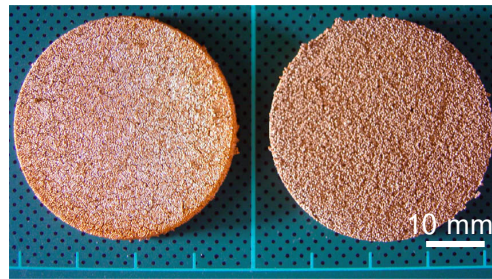


บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

จากการทดลองผลิตโลหะบรอนซ์พูน จะได้ชิ้นงานเป็นแผ่นกลมบางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 38.1 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 3.18 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานจากผงบรอนซ์ขนาด 150 ไมโครเมตร อบพูนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

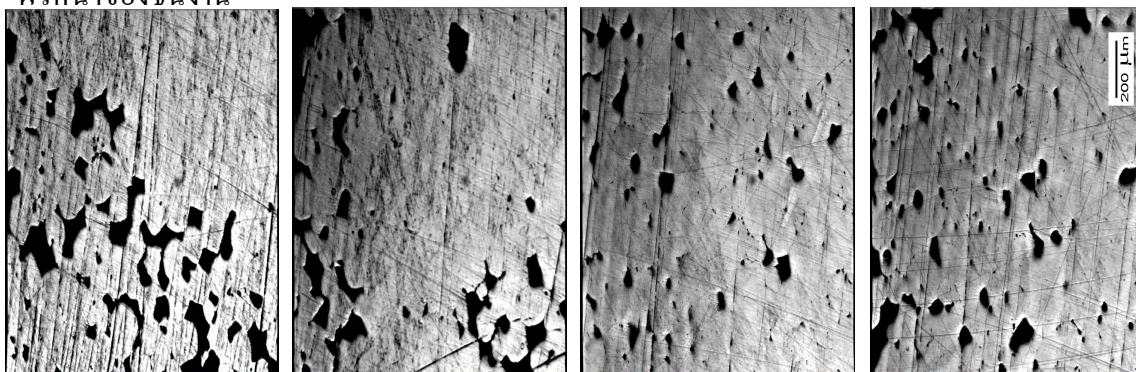
3.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาค

3.1.1 ลักษณะวิทยา (Morphology) ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาด จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อวิเคราะห์ภาพการกระจายของรูพูนในชิ้นงาน (รูปที่ 3.2-3.4) ด้วยเครื่อง image analyzer จะได้ค่าดังตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ทำจากผงขนาดใหญ่จะมีรูพูนขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ทำจากผงขนาดเล็กกว่า และขนาดอนุภาคส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของรูพูน จากตารางพบว่าเมื่อผงอนุภาคมีขนาดโตขึ้นอัตราส่วนของพื้นที่รูพูนจะเพิ่มตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของชิ้นงาน (รูปที่ 3.5) เมื่อขนาดอนุภาคโตขึ้น ชิ้นงานที่อบพูนในสถานะเดียวกันจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า เนื่องจากผงอนุภาคโตจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบพูนที่สูงกว่าผงที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เพราะอนุภาคขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อยกว่า ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กสามารถอบพูนได้เร็วกว่าขนาดโต เกิดการ bulk transport เร็วขึ้นทำให้เกิดการหดตัวเร็วขึ้นเมื่ออบพูนในสถานะที่เท่ากัน (German, 1994)

ตารางที่ 3.1 ค่าการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานทั้ง 3 ขนาด อบผนึกที่ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

Average Size	% Pore	% Solid
150	8.51	91.49
320	24.36	75.64
380	30.49	69.51

ผิวหน้าของชิ้นงาน

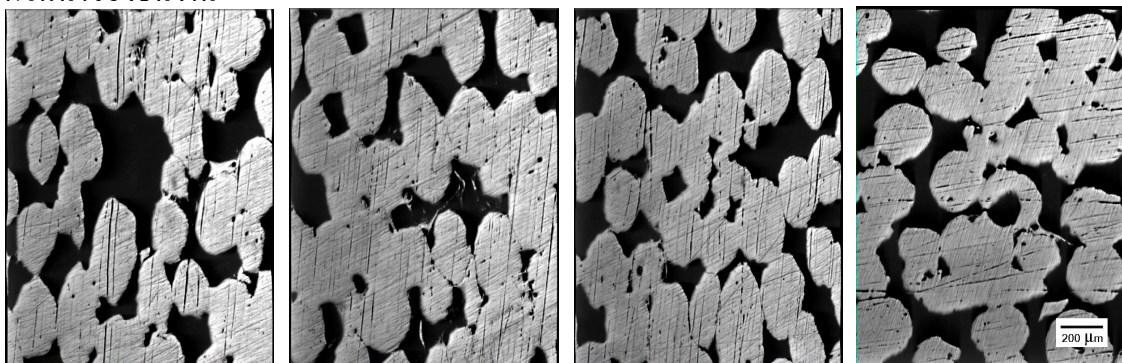


ขอบนอก →

← กึ่งกลาง

รูปที่ 3.2 การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม

ผิวหน้าของชิ้นงาน

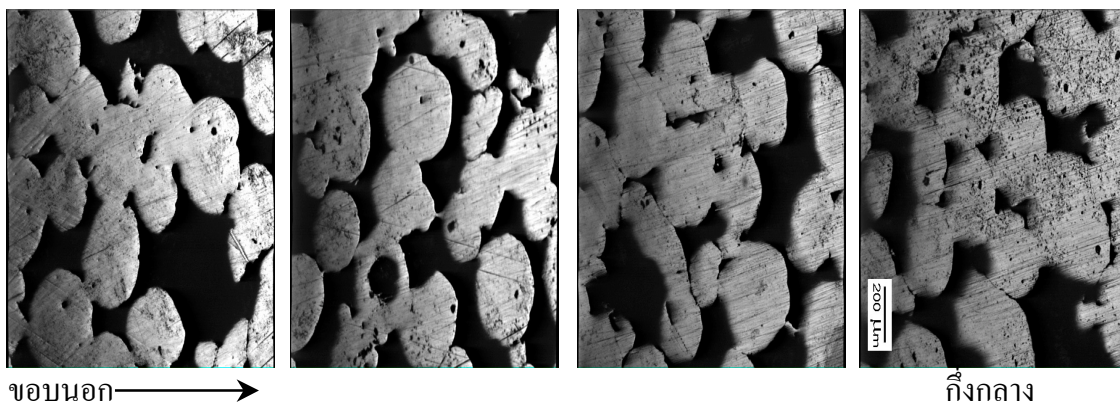


ขอบนอก →

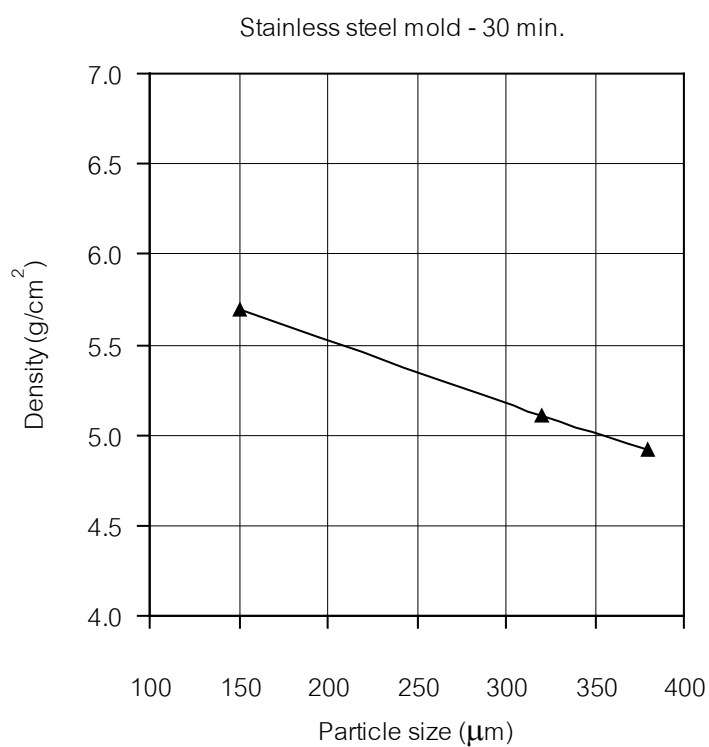
← กึ่งกลาง

รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 320 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม

ผิวหน้าของชิ้นงาน



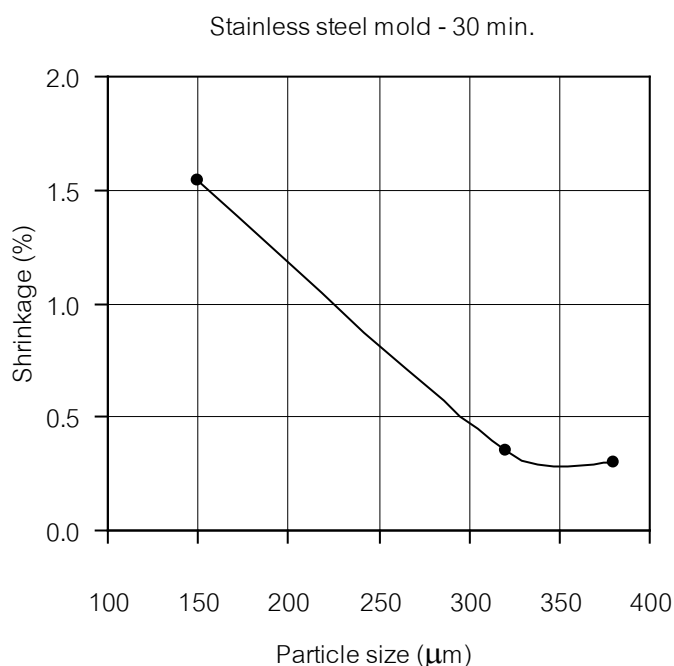
รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 380 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผงนิก
900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 3.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม
อุณหภูมิอบผงนิก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.1.2 อัตราการหดตัว ขนาดของอนุภาคจะส่งผลต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับในสภาวะเดียวกันดังรูปที่ 3.6 ชิ้นงานทั้งสามขนาดอบผงนิกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำจากอนุภาคขนาด 320 และ 380 ไมโครเมตรมี

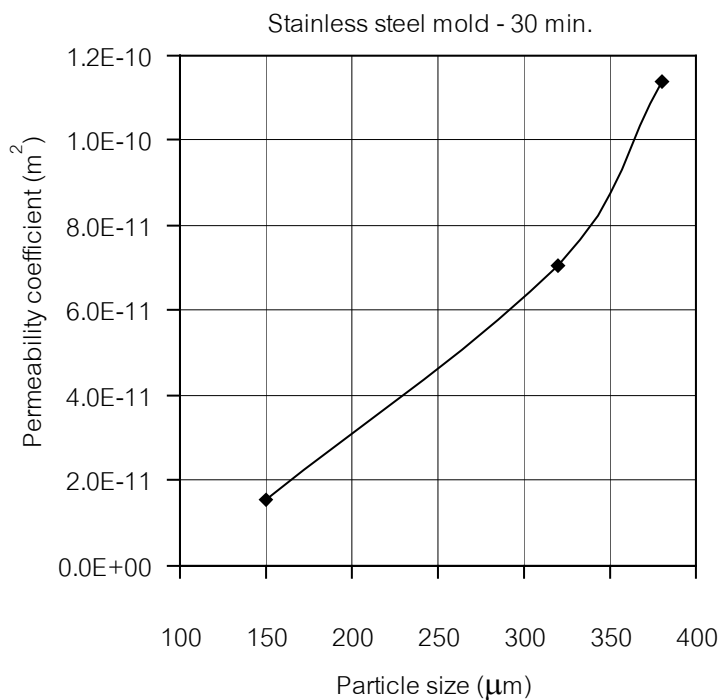
อัตราการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน ส่วนที่ทำจากอนุภาคขนาด 150 ไมโครเมตร จะมีอัตราการหดตัวที่สูงกว่าเนื่องจากการอบผนึกจะแปรตามขนาดของอนุภาค เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงจะให้ผลการอบผนึกเร็วขึ้น อุณหภูมิมีผลมากต่อการอบผนึก ส่วนเวลาจะมีผลน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิและขนาดอนุภาคเมื่อมีการ bulk transport มีผลทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) ซึ่งประมาณได้จากคอคอด (German, 1994)



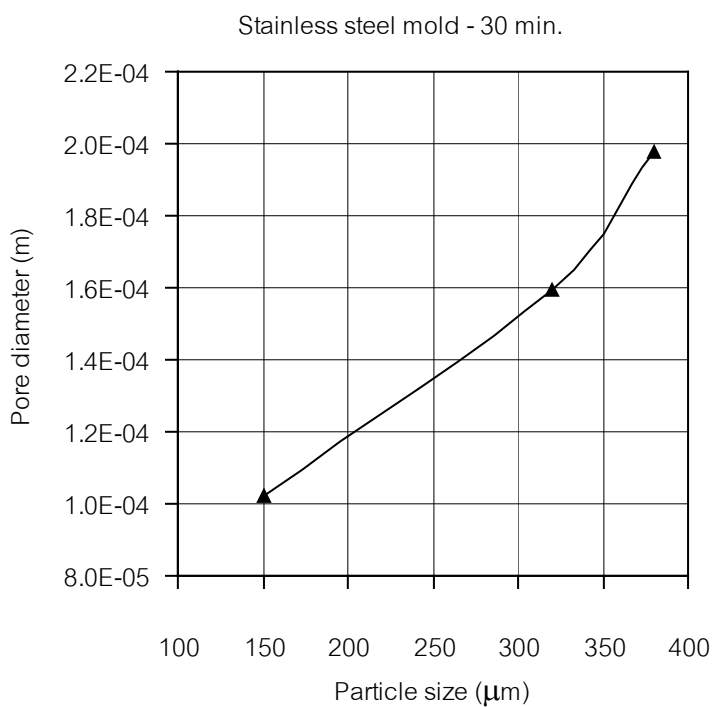
รูปที่ 3.6 อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.1.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ ขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโดยตรง จากรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผงอนุภาคมีขนาดโตขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศก็จะสูงขึ้นตามเช่นกัน เนื่องจากเมื่ออนุภาคโตขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคก็โตขึ้น การกระจายของรูพรุนก็มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความหนาแน่น

3.1.4 ขนาดของรูพรุนโตสุด ขนาดของรูพรุนโตสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้นั้น ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากขนาดของผงอนุภาคเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน คือ เมื่อผงอนุภาคโตขึ้นขนาดรูพรุนโตสุดก็จะมีขนาดโตขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

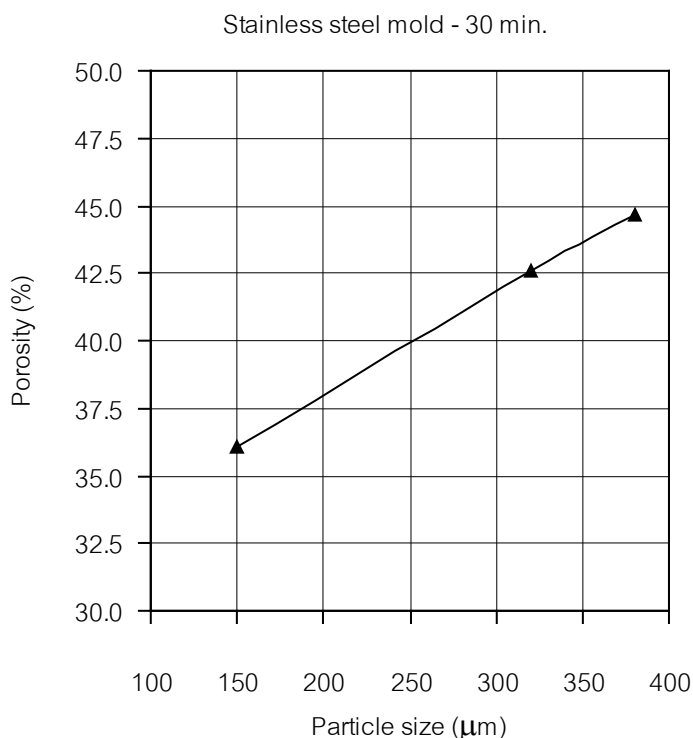


รูปที่ 3.7 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



รูปที่ 3.8 ขนาดรูพรุน โดสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

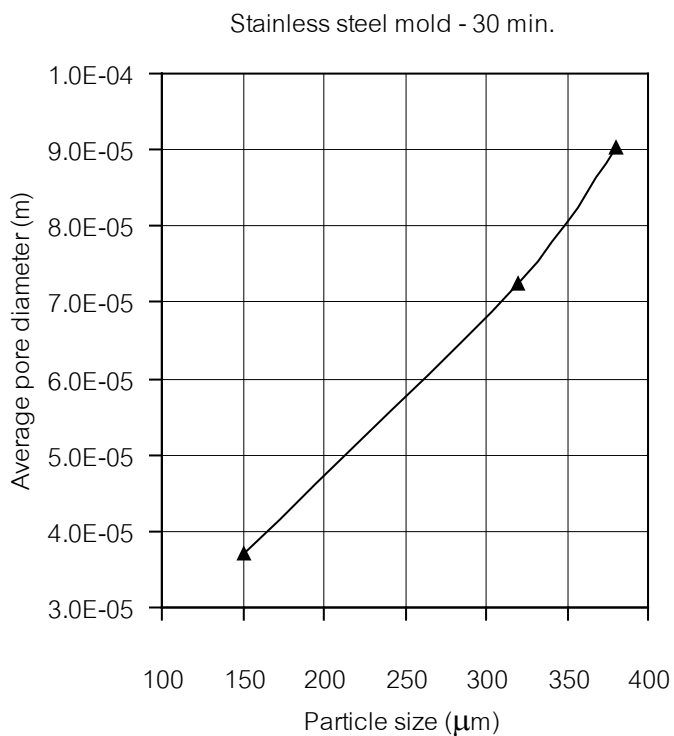
3.1.5 อัตราความพรุน อัตราความพรุนในชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นขนาดของอนุภาคจะมีผลโดยตรง จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อผงโลหะมีขนาดโตขึ้นอัตราความพรุนในชิ้นงานที่ผลิตได้ก็เพิ่มขึ้นตามในสัดส่วนที่ค่อนข้างจะคงที่ เนื่องจากเมื่ออนุภาคโตขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคก็โตขึ้น ความพรุนก็มากขึ้น



