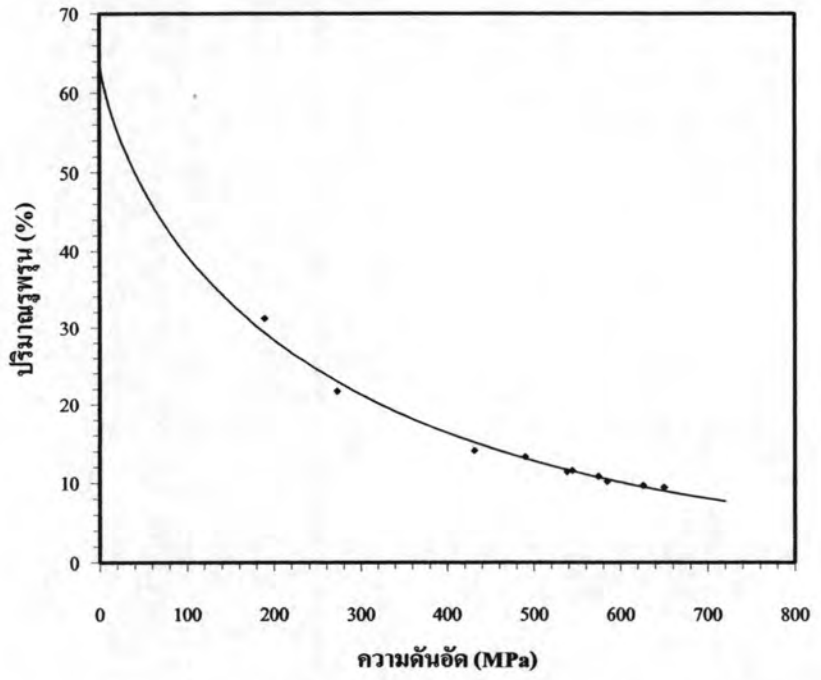
บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลของความดันอัดต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีน

จากผลการทดลองเรื่องความดันอัดต่อความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน ในรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณและสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนของชิ้นงานกรีนกับความดันอัด ได้ดังรูปที่ 5.1 โดยจุดในแผนภูมิเป็นการแปลงค่ามาจากรูปที่ 4.2 และเส้นแนวโน้มในแผนภูมิดังกล่าวสร้างจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีนกับความดันอัด ในสมการที่ 5.1 และกลายเป็นสมการที่ 5.2 โดยค่า P_0 คำนวณได้จากความหนาแน่นปรากฏของผง SCM 415 มีค่าเท่ากับ 63.59 ในขณะที่ค่า K และ n สามารถคำนวณได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square) ได้ค่าเท่ากับ 0.0163 และ 0.74 ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) เท่ากับ 0.94 และเมื่อพิจารณาปริมาณรูพรุนซึ่งลดลงตามความดันอัด หรืออีกนัยหนึ่งคือความหนาแน่นกรีนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีนกับความดันอัด

$$P = P_0 \exp(-Kp^n) \qquad \ldots (5.1)$$

$$P = 63.59\exp(-0.0163p^{0.74}) \qquad \ldots (5.2)$$

เมื่อ P คือ ปริมาณรูพรุนของชิ้นงานกรีน (%)

P_0 คือ ปริมาณรูพรุนของวัสดุผงที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ (%)

p คือ ความดันอัด (MPa)

K คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูพรุน (MPa^{-1})

