

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติวัสดุผง

การทดสอบสมบัติของวัสดุผงประกอบด้วย ส่วนประกอบทางเคมี, รูปร่างอนุภาค, ขนาดอนุภาค และความหนาแน่นเชิงปริมาตร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

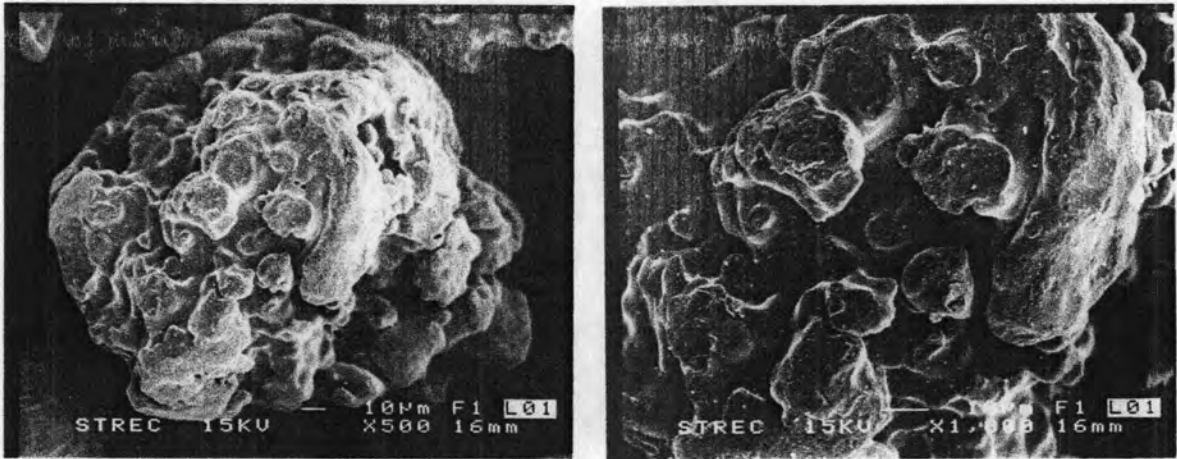
ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ และผง SCM 415 แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเทียบผลของชิ้นงานเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของวัสดุ SCM 415 จากตารางที่ 2.1 พบว่าทุกธาตุมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นคาร์บอนมีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย และเมื่อเทียบผลของผง SCM 415 กับค่ามาตรฐานผงจากผู้ผลิตในตารางที่ 3.1 พบว่า คาร์บอน, แมงกานีส และฟอสฟอรัส มีปริมาณใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน โครเมียม และ โมลิบดีนัม มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ ในขณะที่ซิลิกอน และ กำมะถัน มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ และผง SCM 415

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบทางเคมี (%)						
	C	Cr	Mo	Mn	P	Si	S
ชิ้นงานเปรียบเทียบ	0.193	0.928	0.151	0.665	0.01	0.242	0.013
ผง SCM 415	0.0034	0.863	0.18	0.728	0.013	0.05	0.0059

4.1.2 รูปร่างอนุภาค

ภาพถ่ายรูปร่างอนุภาคของผง SCM 415 แสดงในรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าผง SCM 415 มีลักษณะรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) ผิวขรุขระ และมีรูพรุนขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณผิว



(a)

(b)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของผง SCM 415 ที่กำลังขยายต่าง ๆ

(a) กำลังขยาย 500 เท่า

(b) กำลังขยาย 1000 เท่า

4.1.3 ขนาดอนุภาค

ผลการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง SCM 415 และผงกราไฟต์ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคของผง SCM 415 มีขนาดใหญ่กว่าผงกราไฟต์มาก ส่งผลให้ในขณะผสมผงกราไฟต์จะไปอยู่ในพื้นที่ว่างระหว่างอนุภาค SCM 415 และสามารถเกาะอยู่บนผิวหรือภายในรูพรุนของอนุภาค SCM 415

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง SCM 415 และผงกราไฟต์

ผง	ขนาดเฉลี่ย (μm)
SCM 415	137.42
กราไฟต์	6.44

4.1.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ผลการวัดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 และผงกราไฟต์ แสดงในตารางที่ 4.3 เห็นได้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นกรีน (6.96 g/cm^3) ในขณะที่ผงกราไฟต์มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน (2.27 g/cm^3)

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 และผงกราไฟต์

ผง	ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm ³)
SCM 415	6.61
กราไฟต์	2.22

4.2 สมบัติชิ้นงานกรีน

การทดสอบชิ้นงานกรีน ประกอบด้วย ขนาด, ความหนาแน่นกรีน และผลของความดันอัดต่อความหนาแน่นกรีน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานกรีน จากส่วนผสมทั้ง 3 สูตร แสดงในตารางที่ 4.4 ไม่พบความแตกต่างของขนาด จากชิ้นงานผสมผงกราไฟต์

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดขนาดชิ้นงานกรีน

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.79	8.79	89.78
0.2	5.80	8.79	89.79
0.3	5.80	8.79	89.79

4.2.2 ความหนาแน่นกรีน

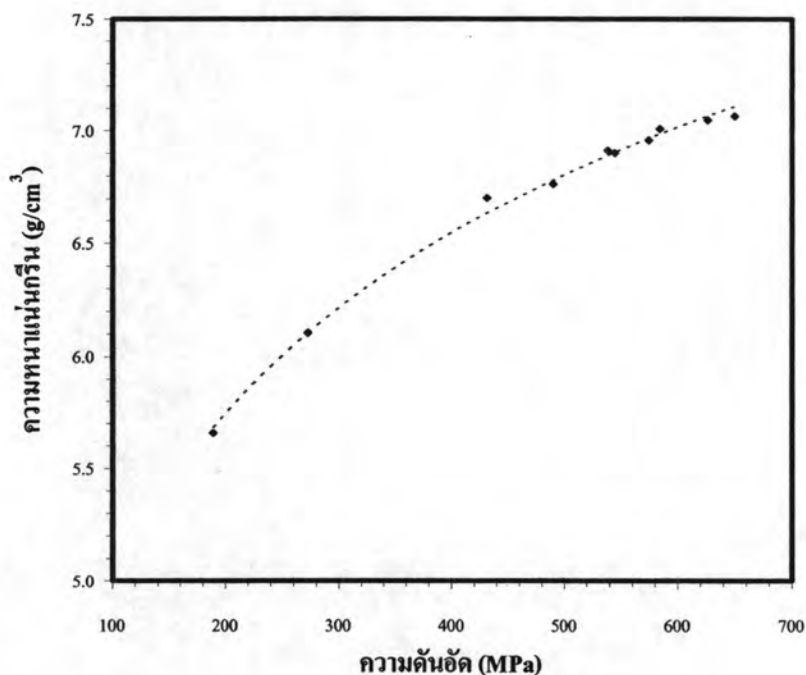
ผลการวัดความหนาแน่นกรีน จากส่วนผสมทั้ง 3 สูตร แสดงในตารางที่ 4.5 ไม่พบความแตกต่างของความหนาแน่นกรีนจากการผสมผงกราไฟต์

