

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการเผาประสานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L

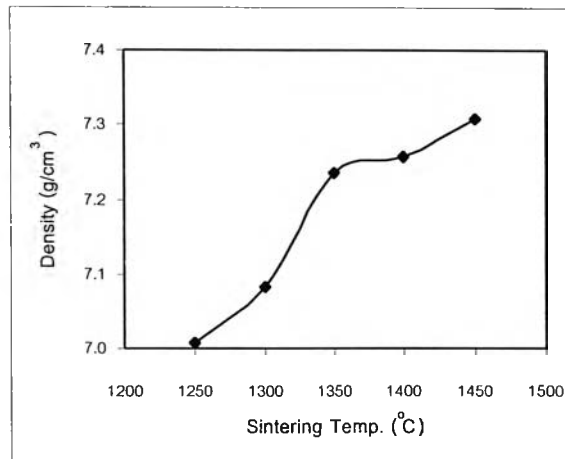
4.1.1 ผลการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาประสานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L

ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ด้วยการอัดขึ้นรูปแบบแกนเดี่ยวที่ความดัน 600 MPa จนได้ความหนาแน่นก่อนเผาประสาน 6.54 g/cm^3 และผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 1250, 1300, 1350, 1400 และ 1450°C แสดงดังตารางที่ 4.1

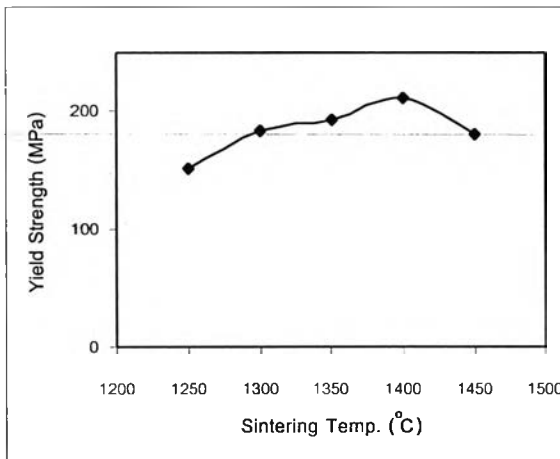
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรง ณ จุดคราก (MPa)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดตัว (%)	ความแข็ง (HRB)
1250	7.007	151.346	194.792	2.926	36.9
1300	7.082	183.892	288.717	11.005	41.4
1350	7.235	192.960	334.191	15.412	60.0
1400	7.258	210.807	349.964	15.930	62.0
1450	7.307	180.870	339.436	17.057	62.2

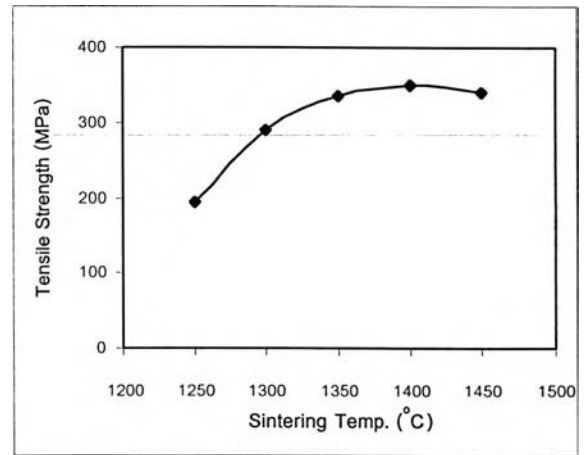
จากผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.1 นำมาพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานต่ออุณหภูมิการเผาประสานได้ดังรูปที่ 4.1 โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานแต่ละอุณหภูมิมิโครสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.2



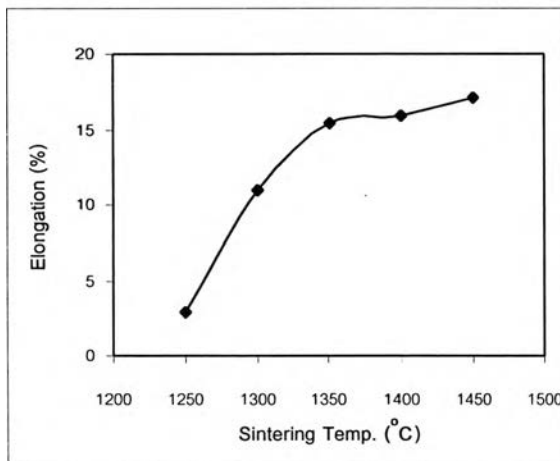
(a)



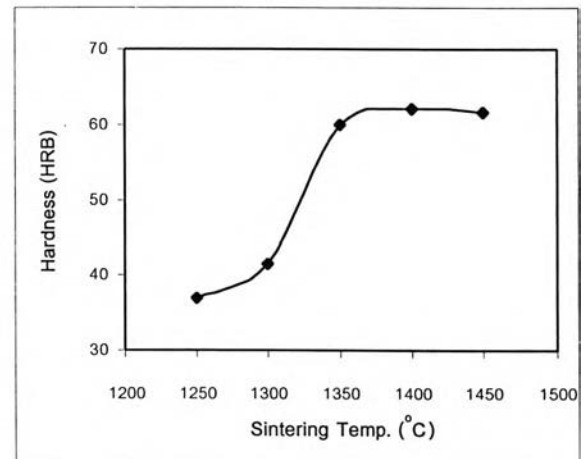
(b)



(c)

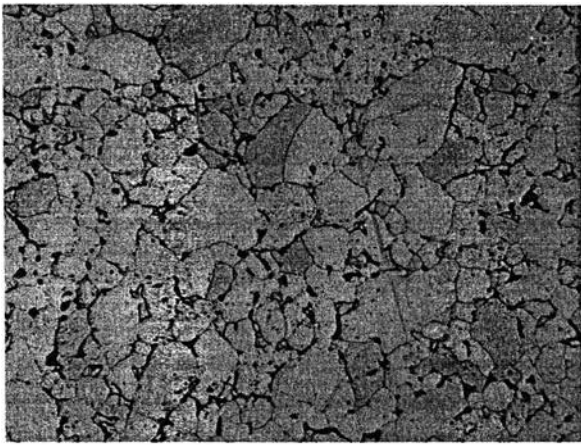


(d)

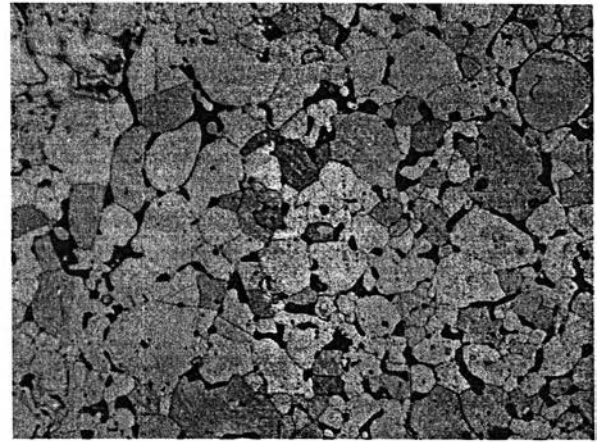


(e)

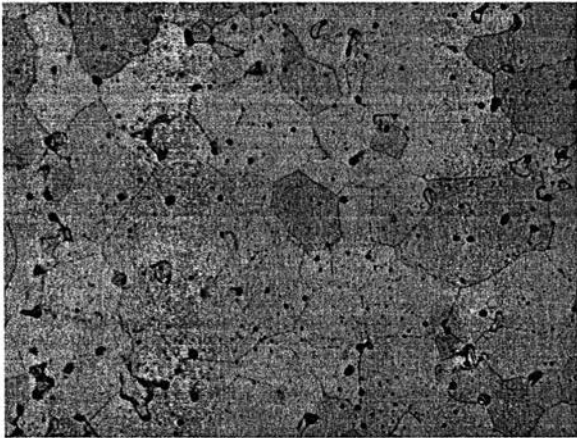
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 45 นาทีที่อุณหภูมิต่างๆ (a) ความหนาแน่น, (b) ความแข็งแรง ณ จุดคราก, (c) ความต้านทานแรงดึง, (d) การยืดตัว และ (e) ความแข็ง