n คือ strain hardening exponent

5.2 ผลของอุณหภูมิเผาผนึก

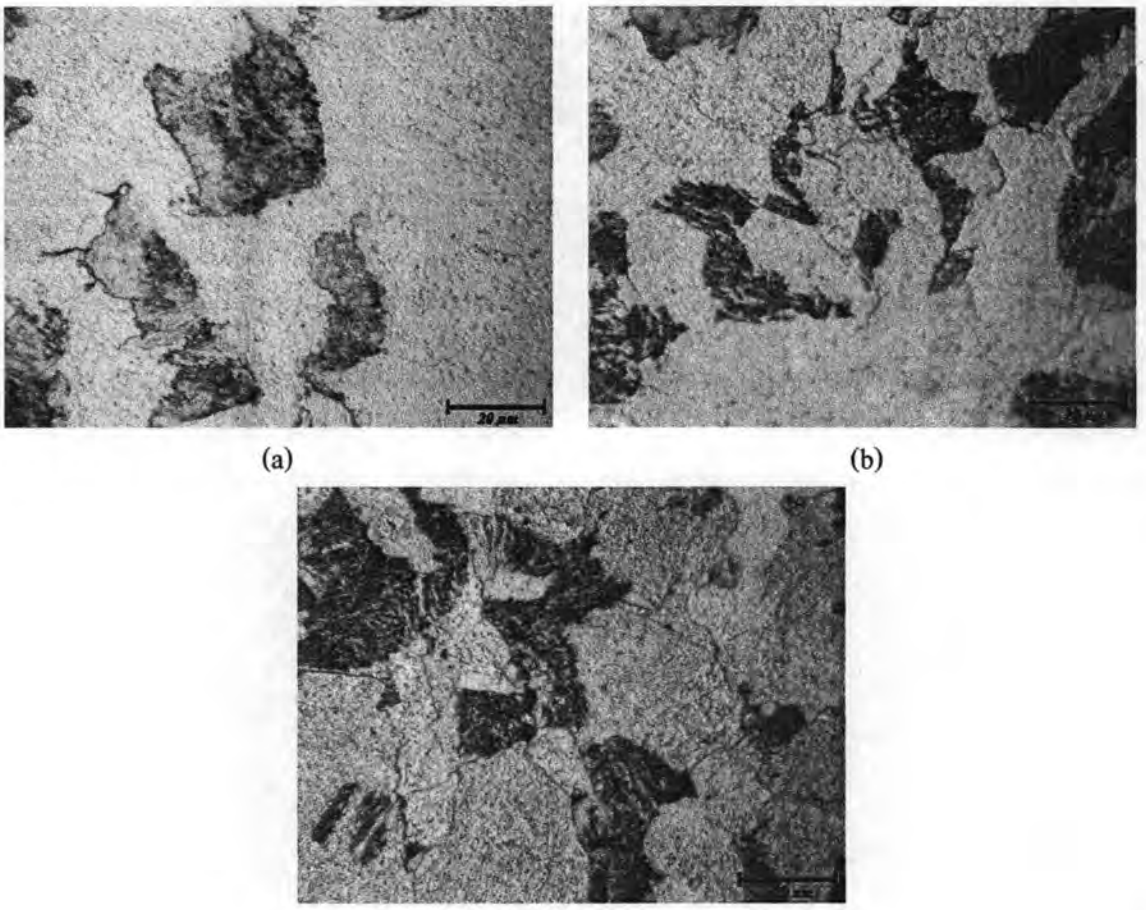
บทบาทสำคัญของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานโลหะผง คือ การเพิ่มการขยายตัวของเกรนและลดปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแพร่ในขั้นตอนการเผาผนึก เป็นกลไกซึ่งสามารถกระตุ้นได้ด้วยความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิเผาผนึกสูงซึ่งมีพลังงานมากกว่าอุณหภูมิเผาผนึกต่ำ อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่า จึงทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันได้ง่ายและรวดเร็ว สอดคล้องกับผลของสมบัติทางกายภาพ ซึ่งพบว่าความหนาแน่น และการหดตัวของชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300°C สูงกว่า 1250 °C และ 1200 °C ตามลำดับ