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความหนาแน่นกรีน

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความหนาแน่นกรีน	
	g/cm ³	%
0	6.98	89.55
0.2	6.97	89.38
0.3	6.94	89.03

4.2.3 ผลของความดันอัดต่อความหนาแน่นกรีน

เมื่อนำข้อมูลจากการอัดขึ้นรูปวัสดุผงซึ่งไม่ผสมกราไฟต์ มาวิเคราะห์สามารถเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัดได้ดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งความหนาแน่นกรีนเพิ่มขึ้นตามความดันอัด ในรูปแบบของสมการลอการิทึม ดังที่แสดงในสมการที่ 4.1 ซึ่งความดันอัดเฉลี่ยที่ใช้การอัดขึ้นรูปมีค่า 577.96 MPa ต่ำกว่าค่ามาตรฐานจากใบรับรองมาตรฐานวัสดุผง SCM 415 (588.4 MPa) ประมาณร้อยละ 2 อันเป็นผลมาจาก Zinc stearate ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นลดแรงเสียดทานระหว่างขั้นตอนการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด

4.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานไม่ผสมผงกราฟไฟต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า การหดตัวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึก และตำแหน่ง C ซึ่งมีความยาวสูงสุดเป็นตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดมากที่สุด จึงใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการแทนค่าสมการที่ 2.2 เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นหลังเผาผนึก

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
1200	5.79	8.77	89.63
1250	5.79	8.75	89.56
1300	5.79	8.74	89.45

4.3.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการที่ 2.2 แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมาอุณหภูมิเผาผนึก ในขณะที่ความหนาแน่นที่วัดได้มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณประมาณร้อยละ 1 – 1.5

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น (g/cm ³)		ความหนาแน่น (%)	
	คำนวณ	ค่าจริง	คำนวณ	ค่าจริง
1200	7.02	7.09	90.03	90.91
1250	7.04	7.13	90.24	91.40
1300	7.06	7.17	90.57	91.95

4.3.2 ส่วนประกอบทางเคมี

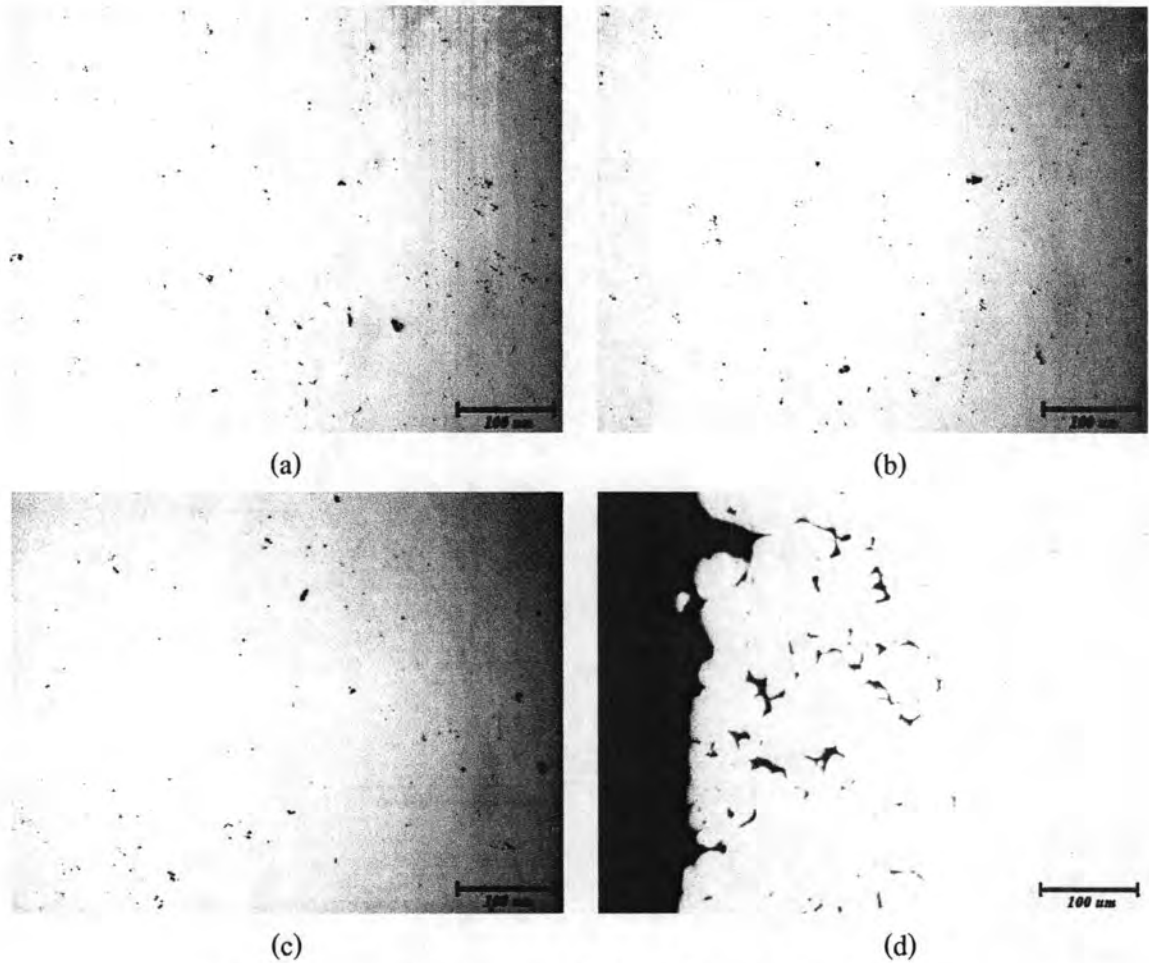
ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.8 ไม่พบว่าอุณหภูมิเผาผนึกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนอย่างชัดเจน และไม่พบการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวอย่างชัดเจนระหว่างการเผาผนึก

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	0.0032	0.0032
1250	0.0035	0.0031
1300	0.0033	0.0031