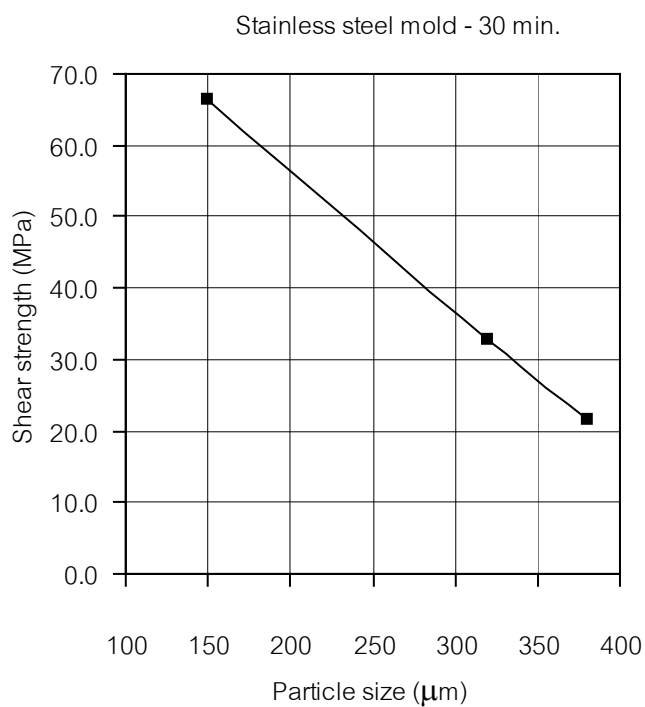
รูปที่ 3.9 อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.1.6 ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้นั้น ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากขนาดของผงอนุภาค เช่นเดียวกับอัตราความพรุน คือ เมื่อผงอนุภาคโตขึ้นขนาดรูพรุนเฉลี่ยก็จะมีขนาดโตขึ้นในสัดส่วนที่ค่อนข้างจะคงที่ เนื่องจากเมื่ออนุภาคโตขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคก็โตขึ้น ขนาดรูพรุนก็โตขึ้นเช่นกัน

3.1.7 ความแข็งแรงเหนือน ความแข็งแรงเหนือนของชิ้นงานที่ทำจากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาดในสภาวะเดียวกันนั้นจะมีค่าความแข็งแรงเหนือนที่ต่างกันซึ่งมีค่าผกผันกับขนาดอนุภาค เมื่อขนาดอนุภาคโตขึ้นความแข็งแรงจะเริ่มลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi และคณะ (2004) เนื่องจากชิ้นงานที่ทำจากผงขนาดเล็กจะมีความหนาแน่นสูงกว่าชิ้นงานที่ทำจากผงขนาดใหญ่กว่า



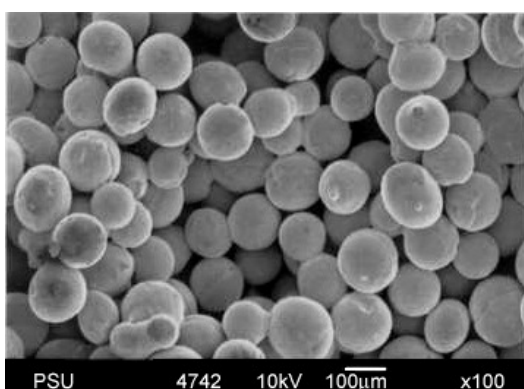
รูปที่ 3.10 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



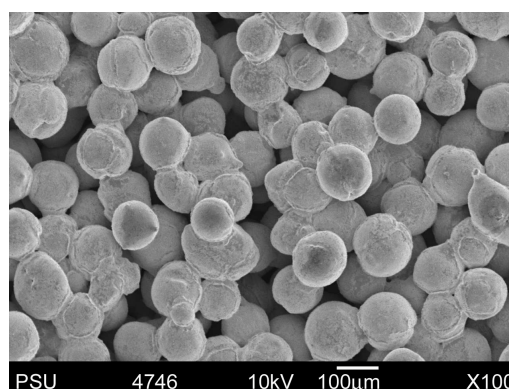
รูปที่ 3.11 ความแข็งแรงเฉือนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลา

3.2.1 ลักษณะวิทยา (Morphology) ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาด จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM จากรูปที่ 3.12 พบว่าชิ้นงานที่ทำจากผงขนาด 150 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถอบขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส ได้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เกิดการ over sintering ขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการอบขึ้นจะเกิดขึ้นได้เร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะเพิ่มจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้น และ available site ขณะอบขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็ว

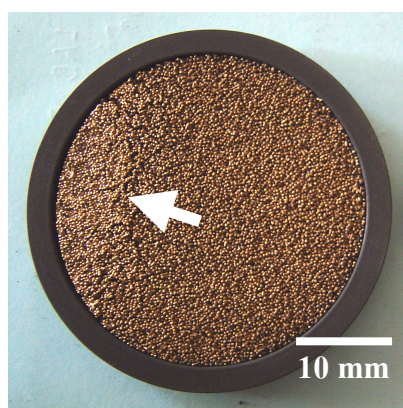


(ก) อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส



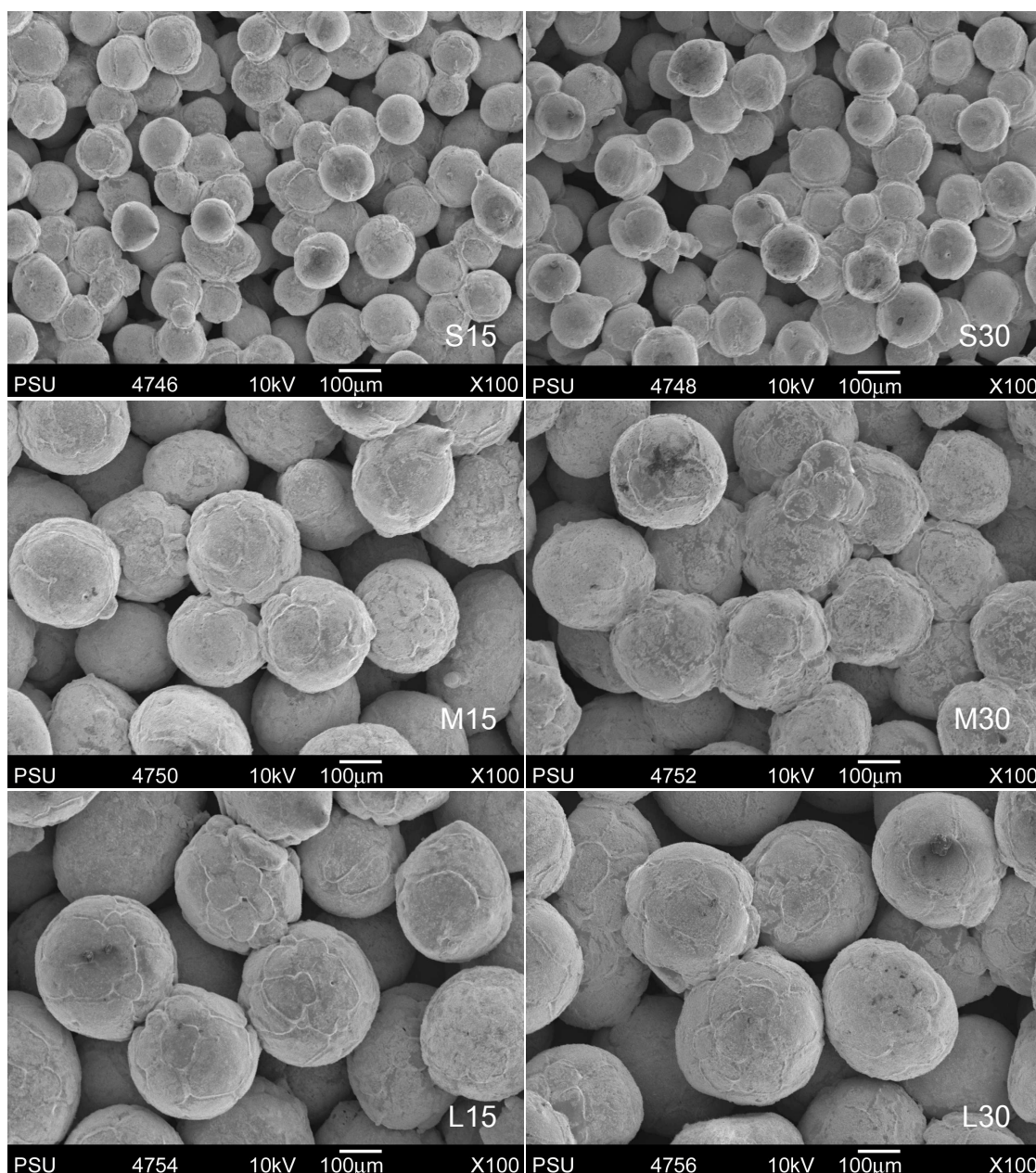
(ข) อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.12 ภาพ SEM เปรียบเทียบชิ้นขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร
อบขึ้นที่อุณหภูมิต่างกัน เวลา 15 นาที