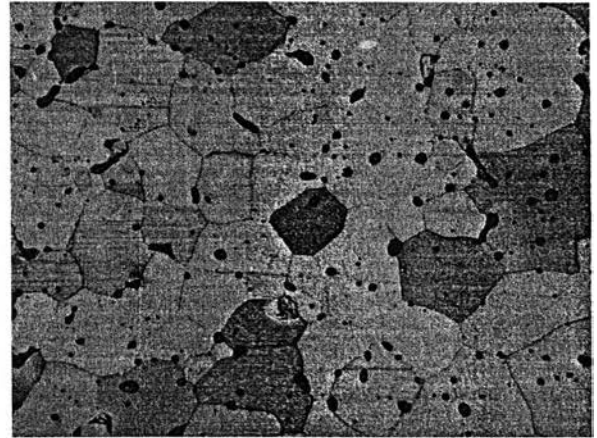
(a)



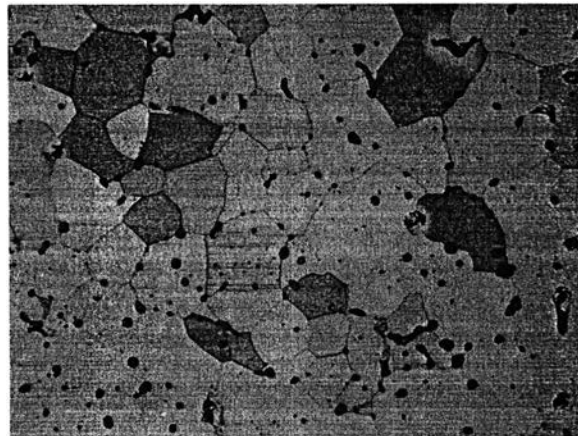
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ (a) 1250, (b) 1300, (c) 1350, (d) 1400 และ (e) 1450°C (etch, กำลังขยาย 100 เท่า)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิการเผาประสานสูงขึ้น ชีงงานมีความหนาแน่นมากขึ้นเนื่องจากขนาดและจำนวนรูพรุน (Porosity) ที่มีอยู่ภายในชีงงานลดลง ซึ่งเกิดจากการแพร่ (Diffusion) ของอะตอมและการเชื่อมต่อกัน (Necking) ระหว่างอนุภาคในระหว่างการเผาประสาน ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ส่งผลให้สมบัติทางกลต่างๆของชีงงานดีขึ้นด้วยเนื่องจากชีงงานมีพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้นและต่อเนื่องขึ้น

จากผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชีงงานพบว่า ชีงงานมีความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การยึดตัว และความแข็งสูงสุดที่อุณหภูมิการเผาประสาน 1450°C ส่วนความแข็งแรง ณ จุดครากและความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการเผาประสาน 1400°C ซึ่งเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเผาประสานที่ 1400 และ 1450°C แล้วพบว่า เป็นอุณหภูมิที่สูงเกินขีดความสามารถของเตาเผาทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม P/M ซึ่งมักจะใช้เตาแบบสายพาน (Mesh-belt furnace) หรือแบบผลัก (Pusher furnace) เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ภายในเตา เช่น ขดลวดความร้อน (Heating elements) ฉนวน (Liner) และสายพานที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 1350°C ทำให้การเผาประสานในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะทำที่ 1120-1350°C เท่านั้น

ในงานวิจัยนี้ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาประสานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่สามารถปฏิบัติได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม จึงตัดสินใจเลือกอุณหภูมิ 1350°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาประสาน เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินขีดจำกัดของเตาเผาทั่วไป และชีงงานที่ได้จากการเผาประสานที่อุณหภูมิดังกล่าวมีความหนาแน่นและสมบัติทางกลใกล้เคียงกับชีงงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1400 และ 1450°C

4.1.2 ผลการหาเวลาที่เหมาะสมในการเผาประสานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L

ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1350°C เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาทีแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานที่เวลาต่างๆ

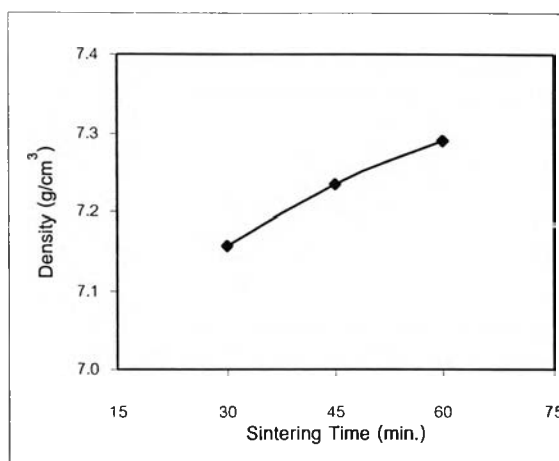
เวลา (min.)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรง ณ จุดคราก (MPa)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดตัว (%)	ความแข็ง (HRB)
30	7.156	187.150	320.444	13.775	56.3
45	7.235	192.960	334.191	15.412	60.0
60	7.290	175.585	352.845	15.706	60.7

จากผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.2 นำมาพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานต่อเวลาในการเผาประสานได้ดังรูปที่ 4.4 โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่เวลาต่างๆมีโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.5

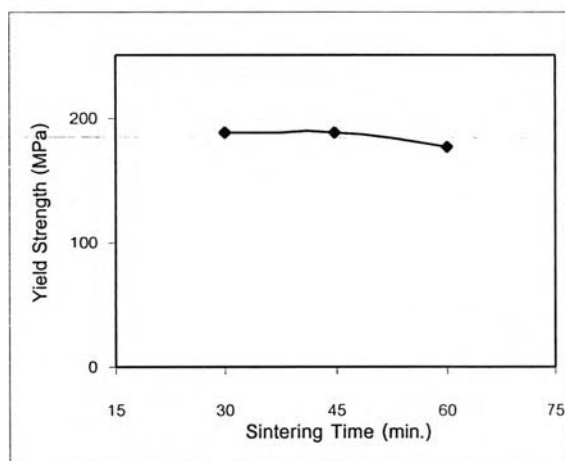
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อเวลาการเผาประสานนานขึ้น ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้นเนื่องจากมีเวลาให้การแพร่ของอะตอมและการเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น โดยความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ส่งผลให้สมบัติทางกลต่างๆของชิ้นงานดีขึ้นเนื่องจากชิ้นงานมีพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้นเช่นกัน

จากผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานจะเห็นว่า ชิ้นงานมีความหนาแน่น ความต้านทานแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืดตัวและความแข็งสูงสุดที่เวลาการเผาประสาน 60 นาที ส่วนความแข็งแรง ณ จุดครากมีค่าสูงสุดที่เวลาการเผาประสาน 45 นาที แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทั้งหมดของเวลาการเผาประสานที่ 45 และ 60 นาทีพบว่า ค่าต่างๆที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก

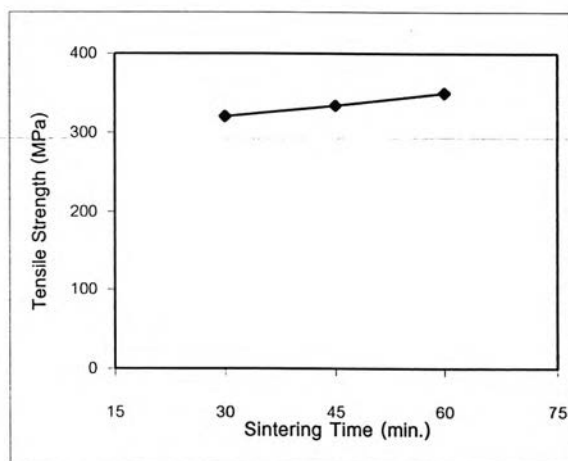
ในทางปฏิบัติ การขึ้นเตอริงด้วยเวลาอันสั้นจะได้เปรียบในแง่ของเวลาและค่าใช้จ่าย (ค่าไฟ, ค่าก๊าซ) ในการผลิต ทำให้สามารถแข่งขันได้ดีกว่า ในงานวิจัยนี้จึงตัดสินใจเลือกเวลา 45 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการเผาประสาน เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานเป็นเวลา 60 นาที



