



วัสดุผสม ทองแดง - ดีบุก สำหรับหัวกระสุนชนิดแตกหักได้
COPPER - TIN COMPOSITE FOR FRANGIBLE BULLETS

ศ ศาลา ครั้วจัตุรัส

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2550

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

วัสดุผสม ทองแดง - ดีบุก สำหรับหัวกระสุนชนิดแตกหักได้
COPPER - TIN COMPOSITE FOR FRANGIBLE BULLETS

ศ ศาลา ครวัจตุรัส

**วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์**

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2550

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

วัสดุผสม ทองแดง – ดีบุก สำหรับหัวกระสุนชนิดแตกหักได้

ศ ศาลา ครวัจตุรัส

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. จุติพร ถนนอมศิลป์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เรืองเดช ชงศรี)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือจากคณะอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชุลีพร ถนอมศิลป์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ และที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. เรืองเดช ธงศรี และคณะผู้วิจัยหน่วยวิจัยและพัฒนาโลหะผงวิทยา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผู้ซึ่งให้ความกรุณาสับสนุนเครื่องมือวัสดุ อุปกรณ์ อำนวยความสะดวก และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้บัญชาการทหารอากาศ และผู้บังคับบัญชาทุกระดับชั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พล.อ.ท. นันทพล บุญญะเสนา อดีตผู้บัญชาการหน่วยบัญชาการอากาศโยธินกองบัญชาการยุทธทางอากาศ น.อ. สุชิน วรรณะโรจน์ ผู้บังคับการกรมปฏิบัติการพิเศษ น.ท. ศรัณย์ สมคะเน และ น.ท. คัชโกชน จ่าปะลัง ผู้บังคับกองพันปฏิบัติการพิเศษที่ 1 ที่ให้โอกาสให้กระผมลาราชการเพื่อศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณสำหรับกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ ความสนับสนุน ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจากคุณพ่อ คุณแม่ สมาชิกครอบครัวผู้เขียน เพื่อนและน้องๆ บัณฑิตศึกษา สาขาวัสดุศาสตร์ และสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งมีส่วนอย่างยิ่ง เพื่อช่วยให้การศึกษาและการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วง และทุกแรงใจที่ผลักดันให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลของการศึกษาครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อองค์กรที่เกี่ยวข้องและผู้ที่เกี่ยวข้องต่อไป หากมีสิ่งผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เรืออากาศเอก ศ ศาลา ครัวจตุรัส

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	วัสดุผสม ทองแดง – ดิบบุก สำหรับหัวกระสุนชนิดแตกหักได้	
ชื่อผู้เขียน	เรืออากาศเอก ศ ศาลา ครัวจตุรัส	
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาวัสดุศาสตร์)	
คณะกรรมการที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ชวลีพร ถนอมศิลป์	ประธานกรรมการ
	อาจารย์ ดร. เรืองเดช ชงศรี	กรรมการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุผสมทองแดง-ดิบบุก เพื่อใช้ผลิตเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ โดยใช้ผงทองแดงที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $87\ \mu\text{m}$ และ $288\ \mu\text{m}$ ผสมกับผงดิบบุกขนาด $35\ \mu\text{m}$ อัตราส่วนทองแดงต่อดิบบุกโดยน้ำหนักที่ต่างกัน ได้แก่ 95 : 5 90:10 และ 85:15 อัดขึ้นรูปแบบแกนเดียว และขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 450 800 850 และ 900°C เป็นเวลา 45 นาที ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและทดสอบการแตกหักจากการยิงกระแทกเป้าแผ่นเหล็ก เทียบกับหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ที่มีใช้งานในปัจจุบัน ผลการทดลองพบว่า การใช้ผงทองแดงขนาดเล็ก ($87\ \mu\text{m}$) ให้ชิ้นงานที่มีสมบัติดีกว่าผงขนาดใหญ่ อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักผงทองแดงและดิบบุกที่ดีที่สุดคือ 90:10 ชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิสูง (800, 850, 900°C) มีสมบัติดีกว่าชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (450°C) การทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งผิว ความทนต่อการกระแทก เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขึ้นเทอร์ ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในช่วง 49.83 – 213.81 MPa ซึ่งอยู่ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ที่ใช้จริงในปัจจุบัน (31-310 MPa) ผลการทดสอบค่าความแข็งผิว และค่าความต้านทานแรงดึง มีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้ากลึงปืนและเป้าแผ่นเหล็ก นอกจากนี้ผลการทดสอบการแตกหักจากการยิงกระแทกเป้า พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C มีการแตกหักได้

คำสำคัญ : หัวกระสุนชนิดแตกหักได้ / วัสดุผสมทองแดง-ดิบบุก / สมบัติทางกล

Thesis Title	Copper - Tin Composite for Frangible Bullets	
Author	Capt. Sorshalar Kruachatturat	
Degree	Master of Science (Material Science)	
Supervisory Committee	Lecturer Dr. Chuleeporn Thanomsilp	Chairperson
	Lecturer Dr. Ruangdaj Tongsri	Member

ABSTRACT

Physical and mechanical properties of Copper-Tin composite as a material for frangible bullet were studied. Copper powder of two average particle sizes, 87 and 288 μm , were mixed with tin powder, particle size 35 μm , using different weight ratios as 95:5, 90:10, and 85:15. The mixtures were then molded into test pieces by a uniaxial compression pressed under a pressure of 275 MPa in order to get the green density of 7.5 g/cm^3 . By inspection of the general physical properties of sample e.g. surface cracks, dimensional change, and breakability, it was found that the samples using the smaller copper powder (87 μm) and high sintering temperature (900°C) had better qualities than the bigger copper powder (288 μm) and low sintering temperature (450°C). The weight ratio of copper: tin as 90:10 resulted in the best quality samples. By varying the sintering temperature to 800 850 and 900°C, the results from mechanical testing including tensile test, surface hardness and impact test showed that the mechanical properties of sample improved with increasing sintering temperature. The compressive strengths of the samples were found to be in the range of 49.83–213.81 MPa while those of commercial frangible bullets were 31–310 MPa. The surface hardness and tensile strength were compared with those of an iron steel and aluminium used for the gun barrel, practicing target and body of an aircraft. The results showed lower values for the samples which

indicated that the gun barrel, practicing target or body of and aircraft should not be damaged. Finally, the results from the firing test by a gas gun showed that only the samples sintered at 800°C were frangible.

Keyword : Frangible Bullet/ Copper-Tin Composite/ Mechanical Properties



สารบัญ

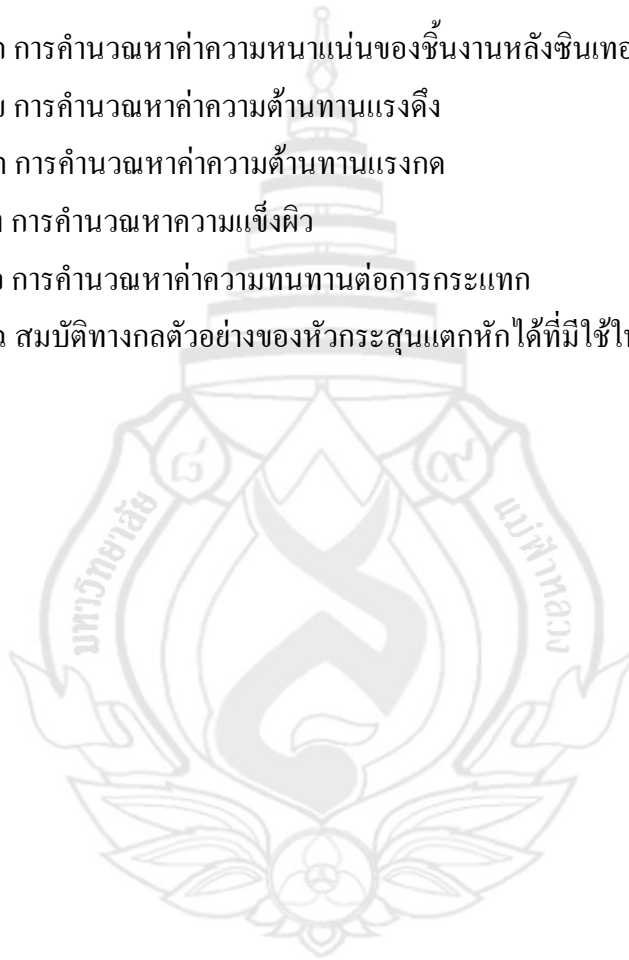
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระสุนชนิดแตกหักได้ (Frangible bullet)	4
2.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy method)	21
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปผงโลหะ	36
3 วิธีดำเนินการทดลอง	43
3.1 ผงโลหะ	43
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.3 การคัดแยกผงโลหะ	44
3.4 การวัดขนาดอนุภาคของผงโลหะ	45
3.5 การเตรียมชิ้นงาน	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	48
3.7 การทดสอบสมบัติทางกล	49
3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	51
3.9 การทดสอบการแตกหักจากการยิงเมื่อกระทบเป้าด้วยความเร็ว	51
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	53
4.1 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะทองแดงและดีบุก	53
4.2 ผลของอุณหภูมิซินเทอร์ต่อสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น	56
4.3 ผลของอุณหภูมิซินเทอร์	63
4.4 อุณหภูมิซินเทอร์ต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค	74
4.5 ผลการทดสอบสมบัติของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)	84
4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นวัสดุทดสอบเทียบกับกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)	87
4.7 การแตกหักจากการยิง	89
4.8 เปรียบเทียบพลังงานตกกระทบ	91
4.9 เปรียบเทียบสมบัติทางกลกับลากล้องปืนและแผ่นเป้า	94
4.10 เปรียบเทียบสมบัติทางกลกับลูมิเนียมนั่งลำตัวเครื่องบิน	95
4.11 เปรียบเทียบความต้านแรงกดกับกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบัน	96
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	98
5.1 สรุปผลการศึกษา	98
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป	99
บรรณานุกรม	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังขึ้นเทอร์	103
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึง	106
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่าความต้านทานแรงกด	108
ภาคผนวก ง การคำนวณหาความแข็งผิว	110
ภาคผนวก จ การคำนวณหาค่าความทนทานต่อการกระแทก	113
ภาคผนวก ฉ สมบัติทางกลตัวอย่างของหัวกระสุนแตกหักได้ที่มีใช้ในปัจจุบัน	115
ประวัติผู้เขียน	117



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงพลังงานและความเร็วของกระสุนปืนชนิดแตกหักได้กับกระสุนปืนชนิดหัวโลหะ	6
2.2 ขนาดกระสุน ความเร็วและพลังงานที่ปากลำกล้อง	7
2.3 สมบัติของหัวกระสุนที่ขึ้นกับอุณหภูมิซินเทอร์	13
2.4 ระดับการแตกหักของกระสุนชนิดแตกหักได้	17
2.5 ระดับการแตกหักของหัวกระสุนทองแดงและทองแดงผสม	19
2.6 แสดงผลของจำนวนอนุภาคข้างเคียงต่อความหนาแน่นปรากฏ	39
2.7 สมบัติเชิงกลของ ผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่ออุณหภูมิซินเทอร์	41
3.1 ขนาดของผงโลหะที่ใช้ในการทดลอง	43
3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุทดสอบ	45
4.1 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ	53
4.2 ผลการทดสอบการคงรูปของชิ้นงานและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงานที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 450°C	58
4.3 ผลการทดสอบการคงรูปของชิ้นงานและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงานที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C	60
4.4 ขนาดของชิ้นทดสอบที่ขยายตัวหลังซินเทอร์	65
4.5 ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงหลังซินเทอร์	65
4.6 สมบัติทางกลเชิงเปรียบเทียบพลังงานที่ถูกดูดซับ	66
4.7 ความแข็งของชิ้นวัสดุที่ซินเทอร์อุณหภูมิต่างๆ	68
4.8 ความแข็งผิวของชิ้นวัสดุที่ซินเทอร์ต่างอุณหภูมิ	71
4.9 สมบัติทางกลความต้านทานแรงกด ที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน	72
4.10 พลังงานตกกระทบที่คำนวณได้เทียบกับหัวกระสุนแตกหักได้ (Longbow NTF)	91
4.11 เปรียบเทียบความเค้นของวัสดุที่จุดกระทบเป้า	94
4.12 สมบัติทางกลของชิ้นวัสดุทดสอบกับเหล็กกล้าล่องปืน เหล็กแผ่นเป้าและอลูมิเนียมผนังลำตัวอากาศยาน	96
4.13 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานเปรียบเทียบกับกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบัน	97

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงลักษณะการแตกหักของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้เมื่อกระทบเป้า	6
2.2 ตัวอย่างการแตกของหัวกระสุนขณะกระทบเป้า	8
2.3 ตัวอย่างผลการยิงของกระสุนชนิดแตกหักได้ Frangible bullet	8
2.4 ตัวอย่างหัวกระสุนชนิดแตกหักได้	10
2.5 ตัวอย่างกระสุนชนิดแตกหักได้บางชนิดที่ผลิตจากผงโลหะอัดขึ้นรูป	11
2.6 การทดสอบความแข็งแรงต่อการกระแทกของหัวกระสุน	15
2.7 การทดสอบความแข็งแรงต่อการกระแทกของวัสดุที่มีรูพรุน	16
2.8 ผลของการแตกหักของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้เมื่อกระทบเป้า	20
2.9 กระบวนการผลิตขึ้นงานด้วยวิธีทางโลหะผง	22
2.10 สารหล่อลื่นต่อแรงอัดขึ้นรูปและความหนาแน่นกรีนของเหล็กกล้าไร้สนิม	23
2.11 ลำดับขั้นตอนการอัดแน่นผงวัสดุ	24
2.12 ความหนาแน่นที่ได้จากแรงกระทำจากภายนอก	24
2.13 ภาพแสดงลักษณะรูปร่างของอนุภาคหลังการอัดขึ้นรูป	25
2.14 แผนภูมิของอนุภาคบรอนซ์ทรงกลมแสดงความดันและการจัดเรียงตัวของอนุภาค	26
2.15 การเปลี่ยนรูปและเข้าแทนที่ช่องว่างที่อยู่รอบๆอนุภาค	26
2.16 พื้นที่สัมผัสของอนุภาคภายใต้แรงดันที่เพิ่มขึ้น	27
2.17 แสดงกลไกการแพร่ของมวลในขั้นตอนซินเทอร์	28
2.18 ลักษณะการขยายของเกรนและการเกิดรูพรุนในขั้นตอนซินเทอร์	29
2.19 ปรากฏการณ์ขอบเกรนลากรูพรุนไปไว้ในเกรน (Pore drag effect)	29
2.20 ลักษณะการเกิดรูพรุนหลังซินเทอร์	30
2.21 พฤติกรรมการหดตัวของผงทองแดงที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน	31
2.22 การตั้งอุณหภูมิและเวลาซินเทอร์	32
2.23 การประสานของผงโลหะที่ซินเทอร์ต่างอุณหภูมิ	32
2.24 การประสานของผงโลหะที่ซินเทอร์ต่างอุณหภูมิ	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.25 การเกิดเฟสผสม	34
2.26 กระบวนการเกิดเป็นชั้นวัสดุเฟสเดียวหลังซินเทอร์ผสม	36
2.27 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะแบบต่างๆ	37
2.28 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงที่ขึ้นรูปจากผงขนาดต่างกันหลังซินเทอร์	38
2.29 แสดงค่าเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่งของผงโลหะต่างชนิดกัน	40
3.1 เครื่องคัดขนาดโลหะผงยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 Control 'g'	44
3.2 เครื่องอัดชิ้นงานยี่ห้อ Drost รุ่น TPA50/4	46
3.3 เตาซินเทอร์ชิ้นงานแบบควบคุมบรรยากาศยี่ห้อ Linn รุ่น 1800 Vac	47
3.4 การตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนซินเทอร์	47
3.5 การวัดขนาดเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาด	48
3.6 แบบจำลองปืนแก๊ส (Gas gun)	52
4.1 การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ	54
4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงโลหะ	55
4.3 ชิ้นงานก่อนซินเทอร์ (green part)	56
4.4 ชิ้นงาน ที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 450°C	57
4.5 ชิ้นงานที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C	61
4.6 รอยแตกร้าวหลังซินเทอร์	62
4.7 ชิ้นงาน A2 ที่ซินเทอร์อุณหภูมิ 800, 850, 900°C เป็นเวลา 45 นาที	63
4.8 แผนภูมิแสดงสมบัติทางกลความทนทานต่อการกระแทกที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน	66
4.9 ผลการหักของชิ้นทดสอบการกระแทก (Impact test)	67
4.10 ค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน	68
4.11 เส้นกราฟความเค้น- ความเครียด (Stress- Strain Curve) ที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน	69
4.12 แผนภูมิแสดงความต้านทานแรงกดที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ลักษณะการแตกหักของชิ้นวัสดุหลังการทดสอบความต้านทานแรงกด	74
4.14 ลักษณะการเกิดรูพรุนในชิ้นงานชินเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C	75
4.15 ลักษณะการเกิดรูพรุนในชิ้นงานชินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850°C	76
4.16 ลักษณะการเกิดรูพรุนในชิ้นงานชินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C	77
4.17 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายในชิ้นวัสดุ หลังชินเทอร์อุณหภูมิต่างๆ	79
4.18 ภาพถ่ายชิ้นงานก่อนชินเทอร์ (Green part) จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	80
4.19 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ชินเทอร์อุณหภูมิ 800°C จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	81
4.20 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ชินเทอร์อุณหภูมิ 850°C จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	82
4.21 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ชินเทอร์อุณหภูมิ 900°C จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	83
4.22 ภาพถ่ายลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายในชิ้นวัสดุ ที่ชินเทอร์อุณหภูมิต่างกัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	84
4.23 ลักษณะการแตกของหัวกระสุนแตกหักได้ Frangible bullet 85 Gr (Luger) หลังทดสอบความต้านทานแรงกด	85
4.24 แผนภูมิแสดงความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เปรียบเทียบกับชิ้นวัสดุทดสอบ	86
4.25 รอยแตกจากการทดสอบด้วย Kolsky Bar Apparatus ของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)	87
4.26 โครงสร้างจุลภาคของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เทียบกับ ชิ้นวัสดุทดสอบถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	88
4.27 การแตกของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) และชิ้นวัสดุหลังการยิงด้วยปืนลมแรงดัน 13.7 MPa	89
4.28 พงโลหะจากการแตกหักของชิ้นทดสอบจากการยิง	90
4.29 เหล็กกล้าสำหรับด้ามกล้องปืน (4140 Stainless Steel)	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากภัยการก่อการร้ายที่ทวีความรุนแรงและเกิดขึ้นทุกภูมิภาคทั่วโลก ทำให้ทุกประเทศทั่วโลก ต้องระวังภัยจากการก่อการร้ายและจัดเตรียมกำลังพลเพื่อป้องกันและปราบปรามการก่อการร้ายรวมทั้งการปล้นยึดอากาศยานในประเทศของตนเองและภูมิภาคใกล้เคียง

กองทัพอากาศไทยมีภารกิจในการเตรียมกำลังพลในการป้องกันและปราบปรามการก่อการร้ายและช่วยเหลือตัวประกันให้ปลอดภัย โดยเฉพาะการปล้นยึดอากาศยานไม่ว่าจะเกิดขึ้นในประเทศไทย หรือ ณ ที่ใดในโลก ในการเตรียมกำลังพลให้พร้อมจำเป็นต้องมีการฝึกใช้อาวุธปืนและใช้กระสุนจริงชนิดหัวกระสุนโลหะ ซึ่งทำให้กรมปฏิบัติการพิเศษกองทัพอากาศไทยมีภาระค่าใช้จ่ายในการฝึกสูงมาก นอกจากนี้การใช้กระสุนจริงชนิดโลหะในปฏิบัติการบนอากาศยานหรือในสนามฝึก อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ เช่น กระสุนปืนมีโอกาสที่จะทะลุผนังลำตัวอากาศยานออกนอกพื้นที่ปฏิบัติการ กระสุนปืนทำลายอุปกรณ์ประจำเครื่องบิน การแลบของหัวกระสุนไปกระทบเป้าหมายที่ไม่ต้องการ การแตกเป็นสะเก็ดของหัวกระสุนไปกระทบกับเป้าหมายที่ไม่ต้องการ ก่อให้เกิดอันตรายต่อเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติการบนอากาศยาน ผู้บริสุทธิ์ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติการ และหากนำไปใช้ในสนามฝึกจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ฝึก ผู้ควบคุมการฝึกและความเสียหายต่ออุปกรณ์สนามฝึก

จากปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบันจึงมีการเปลี่ยนมาใช้กระสุนชนิดแตกหักได้ (Frangible bullet) ในการฝึกและการปราบปรามการก่อการร้าย กระสุนชนิดนี้จะเกิดการแตกหักและกระจายออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เมื่อกระทบกับวัตถุที่มีความแข็งแรงมากกว่า ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์การฝึกและอุปกรณ์บนอากาศยาน อย่างไรก็ตามกระสุนชนิดแตกหักได้มีราคาแพงและกองทัพอากาศไทยต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งยังคงเป็นภาระค่าใช้จ่ายที่สูง

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุที่จะใช้เป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย เช่นผงโลหะจากโรงงานอุตสาหกรรม และขบวนการผลิต

ที่ไม่ยุ่งยาก เช่นการอัดขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งน่าจะทำให้หัวกระสุนที่ผลิตขึ้นมีราคาถูกกว่าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ ทองแดง-ดีบุก เช่น ขนาดของผงทองแดง อัตราส่วนผสมของผงโลหะ อุณหภูมิซินเทอร์ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ โดยการเปรียบเทียบกับหัวกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบันที่ผลิตจากผงโลหะผสมด้วยโพลิเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ผลิตวัสดุ ทองแดง-ดีบุก โดยใช้เงื่อนไขการผลิตต่างๆ เช่น ขนาดของผงโลหะ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิซินเทอร์
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ ทองแดง-ดีบุก ที่เตรียมได้
- 1.2.3 ทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ทองแดง-ดีบุก โดยเปรียบเทียบกับชนิดอื่นๆ กับ กระสุนจริง ที่ทำจาก ผงโลหะ-โพลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ผงทองแดงที่มีขนาดอนุภาคต่างกันสองขนาดโดยใช้ผงทองแดงขนาดอนุภาคเฉลี่ย ระหว่าง 87 - 288 μm
- 1.3.2 ใช้ผงดีบุกขนาดอนุภาคเฉลี่ย 35 μm
- 1.3.3 อัดขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ ความหนาแน่นกรีน 7.5 (g/cm^3)
- 1.3.4 ซินเทอร์ที่อุณหภูมิค่า 450°C และอุณหภูมิสูง 800 850 และ 900°C เป็นเวลา 45 นาที บรรยากาศปกคลุมด้วยไฮโดรเจน (H_2)
- 1.3.5 วิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ ทองแดง-ดีบุก
- 1.3.7 คำนวณหาพลังงานกระทบของหัวกระสุนในระยะต่างๆ เทียบกับกระสุนแตกหักได้ ยี่ห้อ Longbow NTF.

1.3.8 ทดสอบการแตกของวัสดุผสม ทองแดง-ดีบุก เมื่อกระทบเป้าเทียบกับกระสุน
Frangible bullet 85 Gr (Luger)

1.3.9 เปรียบเทียบค่าด้านทานแรงดึงและความแข็งกับแผ่นอลูมิเนียม AL 2024 –T3
ผนังลำตัวอากาศยาน

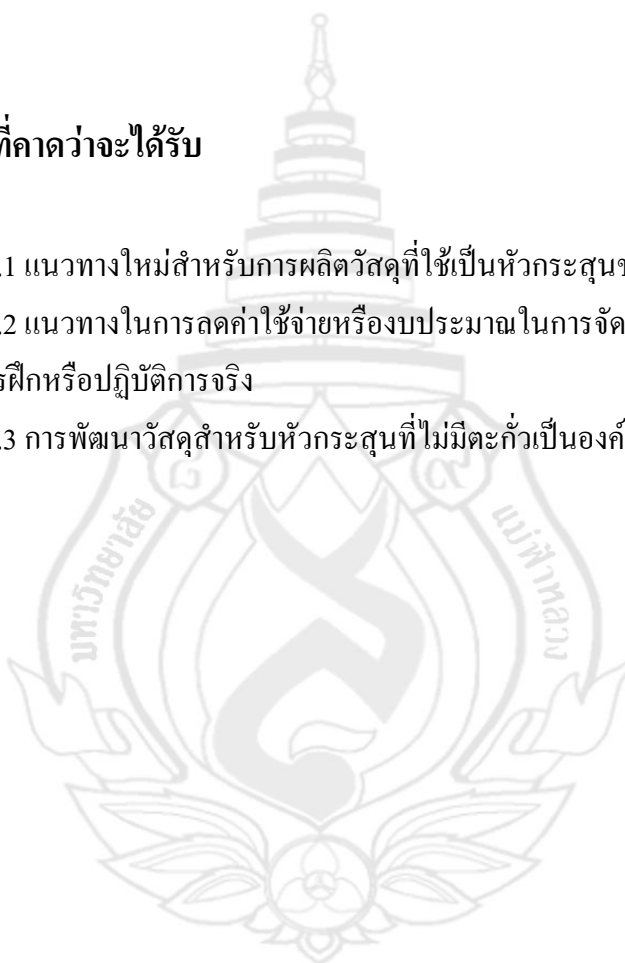
1.3.10 เปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุ ทองแดง - ดีบุก กับความแข็งของเหล็กกล้าลำ
กล้องปืน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แนวทางใหม่สำหรับการผลิตวัสดุที่ใช้เป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้

1.4.2 แนวทางในการลดค่าใช้จ่ายหรืองบประมาณในการจัดซื้อกระสุนชนิดแตกหักได้
สำหรับการฝึกหรือปฏิบัติการจริง

1.4.3 การพัฒนาวัสดุสำหรับหัวกระสุนที่ไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระสุนชนิดแตกหักได้ (Frangible bullet)

กระสุนชนิดแตกหักได้ (Frangible bullet) หรือกระสุนชนิดอ่อน (Soft bullet) หรือกระสุนชนิดไร้ตะกั่ว (Non lead bullet) ถูกออกแบบมาให้แตกกระจายเป็นชิ้นเล็กหรือเป็นผงเมื่อถูกยิงไปกระทบกับวัสดุที่มีความแข็งแรงกว่า โดยปราศจากการแลกเปลี่ยนทิศทางของหัวกระสุน การแตกกระจายออกเป็นชิ้นเล็กๆจำนวนมาก ทำให้เกิดการกระจายแรงปะทะออกไปตามชิ้นส่วนของกระสุน และสูญเสียพลังงานไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งต่างๆ รอบบริเวณ เป้า รูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะการแตกของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้เมื่อกระทบเป้าที่แข็งแรงกว่าตามลำดับขั้นตอน ขั้นที่ 1 ก่อนกระทบเป้า ขั้นที่ 2 ส่วนหัวของกระสุนกระทบเป้าและเกิดการยุบตัวเริ่มมีการแตกเกิดขึ้น ขั้นที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 เกิดการแตกเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กๆและแตกกระจายออกไปรอบบริเวณตกกระทบ ส่งผลให้เกิดการกระจายของพลังงานตกกระทบออกไปพร้อมชิ้นส่วนที่แตกออก และพลังงานนี้จะหายไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เป้าไม่เกิดความเสียหาย (Mullins, 2001)



รูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะการแตกหักของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้เมื่อกระทบเป้า

หัวกระสุนชนิดแตกหักได้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงศาสตร์ของอาวุธปืนในช่วง 100 ปีที่ผ่านมาและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อลดปัญหาต่างๆ เช่น ลดอันตรายจากสารตะกั่วซึ่งเป็นโลหะหลักของกระสุนปืนที่ใช้ในสนามฝึกยิงปืน ทั้งสนามในร่มและสนามกลางแจ้ง เช่น การฝึกพลแม่นปืน (Mark man ships) การฝึกทีมปฏิบัติการพิเศษ (Special operation force) ลดอันตรายที่จะเกิดกับเจ้าหน้าที่และวัสดุอุปกรณ์อันเนื่องมาจากการแล่นของหัวกระสุน หัวกระสุนชนิดแตกหักได้ปลอดภัยที่สุดในการนำไปฝึกแบบเต็มรูปแบบของเจ้าหน้าที่ตำรวจทหาร เจ้าหน้าที่ของรัฐ และรวมไปถึงการฝึกในสนามยิงปืนของพลเรือนอีกด้วย

กระสุนแตกหักได้มักจะถูกผลิตขึ้นมาจากกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะผสม หรือจากการผสมกันของผงโลหะโดยมีตัวประสานให้ยึดติดเข้าด้วยกัน ปัจจุบันกระสุนชนิดแตกหักได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางกับปืนพก (Pistol) ปืนยาว (Rifle) สำหรับการฝึกและการใช้ในการกิจพิเศษของกองทัพ

ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานและความเร็วของกระสุนแตกหักได้เปรียบเทียบกับกระสุนโลหะบางชนิดที่มีใช้งานในปัจจุบัน จากข้อมูลในตารางจะเห็นว่าพลังงานและความเร็วของกระสุนปืนขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำหัวกระสุนและน้ำหนักของหัวกระสุน ความเร็วและพลังงานตกกระทบของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้จะมีค่ามากที่ระยะใกล้ (3 m.) และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะไกลออกไป (15 m.) ขณะที่หัวกระสุนชนิดโลหะมีความเร็วและพลังงานน้อยกว่าที่ระยะใกล้และลดลงอย่างช้าๆ ในระยะไกลออกไป กระสุนชนิดแตกหักได้จึงเหมาะกับการใช้งานในระยะใกล้ๆ หรือสถานที่แคบๆ

การออกแบบกระสุนแตกหักได้ขึ้นกับลักษณะของการใช้งาน โดยหัวกระสุนจะแตกเป็นชิ้นเล็กก็ต่อเมื่อ ค่าความต้านทานพลังงานจากการกระแทกของหัวกระสุน น้อยกว่าพลังงานที่กระทบเป้า (Mullins, 2001) ชนิดของกระสุนแตกหักได้แบ่งโดยทั่วไปได้ 3 ระดับดังนี้ (1) ระดับใช้กับการฝึก (2) ระดับใช้ทั่วไป (3) ระดับใช้แบบพิเศษ ซึ่งกระสุนทั้ง 3 แบบจะมีระดับของการแตกหักที่แตกต่างกัน หัวกระสุนชนิดแตกหักได้ที่มีใช้งานในปัจจุบันมีการผลิตหลากหลายขนาดตามชนิดและขนาดของปืนแสดงในตารางที่ 2.2

หัวกระสุนต่างชนิดและขนาดจะมีความเร็วและพลังงานกระทบที่ต่างกัน ตัวอย่างหัวกระสุนที่ผลิตโดย บริษัท PMC Green Frangible Ammunition หัวกระสุนที่มีขนาดและน้ำหนักเท่ากัน เช่น .357 Mag .357 Sig .38 Special ยิงจากปืนที่ต่างชนิดกันความเร็วและพลังงานตกกระทบจะต่างกัน ปืนยาว (Rifle) จะให้ความเร็วและพลังงานตกกระทบมากกว่าปืนสั้น (Pistol) ความเร็วและพลังงานกระทบของกระสุน ยังขึ้นอยู่กับชนิดของดินปืนและน้ำหนักของดินปืนภายในลูกปืนอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานและความเร็วของกระสุนแตกหักได้เปรียบเทียบกับกระสุนหัวโลหะ
(Mullins, 2001)

ความเร็วและพลังงาน	ชนิดกระสุน		
	หัวกระสุนชนิด แตกหักได้ (Longbow NTF)	หัวกระสุนโลหะ (Winchester Talon)	หัวกระสุนโลหะ (Federal 124 Hydro-Shock)
ความเร็วปากลำกล้อง (m/s)	435	297	336
พลังงานปากลำกล้อง (J)	327	236	255
ความเร็วที่ระยะ 3 เมตร (m/s)	409	294	329
พลังงานที่ระยะ 3 เมตร (J)	290	232	245
ความเร็วที่ระยะ 10 เมตร (m/s)	370	288	318
พลังงานที่ระยะ 10 เมตร (J)	238	223	228
ความเร็วที่ระยะ 15 เมตร (m/s)	343	283	308
พลังงานที่ระยะ 15 เมตร (J)	204	215	214
ระยะยิงไกลที่สุด (m)	1,193	2,053	1,742

ตารางที่ 2.2 ขนาดกระสุน ความเร็ว และพลังงานที่ปากลำกล้อง (PMG Frangible bullet
Ammunition Co., 2005)

ชนิดกระสุน	ชนิดของปืน	น้ำหนัก กระสุน (g)	ความเร็ว ที่ปากลำกล้อง (m/s)	พลังงาน ที่ปากลำกล้อง (J)
.357 Mag	Pistol .357	5.50	404	448
.357 Sig	Pistol .357	5.50	451	560
.38 Special	Pistol .38	5.50	388	416
.40 S&w	Pistol .40	7.45	411	630
.45 Auto	Pistol .45	9.40	335	529
9 mm. (Luger)	Pistol 9 mm.	4.80	411	410
.223 Rem	Rifle 5.56 mm.	2.60	1,066	1,475
.308 Win	Rifle 7.62 mm.	7.77	792	2,442

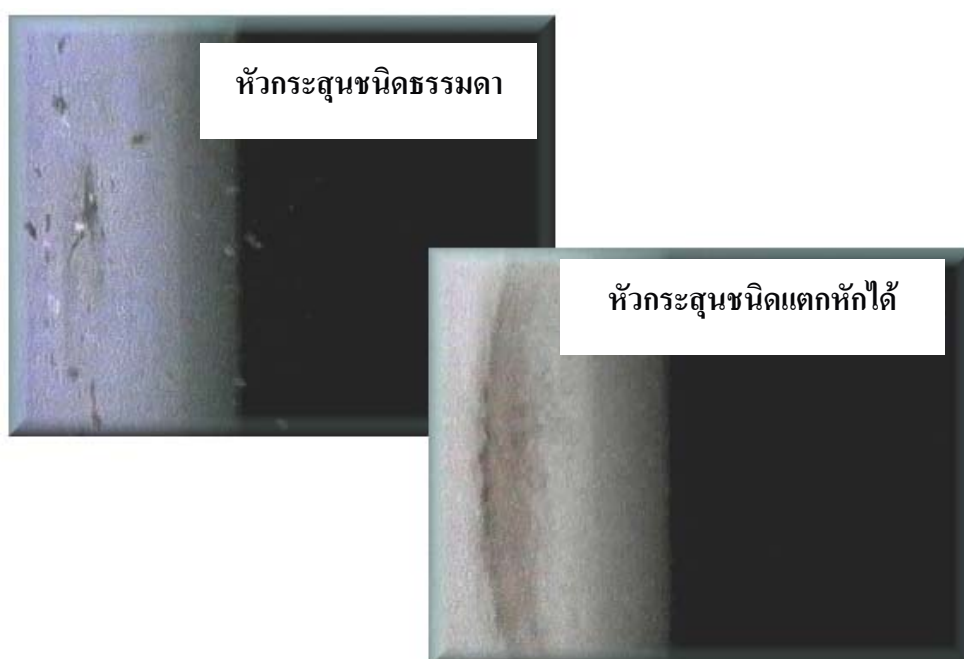
หมายเหตุ: Pistol = ปืนพก Rifle = ปืนยาว Mag = Magnum Sig = Single action

Rem = Remington Win = Winchester Luger = Bullet Luger

S&w = Smith & Wesson

ข้อดีของกระสุนชนิดแตกหักได้สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ไม่มีสะเก็ดกระเด็นกลับมาเป็นอันตรายต่อผู้ยิง (รูปที่ 2.2)
2. ไม่เกิดการแฉลบที่เป็นอันตรายต่อผู้ยิง และผู้รับการฝึก
3. ไม่ทำลายเป้าในขณะที่ฝึก (รูปที่ 2.3)
4. ลดการทำลายเครื่องมืออุปกรณ์ในพื้นที่ปฏิบัติการปราบปรามการก่อการร้าย
5. ลดปัญหาการสึกหรอของลำกล้องปืน ประหยัดค่าใช้จ่ายในระยะยาว
6. ลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการแตกของหัวกระสุนขณะกระทบเป้าผลการยิงของกระสุนชนิดที่แตกเป็นสะเก็ด (Lead round) กับกระสุนชนิดแตกหักได้ Frangible bullet (Non-toxic round) (Mikko, 2000)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างผลการยิงของกระสุนชนิดแตกหักได้ Frangible bullet, (Non-toxic round) ซึ่งไม่ทำลายเป้าฝึกยิงปืน (Mullins, 2001)

2.1.1 ผงโลหะสำหรับผลิตกระสุนชนิดแตกหักได้ เหตุผลสำคัญในการผลิตหัวกระสุนแตกหักได้คือ การที่ไม่ต้องการใช้โลหะตะกั่วในการผลิตหัวกระสุน เนื่องจากโลหะตะกั่วเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะตกค้างในสนามฝึกยิงปืน ดังนั้นการผลิตกระสุนชนิดแตกหักได้จะใช้โลหะชนิดอื่น ซึ่งอาจเป็นผงโลหะชนิดเดียวหรือการผสมของผงโลหะหลายชนิด หรือผงโลหะผสมกับวัสดุชนิดที่ไม่ใช่โลหะก็ได้ โดยใช้กระบวนการทางโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy) เมื่อขึ้นรูปแล้วหัวกระสุนจะมีความหนาแน่นประมาณ 10 g/cm^3 ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของตะกั่ว (11.34 g/cm^3) ผงโลหะที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตกระสุนชนิดแตกหักได้ ได้แก่ ผงเหล็ก (Steel or Iron powder) ผงทองแดง (Copper powder) ผงสังกะสี (Zinc powder) ผงทังสเตน (Tungsten powder) ผงดีบุก (Tin powder) ผงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel powder) เป็นต้น (Collins, 1999) โลหะแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันพอสรุปได้ดังนี้