4.3.3 โครงสร้างจุลภาค

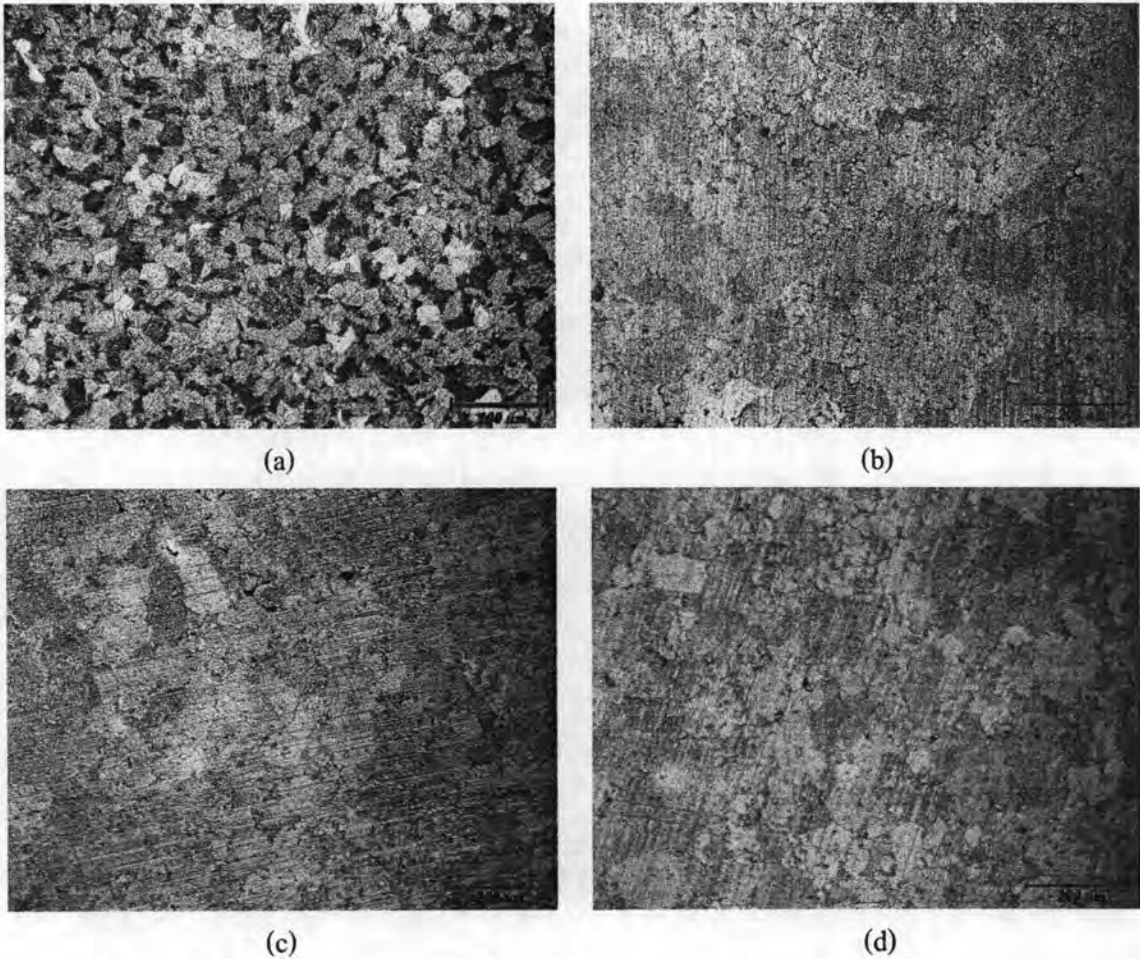
ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.3 ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนของปริมาณและขนาดรูพรุน ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ โดยลักษณะรูพรุนภายในชิ้นงานมีขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่เล็กน้อย แต่หากพิจารณารูปที่ 4.3 (d) ซึ่งเป็นภาพถ่ายรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงาน พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่มากกว่าบริเวณอื่น ในทุกอุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผืนิกต่าง ๆ

(a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1300 °C (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผืนิกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปรียบเทียบ รูปที่ 4.4 (a) มีลักษณะเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo-Eutectoid) กล่าวคือ เนื้อพื้นมีเฟส เฟอร์ไรต์ (พื้นที่สีอ่อน) และเพิลไรต์ (พื้นที่สีเข้ม) ผสมกันอยู่ ในขณะที่ชิ้นงานซึ่งผ่านการเผาผืนิกเนื้อพื้นมีเพียงเฟสเฟอร์ไรต์ และรูพรุนกระจายตัวอยู่ซึ่งพบมากในบริเวณขอบเกรน ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อพื้นต่ำจนไม่สามารถเกิดเพิลไรต์ได้ และหากพิจารณาผลของอุณหภูมิเผาผืนิก ไม่พบความแตกต่างของเนื้อพื้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่อุณหภูมิเผาผืนิก 1300 °C รูปที่ 4.4 (d) เห็นได้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเผาผืนิกอื่น ๆ



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ
 (a) ชิ้นงานเปรียบเทียบ (b) 1200 °C (c) 1250 °C (d) 1300 °C

4.3.4 สมบัติทางกล

4.3.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ แสดงในตารางที่ 4.9 ชิ้นงานทั้งหมดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ บริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลางเล็กน้อย และพบว่าที่ 1200 °C มีค่าความแข็งต่ำกว่า อีกสองอุณหภูมิค่อนข้างมาก อันเป็นผลมาจากปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานมีปริมาณมากกว่าและขนาดใหญ่กว่า ในขณะที่ 1250 °C และ 1300 °C ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน

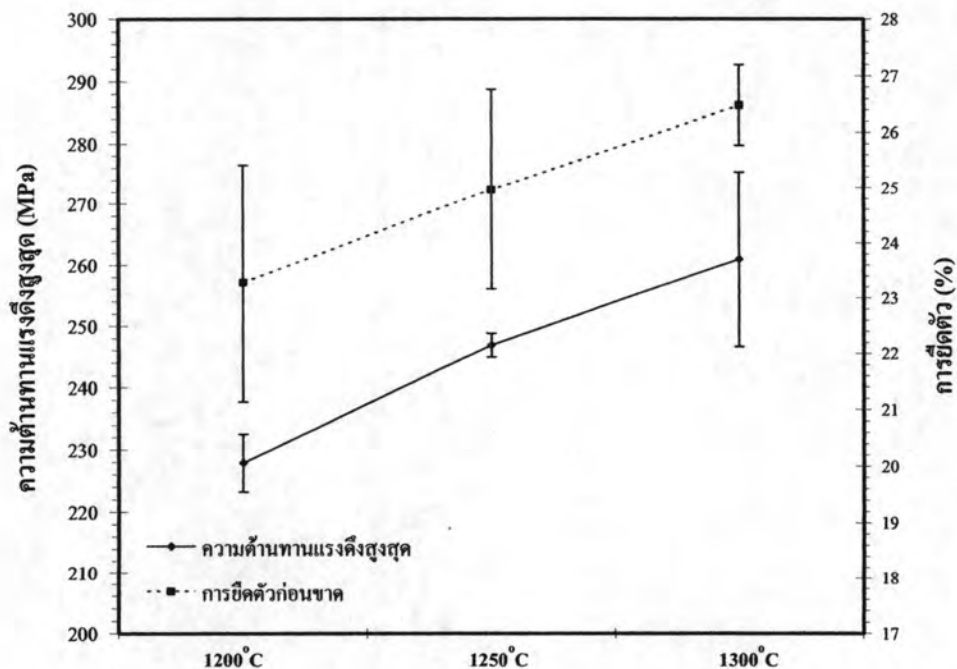


ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง (HV)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	107.63 ± 7.53	104.70 ± 1.99
1250	124.23 ± 6.59	118.23 ± 5.15
1300	125.73 ± 2.01	119.83 ± 4.54
ชิ้นงานเปรียบเทียบ	211.33 ± 4.72	