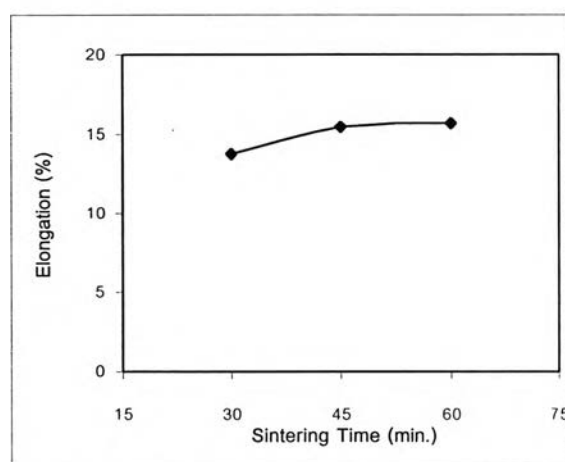
(a)



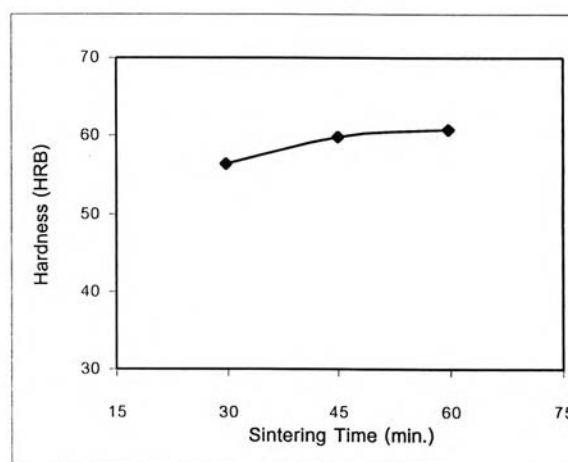
(b)



(c)

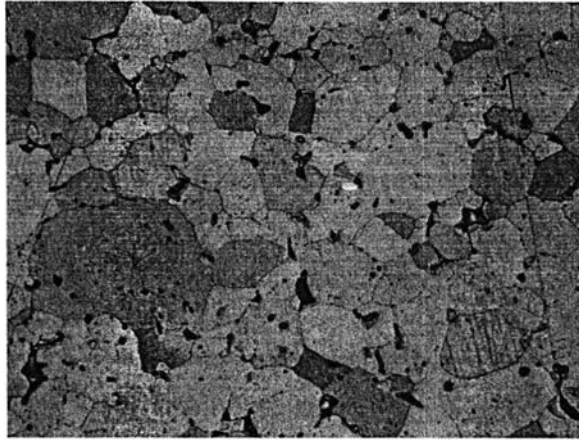


(d)

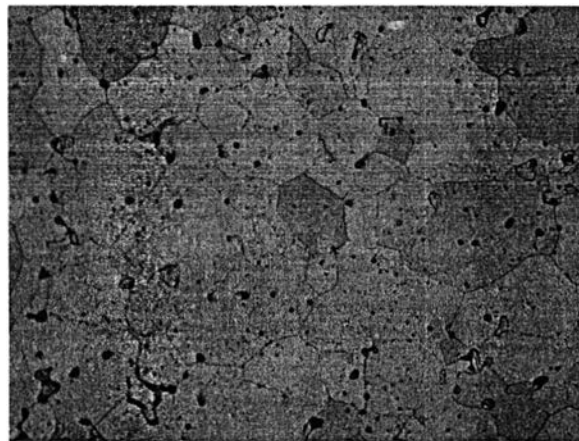


(e)

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1350°C ที่เวลาต่างๆ (a) ความหนาแน่น, (b) ความแข็งแรง ณ จุดคราก, (c) ความต้านทานแรงดึง, (d) การยืดตัว และ (e) ความแข็ง



(a)



(b)



(c)

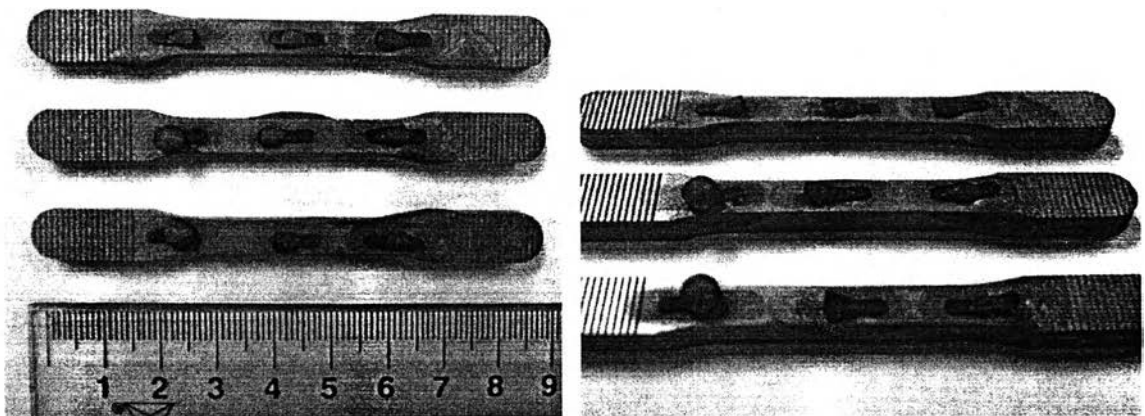
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1350°C เป็นเวลา (a) 30, (b) 45 และ (c) 60 นาที (etch, กำลังขยาย 100 เท่า)

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาประสานชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L คือ การเผาประสานที่อุณหภูมิ 1350°C เป็นเวลา 45 นาทีภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน

4.2 ผลการแทรกซึมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ด้วยทองแดง

4.2.1 ผลการแทรกซึมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมแบบ 2 ขั้นตอน

จากการแทรกซึมแบบ 2 ขั้นตอน คือ เผาประสานก่อนแล้วตามด้วยการแทรกซึมที่หลัง โดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่มีความหนาแน่นก่อนการเผาประสาน (Green density) 6.2 g/cm^3 (ต่ำกว่าชิ้นงานปกติที่มีความหนาแน่นก่อนการเผาประสานอยู่ที่ 6.54 g/cm^3) และชิ้นงานทองแดงที่ได้จากการอัดขึ้นรูปผงทองแดง (Infiltrating grade) จำนวน 3 ชิ้น ชิ้นละ 2 w/o มีลักษณะภายนอกแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยโครงสร้างจุลภาคบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างทองแดงกับผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงดังรูปที่ 4.6



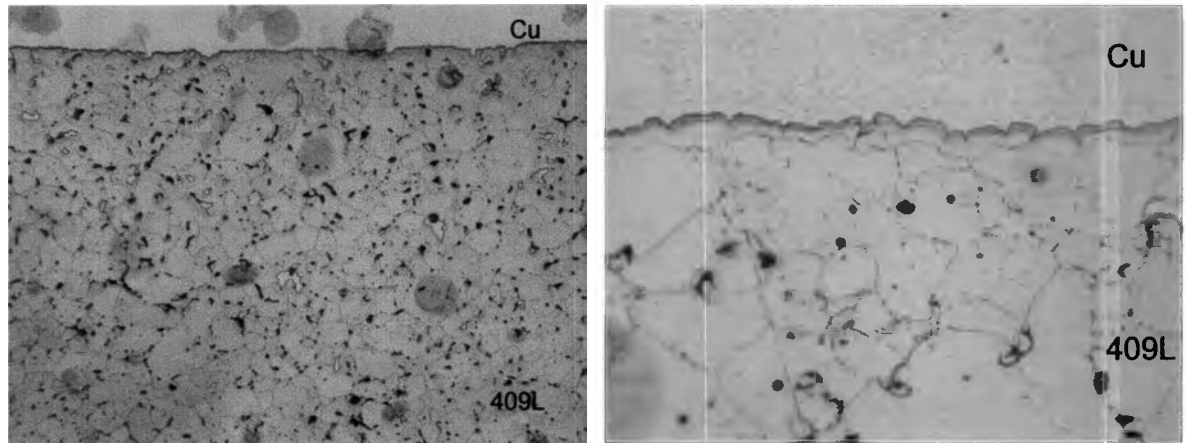
(a)