1. ผงเหล็กมีความหนาแน่น 7.85 g/cm^3 จุดหลอมเหลว $1,530^\circ\text{C}$ (Callister, 2002) มีความเป็นสนิมได้ง่ายเมื่อทำเป็นหัวกระสุนต้องใช้กับชนิดที่มีเปลือกหุ้ม
2. ผงทังสเตน มีความหนาแน่น 19.3 g/cm^3 จุดหลอมเหลว $3,410^\circ\text{C}$ (Callister, 2002) เนื่องจากผงทังสเตนมีความแข็งมาก หากนำผงทังสเตนบริสุทธิ์ไปใช้ มีความยุ่งยาก ในการขึ้นรูป และมีราคาแพง ดังนั้นจึงนิยมผสมกับโลหะชนิดอื่น
3. ผงเหล็กกล้าไร้สนิม มีความหนาแน่น 7.48 g/cm^3 จุดหลอมเหลว $1,363^\circ\text{C}$ (Callister, 2002) สมบัติพิเศษมีการทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิมและความแข็งแรงสูง
4. ผงทองแดง มีความหนาแน่น 8.94 g/cm^3 จุดหลอมเหลว $1,082^\circ\text{C}$ (Callister, 2002) มีความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) ที่ใช้ผลิตลำกล้องปืน เมื่อนำไปทำหัวกระสุนจะลดการสึกหรอของลำกล้องปืนจากการเสียดสี ทำให้ยืดอายุการใช้งานของลำกล้องปืน
5. ผงสังกะสี มีความหนาแน่น 7.135 g/cm^3 จุดหลอมเหลว 419°C (Callister, 2002) มีความแข็งต่ำ ทนการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี นิยมนำมาเป็นตัวประสานในวัสดุผสมโลหะ
6. ผงดีบุก มีความหนาแน่น 7.17 g/cm^3 จุดหลอมเหลว 232°C (Callister, 2002) มีความต้านทานการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากดีบุกเป็นโลหะอ่อนจึงนิยมนำไปใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างโลหะกับโลหะ

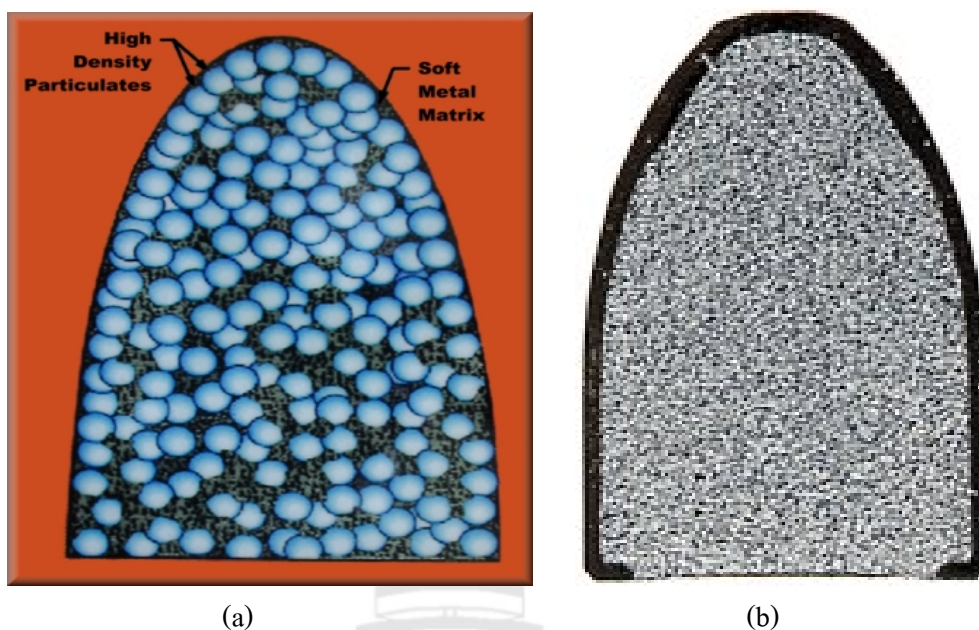
2.1.2 กระบวนการผลิตหัวกระสุนชนิดแตกหักได้

กระบวนการผลิตหัวกระสุนชนิดแตกหักได้มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการของหัวกระสุนและวัสดุที่ใช้ผลิตหัวกระสุน ได้แก่

1. คอมโพสิตของผงโลหะ (Metals powder composite) การผลิตโดยวิธีการอัดขึ้นรูปผงโลหะโดยหลักการประสานกันเชิงกล (Mechanical interlocking) และเกิดการเชื่อมประสานแบบเย็น (Cold-welding) ของผงโลหะซึ่งสามารถควบคุมและปรับปรุงสมบัติของหัวกระสุนได้ เช่นการปรับความหนาแน่นของหัวกระสุน โดยควบคุมความเข้มข้นและอัตราส่วนของโลหะผสม ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถการทะลุทะลวงและการแตกกระจายของกระสุนเมื่อกระทบกับเป้า กระบวนการผลิตนี้สามารถขึ้นรูปเป็นหัวกระสุนโดยตรงหรือขึ้นรูปเป็นแกนของกระสุน (Core) และนำไปใช้ได้เลยโดยมีเปลือกหุ้ม (Jacketing) (รูปที่ 2.4) หรือไม่ต้องมีเปลือกหุ้ม (Non-jacketing) (รูปที่ 2.5) หัวกระสุนชนิดที่ผลิตจากอัดขึ้นรูปแบบเย็นถูกนำไปใช้กับปืนที่มีขนาดลำกล้องขนาดเล็ก เช่น 5.56 มม. 7.62 มม. 9 มม. 9.652 มม. (0.38 นิ้ว) และ 11 มม. (0.45 นิ้ว) หัวกระสุนแตกหักได้ที่ผลิตโดยวิธีการอัดขึ้นรูปผงโลหะได้แก่ U.S. Military Green Bullet ซึ่งผลิตโดยสถาบันวิจัยและสืบสวนด้านอาชญากรกองทัพบกสหรัฐอเมริกา (U.S. Army Criminal Investigations Laboratory) (Mikko, 2000) วัสดุที่ใช้คือผงทังสเตน (Tungsten) ผสมกับผงดีบุก (Tin) หรือผงสังกะสี (Zinc) หลังจากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปแบบเย็น (Cold pressed) การขึ้นรูปแบบเย็นมีข้อดีคือสามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้เนื่องจากผงโลหะผสมไม่มีพันธะกันทางเคมีทำให้เกิดการแยกตัวกันได้ง่าย



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกระสุนชนิดแตกหักได้บางชนิดที่ผลิตจากผงโลหะอัดขึ้นรูป (Mikko, 2000)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกระสุนชนิดแตกหักได้ชนิดที่ผลิตจากผงโลหะอัดขึ้นรูป (a) หัวกระสุนชนิดผงโลหะแข็งกับผงโลหะอ่อนอัดขึ้นรูป (b) ผงโลหะทั้งสเดนผสมกับโลหะดีบุกมาอัดขึ้นรูปจากนั้นเคลือบผิวชั้นนอกด้วยโลหะอ่อน(Mikko, 2000)

Siddle (2003) เอกสารสิทธิบัตรแห่งสหรัฐอเมริกาหมายเลข 6551375 ผลิตกระสุนชนิดแตกหักได้ เพื่อนำมาใช้แทนกระสุนที่ผลิตจากเหล็ก เนื่องจากหัวกระสุนเหล็กมีความเร็วปากลำกล้องที่ต่ำ มีความหนาแน่นต่ำ ($7.5 - 8.0 \text{ g/cm}^3$) มีพลังงานต่ำเมื่อกระทบเป้า ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงความหนาแน่นของหัวกระสุนเพื่อให้ได้ความหนาแน่นใกล้เคียงกับหัวกระสุนตะกั่ว (11.34 g/cm^3) วิธีที่อ้างถึงคือการนำผงทั้งสเดนซึ่งมีความหนาแน่นสูงมากมาใช้เป็นวัสดุหลักและผสมกับวัสดุอื่น เนื่องจากผงทั้งสเดนมีความแข็งแรงและยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงมากด้วย หากนำผงทั้งสเดนบริสุทธิ์ไปขึ้นรูป จะมีความยุ่งยากและมีราคาแพง กระบวนการผลิตหัวกระสุนชนิดนี้ใช้ทั้งสเดนน้อยกว่า 80% โดยปริมาตร ผงโลหะชนิดอื่นเช่น เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง หรือดีบุกมากกว่า 10% โดยปริมาตร ส่วนที่เหลือใช้ ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Type 1 Portland cement) เป็นตัวประสาน ขนาดของผงโลหะทั้งสองชนิดที่ใช้ควรมีขนาดประมาณ $1 - 100 \text{ }\mu\text{m}$ รายงานนี้ใช้ผงทั้งสเดนขนาด $5 \text{ }\mu\text{m}$ และใช้ผงเหล็กขนาด $50 \text{ }\mu\text{m}$ โลหะผสม

จะถูกอัดขึ้นรูปในแนวแกนเดียว ความแข็งแรงของหัวกระสุนได้จากแรงอัดและความแข็งของปูนซีเมนต์

Lowden (1998) เอกสารสิทธิบัตรแห่งสหรัฐอเมริกาหมายเลข 5760331 แสดงข้อมูลหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนผสมกับผงโลหะอ่อนเช่นทองแดง ดีบุก สังกะสี บิสมัท อลูมิเนียมเป็นต้น จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปแบบเย็นด้วยแรงอัด 140 – 350 MPa หัวกระสุนมีความต้านทานแรงกด 57 MPa – 220 MPa ใช้ผงทั้งสแตนขนาด 149 - 1,000 μm และผงโลหะตัวประสานขนาด 45–149 μm ตัวอย่างเช่นผงทั้งสแตนขนาด 500 – 1,000 μm ถูกเคลือบผิวด้วยอลูมิเนียมหนา 50–70 μm จำนวน 9.6 g (148 Gr) นำไปบรรจุลงแม่แบบทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 mm. อัดด้วยแรงดัน 350 MPa ที่อุณหภูมิห้องใช้เวลานาน 5 วินาที ได้ความหนาแน่นเฉลี่ย 10.9 g/cm^3 ซึ่งเทียบได้กับ 95% ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของตะกั่ว และค่าความต้านทานแรงอัด ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุขึ้นทดสอบวัดได้ 145 MPa วัสดุผสมชนิดนี้ถูกนำไปผลิตหัวกระสุนที่ใช้กับปืนเล็กที่มีขนาดลำกล้อง ขนาด 9 มม. และ 9.652 มม. (0.38 นิ้ว)

2. ผงโลหะผสมอัดขึ้นรูปแล้วซินเทอร์เพิ่มความแข็งแรง (sintered metal powder composite) การผลิตหัวกระสุนชนิดนี้ใช้การผสมผงโลหะเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปบรรจุลงในแม่แบบอัดขึ้นรูป นำไปอบความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของตัวประสาน หรืออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะหลักเล็กน้อย (ประมาณ 200°C) เพื่อให้เกิดพันธะภายในของโลหะตัวประสานกับโลหะหลักเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเปราะของตัวประสาน เป็นผลให้หัวกระสุนมีความเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อมีการกระทบเป้า สมบัติความเปราะของตัวประสาน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบความร้อน การใช้อุณหภูมิสูงและเวลานาน จะทำให้โลหะตัวประสานสามารถเกิดพันธะโลหะกับโลหะหลักได้ดี ซึ่งส่งผลให้หัวกระสุนมีความแข็งแรงมากขึ้นมีความเปราะน้อยลง (Rider, 2003) ผงโลหะหลักที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ผงโลหะในกลุ่ม ทองแดง เหล็ก นิกเกิล เงินและโครเมียมเป็นต้น ผงโลหะที่ใช้เป็นตัวประสานได้แก่ผงโลหะในกลุ่ม ดีบุก สังกะสี อลูมิเนียม ซิลิคอนและ บิสมัท เป็นต้น

Benini (2001) ศึกษาสมบัติของหัวกระสุนที่ผลิตได้จะขึ้นกับอุณหภูมิซินเทอร์ เช่น วัสดุผสมทองแดง-ดีบุก (90:10) อัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 20 ดัน เพาที่อุณหภูมิ 260°C และ 810°C แสดงสมบัติทางกลที่ต่างกัน ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3 ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นหัวกระสุนแตกหักได้ที่ใช้กับ ปืนขนาด 9 มม. ควรมีค่าความต้านทานแรงกดไม่เกิน 90 MPa ซึ่งจะแสดงสมบัติการเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ดี แต่ถ้าค่าต้านทานแรงกดมากกว่า 90 MPa ก็ยังสามารถนำไปใช้ได้แต่จะแสดงสมบัติการเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักที่ไม่ดีนัก

ตารางที่ 2.3 สมบัติของหัวกระสุนที่ขึ้นกับอุณหภูมิซินเทอร์ (Benini, 2001)

ชิ้นวัสดุ	ความหนาแน่น g/cm ³	ขนาดเปลี่ยนไป %	ความแข็งผิว HRH (ave.)	ความแข็งแรง TRS (MPa)
ก่อนซินเทอร์	7.26	0.14	73.70	25.17
260°C	7.27	0.07	94.80	87.63
810°C	6.53	2.53	52.70	224.90

หมายเหตุ : TRS = Transverse Rupture Strength (ความแข็งแรงด้านทานแรงดึงตามแนวขวาง)

บริษัท Delta Frangible Ammunition LLC. ได้ผลิตหัวกระสุนโดยใช้ผงโลหะ ทองแดง และทองแดงผสม เช่น ทองเหลือง (Brass) สัมฤทธิ์ (Bronze) รวมกับสารหล่อลื่นอัดขึ้นรูป แล้วซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 815-926°C (1,500-1,700°F) พบว่าหัวกระสุนที่มีความหนาแน่นต่ำซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำจะมีการแตกหักที่ดี และหัวกระสุนที่มีความหนาแน่นสูงซินเทอร์ที่อุณหภูมิสูงจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Benini, 2001) สมบัติทั้งสองอย่างนี้เป็นสิ่งที่หัวกระสุนแตกหักได้ต้องการพร้อมๆกันคือ สมบัติความเหนียวเพื่อไม่ให้หัวกระสุนแตกภายในลำกล้องหรือแตกก่อนกระทบเป้า ส่วนสมบัติการแตกหัก ใช้เมื่อกระสุนกระทบเป้าแล้วแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ตัวอย่างซินเทอร์ผงโลหะที่อุณหภูมิต่างกันคือบรอนซ์ (Cu: Sn 90:10) 99.75 wt% + 0.25 wt% Acrawax C. Lubricants (Benini, 2001) อัดขึ้นรูปให้ได้ความหนาแน่น 8 g/cm³ ซินเทอร์แล้วทดสอบการยิง พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหัวกระสุนมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เช่น ซินเทอร์ 815°C (1,500°F) หัวกระสุนเมื่อถูกยิงจะแตกก่อนกระทบเป้าแตกเป็นผงขนาดเล็กเกือบทั้งหมด ซินเทอร์ที่ 871°C (1,600°F) กระสุนมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสามารถแตกหักได้ ซินเทอร์ที่ 926°C (1,700°F) หัวกระสุนมีความเหนียวเพิ่มขึ้นมาก สามารถแตกหักได้ บรอนซ์ที่มีอัตราส่วนผสมทองแดงต่อดีบุก 90:10 wt% ควรซินเทอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 815-871°C (1,500-1,600°F) จะได้สมบัติของหัวกระสุนแตกหักได้ดี

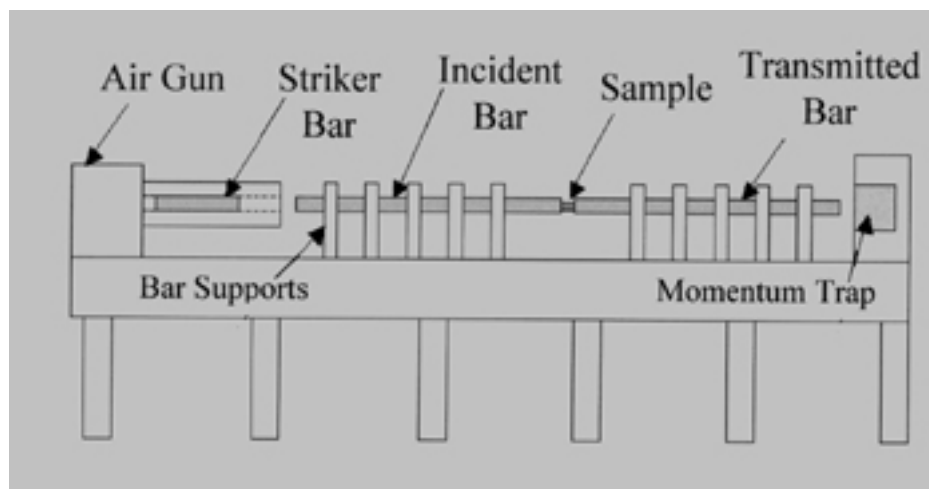
3. ผงโลหะผสมโพลิเมอร์อัดขึ้นรูป (metal powder polymer composite)

กระบวนการผลิตโดยการผสมผงโลหะกับโพลิเมอร์ จากนั้นให้ความร้อนพร้อมกับอัดขึ้นรูป โพลิเมอร์จะเป็นตัวประสานผงโลหะให้ติดกันและเป็นเปลือกหุ้มของหัวกระสุน ตัวอย่างเช่น บริษัทผลิตกระสุนชื่อ PMC Green Frangible Ammunition (Mullins, 2001) ได้ผลิตกระสุน

ชนิดแตกหักได้ โดยนำวัสดุผสมผงโลหะทองแดง 93 wt% และโพลิเมอร์ (Nylons 11) 7 wt%อัดขึ้นรูปเป็นกระสุนและปล่อยให้เซตตัว 24 ชั่วโมง หัวกระสุนที่ได้มีสมบัติกันความชื้น นอกจากนั้นยังไม่มีโลหะหนักอื่นๆผสมอยู่ หลังการยิงจึงทำให้ล้ากล้องปืนสะอาดอีกด้วย บริษัทอื่นที่มีการผลิตกระสุนชนิดแตกหักได้ด้วยการผสมผงโลหะกับโพลิเมอร์ได้แก่ บริษัท Remington ได้ผลิตหัวกระสุนผงโลหะผสมโพลิเมอร์ ใช้ชื่อทางการค้า UMC Leadless 9 mm Luger (Rider, 2003) บริษัท Longbow, Inc. ใช้ผงทองแดงผสมกับโพลิเมอร์และใช้ชื่อทางการค้า “NTF” (Rider, 2003) บริษัท Delta Frangible Ammunition (DFA) ได้ผลิตโดยใช้ผงโลหะผสมกับไนลอน (Rider, 2003) บริษัท Winchester Ammunition ได้ผลิตโดยใช้ผงโลหะผสมโพลิเมอร์ใช้ชื่อทางการค้าว่า Winchester Super Clean NT (Rider, 2003)

2.1.3 วิธีการทดสอบหัวกระสุนแบบแตกหักได้ การกำหนดมาตรฐานของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้จำเป็นต้องมีการทดสอบหัวกระสุนโดยการทดสอบการทนแรงกระแทก การทะลุทะลวงและการแตกหักหลังการกระทบเป่ามีการทดสอบได้หลากหลายวิธี เช่น

1. การทดสอบความแข็งแรง สถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (National Institute of Standards and Technology, NIST.) ได้ทำการวิจัยและวัดค่าของการแตกหักของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ เมื่อกระทบเป่า โดยใช้เครื่องมือวัดแบบคอลด์สกีบาร์ (Kolsky bar) (รูปที่ 2.6 a) เครื่องมือชนิดนี้จะใช้วิธีการวัดความเค้น ความเครียด (Stress and Strain) ของหัวกระสุนเมื่อเกิดการกระทบหรือการชนด้วยความเร็วสูง วิธีการทดสอบทำโดยการนำหัวกระสุนมาประกบด้วยแท่งโลหะสองแท่ง จากนั้นใช้ปืนลมที่มีความเร็วลมสูง 5,000 m/s ยิงลมมาที่แท่งเป่า (Incident bar) จากนั้นพลังงานจะถูกถ่ายเทไปที่หัวกระสุนและวัดความแข็งแรงของหัวกระสุน และดูผลการแตกหักของหัวกระสุนได้ (รูปที่ 2.6 b) นอกจากจะทราบสมบัติของหัวกระสุนแล้วยังสามารถนำค่าความแข็งแรงที่วัดได้ ไปเป็นมาตรฐานในการผลิตสื่อเกราะได้อีกด้วย (Newman, 2006)



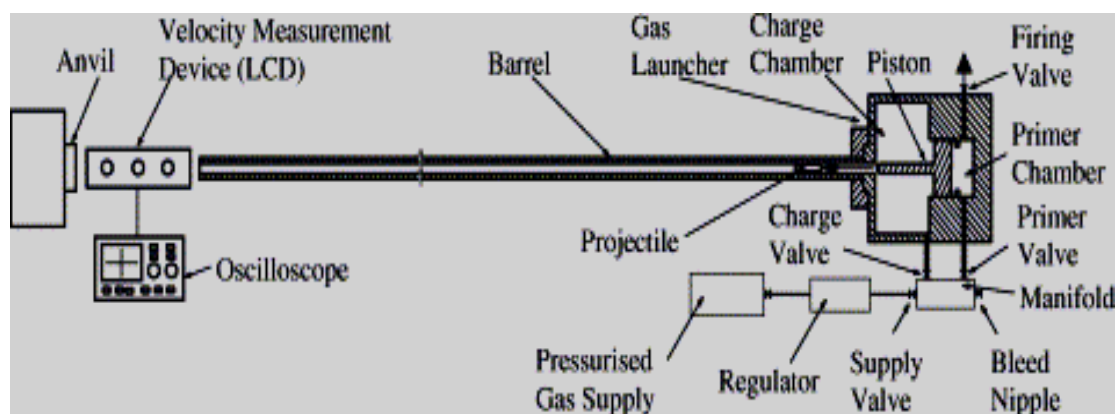
(a)



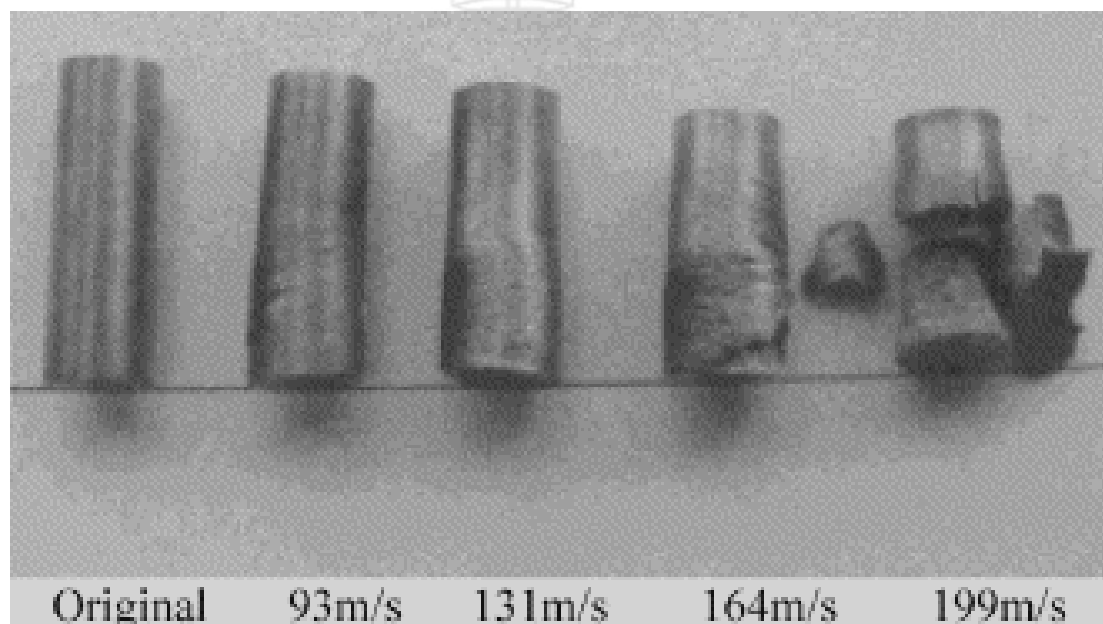
(b)

รูปที่ 2.6 การทดสอบความแข็งแรงต่อการแตกของหัวกระสุน (a) เครื่องมือวัดคอลล์สกีบาร์
(b) หัวกระสุนแตกหักได้ที่ทดสอบด้วยคอลล์สกีบาร์ (Newman, 2006)

การทดสอบการแตกหักหลังการกระทบของวัสดุที่มีรูปทรงอื่นวิธีหนึ่งใช้วิธี Taylor impact test (Taylor, 2003) (รูปที่ 2.7 a) ใช้ปืนลมยิงวัสดุที่มีความพรุนให้มีความเร็วในการกระทบเป้าที่ต่างกันพบว่าวัสดุจะเกิดการแตกหักได้มากขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการแตกและลักษณะการแตกหักจะเกิดขึ้นแตกต่างกัน ตามชนิดของวัสดุและความเร็วที่ใช้ในการกระทบ (รูปที่ 2.7 b)



(a)



(b)

รูปที่ 2.7 การทดสอบความแข็งแรงต่อการกระแทกของวัสดุที่มีรูพรุน

(a) เครื่องมือวัด Taylor Impact Test

(b) วัสดุพูนแตกหักตามความเร็ว ทดสอบด้วย Taylor Impact Test

(Taylor,2003)

2. ยิงเป้าทดสอบ เพื่อสังเกตพฤติกรรมการแตกของหัวกระสุนจากการกระทบเป้าชนิดต่างๆ จะบอกถึงสมบัติของหัวกระสุน และความสามารถในการนำไปใช้งานที่ต่างกัน

1) ยิงเป้าและวัดระดับการแตกหัก

Benini (2001) แสดงการวัดระดับการแตกหักของหัวกระสุน ซึ่งจะบอกถึงสมบัติของหัวกระสุนและความสามารถในการนำไปใช้งานที่ต่างกัน การตรวจสอบการแตกหักทำได้โดยการทดสอบการยิงเพื่อให้เกิดการแตกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เศษผงโลหะที่ได้นำมาคัดขนาดและคำนวณหาระดับการแตกหัก โดยกำหนดมาตรฐานดังนี้

ผงโลหะขนาดเล็ก (Powder) ขนาดเล็กกว่า 1,190 μm คิดเป็น 60%

ผงโลหะขนาดใหญ่ (Chunk) ขนาดโตกว่า 1,190 μm คิดเป็น 30%

ผงโลหะขนาดกลาง (Base) ขนาดประมาณ 1,190 μm คิดเป็น 10%

จากนั้นนำผลของขนาดมาคำนวณดังสมการที่ 2.1 และนำคะแนนที่ได้ไปเทียบระดับการแตกหักในตารางที่ 2.4

$$\text{คะแนน (Score)} = 0.6 \times \text{wt\% powder} + 0.3 \times \text{wt\% chunks} + 0.1 \times \text{wt\% bases} \quad \dots(2.1)$$

ตารางที่ 2.4 ระดับการแตกหักของกระสุนชนิดแตกหักได้

คะแนน	ระดับการแตกหัก
<15	1
16 - 25	2
26 - 35	3
36 - 45	4
45>	5

หมายเหตุ : ระดับ 1 คือระดับที่มีความสามารถในการแตกหักต่ำที่สุด มีชิ้นส่วนขนาดเล็กน้อยที่สุด
ระดับ 5 คือระดับที่มีการแตกหักได้มากที่สุด มีชิ้นส่วนขนาดเล็กมากที่สุด

Abram (2006) ได้ทดสอบตามรายงานสิทธิบัตรหมายเลข 6074454 เปรียบเทียบผลการยิงของหัวกระสุนที่ผลิตโดยใช้ผงทองแดงและทองแดงผสมอัดขึ้นรูปแล้วขึ้น

เทอร์ มีความหนาแน่นของหัวกระสุน 8.2 g/cm³ (125 Gr.) ซึ่งเป็นกระสุนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับหัวกระสุนที่ใช้ในปัจจุบัน แสดงในตารางที่ 2.5 จากการทดสอบหัวกระสุนที่ผลิตด้วยผงทองแดง ให้ผลการแตกหักที่ ระดับ 2,3 กระสุนไม่แตกหักในลำกล้องปืนหรือแตกหักก่อนถึงเป้า ส่วนหัวกระสุนที่ผลิตจากทองแดงผสม (brass, bronze) จะแตกหักก่อนถึงเป้าและมีระดับการแตกหักที่ระดับ 5 เมื่อชินเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำ และจะแตกหักได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิชินเทอร์สูงขึ้น หัวกระสุนที่ใช้ทดสอบมีอัตราส่วนผสมดังนี้

(1) 99.75% 150RXM + 0.25%	Acrawax.RTM.C
(2) 99.75% 150RXH 30 + 0.25%	Acrawax.RTM.C
(3) 99.75% 100RXM + 0.25%	Acrawax.RTM.C
(4) 99.75% 100RXH + 0.25%	Acrawax.RTM.C
(5) 99.75% (70:30) Brass + 0.25%	Acrawax.C
(6) 99.75% (90:10) Bronze + 0.25%	Acrawax.C

หมายเหตุ: 150RXM, 150RXH, 100RXM, 100RXH คือชื่อทางการค้าผงทองแดง

แบ่งตามเกรดและกระบวนการผลิต ของบริษัท SCM Metal Products, Inc.

Acrawax.C, Acrawax.RTM.C คือชื่อทางการค้าของสารหล่อลื่น บริษัท Lonza - Corporation.

ตารางที่ 2.5 ระดับการแตกหักของหัวกระสุนทองแดงและทองแดงผสม

อัตราส่วน	แรงอัดขึ้นรูป (MPa)	อุณหภูมิขึ้นเทอร์ (°C)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การแตกหัก ในลำกล้อง	ผงขนาดเล็ก <1,190 (μm)	ผงขนาดใหญ่ >1,190 (μm)	ผงขนาดกลาง 1,190 (μm)	คะแนน	ระดับการแตกหัก
1	552	926	8.26	No	12.60	19.10	68.30	20	2
1	607	926	8.23	No	6.80	27.20	66.00	19	2
2	552	926	8.29	No	17.00	57.00	26.10	30	3
2	607	926	8.29	No	15.80	55.20	31.00	29	3
3	552	926	8.24	No	1.40	32.40	66.20	17	2
4	552	926	8.20	No	9.50	28.40	62.10	20	2
5	607	815	7.68	Yes	79	21	0	54	5
5	662	871	7.76	Yes	26	9	5	37	4
5	607	926	7.88	No	2	0	38	23	2
6	607	815	8.24	Yes	80	20	0	54	5
6	607	871	8.32	No	0	27	73	16	1

2) ยิงเป้าทดสอบชนิดเจล

การยิงผ่านเจลถูกนำมาใช้เพื่อวัดผลจากการยิงสิ่งมีชีวิตโดยใช้เจลทดสอบเสมือนเป็นกล้ามเนื้อของมนุษย์ ระยะทางของการทะลุทะลวงผ่านเจล และการแตกของหัวกระสุน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของกระสุน เพื่อกำหนดระดับของหัวกระสุนที่ใช้ทดสอบ การทะลุทะลวงวัดระยะทางที่หัวกระสุนเข้าถึงสะเก็ดที่ไกลที่สุดในแท่งเจล แสดงดังรูปที่ 2.8 (a) ชิ้นส่วนกระสุนที่แตกออกจะถูกนำไปคัดแยกขนาดเพื่อวัดค่าการแตกหักและกำหนดระดับการแตกหักของหัวกระสุน แสดงดังรูปที่ 2.8 (b)



(a) หัวกระสุนผ่านเจลและแตกเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก

(b) ชิ้นส่วนกระสุนหลังการแตกหัก

รูปที่ 2.8 ผลของการแตกหักของหัวกระสุนชนิดแตกหักได้เมื่อกระทบเป้า

(Custom Cartridge Inc, 2005)

ตัวอย่างเช่น การทดสอบเมื่อใช้ กระสุนปืนขนาด 9 มม. (9 mm. Luger) น้ำหนักหัวกระสุน 100 Gr. (6.5 g) ยิงจากปืนพกยี่ห้อ Coult ลำกล้องยาว 12.7 cm. ที่ระยะห่างจากเป้า 3 m. เป้าที่ใช้ทดสอบคือแท่งเจลที่มีความหนา 40 cm. ผลของการทดสอบหัวกระสุนสามารถทะลุผ่านเจลเข้าไปได้ระยะ 25 cm. แต่ไม่ทะลุผ่านแท่งเจลทดสอบ กระสุนปืนเล็กยาวขนาด 7.62 มม. (.308 Winchester) น้ำหนักหัวกระสุน 125 Gr. (8.11g) ยิงจากปืนเล็กยาวมาตรฐาน M-14 ระยะห่างจากเป้า 3 m. เป้าที่ใช้ทดสอบคือแท่งเจล ที่มีความหนา 50 cm. ผลของการทดสอบหัวกระสุนสามารถทะลุผ่านเจลเข้าไปได้ระยะ 30 cm. แต่ไม่ทะลุผ่านแท่งเจลทดสอบ

3) ยิงเป้าทดสอบกับผนังลำตัวอากาศยาน

การทดสอบกับเครื่องบินโดยสาร Boeing 747 (Custom Cartridge Inc, 2005) ใช้กระสุนปืนขนาด 9 มม. (9 mm. Luger) น้ำหนักหัวกระสุน 100 Gr. (6.5 g) ยิงจากปืนพกยี่ห้อ Coult ลำกล้องยาว 12.7 cm. ที่ระยะห่างจากเป้า 6.30 เมตร เป้าที่ใช้ทดสอบคือผนังลำตัวด้านในของเครื่องบินโดยสาร Boeing 747 ปากลำกล้องปืนทำมุมกับผนังอากาศยานน้อยกว่า 30 องศา จนถึงทำมุม 90 องศา กับผนังลำตัวอากาศยาน ผลของการทดสอบหัวกระสุนสามารถทะลุผ่านชั้นบุภายใน ไปถึงผนังลำตัวด้านใน แต่ไม่ทะลุผ่านออกมาด้านนอกของอากาศยาน เนื่องจากผนังลำตัวอากาศยานไม่ได้รับกระแทกจากกระสุนโดยตรง เมื่อเปลี่ยนเป้าเป็นหน้าต่างเครื่องบินโดยยังทำมุม 30 องศา จะทะลุผ่านแผ่นพลาสติกด้านในของกระจก และเมื่อไปกระทบกับกระจกทึบความดันด้านนอกของลำตัวอากาศยานหัวกระสุนจะแตกกระจาย และทำให้กระจกเกิดรอยร้าวมีพื้นที่