4.3.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึง แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าแนวโน้มของความต้านทานแรงดึง, การยืดตัว และความคราก เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ ความต้านทานแรงดึง, การยืดตัว และความคราก เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความครากคำนวณจาก 0.2% offset เนื่องจากไม่ปรากฏจุดครากในผลการทดสอบ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความคราก (MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
1200	104.33 ± 1.25	227.85 ± 4.67	23.28 ± 2.13
1250	105.33 ± 3.81	246.83 ± 1.94	24.96 ± 1.80
1300	116.67 ± 5.67	260.95 ± 14.40	24.48 ± 0.71

4.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานไม่ผสมผงกราไฟต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.4.1 สมบัติทางกายภาพ

4.4.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังชุบแข็งผิวเล็กน้อย

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
1200	5.82	8.80	90.16
1250	5.85	8.81	90.14
1300	5.84	8.79	90.09

4.4.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าความหนาแน่นลดลง และใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากขนาดของชิ้นงานใหญ่ขึ้น โดยชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300 °C ยังคงมีความหนาแน่นสูงสุด

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น	
	g/cm ³	%
1200	7.06	90.33
1250	7.07	90.64
1300	7.09	90.91

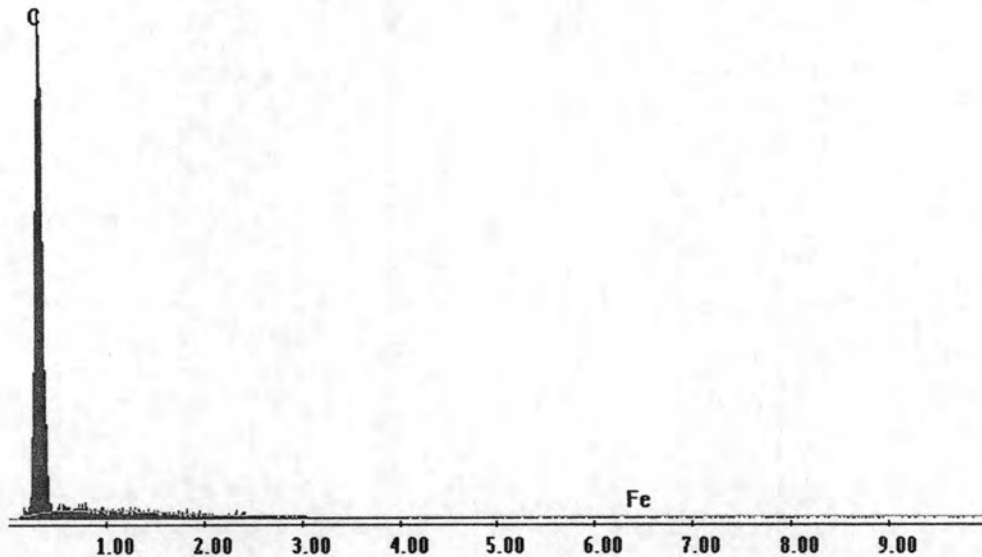
4.4.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวด้วยเครื่อง C-S Meter แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือบริเวณผิวมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าแกนกลาง โดยอุณหภูมิเผาผนึก 1200 °C มีปริมาณคาร์บอนบริเวณแกนกลางสูงสุด

ตารางที่ 4.13 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	1.3246	1.6442
1250	1.1620	1.6125
1300	1.1154	1.5833

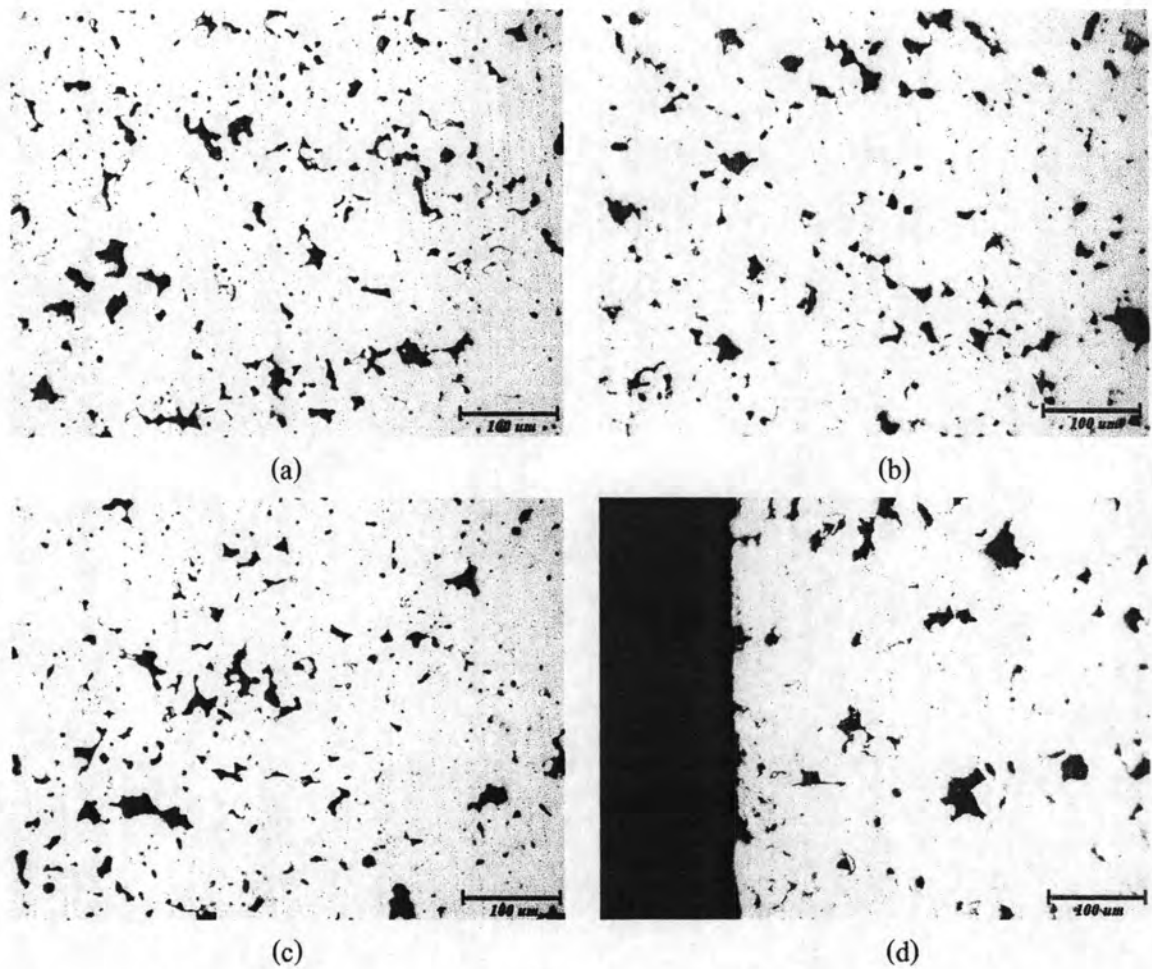
อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะตำแหน่งด้วยเครื่อง SEM+EDS พบว่า บริเวณรูพรุนปริมาณคาร์บอนสูงกว่าบริเวณเนื้อพื้นมาก ในขณะที่บางจุดในรูพรุน ตรวจพบเฉพาะคาร์บอนเท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 และหากวิเคราะห์เฉพาะบริเวณเนื้อพื้น พบว่าทุกจุดมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน โดยในช่วงระยะลึกจากผิว 0.2 มิลลิเมตรมีปริมาณคาร์บอนสูงสุด