(b)

รูปที่ 4.5 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมแบบ 2 ขั้นตอนด้วยทองแดง ปริมาณ 6% (a) ด้านบน (b) ด้านข้าง

จากรูปจะเห็นว่า ทองแดงยังคงกองอยู่บนผิวด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างทองแดงและชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ในรูปที่ 4.6 (a) จะเห็นว่า ทองแดงแทรกซึมลงไปเนื้อชิ้นงานได้น้อยมาก และเมื่อพิจารณาที่รูป 4.6 (b) จะเห็นชัดเจนว่า รูพรุนที่ผิวหน้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะปิด (Closed

pores) ทำให้ทองแดงไม่สามารถไหลแทรกซึมลงสู่ภายในชิ้นงานได้โดยสะดวก การแทรกซึมที่สมบูรณ์จึงไม่เกิดขึ้น



(a)

(b)

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณจุดสัมผัสระหว่างทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L จากชิ้นงานในรูปที่ 4.5 (a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 200 เท่า

การแก้ปัญหาเรื่องรูพรุนในชิ้นงานก่อนการแทรกซึมอาจทำได้โดยเผาประสานครั้งแรกด้วยอุณหภูมิและเวลาที่ต่ำกว่าปกติที่ใช้ทั่วไป หรือใช้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นก่อนการเผาประสาน (Green density) ต่ำกว่าปกติ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การควบคุมลักษณะของรูพรุนให้เป็นแบบเปิด (Opened pores) และมีความต่อเนื่องภายในชิ้นงานเป็นไปได้ยาก จึงได้ชะลอการศึกษการแทรกซึมแบบ 2 ขั้นตอนไว้ ณ ที่นี้ และทำการศึกษการแทรกซึมแบบขั้นตอนเดียวต่อไป

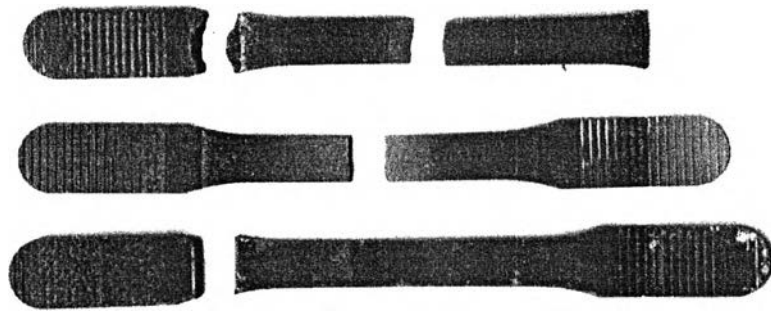
4.2.2 ผลการแทรกซึมแบบขั้นตอนเดียว

ในการแทรกซึมแบบขั้นตอนเดียว คือ เผาประสานพร้อมกับการแทรกซึม ได้ใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่มีความหนาแน่นก่อนการเผาประสาน (Green density) 6.54 g/cm^3 และตัวแทรกซึมปริมาณ 2, 4, 6 และ 8w/o

จากการเตรียมทองแดงที่จะใช้เป็นตัวแทรกซึมทั้ง 3 ลักษณะ พบความแตกต่างและข้อจำกัดดังนี้คือ

1) ตัวแทรกซึมที่เตรียมจากผงทองแดงแบบไม่ผสมตัวประสาน โดยอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่ามีความแข็งแรง

1) ตัวแทรกซึมที่เตรียมจากผงทองแดงแบบไม่ผสมตัวประสาน โดยอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่ามีความแข็งแรง (Green strength) ที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้เปราะและแตกหักได้ง่ายหากใช้ผงทองแดงปริมาณไม่มากนัก (น้อยกว่า 2 กรัม) ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะการแตกของตัวแทรกซึมที่เตรียมจากผงทองแดงไม่ผสมตัวประสาน

ในระหว่างการแทรกซึม ชิ้นงานทองแดงที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้หากไม่แตกหักเสียก่อนจะมีการกระจายตัวบนผิวหน้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ได้สม่ำเสมอว่าตัวแทรกซึมที่เตรียมจากวิธีอื่นๆ เนื่องจากสามารถกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการได้ทั้งหมด และไม่มีผลจากความไม่สม่ำเสมอในการผสมกับตัวประสานเข้ามาเกี่ยวข้อง

วิธีนี้เหมาะกับการเตรียมชิ้นงานทองแดงปริมาณตั้งแต่ 10 w/o ขึ้นไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม (22 กรัม)

2) ตัวแทรกซึมที่เตรียมจากผงทองแดงผสม H-WACHS 25% โดยอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงมากกว่าการเตรียมแบบแรก สามารถเคลื่อนย้ายได้โดยไม่เกิดการแตกหัก แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่ปริมาณของผงผสม (ผงทองแดง+H-WACHS) ที่จะต้องมีปริมาตรไม่มากเกินไปกว่าปริมาตรของช่องว่างภายในแม่พิมพ์ (Die cavity) ที่ใช้ขึ้นรูป หากมีปริมาตรมากเกินไปไม่สามารถบรรจุผงผสมทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ได้แล้ว ก็จะไม่สามารถอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากผงผสมนั้นได้ เนื่องจากผงจะล้นออกมาในระหว่างการอัดขึ้นรูป และเมื่อต้องการทำการแทรกซึมโดยใช้ผงทองแดงปริมาณน้อยๆ (น้อยกว่า 1 กรัม) ถึงแม้จะผสมตัวประสานมากเท่าใดก็ตาม ก็ไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นกันเนื่องจากการที่มีผงโลหะน้อยแต่มีตัวประสานมาก ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ จึงเกิดการแตกหักหรือติดค้างอยู่กับแม่พิมพ์หรือตัวกด (Punch) ได้

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือ ชีงงานทองแดงที่เตรียมด้วยวิธีนี้จะต้องผ่านการกำจัดตัวประสานที่นานกว่าปกติ เนื่องจากมีตัวประสานผสมอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องแน่ใจว่าตัวประสานได้ถูกกำจัดออกไปจนหมดก่อนที่จะเกิดการแทรกซึมและการเผาประสาน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการตกค้างของคาร์บอนในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

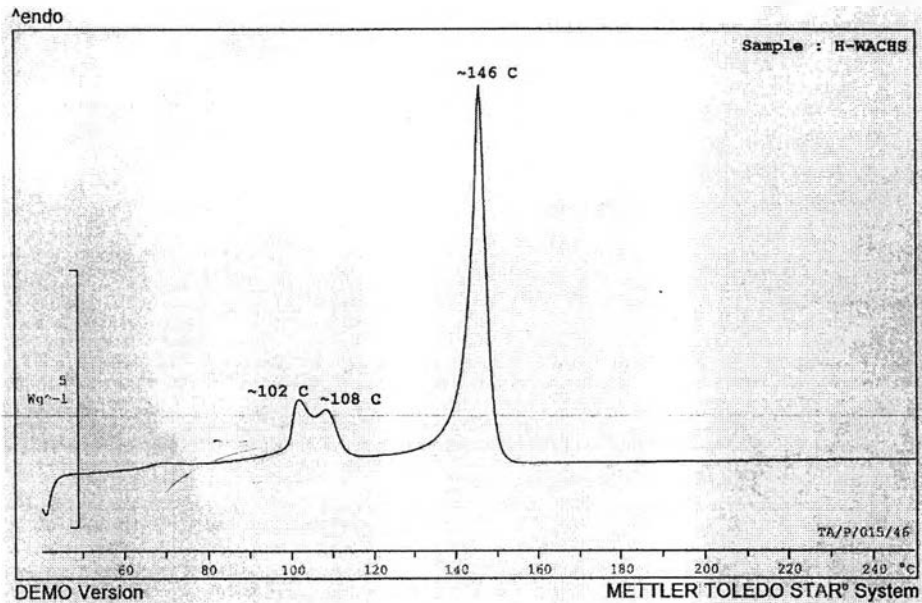
วิธีนี้สามารถเตรียมชีงงานทองแดงปริมาณ 4w/o - 8 w/o เมื่อเทียบกับน้ำหนักของชีงงานเหล็กกล้าไร้สนิม (22 กรัม) ได้ โดยอาจปรับลดปริมาณตัวประสานได้เพื่อให้ผสม (ผงทองแดง + ตัวประสาน) มีปริมาณที่เหมาะสม