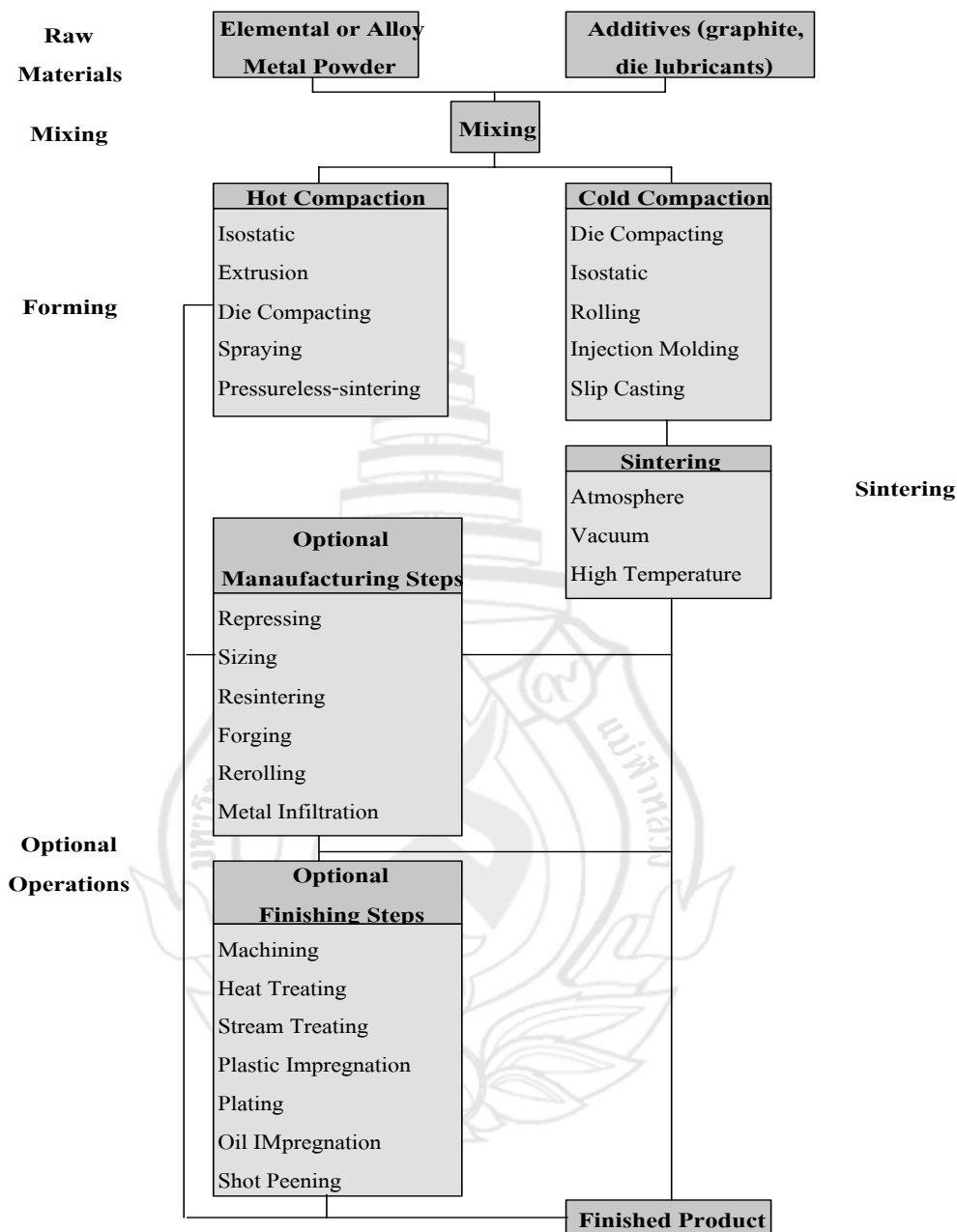
ประมาณ 15 cm² แต่ไม่ทำให้กระจกแตก เมื่อเปลี่ยนเป่าเป็นหน้าต่างเครื่องบินโดยยิงทำมุม 90 องศา หัวกระสุนจะทะลุผ่านกระจกทั้งสองชั้นและทำให้เกิดรูขนาดเล็กประมาณ 9 mm. ที่ด้านในของกระจกทนความดันและเกิดเป็นโพรงออกมายังกระจกด้านนอก แต่ก็ยังคงสภาพของกระจกที่ไม่แตกกระจายออกไป แต่เมื่อใช้หัวกระสุนขนาด 75 Gr. (4.87 g) ผลที่ได้กระสุนทะลุชั้นบุผนังลำตัวแต่ไม่ทะลุผนังลำตัวออกมาด้านนอก เมื่อเปลี่ยนเป่าเป็นกระจกและวางถังบรรจุน้ำ 1 แกลลอนที่ด้านหน้ากระจกโดยสมมติว่าเป็นผู้ก่อการร้ายจากนั้นทำการยิงด้วยมุม 90 องศาปรากฏว่ากระสุนทะลุผ่านถังบรรจุน้ำแต่ไม่สามารถเจาะทะลุส่วนใดๆของกระจกได้

2.2. การขึ้นรูปด้วยวิธีโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy method)

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางโลหะผง (Powder Metallurgy หรือ P/M) เป็นที่สนใจของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรม เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่าการผลิตชิ้นส่วนด้วยกรรมวิธีการผลิตและขึ้นรูปชิ้นงานทั่วไป ชิ้นส่วนที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานชิ้นสุดท้าย และมีเศษของวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปและตกแต่งน้อยมากกระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีโลหะผงวิทยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ การผสมผงโลหะ (Mixing) การขึ้นรูปผงโลหะ (Powder Compaction) และซินเทอร์ชิ้นงาน (Sintering)

2.2.1 การผสมผงโลหะ (Mixing) เป็นกระบวนการผสมผงโลหะบริสุทธิ์หลายชนิดเข้าด้วยกันโดย หรือผสมผงโลหะกับสารหล่อลื่น เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผงโลหะด้วยกันเองและระหว่างผงโลหะกับแม่พิมพ์ ในขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องผสมซึ่งทำให้ผงโลหะต่างชนิดหรือต่างขนาดมีการกระจายตัวเข้ากันอย่างสม่ำเสมอ เครื่องผสมที่นิยมใช้ได้แก่เครื่องผสมแบบหมุน (Fritz, 1984)

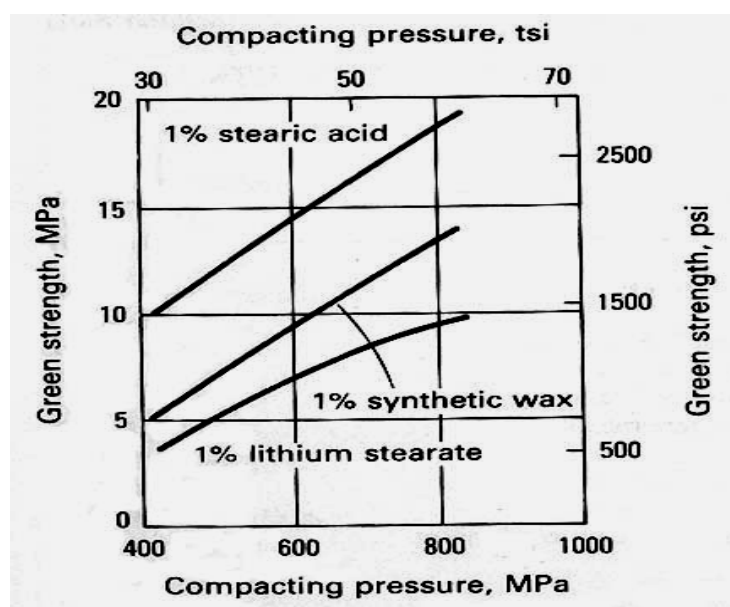
2.2.2 การอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Powder Compaction) การอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการกดอัดขึ้นรูปผงโลหะที่ผสมแล้วในแม่พิมพ์ (Die) การอัดขึ้นรูปผงโลหะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การขึ้นรูปร้อน (Hot Compaction) และการขึ้นรูปเย็น (Cold Compaction) โดยแต่ละประเภทยังมีวิธีการขึ้นรูปผงโลหะอีกหลายวิธี เช่น การอัดทุกทิศทาง การอัดผ่านแบบ การอัดด้วยแม่พิมพ์ การรีด การฉีด การหล่อสลึงเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (Fritz, 1984) ชิ้นงานที่ได้เรียกชิ้นงานกรีน (Green part) ซึ่งมีความแข็งแรงกรีน (Green Strength) เพียงพอต่อการเคลื่อนย้าย



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีทางโลหะผง (Fritz, 1984)

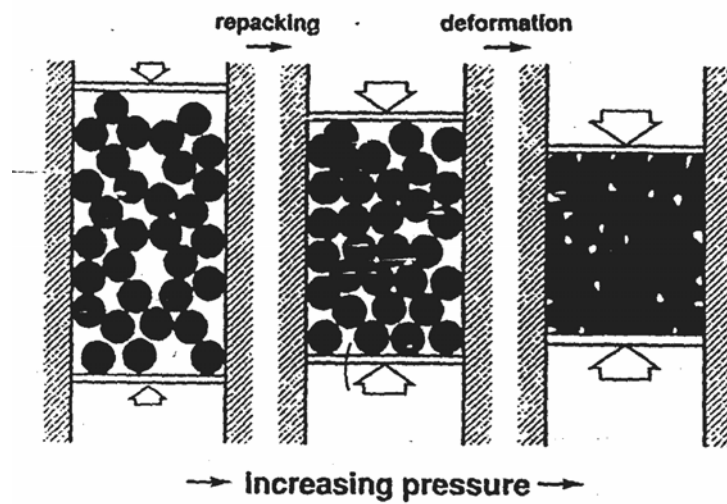
ความแข็งแรงกรีนของชิ้นงานจะแปรผันตามแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (รูปที่ 2.10) ชนิดของสารหล่อลื่นก็มีผลต่อความแข็งแรงกรีนของชิ้นงานเช่นกัน รูปที่ 2.10 แสดง

ให้เห็นว่า ที่แรงดันอัดขึ้นรูปเดียวกัน ชิ้นงานที่ใช้ Stearic acid เป็นสารหล่อลื่นจะมีความแข็งแรงกรีนสูงกว่าใช้ Synthetic wax หรือ Lithium wax

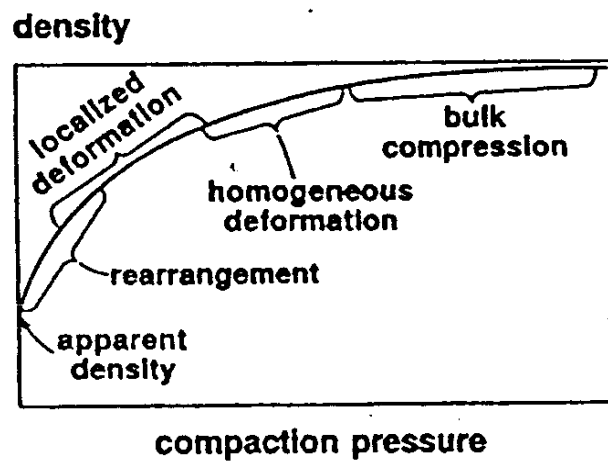


รูปที่ 2.10 สารหล่อลื่นต่อแรงอัดขึ้นรูปและความหนาแน่นกรีนของเหล็กกล้าไร้สนิม
(William, 2002)

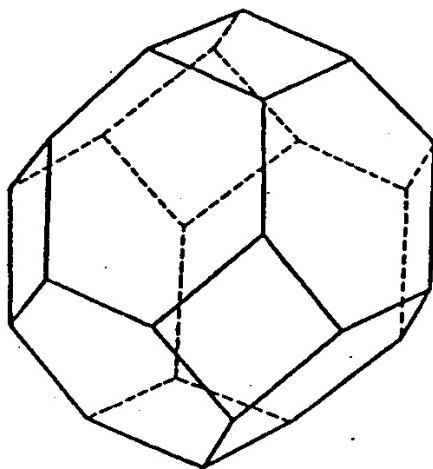
การใช้แรงดันอัดขึ้นรูปผงโลหะจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.11 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการเพิ่มแรงดันให้กับชิ้นงานที่แรงดันต่ำๆ ผงโลหะจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ (repacking) มีจำนวนการสัมผัสของอนุภาครอบข้างสูงขึ้น ทำให้รูพรุนในชิ้นงานลดลงอย่างมากทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 2.12) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันมากขึ้นรูพรุนในชิ้นงานจะลดลง จนกระทั่งไม่มีที่ว่างในการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค ความหนาแน่นของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ผงโลหะมีจำนวนการสัมผัสและพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น จุดสัมผัสใหม่เกิดขึ้นที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยุบตัวลง (Collapse) บริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคจะเกิด การเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) ปรากฏเป็นผิวแบนราบจากเดิมที่มีผิวเป็นผิวโค้งตามเส้นรอบวง (รูปที่ 2.13) ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค มีการเชื่อมเยื้องกันที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค ส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงขึ้นในชิ้นงาน ผงโลหะจะมีความหนาแน่นกรีนมากที่สุด เมื่ออนุภาคมีจำนวนโคออร์ดิเนชันเข้าใกล้ 1 ซึ่งสอดคล้องกับอนุภาครูปทรงเตตราไฮเดรอน (Tetrahedron)



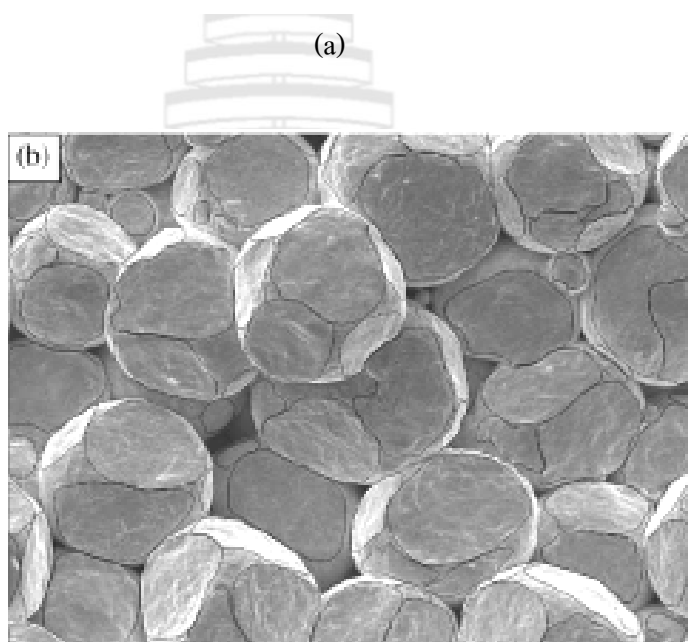
รูปที่ 2.11 ลำดับขั้นตอนการอัดแน่นผงวัสดุ (German, 1994)



รูปที่ 2.12 ความหนาแน่นที่ได้จากแรงกระทำจากภายนอก (German, 1994)



tetrakaidecahedron



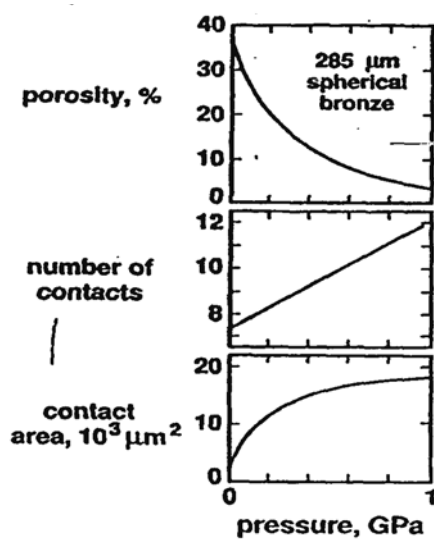
(b)

รูปที่ 2.13 ภาพแสดงลักษณะรูปร่างของอนุภาคหลังการอัดขึ้นรูป

(a) Tetrakaidecahedron (German, 1994)

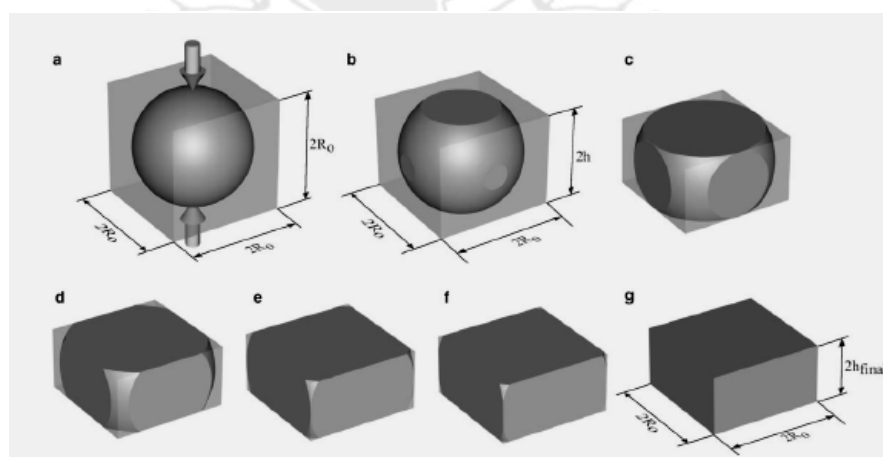
(b) Tetrakaidecahedron (Montes, 2005)

รูปที่ 2.14 แสดงถึงการอัดขึ้นรูปของอนุภาคบรอนซ์ จะเห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความพรุนจะลดลง จำนวนสัมผัสและพื้นที่การสัมผัสเพิ่มขึ้น

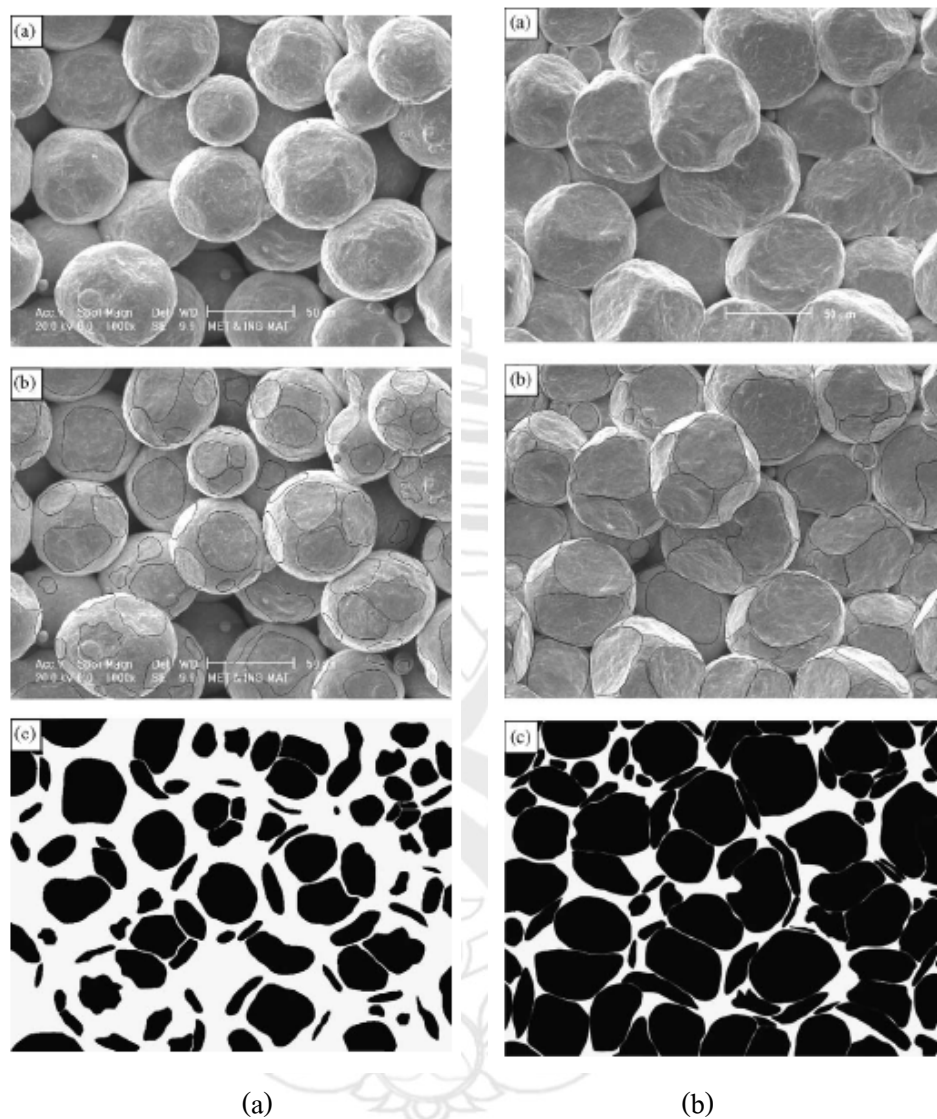


รูปที่ 2.14 แผนภูมิของอนุภาคบรอนซ์ทรงกลมแสดงความดันและการจัดเรียงตัวของอนุภาค (German, 1994)

Montes (2006) ศึกษาเรื่องผลตอบสนองของพื้นที่ในวัสดุผงที่อัดขึ้นรูปตามแนวแกนเดียว พบว่าเมื่อเพิ่มแรงอัดมากขึ้นรูพรุนจะลดลง เนื่องจากการยุบตัวของผงโลหะและเข้าแทนที่ช่องว่างที่อยู่รอบๆอนุภาค แสดงด้วยแบบจำลองอนุภาคทรงกลม 1 Unit cell เมื่อได้รับแรงกด จะเกิดการเปลี่ยนรูปตามจุดสัมผัสที่เกิดจากผงโลหะรอบข้างและแสดงแนวโน้มจะเปลี่ยนรูปเป็นรูป cubic แสดงใน รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนรูปและเข้าแทนที่ช่องว่างที่อยู่รอบๆอนุภาค (Montes, 2005)

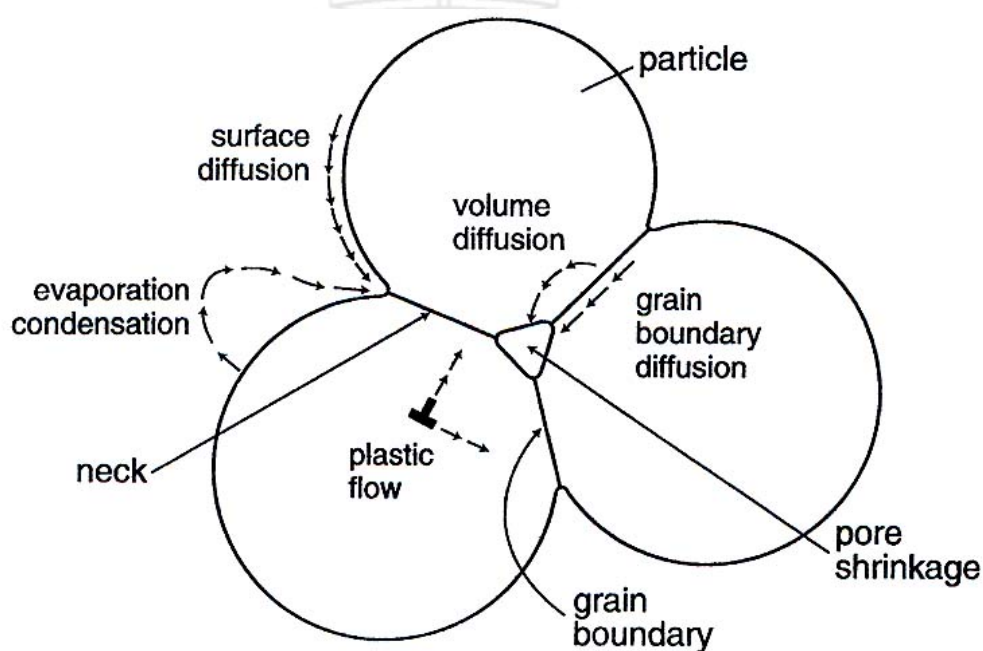


รูปที่ 2.16 พื้นที่สัมผัสของอนุภาคภายใต้แรงดันที่เพิ่มขึ้น (a) เริ่มให้แรงอัดพื้นผิวสัมผัสมีน้อย
(b) แรงอัดเพิ่มขึ้นพื้นที่สัมผัสของอนุภาคเพิ่มขึ้น (Montes, 2005)

เมื่อแรงกดเพิ่มมากขึ้นรูพรุนมีขนาดเล็กลงพื้นที่สัมผัสของอนุภาคมีมากขึ้น แสดงด้วย
ภาพแรงเสียดทานที่เพิ่มมากขึ้น วัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.16)

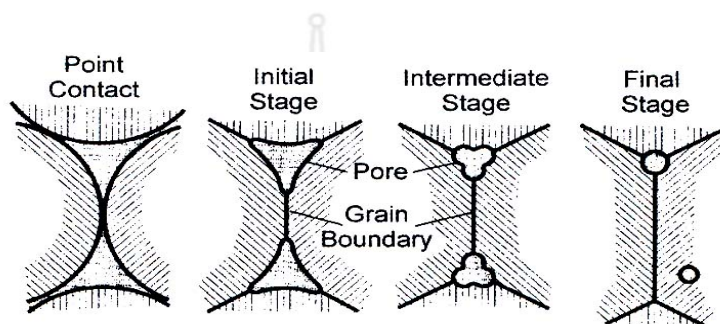
2.2.3 ซินเทอร์ (Sintering) เป็นกระบวนการเผาชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปเย็น ซินเทอร์มักจะใช้อุณหภูมิประมาณ $2/3$ หรือ $3/4$ ของจุดหลอมเหลวของวัสดุหลักและเผาชิ้นงานในบรรยากาศที่ป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ความร้อนจะทำให้เกิดการแพร่ และเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาค ช่องว่างหรือรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น (Fritz, 1984)

กลไกการแพร่ของมวลในขั้นตอนซินเทอร์ อนุภาคที่มีผิวสัมผัสกันจะเกิดคอเชื่อม (necking) เกิดขอบเกรน (grain boundary) เกิดการแพร่ ในลักษณะต่างๆ เช่น การแพร่ของการมีอนุภาคของสารชนิดอื่นเข้ามาผสม (Impurity diffusion) หรือการแพร่ภายในตัวของอนุภาคสารเอง (Self diffusion) เช่นการแพร่แบบปริมาตร (Volume diffusion) การแพร่บนพื้นผิว (Surface diffusion) การระเหยและควบแน่น (Evaporation Condensation) และเกิดการเลื่อนไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ส่งผลให้รูพรุนภายในชิ้นงานมีขนาดเล็กลง



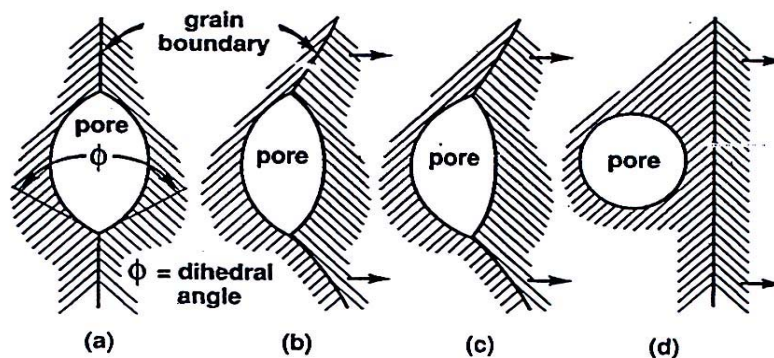
รูปที่ 2.17 แสดงกลไกการแพร่ของมวลในขั้นตอนซินเทอร์ (Callister, 2002)

รูปที่ 2.18 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนขณะซินเทอรัมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนที่โตขึ้น โดยเริ่มต้นรูพรุนจะอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาค เมื่อเริ่มมีขอบเกรนเกิดขึ้น และมีการขยายตัวจะทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาระหว่างรูพรุนและขอบเกรนเกิดขึ้นสามลักษณะคือ หนึ่งรูพรุนทำให้เกรนโตช้าลง สองรูพรุนถูกลากไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของขอบเกรน ขณะเกิดการโตของเกรน และสามขอบเกรนแยกจากรูพรุนทิ้งให้รูพรุนค้างอยู่ในเกรน (รูปที่ 2.19)



รูปที่ 2.18 ลักษณะการขยายของขอบเกรนและการเกิดรูพรุนในขั้นตอนซินเทอรั

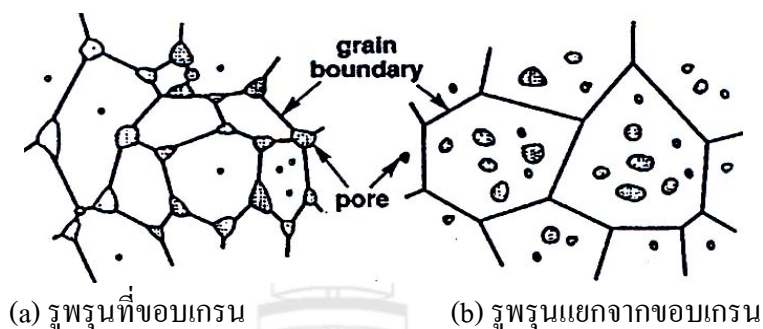
(German, 1994)



รูปที่ 2.19 ปรากฏการณ์ขอบเกรนลากรูพรุนไปไว้ในเกรน (Pore drag effect)

(German, 1994)

ในกระบวนการโลหะวิทยาที่ต้องการความหนาแน่นสูง จะต้องลดการแยกตัวของรูพรุนกับขอบเกรนให้มีจำนวนน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนลักษณะฟองน้ำขึ้นภายในชิ้นงาน (รูปที่ 2.20) เมื่อเกิดรูพรุนลักษณะฟองน้ำจะทำให้การเพิ่มความหนาแน่นให้วัสดุทำได้ยากขึ้น

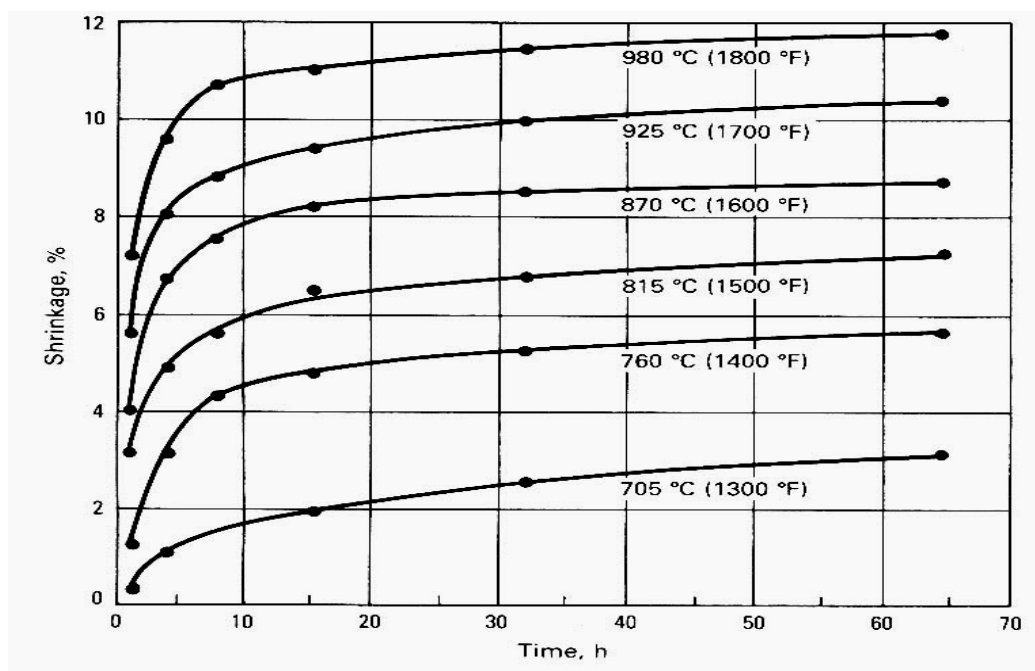


(a) รูพรุนที่ขอบเกรน

(b) รูพรุนแยกจากขอบเกรน

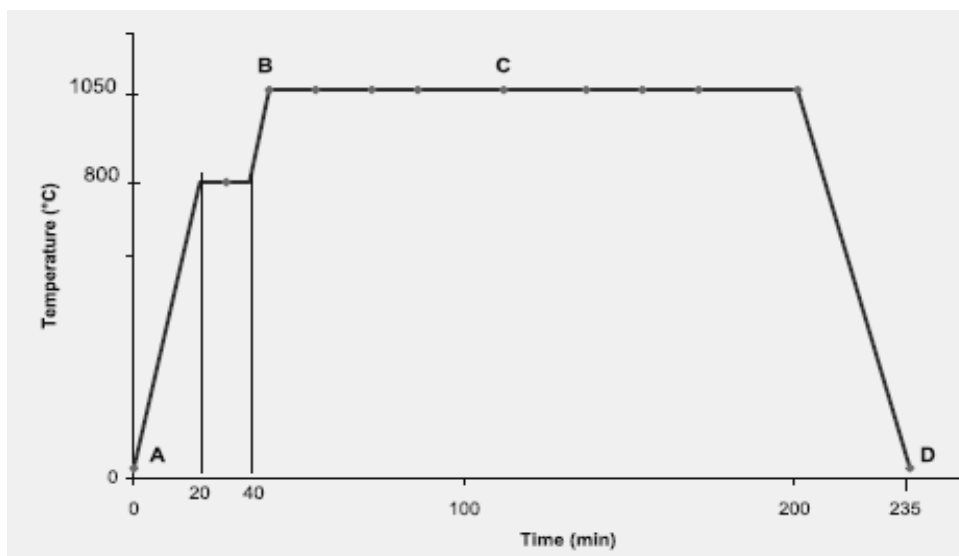
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเกิดรูพรุนหลังซินเทอร์ (German, 1994)

ในขั้นตอนซินเทอร์นี้จะเกิดคอเชื่อม (Necking) ขณะที่คอเชื่อมขยายใหญ่ขึ้นจะเกิดการดึงอนุภาคเข้ามาชิดกันทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานหลังซินเทอร์ซึ่งค่าการหดตัวจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในซินเทอร์และเวลาที่ใช้ หากใช้อุณหภูมิสูงหรือเวลายาวมากก็จะเกิดการหดตัวมากขึ้นด้วย เช่นลักษณะการหดตัวของผงทองแดงที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน (รูปที่ 2.21)

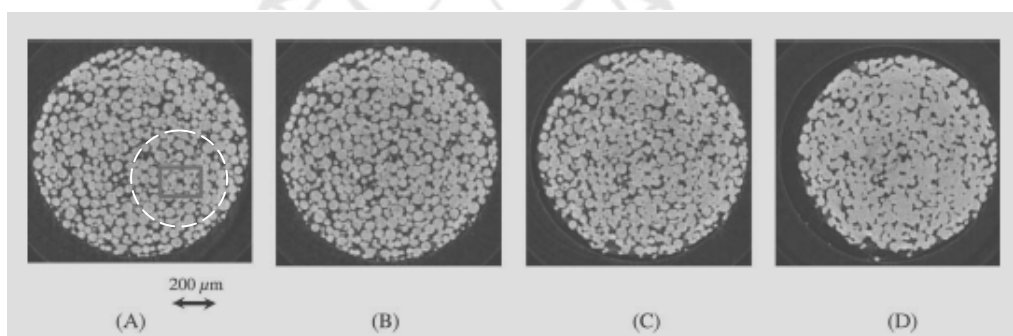


รูปที่ 2.21 พฤติกรรมการหดตัวของผงทองแดงที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน (German, 1994)

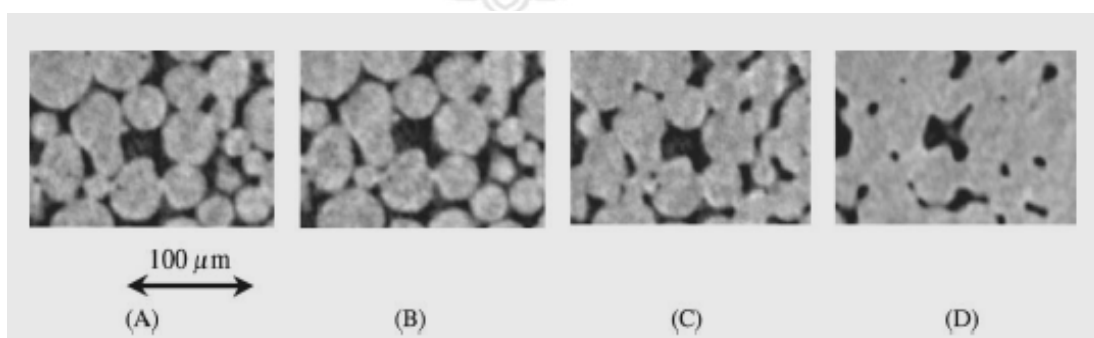
Lime (2003) ศึกษาการเชื่อมติดกันของผงโลหะในชั้นตอนซินเทอร์โดยใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการศึกษา พบว่าเมื่ออุณหภูมิซินเทอร์สูงขึ้นและเวลาในการเผามากขึ้น วัสดุมีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น รูพรุนมีจำนวนลดลง โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาของการวัดขนาดรูพรุนที่จุด A อุณหภูมิห้อง เวลา 0 นาที ที่จุด B อุณหภูมิ 1050°C เวลา 50 นาที ที่จุด C อุณหภูมิ 1050°C เวลา 110 นาที ที่จุด D อุณหภูมิห้อง (หลังการทำให้เย็น) เวลา 235 นาที แสดงในรูปที่ 2.22 และการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูพรุนที่จุดต่างๆลดลง ตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงใน รูปที่ 2.23, 2.24



รูปที่ 2.22 อุณหภูมิและเวลาที่ซินเทอร์ (Lime, 2003)



รูปที่ 2.23 การประสานของผงโลหะตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นที่จุดต่างๆ (Lime, 2003)



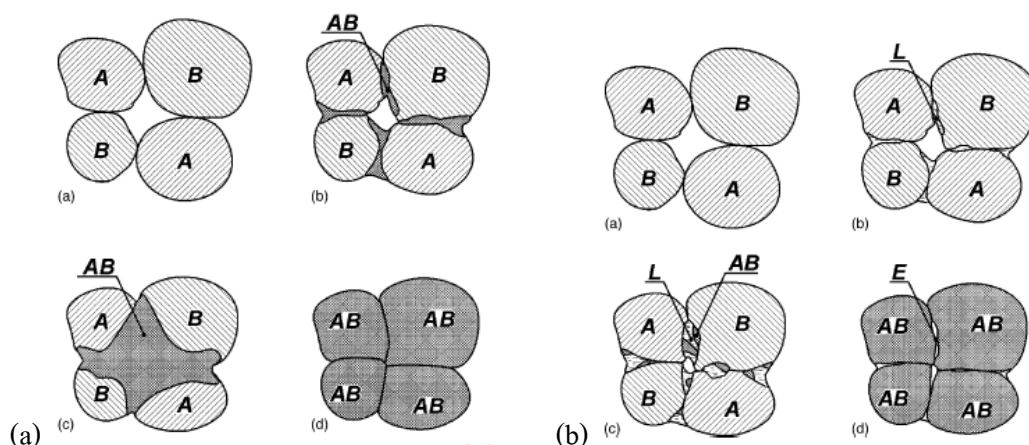
รูปที่ 2.24 รูปขยายการเชื่อมประสานของผงโลหะตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น (Lime, 2003)

ดังนั้นในขั้นตอนซินเทอริงจึงต้องมีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุนั้น โดยพิจารณาอุณหภูมิและเวลาสำหรับซินเทอริงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง และมีความแข็งแรงเพียงพอในการใช้งาน ซึ่งมีการศึกษาซินเทอร์ของวัสดุ ดังนี้