อย่างไรก็ดีจากภาพถ่ายลักษณะรูพรุน ไม่พบความแตกต่างชัดเจนทั้งปริมาณและขนาดรูพรุนในชิ้นงาน เนื่องจากช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิเผาผนึกในการทดลองแคบเกินไป นอกจากนี้พบว่าลักษณะรูพรุนจากบริเวณผิวลึกลงไปประมาณ 300 ไมครอน มีขนาดใหญ่กว่าบริเวณอื่น เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาผนึก บริเวณผิวเป็นบริเวณที่ก๊าซซึ่งตามรูพรุนเปิดภายในชิ้นงานไหลผ่านเพื่อออกจากชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เหลือค้างอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งบริเวณผิวมีค่าต่ำกว่าบริเวณแกนกลางเล็กน้อย ในขณะที่ผลของปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวไม่มีบทบาท เพราะเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวเพียงเล็กน้อยระหว่างการเผาผนึก เนื่องจากบรรยากาศในเตาเผาผนึกปกคลุมด้วยก๊าซไฮโดรเจน และอาร์กอน ซึ่งป้องกันการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ประกอบกับปริมาณธาตุคาร์บอนเดิมในวัสดุผงก็ต่ำมาก จนไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และเมื่อพิจารณาเทียบกับชิ้นงานเปรียบเทียบ พบว่าชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300 °C มีค่าความแข็งประมาณร้อยละ 60 ของชิ้นงานเปรียบเทียบ อันมีสาเหตุสำคัญ 2 ข้อคือ รูพรุนในชิ้นงาน และปริมาณคาร์บอนซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน SCM 415 มาก ซึ่งส่งผลให้เนื้อพื้นมีความแข็งต่ำ

ขณะที่การทดสอบแรงดึง พบว่า ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยืดตัว และความครากเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของปริมาณรูพรุน ทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่เนื้อพื้นในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น และสามารถยืดตัวได้มากขึ้น ในขณะที่มีลักษณะเนื้อพื้นเหมือนกัน คือมีเพียงเฟสเฟอร์ไรท์ และรูพรุนกระจายตัวอยู่

5.3 ผลของปริมาณคาร์บอน

บทบาทสำคัญของปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มลงไปโดยการผสมผงกราไฟต์ คือการเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพื้นซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคว่าบริเวณเนื้อพื้นเกิดเป็น เฟสเฟอร์ไรท์และเพิร์ไลท์ ผสมกันอยู่เหมือนกับในชิ้นงานเปรียบเทียบ แต่หากมองที่กำลังขนาดสูง พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 99 มีลักษณะเป็นดังในรูปที่ 5.2 (a) ซึ่งเฟสเพิร์ไลท์ที่เกิดมีปริมาณเฟสซีเมนต์ไตด์อยู่น้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานเปรียบเทียบในรูปที่ 5.2 (c) เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนในบริเวณนั้นต่ำ ทำให้เกิดเป็นเฟสซีเมนต์ไตด์ได้น้อย อย่างไรก็ดีพบบางส่วนในชิ้นงานมีที่เพิร์ไลท์ชัดเจน ดังเช่นในรูปที่ 5.2 (b) โดยบริเวณดังกล่าวกระจายอยู่ในชิ้นงานไม่แน่นอน แต่ในบางชิ้นงานไม่พบบริเวณดังกล่าวเลย



(a) (b)

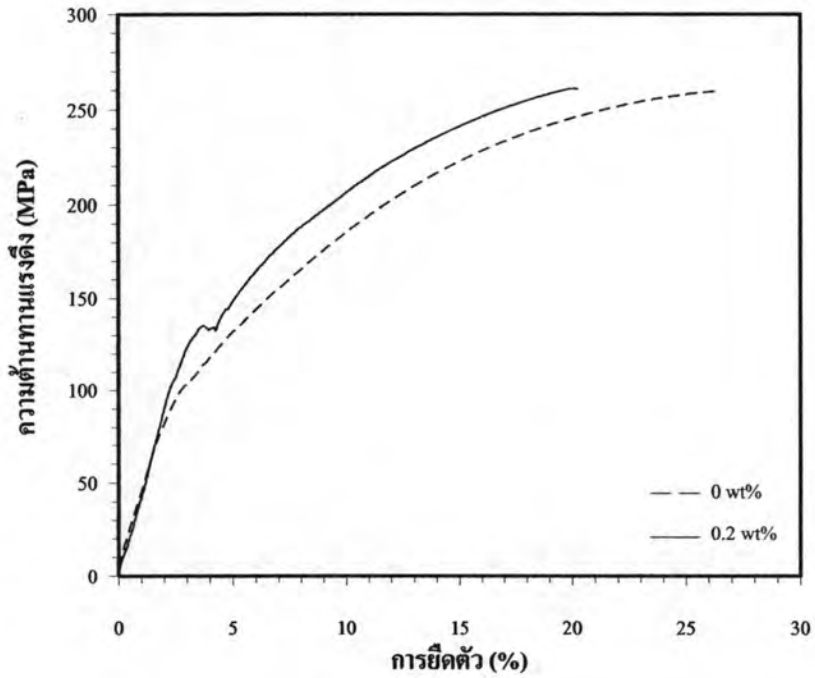
(c)