3) ตัวแทรกซึมที่เตรียมจากแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการรีดจนมีความหนา 0.2 มิลลิเมตร โดยตัดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกับพื้นที่หน้าตัดของชีงงานเหล็กกล้าไร้สนิมมากที่สุด การเตรียมด้วยวิธีนี้ แผ่นทองแดงที่ตัดได้อาจมีพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากับพื้นที่ที่ต้องการทำการแทรกซึม เนื่องจากความหนาของแผ่นทองแดงเป็นตัวบังคับขนาดความกว้างและความยาวของตัวแทรกซึม เพื่อให้น้ำหนัก (ปริมาณ) ของทองแดงตรงกับที่กำหนด ทำให้การกระจายตัวของทองแดงบนชีงงานเหล็กกล้าไร้สนิมอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นได้ โดยเฉพาะถ้าทองแดงที่ต้องการใช้มีปริมาณน้อย (น้อยกว่า 1 กรัม)

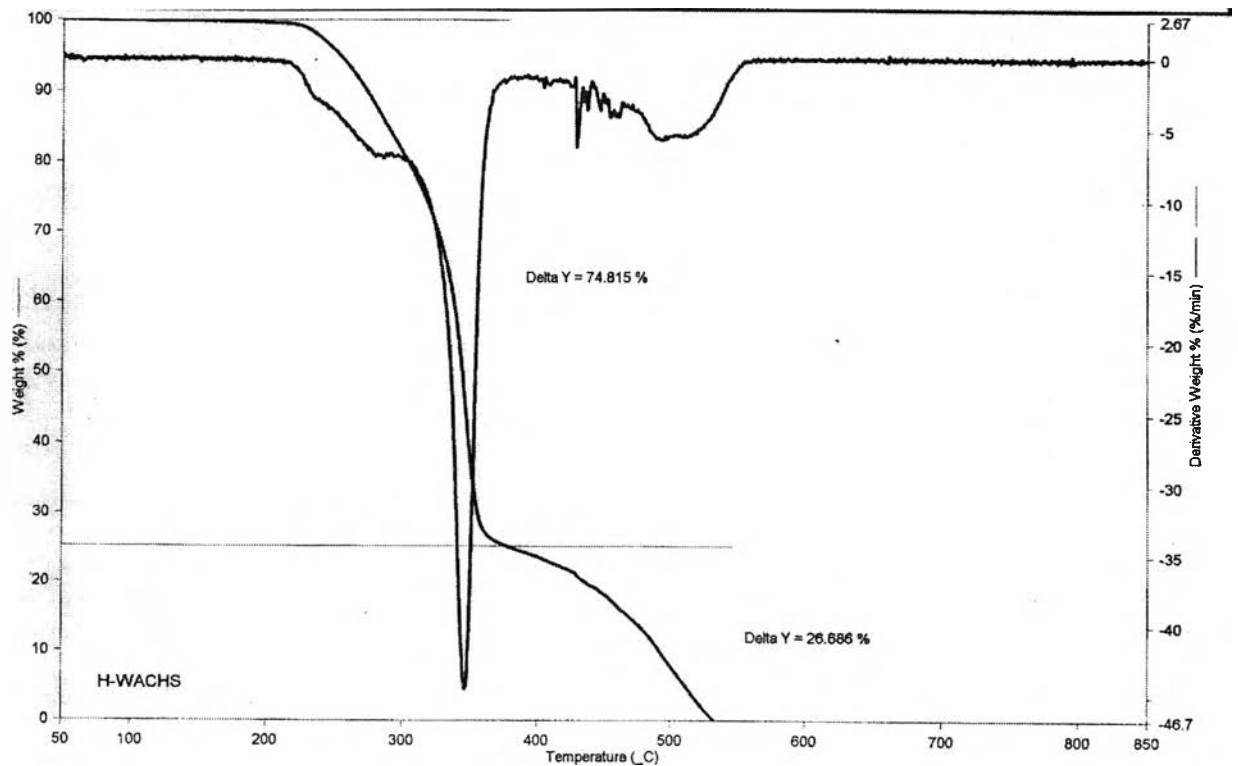
ข้อเสียของการใช้ตัวแทรกซึมจากแผ่นทองแดงบริสุทธิ์คือ การเกิดการกัดเซาะ (Erosion) ที่ผิวหน้าของชีงงาน เนื่องจากเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมบางส่วนได้ถูกละลายเข้าไปในทองแดงในขณะที่ทองแดงหลอมเหลวไหลแทรกซึมเข้าสู่ชีงงาน^[2] ดังจะเห็นได้จากรูขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของชีงงานหลังการแทรกซึม การแก้ปัญหามารถทำได้โดยใช้แผ่นทองแดงที่มีการผสมเหล็กเล็กน้อย เพื่อให้ทองแดงหลอมเหลวอิ่มตัว (Saturated) ไปด้วยเหล็กและไม่เกิดการละลายของเหล็กในทองแดง ดังจะเห็นได้จากผงทองแดงที่ใช้สำหรับการแทรกซึมโดยเฉพาะ (Infiltration grade) เช่นที่ใช้ในการทดลองนี้นั้น ได้มีการเติมเหล็กปริมาณ 3.5% เข้าไปเพื่อช่วยป้องกันการกัดเซาะที่จะเกิดขึ้น

วิธีนี้สามารถเตรียมแผ่นทองแดงได้ตั้งแต่ปริมาณ 2w/o ขึ้นไปเทียบกับน้ำหนักของชีงงานเหล็กกล้าไร้สนิม (22 กรัม) โดยอาจใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการปริมาณทองแดงมากขึ้น

ผลการหาจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการสลายตัวของ H-WACHS ด้วยชุดอุปกรณ์ DTA และ DSC แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากกราฟจะเห็นว่า H-WACHS มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 146°C และจะสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ 540°C ซึ่งข้อมูลนี้จะนำมาใช้ประโยชน์ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดตัวประสานในกรณีที่ใช้ตัวแทรกซึมแบบที่สอง (แบบผงทองแดงผสม H-WACHS 25%) ต่อไป