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีบริเวณรูพรุนด้วยเครื่อง SEM+EDS

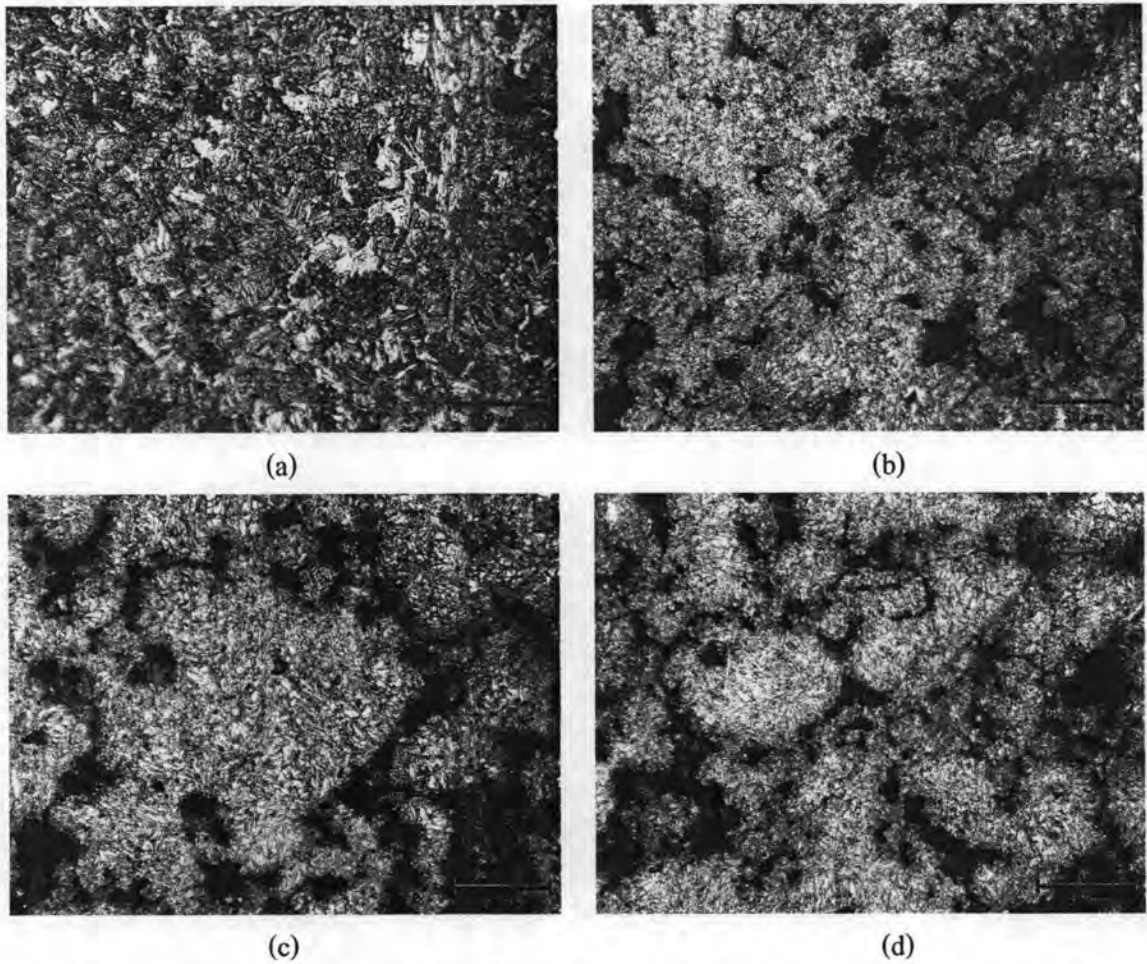
4.4.3 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่ารูพรุนที่มีการขยายตัวอย่างมาก เป็นรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน รวมถึงบริเวณผิวดังในรูปที่ 4.7 (d) ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่ไม่พบความแตกต่างชัดเจนของลักษณะรูพรุนจากอุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว
 (a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1300 °C (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าบริเวณผิวชิ้นงานเปรียบเทียบ 4.8 (a) มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่ชิ้นงานเผาผนึกทั้งหมด มีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน โดยมีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ เฟสมาร์เทนไซต์ (พื้นที่สีอ่อน) เป็นเนื้อพื้น และรูพรุน (พื้นที่สีเข้ม)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ หลังชุบแข็งผิว (a) ชิ้นงานเปรียบเทียบ (ผิว) (b) 1200 °C (c) 1250 °C (d) 1300 °C

4.4.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกล

4.4.4.1 ความแข็ง

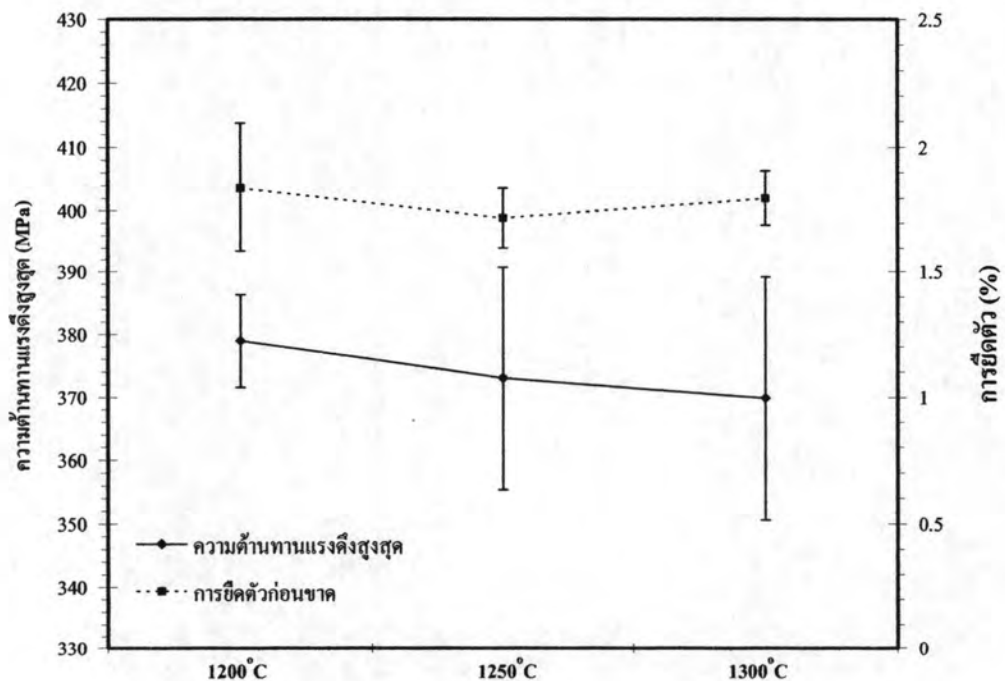
ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวแสดงในตารางที่ 4.14 บริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลางเล็กน้อย และหากพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิเผาผนึก พบว่าที่ 1300 °C ยังคงมีค่าความแข็งสูงสุด

