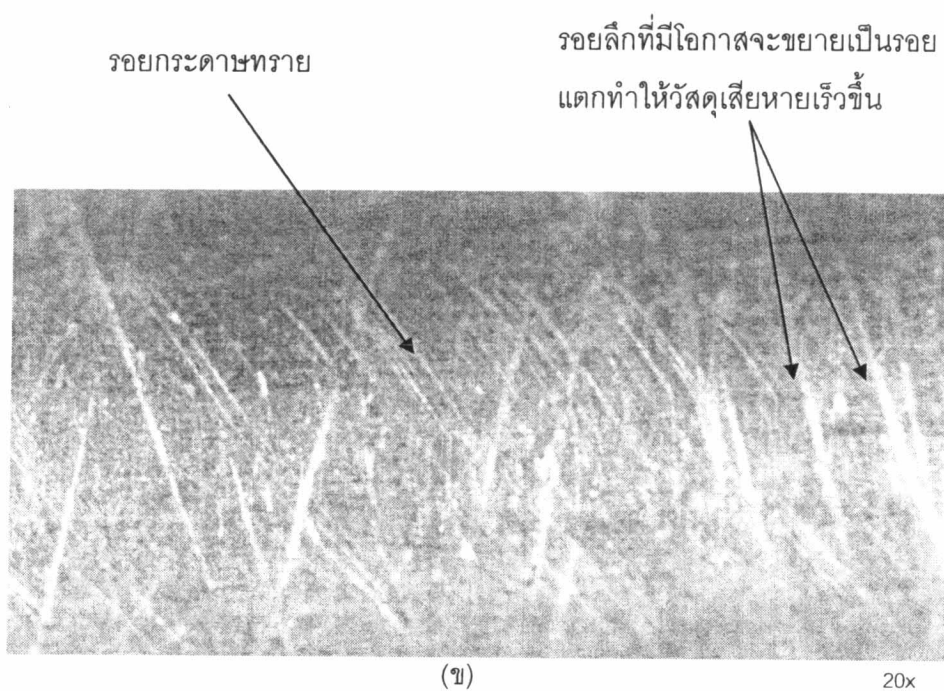
ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 - 670 °C

อุณหภูมิ ม้วนเก็บ(°C)	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว		
	ชิ้นงานชุดที่ 1	ชิ้นงานชุดที่ 2	ชิ้นงานชุดที่ 3
510	21.0	21.4	34
550	16.8	16.2	33.6
580	15.9	-	31.8
610	19.1	10.5	34.2
640	21.7	17.6	30.5
670	14.9	18.4	37.7



(ก)