1. ซินเทอริงโลหะผสม (Mixed powder sintering) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับซินเทอร์ร่วมระหว่างผงวัสดุสองเฟสที่มีจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกันมาก ความแตกต่างของส่วนผสมช่วยในซินเทอร์ คือทำให้ช่วยส่งเสริมความสามารถแพร่ หรือการเพิ่มปริมาณของการแพร่ ให้เพิ่มขึ้น และมีการอินเตอร์เฟสทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ และยับยั้งการโตของเกรน ดังนั้น ซินเทอร์เฟสผสมจึงต้องควบคุมเวลาและอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซินเทอร์เฟสผสมดีที่สุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กและมีระยะทางในการแพร่สั้น ถ้าอัตราการแพร่ของวัสดุสองชนิดแตกต่างกันมาก จะเกิดรูพรุนขึ้นเพราะการแพร่ที่ไม่เท่ากัน ผลคืออาจจะมีการบวมเกิดขึ้นโดยเฉพาะถ้าจุดหลอมเหลวต่างกันมากๆ เช่น การเติมอลูมิเนียมลงไปในการทำให้เหล็กเกิดการบวมขึ้นเมื่ออลูมิเนียมหลอมเหลว การควบคุมอุณหภูมิและเวลาในซินเทอริงที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดเฟสค่อขึ้น ได้โลหะผสมที่เปราะ (German, 1994)

Condela (2001) ศึกษาความสามารถในซินเทอร์บรอนซ์ และเหล็กฟอสฟอรัส บรอนซ์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของโลหะเหล็กฟอสฟอรัสบรอนซ์ขึ้นอยู่กับจำนวนบรอนซ์ที่ผสม ปริมาณบรอนซ์มากจะทำให้เกิดการขยายตัวได้มาก และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 700-900°C และโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันมากๆ จะขยายตัวเมื่อตัวประสานหลอมเหลวและเปลี่ยนเฟสจากของแข็ง เป็นเฟสของเหลว (Liquid phase) และการเปลี่ยนแปลงขนาดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Nowacki (2006) ศึกษาการเกิดเฟสผสม พบว่าการเกิดเฟสผสมของโลหะเกิดได้หลายกรณี เช่นกรณีที่หนึ่งคือการเกิดสารผสม (A+B) ที่จุดสัมผัส ผลที่ได้หลังการเผาจะได้วัสดุผสม (AB) (รูปที่ 2.25 a) หรือกรณีที่สองคือการเกิดของเหลว (Liquid phase) และสารผสม (A+B) ที่จุดสัมผัส ผลที่ได้หลังการเผาจะได้วัสดุผสม (AB) และหลังการทำให้เย็นตัวลง จะมีรูพรุนที่บริเวณขอบเกรน (รูปที่ 2.25 b) การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุผสม ชิ้นงาน จะเกิดการขยายตัวขณะผงโลหะหลอมเหลว และการขยายตัวของชิ้นงานจะขึ้นกับเวลาในการซินเทอร์ เมื่อโลหะหลอมเหลวและผสมรวมกันขึ้นวัสดุจะเกิดการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและขยายตัวอย่างรวดเร็วที่เวลานาทีที่ 80 ถึงนาทีที่ 100 ของเวลาที่ใช้ในซินเทอร์ แต่เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นวัสดุ จะรวมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ชิ้นวัสดุจะเกิดการหดตัวทำให้รูพรุนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.25 การเกิดเฟสผสม (a) สารผสม (A+B) ที่จุดสัมผัส (b) การเกิดของเหลว (Liquid phase) และสารผสม (A+B) ที่จุดสัมผัส (Nowacki, 2006)

2. ซินเทอริงเฟสของเหลว (Liquid phase sintering) ซินเทอริงในระบบ ผงผสมสองเฟสมีความเป็นไปได้ที่เฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะกลายเป็นของเหลว การมีเฟสของเหลวช่วยให้มีการเคลื่อนที่เร็วส่งผลให้ซินเทอร์เร็วขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอน การทำให้เปียก (wetting) เป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอันดับแรก เนื่องจากของเหลวจะเป็นแผ่นฟิล์มบางกระจายรอบเฟสของแข็ง และเกิดการแพร่ของอะตอมของแข็งอย่างรวดเร็ว แผ่นฟิล์มบางจะก่อให้เกิดแรงดึงผิวและเสริมให้เกิดการแน่นตัว ตัวอย่างระบบที่ของเหลวที่เกิดขึ้นขณะซินเทอร์คือ ทั้งสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) ทั้งสเตน-ทองแดง (W-Cu) ทองแดง-ดีบุก (Cu-Sn) เหล็ก-ทองแดง-คาร์บอน (Fe-Cu-C) เป็นต้น ซินเทอร์ที่มีเฟสของเหลว มีอัตราการแน่นตัวสูงกว่าซินเทอร์สถานะของแข็ง และใช้เวลาสั้น (German, 1994)

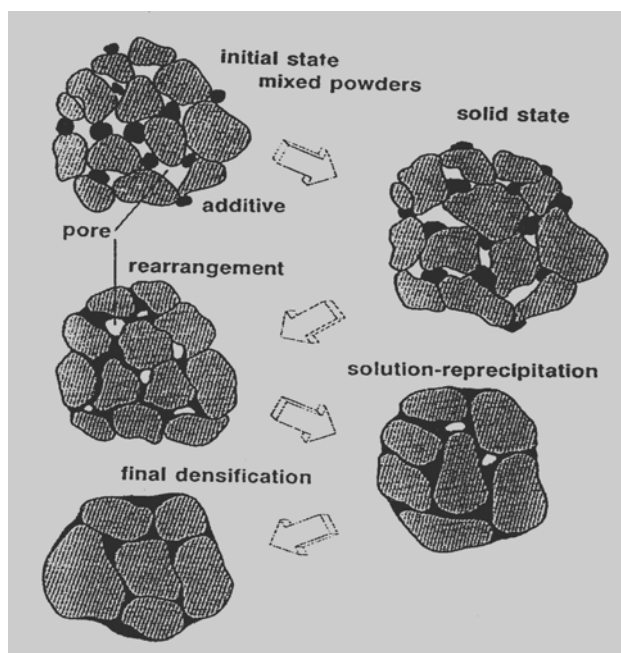
ความสามารถในการละลายเป็นปัจจัยสำคัญในซินเทอร์เฟสของเหลว ถ้าความสามารถในการละลายของเหลวในของแข็งต่ำ บวกกับความสามารถในการละลายของแข็งในของเหลวสูง จะทำให้เกิดการแน่นตัวของชิ้นวัสดุมาก ถ้าความสามารถในการละลายทั้งของแข็งและของเหลวสูง เป็นสิ่งที่คาดการณ์ได้ยากที่สุด เพราะจะเกิดการบวมและการแน่นตัว รวมทั้งมีความไวต่อตัวแปรในกระบวนการอื่นขึ้นกับ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค และความหนาแน่นก่อนเผา เช่นระบบทองแดง-ดีบุก (Cu-Sn) แสดงทั้งพฤติกรรมการบวมและการหดตัว (German, 1994)

อรุณ (2545) พบว่าเมื่อตัวประสานที่หลอมละลายได้เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานกลับลดลง รูปพรุนในชิ้นงานมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก สาเหตุ

ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากปรากฏการณ์ Swelling เมื่อชิ้นงานถูกแทรกซึมด้วยตัวประสานที่หลอมเหลวจะมีการหดตัวที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ตัวประสานที่หลอมเหลวไหลเข้าไปแทรกปกคลุมอยู่ระหว่างอนุภาคของทองแดงในระหว่างการเผาประสาน ทำให้กระบวนการเผาประสานไม่สามารถเกิดได้โดยสะดวก การหดตัวโดยรวมของชิ้นงานจึงลดลง

การประยุกต์ใช้ซินเทอร์ริงผงผสมและเฟสของเหลว เช่น การทำบรอนซ์พูนจากการผสมผงทองแดงและผงดีบุก (จุดหลอมเหลวของดีบุกคือ 232°C และจุดหลอมเหลวของทองแดงคือ $1,083^{\circ}\text{C}$) จะให้ความร้อนดีบุกหลอมเหลวและไปเปียกทองแดงและทิ้งรูพูนไว้ การเปลี่ยนขนาดเล็กน้อยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 232°C เมื่อดีบุกหลอมเหลว และเห็นการบวมชัดเจนที่อุณหภูมิประมาณ 700°C (ผิวอนุภาคทองแดงเริ่มละลาย) ซึ่งเป็นการแพร่อย่างรวดเร็วของดีบุกเข้าสู่ทองแดง ส่งผลให้เกิดรูพูนมากขึ้น ของเหลวที่เกิดขึ้นจะอยู่ชั่วขณะ เนื่องจากโลหะผสมทองแดง-ดีบุก มีสถานะเป็นของแข็งจนถึงอุณหภูมิเข้าใกล้ 800°C เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 800°C การหดตัวเกิดขึ้นตามการเกิดของของเหลว ถ้าให้ความร้อนนานขึ้นโลหะผสมจะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อเกิดเป็นชิ้นวัสดุเฟสเดียว การรวมเป็นเฟสเดียวทำให้เกิดการแพร่แบบไหลขณะซินเทอร์ริงเฟสผสม และการแน่นตัวจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันในที่สุด

รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างกระบวนการเกิดเป็นชิ้นวัสดุเฟสเดียวหลังซินเทอร์ริงผงผสมตามขั้นตอน เริ่มจากการผสม การจัดเรียงอนุภาค การเป็นเฟสของเหลวเข้าแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาค และขั้นการแน่นตัวในที่สุด รูพูนภายในจะลดลงตามลำดับจนลำดับสุดท้ายจะมีความหนาแน่นเต็ม



รูปที่ 2.26 กระบวนการเกิดเป็นชิ้นวัสดุเฟสเดียวหลังซินเทอร์ผงผสม

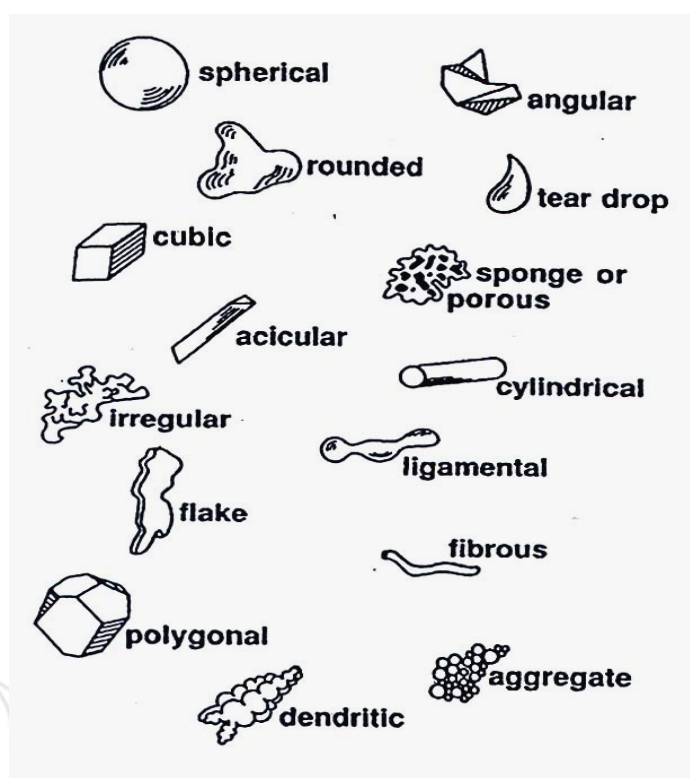
(German, 1994)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปผงโลหะ

การอัดขึ้นรูปผงโลหะมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลถึงสมบัติของชิ้นงาน โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้ (มณฑาส, 2549)

2.3.1 รูปร่างของผงโลหะ (Powder shape) รูปร่างของผงโลหะเป็นคุณลักษณะที่ควรพิจารณา เนื่องจากรูปร่างของผงโลหะจะส่งผลต่อการอัดขึ้นรูปเช่น อัตราการไหล (Flow rate) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ความสามารถในการถูกอัด (Compressibility) และความสามารถในการเชื่อมประสาน (Sintering ability) ลักษณะรูปร่างของผงโลหะมีหลากหลายขึ้นกับกรรมวิธีผลิตผงโลหะที่ต่างกัน ผงโลหะทรงกลม (Spherical) ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยแก๊ส (Gas Atomization) ผงโลหะรูปร่างไม่แน่นอนผิวโค้งมน (Rounded) ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยน้ำ (Water Atomization) ผงโลหะเป็นแผ่นแบน (Flake) ได้จากการผลิตแบบบดย่อย (Mill) เป็นต้น (รูปที่ 2.27)

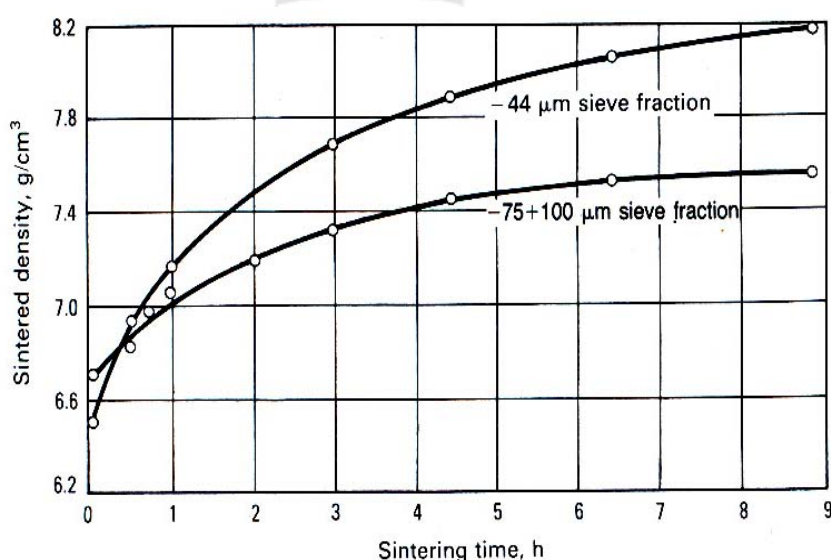
ผงโลหะที่มีผิวอนุภาคที่ขรุขระจะช่วยให้ความแข็งแรงก่อนเผาเพิ่มขึ้นในรูปของการเกาะเกี่ยวเชิงกลของอนุภาค (German, 1994) การอัดแน่นของอนุภาครูปร่างคล้ายฟองน้ำที่มีความพรุนภายในทำได้ยาก เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กๆ ภายในฟองน้ำจะขัดขวางการอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ผงขนาดเล็ก ผงที่มีความแข็ง และผงลักษณะฟองน้ำทำให้แรงดัดกลับในขั้นตอนการเอาชิ้นงานออกมีค่าสูง และมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย (German, 1994)



รูปที่ 2.27 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะแบบต่างๆ (German, 1994)

2.3.2 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดผงโลหะ (Powder size and Size distribution)
ขนาดของผงโลหะและการกระจายตัวของขนาดผงโลหะ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน โดยพบว่าผงโลหะที่มีขนาดเล็กจะทำให้ประสิทธิภาพในซินเทอริง (Sintering efficiency) เกิดได้เร็วกว่ากรณีที่ใช้ผงขนาดใหญ่ (รูปที่ 2.28) เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมาก ทำให้มีบริเวณที่สามารถแพร่ผ่านของมวลมาก เกิดการเชื่อมติดของผงโลหะได้ดีและเร็วขึ้น ส่งผลให้รูพรุนในชิ้นงานลดลงและชิ้นวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (German, 1994)

ขนาดของผงโลหะมีผลกระทบต่อแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ความหนาแน่นจากการจัดเรียงตัวและขนาดรูพรุน ผงขนาดเล็กทำให้มีความยุ่งยากในการอัดขึ้นรูปเพราะรูพรุนระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็กต้องใช้แรงดันที่สูงกว่ารูพรุนขนาดใหญ่ จึงทำให้ผงขนาดใหญ่อัดแน่นได้ดีกว่าผงขนาดเล็ก แต่การเกิดเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่งในผงขนาดใหญ่จะเกิดช้ากว่าผงขนาดเล็ก เนื่องจากระยะห่างของอนุภาคทำให้การเคลื่อนที่ของ ดิสโลเคชันกว้างกว่าผงขนาดเล็ก (มนภาส, 2549) การกระจายตัวของขนาดจะส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏ เนื่องจากการที่มีขนาดของผงที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการแทรกตัวของผงขนาดเล็กระหว่างผงขนาดใหญ่ จำนวนอนุภาคข้างเคียงเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปจะทำให้สามารถอัดขึ้นรูปได้สูงกว่าผงโลหะที่มีการกระจายตัวแคบหรือมีขนาดเดียว จำนวนอนุภาคข้างเคียงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 2.6) (German, 1994)



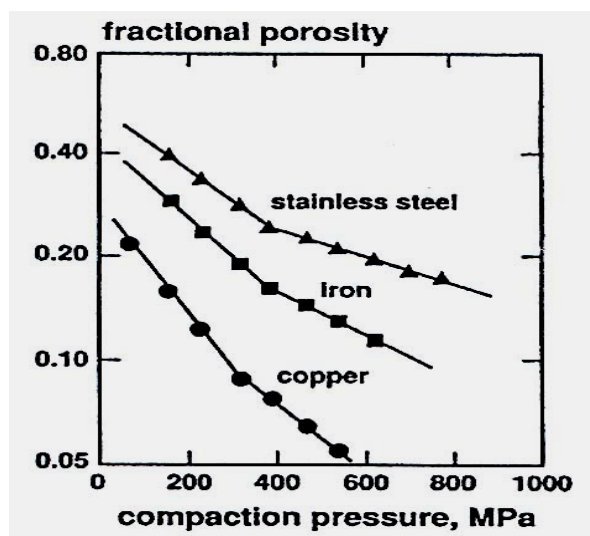
รูปที่ 2.28 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงที่ขึ้นรูปจากผงขนาดต่างกันหลังซินเทอร์ (Klar, 1984)

ตารางที่ 2.6 ผลของจำนวนอนุภาคข้างเคียงต่อความหนาแน่นปรากฏ (Fritz, 1984)

รูปแบบการจัดเรียงอนุภาค	ความหนาแน่น (%)	จำนวนจุดสัมผัส
Simple cubic	52	6
Body center cubic (BCC)	68	8
Face center cubic (FCC)	74	12
Hexagonal closed packed (HCP)	74	12

2.3.3 แรงดันอัดขึ้นรูป (Compaction Pressure) แรงดันอัดขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ความหนาแน่นก่อนเผาเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือความพรุนลดลง ที่แรงดันอัดขึ้นรูปต่างกันก็จะทำให้ผงโลหะชนิดเดียวกันนี้มีความสามารถในการอัดตัวต่างกัน และทำให้ได้ค่าความหนาแน่นก่อนเผต่างกันด้วย แต่เมื่อให้แรงดันอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจนเกินความแข็งแรงคราก (Yield Strength) ของวัสดุนั้น แม้จะให้แรงดันอัดขึ้นรูปสูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพการอัดแน่นจะต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ความหนาแน่นเต็ม (Full density) ซึ่งพฤติกรรมนี้ถูกควบคุมด้วยเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่ง (Work hardening)

รูปที่ 2.29 แสดงตัวอย่างการแน่นตัวของผงโลหะ โดยดูจากสัดส่วนของรูพรุนที่แรงดันอัดต่างๆ ที่ 300 MPa ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งให้เห็นว่ากลไกในการอัดแน่นมีการเปลี่ยนแปลง ที่แรงดันอัดต่ำกว่า 300 MPa การอัดแน่นจะสัมพันธ์กับความแข็งแรงครากของวัสดุ ที่แรงดันอัดสูงกว่า 300 MPa ประสิทธิภาพของการอัดแน่นต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ความหนาแน่นเต็ม การอัดแน่นจะถูกควบคุมด้วยพฤติกรรมเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่งของวัสดุ สังเกตได้ว่าทองแดงซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำสุดจะแสดงความพรุนต่ำสุดที่ทุกระดับความดัน ในการอัดแน่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นผงพรีอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงสูงสุด และเกิดความแข็งแรงจากเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่งเร็วที่สุด จึงมีความพรุนสูงสุด



รูปที่ 2.29 แสดงค่าเวิร์กฮาร์ดเทนนิ่งของผงโลหะต่างชนิดกัน (German, 1994)

2.3.4 พันธะของอนุภาคในชิ้นงานก่อนเผา (Particle bonding in the green state)

พันธะระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการอัดแน่นทำให้เกิดเป็นความแข็งแรงก่อนเผา อนุภาคทรงกลมจะมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้อยทำให้ความแข็งแรงก่อนเผาไม่ค่อยดี การอัดอนุภาคทรงกลมจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเฉพาะหลังการอบผนึกเท่านั้น (German, 1994) ผิวอนุภาคสะอาดช่วยให้พันธะระหว่างอนุภาคดีขึ้น พันธะระหว่างอนุภาค จะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและแรงไฟฟ้าสถิตที่ตัดผ่านกัน แรงเหล่านี้มีความแข็งแรงมากขึ้นถ้าผงวัสดุมีขนาดเล็กและมีพื้นผิวสะอาด อย่างไรก็ตามการเกาะเกี่ยวเชิงกลมีผลในการทำให้ความแข็งแรงก่อนเผาสูงขึ้นอย่างมาก การเกาะเกี่ยวเชิงกลจะมีค่ามากขึ้นถ้าอนุภาคมีรูปร่างไม่แน่นอน จากคุณลักษณะนี้เมื่อผนวกกับต้นทุนที่ต่ำและมีความสามารถในการอัดสูง ทำให้วัสดุที่ผลิตด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยน้ำได้ผงโลหะที่มีลักษณะมีรูปร่างไม่แน่นอน และกลมมน มีผิวที่สะอาดจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการอัดแน่นแบบทิศทางเดียวผ่านแม่พิมพ์ (German, 1994)

2.3.5 อุณหภูมิที่ใช้ในซินเทอริง (Sintering Temperature) ซินเทอริงที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดกลไกการแพร่ของมวล (Mass diffusion) ได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง (German, 1994) ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิในซินเทอริง จะต้องพิจารณาจากตัววัสดุที่ใช้โดยจะเลือกอุณหภูมิในซินเทอริงเป็น 2/3 หรือ 3/4 ของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุนั้น กรณีที่เป็นวัสดุผสม (Composite) ให้พิจารณาวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) หรือส่วนผสมหลักที่มีปริมาณมากที่สุด อุณหภูมิซินเทอริง

มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลอย่างมาก (ภานุ, 2006) ตารางที่ 2.7 แสดงผลของการเพิ่มอุณหภูมิซินเทอร์ผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดย ความหนาแน่น การหดตัว และความต้านทานแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ในขณะที่ความเค้นครากลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานแสดงสมบัติของความเหนียว ผลจากการศึกษานี้ เป็นแนวทางในการเลือกอุณหภูมิซินเทอร์เพื่อให้ได้สมบัติของชิ้นงานเหมาะสมกับการใช้งาน เวลาที่ใช้ในซินเทอร์ก็มีส่วนสำคัญเช่นกัน ที่อุณหภูมิซินเทอร์เท่ากันถ้าเพิ่มเวลาในซินเทอร์ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการแพร่และเชื่อมติดกันของอนุภาคดีขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปก็อาจเกิดการโตของเกรน (Grain growth) ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง อีกทั้งสิ้นเปลืองเวลาในการผลิตและเปลืองแก๊สด้วย (มนภาส, 2549)

ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่ออุณหภูมิซินเทอร์ (ภานุ, 2549)

อุณหภูมิซินเทอร์ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	การหดตัว (%)	ความเค้น คราก (MPa)	ร้อยละ(%) ความเครียด จากแรงดึง	ความต้านทาน แรงดึง (MPa)
1,150	7.187	0.280	173.881	0.439	133.013
1,200	7.180	1.380	171.154	4.294	206.500
1,250	7.105	1.400	170.065	5.364	234.101
1,300	7.156	1.970	161.625	9.624	284.306
1,350	7.162	2.610	152.555	22.513	366.828
1,400	7.307	3.170	151.150	37.489	406.932

Kato (2003) ได้ศึกษาการสึกหรอและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม ทองแดง- ดีบุก หลังซินเทอร์ พบว่าทองแดง-ดีบุก ปราศจากสารหล่อลื่นเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 820°C (1,093 K) เวลา 60 นาที โลหะผสมที่ได้มีความแข็ง 50 Vickers Hardness (HV) และความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น

2.3.6 แก๊สที่ใช้เป็นบรรยากาศปกคลุม (Sintering atmosphere) ในขั้นตอนซินเทอร์ นอกจากจะมีอุณหภูมิและเวลาแล้ว จำเป็นต้องมีแก๊สปกคลุม เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวชิ้นงานหรือผงโลหะสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน โลหะจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ผงโลหะไม่สามารถเชื่อมติดกันได้และมีความแข็งแรงต่ำ ในการเลือกใช้แก๊สควรพิจารณาถึงสมบัติของวัสดุที่ซินเทอร์ว่าเป็นโลหะชนิดอะไร ตัวผงโลหะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สหรือไม่ พร้อมทั้งพิจารณาสมบัติของวัสดุที่ต้องการเช่นต้องการให้ได้วัสดุที่สะอาดหรือไม่ สีสวยงามหรือไม่หลังซินเทอร์ ราคาแก๊ส และความปลอดภัยเป็นหลัก (มณฑาส, 2549) แก๊สที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ ไนโตรเจน(N_2) อาร์กอน (Ar) และบางกรณีก็เป็นตัวรีดิวซ์ออกซิเจนออกจากระบบด้วย เช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 ผงโลหะ

ผงโลหะที่ใช้ในการทดลองมีสองชนิดคือผงทองแดง (Copper powder) และผงดีบุก (Tin powders) ผงโลหะทั้งสองชนิดมีรูปร่างกลม (Spherical) ผลิตจากกระบวนการพ่นด้วยแก๊ส (Gas Atomization) จากบริษัท Siam product ขนาดของผงโลหะแสดงใน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของผงโลหะที่ใช้ในการทดลอง

ผงโลหะ	ขนาดเฉลี่ย (μm)
ผงทองแดง A	87
ผงทองแดง B	288
ผงดีบุก	35

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องคัดขนาดโลหะผงยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 Control 'g'

3.2.2 เครื่องวัดขนาดอนุภาค ยี่ห้อ Master size รุ่น 2000

3.2.3 เครื่องอัดชิ้นงานยี่ห้อ Drost รุ่น TPA50/4

3.2.4 เตาซินเทอร์ริงชิ้นงานแบบควบคุมบรรยากาศยี่ห้อ Linn รุ่น 1800 Vac

3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ A&D รุ่น GF-3000 พร้อมอุปกรณ์วัดความหนาแน่น

A&D GF-1300

3.2.6 เครื่องขัดชิ้นงานแบบหมุนยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-5

- 3.2.7 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง Instron UTM 5583
- 3.2.8 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกด Instron UTM 450
- 3.2.9 เครื่องวัดความแข็ง Micro hardness tester รุ่น Model M-400-G3, LECO
- 3.2.10 เครื่องตัดชิ้นงาน Buelher
- 3.2.11 เครื่องขึ้นเรือนร้อนชิ้นงาน (Hot mounting) Struers Predopress
- 3.2.12 เครื่องขัดชิ้นงานแบบหมุนยี่ห้อม Struers รุ่น LaboPol-5
- 3.2.13 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อม Nikon รุ่น Eclipse E200
- 3.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) บริษัท LEO รุ่น 1460 VP
- 3.2.15 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการกระแทกยี่ห้อม Zwick Model 5102

3.3 การคัดแยกผงโลหะ

ผงโลหะทองแดงถูกแยกเป็นสองขนาดโดยผ่านตะแกรงแยกขนาด $106\mu\text{m}$ และ $300\mu\text{m}$ โดยใช้เครื่องคัดขนาดผงโลหะ (รูปที่ 3.1) ส่วนผงดิบจะใช้ขนาดเดียวคือ $32\mu\text{m}$



รูปที่ 3.1 เครื่องคัดขนาดโลหะผงยี่ห้อม Retsch รุ่น AS200 Control 'g'

3.4 การวัดขนาดอนุภาคของผงโลหะ

การวัดขนาดอนุภาคผงโลหะทำโดยเครื่องวัดขนาดอนุภาค ยี่ห้อ Mastersizer รุ่น 2000 โดยวิธีการทำสารแขวนลอยของผงโลหะเพื่อวัดขนาดเฉลี่ยของผงโลหะแต่ละชนิด

3.5 การเตรียมชิ้นงาน

3.5.1 การผสมผงโลหะ (Mixing) เตรียมส่วนผสมผงโลหะตามอัตราส่วนที่กำหนดตามตารางที่ 3.2 ผสมด้วยเครื่องผสมแบบหมุน เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุทดสอบ

ส่วนผสม	ผงทองแดง A (wt%)	ผงทองแดง B (wt%)	ผงดีบุก (wt%)	Stearic acid (wt%)
A1	95	-	5	1
A2	90	-	10	1
A3	85	-	15	1
B1	-	95	5	1
B2	-	90	10	1
B3	-	85	15	1

3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัดแน่น (Compaction) อัดขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแกนเดียว (Uniaxial press) (รูปที่ 3.2) ด้วยแรงอัด 275 MPa เพื่อให้ได้ความหนาของชิ้นงานประมาณ 5.4 – 5.5 mm. ได้ความหนาแน่นกรีน (Green density) เป็น 7.5 g/cm³ เนื่องจาก Benini (2001) ได้ผลิตหัวกระสุนที่ใช้ผงทองแดง-ดีบุก และได้สมบัติของหัวกระสุนที่ดี ชิ้นงานกรีนมีความหนาแน่น 7.26 g/cm³ และเมื่อขึ้นเทอริงชิ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

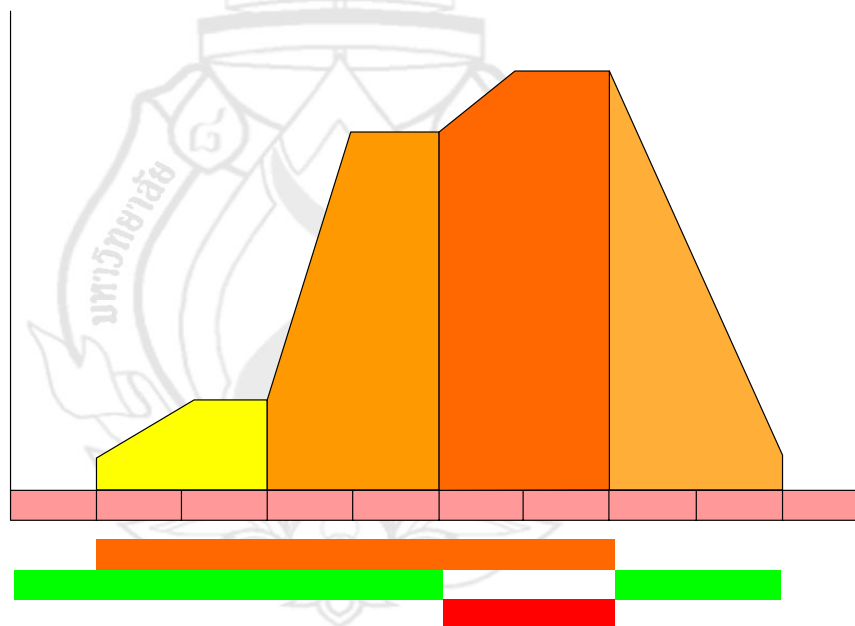
3.5.3 ซินเทอริง (Sintering) ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะถูกนำมาซินเทอริงโดยใช้เตาซินเทอริงขึ้นงานแบบควบคุมบรรยากาศยี่ห้อ Linn รุ่น 1800 Vac (รูปที่ 3.3) อุณหภูมิซินเทอริงที่ศึกษาคือ 450 800 850 และ 900°C เวลาซินเทอริง 45 นาที ปกคลุมด้วยบรรยากาศไฮโดรเจน ขั้นตอนการเผาประกอบด้วยช่วงเผาไล่ความชื้น (Warm) ไล่สารหล่อลื่นและตัวประสาน (Delubricating and debinding) ขั้นตอนซินเทอริง (Sintering) และขั้นตอนการทำให้เย็นลง (Cooling) อุณหภูมิและช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดชิ้นงานยี่ห้อ Drost รุ่น TPA50/4



รูปที่ 3.3 เตาซินเทอร์ริงงานแบบควบคุมบรรยากาศหือ Linn รุ่น 1800 Vac

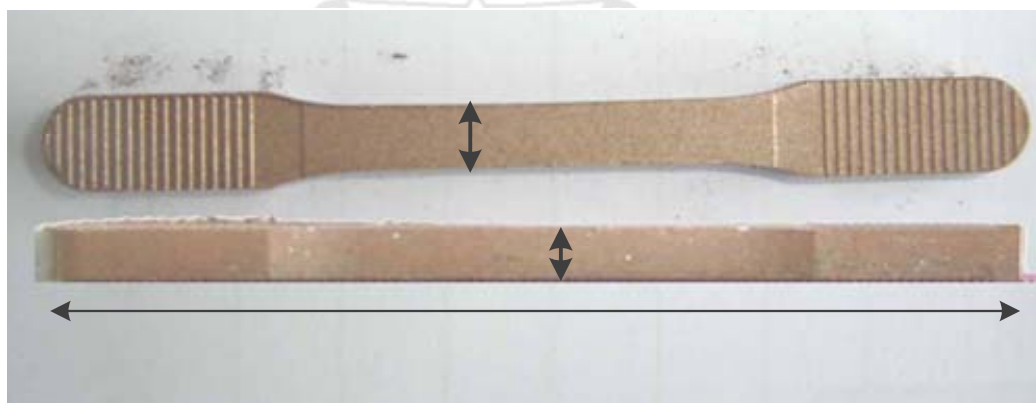


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนซินเทอร์ริงที่ 900°C
จากช่วงเวลาที่ 1-8 และการใช้แก๊สปกคลุมในแต่ละช่วงเวลา
(Ar = Argon, H₂ = Hydrogen)

จากรูปที่ 3.4 ช่วงเวลาในซินเทอริงแต่ละช่วงเวลาจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ปรับอุณหภูมิขึ้นหรือลดอุณหภูมิลง ซึ่งขึ้นอยู่กับความต่างของอุณหภูมิที่ต้องการปรับ ในการวิจัยนี้ใช้การปรับอุณหภูมิเพิ่มหรือลด 5°C ต่อ 1 นาที เมื่อปรับให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจะเผาด้วยความร้อนระดับนั้นๆ ตามเวลาที่กำหนดเป็นนาที

3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.6.1 การเปลี่ยนแปลงขนาด (Dimensional change) วัดขนาดชิ้นงานตามแบบทดสอบแรงดึงหลังอัดขึ้นรูปเทียบกับขนาดแม่พิมพ์เพื่อหาค่าการคืนตัว (Springback) และขนาดของชิ้นงานหลังซินเทอริงเทียบกับแม่พิมพ์เพื่อหาค่าการหดตัว (Shrinkage) ที่แต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน โดยวัด ความกว้าง ความหนา และความยาว ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการวัดขนาดของชิ้นงาน (1) ความกว้าง (2) ความหนา (3) ความยาว

3.6.2 ความหนาแน่น (Density) วัดความหนาแน่นของชิ้นงานโดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาคิมิดีส โดยใช้น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในอากาศเทียบกับน้ำหนักในน้ำ แล้วคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times (\rho_0 - d) + d \quad \dots\dots(3.1)$$

ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

A = น้ำหนักชิ้นงานในอากาศ (g)

B = น้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (g)

ρ_0 = ความหนาแน่นน้ำ (1.000 g/cm^3)

d = ความหนาแน่นอากาศ (0.001 g/cm^3)

3.7 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นเทอริงที่ต่างอุณหภูมิ และเปรียบเทียบกับหัวกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบัน ผลการวัดสมบัติทางกลจะบอกถึงคุณลักษณะของชิ้นงานและความสามารถในการผลิตเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้

3.7.1 ความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ค่าความสามารถ ในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron UTM 5583 โดยใช้ Load Cell ขนาด 100 kN ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 5 mm./min และใช้ระยะวัด (Gauge length) 25 mm. โดยใช้จำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง ค่าต้านทานแรงดึงหาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots\dots (3.2)$$

σ = ค่าต้านทานแรงดึง (MPa)

F = แรงดึง (N)

A = พื้นที่รับแรงดึง (mm^2)

3.7.2 ความสามารถในการต้านทานแรงกด (Compressive Strength) วัดค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 450 โดยใช้ Load Cell ขนาด 100 kN ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 5 mm./min โดยใช้จำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง ค่าต้านทานแรงกดหาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{..... (3.3)}$$

σ = ค่าต้านทานแรงกด (MPa)

F = แรงกด (N)

A = พื้นที่รับแรงกด (mm²)

3.7.3 ความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength) วัดค่าความทนทานต่อการกระแทก (เชิงเปรียบเทียบ) โดยเครื่องมือทดสอบ Pendulum impact test ยี่ห้อ Zwick รุ่น 2006 โดยพลังงานสูงสุด 4 J โดยใช้จำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง ค่าความทนทานต่อการกระแทก ได้สมการดังนี้

$$E_x = E_1 - E_2 = mgh_1 - mgh_2 \quad \text{.....(3.4)}$$

E_x = พลังงานที่หายไป (พลังงานที่ถูกดูดซับ) (J)

E_1 = พลังงานที่จุดเริ่มต้น = mgh_1 (J)

E_2 = พลังงานที่จุดสุดท้าย = mgh_2 (J)

m = มวลของแท่งกระทบ (kg)

g = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.8 (ms⁻²)

h_1 = ความสูงของลูกตุ้มน้ำหนักเริ่มต้น (m)

h_2 = ความสูงของลูกตุ้มน้ำหนักสุดท้าย (m)

3.7.4 ความแข็งผิว (Surface Hardness) วัดค่าความแข็งผิว ของวัสดุชิ้นทดสอบโดยการกดด้วยเครื่องมือ Micro hardness tester รุ่น Model M-400-G3, LECO ซึ่งวัดค่าเป็น Vickers Hardness โดยใช้จำนวนชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง ค่าความแข็งได้จากการคำนวณรอยกดที่ผิววัสดุได้สมการดังนี้

$$HV = \frac{1854.P}{d^2} \quad \dots\dots (3.5)$$

HV = Vickers Hardness

P = แรง (N)

d = ระยะทแยงมุมของรอยกด (m)

3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

3.8.1 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ตัดชิ้นวัสดุแล้วขัดให้เรียบด้วยเครื่องขัด ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง อัตราขยาย 100 200 และ 500 เท่า จำนวนชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง

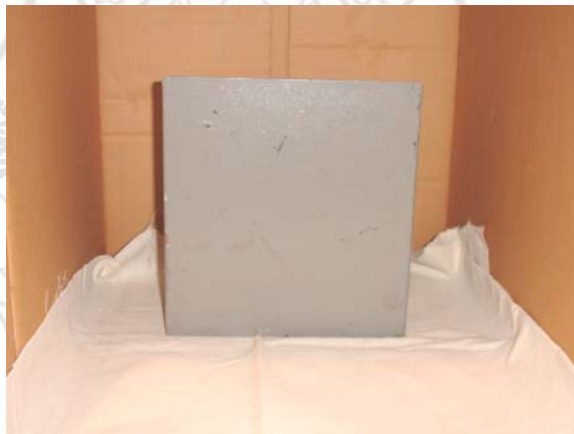
3.8.2 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นำชิ้นวัสดุที่ได้จากการหักไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อัตราขยาย 100 250 500 และ 1,000 เท่า จำนวนชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นต่อการชุดการทดลอง (เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะและเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจึงไม่จำเป็นต้องเคลือบด้วยทองคำ)

3.9 การทดสอบการแตกหักเมื่อกระทบเป่าจากการยิงด้วยความเร็ว

ทดสอบการแตกโดยการยิงชิ้นวัสดุทดสอบด้วยแบบจำลองปืนแก๊ส (Gas gun) แรงดัน 13.80 MPa ระยะปลายกระบอกปืนห่างจากเป้า 3 m เป้าทำจากแผ่นเหล็กหนา 1 mm จำนวนชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น ต่อการชุดการทดลอง



(a)



(b)

รูปที่ 3.6 แบบจำลองปืนแก๊ส (Gas gun) (a) ปืนแก๊สแรงดัน 13.8 MPa (b) แผ่นเป้าทำจากเหล็ก
หนา 1 mm.