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง (HRC)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	48.40 ± 0.17	44.67 ± 0.60
1250	48.80 ± 0.66	45.73 ± 0.31
1300	49.39 ± 0.29	46.60 ± 0.69
ชิ้นงานเปรียบเทียบ (ผิว)	62.57 ± 0.65	

4.4.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวแสดงในตารางที่ 4.15 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึกได้ดังรูปที่ 4.9 พบว่าลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเป็นการแตกหักแบบเปราะ โดยทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัว มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก หลังจากชุบแข็งผิว

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
1200	378.96 ± 7.38	1.84 ± 0.25
1250	373.02 ± 17.68	1.72 ± 0.12
1300	369.59 ± 19.27	1.80 ± 0.11

4.5 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1300°C ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.5.1 สมบัติทางกายภาพ

4.5.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ในตารางที่ 4.16 พบว่าการหดตัวอยู่ในระดับเดียวกัน แต่ในตำแหน่ง C ชิ้นงานผสมกราไฟต์ มีการหดตัวมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.79	8.74	89.45
0.2	5.78	8.74	89.38
0.3	5.79	8.75	89.42

4.5.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณในสมการที่ 2.2 แสดงในตารางที่ 4.17 ไม่พบว่ากราไฟต์ส่งผลต่อความหนาแน่น ในขณะที่ความหนาแน่นที่วัดได้มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณประมาณร้อยละ 1 – 1.5

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)		ความหนาแน่น (%)	
	คำนวณ	ค่าจริง	คำนวณ	ค่าจริง
0	7.06	7.17	90.57	91.95
0.2	7.07	7.15	90.63	91.59
0.3	7.03	7.14	90.15	91.55

4.5.2 ส่วนประกอบทางเคมี

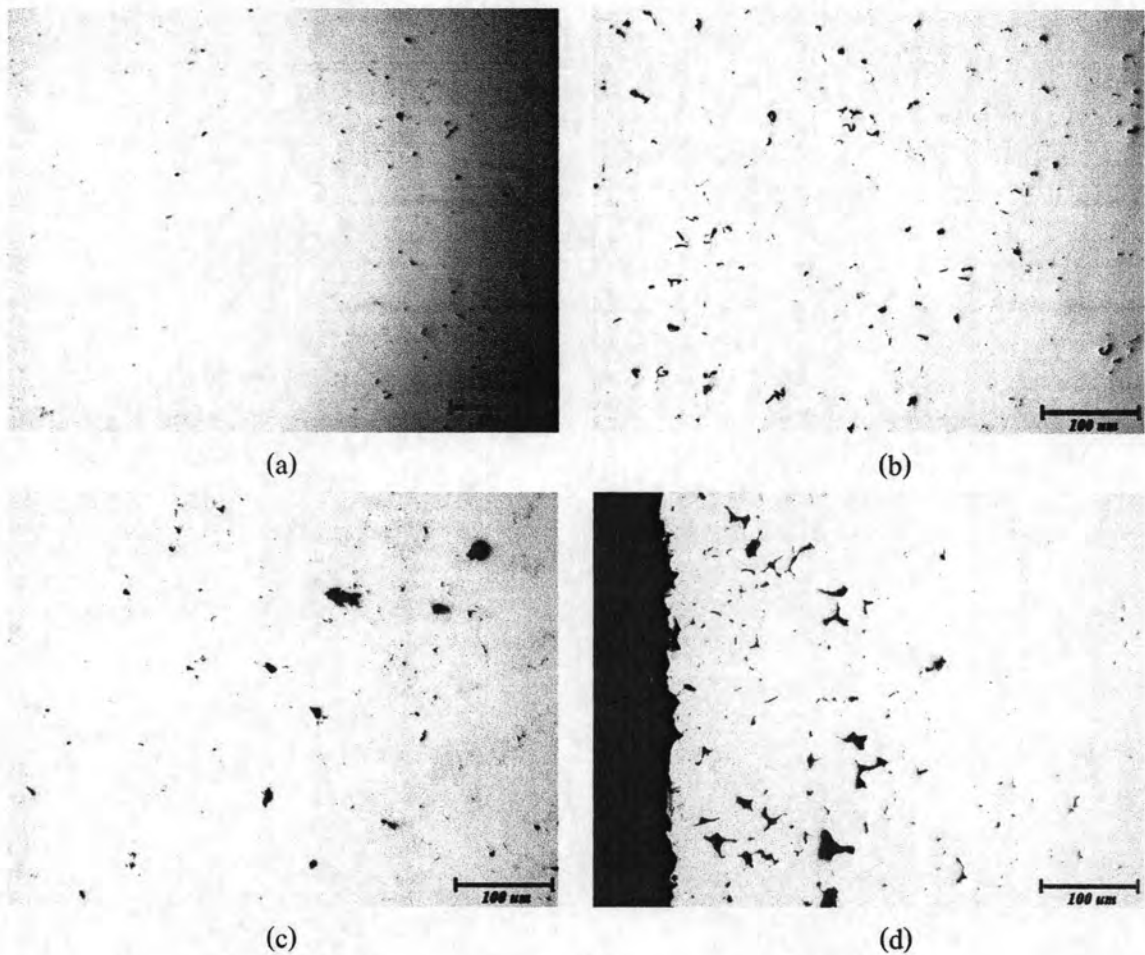
ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าเกิดการสูญเสียคาร์บอนระหว่างกระบวนการผลิตประมาณร้อยละ 25 – 35 นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวระหว่างการผลิตประมาณร้อยละ 25 - 30 จากบริเวณแกนกลาง

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
0	0.0032	0.0031
0.2	0.1435	0.1164
0.3	0.2073	0.1464