20x



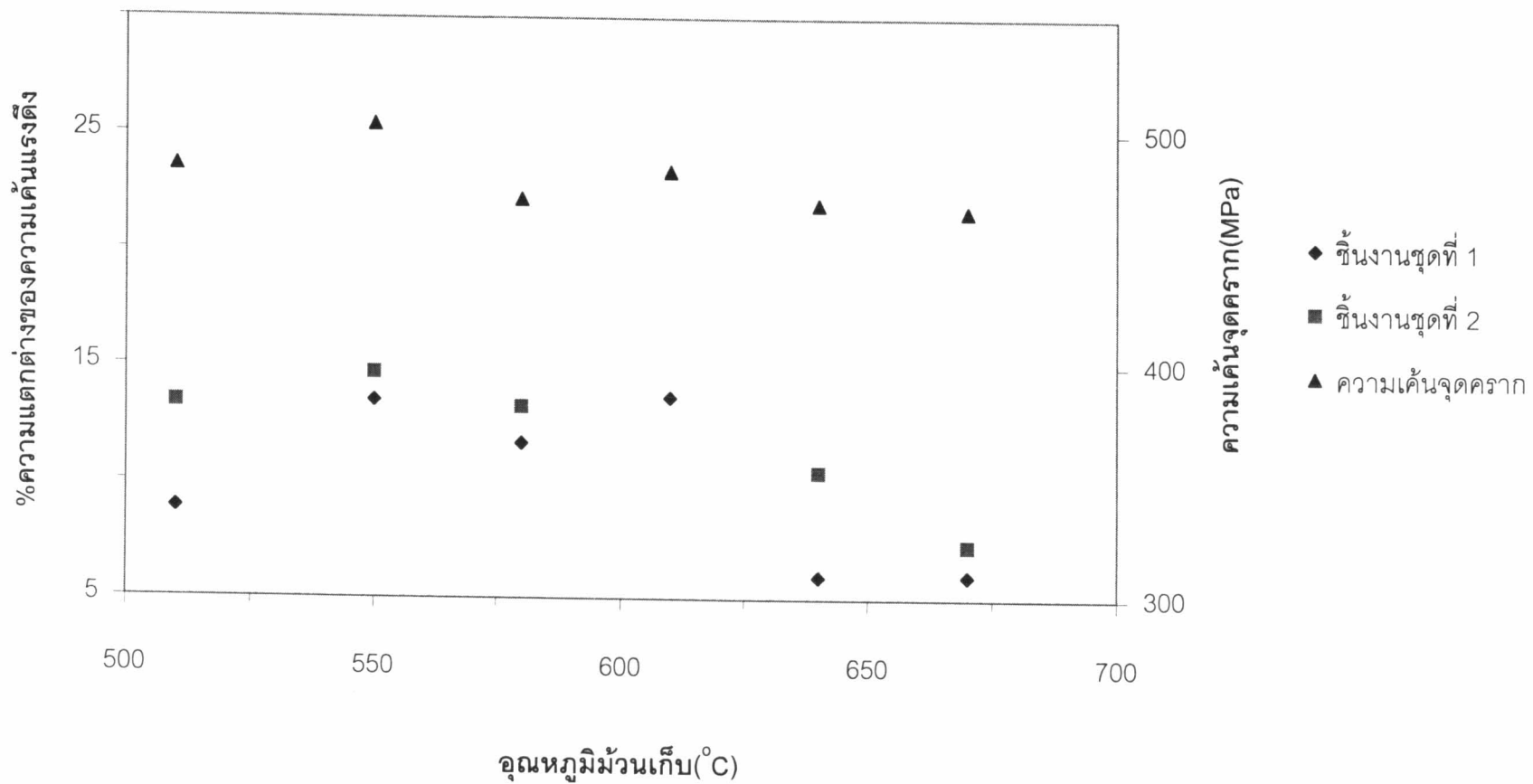
รอยกระดาษทราย

รอยลึกที่มีโอกาสจะขยายเป็นรอย
แตกทำให้วัสดุเสียหายเร็วขึ้น

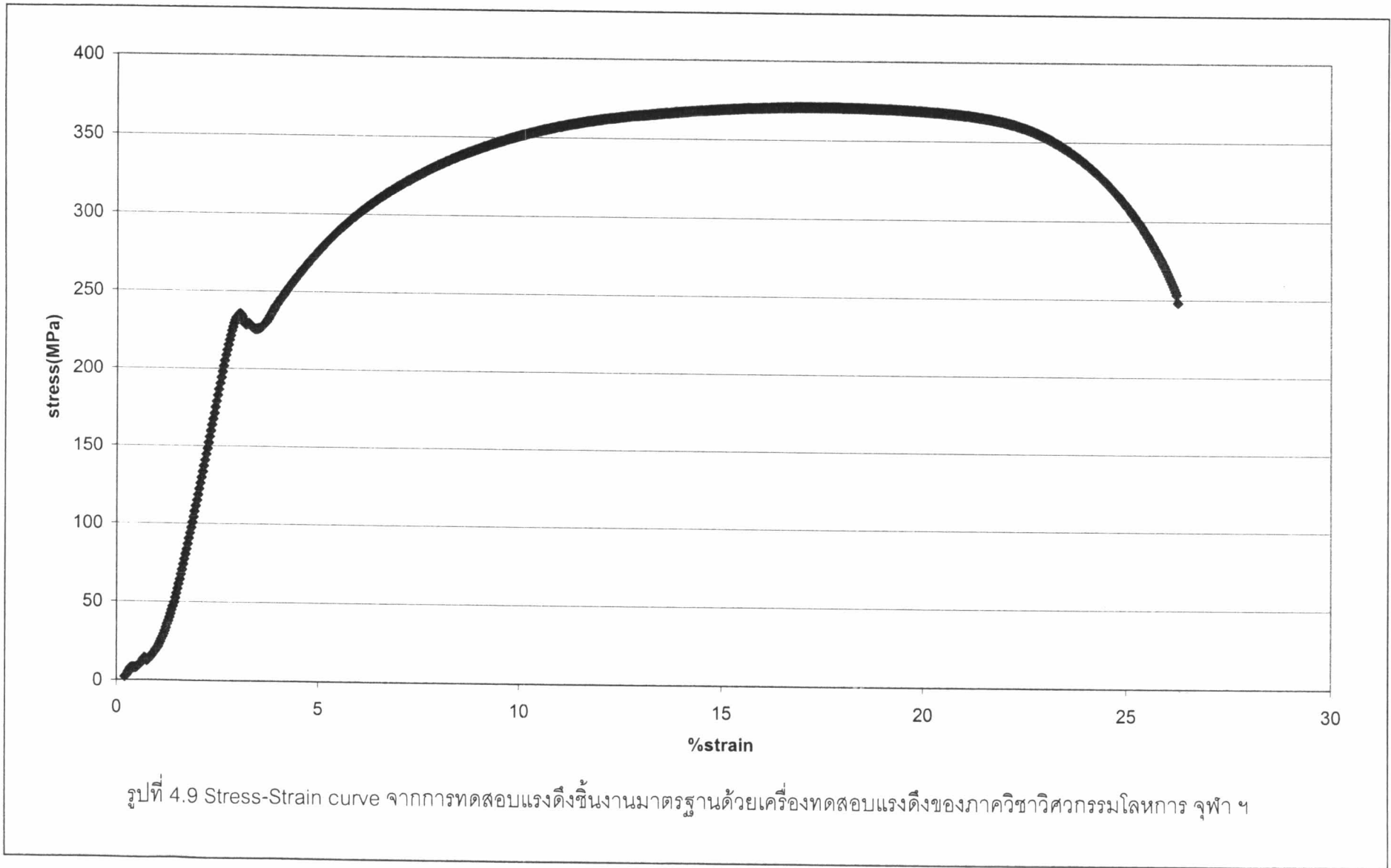
(ข)

20x

รูปที่ 4.7 ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ (ก) ชิ้นงานมีความเค้นแรงดึงน้อยกว่าที่ทดสอบได้จากประเทศโลวาเกียประมาณ 6% (ข) ชิ้นงานมีความเค้นแรงดึงน้อยกว่าที่ทดสอบได้จากประเทศโลวาเกียประมาณ 12%