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

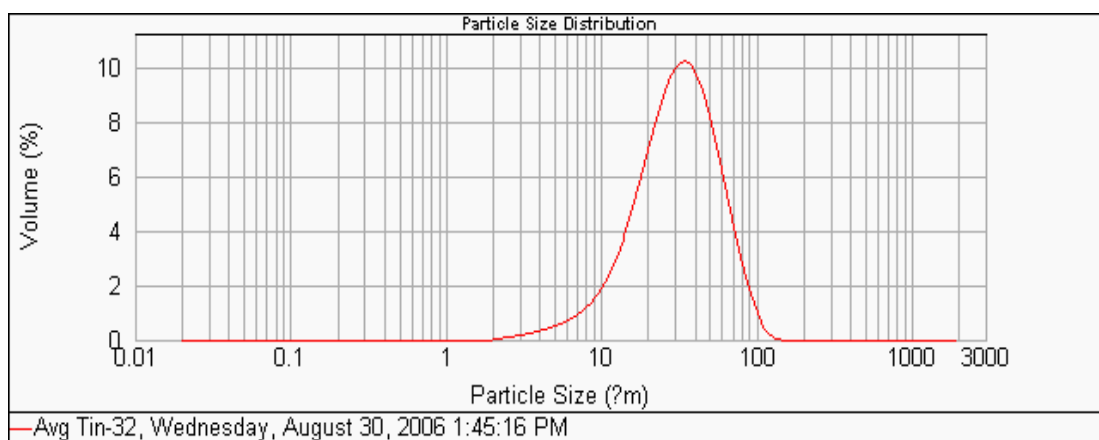
โลหะผสมทองแดง-ดีบุก ในงานวิจัยนี้ผลิตจากกระบวนการทางโลหะผง และศึกษาผลของ ขนาดของผงโลหะ อัตราส่วนผสมของผงโลหะ อุณหภูมิซินเทอร์ต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้

4.1 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะทองแดงและดีบุก

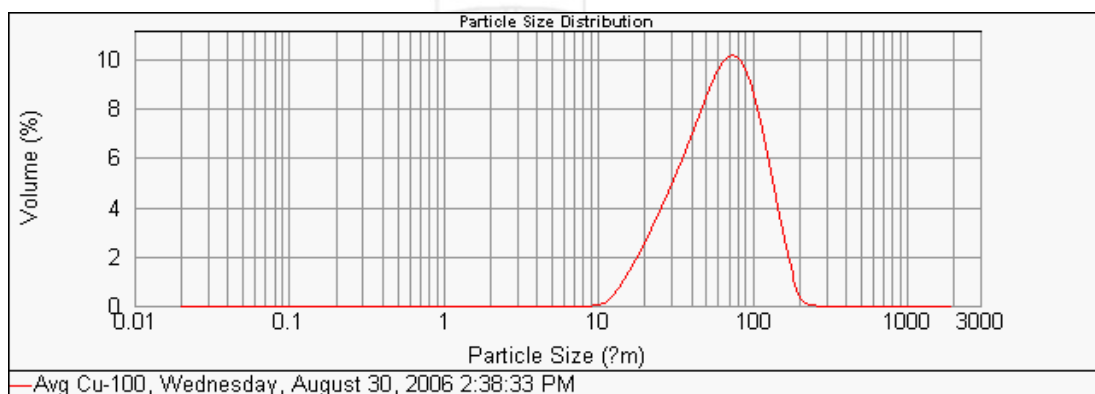
ผงโลหะที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด ตามหัวข้อ 3.3 ถูกนำมาวัดขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดด้วยเครื่องวัดอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Mastersizer รุ่น 2000) พบว่าผงทองแดงมีขนาดเฉลี่ยเป็น $87 \pm 10 \mu\text{m}$ และ $288 \pm 10 \mu\text{m}$ และผงดีบุกมีขนาดเฉลี่ยเป็น $35 \pm 5 \mu\text{m}$ (ตารางที่ 4.1) และผลการกระจายตัวของขนาด (รูปที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ

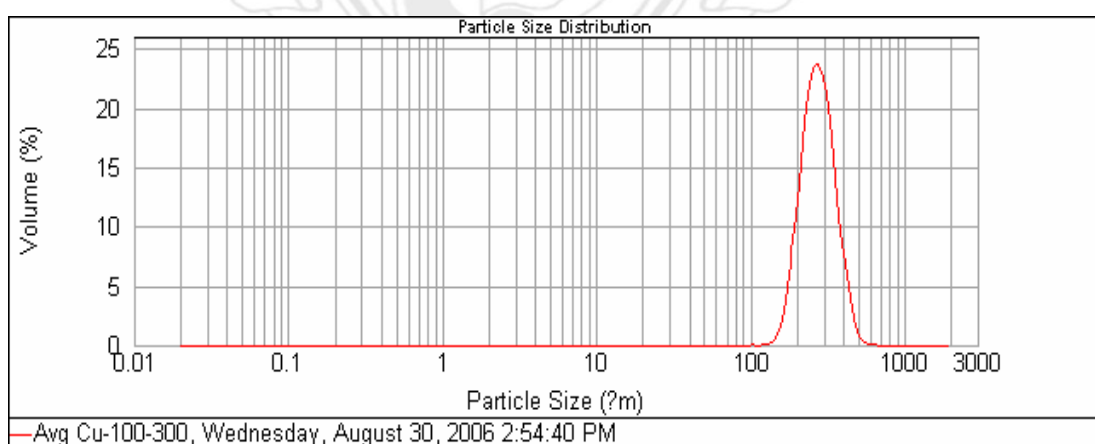
ผงโลหะ	ขนาดเฉลี่ย (μm)
ผงดีบุก	35 ± 5
ผงทองแดงขนาดเล็ก (A)	87 ± 10
ผงทองแดงขนาดใหญ่ (B)	288 ± 10



(a)

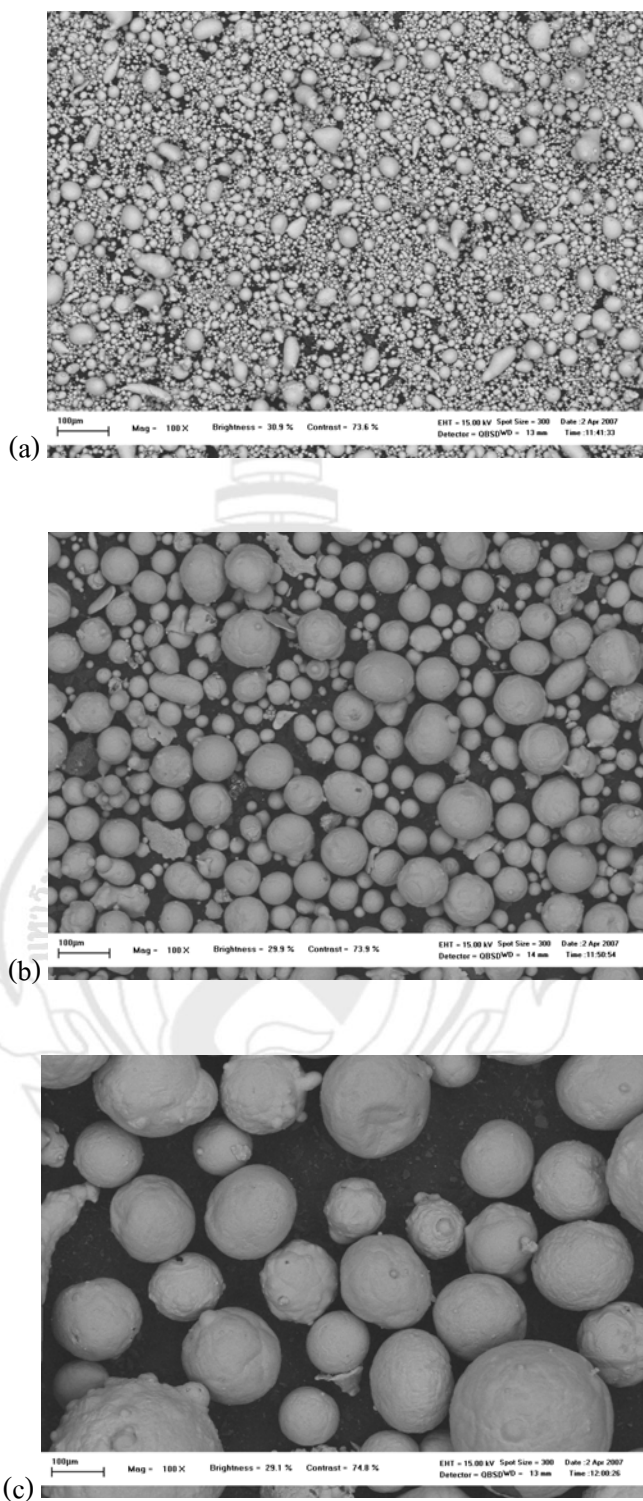


(b)



(c)

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ (a) ผงดีบุก (b) ผงทองแดงขนาดเล็ก (A)
(c) ผงทองแดงขนาดใหญ่ (B)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงโลหะ

(a) ผงดีบุก (b) ผงทองแดงขนาดเล็ก (A) (c) ผงทองแดงขนาดใหญ่ (B)

4.2 ผลของอุณหภูมิซินเทอร์ต่อสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ส่วนแรกเป็นการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของชิ้นงานที่ผ่านซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดง (450°C) และอุณหภูมิสูงใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของทองแดง (900°C) ทั้งนี้เนื่องจากมีรายงานการผลิตหัวกระสุนแตกหักได้จากซินเทอร์ โลหะผสมที่อุณหภูมิต่ำ ระหว่าง $150\text{--}430^{\circ}\text{C}$ (Benini, 2000) และซินเทอร์ที่อุณหภูมิสูง ระหว่าง $815\text{--}926^{\circ}\text{C}$ (Abram, 2000) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการซินเทอร์ คงที่เป็นเวลา 45 นาที

รูปที่ 4.3 แสดงชิ้นงานหลังการอัดมีขนาด ความกว้าง x ความหนา x ความยาว เป็น $5.80 \times 5.45 \times 89.87 \text{ mm}$ ชิ้นงานก่อนเผาได้มีการคงรูปที่ดี สามารถเคลื่อนย้ายได้ แต่มีความแข็งแรงน้อยและแตกหักได้ง่าย



รูปที่ 4.3 ชิ้นงานก่อนซินเทอร์ (green part)

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 450°C ชิ้นงานหลังการเผ่าจะมีการขยายตัวในทุกอัตราส่วนผสม และจะมีการขยายตัวมากเมื่ออัตราส่วนของดีบุกมาก (A3, B3) ผลที่ได้สอดคล้องกับ Condela (2001) ซึ่งพบว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันมากๆ จะขยายตัวเมื่อตัวประสานหลอมเหลวและเปลี่ยนเฟสจากของแข็งเป็นเฟสของเหลว (Liquid phase) และการเปลี่ยนแปลงขนาดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยการหักด้วยมือพบว่า ชิ้นงานยังไม่แข็งแรงมากนัก สามารถหักได้ทุกอัตราส่วนอย่างไรก็ตามจากการสังเกตชิ้นงานหลังการหัก พบว่าอัตราส่วน A2 น่าจะมีการยึดเกาะของผงโลหะดีที่สุด

เนื่องจากไม่มีเศษผงโลหะหลังการหัก เมื่อเปรียบเทียบขนาดของผงโลหะทองแดง พบว่าการใช้ผงโลหะทองแดงขนาดเล็ก (A) ทำให้ชิ้นงานมีการคงรูปที่ดี ไม่มีรอยร้าวบนชิ้นงานหลังการเผา ในขณะที่การใช้ผงโลหะทองแดงขนาดใหญ่ (B) ทำให้เกิดรอยร้าวบนชิ้นงาน (B1 B2 B3) โดยรอยร้าวเหล่านี้สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และขยายให้ชัดเจนด้วยกล้องจุลทรรศน์ ตามรูปที่ 4.6 (a)

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของชิ้นงานที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C โดยทั่วไปผลที่สังเกตได้จะคล้ายกับซินเทอร์ที่ 450°C นั่นคือชิ้นงานหลังการเผามีการขยายตัวโดยการขยายตัวจะมากขึ้นเมื่อส่วนผสมของดินบุกมากขึ้นนอกจากนี้อัตราส่วนที่มีดินบุกมาก (A3) จะมีดินบุกไหลออกมาจากชิ้นงาน (รูปที่ 4.5) การใช้ผงโลหะทองแดงขนาดใหญ่ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่บนชิ้นงาน (รูปที่ 4.6 (b)) ชิ้นงานยังคงหักได้ด้วยมือ ยกเว้นอัตราส่วน A2 ที่ไม่มีรอยร้าว และไม่สามารถหักได้ด้วยมือ

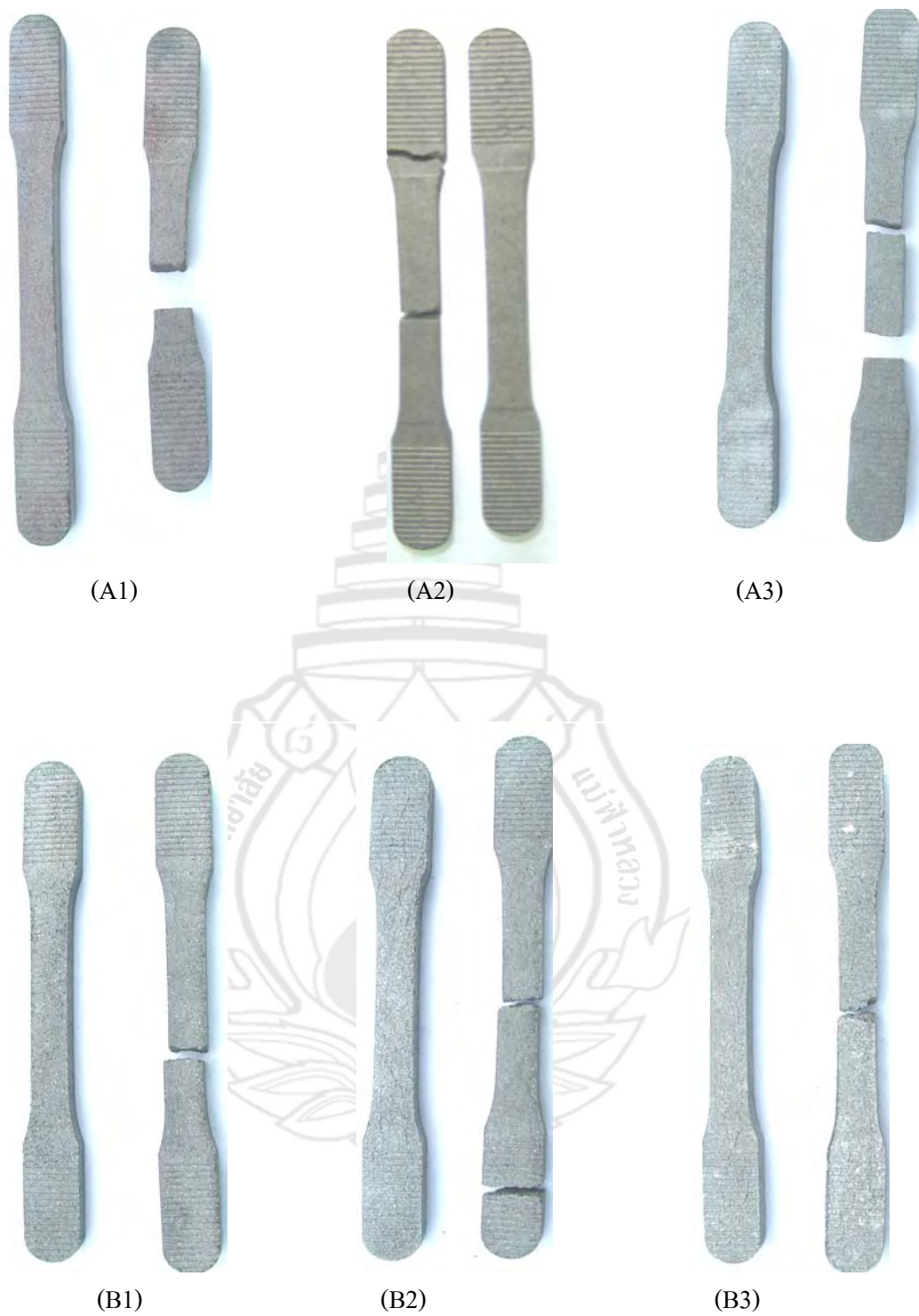
รูปที่ 4.6 แสดงรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังซินเทอร์ ของชิ้นงานที่มีอนุภาคผงโลหะทองแดงขนาดใหญ่ (B) พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ (a) รอยร้าวมีขนาดเล็กกว่าและจำนวนน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง (b)

ผลการศึกษาทั้งสองอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าขนาดของผงโลหะทองแดงมีผลต่อชิ้นงานที่ได้ ซึ่งผงโลหะขนาดใหญ่จะทำให้เกิดรอยร้าวบนชิ้นงานหลังซินเทอร์ซึ่งอาจเป็นผลมาจากจากการที่ดินบุกหลอมละลายแล้วเกิดการขยายตัวของชิ้นงาน จากแรงดีดกลับ (Spring back) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการอัดขึ้นรูป หรืออาจเกิดจากการที่ดินบุกละลายแล้วขยายตัวเข้าแทรกในช่องว่างของทองแดงทั้งช่องว่างเอาไว้และทำให้เกิดรอยร้าว เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง

อัตราส่วนผสมทองแดง- ดินบุก ที่เหมาะสมที่สุดทำให้ได้ชิ้นงานที่แข็งแรงคือ 90:10 (A2) เนื่องจากดินบุกทำหน้าที่เป็นตัวประสานมีปริมาณพอเหมาะ ที่ส่วนผสม 95:5 (A1) ปริมาณดินบุกอาจจะน้อยเกินไป ทำให้การประสานของผงโลหะต่ำ ในขณะที่ถ้าใช้ดินบุกมากขึ้น 85:15 (A3) จะทำให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวมาก เนื่องจากดินบุกมีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้เกิดการบวมของชิ้นงานได้และยังไหลออกมาจากชิ้นงานอีกด้วย นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิซินเทอร์จาก 450°C เป็น 900°C ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องทฤษฎีซินเทอร์ (German, 1994) นั่นคือที่อุณหภูมิสูงโลหะจะมีการประสานกันได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการคงรูปของชิ้นงานและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงาน
ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 450°C

ชิ้นวัสดุ	ขนาดก่อนเผา กว้าง x หนา x ยาว (mm.)	ขนาดหลังเผา กว้าง x หนา x ยาว (mm.)	การ ขยายตัว	ทดสอบการ หักด้วยมือ	อื่นๆ
A1	5.80 x 5.45 x 89.87	6.25 x 5.80 x 91.60	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	เมื่อหักมีผงโลหะ ร่วนออกมา
A2	5.80 x 5.45 x 89.87	6.20 x 5.85 x 93.20	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	ไม่มีเศษผงโลหะ หลังการหัก
A3	5.80 x 5.45 x 89.87	6.20 x 5.85 x 94.50	ขยายตัว มาก	หักได้	มีเศษผงโลหะ ร่วนออกมาด้วย มากกว่า A1 และ A2
B1	5.80 x 5.45 x 89.87	6.15 x 5.60 x 91.20	ขยายตัว น้อยที่สุด	หักได้	มีรอยร้าวตามแนว ยาวชิ้นวัสดุเล็กน้อย
B2	5.80 x 5.45 x 89.87	6.15 x 5.75 x 91.75	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	มีรอยร้าวตามแนว ยาวชิ้นวัสดุ และหัก ได้ง่ายกว่า B1
B3	5.80 x 5.45 x 89.87	6.40 x 6.00 x 92.60	ขยายตัว มากที่สุด	หักได้	มีรอยร้าวตามแนว ยาวมีดินุ๊กไหลออก มานอกผิวชิ้นวัสดุ หักได้ง่ายกว่า B1 B2



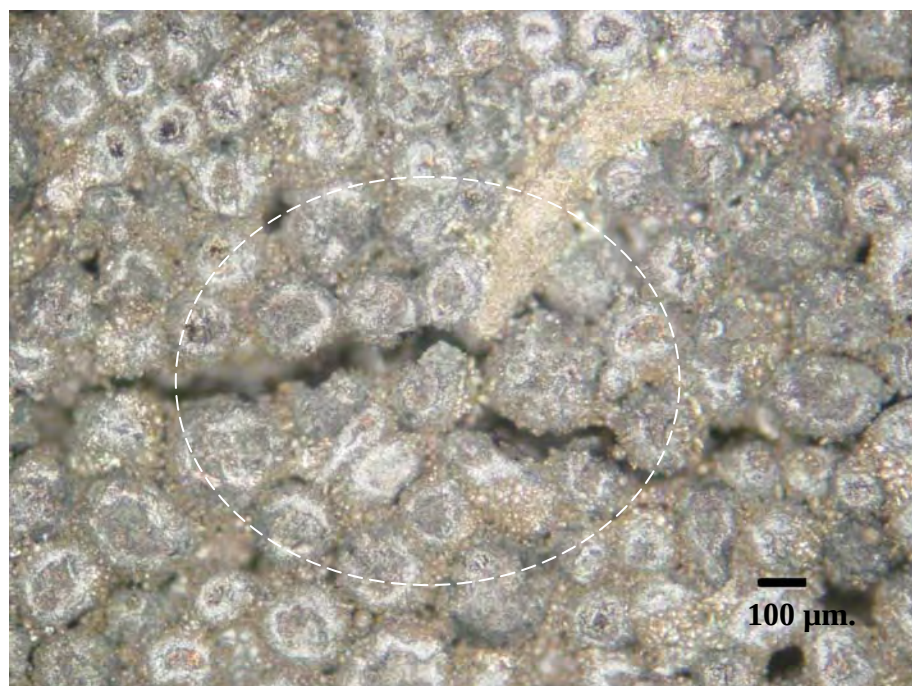
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 450°C

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการคงรูปของชิ้นงานและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงาน
ที่เผาประสานที่อุณหภูมิ 900°C

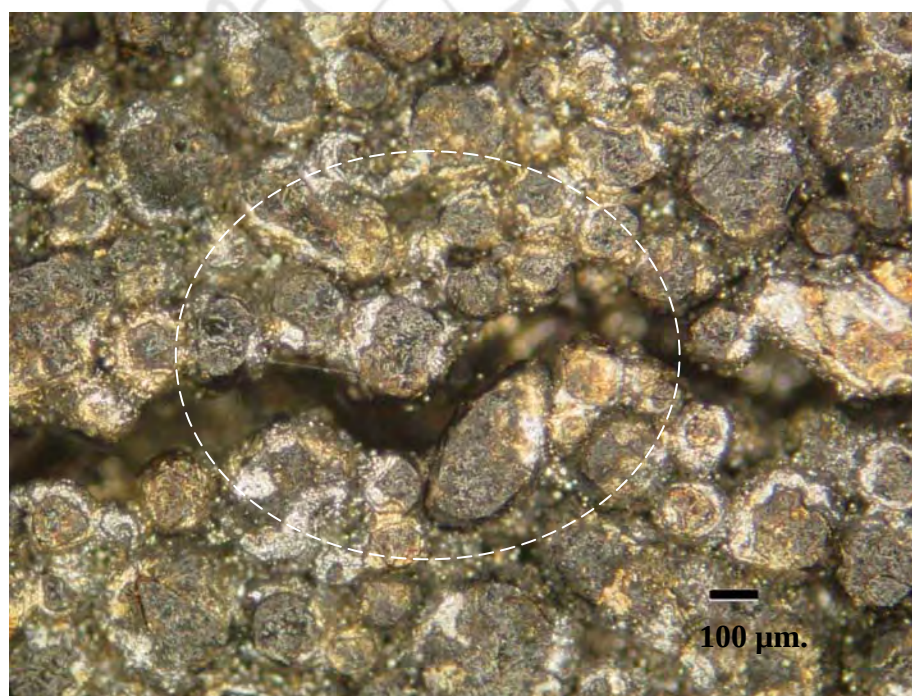
ชิ้นวัสดุ	ขนาดก่อนเผา กว้าง x หนา x ยาว (mm.)	ขนาดหลังเผา กว้าง x หนา x ยาว (mm.)	การ ขยายตัว เล็กน้อย	ทดสอบการ หักด้วยมือ	อื่นๆ
A1	5.80 x 5.45 x 89.87	6.15 x 6.00 x 93.50	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	เนื้อโลหะเกาะกัน แต่ไม่ดีมากนัก
A2	5.80 x 5.45 x 89.87	6.00 x 5.80 x 93.50	ขยายตัว เล็กน้อย	หักไม่ได้	ดัดงอได้เล็กน้อย มีความแข็งแรงสูง
A3	5.80 x 5.45 x 89.87	6.15 x 5.80 x 95.70	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	ดีบุกที่หลอมละลาย ออกมานอกชิ้นงาน เมื่อหักมีเศษผงโลหะ ร่วนออกมาด้วย
B1	5.80 x 5.45 x 89.87	6.30 x 5.75 x 94.00	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	มีรอยร้าวตามแนวยาว ชิ้นวัสดุ เมื่อหักมีเศษผง โลหะร่วนออกมาด้วย
B2	5.80 x 5.45 x 89.87	6.50 x 6.15 x 94.15	ขยายตัว เล็กน้อย	หักได้	มีรอยร้าวตามแนวยาว ชิ้นวัสดุ หักได้ง่ายกว่า B1 เมื่อหักมีเศษผงโลหะ ร่วนออกมาด้วย
B3	5.80 x 5.45 x 89.87	6.75 x 6.00 x 97.00	ขยายตัว มากที่สุด	หักได้	มีรอยร้าวตามแนวยาว ชิ้นวัสดุจำนวนมากหัก ได้ง่ายกว่า B1 B2 เมื่อ หักมีเศษผงโลหะร่วน ออกมา



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C



(a)



(b)

รูปที่ 4.6 รอยแตกร้าวหลังซินเทอร์ (a) ซินเทอร์ที่ 450°C (b) ซินเทอร์ที่ 900°C

4.3 ผลของอุณหภูมิซินเทอร์

จากผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นในหัวข้อ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะทองแดงขนาดเล็ก (A) ในอัตราส่วนทองแดงต่อดีบุก (Cu: Sn) = 90:10 หรือ A2 ซินเทอร์ที่ 900°C มีสมบัติดีที่สุด อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 900°C พบว่ามีความแข็งแรงมากไม่สามารถหักได้ แต่กระสุนแตกหักได้ต้องการวัสดุที่มีสมบัติการคงรูปที่ดี แต่ไม่แข็งแรงจนเกินไป การทดลองในตอนนี้จึงต้องการศึกษาอุณหภูมิซินเทอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้วัสดุที่สามารถแตกหักได้ โดยการลดอุณหภูมิซินเทอร์ลงเล็กน้อย เป็น 800 , 850°C และทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานเปรียบเทียบกับการเผาที่ 900°C

4.3.1 การคงรูปของชิ้นงาน ชิ้นงานหลังซินเทอร์มีสมบัติการคงรูปที่ดี (รูปที่ 4.7) ทดสอบสมบัติทางกลเบื้องต้นโดยการหักด้วยมือพบว่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเทอร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 800°C สามารถหักด้วยมือได้ง่ายไม่มีเศษผงโลหะร่วงออกมาที่อุณหภูมิ 850°C สามารถหักด้วยมือได้แต่ต้องใช้แรงมากกว่า ไม่มีเศษผงโลหะร่วงออกมาที่อุณหภูมิ 900°C คัดให้โค้งงอได้ ไม่สามารถหักด้วยมือได้ มีความแข็งแรงสูงที่สุด



รูปที่ 4.7 ชิ้นงาน A2 ที่ซินเทอร์อุณหภูมิ 800 850 900°C เป็นเวลา 45 นาที

(a) 800°C (b) 850°C (c) 900°C

4.3.2 การขยายตัวของชิ้นทดสอบหลังซินเทอร์ ตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการขยายตัวของชิ้นงานและความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงหลังซินเทอร์ตามลำดับ พบว่าทุกอุณหภูมิที่ซินเทอร์ ชิ้นงานขยายตัวเพิ่มขึ้นแต่มีร้อยละการขยายตัวที่แตกต่างกัน สาเหตุของการขยายตัวของชิ้นวัสดุเกิดขึ้นจากการที่ดินบุกหลอมที่ 232°C และเป็นของเหลวเข้ามาแทรกในผงทองแดง

ที่อุณหภูมิประมาณ $800-850^{\circ}\text{C}$ ผิวของอนุภาคทองแดงเริ่มละลายและรวมตัวกับดินบุกอย่างรวดเร็วทำให้ชิ้นวัสดุเกิดการบวมและเกิดรูพรุนจำนวนมาก ขนาดชิ้นงานจะขยายขนาดขึ้น การที่มีรูพรุนมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลง สอดคล้องกับ อรรถนิ (2002) พบว่าเมื่อตัวประสานที่หลอมละลายได้เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานกลับลดลง รูพรุนในชิ้นงานมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากปรากฏการณ์ Swelling เมื่อชิ้นงานถูกแทรกซึมด้วยตัวประสานที่หลอมเหลวจะมีการหดตัวที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ตัวประสานที่หลอมเหลวไหลเข้าไปแทรกปกคลุมอยู่ระหว่างอนุภาคของทองแดงในระหว่างการเผาประสาน ทำให้กระบวนการเผาประสานไม่สามารถเกิดได้โดยสะดวก การหดตัวโดยรวมของชิ้นงานจึงลดลง และเมื่อปริมาณการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณทองแดงที่เริ่มหลอมเหลวที่เกิดขึ้นและดินบุกที่หลอมเหลวไหลแทรกซึมอยู่ระหว่างอนุภาคก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวของชิ้นงานยิ่งลดลง

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 900°C ทองแดงหลอมละลายได้มากขึ้นและเกิดการรวมตัวของอนุภาคทองแดง- ทองแดง และโลหะผสมทองแดง- ดินบุก ทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นวัสดุ สืบเนื่องจากร้อยละการขยายตัวน้อยกว่าที่ 850°C ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ German (1994) รูพรุนที่ลดลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น (ตารางที่ 4.5) สอดคล้องกับ ภาณุ (2006) ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเทอร์เพิ่มขึ้น และ Lime (2003) พบว่าเมื่ออุณหภูมิซินเทอร์สูงขึ้นและเวลาในการเผามากขึ้น วัสดุมีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น รูพรุนมีจำนวนลดลง (รูปที่ 2.23 - 2.24) และ Nowacki (2006) พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุผสมชิ้นงานจะเกิดการขยายตัวขณะผงโลหะหลอมเหลว และการขยายตัวของชิ้นงานจะขึ้นกับเวลาในซินเทอร์ เมื่อโลหะหลอมเหลวและผสมรวมกัน ชิ้นวัสดุจะเกิดการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นวัสดุจะรวมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ชิ้นวัสดุจะเกิดการหดตัวทำให้รูพรุนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 การขยายตัวของชิ้นงานหลังขึ้นเทอร์

อุณหภูมิขึ้นเทอร์ (°C)	ขยายตัวตามแนว ความกว้าง (%)	ขยายตัวตามแนว ความหนา (%)	ขยายตัวตามแนว ความยาว (%)
800	6.89	10.09	5.98
850	7.58	13.76	6.64
900	6.37	10.09	5.15

ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงหลังขึ้นเทอร์

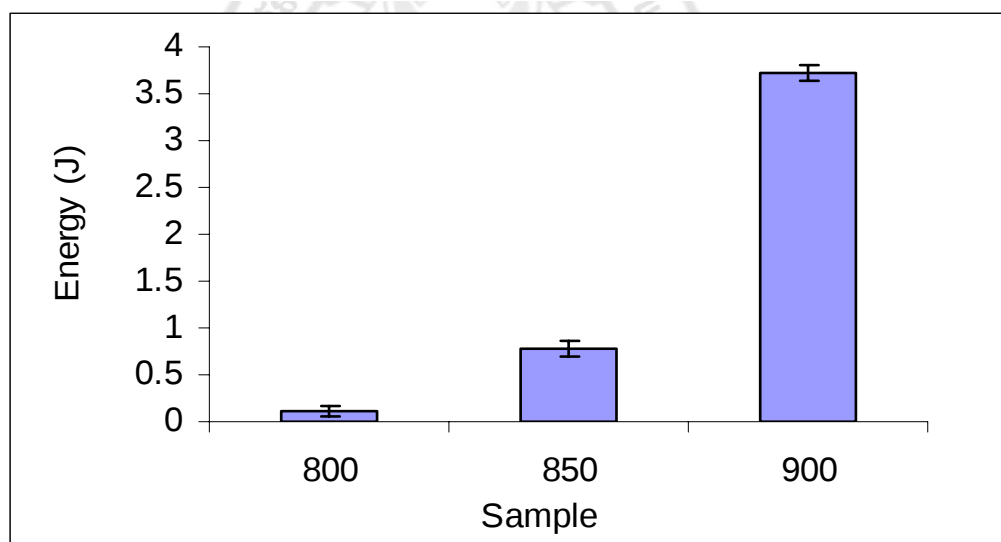
อุณหภูมิขึ้นเทอร์ (°C)	ความหนาแน่น กรีน (g/cm ³)	ความหนาแน่น หลังขึ้นเทอร์ (g/cm ³)	ความหนาแน่นที่ เปลี่ยนแปลง (g/cm ³)
800	7.55	7.03	- 0.52
850	7.55	6.74	- 0.81
900	7.55	7.14	- 0.41

4.3.3 สมบัติทางกลการทดสอบการกระแทก (Impact test) ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 แสดงผลจากการทดสอบการกระแทก ของชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิขึ้นเทอร์มากขึ้น ชิ้นงานมีความทนทานต่อการกระแทกได้สูงขึ้น ดูได้จากค่าพลังงานดูดซับที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความทนทานต่อการกระแทกชิ้นงานที่เผา 850°C ไม่ต่างกับชิ้นงานที่เผา 800°C มากนัก แต่ที่ 900°C ค่าความทนทานต่อการกระแทกจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการประสานของผงโลหะที่ต่างกันระหว่างการเผาที่อุณหภูมิ 900°C และ 800, 850°C การเผาที่ 900°C เกิดการหดตัวของชิ้นงานจากการเชื่อมประสานของเนื้อโลหะเข้าด้วยกันหลังจากการขยายตัวที่อุณหภูมิ 800, 850°C ทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างจุลภาคที่แข็งแรงจากการประสานกันเองของทองแดงกับทองแดงที่เพิ่มมากขึ้นเกิดพันธะโลหะทองแดงที่แข็งแรง ชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 900°C จึงมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในขณะที่ 800, 850°C มีการเชื่อมประสานกันของทองแดงกับทองแดงในชิ้นงานไม่มากนัก แต่จะเกิดพันธะของทองแดงกับดินุ๊กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความแข็งแรง