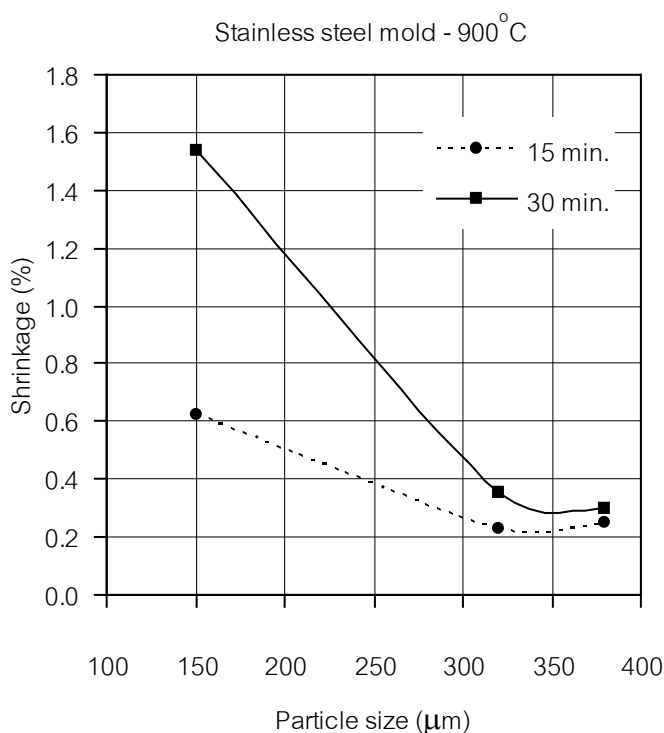
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่เกิดการหลอมตัวของอนุภาคที่อุณหภูมิสูง

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผลิตจากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาด อบผนึกที่อุณหภูมิเดียวกันแตกต่างกันที่ เวลาในการอบผนึก จะเห็นได้ว่าผงบรอนซ์จะเริ่มหลอมติดกันมากขึ้น ดังรูปที่ 3.14



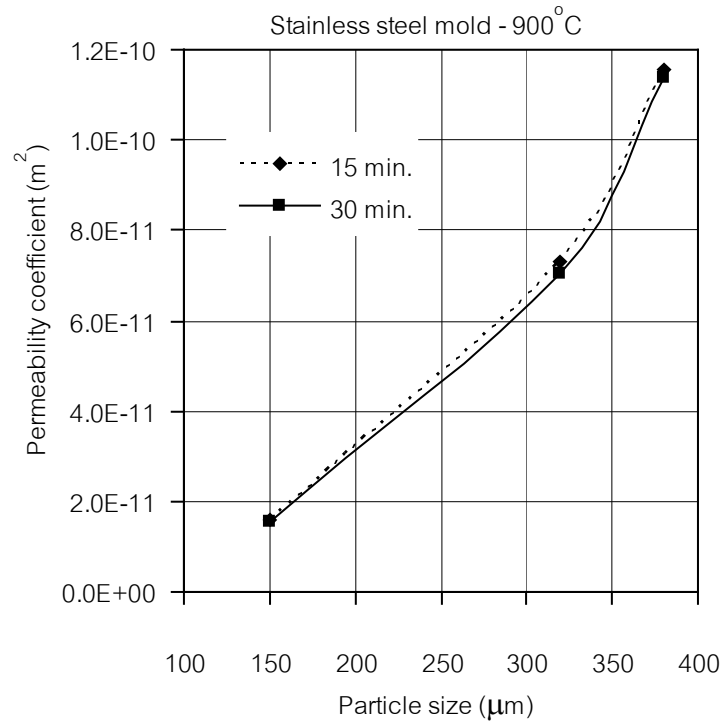
ภาพที่ 3.14 ภาพ SEM ของชิ้นงานทั้งสามขนาด เเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลาเผาแช่ 15 นาที (S15, M15, L15) และเวลาเผาแช่ 30 นาที (S30, M30, L30)

3.2.2 อัตราการหดตัว อุณหภูมิและเวลาที่มีอิทธิพลต่ออัตราการหดตัว เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นอนุภาคจะหลอมติดกันมากขึ้น ดังคำกล่าวของ German (1994) “ในทุกกรณีการอบผืนก็ขึ้นกับอุณหภูมิในรูปแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบต่ออัตราการอบผืน” และ “การอบผืนเป็นเวลานานทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการแพร่ การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุนต่างเป็นกระบวนการที่กระตุ้นได้ด้วยความร้อน วัสดุส่วนใหญ่อัตราเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะเฉพาะ (เช่น ขนาดเกรน ขนาดรูพรุน และระยะห่างระหว่างรูพรุน) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะอบผืน ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อกระบวนการอบผืน” รูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กจะหดตัวได้มากเมื่อเพิ่มเวลาในการอบผืน



รูปที่ 3.15 อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผืน 900 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบที่เวลาอบผืน 15 และ 30 นาที

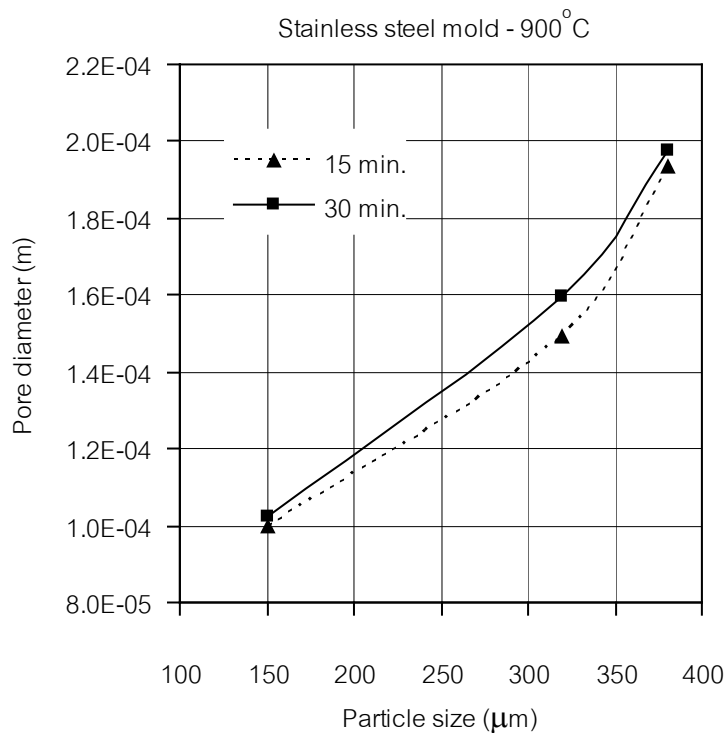
3.2.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ เวลาที่ใช้ในการอบผนึกไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโดยตรง รูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาให้มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศไม่ได้แตกต่างกันมากนัก



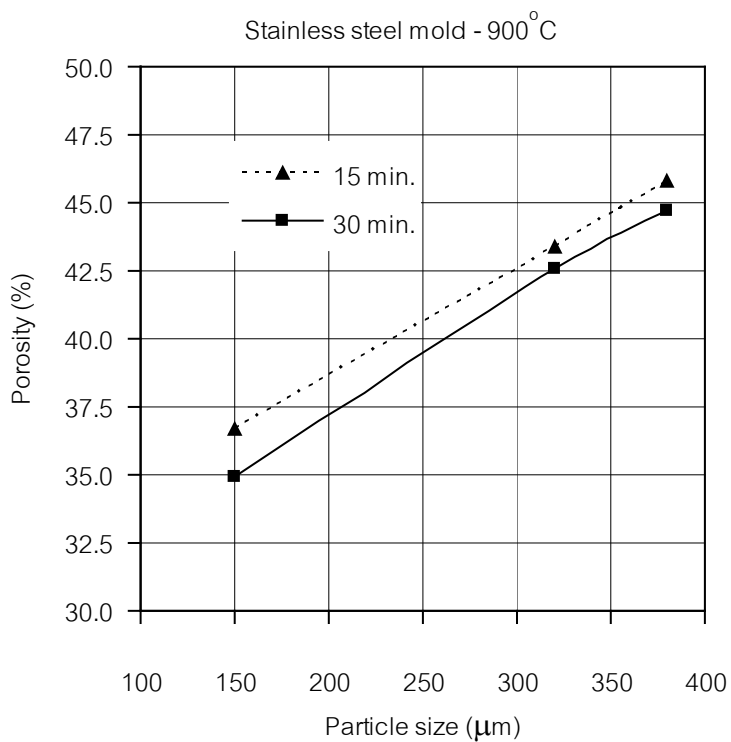
รูปที่ 3.16 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที

3.2.4 ขนาดรูพรุนโตสุด เวลาที่ใช้ในการอบผนึกมีผลกระทบต่อขนาดของรูพรุนโตสุด ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานไม่มากนัก จากรูปที่ 3.17 เมื่อเพิ่มเวลาให้มากขึ้นขนาดรูพรุนโตสุดก็จะมีขนาดโตขึ้นเล็กน้อย