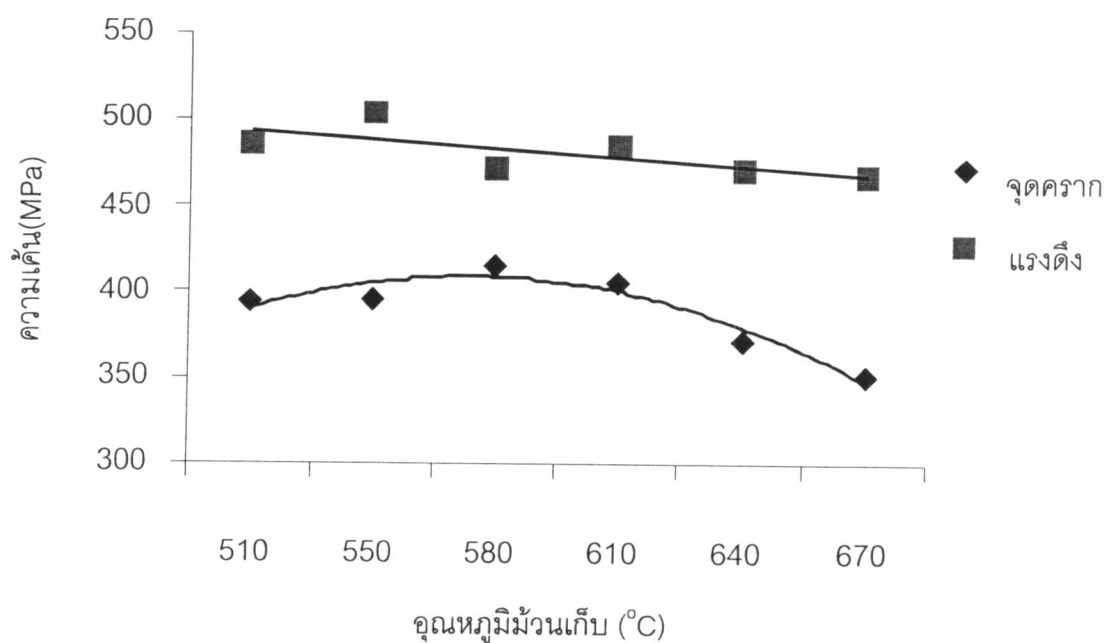
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความแตกต่างของความเค้นแรงดึงของชั้นงานที่ทดสอบแรงดึงจากภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธาฯ เมื่อเทียบกับที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจากประเทศสโลวาเกีย



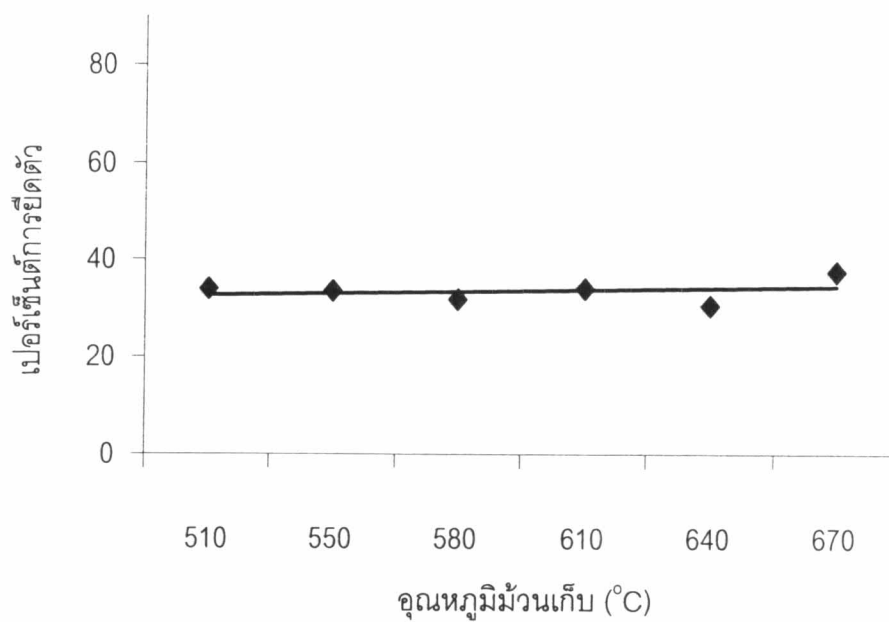
รูปที่ 4.9 Stress-Strain curve จากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C