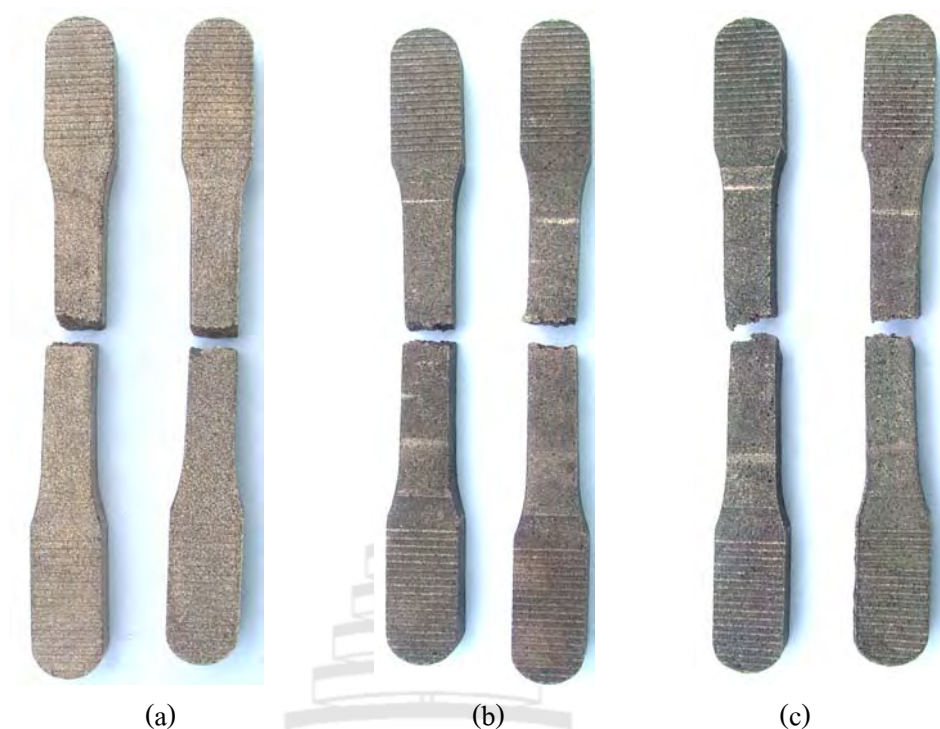
น้อยกว่าพันธะของทองแดง และจากการขยายตัวของชิ้นงานซึ่งทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนมาก เป็นผลให้ชิ้นงานที่ 800, 850°C มีความเปราะมากกว่าชิ้นงานเผาที่ 900°C

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลเชิงเปรียบเทียบพลังงานที่ถูกดูดซับ

อุณหภูมิ (°C)	พลังงานที่ถูกดูดซับ (J)
800	0.107 ± 0.053
850	0.770 ± 0.084
900	3.726 ± 0.083



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงสมบัติทางกลความทนทานต่อกระแทกที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน (แสดงเชิงเปรียบเทียบ)



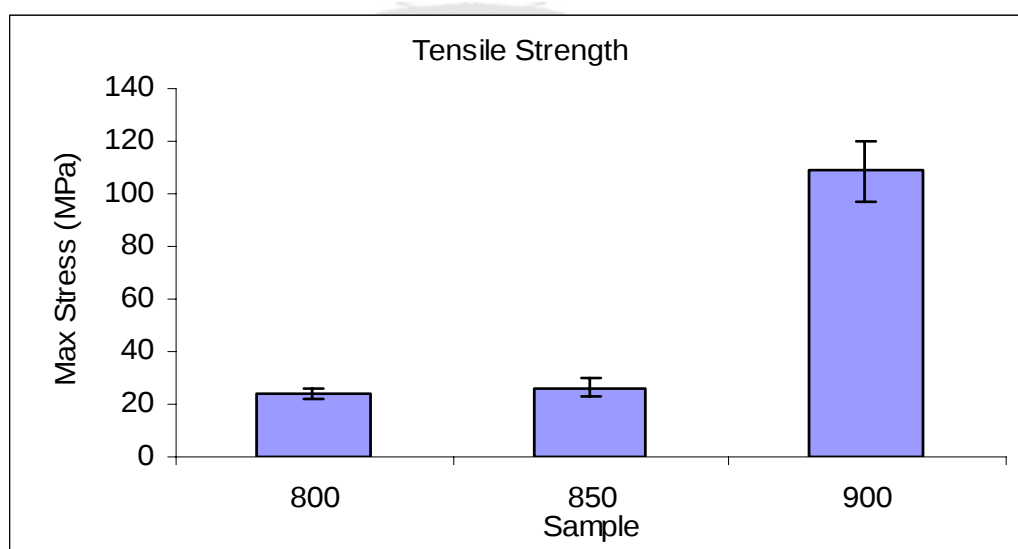
รูปที่ 4.9 ผลการหักของชิ้นงานจากการทดสอบการกระแทก (Impact test)

(a) อุณหภูมิ 800°C (b) อุณหภูมิ 850°C (c) อุณหภูมิ 900°C

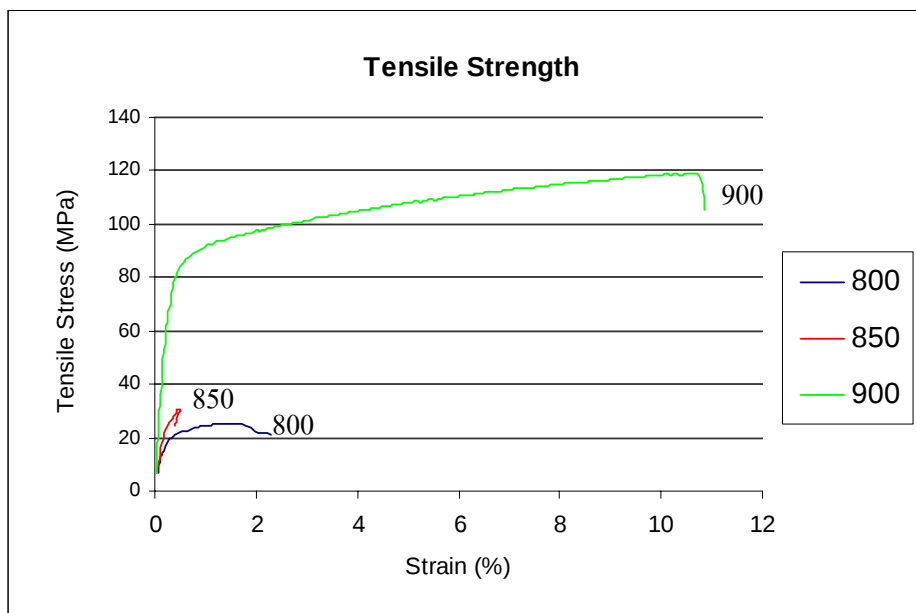
4.3.4 สมบัติทางกลความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติความต้านทานแรงดึงของชิ้นวัสดุทดสอบ พบว่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่ 900°C มีค่าสูงที่สุด รูปที่ 4.10 เป็นแผนภูมิแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน รูปที่ 4.11 เส้นกราฟความเค้น- ความเครียด (Stress- Strain Curve) ชิ้นงานที่เผา 800°C และ 900°C มีการยืดออกของเส้นกราฟ แสดงถึงสมบัติความเหนียวของชิ้นงาน ในขณะที่ 850°C เส้นกราฟมีความชันและมีการยืดออกเล็กน้อย แสดงถึงสมบัติความเปราะของชิ้นงาน สมบัติความเหนียวสังเกตได้จากค่าร้อยละของความเครียดที่จุดหัก โดยจะบอกถึงการยืดออกของวัสดุก่อนการแตกหัก โดยชิ้นงานที่ 900°C แสดงการขาดแบบเหนียวมีการยืดออกมากที่สุดก่อนการแตกหักคือ 9.16% แต่ที่ 850°C แสดงการขาดแบบเปราะ มีการยืดออกของชิ้นงานก่อนแตกหักน้อยที่สุดคือ 0.52%

ตารางที่ 4.7 สมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

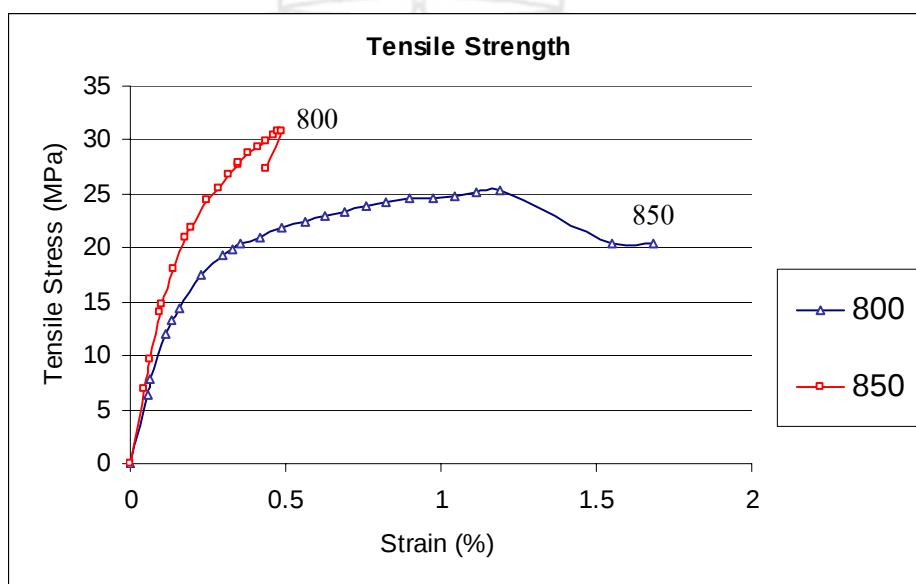
อุณหภูมิขึ้นเทอร์ (°C)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ร้อยละของความเครียด ที่จุดหัก (%)
800	23.60 ± 2.00	1.14 ± 0.34
850	26.30 ± 3.75	0.52 ± 0.15
900	108.70 ± 11.81	9.16 ± 1.73



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานแรงดึง ที่อุณหภูมิขึ้นเทอร์ต่างกัน



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 เส้นกราฟความเค้น- ความเครียด (Stress- Strain Curve) ที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่างกัน (a) เปรียบเทียบสามอุณหภูมิ (b) เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C

การหาค่าความต้านทานแรงดึงเป็นการดึงชิ้นวัสดุให้แยกออกจากกัน เป็นการขยายขนาดของรูปพรุนภายในชิ้นวัสดุ จำนวนและขนาดรูปพรุนภายในชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเชื่อมประสานกันของอนุภาคผงโลหะส่งผลให้สมบัติของชิ้นงานแตกต่างกัน ที่ 800°C ผงดีบุกที่หลอมละลายเข้าเคลือบผิวของทองแดงบางส่วน เสมือนเป็นกาวประสานผงทองแดงให้เชื่อมติดเข้าด้วยกัน ด้วยพันธะโลหะของทองแดงกับดีบุก และมีบางส่วนที่ยังคงค้างอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาค (รูปที่ 4.19) เมื่อออกแรงดึง ดีบุกที่ค้างในจะทำให้รูปพรุนขยายตัวได้ช้าชิ้นงานจึงแสดงสมบัติความเหนียว แต่ที่ 850°C ผงดีบุกที่หลอมละลายเข้าเคลือบผิวของทองแดงมากกว่า และมีส่วนที่ค้างในช่องว่างน้อยกว่า 800°C ทำให้อนุภาคมีผิวที่เรียบมากขึ้น พันธะโลหะของทองแดงกับดีบุกที่ผิวสัมผัสของอนุภาคน้อยลง (รูปที่ 4.20) เปรียบเสมือนมีรูปพรุนในเนื้อวัสดุที่เรียบขึ้น เมื่อออกแรงดึงวัสดุจึงขาดได้ง่ายขึ้นทำให้โลหะแสดงความเหนียวน้อยกว่า 800°C และที่ต่างออกไปคือที่ 900°C (รูปที่ 4.21) เกิดการเชื่อมประสานกันเองของทองแดง โดยมีดีบุกที่ละลายเคลือบไว้อีกชั้นหนึ่งชิ้นงานจะมีการหดตัว ทำให้มีพันธะโลหะของทองแดงกับทองแดงที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะโลหะของทองแดงกับดีบุก และจากโครงสร้างจุลภาคที่เชื่อมประสานกันของทองแดงภายในชิ้นวัสดุจึงก่อให้เกิดความแข็งแรงของชิ้นงาน การที่จะทำให้ชิ้นงานขาดจากแรงดึงต้องใช้แรงมากขึ้น เพราะการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำได้ยากขึ้น รูปพรุนขยายตัวได้ยากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด

4.3.5 ความแข็งผิว (Surface Hardness) ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งของชิ้นวัสดุทดสอบ พบว่าค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิชิ้นเทอร์ที่เพิ่มขึ้น ชิ้นงานชิ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C จะมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานชิ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C จะมีความแข็งผิวสูงมากและมีค่าสูงที่สุด ผลจากการวัดค่าความแข็งผิวที่ได้เนื่องมาจากความพรุนตัวของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C จะมีการประสานกันของเนื้อโลหะน้อยกว่าที่ 900°C รูปพรุนภายในที่มีมากกว่าจึงทำให้มีความแข็งน้อยกว่า และอีกประการหนึ่งคือที่ 900°C มีการเชื่อมประสานกันระหว่างทองแดง-ทองแดง ทำให้ชิ้นงานเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าที่ 800°C และ 850°C ชิ้นงานที่ 900°C จึงมีความแข็งมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Lime (2003) คือเมื่ออุณหภูมิชิ้นเทอร์สูงขึ้น วัสดุมีการประสานกันมากขึ้น รูปพรุนจะลดลง วัสดุจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ Kato (2003) ซึ่งพบว่า วัสดุผสมทองแดง-ดีบุก ปราศจากสารหล่อลื่นเมื่อชิ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 820°C เวลาเผา 60 นาที โลหะผสมที่ได้มีความแข็ง 50 HV และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 ความแข็งของชิ้นวัสดุที่ขึ้นเทอร์อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิขึ้นเทอร์ (°C)	ความแข็ง HV
800	54.40 ± 10.25
850	76.10 ± 10.73
900	118.50 ± 7.55

เนื่องจากหัวกระสุนโดยทั่วไปผลิตขึ้นมาจากวัสดุที่มีความแข็งผิวต่ำกว่าค่าความแข็งของลำกล้องปืน เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ฯลฯ และถ้าผลิตจากวัสดุที่มีความแข็งผิวสูงกว่าลำกล้องปืน เช่น ทังสเตน ก็จะถูกหุ้มด้วยทองแดงผสมซึ่งมีความแข็งผิว 77 HV (77HB) (Nielsen 2006) ซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าลำกล้องปืน (247 HV) (Green Mountain Rifle Barrel Co, 2005) ในงานวิจัยฉบับนี้การวัดความแข็งผิวของชิ้นงาน เพื่อต้องการนำค่าความแข็งไปเปรียบเทียบกับความแข็งของลำกล้องปืน จึงไม่จำเป็นต้องวัดความแข็งของลูกปืน แต่จะใช้ค่าความแข็งของทองแดงแทน คือ 77 HV

4.3.6 ความต้านทานแรงกด (Compressive strength) ตารางที่ 4.9 แสดงผลค่าความต้านทานแรงกดของชิ้นวัสดุทดสอบ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขึ้นเทอร์ที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C จะมีค่าความต้านทานแรงกดใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิ 900°C มีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับ Lime (2003) คือเมื่ออุณหภูมิขึ้นเทอร์สูงขึ้น วัสดุมีการประสานกันมากขึ้น รูพรุนจะลดลง วัสดุจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และมีค่ามากกว่าค่าต้านทานแรงดึง มีสาเหตุมาจากการออกแรงกดลงไปบนวัสดุ ทำให้อนุภาคผงโลหะภายในเนื้อวัสดุมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น รูพรุนหรือช่องว่างระหว่างอนุภาคถูกกดให้เล็กลง ทำให้เกิดการอัดแน่นอีกครั้งหนึ่ง ชิ้นวัสดุทดสอบจะมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

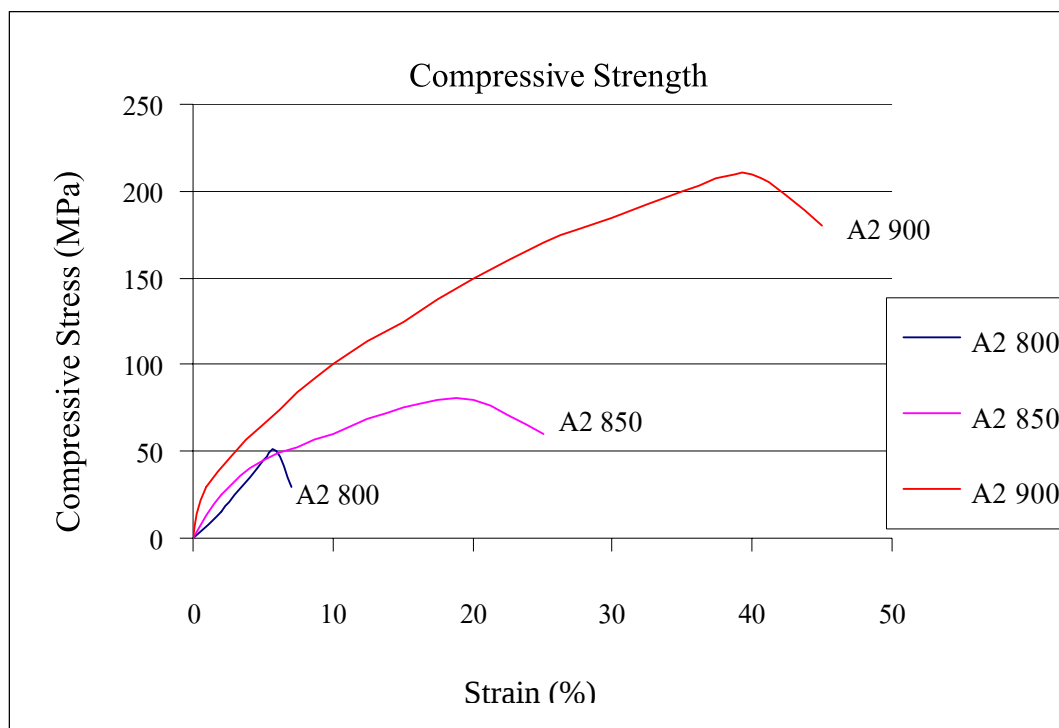
รูพรุนภายในวัสดุเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น เมื่อถูกแรงอัดรูพรุนจะยุบตัวลงจนไม่สามารถยุบได้ ทำให้ชิ้นวัสดุทนต่อแรงกดได้มากขึ้น การแตกหักของชิ้นวัสดุเกิดจากแรงที่ให้กับชิ้นวัสดุมีมากจนทำลายพันธะโลหะและมากพอที่จะผลักดันให้เกิดการเลื่อนตัวของอนุภาค จนเกิดรอยแตกภายในชิ้นวัสดุและแตกหักในที่สุด ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดก่อน

การแตกหักของชิ้นวัสดุจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ จากค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดที่อุณหภูมิ 900°C นำมาเขียนแผนภูมิได้ค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 850°C ประมาณ 3 เท่า และมากกว่าที่อุณหภูมิ 800°C ประมาณ 5 เท่า (รูปที่ 4.12)

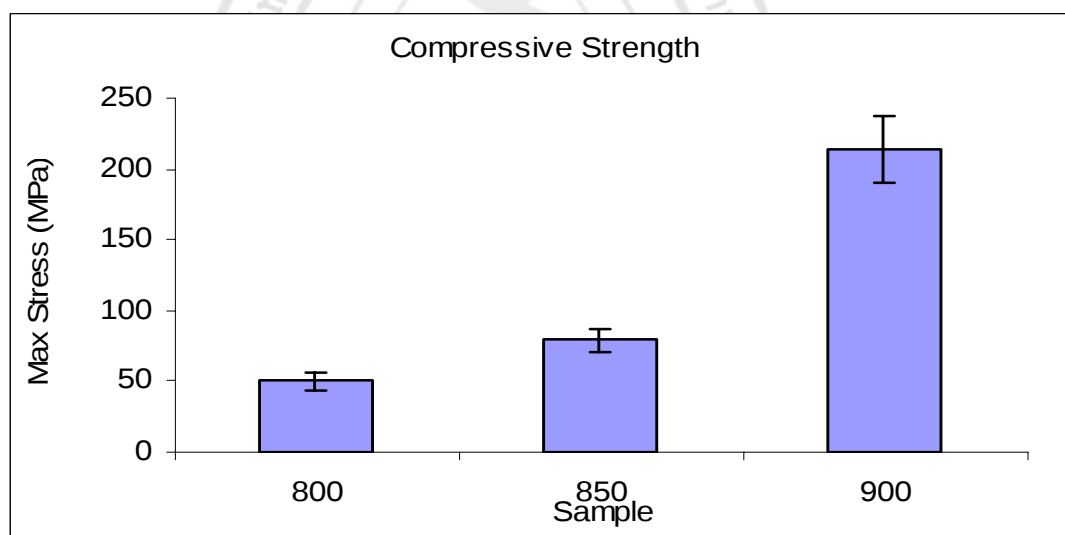
รูปที่ 4.13 แสดงการแตกของชิ้นวัสดุเป็นแนวเฉียงของชิ้นงานตามแนวแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 800°C การแตกออกจากกันโดยชัดเจน ที่อุณหภูมิ 850°C แตกเป็นตามแนวแรงเฉือนแต่ยังไม่แยกออกจากกัน แต่ที่อุณหภูมิ 900°C ชิ้นทดสอบไม่แตกออกจากกัน แต่มีการโก่งงอสาเหตุเกิดจากการเชื่อมประสานกันของอนุภาคโลหะทองแดง-ทองแดง ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นขึ้น และมากกว่าที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงมากที่สุด

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกลความต้านทานแรงกดที่อุณหภูมิขึ้นเทอร์ต่างกัน

ขึ้นทดสอบเผาที่ ต่างอุณหภูมิ (°C)	แบบ ของการแตก	ขึ้นทดสอบ หลังการแตก	ความต้านทานแรง กดสูงสุด (MPa)	ลักษณะอื่นๆ
800	แตกแบบเฉือน ตามแนวเฉียง	รอยแตกแบบ เปราะ	49.82 ± 6.91	ได้โลหะที่ร่วน เป็นผงเล็กๆ
850	แตกแบบเฉือน ตามแนวเฉียง	รอยแตกแบบ เหนียว	79.81 ± 8.36	โลหะที่ยังติดกัน ไม่ร่วนเป็นผง
900	ไม่แตกออกจาก กันอย่างชัดเจน	เกิดการยุบตัว มีรอยปริแตก	213.81 ± 22.81	บดงอเสียรูป มีรอยปริแตก ที่พื้นผิว



(a)



(b)

รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความต้านทานแรงกดที่อุณหภูมิขึ้นเทอร์ต่างกัน (a) แผนภูมิเชิงเส้น
แสดงความต้านทานแรงกดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (b) แผนภูมิแท่งแสดงความ

ต้านทานแรงกดสูงสุด



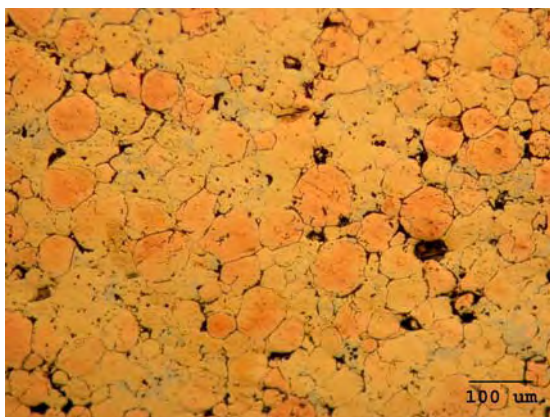
รูปที่ 4.13 ลักษณะการแตกหักของชิ้นวัสดุหลังการทดสอบความต้านทานแรงกด

4.4 อุณหภูมิขึ้นเทอร์ต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

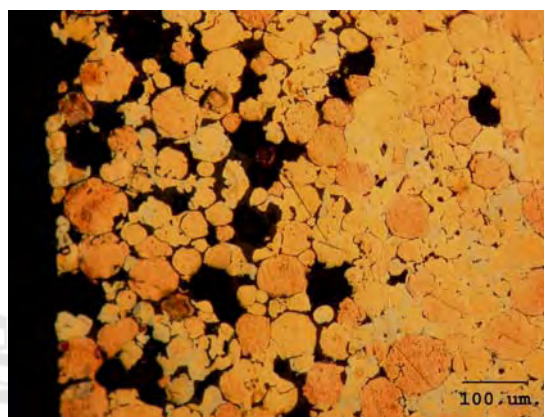
รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงการเกิดรูพรุนของชิ้นงานจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง รูพรุนในชิ้นงานมีรูพรุนที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C การเชื่อมประสานของอนุภาคภายในชิ้นงานมีน้อย ซึ่งสังเกตได้จากจำนวนคอเชื่อม เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น (850°C) จำนวนคอเชื่อมเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิที่เข้าใกล้จุดหลอมเหลวของผงโลหะที่เพิ่มสูงขึ้น (900°C) ทำให้เกิดการแพร่มากขึ้น จำนวนคอเชื่อมมากและใหญ่ขึ้น รูพรุนในชิ้นงานบริเวณผิวสัมผัสลดลง

เมื่อเปรียบเทียบบริเวณผิวภายนอกชิ้นวัสดุและบริเวณภายในชิ้นวัสดุ พบว่าบริเวณผิวภายนอกของชิ้นวัสดุ การประสานของอนุภาคมีน้อย มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก รูพรุนที่ผิวรอบนอกชิ้นวัสดุเหล่านี้เกิดขึ้นจากการขยายตัวกลับ (Spring back) ของผงโลหะรอบนอกชิ้นวัสดุหลังถอดออกจากแม่แบบ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ตามปกติของการอัดขึ้นรูป เมื่อผงโลหะรอบนอกขยายตัว

ออกไปทำให้ระยะห่างของผลโลหะห่างกันมากขึ้น บริเวณจุดสัมผัสของผลโลหะมีน้อยลงเมื่อนำไปขึ้นเทอร์จึงทำให้เกิดการแพร่ของโลหะเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากบริเวณผิวของชิ้นวัสดุ

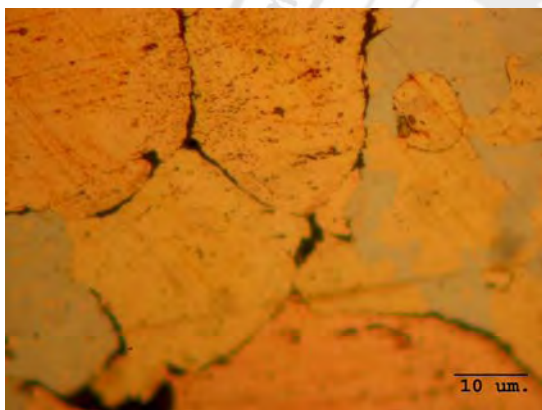


กลางชิ้นวัสดุ

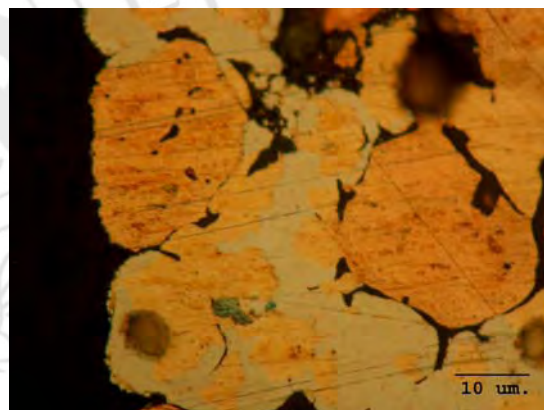


ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 100 เท่า



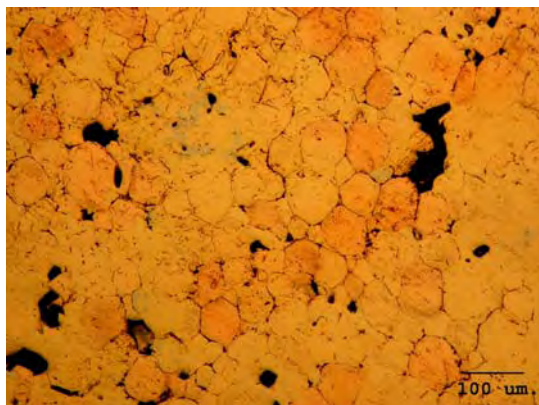
กลางชิ้นวัสดุ



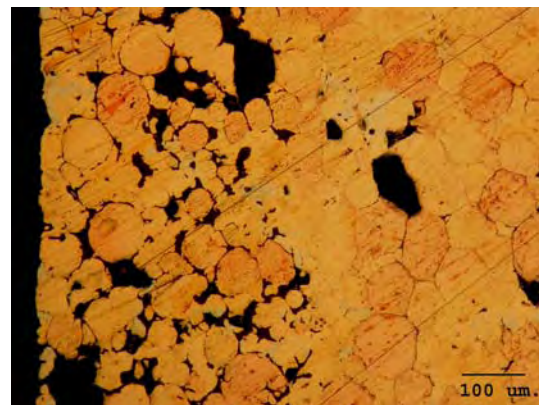
ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.14 ลักษณะรูพรุนในชิ้นงานขึ้นงานขึ้นเทอร์อุณหภูมิ 800°C อัตราขยาย 100 และ 500 เท่า
บริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคมีระยะห่างกันมากเกิดรูพรุนขนาดใหญ่

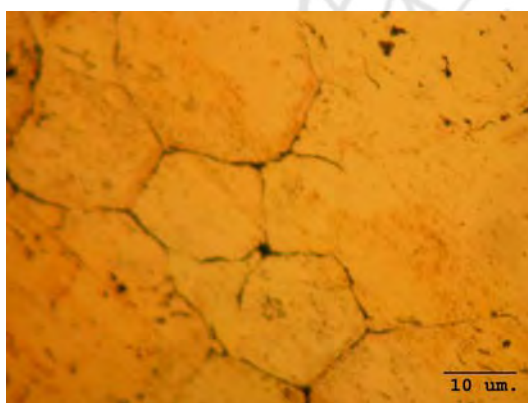


กลางชิ้นวัสดุ

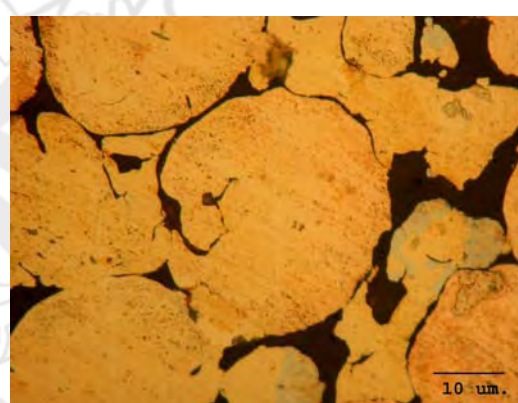


ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 100 เท่า



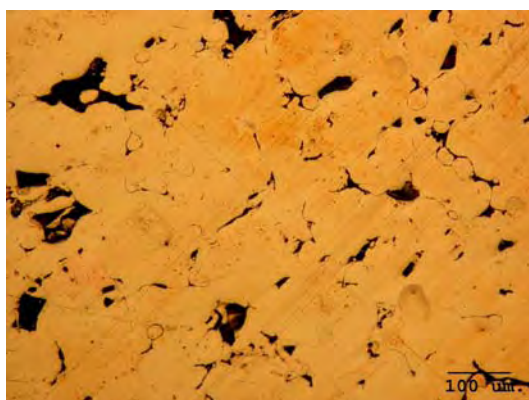
กลางชิ้นวัสดุ



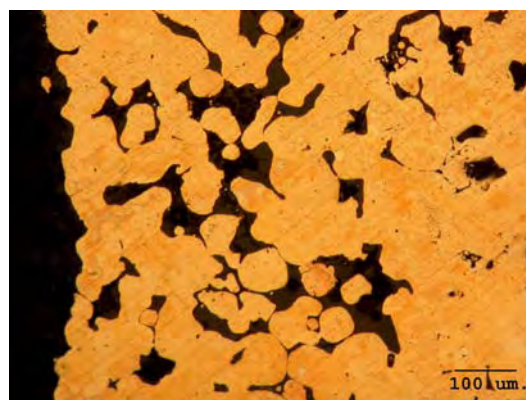
ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.15 ลักษณะรูพรุนในชิ้นงานซินเทอร์อุณหภูมิ 850°C อัตราขยาย 100 และ 500 เท่า
ระยะห่างบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคมีระยะห่างกันลดลง เกิดรูพรุนมีขนาดเล็กลง

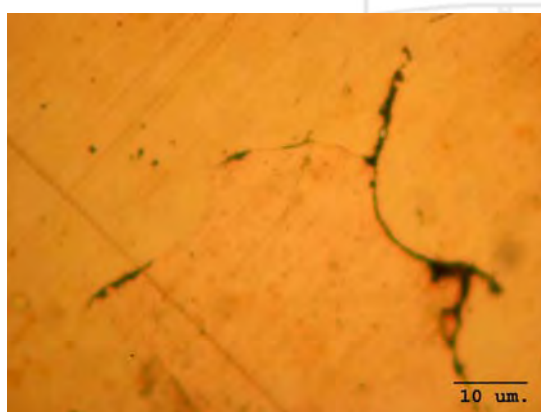


กลางชิ้นวัสดุ

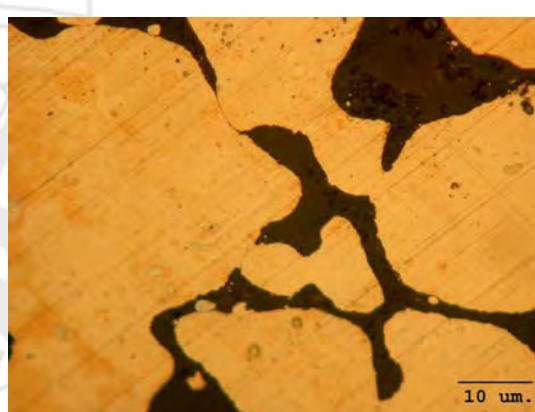


ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 100 เท่า



กลางชิ้นวัสดุ



ขอบชิ้นวัสดุ

อัตราขยาย 500 เท่า

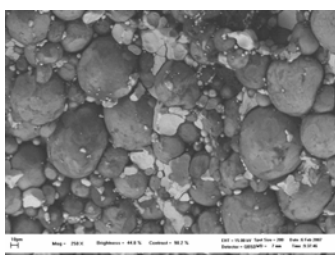
รูปที่ 4.16 ลักษณะรูพรุนในชิ้นงานซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C อัตราขยาย 100 และ 500 เท่า
ระยะห่างบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคลดลง เกิดรูพรุนมีขนาดเล็กลง

จากผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่ารูพรุนในชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิซินเทอร์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเทอร์ (ตารางที่ 4.5) นอกจากนี้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงให้เห็นว่า มีการประสานกันบริเวณขอบพื้นผิวสัมผัสของอนุภาค เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนจึงศึกษาการประสานกันของอนุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูการประสานกันบริเวณพื้นผิว และช่องว่างระหว่างอนุภาคเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (รูปที่ 4.17)

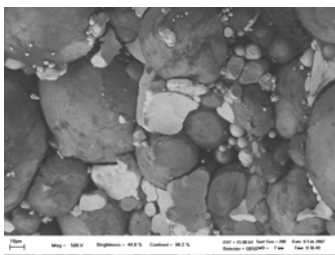
ก่อนซินเทอร์ ผงดิบและผงทองแดงขนาดเล็กจะถูกอัดแน่นและแทรกอยู่บริเวณช่องว่างของผงทองแดงขนาดใหญ่ (รูปที่ 4.18) หลังจากซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C เห็นความแตกต่างของผงทองแดง และผงดิบอย่างชัดเจน ผงโลหะทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นทรงกลมสังเกตได้ว่าผงดิบเกิดการหลอมและการแพร่กระจายไปบนผงโลหะทองแดงแต่ยังมีผงดิบบางส่วนที่ยังไม่เคลือบผิวของทองแดง ยังคงแยกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของผงทองแดง (รูปที่ 4.19) จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาค สัมพันธ์กับรูพรุนที่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคมีขนาดใหญ่ และมีจำนวนมาก ความหนาแน่นของชิ้นงานน้อย ทำให้สมบัติทางกล ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านแรงกด และค่าความแข็งผิวมีค่าน้อย

หลังจากซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850°C ผิวสัมผัสผงทองแดงเริ่มละลาย ดิบที่หลอมเหลวจะเข้าร่วมกับพื้นผิวของผงทองแดงที่เริ่มละลาย และบางส่วนของดิบยังคงเคลือบพื้นผิวของผงทองแดง สังเกตได้จากผิวของผงโลหะมีความเรียบและไม่มีเศษโลหะที่แยกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของผงทองแดง (รูปที่ 4.20) จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาค สัมพันธ์กับรูพรุนที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคมีขนาดเล็กลง จำนวนรูพรุนลดลง ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติทางกล ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านแรงกด และค่าความแข็งผิวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ 800°C