3.2.5 อัตราความพรุน เวลาที่ใช้ในการอบผนึกส่งผลเล็กน้อยต่ออัตราความพรุนในชิ้นงานที่ผลิตได้ รูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบผนึกให้นานขึ้น อัตราความพรุนในชิ้นงานที่ผลิตได้ก็ลดลงตามในสัดส่วนที่ค่อนข้างจะคงที่ และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



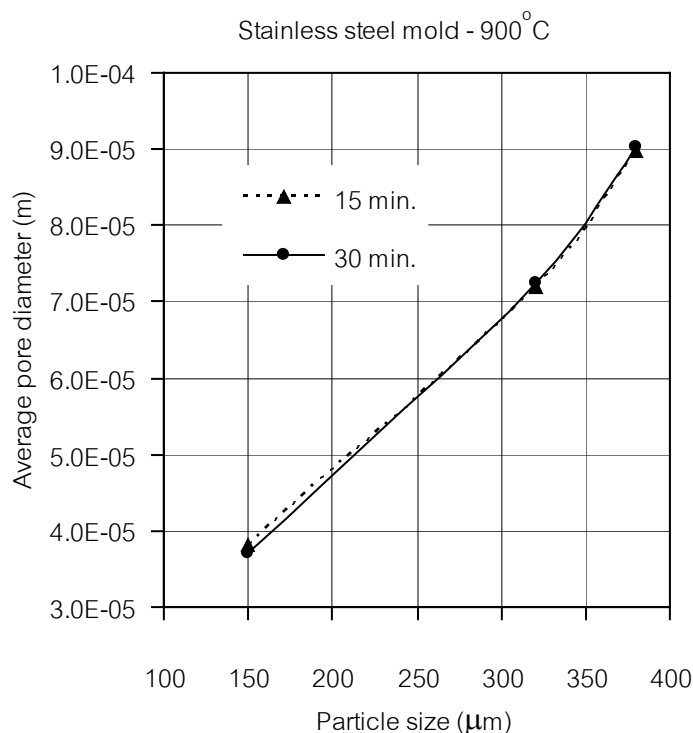
รูปที่ 3.17 ขนาดรูพรุน โตสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 15 และ 30 นาที



รูปที่ 3.18 อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม

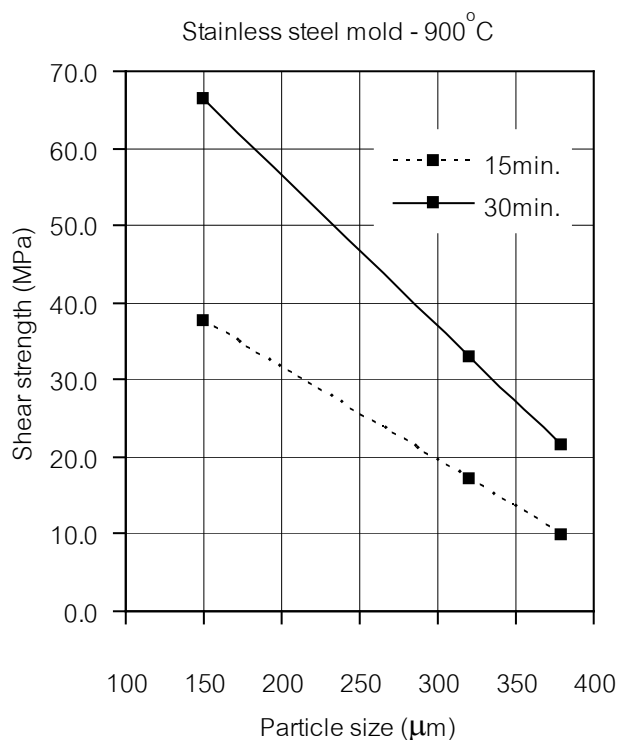
อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที

3.2.6 ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย ที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 3.19 จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการอบผนึกไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้



รูปที่ 3.19 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที

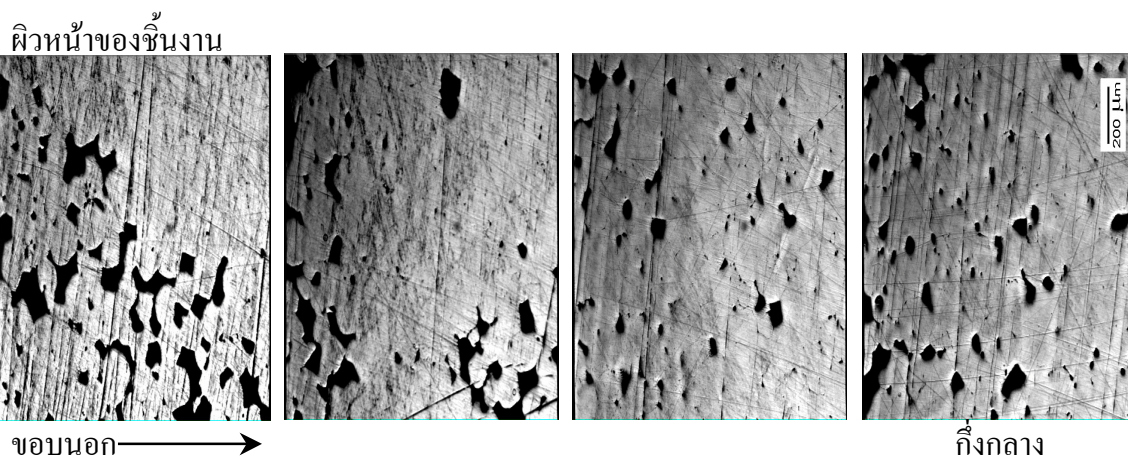
3.2.7 ความแข็งแรงเหนือน ค่าความแข็งแรงเหนือนของชิ้นงานที่ทำจากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาดเมื่ออบผนึกที่อุณหภูมิเดียวกันแต่เวลาที่ใช้ต่างกันจะมีค่าความแข็งแรงเชิงกลที่ต่างกัน เนื่องจากเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ผงบรอนซ์เริ่มหลอมติดกันมากขึ้น มีพันธะการเกาะติดที่แน่นขึ้น ซึ่งตรงกับคำกล่าวของ German (1994) “ถ้าต้องการให้สมบัติ และความหนาแน่นเปลี่ยน ต้องอบผนึกเป็นเวลานานซึ่งกลไกต่างๆ นี้เป็นกระบวนการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิคงที่ (Thermally activated processes) (เช่น อัตราการแพร่, การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุน)” ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นดังรูปที่ 3.20



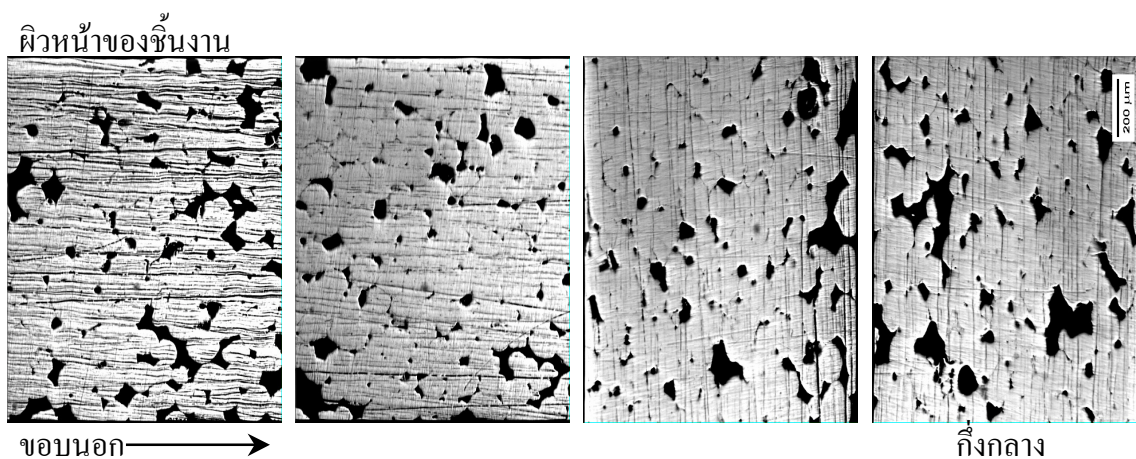
รูปที่ 3.20 ความแข็งแรงเฉือนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.3 อิทธิพลของแม่พิมพ์

3.3.1 สัณฐานวิทยา (Morphology) ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อวิเคราะห์ภาพการกระจายของรูพรุนในชิ้นงานที่ทำจากผงอนุภาคขนาด 150 ไมโครเมตร อบผนึกที่สภาวะเดียวกันแต่ใช้แม่พิมพ์ต่างกัน (รูปที่ 3.21 และ 3.22) ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ทำจากแม่พิมพ์กราไฟต์มีการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอกว่า เมื่อดูที่บริเวณผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าชิ้นงานจะมีความแน่นตัวสูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตในแม่พิมพ์กราไฟต์ นอกจากนี้ชิ้นงานจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมจะติดกับแม่พิมพ์และแกะออกจากแม่พิมพ์ได้ยากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากแม่พิมพ์กราไฟต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นโลหะจะเกิดการสะสมความร้อน และเกิดการแพร่ระหว่างแม่พิมพ์และผงบรอนซ์ สัดส่วนของรูพรุนชิ้นงานจากแม่พิมพ์กราไฟต์จะมีมากกว่าชิ้นงานที่ทำจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.21 การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบพ่นิก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