4.5.3 โครงสร้างจุลภาค

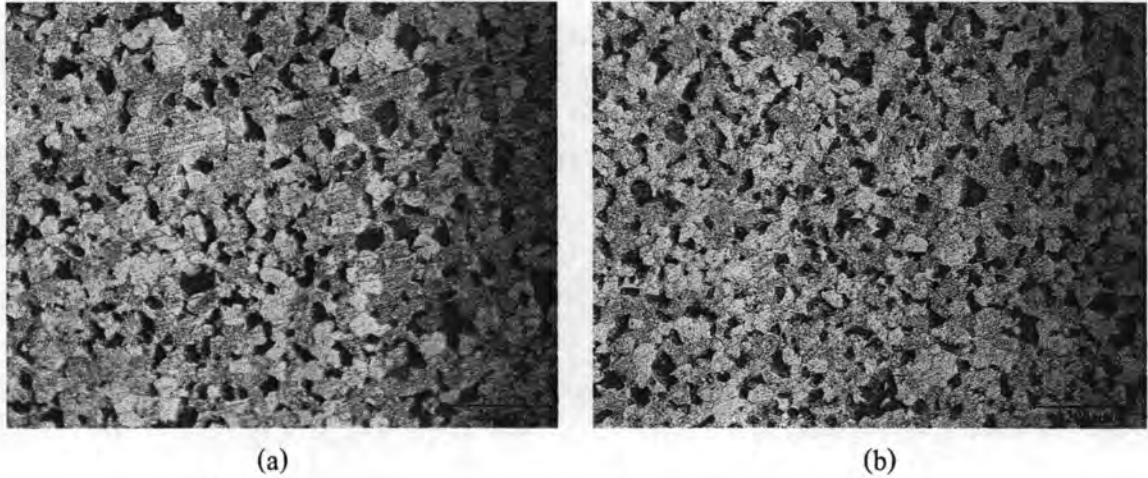
ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่าเมื่อผสมกราไฟต์ลงไป จะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่มากขึ้นกว่าปกติ กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน ซึ่งจุดที่เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่คือบริเวณที่ผงกราไฟต์เคยอยู่ขณะเป็นชิ้นงานกรีน แล้วเมื่อแพร์เข้าไปในเนื้อพื้นแล้วจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ประกอบกับความหนาแน่นกรีนของชิ้นงานที่เติมกราไฟต์ต่ำกว่า จึงเกิดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าดังกล่าว นอกจากนี้หากพิจารณาบริเวณผิวในรูปที่ 4.10 (d) พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

(a) 0 wt% (b) 0.2 wt% (c) 0.3 wt% (d) 0.3 wt% (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าบริเวณเนื้อพื้นเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ (พื้นที่สีอ่อน) และเฟสเพิร์ไลต์ (พื้นที่สีเข้ม) ตลอดทั้งชิ้นงาน เช่นเดียวกับในชิ้นงานเปรียบเทียบ และเห็นได้ว่าเฟสเพิร์ไลต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกราไฟต์เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อพื้นเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ
(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

4.5.4 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติทางกล

4.5.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อผสมกราไฟต์ลงไป ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาบริเวณผิว เห็นได้ว่าค่าความแข็งไม่แตกต่างจากเดิมนัก เนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว

ตารางที่ 4.19 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

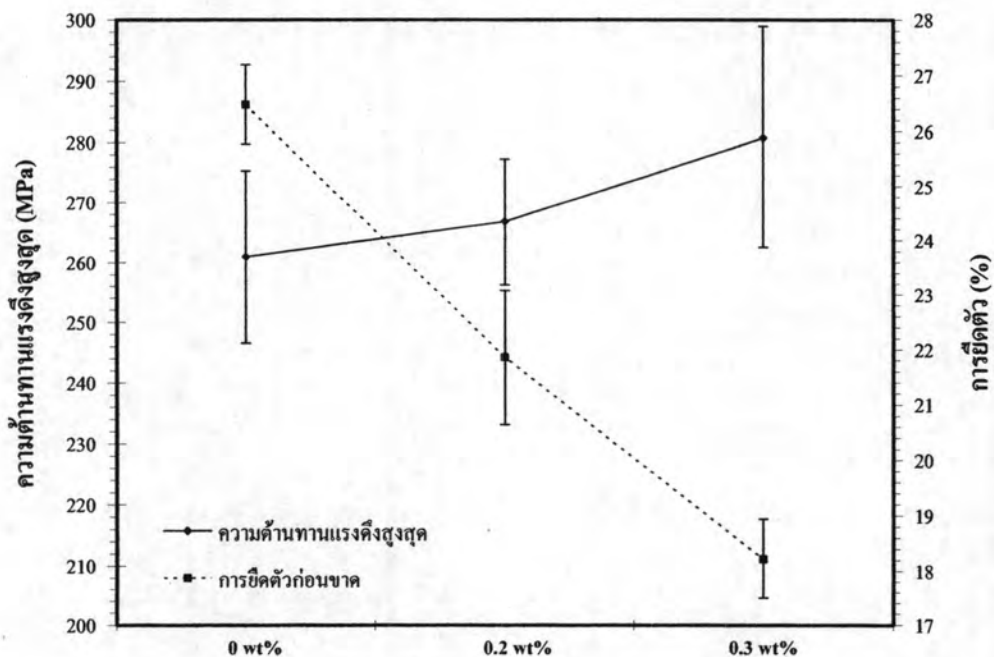
ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความแข็ง (HV)	
	แกนกลาง	ผิว
0	125.73 ± 2.01	119.83 ± 4.54
0.2	145.90 ± 2.66	119.93 ± 5.56
0.3	151.90 ± 1.45	123.70 ± 11.20

4.5.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าค่าความคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เพิ่มขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ และในทางกลับกันส่งผลให้การยืดตัวลดลง และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับการยืดตัวของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความคราก (MPa)	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
0	116.67 ± 5.67	260.95 ± 14.40	24.48 ± 0.71
0.2	135.00 ± 5.00	266.73 ± 10.51	21.86 ± 1.21
0.3	143.33 ± 7.64	280.71 ± 8.21	18.22 ± 0.72



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับปริมาณกราไฟต์



4.6 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผืนิก 1300°C หลังชุบแข็งผิว ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.6.1 สมบัติทางกายภาพ

4.6.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังชุบแข็งผิวเล็กน้อย ซึ่งหากพิจารณาดำแหน่ง C พบว่า ชิ้นงานผสมกราไฟต์มีการขยายตัวน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.84	8.79	90.09
0.2	5.83	8.80	89.93
0.3	5.81	8.79	89.95

4.6.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.22 พบว่ามีความหนาแน่นลดต่ำลงเล็กน้อย โดยชิ้นงานซึ่งไม่ผสมกราไฟต์ยังคงมีความหนาแน่นสูงสุด

4.6 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาพูนที่ 1300°C หลังชุบแข็งผิว ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.6.1 สมบัติทางกายภาพ