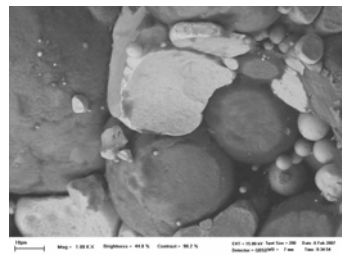
หลังจากซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพื้นผิวสัมผัสของทองแดงที่เริ่มละลายประสานกันเองมากขึ้น ซึ่งเกิดการประสานของอนุภาคทองแดงที่อยู่ติดกัน ดิบบางส่วนรวมกับทองแดง และบางส่วนยังคงหุ้มเคลือบอนุภาคผงทองแดง (รูปที่ 4.21) แสดงให้เห็นลักษณะความเหนียวของเนื้อชิ้นงานจากรอยแตกที่ได้ จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีการเชื่อมประสานกันของทองแดงกับทองแดง สัมพันธ์กับรูพรุนที่มีขนาดเล็กลงมาก จำนวนรูพรุนลดลง ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มากกว่าที่ 850°C ทำให้สมบัติทางกล ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านแรงกด และค่าความแข็งผิวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ 850°C



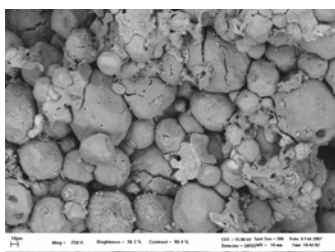
Green part ขยาย 250 เท่า



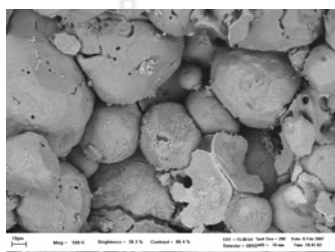
Green part ขยาย 500 เท่า



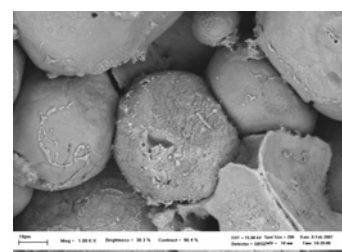
Green part ขยาย 1000 เท่า



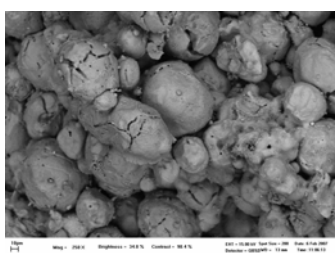
800°C ขยาย 250 เท่า



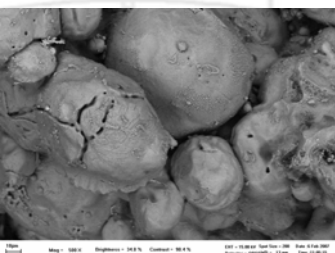
800°C ขยาย 500 เท่า



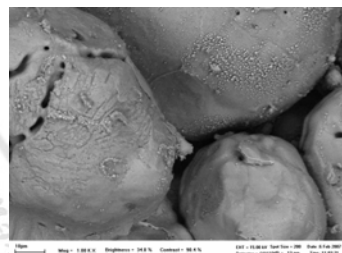
800°C ขยาย 1,000 เท่า



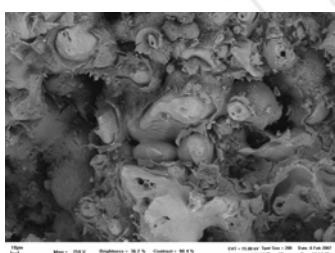
850°C ขยาย 250 เท่า



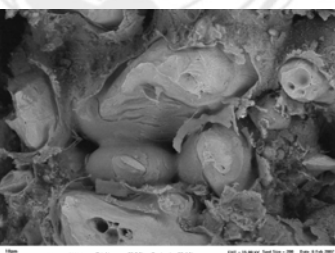
850°C ขยาย 500 เท่า



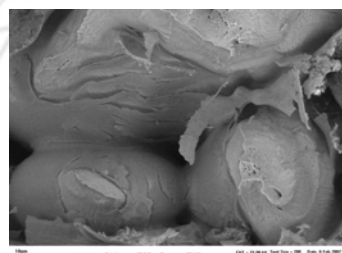
850°C ขยาย 1,000 เท่า



900°C ขยาย 250 เท่า

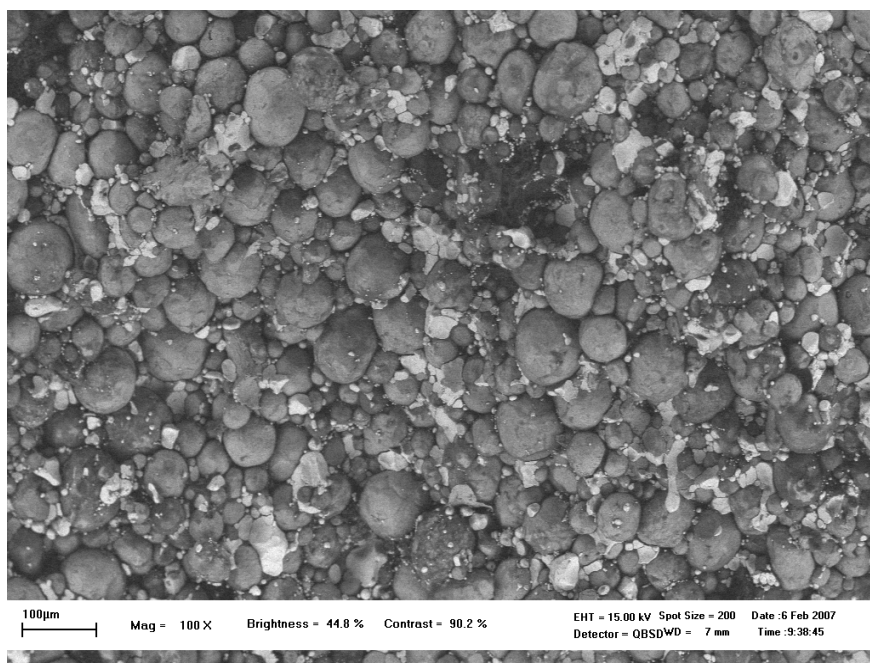


900°C ขยาย 500 เท่า

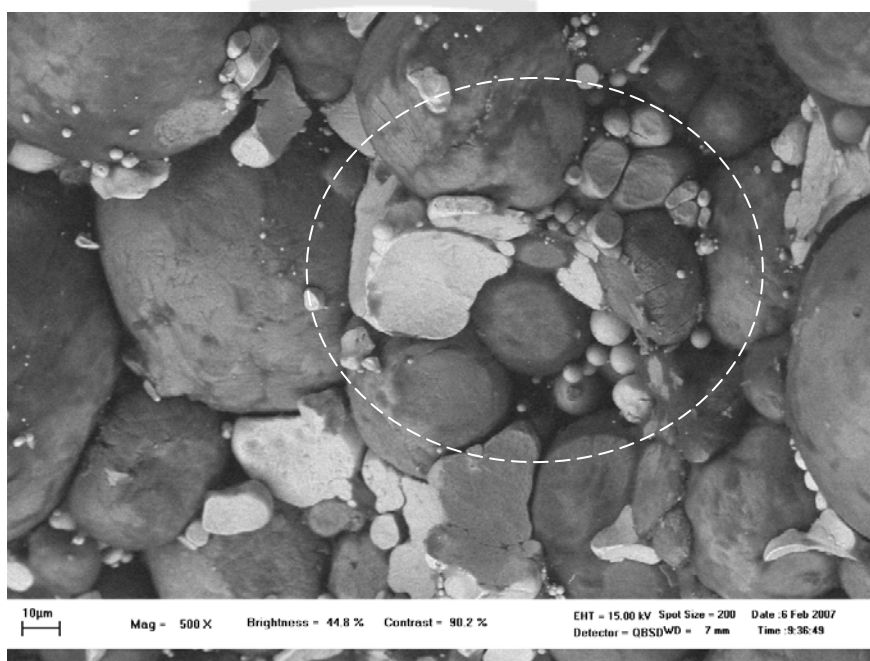


900°C ขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายในชิ้นวัสดุ
หลังซินเทอร์อุณหภูมิต่างๆ (800 850 และ 900°C)

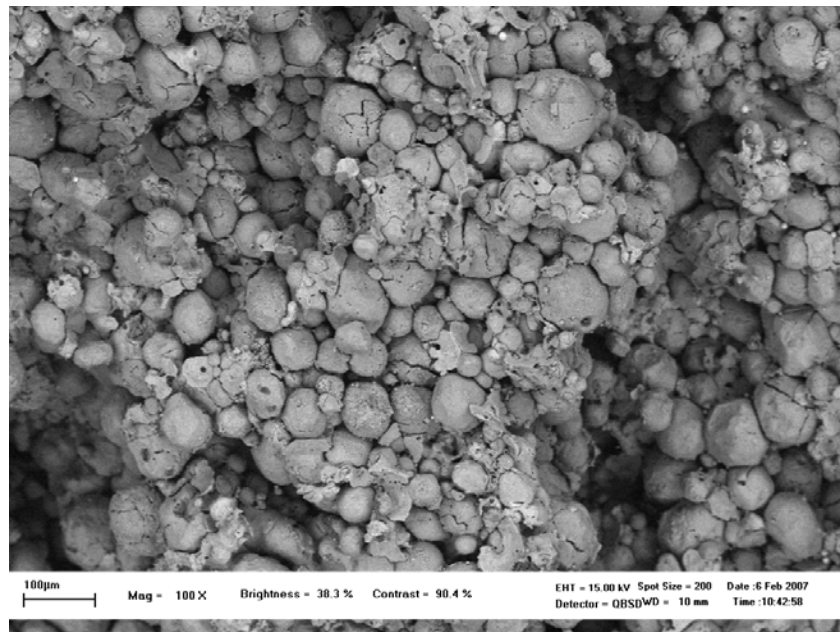


อัตราขยาย 100 เท่า

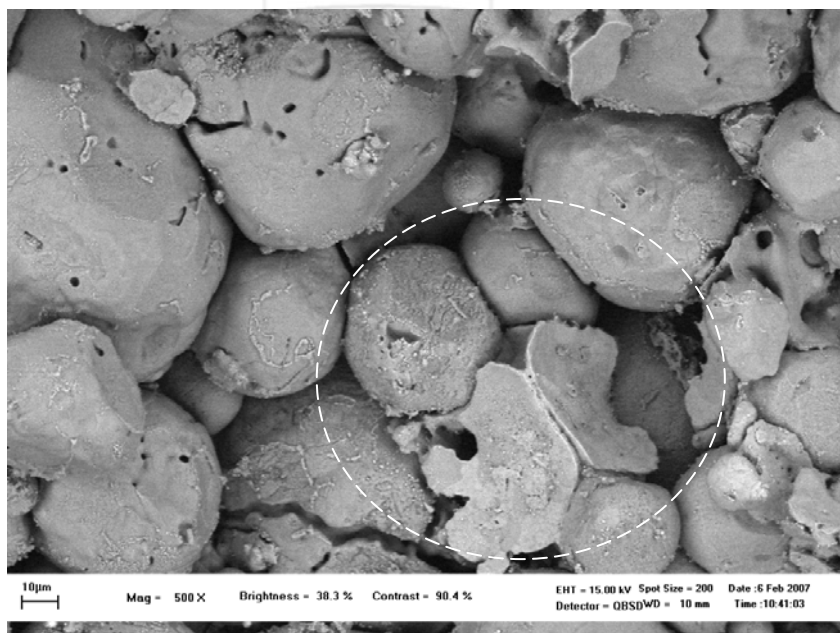


อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายชิ้นงานก่อนชินเทอร์ (Green part) จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะการเกาะเกี่ยวทางกลบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาค ผงทองแดง ขนาดเล็กและดิบูก เข้าแทรกในช่องว่างของอนุภาคทองแดงขนาดใหญ่

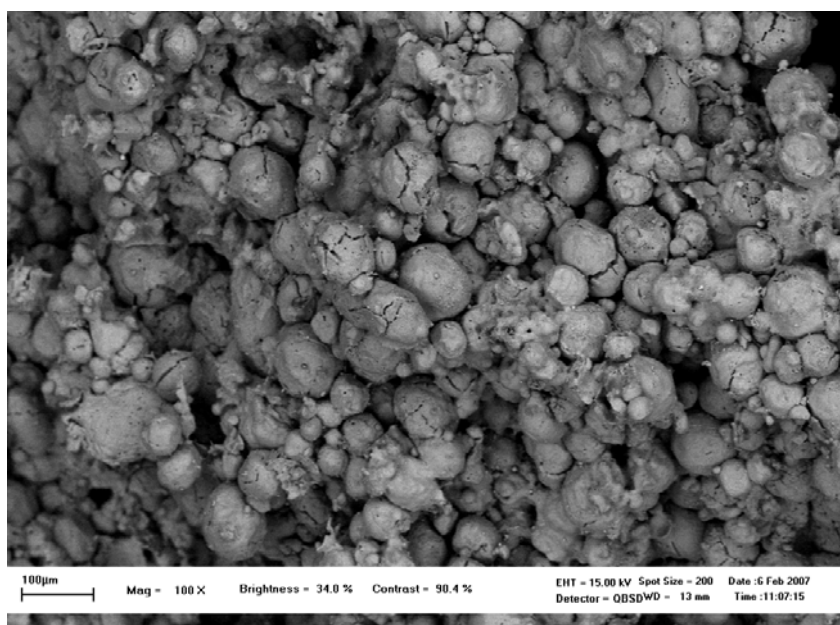


อัตราขยาย 100 เท่า

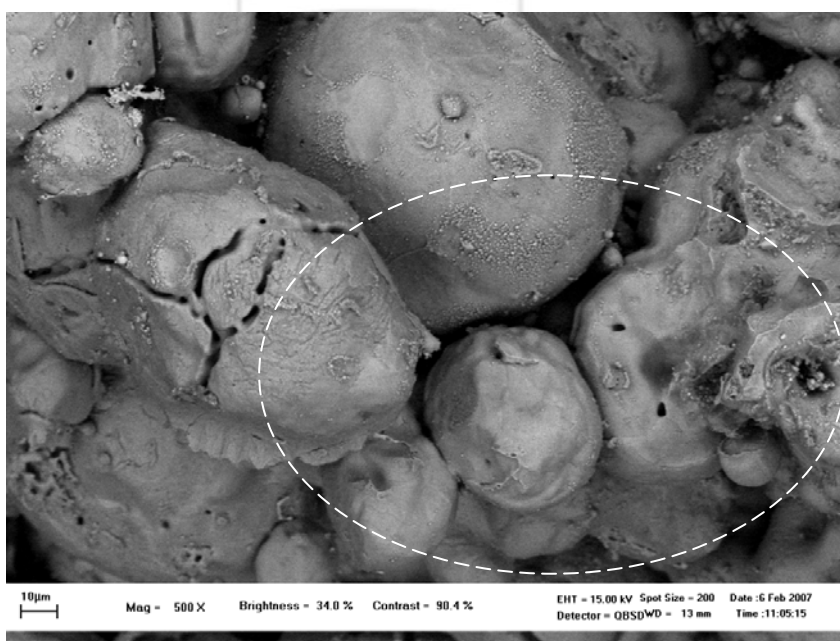


อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ซินเทอร์อุณหภูมิ 800°C จากห้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด แสดงลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายใน ดินุกหลอมละลาย เข้าแทรกในช่องว่างและเคลือบพื้นผิวของอนุภาคทองแดงมีการประสานกัน บริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคทองแดงโดยดินุกที่ละลายเป็นตัวประสาน

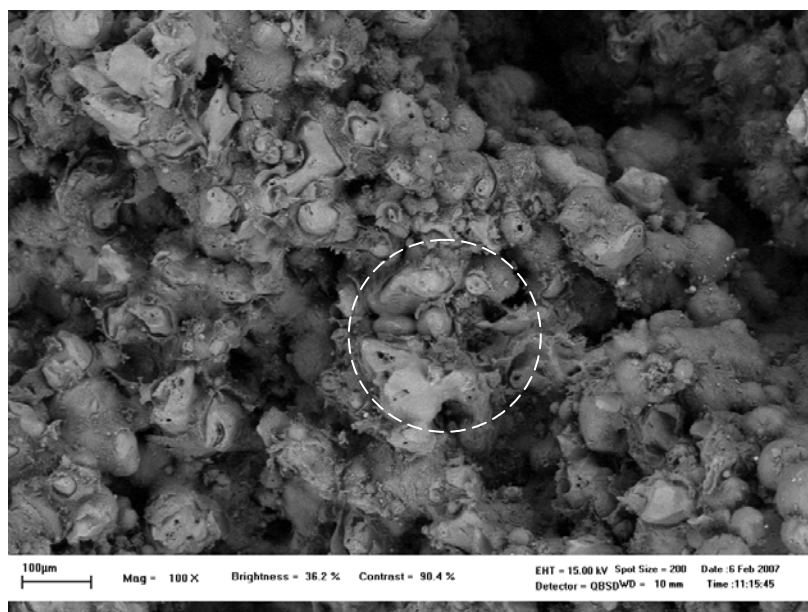


อัตราขยาย 100 เท่า

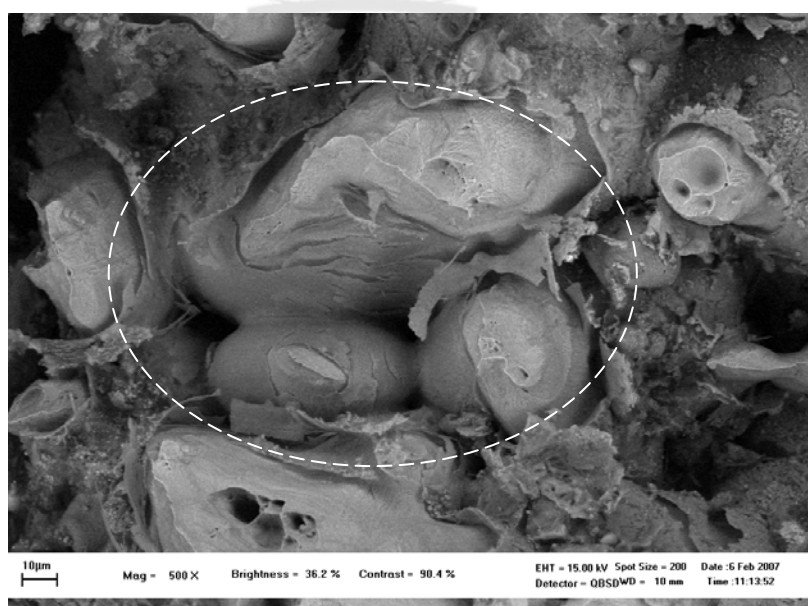


อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์อูณหภูมิ 850°C จากห้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด แสดงลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายใน มีการประสานบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคมากกว่าที่ 800°C ดินุ่กที่หลอมละลายเคลือบพื้นผิวแทรกในช่องว่างและประสานรวมกับทองแดงที่ละลายมากขึ้น ทำให้รูพรุนลดลง

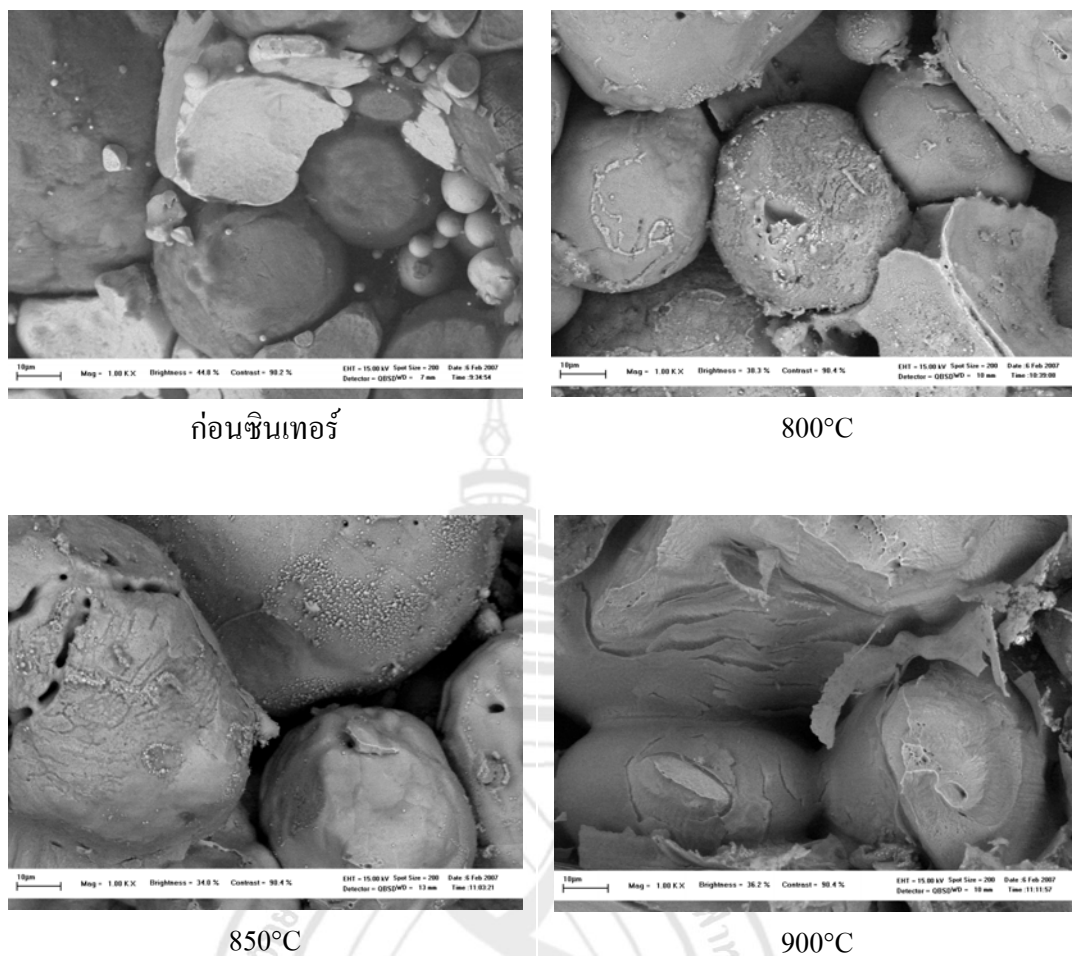


อัตราขยาย 100 เท่า



อัตราขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ซินเทอร์อุณหภูมิ 900°C จากห้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายในทองแดง มีการประสานบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคมากกว่าที่ 850°C ซึ่งเกิดจากดินุคที่หลอมละลายเข้ามาประสานกับทองแดงที่ละลายมากขึ้นกลายเป็นโลหะสัมฤทธิ์ และทองแดงประสานกันเองบริเวณผิวสัมผัส และดินุคบางส่วนเคลือบผิวอนุภาคทองแดงที่ประสานกัน ทำให้รูพรุนลดลงยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายลักษณะการเกิดรูพรุนและการประสานภายในชิ้นวัสดุ ก่อนและหลังซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขยาย 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบรูปถ่ายที่ได้ พบว่ารูพรุนบริเวณผิวสัมผัสและช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเทอร์เพิ่มขึ้น

4.5 ผลการทดสอบสมบัติของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)

การวิจัยนี้ต้องการนำชิ้นวัสดุไปใช้ผลิตหัวกระสุนปืนชนิดแตกหักได้ (Frangible bullet) จึงต้องการนำผลการทดสอบของวัสดุที่เตรียมจากงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับสมบัติของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตหัวกระสุน ปืนชนิดแตกหักได้ เพื่อใช้งานต่อไป จึงทำการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน

Frangible bullet 85 Gr (Luger) ทำการทดสอบหัวกระสุนที่ตัดส่วนหัวกระสุนออก เพื่อให้ได้ชิ้นวัสดุทรงกระบอก ได้ค่าความต้านแรงกดของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เป็น 39.46 ± 0.40 MPa มีลักษณะการแตกดังรูป 4.23 ผลที่ได้เปรียบเทียบกับความต้านทานแรงกดของวัสดุทดสอบ ดังรูป 4.24

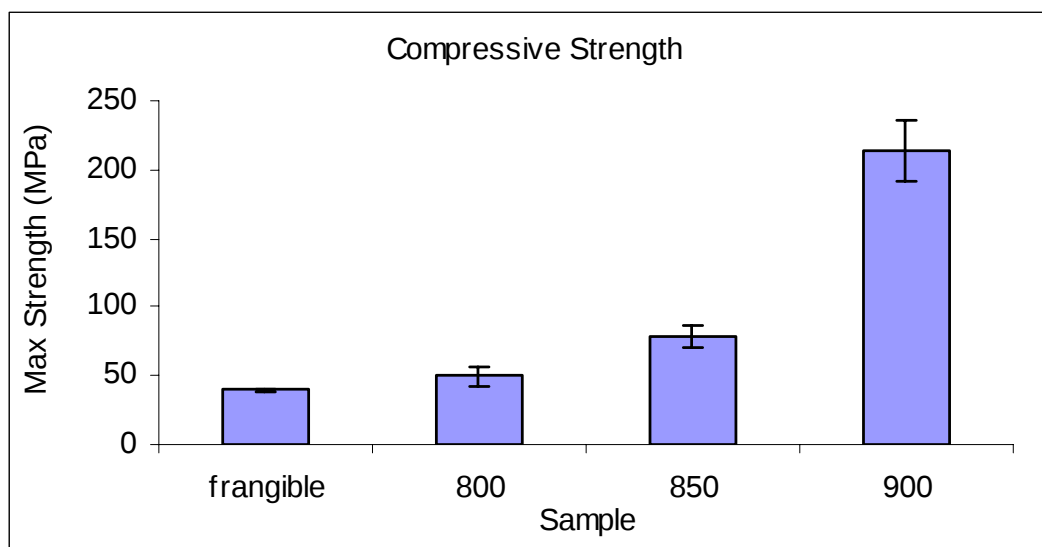
หัวกระสุนชนิดแตกหักได้ frangible bullet 85 Gr (Luger) ซึ่งมีใช้งานในปัจจุบันเป็นกระสุนขนาดเบา มีน้ำหนัก 85 Gr (5.8 g) ผ่านการทดสอบว่าหัวกระสุนไม่สามารถทะลุกระจกและผนังลำตัวเครื่องบินออกมาภายนอกได้ และแตกกระจายเป็นผงโลหะและชิ้นส่วนเล็กๆบริเวณที่หัวกระสุนกระทบเป้า (Rider, 2003) หัวกระสุนที่ทดสอบความต้านทานแรงกดได้ 39 MPa ซึ่งสามารถนำไปใช้กับปืนพก ขนาด 9 มม. แสดงให้เห็นว่าหากต้องการนำชิ้นงานไปผลิตเป็นหัวกระสุน ชิ้นงานควรที่จะมีความต้านทานแรงกดได้ไม่ต่ำกว่า 39 MPa

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของชิ้นงานทดสอบกับหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) พบว่ามีความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 800°C



รูปที่ 4.23 ลักษณะการแตกของหัวกระสุนแตกหักได้ Frangible bullet 85 Gr (Luger)

หลังทดสอบความต้านทานแรงกด (Frangible หัวกระสุนตัดหัว)



รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เปรียบเทียบกับชิ้นวัสดุทดสอบ

ลักษณะการแตกของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิขึ้นเทอร์ 800, 850 °C (รูปที่ 4.12 b, c) และหัวกระสุน frangible bullet 85 Gr (Luger) มีลักษณะคล้ายกันและยังมีความคล้ายกับลักษณะการแตกจาก Kolsky bar ด้วย (รูปที่ 4.25) ชิ้นทดสอบที่ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 900°C มีค่าความต้านทานแรงกดมากกว่ากระสุน frangible bullet 85 Gr (Luger) ประมาณ 5 เท่า (213 MPa) ลักษณะการแตกหักของวัสดุทดสอบจะไม่แตกออกจากกันโดยทันทีแต่จะเกิดการโก่งงอเสียรูปร่าง (Buckling) ก่อนเกิดการปริของขอบชิ้นวัสดุทดสอบ (รูปที่ 4.12 d) ซึ่งการโก่งงอของชิ้นงานแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุต่อการกด ซึ่งแรงที่ใช้ในการกดทำให้เกิดความเค้นน้อยกว่าค่าความต้านทานแรงกดของชิ้นวัสดุ จึงไม่สามารถทำให้ชิ้นวัสดุแตกหักได้ หากนำชิ้นวัสดุไปผลิตเป็นกระสุนปืนจะเกิดการแตกหักได้ยากหรืออาจแตกหักได้ไม่ดี



(a)



(b)

รูปที่ 4.25 รอยแตกจากการทดสอบความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน frangible bullet

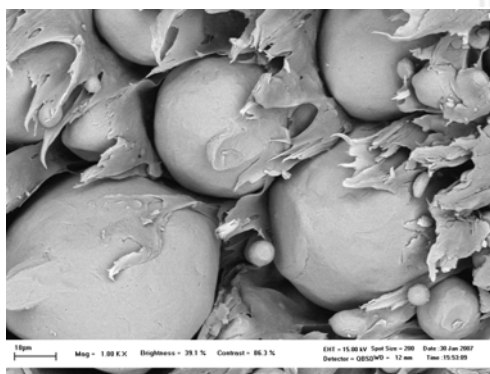
(a) ทดสอบด้วย Kolsky Bar (Newman, 2006)

(b) ทดสอบด้วย Universal Testing Machine UTM.

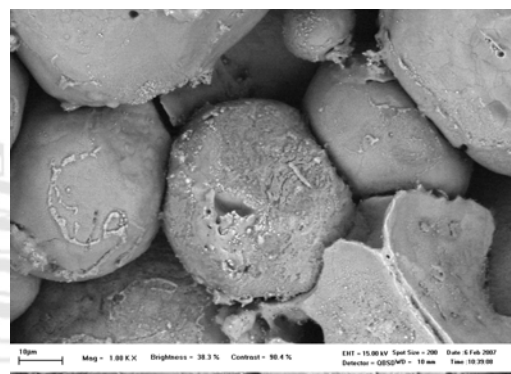
4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นวัสดุทดสอบเทียบกับกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)

รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นวัสดุทดสอบและโครงสร้างจุลภาคของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) จะเห็นว่าหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) ซึ่งใช้วัสดุโพลีเมอร์เป็นตัวประสาน (Rider, 2003) โพลีเมอร์ไม่ได้เกิดพันธะกับผงทองแดง เพียงแต่หุ้มเคลือบผงทองแดงไว้เท่านั้น ในขณะที่ชิ้นวัสดุทดสอบมีการเกิดพันธะโลหะได้แก่พันธะดีบุกกับทองแดง และพันธะของ

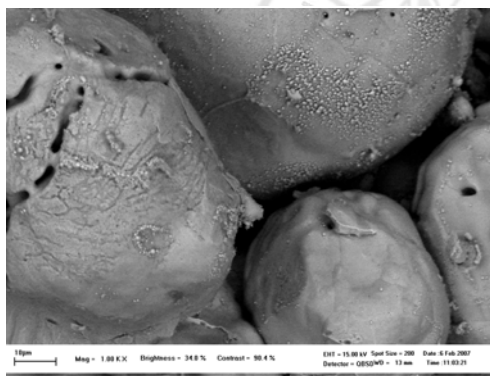
ทองแดงกับทองแดงซึ่งสามารถอธิบายถึงค่าความต้านทานแรงกดของหัวกระสุน Frangible- bullet ที่มีค่าต่ำกว่าชิ้นวัสดุทดสอบ ในหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) ไม่มีการเชื่อมประสานของผงโลหะ แต่ชิ้นวัสดุทดสอบที่ 800°C และ 850°C มีลักษณะการเชื่อมประสานกันบ้างแต่ไม่มากนัก ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดเรียงตัวของผงทองแดงใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าความต้านทานแรงกดใกล้เคียงกันในขณะที่ 900°C มีการเชื่อมประสานระหว่างผงโลหะทองแดงทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากที่สุดจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด



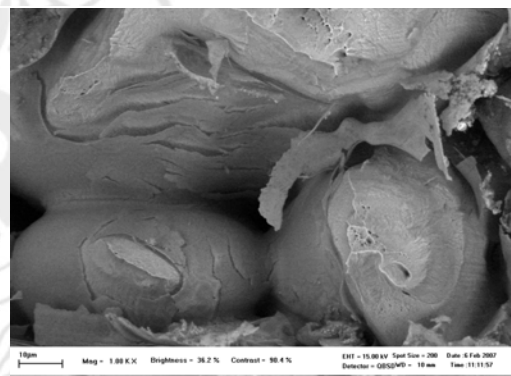
กระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger)



800°C



850°C

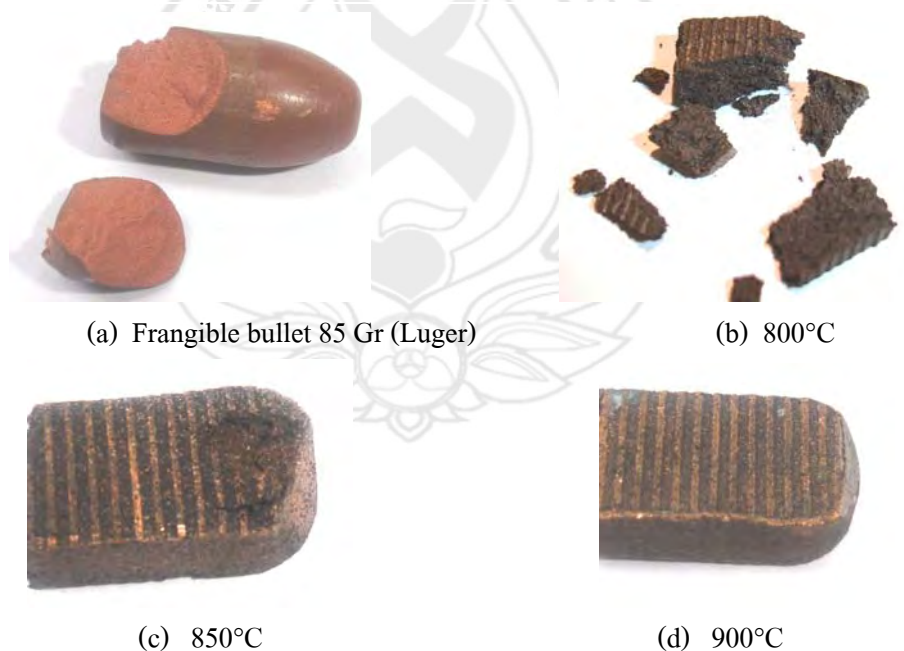


900°C

รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) เทียบกับชิ้นวัสดุทดสอบถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขยาย 1,000 เท่า

4.7 การแตกหักจากการยิง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการขึ้นรูปวัสดุเป็นหัวกระสุนจริง การทดสอบการแตกหักจึงทำโดยการจำลองการทดสอบคล้ายกับ Kolsky bar โดยจำลองแบบการยิง ออกจากปากลำกล้องปืนด้วยความเร็ว โดยใช้แก๊สที่มีแรงดัน 13.7 MPa ยิงวัสดุทดสอบที่ขนาดใกล้เคียงกับหัวกระสุนปืนขนาด 9 มม. ไปยังเป้าที่ทำจากแผ่นเหล็กหนา 1 mm ระยะระหว่างปลายกระบอกปืนกับเป้า 3 m. เพื่อดูผลการแตกของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr(Luger) เทียบกับชิ้นวัสดุทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) แตกออกเป็นชิ้นเล็ก (รูปที่ 4.27 a) ชิ้นวัสดุซินเทอร์ที่ 800°C แตกออกจากกันเป็นชิ้นเล็กๆ (รูปที่ 4.27 b) เมื่อแตกเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กๆ ขนาดแตกต่างกันออกไปและมีทิศมีการกระจายออกจากเป้า 1-2 เมตร (รูปที่ 4.28) ชิ้นวัสดุซินเทอร์ที่ 850°C มีรอยแตกกว้างเป็นแนวยาวเกิดขึ้นในชิ้นวัสดุแต่ไม่แตกออกจากกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.27 c) และชิ้นวัสดุซินเทอร์ที่ 900°C มีรอยยุบตัวของบริเวณสัมผัสที่กระทบเป้า แต่ไม่แตกออกจากกัน (รูปที่ 4.27 d) ผลการทดสอบแสดงถึงแนวโน้มการแตกหักที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเทอร์สูงขึ้น

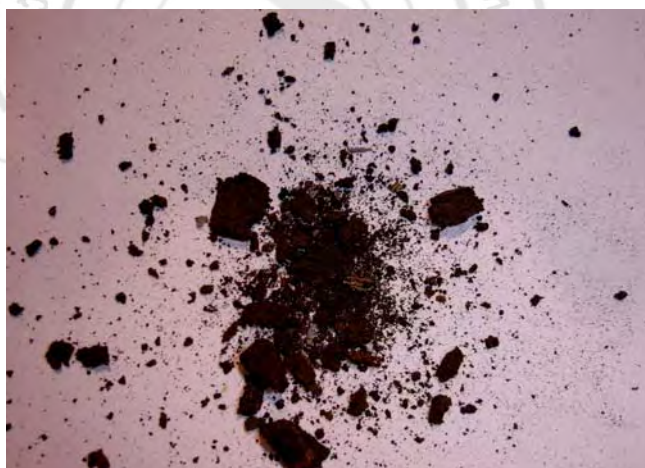


รูปที่ 4.27 การแตกของหัวกระสุน Frangible bullet 85 Gr (Luger) และชิ้นวัสดุ
หลังการยิงด้วยปืนลมแรงดัน 13.7 MPa

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าการทดสอบความทนทานจากการกระแทก (Impact strength) ของชิ้นงาน (ตารางที่ 4.6) เนื่องจากชิ้นงานที่ 900°C มีความทนทานจากการกระแทกได้มากที่สุด จึงมีการแตกหักได้น้อยที่สุดนั่นเอง นอกจากนี้ลักษณะการประสานกันของ ทองแดง-ทองแดง (รูปที่ 4.16, 4.21) ในชิ้นงานที่เผาที่ 900°C ก็น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ยาก