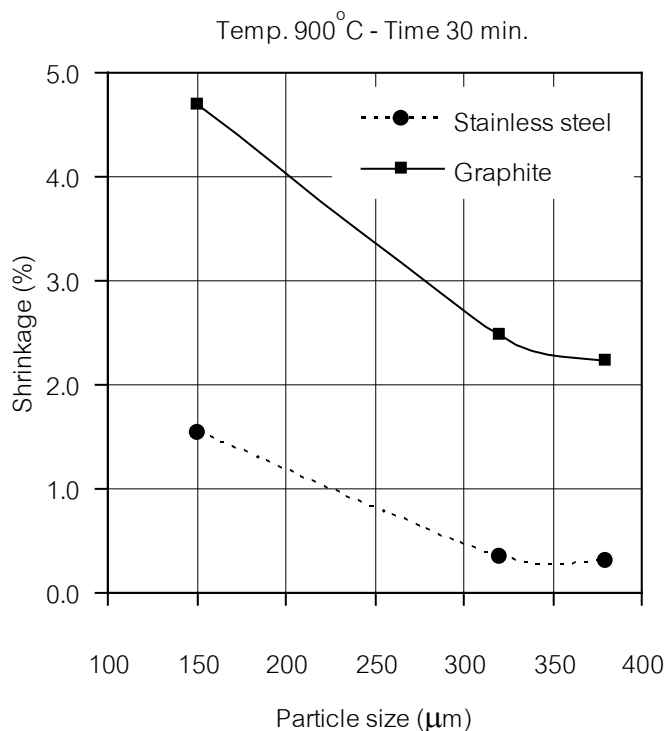
รูปที่ 3.22 การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร ผลิตจากแม่พิมพ์กราไฟต์ อุณหภูมิอบพ่นิก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

ตารางที่ 3.2 ค่าการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานจากผงขนาด 150 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบพ่นิก 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมและแม่พิมพ์กราไฟต์

Average	% Pore	% Solid
Mold		
Stainless steel	8.51	91.49
Graphite	18.05	81.95

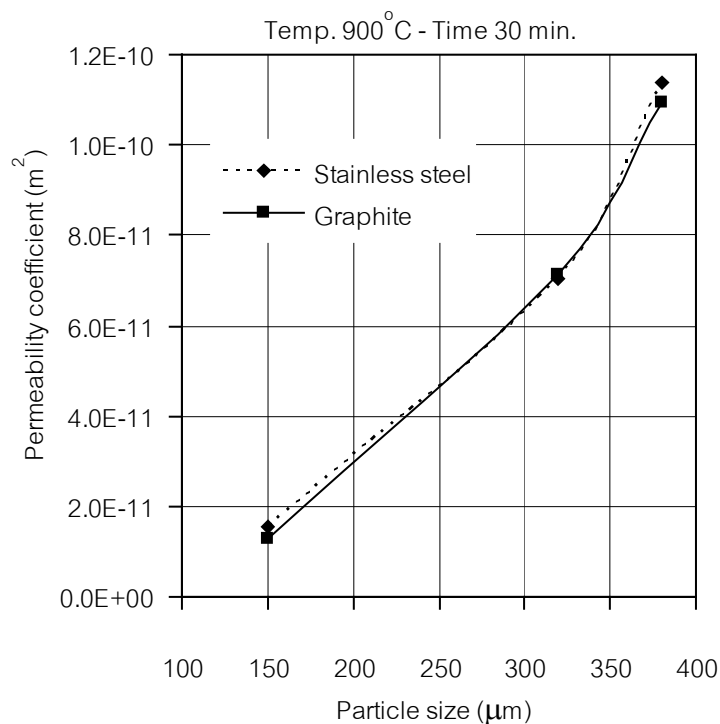
3.3.2 อัตราการหดตัว ชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์จะมีค่าอัตราการหดตัวที่สูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม (รูปที่ 3.23) เนื่องจากกราไฟต์เป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้นแม่พิมพ์กราไฟต์จึงสามารถส่งผ่านความร้อนไปยังผงบรอนซ์ได้ดีกว่าแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผลิตได้ในแม่พิมพ์กราไฟต์มีอัตราการหดตัวสูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม

3.3.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ ชนิดของแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโดยตรง จากรูปที่ 3.24 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศในชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์ทั้งสองมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน และมีแนวโน้มที่คล้ายกัน

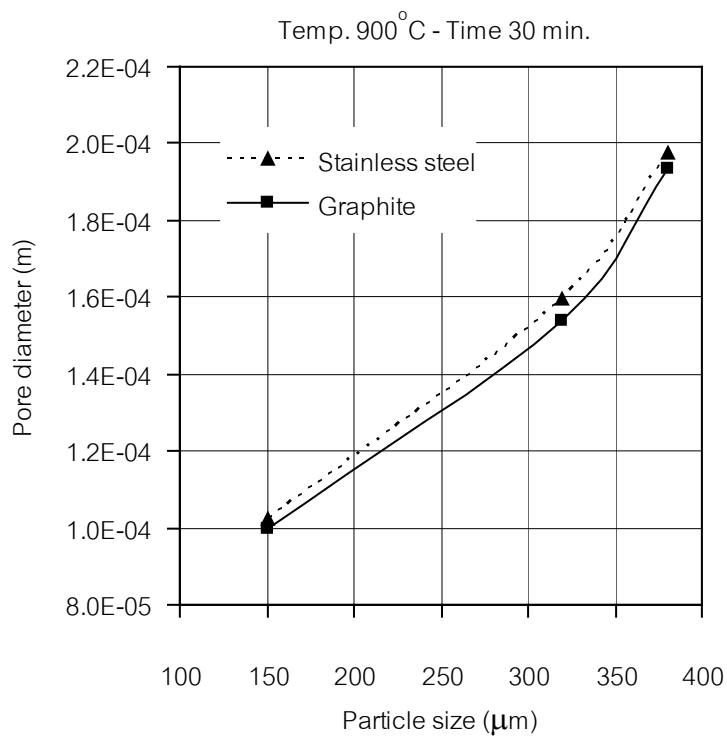


รูปที่ 3.23 อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาด อบสนิกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระหว่างแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์

3.3.4 ขนาดรูพรุนโตสุด ชนิดของแม่พิมพ์ไม่ได้ส่งผลมากนักต่อขนาดของรูพรุนโตสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้นั้น ในรูปที่ 3.25 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีขนาดโตกว่าชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์



รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศในชิ้นงานทั้งสามขนาดระหว่างแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์

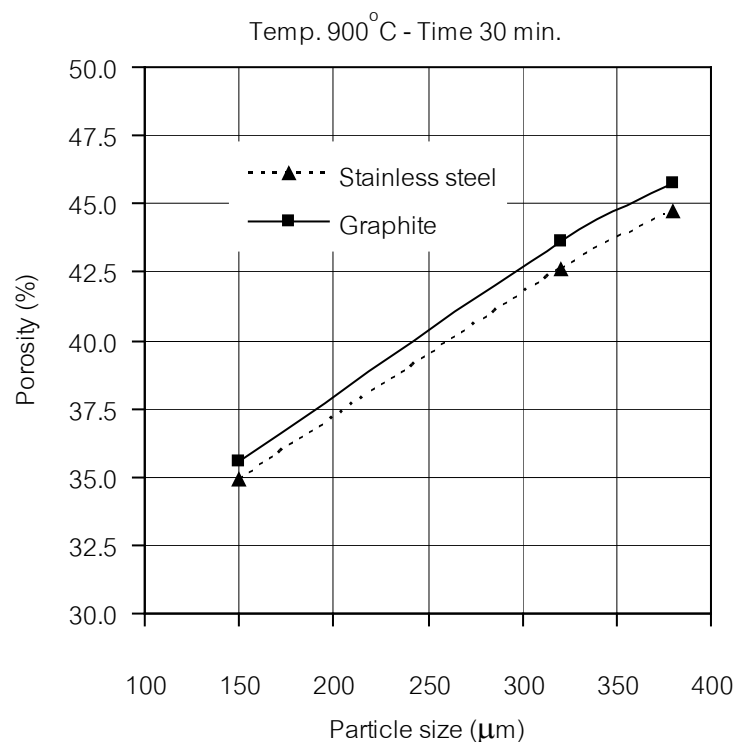


รูปที่ 3.25 ขนาดรูพรุน โตสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์

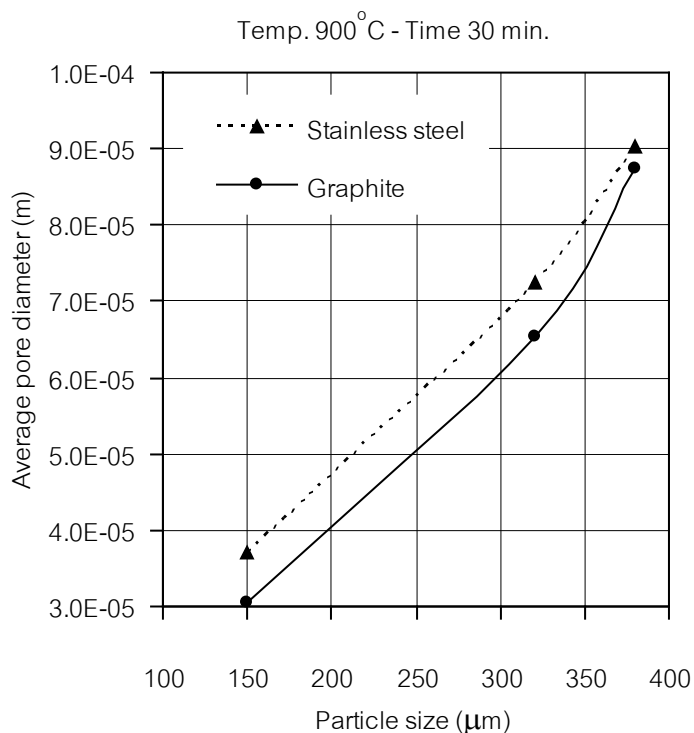
3.3.5 อัตราความพรุน ในชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามชนิดของแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.26 จะเห็นได้ว่าอัตราความพรุนจากแม่พิมพ์ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีแนวโน้มของเส้นกราฟไปในรูปแบบเดียวกัน