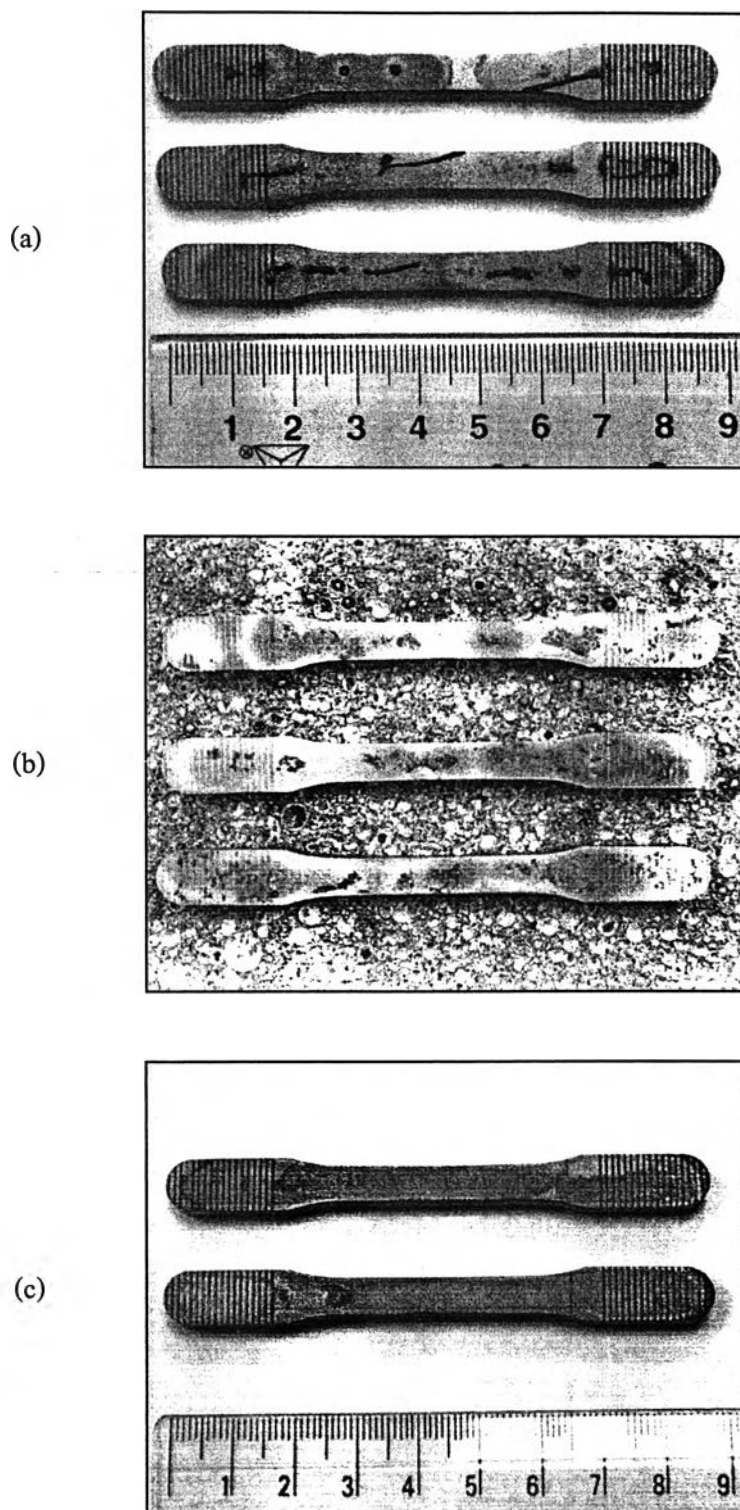


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของ H-WACHS



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของ H-WACHS

ลักษณะภายนอกของชิ้นงานที่ผ่านการแทรกซึมแบบชั้นตอนเดียวจากตัวแทรกซึมทั้ง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 4.10



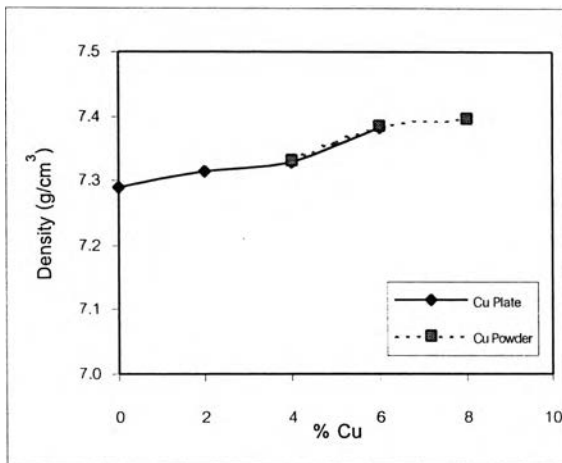
รูปที่ 4.10 ชิ้นงานที่ผ่านการแทรกซึมแบบชั้นตอนเดียวจากตัวแทรกซึมทั้ง 3 แบบ
 (a) ใช้ผงทองแดงอย่างเดียว (Cu 10%), (b) ใช้ผงทองแดงผสม H-WACHS (Cu 4%, 6%, 8%)
 และ (c) ใช้แผ่นทองแดง (Cu 2%)

ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดงแบบต่างๆปริมาณ 2, 4, 6, และ 8 w/o ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1350°C เป็นเวลา 45 นาทีแสดงดังตารางที่ 4.3

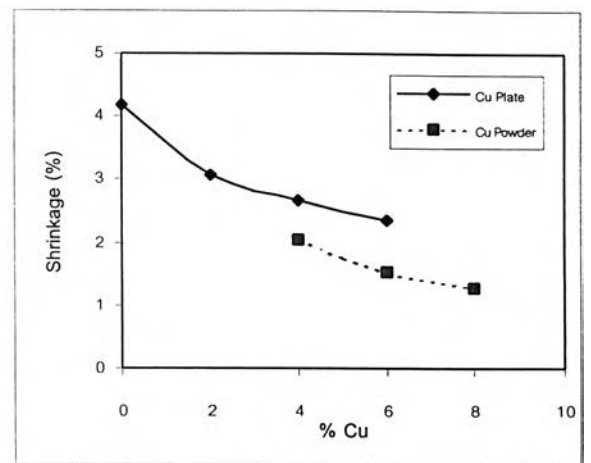
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดงปริมาณต่างๆ

ชนิดของ ตัวแทรกซึม	ทองแดง (%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความเค้นคราก (MPa)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดตัว (%)	ความแข็ง (HRB)
แผ่นทองแดง	0%	7.288	221.240	367.196	15.776	60.0
	2%	7.315	339.706	449.484	5.043	84.4
	4%	7.328	368.148	480.279	2.609	85.0
	6%	7.381	477.133	530.193	1.977	87.3
ผงทองแดง + H-Wachs 25%	4%	7.332	345.241	476.485	2.289	93.9
	6%	7.385	415.965	514.073	1.840	94.5
	8%	7.396	506.155	541.847	1.372	95.0
ผงทองแดง	10%	7.577	535.881	614.722	1.271	93.1
	12%	7.556	549.947	662.487	1.219	95.8
	15%	7.569	650.575	737.364	0.571	98.5
	20%	7.693	-	743.807	0.149	97.1

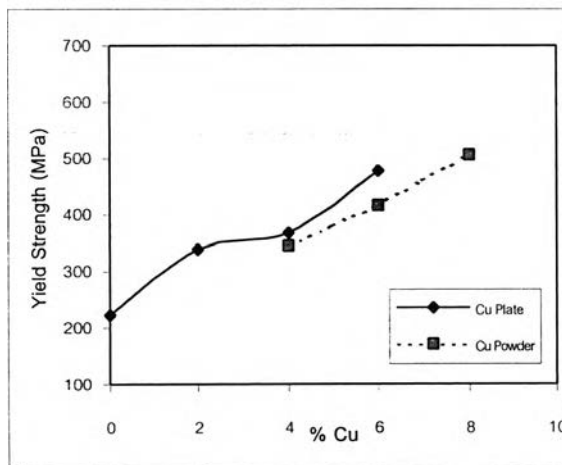
จากผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.3 นำมาพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงาน ต่อปริมาณทองแดงที่ใช้ในการแทรกซึมได้ดังรูปที่ 4.11 โดยพิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดงปริมาณ 2-8% โดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดงแสดงดังรูปที่ 4.12



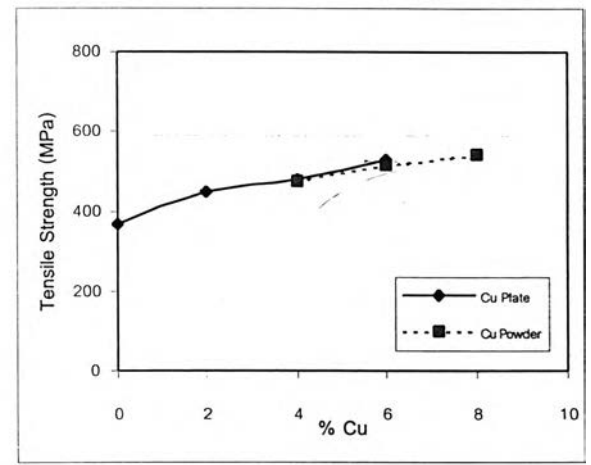
(a)



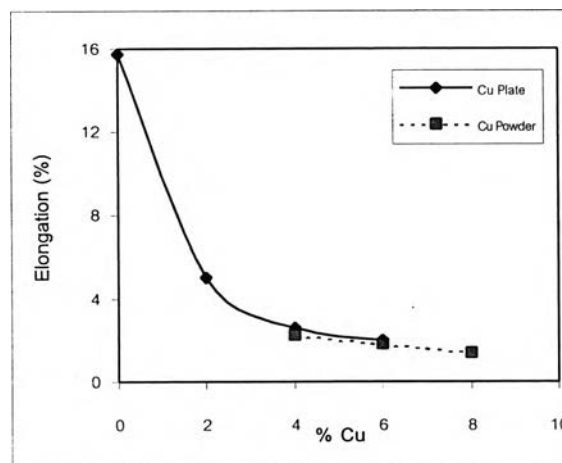
(b)



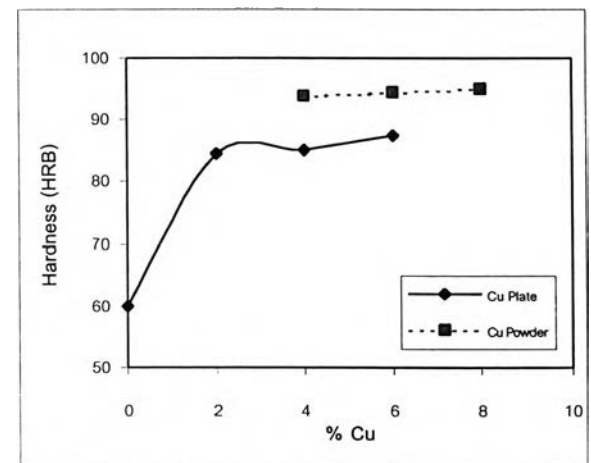
(c)



(d)

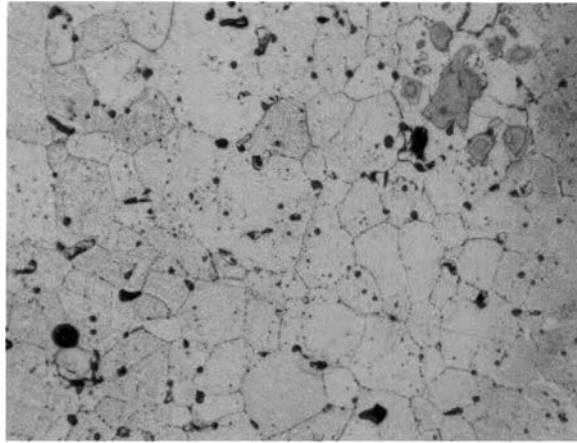


(e)

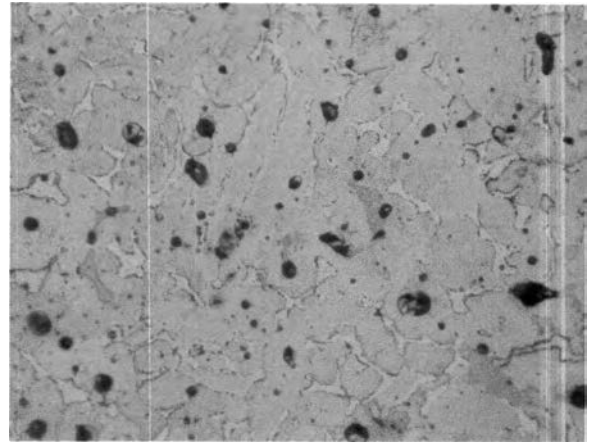


(f)

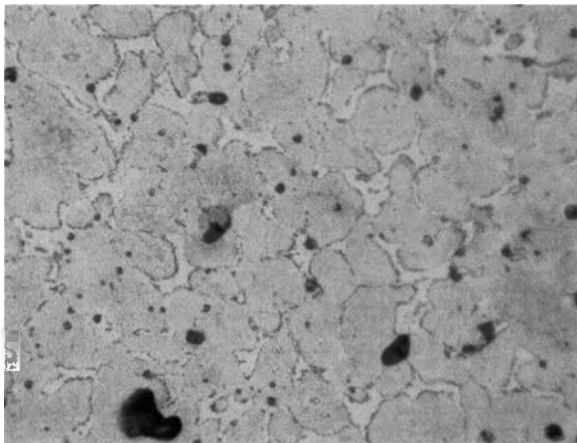
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดง 2 แบบที่ปริมาณต่างๆ (a) ความหนาแน่น, (b) การหดตัว, (c) ความแข็งแรง ณ จุดคราก, (d) ความต้านทานแรงดึง, (e) การยืดตัว และ (f) ความแข็ง



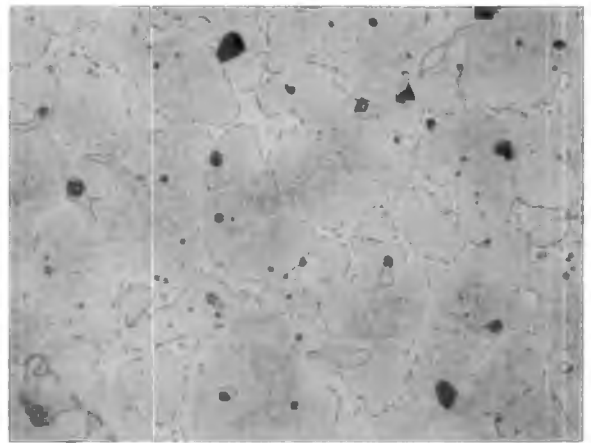
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดงปริมาณ
(a) 2%, (b) 4%, (c) 6% และ (d) 8% (กำลังขยาย 200 เท่า)

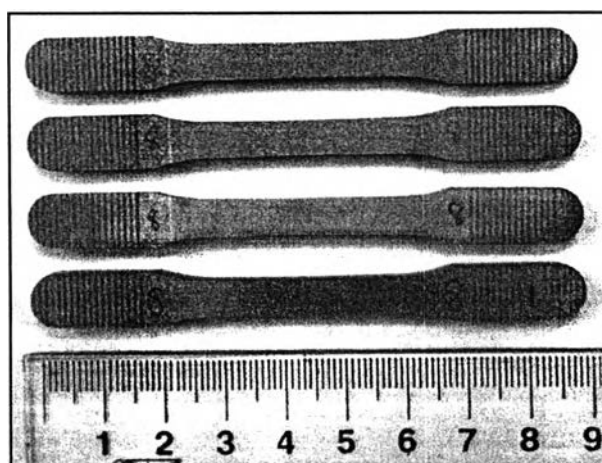
ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมด้วยทองแดง โดยทดสอบในกรดไนตริก 40 v/o ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการแทรกซึมด้วย
ทองแดงแบบผงทองแดงผสม H-WACHS และแบบแผ่น

ทองแดง (%)	แบบใช้ผงทองแดง + H-WACHS			แบบแผ่นทองแดง		
	E (I=0) (mV)	I _{corr} (μA)	อัตราการกัดกร่อน (mmpy)	E (I=0) (mV)	I _{corr} (μA)	อัตราการกัดกร่อน (mmpy)
0	686.4	9.046	0.19	686.4	9.046	0.19
2	-	-	-	662.1	6.956	0.15
4	563.7	1.090	0.02	674.3	5.187	0.11
6	478.3	0.240	0.004	693.9	7.687	0.09
8	535.5	0.010	0.0002	-	-	-

4.3 ผลการเผาประสานชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L แบบเกิดเฟสของเหลว

ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ผสมผงทองแดง และผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลวแล้วแสดงดังรูปที่ 4.13.



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ผสมทองแดงที่ผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลวแล้ว (ชิ้นงานผสมทองแดง 2%, 4%, 6% และ 8% เรียงตามลำดับจากบนลงล่าง)

ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะผสมระหว่างผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L กับผงทองแดงและผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลวภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 45 นาทีที่อุณหภูมิ 1350°C แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ผสมทองแดงที่ผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลว

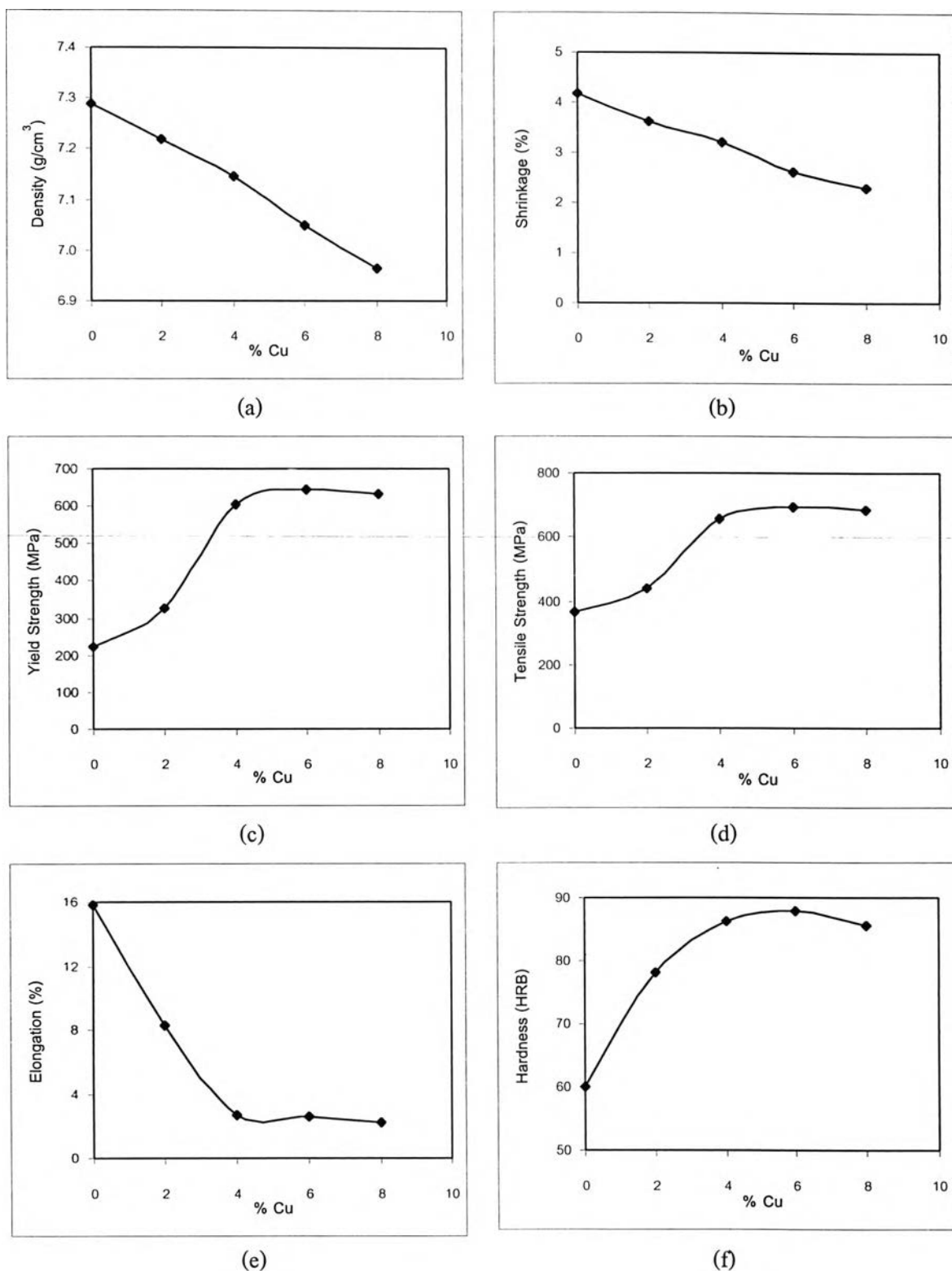
การทดสอบ	ปริมาณทองแดง (%)				
	0	2	4	6	8
ความหนาแน่น (g/cm^3)	7.288	7.219	7.147	7.050	6.964
การหดตัว (%)	4.172	3.618	3.198	2.616	2.304
ความแข็งแรง ณ จุดคราก (MPa)	221.240	327.356	604.081	642.564	631.818
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	367.196	441.227	657.664	693.756	682.487
การยืดตัว (%)	15.776	8.277	2.699	2.601	2.217
ความแข็ง (HRB)	60.0	78.1	86.3	88.0	85.5

จากผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.5 นำมาพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานต่อปริมาณทองแดงที่ใช้ในการเผาประสานแบบเฟสของเหลวได้ดังรูปที่ 4.14 โดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลวแสดงดังรูปที่ 4.15

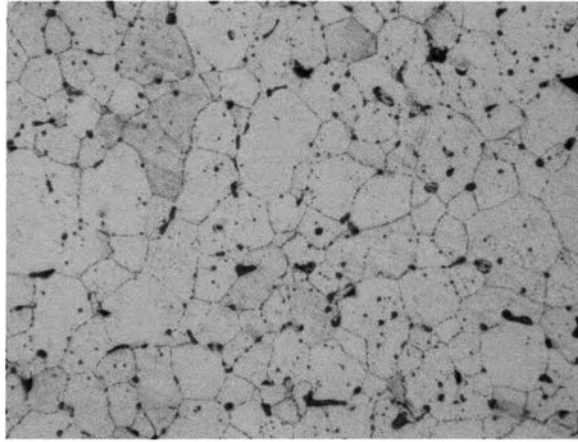
ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานแบบเฟสของเหลว โดยทดสอบในกรดไนตริก 40 v/o ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ที่ผ่านการเผาประสานแบบเกิดเฟสของเหลว

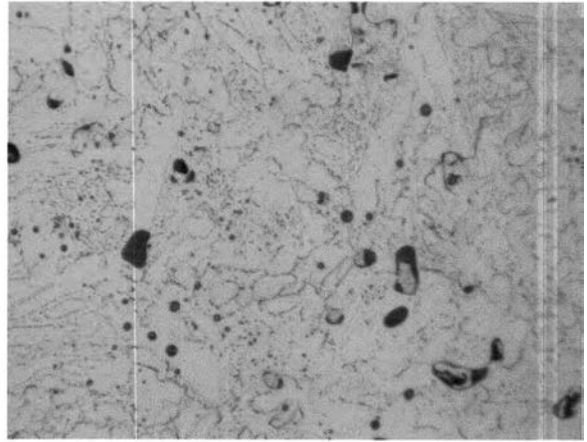
ทองแดง (%)	E (I=0) (mV)	I_{corr} (μA)	อัตราการกัดกร่อน (mmpy)
0	686.4	9.046	0.19
2	728.2	10.92	0.21
4	702.3	11.48	0.29
6	649.5	20.08	0.43
8	669.7	26.02	0.54



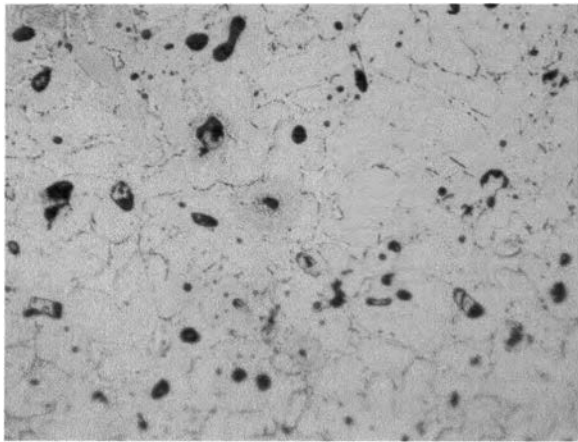
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L ผสมทองแดงที่ผ่านการเผาประสานแบบเฟสของเหลว (a) ความหนาแน่น, (b) การหดตัว, (c) ความแข็งแรง ณ จุดคราก, (d) ความต้านทานแรงดึง, (e) การยืดตัว และ (f) ความแข็ง



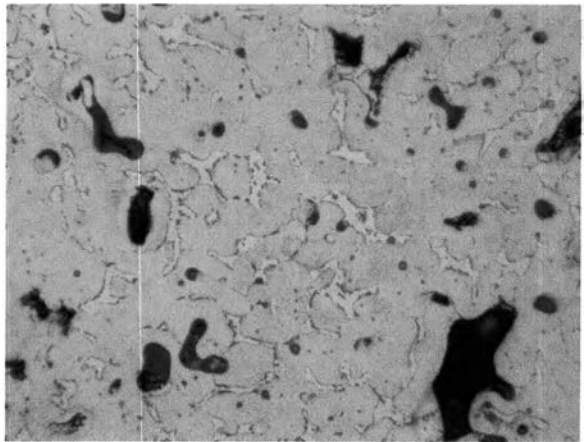
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานแบบเฟสของเหล็กที่ปริมาณการผสม
ทองแดง (a) 2%, (b) 4%, (c) 6% และ (d) 8% (กำลังขยาย 200 เท่า)