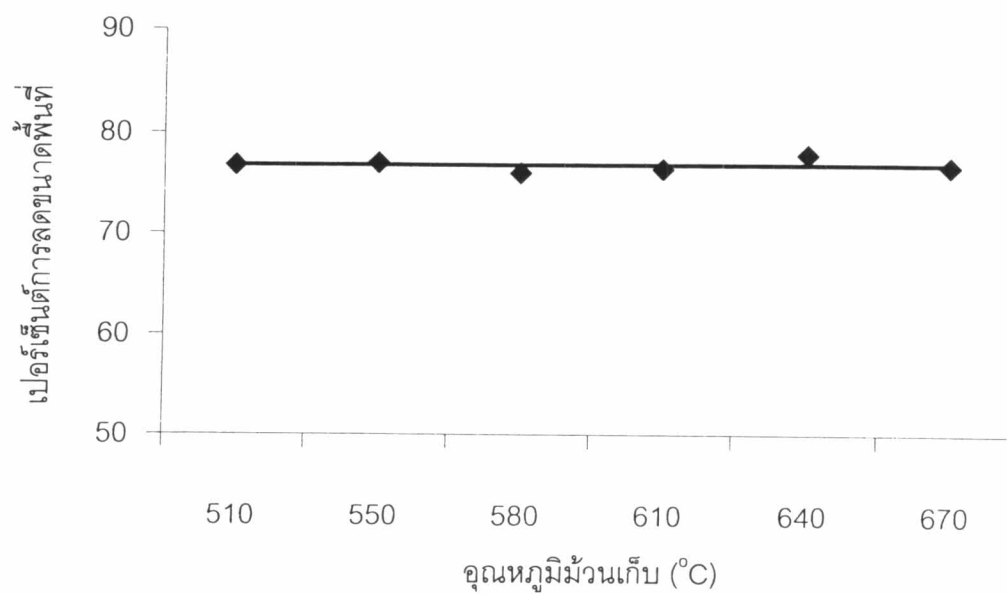
สมบัติทางกล อุณหภูมิ ม้วนเก็บ(°C)	แรงคราก (MPa)	แรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว	เปอร์เซ็นต์การลด ขนาดพื้นที่
510	394	486	34	77
550	396	504	34	77
580	415	472	32	76
610	406	484	34	76
640	372	470	31	78
670	351	467	38	77



รูปที่ 4.10 ความเค้นจุดครากและความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C



รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การยัดตัวของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 $^{\circ}\text{C}$

4.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการรีดร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล

ส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการรีดร้อนของงานโดมเดซ³¹ และงานปัจจุบันแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ความแตกต่างของงานโดมเดซกับงานปัจจุบันมี 2 ประการหลัก คือ ประการแรก งานโดมเดซมีส่วนผสมของธาตุไทเทเนียม ประการที่สองอุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกของงานโดมเดซอยู่ที่ 1,150 °C ขณะที่งานปัจจุบันอยู่ที่ 1,250 °C ทั้งสองประการส่งผลดังนี้

4.2.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการรีดร้อนต่อขนาดเกรนอสเทนไนท์และเฟอร์ไรท์

ขนาดเกรนอสเทนไนท์ของชิ้นงานที่ผ่านแต่ละขั้นตอนการรีดและขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บของงานโดมเดซและงานปัจจุบันแสดงในตารางที่ 4.8 ขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกของงานปัจจุบันประมาณ 135 ไมครอน แต่ขนาดเกรนอสเทนไนท์ของงานโดมเดซหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกเพียง 115 ไมครอน ผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ G.R. Killmore³² ซึ่งระบุว่าความแตกต่างของขนาดเกรนดังกล่าวเป็นผลจากไทเทเนียมที่ให้ผลป้องกันเกรนอย่างมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง อีกประการหนึ่งอาจเป็นผลจากอุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกของงานปัจจุบันที่สูงกว่างานเดิม จึงเป็นไปได้ที่อนุภาคตกตะกอนที่จะส่งผลยับยั้งเกรนโตสลายหมดไป⁹

ภายหลังการรีดหยาบที่อุณหภูมิ 1,150 °C งานปัจจุบันได้โครงสร้างอสเทนไนท์หลังการตกผลึกใหม่เช่นเดียวกับงานโดมเดซ แต่ขนาดเกรนอสเทนไนท์ของงานปัจจุบันที่มีขนาด 54 ไมครอนใหญ่กว่างานโดมเดซที่มีขนาดเพียง 37 ไมครอน ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการ 2-2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเริ่มต้น(ขนาดเกรนหลังอบให้ร้อนขึ้นอีก) กับ ขนาดเกรนหลังการตกผลึกใหม่ โดยขนาดเกรนเริ่มต้นมีขนาดใหญ่ จะได้เกรนหลังการตกผลึกใหม่มีขนาดใหญ่ ภายหลังการรีดละเอียดที่อุณหภูมิ 860 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่มีการตกผลึกใหม่ จึงทำให้ได้เกรนลักษณะรียาวเหมือนกันทั้งงานปัจจุบันและงานเดิม เมื่อพิจารณาค่า S_v ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งบอกพื้นที่ที่เกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรท์ พบว่างานปัจจุบันมีค่า 52 mm^{-1} น้อยกว่างานโดมเดซที่มีค่า 87 mm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kozasu³³ ที่แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังการตกผลึกใหม่กับค่า S_v โดยยิ่งขนาดเกรนอสเทนไนท์เล็ก ค่า S_v ยิ่งมาก และเนื่องจาก S_v เป็นค่าที่สัมพันธ์กับปริมาณการเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรท์ โดยค่า S_v มาก ก็จะทำให้มีโอกาสได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ละเอียดสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ โดยงานปัจจุบันที่มีค่า S_v 52 mm^{-1} ได้ขนาด