3.3.6 ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย ที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 3.27 จะเห็นได้ว่าขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้นั้น ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากชนิดของแม่พิมพ์ ในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเฉลี่ยรูพรุนที่สูงกว่าชิ้นงานที่ทำได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์ เนื่องจากคุณลักษณะของกราไฟต์เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดีและส่งผ่านความร้อนไปยังผงบรอนซ์ได้ทั่วถึงทำให้ชิ้นงานมีการหดตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้ได้รูพรุนที่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

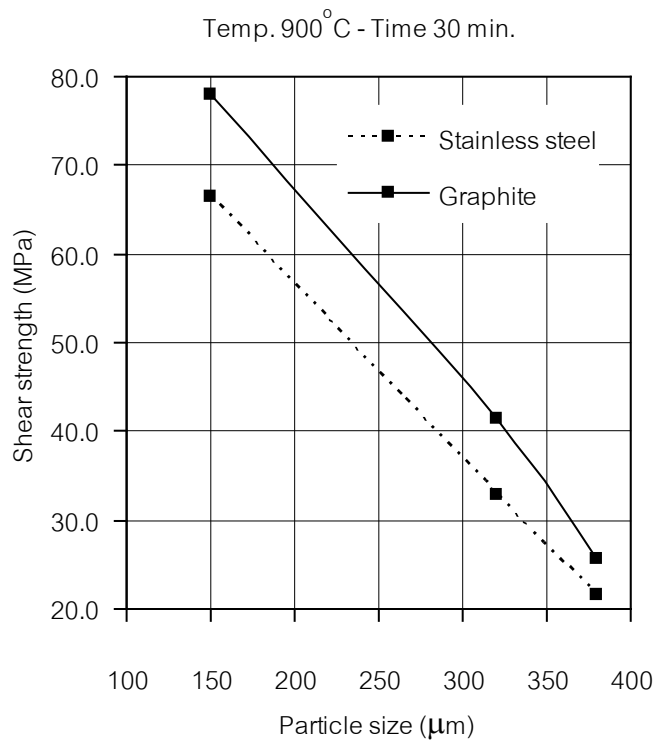
3.3.7 ความแข็งแรงเฉือน ของชิ้นงานที่ทำจากผงบรอนซ์ทั้งสามขนาดที่ผลิตในสถานะเดียวกันนั้น อิทธิพลของแม่พิมพ์ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงเชิงกลโดยตรง ชิ้นงานที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์ กราไฟต์จะมีค่าความแข็งแรงเชิงกลที่สูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 3.28 เนื่องจากชิ้นงานในแม่พิมพ์กราไฟต์มีอัตราการหดตัวสูงกว่าชิ้นงานจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 3.26 อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์



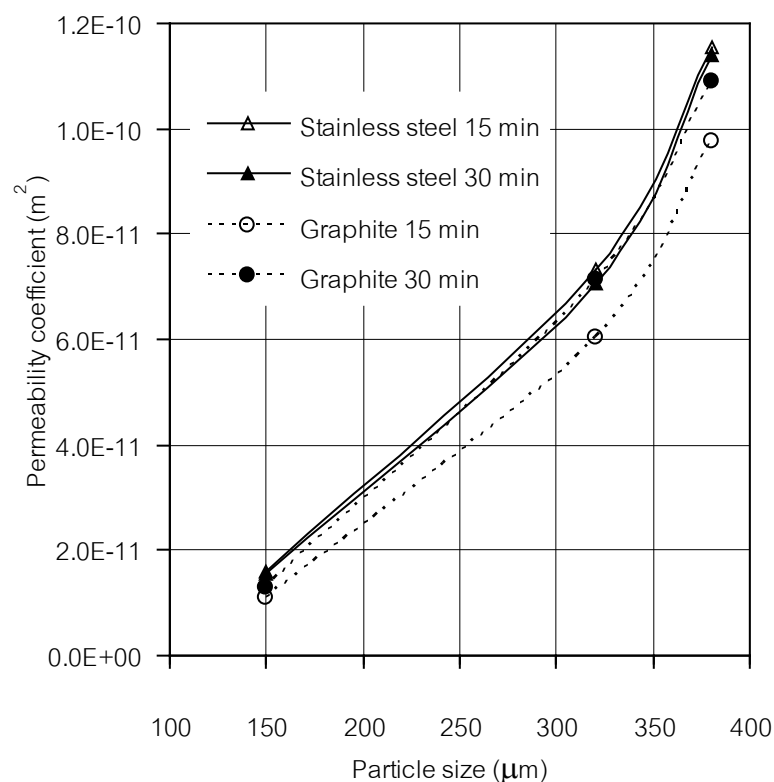
รูปที่ 3.27 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์



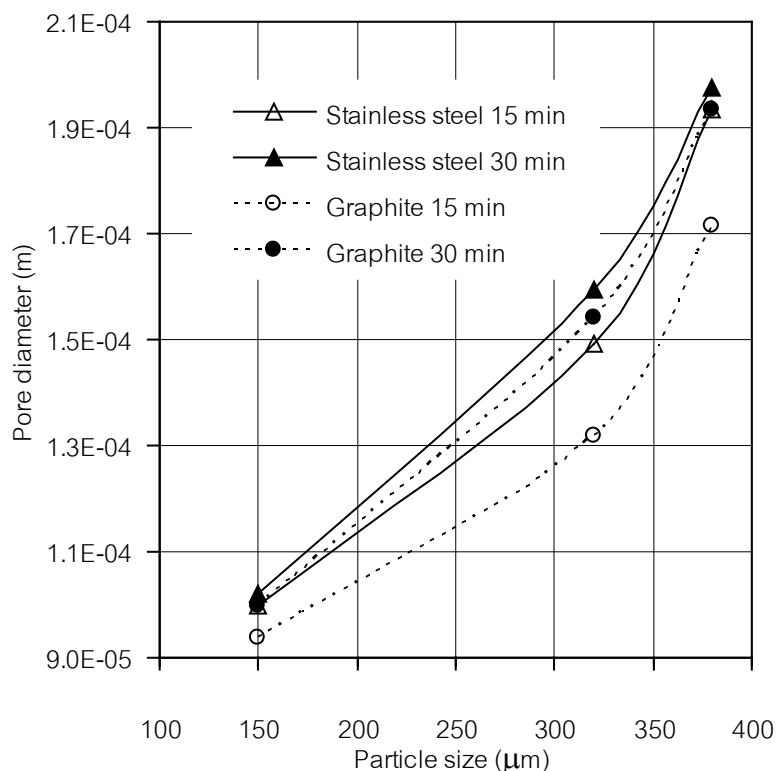
รูปที่ 3.28 ความแข็งแรงเชิงกลเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์

การทดลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดของอนุภาคจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของโลหะบรอนซ์พูนที่ผลิตได้ ซึ่งผงบรอนซ์ที่มีขนาดอนุภาคโตจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบผนึกที่สูงกว่าผงบรอนซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดโตจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อยกว่าและอนุภาคขนาดเล็กสามารถอบผนึกได้เร็วกว่าขนาดโต เนื่องจากจะเกิดการแพร่ที่ผิว (Surface diffusion) และการแพร่ที่ขอบเกรน (Grain boundary diffusion) ได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดโต

ปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ และขนาดของรูพรุนในตัวกรองที่ผลิตได้นั้น ได้แก่ขนาดของผงบรอนซ์ที่ใช้ในการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 ซึ่งแสดงภาพรวมของผลการทดลองที่ได้ และผลที่ได้นี้จะตรงกับการรายงานการวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นของ Choi และคณะ (2004) “การเปลี่ยนขนาดผงวัสดุเป็นวิธีการที่ได้ผลที่สุดเมื่อต้องการควบคุมขนาดรูพรุนของตัวกรอง” และผลการทดลองของ Heikkinen และ Harley (2000) ที่กล่าวว่า “การซึมผ่านของอนุภาคจะลดลงเมื่อขนาดรูพรุนลดลงในขณะที่ความหนาเท่ากัน”



รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที

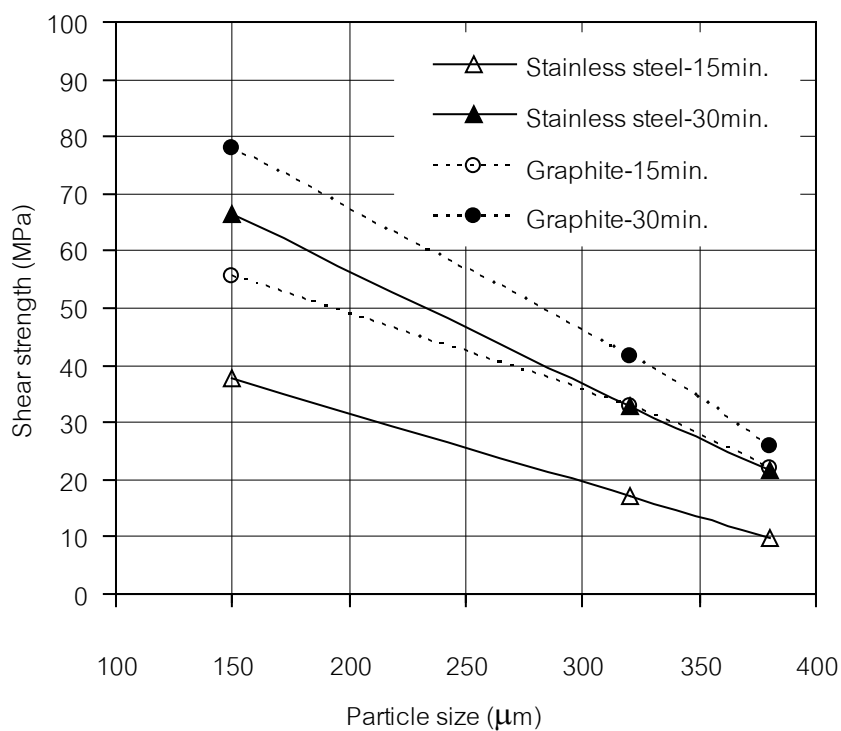


รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบค่ารูพรุน โดสุดของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบพ่นิก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบพ่นิก 15 และ 30 นาที

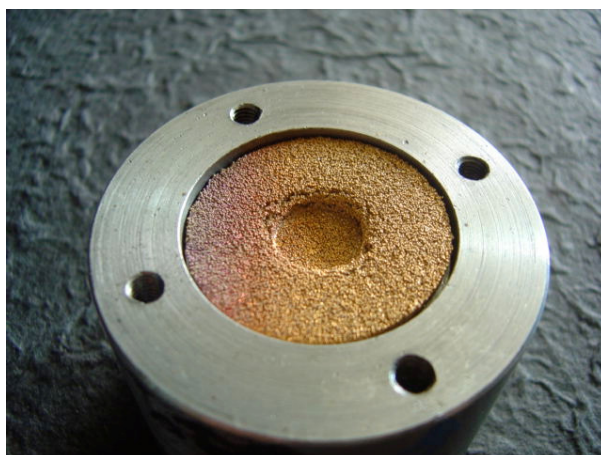
ค่าความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานบรอนซ์พ่นิกที่ผลิตได้จะได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ส่วนเวลาในการอบพ่นิกและชนิดของแม่พิมพ์เป็นปัจจัยรองลงมา ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับผลการวิจัยของ Choi และคณะ (2004) ที่ว่า “การเพิ่มขนาดของผงโลหะก็มีขีดจำกัดเช่นกัน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของอนุภาคนั้นจะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคที่ลดลง จึงส่งผลให้ตัวกรองแตกหัก” และงานวิจัยของ Wang และคณะ (2001) “จะเป็นการลดลงเชิงเส้นของความเค้นครากเมื่อความพ่นิกในชิ้นงานเพิ่มขึ้น” ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 3.32

การทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาค เวลาในการอบพ่นิก และชนิดของแม่พิมพ์มีอิทธิพลต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงานที่ผลิตได้ ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์ที่เวลาอบพ่นิก 30 นาที จะมีอัตราการหดตัวมากที่สุด ดังรูปที่ 3.33 ทั้งนี้เนื่องจากแม่พิมพ์กราไฟต์มีสมบัติการเป็นตัวนำความร้อนที่ดี และยังไม่เกิดปฏิกิริยาการแพร่กับผงบรอนซ์

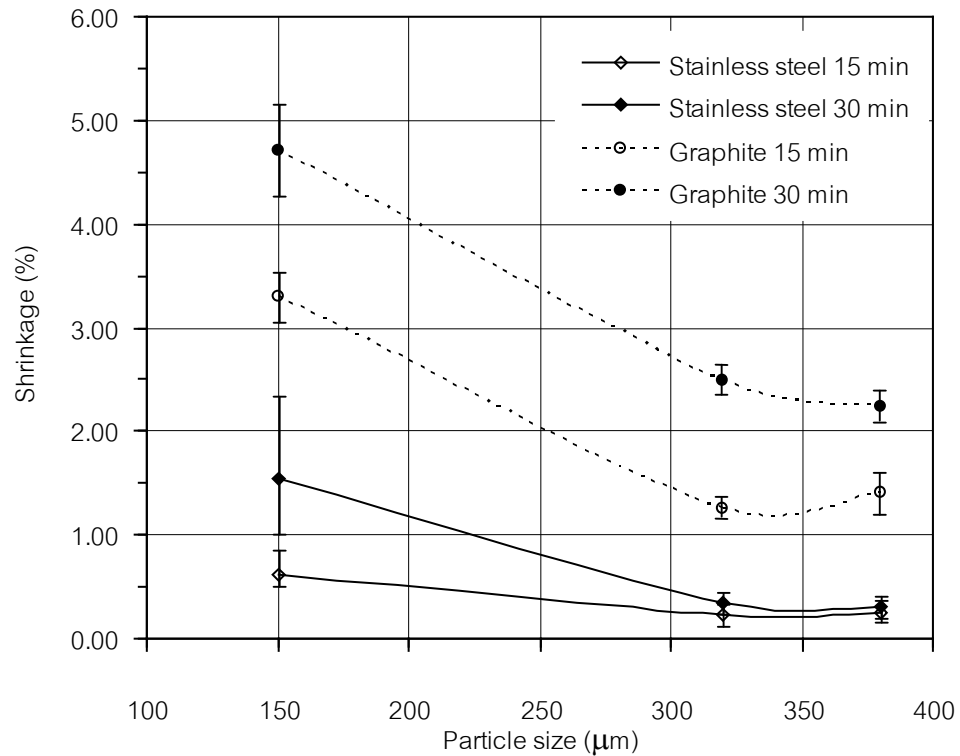
กล่าวโดยสรุปได้ว่าเวลาเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและขนาดอนุภาค



รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบพ่น 900 องศาเซลเซียส เวลาอบพ่น 15 และ 30 นาที



รูปที่ 3.32 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือน



รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบอัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบพูนที่ 900 องศาเซลเซียส เวลาอบพูนที่ 15 และ 30 นาที

3.4 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่ได้กับชิ้นงานในท้องตลาด

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานบรอนซ์พูนที่ผลิตได้ ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 กับชิ้นงานของบริษัท GKN Sinter Metals ตารางที่ 3.5 จะพบว่าชิ้นงานที่ผลิตได้อยู่ในเกณฑ์เดียวกันกับชิ้นงานของท้องตลาด

ตารางที่ 3.3 สมบัติของชิ้นงานที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม

Particle size (μm)	Porosity (%)	Permeability coefficients		Average CCE pore diameter (μm)	Shear strength (MPa)
		min.(m ²)	max.(m ²)		
150	36	1.12×10^{-11}	1.75×10^{-11}	33 – 39	38 – 65
320	44	6.09×10^{-11}	9.17×10^{-11}	67 – 80	13 – 33
380	46	8.35×10^{-11}	1.35×10^{-10}	85 – 90	10 – 37

ตารางที่ 3.4 สมบัติของชิ้นงานที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์

Particle size (μm)	Porosity (%)	Permeability coefficients		Average CCE pore diameter (μm)	Shear strength (MPa)
		min.(m^2)	max.(m^2)		
150	40	1.02×10^{-11}	1.76×10^{-11}	29 – 36	35 – 78
320	45	5.56×10^{-11}	8.91×10^{-11}	65 – 79	16 – 41
380	46	8.61×10^{-11}	1.09×10^{-10}	80 – 88	14 – 38

ตารางที่ 3.5 สมบัติของชิ้นงานของบริษัท GKN Sinter Metals

Filter type	Porosity (%)	Permeability coefficients		Average CCE pore diameter (μm)	Shear strength (MPa)
		α (10^{-12} m^2)	β (10^{-7} m^2)		
SIKA-B 8	29	2	52	11	130
SIKA-B 12	32	6	64	16	120
SIKA-B 20	38	10	83	28	110
SIKA-B 30	36	14	89	33	100
SIKA-B 45	41	43	144	55	90
SIKA-B 60	37	50	202	62	90
SIKA-B 80	42	114	282	90	80
SIKA-B 100	42	127	406	98	70
SIKA-B 120	40	230	633	120	60
SIKA-B 150	44	248	643	141	40
SIKA-B 200	48	463	1046	206	30