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ และชิ้นงานเปรียบเทียบ
(a) เพิร์ไลท์ที่มีซีเมนต์ไตด์ต่ำ (b) เพิร์ไลท์ปกติ (c) ชิ้นงานเปรียบเทียบ

ส่วนการหดตัว และความหนาแน่นของชิ้นงาน ไม่ได้รับผลกระทบจากการผสมผงกราไฟต์เนื่องจากผสมปริมาณกราไฟต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ดีที่เห็นได้ว่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ลดลงเล็กน้อยนั้น เกิดจากชิ้นงานผสมกราไฟต์มีความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาความแข็ง พบว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์ มีค่าความแข็งสูงกว่า เนื่องมาจากคาร์บอนซึ่งได้จากผงกราไฟต์ละลายเข้าไปในเนื้อพื้นจนสามารถเกิดเฟสเพิร์ไลท์ ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามพบว่าบริเวณผิว ค่าความแข็งไม่ต่างจากเดิม เนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และยังคงมีรูพรุนขนาดใหญ่บริเวณผิวในลักษณะเดียวกัน

ส่วนของการทดสอบแรงดึง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความดรากเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ที่ผสม เนื่องจากปริมาณรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เนื้อพื้นเกิดเฟสเพิร์ไลท์ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ แต่ในทางกลับกันส่งผลให้การยืดตัวลดต่ำลง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงในรูปของร้อยละได้ในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบจุดน่าสนใจคือ เมื่อผสมกราไฟต์ลงไป ทำให้เกิดจุดดรากที่ชัดเจน เนื่องจากคาร์บอนละลายเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ Body Center Cubic (BCC) ทำให้เกิด Elastic Interaction ที่แข็งแรงระหว่างอะตอมกับดิสโลเคชัน[18] ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.3 ในทางกลับกันชิ้นงานที่ไม่ผสมกราไฟต์มีคาร์บอนละลายอยู่ต่ำจึงไม่เกิดจุดดรากที่ชัดเจน



รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับการยืดตัวของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ เทียบกับชิ้นงานไม่ผสมกราไฟต์

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความคราก (%)	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (%)	การยืดตัว (%)
0.2	+15.71	+2.22	-11.70
0.3	+22.85	+7.57	-25.57

5.4 ผลของการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งต่อสมบัติทาง ๆ ของชิ้นงาน

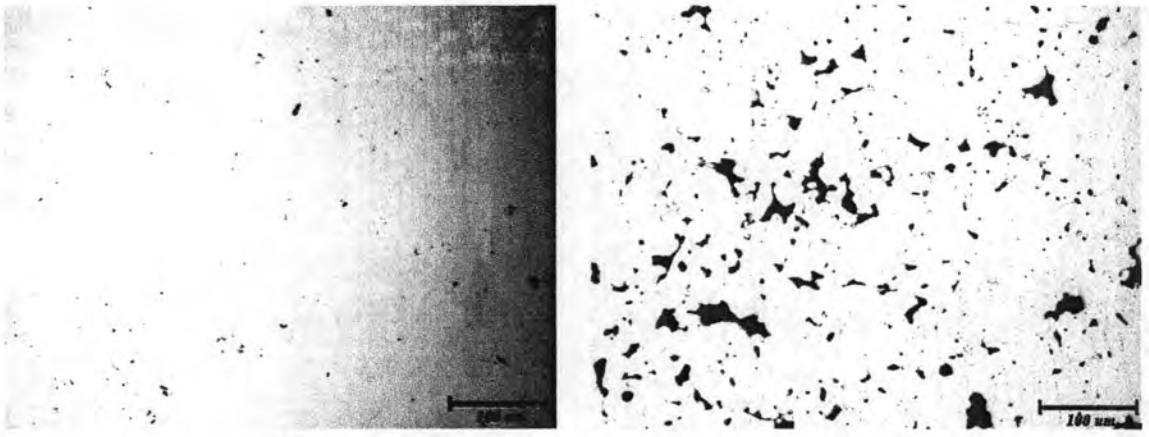
ผลของการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุน, ผลต่อโครงสร้างจุลภาค และผลต่อสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.4.1 ผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุน

ในขั้นตอนการชุบแข็งผิว ชิ้นงานได้รับความร้อนที่ 940 °C เป็นเวลานาน เสมือนกับการนำไปเผาผนึกอีกครั้งแม้อุณหภูมิจะต่ำกว่า จึงเกิดการรวมตัวของรูพรุน นำไปสู่การโตของรูพรุนขนาดใหญ่และสูญเสียรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีความเสถียรน้อยกว่า ส่งผลให้รูพรุนมีจำนวนน้อยลง แต่ขนาดใหญ่ขึ้น เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (Ostwald ripening)

เมื่อใช้เครื่อง SEM+EDS วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณรูพรุน พบมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าบริเวณเนื้อพื้นมาก และบางตำแหน่งในรูพรุนเป็นคาร์บอนเกือบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเกิดการสะสมของคาร์บอนในรูพรุน ดังที่พบจากผลการวัดปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง C-S Meter ของชิ้นงานที่เผาผนึกด้วยอุณหภูมิเผาผนึก 1200°C มีปริมาณคาร์บอนบริเวณแกนกลางสูงกว่าอุณหภูมิเผาผนึกอื่น เนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนมากกว่า จึงมีพื้นที่ในการสะสมคาร์บอนมากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณรูพรุนต่ำ และจากผลยังแสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวมีการสะสมของคาร์บอนในรูพรุนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสกับก๊าซในขั้นตอนการชุบแข็งผิวมากที่สุด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการขยายขนาดของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว ประกอบกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี พบว่าขนาดของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการขยายตัวทางความร้อนระหว่างการชุบแข็งผิว แต่ทว่าในระหว่างนั้นอะตอมคาร์บอนได้แพร่ซึ่งเข้าไปในชิ้นงาน และเกิดการสะสมของคาร์บอนในรูปของกราไฟต์ภายในรูพรุนดังที่แสดงในรูปที่ 5.4 (b) ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่บางส่วนคือกราไฟต์ซึ่งสะสมอยู่ในรูพรุน และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงชิ้นงานจึงไม่สามารถหดตัวให้ขนาดเท่ากับขนาดเริ่มต้น



(a) (b)

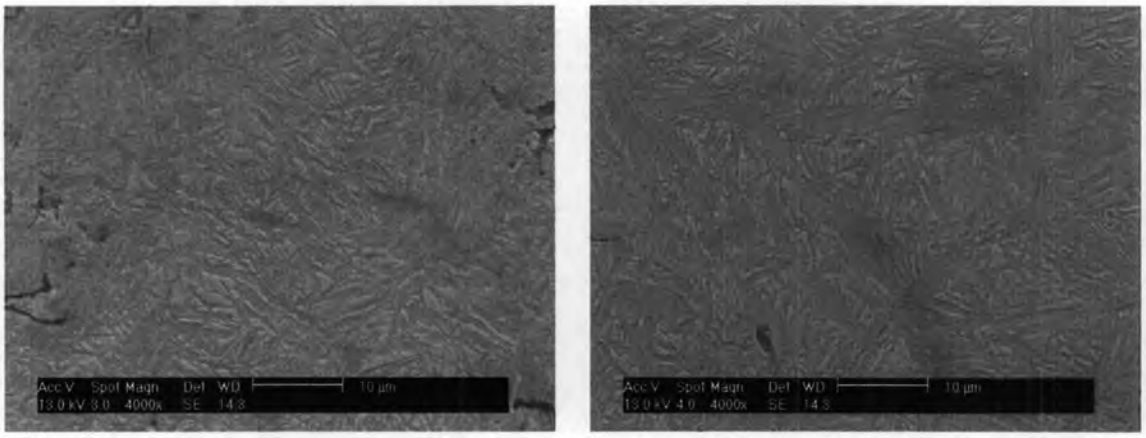
รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300°C
(a) ก่อนชุบแข็งผิว (b) หลังชุบแข็งผิว