(a)



(b)

รูปที่ 4.28 ผงโลหะจากการแตกหักจากการยิงของชิ้นทดสอบ เผาที่ 800°C

(a) แยกออกและกระจายรอบบริเวณเป้ารัศมี 1-2 เมตร

(b) ชิ้นส่วนขนาดเล็กๆ

4.8 เปรียบเทียบพลังงานตกกระทบ

การทดสอบด้วยการจำลองการยิงด้วยแก๊ส ทำให้ทราบว่าชิ้นวัสดุทดสอบที่อุณหภูมิที่ 800°C แตกหักเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ แต่ที่อุณหภูมิ 850°C และ 900°C มีการแตกเล็กน้อย อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสอง มีโอกาสที่จะแตกได้มากขึ้นถ้าความเร็วในการกระทบมากขึ้น เหมือนการทดสอบแบบ Taylor bar (Taylor, 2003) จึงคำนวณเปรียบเทียบพลังงานตกกระทบที่ระยะต่างๆ กับหัวกระสุนแตกหักได้ที่มีการใช้ในปัจจุบัน (Longbow NTF) โดยกำหนดให้ความเร็วที่ระยะต่างๆ เท่ากัน และกำหนดให้ขนาดหัวกระสุนมีขนาด 1 cm³ เท่ากัน พลังงานตกกระทบที่คำนวณจากสมการ 4.1แสดงในตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ตกกระทบหรือพลังงานจลน์ มีค่าลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นและความเร็วกระสุนที่ลดลง ชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีพลังงานกระทบที่สูงกว่า

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{.....(4.1)}$$

KE = พลังงานจลน์ (J)

m = มวลของหัวกระสุน (kg)

v = ความเร็วของหัวกระสุน (m/s)

ตารางที่ 4.10 พลังงานตกกระทบที่คำนวณได้เทียบกับหัวกระสุนแตกหักได้ (Longbow NTF)

ชนิดกระสุน	Longbow, NTF.	800°C	850°C	900°C
ความหนาแน่น (g/cm ³)	5.50	7.03	6.74	7.14
ความเร็วปากลำกล้อง(m/s)	435	435	435	435
พลังงานปากลำกล้อง (J)	327	665	637	675
ความเร็วระยะ3 เมตร (m/s)	409	409	409	409
พลังงานระยะ3 เมตร (J)	290	587	563	597
ความเร็วระยะ10 เมตร (m/s)	370	370	370	370
พลังงานระยะ10 เมตร (J)	238	481	461	488
ความเร็วระยะ15 เมตร (m/s)	343	343	343	343
พลังงานระยะ 15 เมตร(J)	204	413	396	420

จากตารางที่ 4.10 จากค่าพลังงานตกกระทบที่คำนวณได้ ค่าพลังงานตกกระทบของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมีค่ามากกว่าพลังงานตกกระทบของหัวกระสุนแตกหักได้ (Longbow NTF) ที่มีใช้ในปัจจุบัน เมื่อทราบค่าพลังงานตกกระทบของหัวกระสุนที่ระยะต่างๆ สามารถคำนวณได้ว่าหัวกระสุนจะแตกหักได้หรือไม่แตกหัก โดยนำค่าพลังงานตกกระทบมาคำนวณหาแรงที่กระทำต่อหัวกระสุนปืน และสามารถคำนวณหาความเค้นที่หัวกระสุนกระทำกับเป้าที่จุดกระทบเป้าได้ สามารถสรุปได้ว่าหัวกระสุนจะแตกหักได้ เมื่อค่าความต้านทานแรงกดของหัวกระสุนมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นจากแรงกด (Compressive stress) ที่จุดกระทบเป้า ซึ่งค่าความเค้นที่จุดกระทบเป้าหาได้ ดังสมการ

$$F = ma \quad \text{.....(4.2)}$$

F = แรงกดที่จุดกระทบเป้า (N)

m = มวลหัวกระสุน (kg)

a = ความเร่ง (ms^{-2})

เมื่อทราบความเร็วของหัวกระสุนที่จุดกระทบเป้า สามารถหาความเร่งได้ดังนี้

$$v^2 = u^2 + 2as$$

$$a = \frac{(v^2 - u^2)}{2s} \quad \text{.....(4.3)}$$

u = ความเร็วก่อนกระทบเป้า (m/s)

v = ความเร็วหลังกระทบเป้า (m/s) (กำหนดให้เท่ากับ 0)

แรงที่ได้ที่จุดกระทบหาได้จากการแทนค่าในสมการที่ 4.2 ได้ดังนี้

$$F = m \frac{(v^2 - u^2)}{2s} \quad \text{.....(4.4)}$$

s = ระยะทางเป้าเคลื่อนที่ (m) (กำหนดให้เท่ากับ = 5 mm)

จากนั้นนำแรงที่ได้ไปคำนวณหาความเค้นจากแรงกดที่จุดกระทบเป่าดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{.....(4.5)}$$

σ = ความเค้นจากแรงกดที่จุดกระทบเป่า (MPa)

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของหัวกระสุน และกำหนดให้หัวกระสุนกระทบเป่าเต็มพื้นที่หน้าตัด ฉะนั้นเมื่อกำหนดให้หัวกระสุนใช้กับปืนขนาด 9 มม. พื้นที่ของการกระทบเป่าได้ดังนี้

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{22}{7}\right) (4.5)^2 = 31.82 \text{ mm}^2$$

ความเค้นสูงสุดที่จุดกระทบเป่าของหัวกระสุนมีค่าดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{31.82} \quad (\text{MPa}) \quad \text{.....(4.6)}$$

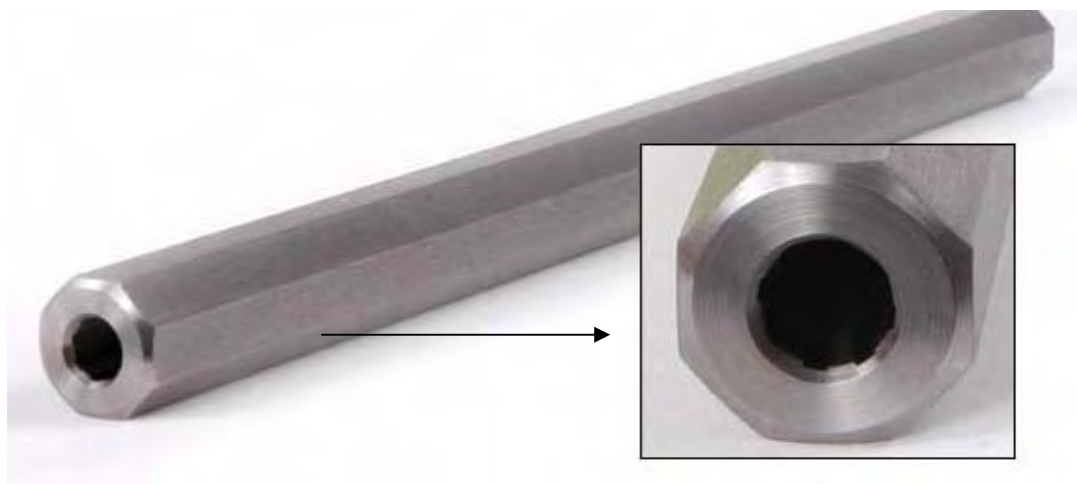
เมื่อกำหนดให้ความเร็วของหัวกระสุนในการกระทบเป่าเท่ากันตามตารางที่ 4.10 ความเค้นจากแรงกด (Compressive stress) ที่จุดกระทบเป่ามีค่ามากกว่าค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุทดสอบที่ใช้แทนหัวกระสุน ในการคำนวณเปรียบเทียบโดยกำหนดให้ขนาดหัวกระสุนมีขนาด 1 cm³ เท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุทดสอบจึงเท่ากับน้ำหนักของหัวกระสุน ตาราง ที่ 4.9 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าหัวกระสุนและชิ้นทดสอบชินเทอร์ที่ 800°C, 850°C จะแตกเมื่อถูกยิงไปกระทบเป่า แต่ชิ้นวัสดุชินเทอร์ที่ 900°C ไม่แตกออกเนื่องจากความเร็วในการยิงทดสอบไม่เท่ากับความเร็วที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบความเค้นของวัสดุที่จุดกระทบเป้า

ชนิดกระสุน	Longbow, NTF.	800°C	850°C	900°C
น้ำหนักหัวกระสุน (g)	5.50	7.03	6.74	7.14
ความเค้นระยะ 3 เมตร (MPa)	2,891	3,695	3,543	3,753
ความเค้นระยะ 10 เมตร (MPa)	2,366	3,024	2,899	3,071
ความเค้นระยะ 15 เมตร (MPa)	2,033	2,599	2,639	2,639
ความต้านทานแรงกด ของชิ้นวัสดุทดสอบ (MPa)	ไม่ทดสอบ	49.82	79.81	213.81

4.9 เปรียบเทียบสมบัติทางกลกับลำกล้องปืนและแผ่นเป้า

หัวกระสุนควรมีค่าความต้านทานแรงกดและความแข็งผิวไม่น้อยกว่าลำกล้องปืนและแผ่นเป้า เนื่องจากเหล็กที่ใช้ทำลำกล้องปืนและแผ่นเป้าหมายมีหลายชนิด โดยทั่วไปวัสดุเป้าหมายจะทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) 1020 1040 Steel และเหล็กเครื่องมือ (Tool Steel) เช่น 4140 4340 Steel เหล็กแข็งพิเศษ AR 350 AR 500 เป็นต้น จึงเปรียบเทียบสมบัติทางกลความต้านทานแรงดึงและความแข็งผิวของชิ้นวัสดุทดสอบ กับเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับใช้ทำลำกล้องปืน 4140 Steel (Green Mountain Rifle Barrel Co., 2005) ในรูปที่ 4.29 ตามมาตรฐาน วัสดุ ความต้านทานแรงดึงของ 4140 Steel ผ่านการอบความร้อนเท่ากับ 655 MPa (Callister, 2002) และมีค่าความแข็งผิวเท่ากับ 247 HV (Automation Creations, Inc., 2006) และเหล็กแข็งพิเศษสำหรับแผ่นเป้า AR 500 (500 HV) (Action Targets, Inc., 2000) ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของชิ้นวัสดุทดสอบมีความแข็งผิวน้อยกว่าเหล็กลำกล้องปืนและเหล็กแผ่นเป้า แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำวัสดุทดสอบไปผลิต เป็นหัวกระสุน จะไม่ก่อให้เกิดการสึกหรอให้แก่ลำกล้องปืน และไม่ทำลายแผ่นเป้าแสดงผลสมบัติทางกล ดังตาราง 4.12



รูปที่ 4.29 เหล็กกล้าสำหรับลำกล้องปืน 4140 Steel (Green Mountain Rifle Barrel Co., 2005)

4.10 เปรียบเทียบสมบัติทางกลกับอลูมิเนียมผนังลำตัวเครื่องบิน

เนื่องจากความต้องการนำวัสดุผสมที่ได้ ไปผลิตเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ เพื่อใช้ฝึกและใช้จริงบนอากาศยาน จึงเปรียบเทียบสมบัติทางกลความต้านทานแรงดึงของชิ้นวัสดุทดสอบกับ อลูมิเนียมผสม (AL 2024-T3) ที่เป็นวัสดุโครงสร้างและผนังลำตัวอากาศยานโดยทั่วไป ตามมาตรฐานวัสดุของอลูมิเนียมผสม AL 2024-T3 ค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 485 MPa (Callister, 2002) ค่าความแข็งผิวเท่ากับ 137 HV (ASM Aerospace Specification metals Inc, 2006) จากค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งผิวของอลูมิเนียมผสม AL 2024-T3 มีค่ามากกว่าทุกชิ้นงานวัสดุทดสอบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำวัสดุทดสอบไปผลิตเป็นหัวกระสุน และเมื่อยิงในอากาศยาน จะไม่ทำลายผนังอากาศยาน แสดงสมบัติทางกลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางกลของชิ้นวัสดุทดสอบกับเหล็กกล้าลึงปืน เป้าแผ่นเหล็ก และอลูมิเนียม
 ผนังลำตัวอากาศยาน (Callister, 2002) (Action Targets, Inc., 2000)
 (ASM Aerospace Specification metals Inc, 2006)

วัสดุทดสอบ	ค่าต้านทานแรงดึง (MPa)	ค่าความแข็งผิว HV	พลังงานที่ถูกดูดซับ (J)
1020 (Carbon Steel)	380-440	126	123.40
1040 (Carbon Steel)	520-590	149	44.30
4140 (Tool Steel)	655-1,720	247	54.50
4340 (Tool Steel)	745-1,760	339	51.1
AL 2024 –T3	483	137	-
AR 350	1,379	321	27.11
AR 500	1,703	500	43.38
800°C	23.60	55.40	0.10
850°C	26.30	76.10	0.77
900°C	108.70	118.50	3.72

หมายเหตุ: AR = Abrasion Resistant Steel, AL = Aluminum Alloys

4.11 เปรียบเทียบความต้านทานแรงกดกับกระสุนปืนที่มีใช้ในปัจจุบัน

ปืนแต่ละชนิดจะมีแรงดันภายในลำกล้องปืนที่แตกต่างกันตามชนิดของปืน ชนิดของกระสุนปืน ชนิดของดินปืนในกระสุนปืน ความยาวลำกล้อง และขนาดของลำกล้องปืน หัวกระสุนที่ใช้กับปืนแต่ละชนิดและขนาด จึงมีสมบัติทางกลที่ต่างกัน ถ้าพิจารณาสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นวัสดุทดสอบ กับกระสุนแตกหักได้ที่มีใช้ในปัจจุบัน พบว่าค่าความต้านทานแรงกด ของ

ชิ้นงานที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าต้านทานแรงกดของกระสุนที่มีรายงานไว้ (ตารางที่ 4.13)

ตารางที่ 4.13 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานเปรียบเทียบกับกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบัน

ชนิดกระสุนและกระสุนตามสิทธิบัตร	ความต้านทานแรงกด (MPa)
Frangible bullet 85 Gr, Luger	39.46
กระสุนตามสิทธิบัตรของ Lowden, 2001	57 - 220
กระสุนตามสิทธิบัตรของ Brian, 1995	31- 310
800°C	49.82
850°C	79.81
900°C	213.81

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าชิ้นวัสดุทดสอบมีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดของกระสุนที่มีใช้ในปัจจุบัน (Brian, 1995) ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด 31 MPa และสูงที่สุด 310 MPa แสดงให้เห็นว่าชิ้นวัสดุทดสอบสามารถนำไปผลิต เป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ และสามารถใช้ในการฝึกและในสนามรบได้จริง และชิ้นงานชิ้นเทอร์ที่ 850°C มีค่าต้านทานแรงกด 79.81 MPa ซึ่งมีค่าที่อยู่ระหว่างค่าตามสิทธิบัตรของ Lowden (2001) ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด 57 MPa และสูงที่สุด 220 MPa ดังนั้นชิ้นงานชิ้นเทอร์ที่ 850°C จึงเหมาะกับการนำไปใช้เป็นกระสุนขนาด 9 มม. ซึ่งจะแสดงการเป็นกระสุนแตกหักได้ขนาด 9 มม. ที่ดี เนื่องจากค่าความต้านทานแรงกดมีค่าไม่เกิน 90 MPa (Benini, 2001)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการวิจัยสามารถผลิตวัสดุ ทองแดง-ดีบุก โดยการอัดขึ้นรูป ความหนาแน่นก่อนเผาควรเป็น 7.5 g/cm^3 และซินเทอร์เพื่อใช้เป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้ พบว่า

5.1.1 ปัจจัยการผลิตวัสดุ ทองแดง-ดีบุก ที่ให้สมบัติต่างๆ สอดคล้องกับสมบัติของวัสดุสำหรับกระสุนแตกหักได้ตามสิทธิบัตรของ Lowden (2001) และ Brian (1995) ประกอบด้วย

1. อัตราส่วนของทองแดงต่อผงดีบุกโดยน้ำหนักควรเป็น 90:10
2. ขนาดของผงโลหะเล็กมีความแข็งแรงกว่าผงโลหะขนาดใหญ่
3. อุณหภูมิซินเทอร์อยู่ในช่วง $800 - 900^\circ\text{C}$ ซึ่งวัสดุทองแดง-ดีบุก จะซินเทอร์ด้วยอุณหภูมิต่างกันจะให้สมบัติต่างกัน สมบัติทางกลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
4. ค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นหัวกระสุนแตกหักได้ชนิดต่างๆกัน

5.1.2 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุทองแดง-ดีบุก ที่ซินเทอร์ที่ 800°C กับหัวกระสุนแตกหักได้ชนิด Longbow 85 Gr, Luger พบว่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนั้นการแตกหักหลังการทดสอบมีลักษณะคล้ายกันจึงคาดหวังว่าวัสดุทองแดง-ดีบุก (90:10) ที่ซินเทอร์ณ อุณหภูมิ 800°C และ 850°C สามารถนำไปผลิตเป็นหัวกระสุนชนิดแตกหักได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในครั้งต่อไป

การศึกษาวิจัยในลำดับต่อไปควรทดสอบการแตกหักของหัวกระสุนทองแดง-คีนุกด้วยเครื่องทดสอบมาตรฐาน เช่น Kolsky bar หรือ Taylor Impact Test จากนั้นศึกษาการออกแบบและกระบวนการผลิตจริง เช่น การออกแบบแม่พิมพ์หัวกระสุน การควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดหลังซินเทอร์ ทั้งนี้เทคโนโลยีโลหะผงวิทยามีส่วนช่วยในการผลิตหัวกระสุนได้เป็นอย่างดีเพราะสามารถออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเป็นหัวกระสุนได้ และหากมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวกระสุนหลังซินเทอร์ได้เป็นอย่างดี ก็จะลดขั้นตอนการปรับขนาด (sizing) ทำให้ความเป็นผลิตภัณฑ์ (Productivity) ของหัวกระสุนมีค่าสูง



บรรณานุกรม

- ภาณุ เวทยานุกุล. ผลของอุณหภูมิขึ้นเทอร์ตอสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากผงเหล็กกล้า
ไร้สนิม 316 L. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ; 2549.
- มนภาส มรกตจินฎา. การผลิตเบร้งเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยวิธีทางโลหะผงวิทยา. กรุงเทพฯ:
ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ; 2549.
- ศรีพงษ์ พรรณแผ้ว. สมบัติของวัสดุผสมระหว่างบรอนซ์ดีบุกกับพัลคัมจากการเตรียมโดย
กระบวนการผลิตโลหะผสมเชิงกล. [วิทยานิพนธ์]. สงขลา:
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2549.
- อรมนี คุ้มฉานชัย. การแทรกซึมและการเผาประสานแบบเฟสของเหลวของผงเหล็กกล้า
ไร้สนิม. [วิทยานิพนธ์]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.
- Abram, John T. Lead-free frangible bullets and process for making same, Delta Frangible
Ammunition LLC. US. Patent 6074454. [Online]. 2006 June13 [cited 2006 Oct 15].
Available from: <http://www.freepatentsonline.com/6074454.html>.
- ASM Aerospace Specification metals Inc. Aluminum 2219-T851. Subcategory: 2000 Series
Aluminum Alloy; Aluminum Alloy; Metal; Nonferrous Metal. [Online]. 2006 [cited
2006 Oct 15]. Available from :
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2219T851>
- Amick, Darryl D. Tungsten-containing articles and manufacturing processes for tungsten-
containing articles. U.S. Patent 7059233; 2006. June 13.
- Benini, Joseph C. Frangible metal bullets, ammunition and method of making such articles. US.
Patent 6090178. [Online]. 2000 Aug 18. [cited 2005 Sept 13]. Available from:
<http://www.freepatentsonline.com/6090178.html>.
- Benini, Joseph C. Frangible Metal Bullets, ammunition and method of making such articles. US.
Patent . 6263798. [Online]. 2001 July 24. [cited 2005 Sept 13]. Available from:
<http://www.freepatentsonline.com/6263798.html>.
- Brian, Mravic. Lead-free bullet. U.S. Patent 5399187. [Online]. 1995 March 21. [cited 2005
Sept 13]. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5399187.html>.

- Callister, William D. Properties of Selected Engineering Materials, Materials Science and Engineering an Introduction. 6nd ed. New York: Wiley; 2002 745-746.
- Candela, N. Study of sinter ability of bronze and phosphorus bronze steels. Materials Chemistry and Physics. 67; 2001. 66-71.
- Collins, John M. Frangible bullet. Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal; 1999.
- Custom Cartridge, Inc. Precision Ultra High Performance Ammunition. SoftShot Frangible ammunition for self-defense. [Online]. 2005 [cited 2006 Oct 12]. Available from: http://www.customcartridge.com/products/product_softshot.php.
- Fritz, V. L. Mechanical Fundamentals of Consolidation. ASM Handbook. Powder Metallurgy. 7th. Materials Park, Ohio: ASTM International; 1984. p. 298-307.
- Gayle, Frank w. Powder metallurgy. [Online]. 2003. [cited 2006 Oct 20]; Available from: www.metallurgy.nist.gov/techactv2003/AnnualReport2003.pdf.
- German, Randall M. Powder Metallurgy Science. Princeton: Metal Powder Industries Federation. 1994.
- Green Mountain Rifle Barrel Co. Cartridge Pistol Caliber Barrels. EBSCO Industries; 2005.
- Ik-Hyun Oh, Naoyuki N, Naoya M and Shuji H. Mechanical properties of porous titanium compacts prepared by powder sintering. Scripta Materialia. 2003; 49 :1197-1202.
- Kato, Hiroataka. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide: Wear. 2003; 255 : 573-578.
- Klar, Erhard. Particle Shape Analysis. ASM Handbook. In: Powder Metallurgy. Materials Park, Ohio: ASM International; 1984 : 233-245.
- Lime, Oliver. In situ micro tomography of metal powder compacts during sintering. Nuclear Instruments and Methods in physics Research. 2003; B 200 : 287-294.
- Lin, Y.C. Mechanism of plastic deformation of powder metallurgy metal matrix composites of Cu-Sn/SiC under compressive stress. In: Material Science and Engineering; 2004 : A373.
- Lowden, Richard A. Non-lead environmentally projectiles and method of making same. US. Patent 5760331. [Online]. 1998 June 2 [cited 2005 Sept 13]. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5760331.html>.

- Lowden, Richard A. Non-lead, environmentally safe projectiles and explosives containers. [Online]. 2001 Jan 16. [cited 2005 Sept 13].
Available from: <http://www.patentstorm.us/patents/6174494-description.html>
- Mikko, Don. US. Army Criminal Investigation Laboratory. Forest Park Georgia.
- Montes, J. M. (2005). Effective area in powder compacts under uniaxial compression. *Materials Science and Engineering*. 2000; A395 : 208-213.
- Montes, J. M. A new expression for the effective pressure on powder under compression. *Computational Materials Science*. 2006; 36 : 329-337.
- Mullins, John F. Frangible Ammunition The New Wave in Firearms Ammunition. Boulder, Colo.:J.F. Mullins; 2001.
- Mullins, John F. Frangible bullet ammunition. Boulder, Colorado: Paladin press.2001
- Newman, Michael E. (2006). NIST Bullet Test Make Frangible More Tangible. [Online]. 2001 [cited 2006 Oct 20]. Available from:
www.nist.gov/publicaffairs/techbech/tb2006_0608.htm.
- Nielsen, William D. Metallurgy of Copper-Base Alloys. Western Reserve Manufacturing Co., [Online]. 2002 [cited 2006 Oct 20]. Available from:
http://www.copper.org/resources/properties/703_5/703_5.html
- NIST/OLES. The Effects of Frangible Ammunition Against Ballistic-Resistant Armor. NIST Bullet Tests Make Frangibles More Tangible. [Online]. 2003 [cited 2006 Oct 20]. Available from: www.nist.gov/publicaffairs/techbech/tb2006_0608.htm.
- Nowacki, Jerzy. Polyphase sintering and properties of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006; 175 : 316-323.
- Rider, Ethan. *Airliners.net Articles: Handguns and Air Marshals*. [Online]. 2003 November 15
Available from: <http://www.airliners.net/articles/read.main?id=64>
- Siddle, David Richard. Ammunition using non-toxic metals and binders. US. Patent 6551375; 2003 April 22.
- Taylor, B. Wang. Impact Test for Ductile Porous Materials. *Internationals Journal of Impact Engineering*. 2003; 28 : 499-511.
- William, G. W. and Pease, Leander F Fundamentals of Powder Metallurgy. Metal Powder Industries Federation; 2002.



ภาคผนวก ก

การหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่น

วัดความหนาแน่นของชิ้นงานโดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาคีมิดีส โดยใช้น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในอากาศเทียบกับน้ำหนักในน้ำ แล้วคำนวณโดยใช้สมการ

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times (\rho_0 - d) + d$$

ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

A = น้ำหนักชิ้นงานในอากาศ (g)

B = น้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (g)

ρ_0 = ความหนาแน่นน้ำ (g/cm^3)

d = ความหนาแน่นอากาศ (0.001 g/cm^3)

ตัวอย่าง ชิ้นวัสดุมีน้ำหนักชิ้นงานในอากาศ 26 g น้ำหนักชิ้นงานในน้ำ 22.5 g มีความหนาแน่นดังนี้

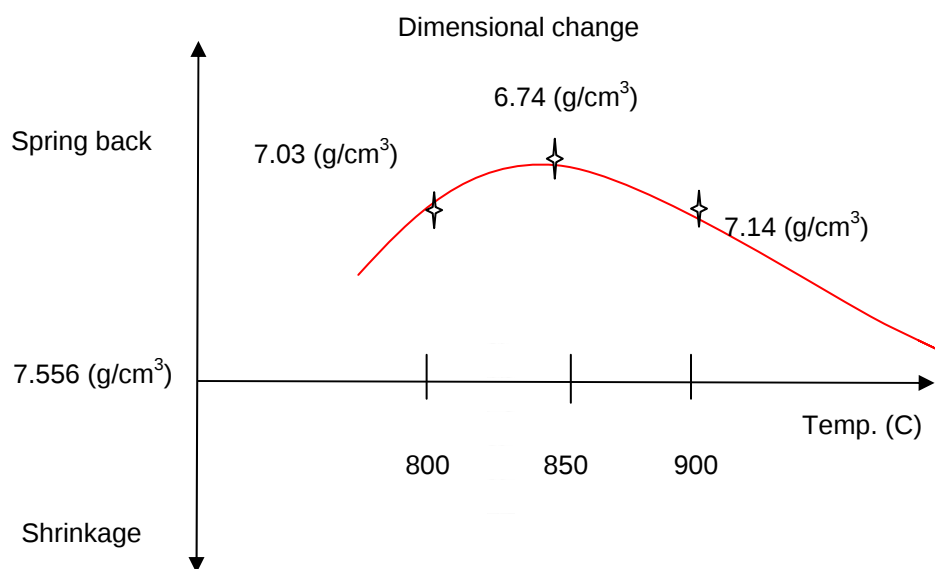
$$\rho = \left(\frac{26.000}{26.000 - 22.500} \right) (1.000 - 0.001) + 0.001$$

$$\rho = \frac{26.000}{3.500}$$

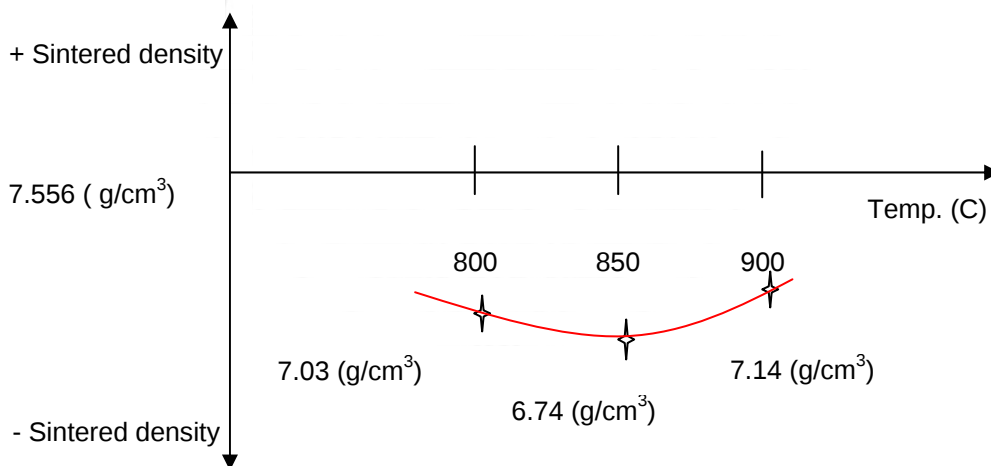
$$\rho = 7.428 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

ตารางที่ 1 ความหนาแน่น

ชิ้นงาน	ความหนาแน่น (g/cm^3)					ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	1	2	3	4	5	
800°C	7.014	7.023	7.033	7.060	7.022	7.030
850°C	6.607	6.548	6.750	6.735	7.053	6.740
900°C	7.205	7.175	7.165	7.187	6.983	7.140



(a) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาด



(b) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น



ภาคผนวก ข

การหาค่าความต้านทานแรงดึง

การหาค่าความต้านทานแรงดึง

ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine การหาค่าความต้านทานแรงดึงหาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = Tensile Strengths (MPa)

F = แรง (N)

A = พื้นที่ (mm²)

ตัวอย่าง การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยใช้แรง 1,000 N ชิ้นวัสดุมีพื้นที่ 36 mm²

$$\sigma = \frac{1,000.00}{36.00} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 27.78 \text{ MPa}$$

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานที่ 800°C	ชิ้นงานที่ 850°C	ชิ้นงานที่ 900°C
(MPa)	(MPa)	(MPa)
24.12	30.84	116.76
20.75	29.08	116.16
25.43	26.38	118.86
22.42	22.42	96.74
25.26	22.72	94.87
ค่าเฉลี่ย 23.60	ค่าเฉลี่ย 26.30	ค่าเฉลี่ย 108.70
ค่าเบี่ยงเบน ± 2.00	ค่าเบี่ยงเบน ± 3.75	ค่าเบี่ยงเบน ± 11.81



ภาคผนวก ค

การหาค่าความต้านทานแรงกด

การหาค่าความต้านทานแรงกด

ค่าความต้านทานแรงกดของชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine การหาค่าความต้านทานแรงกด หาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = Compressive Strength (MPa)

F = แรง (N)

A = พื้นที่ (mm^2)

ตัวอย่าง การทดสอบค่าการต้านทานแรงกด โดยใช้แรง 1,000 N ชิ้นวัสดุมีพื้นที่ 36 mm^2

$$\sigma = \frac{1,000.00}{36.00} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 27.78 \text{ MPa}$$

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงกด

ชิ้นงานที่ 800°C	ชิ้นงานที่ 850°C	ชิ้นงานที่ 900°C
(MPa)	(MPa)	(MPa)
52.20	84.96	219.12
58.20	73.82	245.78
40.76	89.95	182.46
45.01	69.16	215.17
52.97	78.03	207.02
ค่าเฉลี่ย 49.82	ค่าเฉลี่ย 79.81	ค่าเฉลี่ย 213.81
ค่าเบี่ยงเบน ± 6.91	ค่าเบี่ยงเบน ± 8.36	ค่าเบี่ยงเบน ± 22.81



ภาคผนวก ง

การหาค่าความแข็งผิว

การหาค่าความแข็งผิว

ค่าความแข็งผิววัดโดยเครื่องวัดความแข็ง Micro hardness tester รุ่น Model M-400-G3, LECO ค่าความแข็งได้จากการคำนวณรอยกดที่ผิววัสดุดังสมการ

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

HV = Vickers Hardness

P = แรงกด (N)

d = ระยะทแยงมุมของรอยกด (μm)

ตัวอย่าง เช่น ใช้แรงกด 100 N ระยะทแยงมุมรอยกด 50 μm .

$$HV = \frac{1.854 \times 100.00 \text{ N}}{(50.00 \times 10^{-6})^2 \text{ m}^2}$$

$$HV = 74.16 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$HV = 74.16 \text{ GPa}$$

ตารางที่ 5 ค่าความแข็งผิวของชิ้นวัสดุ

ชิ้นงานที่ 800°C	ชิ้นงานที่ 850°C	ชิ้นงานที่ 900°C
(HV)	(HV)	(HV)
62.00	76.30	106.50
63.80	96.40	118.20
60.90	69.00	121.20
51.80	67.30	114.10
59.80	73.10	106.10
71.70	64.20	120.80
47.00	71.10	113.30
82.60	63.50	114.10
50.50	71.90	109.80
53.20	64.20	123.90
45.40	81.40	116.10
45.10	73.10	128.10
41.70	78.10	117.40
49.10	86.70	116.10
42.80	78.10	129.00
47.80	97.10	110.60
55.90	94.00	127.60
50.00	82.60	126.20
48.50	63.70	132.00
58.20	69.90	118.20
ค่าเฉลี่ย 54.40	ค่าเฉลี่ย 76.10	ค่าเฉลี่ย 118.50
ค่าเบี่ยงเบน ± 10.25	ค่าเบี่ยงเบน ± 10.73	ค่าเบี่ยงเบน ± 7.55

ภาคผนวก จ

การหาค่าความทนทานต่อการกระแทก



การหาค่าความทนทานต่อการกระแทก

เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ทดสอบไม่ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ(55 x 10 x 10 mm.) ค่าความทนทานต่อการกระแทกที่ได้จากการวิจัยฉบับนี้จึงเป็นค่าที่วัดในเชิงเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเท่านั้น ค่าความทนทานต่อการกระแทกได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดแบบเพนดูลัม (Pendulum Impact test) ยี่ห้อ Zwick Model 5102 การคำนวณหาค่าความทนทานต่อการกระแทก ดังสมการ

$$E_x = E_1 - E_2 = mgh_1 - mgh_2$$

$$E_x = \text{พลังงานที่หายไป (พลังงานที่ถูกดูดซับ) (J)}$$

$$E_1 = \text{พลังงานที่จุดเริ่มต้น} = mgh_1 \text{ (J)}$$

$$E_2 = \text{พลังงานที่จุดสุดท้าย} = mgh_2 \text{ (J)}$$

$$m = \text{มวลของแท่งกระทบ (kg)}$$

$$g = \text{ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.8 \text{ (ms}^{-2}\text{)}$$

$$h_1 = \text{ความสูงของลูกตุ้มน้ำหนักเริ่มต้น (m)}$$

$$h_2 = \text{ความสูงของลูกตุ้มน้ำหนักสุดท้าย (m)}$$

ตารางที่ 4. ค่าความทนทานต่อการกระแทก

ชิ้นงานที่ 800°C	ชิ้นงานที่ 850°C	ชิ้นงานที่ 900°C
(J)	(J)	(J)
0.013	0.750	3.750
0.125	0.650	3.850
0.125	0.850	3.650
0.135	0.850	3.650
0.135	0.750	3.730
ค่าเฉลี่ย 0.107	ค่าเฉลี่ย 0.770	ค่าเฉลี่ย 3.726
ค่าเบี่ยงเบน ± 0.053	ค่าเบี่ยงเบน ± 0.084	ค่าเบี่ยงเบน ± 0.083

ภาคผนวก ฉ

สมบัติทางกลตัวอย่างของหัวกระสุนแตกหักได้ที่มีใช้ในปัจจุบัน



สมบัติทางกลตัวอย่างของหัวกระสุนแตกหักได้ที่มีใช้ในปัจจุบัน

ตารางที่ 6 สมบัติทางกล จากสิทธิบัตรแห่งสหรัฐอเมริกา หมายเลข 6174494 (Lowden, 2001)

อัตราส่วน (%wt)	แรงดันอัดขึ้นรูป (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความหนาแน่น เทียบกับตะกั่ว (%)	ค่าต้านทาน แรงกด (MPa)
W--Sn 70/30	140	10.17	89.20	70
W--Sn 70/30	210	10.88	95.80	95
W--Sn 70/30	280	11.34	99.90	127
W--Sn 70/30	350	11.49	101.20	137
W--Sn 58/42	140	9.76	85.90	84
W--Sn 58/42	210	10.20	89.80	95
W--Sn 58/42	280	10.49	92.30	106
W--Al II 95/5	140	9.35	82.30	57
W--Al II 95/5	210	10.06	88.60	101
W--Al II 95/5	280	10.62	93.50	157
W--Al II 95/5	350	10.91	96.00	200
W--Zn 60/40	350	10.85	95.50	145
Bi--W 70/30	350	10.88	95.80	Not test
W--Cu 80/20	350	10.99	96.80	220

หมายเหตุ: ค่าต้านทานแรงกดของตะกั่วและตะกั่วผสมดีบุก อยู่ระหว่าง 15 - 70 MPa

ค่าความหนาแน่นของตะกั่วและตะกั่วผสมดีบุก อยู่ระหว่าง 10.70 - 11.36 g/cm³

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	เรืออากาศเอก ศ ศาลา ครัวจตุรัส
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2516
ประวัติการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ โรงเรียนนายเรืออากาศ จ. กรุงเทพฯ พ.ศ. 2541
ประวัติการทำงาน	ผู้บังคับหมวดปฏิบัติการพิเศษต่อต้านการก่อการร้ายที่ 1 กองร้อยปฏิบัติการพิเศษที่ 3 กองพันปฏิบัติการพิเศษที่ 1 กรมปฏิบัติการพิเศษ หน่วยบัญชาการอากาศโยธิน กองบัญชาการยุทธทางอากาศ กองทัพอากาศ