4.6.1.1 ขนาด

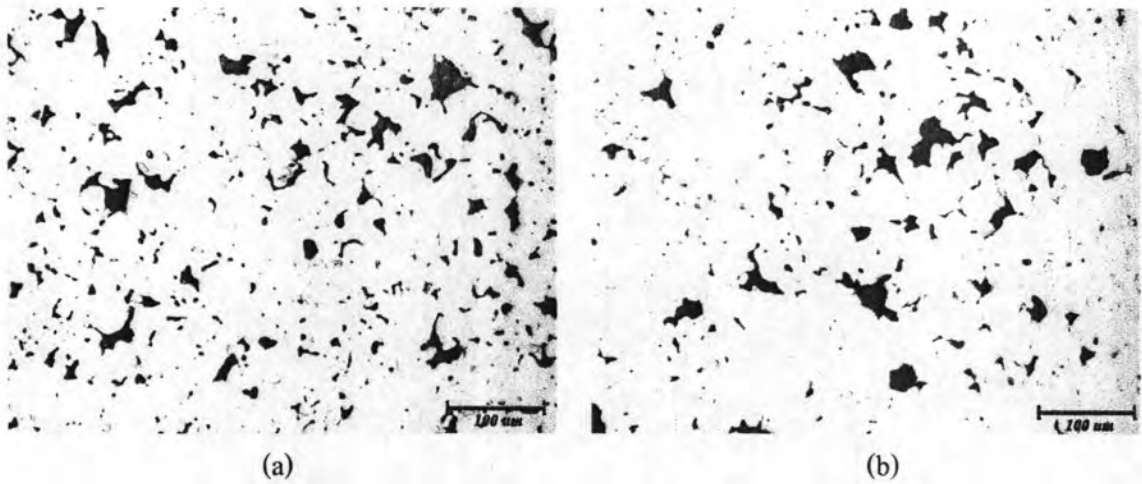
ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังชุบแข็งผิวเล็กน้อย ซึ่งหากพิจารณาค่าแห่ง C พบว่า ชิ้นงานผสมกราไฟต์มีการขยายตัวน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.84	8.79	90.09
0.2	5.83	8.80	89.93
0.3	5.81	8.79	89.95

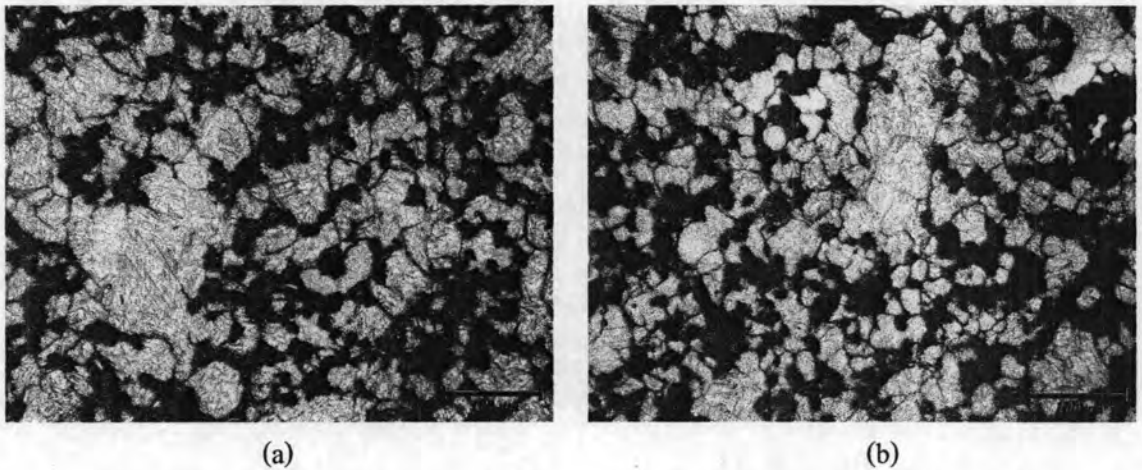
4.6.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.22 พบว่ามีความหนาแน่นลดต่ำลงเล็กน้อย โดยชิ้นงานซึ่งไม่ผสมกราไฟต์ยังคงมีความหนาแน่นสูงสุด



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว
(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าบริเวณเนื้อพื้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ มาร์เทนไซต์ (พื้นที่สีอ่อน) เป็นเนื้อพื้น และบริเวณพื้นที่สีเข้ม อยู่ตามขอบเกรนเชื่อมต่อกัน โดยบริเวณพื้นที่สีเข้มมักมีรูพรุนอยู่ตรงกลาง และเห็นได้ว่า พื้นที่สีเข้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกราไฟต์



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว
(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

4.6.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกล

4.6.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.24 พบว่าบริเวณผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง ในขณะที่บริเวณแกนกลาง มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.24 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

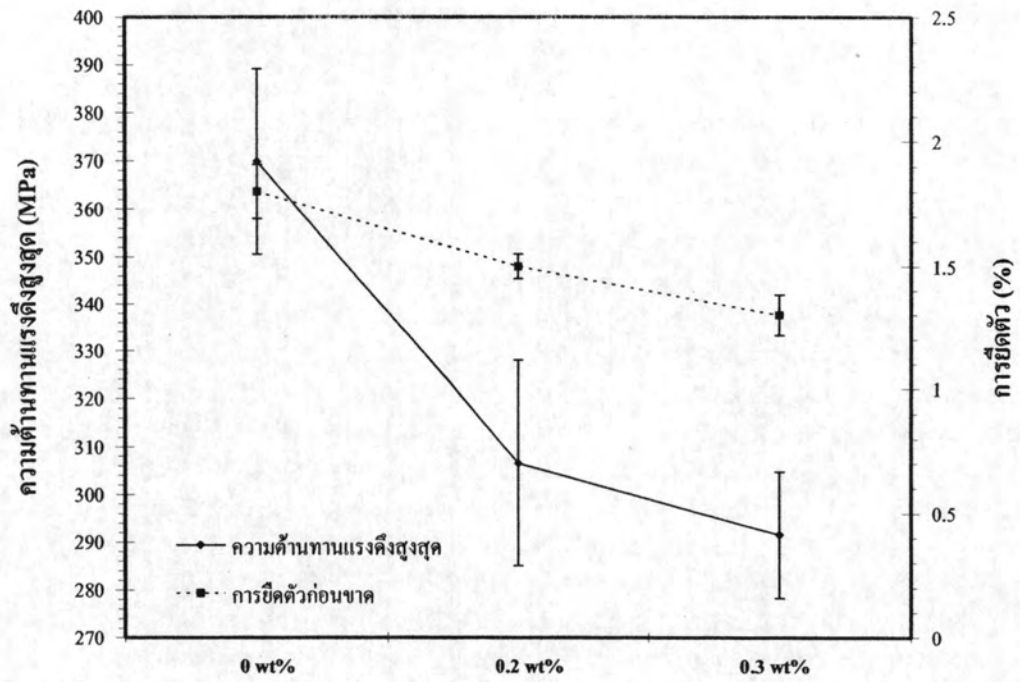
ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความแข็ง (HRC)	
	แกนกลาง	ผิว
0	49.39 ± 0.29	46.60 ± 0.69
0.2	50.40 ± 0.26	46.50 ± 0.52
0.3	50.27 ± 1.69	46.57 ± 0.93

4.6.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.25 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวกับปริมาณกราไฟต์ หลังจากชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัว ลดลงอย่างมากตามปริมาณกราไฟต์

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
0	369.59 ± 19.27	1.80 ± 0.11
0.2	306.51 ± 21.50	1.50 ± 0.05
0.3	291.50 ± 13.22	1.30 ± 0.08



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับปริมาณกราฟไฟต์ หลังจากชุบแข็งผิว