สุดท้ายจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิวลดลง และมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น หรืออาจกล่าวว่าบทบาทของอุณหภูมิเผาผนึกต่อปริมาณรูพรุน ลดน้อยลงในชิ้นงานหลังผ่านการชุบแข็งผิว

5.4.2 ผลต่อโครงสร้างจุลภาค

หลังทำการชุบแข็งผิว ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนภายในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณเนื้อพื้นด้วยเครื่อง SEM+EDS พบว่ามีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ช่วงระยะลึกจากผิว 0.2 มิลลิเมตรมีปริมาณคาร์บอนสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากมีรูพรุนเปิดเชื่อมต่อกันภายในชิ้นงานจำนวนมาก ทำให้ก๊าซสามารถแพร่ผ่านรูพรุนได้ ส่งผลให้บริเวณภายในสามารถสัมผัสก๊าซได้โดยตรงโดยตรง ประกอบกับชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็ก ดังนั้นคาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปถึงบริเวณแกนกลาง

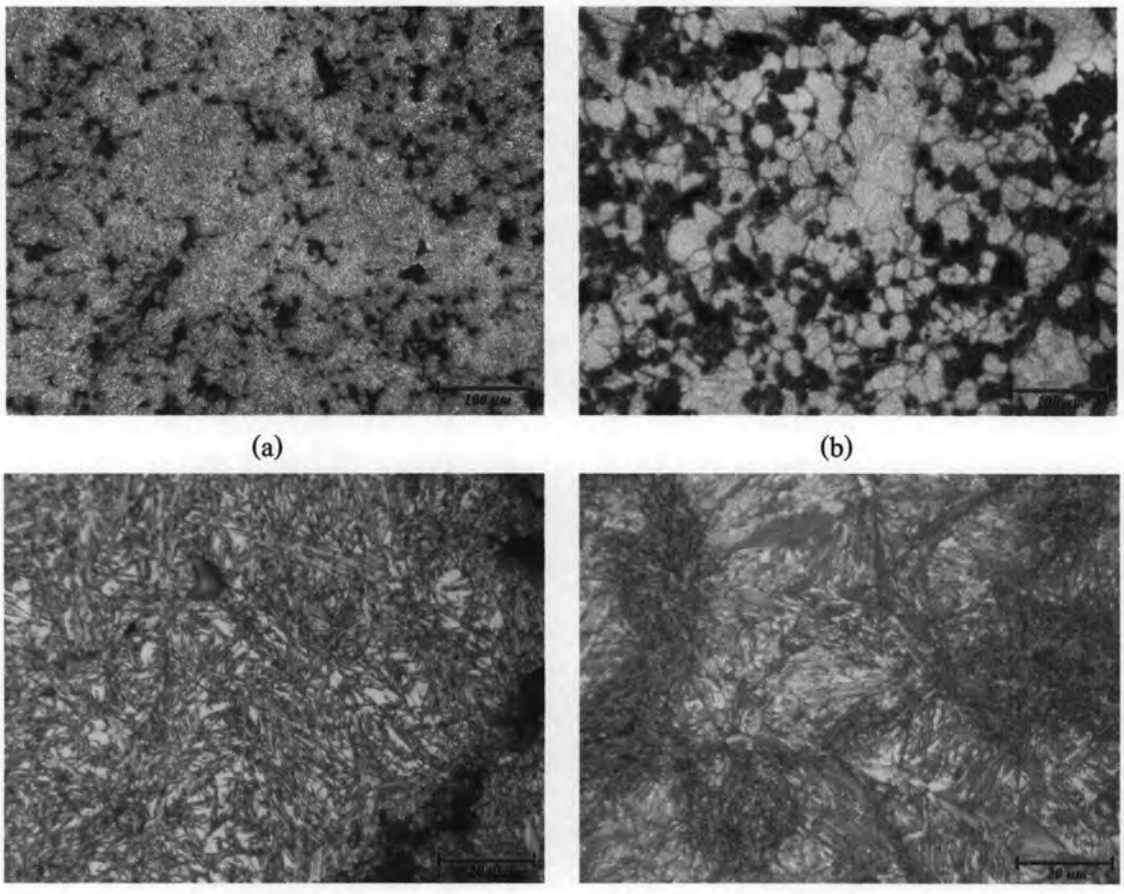
ด้วยเหตุผลในขั้นต้น เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างเนื้อพื้น จึงพบว่าเนื้อพื้นส่วนใหญ่ของชิ้นงานทั้งบริเวณผิวและแกนกลางเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซท์ ทั้งในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.5