เกรนเฟอร์ไรท์หลังการม้วนเก็บของงานปัจจุบันโดยเฉลี่ย 11 ไมครอนใหญ่กว่างานโดมเดซที่มีค่า S_v 87 มม⁻¹ แล้วได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์โดยเฉลี่ย 5 ไมครอน ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิม้วนเก็บสูงขึ้น ผลดังกล่าวอาจเนื่องจากความแตกต่างของอัตราการเย็นตัวของแต่ละอุณหภูมิม้วนเก็บเพราะถ้าพิจารณาช่วงการเย็นตัวจากอุณหภูมิมืดสุดท้ายถึงอุณหภูมิม้วนเก็บด้วยเวลาเท่า ๆ กัน การเย็นตัวของอุณหภูมิม้วนเก็บที่ต่ำกว่าจะมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่า ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์จึงละเอียดกว่า

4.2.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อสมบัติเชิงกล

เมื่อพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของงานปัจจุบันและงานโดมเดซที่แสดงในตารางที่ 4.6 และผลของขนาดเกรนของงานปัจจุบันและงานโดมเดซที่แสดงในตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของทั้งงานปัจจุบันและงานโดมเดซ เป็นผลมาจากขนาดเกรนเฟอร์ไรท์และผลจากอนุภาคตะกอนที่เกิดในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ แม้ว่างานปัจจุบันจะได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ประมาณ 11 ไมครอน ในขณะที่งานโดมเดซจะได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ประมาณ 5 ไมครอน ผลความแตกต่างของขนาดเกรนส่งผลให้งานปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะได้ความแข็งแรงจุดครากน้อยกว่างานโดมเดซประมาณ 60 Mpa³⁰ แต่จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บและความเค้นจุดครากในรูปที่ 4.14 พบว่า ความแข็งแรงจุดครากของงานปัจจุบันกับงานโดมเดซไม่ต่างกันมากนัก นั้นแสดงว่างานปัจจุบันแสดงผลความแข็งแรงจากอนุภาคตะกอนมากกว่างานโดมเดซ ทำให้ชัดเจนผลความแข็งแรงที่น้อยกว่าเนื่องจากขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ จากรูปที่ 4.14 พบข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งคือ สำหรับชิ้นงานโดมเดซมีอุณหภูมิม้วนเก็บที่ได้ความเค้นจุดครากสูงที่สุดคือ 550 °C ส่วนชิ้นงานปัจจุบันจะได้ความเค้นจุดครากสูงที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิม้วนเก็บ 580 °C สาเหตุของความแตกต่างทั้งสองประการนี้น่าจะมาจากการที่ชิ้นงานทดสอบมีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน โดยชิ้นงานปัจจุบันเป็นเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมไนโอเบียมเพียงธาตุเดียว อนุภาคตะกอนจึงจะเกิดเฉพาะไนโอเบียมคาร์ไบด์หรือไนโอเบียมคาร์ไบโบไนตรายด์ แต่ชิ้นงานเดิมที่เป็นเหล็กกล้าความธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมไนโอเบียมและไทเทเนียม นอกเหนือจากไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์ไบโบไนตรายด์แล้ว ยังมีโอกาสที่จะเกิดอนุภาคตะกอนเชิงซ้อน (Ti,Nb)(C,N) และ (Nb,Ti)C เพิ่มขึ้นอีก^{34,35} เนื่องจากอนุภาคตะกอนเชิงซ้อน (Ti,Nb)(C,N) มีความเสถียรสูง ดังนั้นในขณะที่เหล็กที่ผสมไนโอเบียมและไทเทเนียมถูกอบให้ร้อนขึ้นอีก จะมี (Ti,Nb)(C,N) ที่สลายไม่หมด ซึ่งอาจทำให้นีโอเบียมที่จะละลายอยู่ในรูปสารละลายของแข็งลดลงไปประมาณ 22% นอกจากนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 °C ชิ้นงานที่มีไนโอเบียมและไทเทเนียมยังมีโอกาสเกิดอนุภาคตะกอนเชิงซ้อน (Nb,Ti)C ทำให้นีโอเบียมในรูปสารละลาย

ของแข็งลดลงไปอีก ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผสมไนโอเบียมและไทเทเนียมกับชิ้นงานที่ผสมไนโอเบียมเพียงอย่างเดียว จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิมีวณเก็บของชิ้นงานที่ผสมไนโอเบียมและไทเทเนียมจึงมีแนวโน้มที่จะมีไนโอเบียมในรูปสารละลายของแข็งน้อยกว่า ส่งผลให้ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอนน้อยกว่าและมีโอกาสที่จะเกิดอนุภาคตะกอนไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิมักมีวณเก็บต่ำกว่า

ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานโตมเตชและงานปัจจุบัน

	C	Mn	Si	P	S
งานโตมเตช	0.10	0.91	0.01	0.011	0.008
งานปัจจุบัน	0.09	1.14	0.01	0.008	0.007

	Al	Cu	Nb	Ti	V
งานโตมเตช	0.041	0.029	0.031	0.041	0.003
งานปัจจุบัน	0.053	<0.02	0.040	-	0.004

	Zr	N	Cr
งานโตมเตช	0.005	0.0076	-
งานปัจจุบัน	-	0.0070	0.006

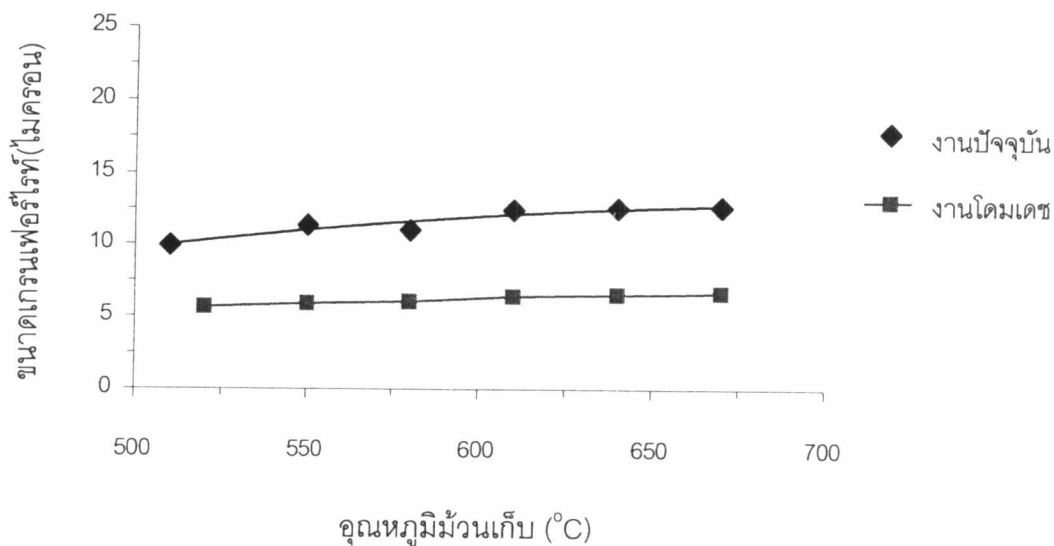
ตารางที่ 4.7 กระบวนการรีดร้อนของชิ้นงานโตมเตชและงานปัจจุบัน

	งานโตมเตช	งานปัจจุบัน
กระบวนการอบให้ร้อนขึ้นอีก	1150 °C 30 min.	1250 °C 30 min.
กระบวนการรีดหยาบ	1150 °C รีด 40%	1150 °C รีด 42%
กระบวนการรีดละเอียด	860 °C รีด 50%	860 °C รีด 53.3%
อุณหภูมิมักมีวณเก็บ (°C)	520,550,580,610, 640,670	510,550,580,610, 640,670

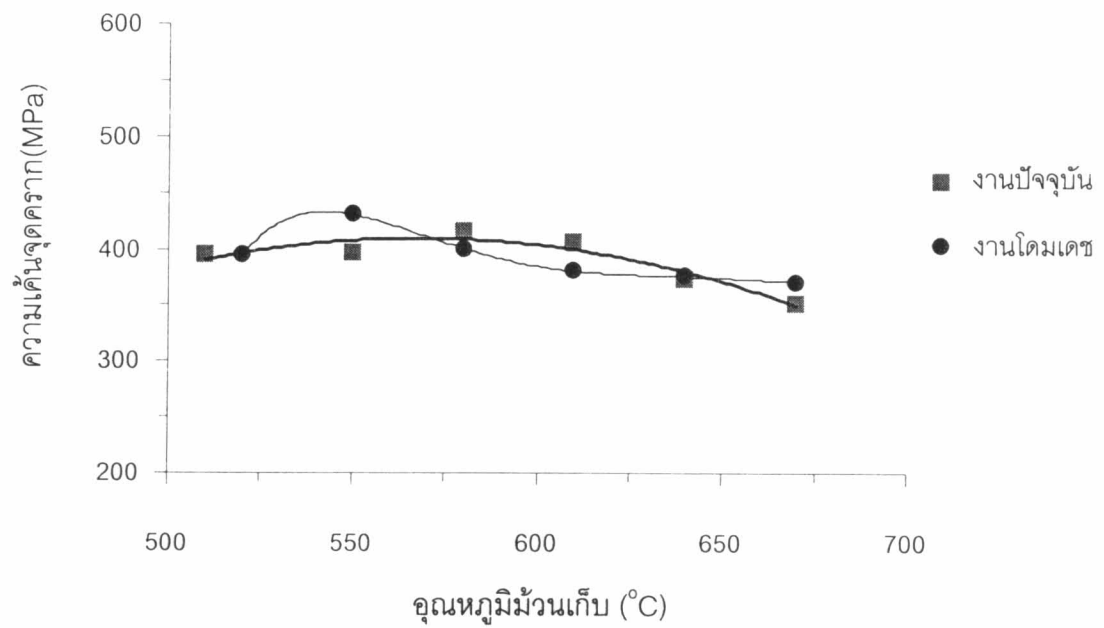
ตารางที่ 4.8 ขนาดเกรนอสเทนไนท์และขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของงานโดมเดซและงานปัจจุบัน

		งานโดมเดซ	งานปัจจุบัน
ขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีก		115	135
ขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังรีดหยาบ		37	54
ขนาดเกรนอสเทนไนท์ก่อนรีดละเอียด		-	58
ขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังรีดละเอียด		d _⊥ 20, d _∥ 50	d _⊥ 36, d _∥ 51
ค่า S _v (หน่วย มม ⁻¹)		87	52
ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์หลังม้วนเก็บแต่ละอุณหภูมิ	520 °C(510 °C)	4.5	9.9 (510 °C)
	550 °C	4.7	11.3
	580 °C	4.8	11.0
	610 °C	5.1	12.4
	640 °C	5.2	12.5
	670 °C	5.3	12.6

หน่วย ; ไมครอน



รูปที่ 4.13 ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ผ่านการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C ของงานโดมเดซและงานปัจจุบัน



รูปที่ 4.14 ความเค้นจุดครากของชิ้นงานที่ผ่านการ máximoเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C ของงานโตมเดซและงานปัจจุบัน