(a) (b)

รูปที่ 5.5 ภาพถ่าย SEM บริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว
(a) ไม่ผสมกราไฟต์ (b) ผสมกราไฟต์

จุดแตกต่างของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์อยู่ที่เฟสซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอบรูพรุน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.6 เห็นได้ว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์ เกิดเฟสใหม่ขึ้นเป็นเฟสสีเข้มรอบ ๆ รูพรุน และเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมกราไฟต์ ไม่เกิดเฟสดังกล่าว มีเพียงรูพรุนเท่านั้น

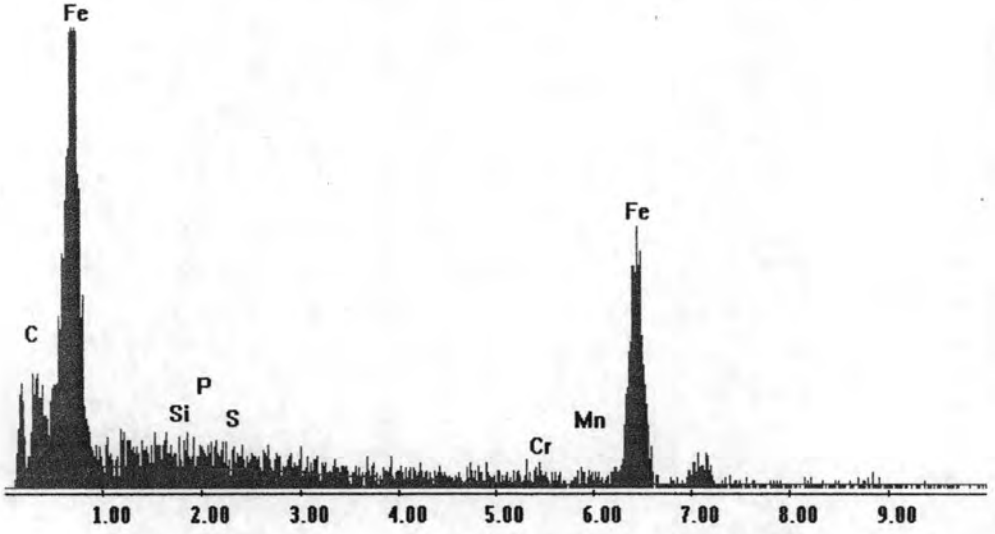


(a) (b)

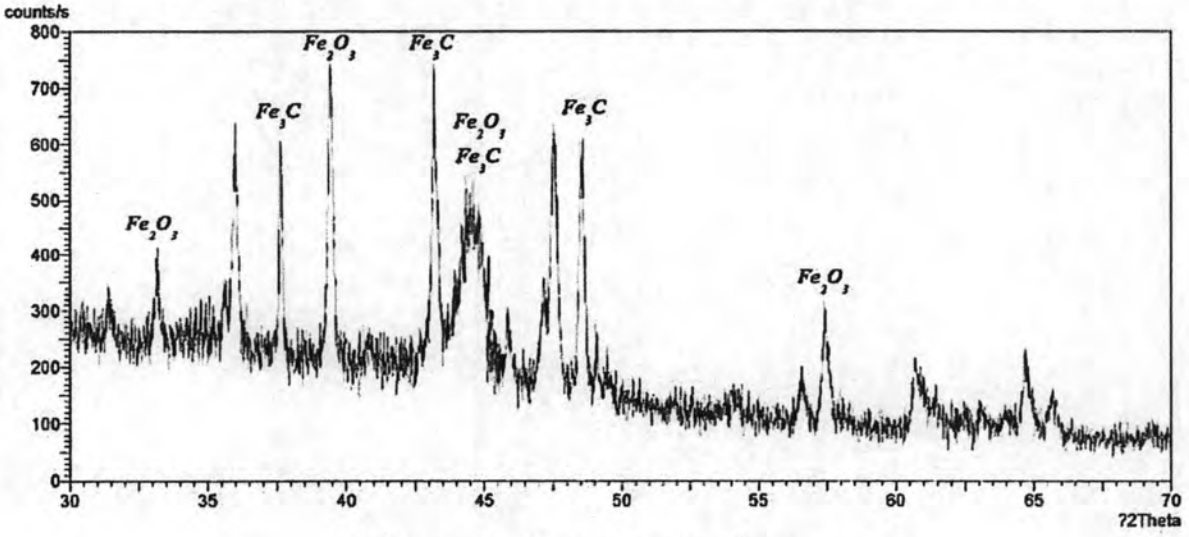
(c) (d)

รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว
(a) ไม่ผสม (b) ผสม (c) ไม่ผสมกำลังขยายสูง (d) ผสมกำลังขยายสูง

เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณดังกล่าวด้วยเครื่อง SEM+EDS ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.7 ประกอบกับการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD ดังที่แสดงในรูปที่ 5.8 สามารถสรุปได้ว่าบริเวณดังกล่าวเป็นเฟสซีเมนต์ไตด์ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งกล่าวว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผลิตจากกระบวนการโลหะผง มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก จะเริ่มเกิดเฟสซีเมนต์ไตด์ขึ้นตามขอบเกรน และขยายตัวมากขึ้นจนกลายเป็นโครงข่ายซีเมนต์ไตด์ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM+EDS บริเวณเฟสซีเมนต์ไตด์



รูปที่5.8 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD

5.4.3 ผลต่อสมบัติทางกล

หลังการชุบแข็งผิว ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเฟสมาร์เทนไซท์มีความแข็งแรงสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ ในทางกลับกันผลของเฟสมาร์เทนไซท์ และการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ภายในชิ้นงานส่งผลให้การยืดตัวลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ค่าความแข็งก็เพิ่มสูงขึ้นเพราะผลของเฟสมาร์เทนไซท์เช่นกัน และยังคงมีแนวโน้มลักษณะเดียวกับชิ้นงานก่อนชุบแข็งผิว คือบริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลาง เนื่องจากบริเวณผิวลึกลงมาถึงระยะ 0.2 มิลลิเมตร มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้นสูงกว่าแกนกลาง ความสามารถในการชุบแข็งบริเวณผิวจึงลดต่ำลง

สำหรับชิ้นงานไม่ผสมกราไฟต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ พบว่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนซึ่งเคยเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติทางกล มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นหลังชุบแข็งผิว ประกอบกับลักษณะโครงสร้างจุลภาคเหมือนกัน จึงเป็นสาเหตุให้ผล ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยืดตัว และความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับชิ้นงานที่ผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1300°C พบว่า หลังชุบแข็งผิว เนื่องจากเกิดโครงข่ายซีเมนต์ไตด์บริเวณขอบเกรนซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ ด้วยสมบัติแข็งแต่เปราะของโครงสร้างซีเมนต์ไตด์ เมื่อไปเกิดบริเวณขอบเกรนจึงส่งผลให้ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวของชิ้นงานผสมกราไฟต์ ลดต่ำลงตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเฟสมาร์เทนไซท์มีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน