

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ปัจจุบันมีการนำวัสดุพอร์นเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทอุปกรณ์ตัวกรองเพื่อใช้แยกสิ่งเจือปนออกจากกระแสของไหล ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำไส้กรองอาจได้มาจากวัสดุหลายประเภท เช่น เซลลูโลส คาร์บอน โลหะ เซรามิกพอร์น เหล็กกล้าไร้สนิมพอร์น และบรอนซ์พอร์น เป็นต้น ไส้กรองแต่ละประเภทเหมาะสำหรับงานเฉพาะอย่าง แต่ในงานที่ต้องการความแข็งแรง งานที่ใช้กับน้ำมัน และงานที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง รวมถึงราคาจะต้องไม่สูงมากนัก ซึ่งวัสดุพอร์นที่ทำจากโลหะเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่น่าสนใจ บรอนซ์เป็นโลหะที่นิยมทำเป็นตัวกรองมากกว่าโลหะชนิดอื่น เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าและทนต่อการกัดกร่อน เมื่อเปรียบเทียบตัวกรองบรอนซ์พอร์นกับตัวกรองที่ทำจากวัสดุอื่น พบว่าวัสดุประเภทตะแกรงละเอียด (Fine screens) จะแตกหักได้ง่าย ส่วนวัสดุเส้นใยและกระดาษนั้นจะใช้กันในช่วงของอุณหภูมิในตัวกรองบรอนซ์พอร์น (Porous bronze filters) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ถูกนำไปใช้กรองอนุภาคขนาดเล็กได้ประมาณ 1 ไมโครเมตร โดยใช้กับอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซเพื่อกรองอนุภาคที่สกปรกเป็นการป้องกันวาล์ว หัวฉีด และเครื่องมือวัดที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ พอลิเมอร์ กระบวนการทางเคมี และในงานที่อุณหภูมิต่ำเพื่อกรองก๊าซซึ่งอยู่ในสภาพของเหลว (ออกซิเจน ไนโตรเจน และฮีเลียม) โลหะพอร์นยังใช้สำหรับครอบตัวตรวจจับเปลวไฟ (Sensor) ของถังเชื้อเพลิง จากสมบัติในการทนต่อการไหลนั้นบรอนซ์พอร์นจึงถูกใช้ประโยชน์ในการลดแรงดันเป็นระลอกของอุปกรณ์ในช่วงเวลา และใช้เป็นตัวลดเสียง (Silencers) ดังรูปที่ 1.2 และแยกความชื้นออกจากอากาศในระบบนิวเมตริก นอกจากนี้ตัวกรองบรอนซ์พอร์นยังใช้ในยานยนต์สำหรับกรองน้ำมันเชื้อเพลิง ใช้ในระบบไฮดรอลิก และการทำละอองของไหล (Fluidization)



รูปที่ 1.1 ตัวกรองบรอนซ์พรุนที่ใช้ในงานต่างๆ [http://www.cys-pm.com.tw]



รูปที่ 1.2 ตัวลดเสียงในระบบนิวเมตริก [http://www.cys-pm.com.tw]

ประเทศไทยนำเข้าอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ (Pressure-reducing valves) และตัวกรองโลหะพรุนชนิดต่างๆ ในปี พ.ศ. 2546 มีมูลค่าถึง 938,258,326 บาท และมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 นอกจากนั้นแล้วยังมีการใช้ตัวกรองโลหะพรุนในงานอื่นๆ นอกเหนือจากอุปกรณ์ปรับความดันอีกมากมาย อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าเสียดายว่ายังมีการผลิตโลหะพรุนเพื่อใช้ในประเทศหรือเพื่อการส่งออกน้อย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษากรรมวิธีการผลิตโลหะบรอนซ์พรุนจากผงบรอนซ์ขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความพรุน ขนาดของรูพรุน และสมบัติของโลหะพรุนที่ผลิตได้

## ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2543-2548

[<http://www.customs.go.th>]

ปี พ.ศ.	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (บาท)
2543	716	620,235,428
2544	954	902,426,773
2545	1,121	864,296,155
2546	1,131	938,258,326
2547	1,062	895,961,718
2548	1,004	824,813,254

### 1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศในโลหะพูน และความพูนไว้ดังนี้

German (1981) ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและความพูนที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการไหลผ่านโลหะพูนของก๊าซ ในการทดลองข้อมูลที่ใช้ในการทดลองมีสองชุด ซึ่งทั้งสองกรณีใช้ผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ได้จากการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ซึ่งงานตัวอย่างจะถูกควบคุมให้มีความพูนและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 59-715 ไมโครเมตร ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปอยู่ระหว่าง 103-210 เมกะปาสคาล อบผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 1290 และ 1370 องศาเซลเซียส การอบผนึกเป็นเวลานาน และอุณหภูมิสูงจะทำให้ได้โครงสร้างรูพูนที่โค้งมนและเรียบ ซึ่งงานที่ได้มีความหนา 0.2 เซนติเมตร ทำการทดสอบการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้อง ส่วนความดันที่ลดลงจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศความดันที่ใช้ทดสอบ 420 กิโลปาสคาล อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1.4 เซนติเมตรต่อวินาที ผลของการศึกษานี้เป็นการพิสูจน์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการผลิต และลักษณะการไหลผ่านตัวกรองของก๊าซ งานวิจัยที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นปัจจัยด้านโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อค่าคงที่ของวัสดุสองค่าคือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient;  $\alpha$ ) และสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (Inertial coefficient;  $\beta$ ) อย่างไรก็ตามการที่จะผลิตวัสดุให้มีสมบัติการไหลภายในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุนั้นเป็นสิ่งที่ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลผ่านโลหะพูน ซึ่งปัจจัยทั้งสองคือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย ในการศึกษานี้พบว่า

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะแปรผันกับความพรุน 5.3 เท่า สำหรับวัสดุที่อบผนึกระหว่างอุณหภูมิ 1175 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศไฮโดรเจน ดังนั้นตัวบ่งบอกเชิงปริมาณซึ่งอธิบายความพรุนได้มากขึ้นว่ารูปร่างของรูพรุนจะเริ่มโค้งมนมากขึ้น ในทำนองเดียวกันขนาดเดิมของอนุภาคจะเริ่มลดลง ซึ่งมีอิทธิพลต่อรูปร่างของรูพรุนที่เริ่มโค้งมนมากขึ้น สำหรับสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยพบว่าจะแปรผันกับความพรุนถึง 6 เท่า ซึ่งดูเหมือนว่าสัณฐานวิทยาของรูพรุนจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสอง

Choi และคณะ (2004) ศึกษาการเตรียมโลหะตัวกรองความพรุนตัวสูงเพื่อใช้ใน งานด้าน fail-safety ซึ่งชิ้นส่วนตัวกรอง fail-safe เป็นตัวกรองสำรองที่ติดตั้งอยู่ในหน่วยรอกก๊าซร้อน เพื่อดักจับอนุภาคที่รั่วออกมาเมื่อตัวกรองหลักแตกหัก ในการทดลองนี้ใช้วิธีการผลิตตัวกรอง 2 วิธี คือ การอัดขึ้นรูปเย็นทุกทิศทาง (Cold isotropic press, CIP) และวิธีผสมสารยึด (Binding, BD) ในวิธีการอัดขึ้นรูปเย็นทุกทิศทางนั้นผงโลหะจะถูกบรรจุลงในช่องว่างของแม่พิมพ์ ซึ่งทำจากท่อทรงกระบอก 2 ชั้น ท่อด้านในเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนด้านนอกเป็นเทฟลอน เพื่อให้ได้ขนาดความโตภายในของตัวกรองเป็น 0.07 เมตรมันจะถูกอัดในเวลาเท่ากัน คือ 200 วินาที ที่แรงดัน  $1.2 \times 10^8$ ,  $1.5 \times 10^8$ ,  $1.7 \times 10^8$  และ  $2.0 \times 10^8$  ปาสคาล อัดผ่านท่อเทฟลอน ส่วนวิธีการผสมสารยึดนั้นของผสมระหว่างผงโลหะและโลหะสารยึด ถูกกำหนดให้สามารถกำจัดออกได้ในสารละลายน้ำของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ตัวกรองที่ขึ้นรูปมาแล้วจะนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 344 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้แข็งตัวแล้วจึงนำออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่ได้จะนำไปอบผนึกอีกครั้งในเตาสัญญากาศที่อุณหภูมิ 1473-1523 องศาเซลวิน เป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ในห้องเผาไหม้จะเป็นสุญญากาศที่  $2.7 \times 10^{-2}$  ปาสคาล แล้วเติมก๊าซอาร์กอนเข้าไป อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลวินต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวเองสู่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง วัสดุที่ใช้ทำตัวกรองคือ SUS310L ซึ่งมีความทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ผงวัสดุมีรูปร่างแบบกิ่งทรงกลมเป็นหลักที่มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในอัตราส่วนของน้ำหนัก ดังนี้ 19.96Ni, 25.29Cr, 0.85Si, 0.15C, 0.08Mn, 0.06S และ 0.02P ขนาดของผงโลหะจะมีความแตกต่างกัน คือ 53-63, 63-120, 120-180, 250-420, 420-840 และ 540-840 ไมโครเมตร วัสดุสารยึดเป็นผงโลหะทรงกลมมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร เป็นผงโลหะที่มีนิกเกิลเป็นเนื้อหลัก ชิ้นงานที่ได้จะนำไปวัดค่าความดันลดลงเมื่ออัดอากาศผ่านตัวกรอง จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนขนาดผงวัสดุเป็นวิธีการที่ได้ผลที่สุดเมื่อต้องการควบคุมขนาดรูพรุนของตัวกรอง ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความดันเป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดของผงโลหะที่ใช้ทำตัวกรอง และผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการซึมผ่าน (Permeability) และขนาดของรูพรุน (Pore size) ในตัวกรองจะเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดของผงวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามการ

เพิ่มขนาดของผงโลหะก็มีขีดจำกัดเช่นกัน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของอนุภาคนั้นจะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคที่ลดลง จึงส่งผลให้ตัวกรองแตกหัก ในการทดลองนี้ใช้ผงโตสุด 420-840 ไมโครเมตร จึงพอสรุปได้ว่าในการผลิตโลหะตัวกรองที่มีความสามารถในการซึมผ่านสูง ด้วยการอบผนึกนั้น ปัจจัยของการผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่ ขนาดอนุภาคผง แรงดันของการทำ CIP อุณหภูมิและเวลาในการอบผนึก ความสามารถในการซึมผ่านของตัวกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มขนาดของผงโลหะ หรือการลดแรงดันของการทำ CIP อุณหภูมิจะมีผลกระทบอย่างมากในการอบผนึกตัวกรองที่ผลิตได้โดยการทำ CIP ที่แรงดันสูง เนื่องจาก synergy ของอุณหภูมิและแรงอัดตัวกรองที่หนา 2 มิลลิเมตร จะมีค่าความสามารถในการซึมผ่านเป็น  $9.2 \times 10^{-11}$  ตารางเมตร เมื่อทำด้วยวิธี CIP ที่มีแรงดัน  $1.7 \times 10^8$  ปาสคาล และอุณหภูมิอบผนึก 1473 องศาเซลวิน ใช้ผงขนาด 420-840 ไมโครเมตร ความแข็งแรงวงแหวน (O-ring strength) ของตัวกรองนี้เท่ากับ  $1.78 \times 10^6$  ปาสคาล ส่วนตัวกรองที่เตรียมด้วยวิธีผสมสารยึด โดยใช้ผงโลหะขนาด 540-840 ไมโครเมตร จะมีความสามารถในการซึมผ่านสูงถึง  $2.76 \times 10^{-10}$  ตารางเมตร

การอบผนึกชิ้นงานในวิธีการแบบเทกอง หรือ loose powder นั้นได้มีการศึกษากลไกของการอบผนึกแบบนี้ไว้ดังนี้

Gokhale และคณะ (1987) ได้ทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเติบโตคอคอดระหว่างการ อบผนึกแบบเทกองของผงเหล็กทรงกลม ในการทดลองใช้ผงเหล็กทรงกลมขนาด 62-74 ไมโครเมตร เทลงในแม่พิมพ์กราไฟต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.2 มิลลิเมตร และสูง 14 มิลลิเมตร ชิ้นงานถูกอบผนึกในเตาแบบท่อ การอบผนึกแบบอุณหภูมิคงที่จะทำที่เวลาต่างๆ เริ่มจาก 0-34 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิ 950 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไฮโดรเจนแห้ง ส่วนบรรยากาศอาร์กอนจะทดลองที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เท่านั้น ชิ้นตัวอย่างจะถูกแช่ด้วยอีพ็อกซีเรซินแล้วนำไปตัดและจัดดูโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองทำให้ทราบว่าขนาดของคอคอด (Neck size) และจำนวนของการสัมผัสระหว่างอนุภาคต่อปริมาตรจะคำนวณได้จากข้อมูลทาง Stereological โมเดลสำหรับการอบผนึกที่ควบคุมการแพร่ที่ผิวจะบอกถึงขนาดของคอคอดซึ่งจะมีค่าสูงกว่าค่าจากการสังเกต ดังนั้นจึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ในระบบนี้ได้ จำนวนของการสัมผัสระหว่างอนุภาคต่อปริมาตร และจำนวนของการสัมผัสระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคไม่มีความไวต่อเวลาหรืออุณหภูมิของการอบผนึก พารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นพื้นฐาน โดยตั้งแต่เริ่มแรกของการเทกองอนุภาคผง ส่วนการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศในการอบผนึกจากไฮโดรเจนแห้งไปเป็นอาร์กอนนั้น ไม่ส่งผลสำคัญต่อจลนพลศาสตร์ของการเติบโตคอคอด

Lin และคณะ (1999) ศึกษาการแน่นตัวและการรักษารูปทรงในการอบผนึกในช่วงเฟสของเหลว (Supersolidus liquid phase sintering, SLPS) ในการทดลองนี้ใช้ผงบรอนซ์ที่

เตรียมจากการอะตอมไมเซชัน 90Cu-10Sn เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิ (DTA) ทำให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิเริ่มแข็งตัว และเริ่มหลอม คือ 851 และ 1015 องศาเซลเซียส ชิ้นงานถูกเตรียมด้วยวิธี “Loose powder” โดยการเทผงโลหะลงในเบ้าทรงกระบอก และเคาะ (20 ครั้ง) เพื่อให้ได้รูปแบบการบรรจุเป็นแบบเดียวกัน จากนั้นผงโลหะจะถูกนำไปอบ presintered ในหม้อถลุง (Retorts) โดยใช้ไฮโดรเจน 100% เป็นบรรยากาศควบคุม อัตราให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และแช่ไว้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบผนึกต่อจนถึงอุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส แช่ไว้ 60 นาที ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรง และความหนาแน่น 57.9% ของทางทฤษฎี มีการถ่ายภาพวิดีโอไว้เพื่อเฝ้าติดตาม การแน่นตัว และการยุบตัวระหว่างการอบผนึก โดยชิ้นงานที่อบ presintering แล้วจะถูกอบผนึกอีกครั้งในเตาเผาแนวนอน (Horizontal furnace) ในบรรยากาศของอาร์กอน 100% ทำให้อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที และเผาแช่ไว้ 30 นาที ใช้อาร์กอนเพื่อหลีกเลี่ยงฟองอากาศที่เกิดจากไฮโดรเจน เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าช่วงการแข็งตัว ชิ้นงานที่อบผนึกแล้วจะถูกวัดความหนาแน่น และรูปร่าง การยุบตัวซึ่งหาได้จากสมการที่ 1.1

$$\text{Slumping parameter} = (D_{\text{bottom}} - D_{\text{top}}) / D_{\text{top}} \quad (1.1)$$

เมื่อ  $D_{\text{bottom}}$  และ  $D_{\text{top}}$  เป็นขนาดความโตของชิ้นงานที่ 0.25H และ 0.89H และ H คือความสูงของชิ้นตัวอย่าง ขนาดความโตวัดด้วยเครื่อง coordinate measuring machine (CMM) นอกจากนี้ชิ้นตัวอย่างจะถูกจุ่มหุบในน้ำเพื่อหยุดโครงสร้างจุลภาค ที่ตำแหน่งการอบผนึกต่างๆ กัน สัดส่วนปริมาณของแข็ง ขนาดเกรน และขอบเกรน ดูได้จากของเหลว (Contiguity) เมื่อวัดโครงสร้างจุลภาคที่ถูกจุ่มหุบ โดยใช้เทคนิคสเตอริโอโลจิคอล (Stereological) เพื่อคำนวณหาค่าซอฟต์แวร์หนึ่งทางโครงสร้างจุลภาค ( $\zeta$ ) ที่สภาพการอบผนึกที่ต่างกัน จากผลการทดลองค่าความหนาแน่น และการยุบตัวของชิ้นส่วนบรอนซ์ที่อบผนึกเป็นเวลา 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงโดยปราศจากการยุบตัวอยู่ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการบิดเบี้ยวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ภาพวิดีโอของชิ้นงานที่อบในเตาเผาในบรรยากาศอาร์กอน ที่มีอัตราให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที การหดตัวของชิ้นงานจะเริ่มเห็นได้ที่อุณหภูมิ 890 และ 900 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะเริ่มเสียรูปที่อุณหภูมิประมาณ 930 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มหุบจากอุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส (ไม่มีการแช่) ของเหลวจะมีเกรนโค้งมน สัดส่วนปริมาณของเหลวของบรอนซ์วัดด้วย metallography ของเหลวทั้งหมดจะจับตัวเป็นขอบเกรน นอกจากนี้สัดส่วนปริมาณของเหลวของบรอนซ์สามารถประมาณค่าได้โดยใช้แผนภาพสมดุล และการวิเคราะห์

ด้วยเครื่อง DTA เมื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดทั้งสามนั้นค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิแข็งตัว นั้นของเหลวจะก่อตัวเป็นไปตามกฎของคาน อุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้สัดส่วนของเหลวเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงจะเกิดการเพิ่มขึ้นของเกรนและจะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่ซอฟต์แวร์นึ่ง ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามเวลาและอุณหภูมิ การเสีรูปจะนำไปสู่การแน่นตัวและการบิดเบี้ยว การแน่นตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในการอบผนึกเนื่องจากมีความเค้นในการอบผนึกสูง ในช่วงนี้การบิดเบี้ยวจะไม่เกิดเนื่องจากมีแรงขับต่ำ การบิดเบี้ยวของรูปร่างเกิดจากค่าพารามิเตอร์ซอฟต์แวร์นึ่ง ( $\zeta$ ) ค่าหนึ่งเพิ่มขึ้น การแน่นตัวในการอบผนึกในช่วงเฟสของเหลวมาจากสามส่วนที่สำคัญ คือ ชิ้นงานจะเริ่มหดตัวจากความร้อนในการอบช่วงของแข็ง การแน่นตัวจะเร่งขึ้นโดยการไหลแบบหนืดของของเหลว และสุดท้ายความหนาแน่นเต็มเกิดขึ้นโดย Solution-precipitation ที่อุณหภูมิอบผนึกสูง การแน่นตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยการจัดเรียงใหม่ของอนุภาค และการไหลของของไหล ที่อุณหภูมิต่ำการไหลแบบหนืดจะไม่ทำให้เกิดความหนาแน่นเต็ม ที่อุณหภูมิปานกลางการแน่นตัวแบบเต็มจะเกิดขึ้นโดยการจับยึดกันที่เพิ่มขึ้น ถ้า  $\zeta$  มีค่าน้อยกว่า  $\zeta_{\text{distort}}$  ที่อุณหภูมิใดจะทำให้ชิ้นงานเสีรูปไป

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานโลหะพูนนั้น ได้มีการทำวิจัยและศึกษาการรับแรงของชิ้นงานในลักษณะต่างๆ เช่น แรงอัด แรงคด ไว้ดังนี้

Moshksar (1993) ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกลของวัสดุพูนทางด้านโลหะกรรมวัสดุผง โดยนำผงบรอนซ์ 90Cu-10Sn รูปร่างไม่แน่นอนมาอัดขึ้นรูปโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ได้ชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร ความหนาแน่นปรากฏ 3.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นำชิ้นส่วนไปอบผนึกในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ประมาณ 4-5 นาที จากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบแรงอัดแบบเพิ่มแรงขึ้นและแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมต่อระหว่างรูพูนจะเกิดขึ้นในขั้นที่สองของการอบผนึก ซึ่งเป็นช่วงเติบโตของคอคอด (Neck growth) และชิ้นส่วนบรอนซ์พูนที่ถูกอบผนึกด้วยสภาวะเดียวกันนี้ อัตราของเวอร์คฮาร์ดเดนนิงและจุดครากเริ่มแรกจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มของความหนาแน่นของวัสดุ และในผงบรอนซ์ 90Cu-10Sn ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio)  $\nu = 0.5R^{1.94}$

Wang และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมวิสโคพลาสติกของโลหะพูน โดยดูผลกระทบจากความพูนต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้แรงกระทำที่อัตราความเครียดต่างๆ โดยใช้วัสดุเพื่อการทดลองสองชนิด ชนิดแรกคือบรอนซ์ที่มีดีบุกผสมอยู่ 10% และชนิดที่สองคือเหล็กบริสุทธิ์ วัสดุทั้งสองชนิดผลิตด้วยเทคโนโลยีโลหะกรรมวัสดุผงที่มีช่วงความพูนตั้งแต่ 10-40% โดยใช้การทดสอบแรงอัดในแนวแกนเดียวซึ่งกระทำที่อุณหภูมิห้อง และ

การทดสอบจะทำซ้ำกับทุกตัวอย่างที่ความพูนแตกต่างกันภายใต้อัตราการเพิ่มความเครียด (Strain rate) ที่ต่างกันสามระดับคือ  $8.33 \times 10^{-4}$ ,  $8.33 \times 10^{-2}$  และ  $11.0-18.5 \text{ s}^{-1}$  การตรวจสอบคุณลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างที่เสียรูปแล้วนี้ จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด ผลการทดลองทำให้ทราบว่าพฤติกรรมของวัสดุแสดงรูปแบบที่เหมือนกันเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำแบบ Quasi-static ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบ ไบลิเนียร์ (Bilinear) โดยประมาณ อิทธิพลของความพูนบนพฤติกรรมของวัสดุสามารถจะแสดงให้เห็นได้ชัดเจนเมื่อพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างความพูนและความเค้นคราก ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นการลดลงเชิงเส้นของความเค้นครากเมื่อความพูนเพิ่มขึ้น

Wang และ Shu (2002) ได้ทำการทดลองหาสมบัติวิสโคอีลาสติกของโลหะพูน โดยทำการศึกษาโลหะ 2 ชนิด คือ เหล็ก และบรอนซ์ผสมดีบุก 10% ตัวอย่างถูกเตรียมจากผงโลหะและขึ้นรูปในแม่พิมพ์ทรงกระบอกที่ความดันแตกต่างกันภายหลังจากการอบผนึกชิ้นงานจะมีความโต 25 มิลลิเมตร และสูง 40 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์มี 4 ชนิด คือ A-เหล็กที่มีความพูน 11% เขียนแทนด้วย Iron 11%, B-บรอนซ์ความพูน 22% หรือ Bronze 22%, C-Iron 33% และ D-Bronze 39% ความสัมพันธ์ของความหนาแน่น หรือความพูนของวัสดุ วัดได้จากการแทนที่ด้วยน้ำ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคดูได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูพูนส่วนใหญ่ค่อนข้างโค้งมนหรือใกล้เคียงทรงกลม และรูพูนโตเฉลี่ย 100-200 ไมโครเมตร ขั้นตอนของการทดลองขั้นทดสอบจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ dynamic mechanical analyzer (DMA) เครื่องมือนี้สามารถทดสอบได้หลากหลาย แต่ในที่นี้ใช้ทดสอบแรงคดแบบสามจุด (Three-point bending) ชิ้นตัวอย่างจะถูกทำเป็นแผ่นบางขนาด  $10 \times 5 \times 1$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร จากผลการทดลองสำหรับตัวอย่างบรอนซ์ กำหนดค่าแรงสถิตอยู่ที่ 650 นิวตันเมตร และแรงพลวัตเป็น 620 นิวตันเมตร ทำการทดสอบแรงอัดแบบวัฏจักรในช่วงของอีลาสติก ค่า Storage modulus ของบรอนซ์ที่อุณหภูมิปกติจะพบอยู่ในช่วง 10-20 จิกะปาสกาล เครื่องสแกนอุณหภูมิพบว่ามีการเพิ่มอัตราความร้อนถึง 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และในระหว่างที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นค่า storage modulus จะลดลง อุณหภูมิประมาณ 130-160 องศาเซลเซียส ค่า storage modulus จะเปลี่ยนแปลงอีกที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ค่า storage modulus จะหายไปประมาณครึ่งหนึ่งจากค่าเริ่มต้น สำหรับค่า tangent delta ของตัวอย่าง จะแสดงค่าสูงสุดที่ 130-160 องศาเซลเซียส ซึ่งค่านี้เป็นค่า loss peak ส่วนตัวอย่างเหล็กจะทดลองที่ค่าแรงสถิตและแรงพลวัตที่ 700 และ 670 นิวตันเมตร ช่วงอุณหภูมิจะคล้ายกับตัวอย่างบรอนซ์ คือ เริ่มจาก 30 ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าช่วง loss peak อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ คือ 35-65 องศาเซลเซียส การทดลองนี้สรุปได้ว่าการทดสอบแรงคดสามจุดแบบวัฏจักร กระทำภายใต้โหมดสแกนอุณหภูมิตัวอย่างเหล็ก และ



บรอนซ์ ที่ความพรุนต่างกัน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความถี่ของแรงกระทำ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของโลหะเหล่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นจาก storage modulus, tangent delta และ loss peak ค่าตัวแปรเหล่านี้แสดงให้เห็นความสามารถในการเก็บ และกระจายพลังงาน ของวัสดุภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตในช่วงอีลาสติก การทดสอบแสดงรูปแบบบางอย่างของวัสดุออกมา ซึ่งยังไม่มากพอที่จะให้ผลในเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตามสามารถสรุปผลในเบื้องต้นดังนี้

- ก. สมบัติวัสดุจะมีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่าความถี่
  - ข. โดยทั่วไปค่าที่สูงกว่าคือ อุณหภูมิ ส่วน storage modulus จะมีค่าต่ำกว่า
  - ค. ค่า tangent delta ปกติจะมีมากในช่วง peak ที่อุณหภูมิเฉพาะ แสดงให้เห็นว่าเก็บกักอุณหภูมิได้ดีที่อุณหภูมินั้น
  - ง. ค่า storage modulus จะมีความเสถียรที่ค่าสูงๆ ในช่วงความถี่สูง ซึ่งมันจะแสดง peak ออกมาในช่วงความถี่เฉพาะ
  - จ. ค่า tangent delta จะมีค่าสูงในช่วงความถี่สูง ๆ และ peak จะมีค่าสูงที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิร์ตซ์ และจะลดลงอย่างช้าๆ
  - ฉ. ชิ้นงานที่มีความพรุนสูง จะทำให้ storage modulus ต่ำพอๆ กับ tangent delta
- ในการทดลองไม่มีการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นจึงไม่มีการอธิบายว่าทำไมวัสดุจึงมีการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกัน ไม่มีความชัดเจนว่าแรงกระทำพลวัตแบบวัฏจักรจะเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงทางสัญญาณวิทยา ในทำนองเดียวกันอิทธิพลของความถี่ควรจะทดสอบในช่วงที่กว้างพอ

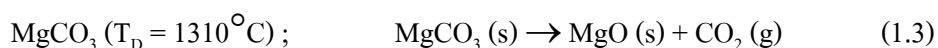
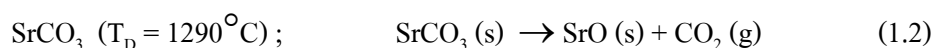
นอกจากนี้แล้วได้มีการศึกษาและวิจัยทางการประยุกต์ใช้งานจริงของโลหะพรุน และการศึกษาผลิตโลหะพรุนในวิธีการอื่นๆ อีกดังนี้

Heikkinen และ Harley (2000) ได้พิสูจน์การทดลองตัวกรองโลหะพรุนที่ผ่านกาครอบผนึก การศึกษานี้เป็นการหาความเป็นไปได้ของการใช้ตัวกรองโลหะพรุน เพื่อเป็นทางเลือกใหม่แทนการใช้ตัวกรองแบบตาข่ายโลหะ และนิวเคลียสโพอร์ (Nucleopore) ซึ่งใช้กักเก็บอนุภาคในแบตเตอรี่ ตัวกรองโลหะพรุนที่นำมาใช้ในการทดลองทำมาจากผงเหล็กกล้าไร้สนิม (316SS) รูปทรงกลม ที่มีขนาดเท่าๆ กัน นำมาอัดขึ้นรูปและอบผนึก ชิ้นงานจะมีความหนาและขนาดเท่าๆ กัน จะแปรผันในขนาดของรูพรุนระหว่าง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดรูพรุนและรูปแบบถูกกำหนดมาแล้วจากผู้ผลิต ในการศึกษาชิ้นงานรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดของตัวกรองซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากขนาดรูพรุนไม่เป็นตัวบ่งบอกของขนาดอนุภาคที่ไหลผ่านตัวกรอง ตัวกรองที่ใช้ในการทดลองทุกตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ในการทดลองจะเป็นการหาค่าสมบัติของ

ชิ้นงานคือ การหาสัดส่วนปริมาณของแข็งของตัวกรอง (Solid volume fraction) หาได้จากอัตราส่วนของมวลตัวกรองที่วัดได้ต่อมวลของแข็งทรงกระบอกขนาดเท่ากับวัสดุตัวกรอง การซึมผ่านของอนุภาคที่ไหลผ่านตัวกรองวัดได้จากตัวกรองหนา 1.57 มิลลิเมตร (0.062 นิ้ว) มีขนาดรูพรุน 100, 40, 20, 10, 5 และ 2 ไมโครเมตร และตัวกรองหนา 0.99 มิลลิเมตร (0.039 นิ้ว) ขนาดรูพรุน 20 และ 15 ไมโครเมตร การวัดค่าจะทำให้สามอัตราการไหล คือ 2.4, 1.2 และ 0.6 ลิตรต่อนาทีและความเร็วค่าน้ำเป็น 12.1, 6.1 และ 3.0 เซนติเมตรต่อวินาที ค่าสุดท้ายที่หาคือ ความจุการกรอง (Filters loading) เพื่อหาว่าตัวกรองจะมีอายุการใช้งานได้นานเท่าไรเมื่อมีฝุ่นเกาะติดมากขึ้น โดยชิ้นตัวอย่างจะทำการทดสอบในห้องทดลองและห้องพักอาศัย ชิ้นตัวอย่างที่ใช้มีความหนา 1.57 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 100, 40, 20, 10 ไมโครเมตร และขนาดความหนา 0.99 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 15 ไมโครเมตร ตัวอย่างทั้งหมดทดสอบที่อัตราการไหล 2.4 ลิตรต่อนาที (12.1 เซนติเมตรต่อวินาที) ชิ้นตัวอย่างวางสูงจากพื้น 80 เซนติเมตร ใช้เวลาในการทดลอง 1-2 เดือน ส่วนตัวกรองอีกหนึ่งตัวมีความหนา 0.99 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 20 ไมโครเมตร ทำการทดลอง 7 เดือน ในห้องทดลองด้วยอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ปริมาณฝุ่นทั้งหมดในห้องทดลองและห้องพักจะถูกวัดจากตัวกรองใยแก้วขนาด 37 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 2-4 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1-3 เดือน ผลการทดลองพบว่าคุณลักษณะการซึมผ่าน และสัดส่วนปริมาณของแข็งของตัวกรองเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดรูพรุน 100 ถึง 2 ไมโครเมตร ที่ใช้ในการทดลองข้อมูลการซึมผ่านนำไปใช้กราฟ non-linear regression ด้วยสมการอย่างง่าย การซึมผ่านของอนุภาคจะลดลงเมื่อขนาดรูพรุนลดลงในขณะที่ความหนาเท่ากัน หรือขนาดรูพรุนเท่าเดิมแต่เพิ่มความหนาให้กับตัวกรอง ผลของการกักเก็บเมื่อเทียบระหว่างรูใหญ่กับรูเล็ก รูใหญ่เก็บอนุภาคได้ 20-30% ซึ่งน้อยกว่ารูเล็ก ตัวกรองโลหะพรุนแสดงให้เห็นว่ามันเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับใช้เพื่อกรองขนาดอนุภาค เพราะมันสามารถทำความสะอาดและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่เนื่องจากมันทำมาจากโลหะจึงส่งผลกระทบต่อไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นข้อด้อยเมื่อเทียบกับตัวกรองแมมเบรน แต่ก็เลี้ยงได้โดยมันสามารถใช้เป็นตัวกรองเบื้องต้นในแบตเตอรี่ หรือเป็นตัวกรองสำรอง ความจุของตัวกรองที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะค่อนข้างมีปัญหาเมื่อใช้ไปในระยะเวลาต่างๆ การลดลงของความดันจะมีมากขึ้นในระหว่างการทดสอบ ซึ่งเป็นดั่งบ่งชี้ที่ดีของภาวะความจุ และสามารถใช้เป็นตัวกำหนดในการเปลี่ยนตัวกรอง หรือจบการทดสอบ นอกจากนี้ค่าความดันที่ลดลงยังสามารถใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของวิธีทำความสะอาดตัวกรองได้อีกด้วย

Park และ Nutt (2000) ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเหล็กกล้าพรุน ที่ใช้วิธีทางโลหะกรรมวัสดุผง โดยการศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการในการผลิตเหล็กกล้าพรุน Fe-2.5%C ผสมเข้ากับเกลือของสารที่ทำให้เกิดลักษณะโฟมจำนวน 0.2% โดยน้ำหนักของ strontium

carbonate ( $\text{SrCO}_3$ ) หรือ magnesium carbonate ( $\text{MgCO}_3$ ) ในเครื่องผสมแห้ง (Dry twin-shell) เป็นเวลา 75 นาที ผงที่ผสมแล้ว จะนำมาอัดขึ้นรูป ทิศทางเดียวด้วยแรงอัดขนาดต่างๆ ดังนี้ 276, 414, 552 และ 827 เมกะปาสคาล หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้ไปอบพ่นที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการขยายตัวของโฟม ด้วยอัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่ออนาที และเผาแซ่ไว้เป็นเวลา 5 นาที เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิแตกตัว ( $T_D$ ) ซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิแข็งตัวและหลอมเหลว (เหล็กจะอยู่ระหว่าง 1250-1350 องศาเซลเซียส) สารที่ทำให้เกิดลักษณะโฟมทั้งสองจะเกิดการแตกตัว เป็นดังนี้



การทำในลักษณะนี้ทำให้ได้เหล็กกล้าที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ในช่วง 0.38 ถึง 0.64 การทดสอบแรงอัดกระทำต่อวัสดุพูนทั้งที่ผ่านการอบอ่อนและไม่ได้อบอ่อนที่ความหนาแน่นระดับต่างๆ ทั้งนี้เพื่อจะศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลและการดูดซับพลังงาน ผลที่ได้สรุปว่าการอบอ่อนนั้นจะมีผลกระทบสูง เนื่องจากไปลดปริมาณคาร์บอนและเปลี่ยนโครงสร้างของเพอร์ไลต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ การเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคนี้ทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

### 1.3 ทฤษฎีและหลักการ

ชิ้นงานโลหะพูนทำได้จากผงโลหะหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่โดยทั่วไปผงโลหะที่ใช้มากที่สุดได้แก่ บรอนซ์ เหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล นิกเกิลอัลลอย ไทเทเนียม และอะลูมิเนียม ส่วนโลหะที่ใช้กันน้อยได้แก่ โลหะทนไฟ (ทั้งสแตน โมลิบดีนัม แทนทาลัม) และโลหะมีค่า (เงิน ทอง ทองคำขาว)

ในการผลิตตัวกรองจากโลหะนอกกลุ่มเหล็กส่วนใหญ่ จะใช้ผงวัสดุทรงกลมที่ได้จากการอะตอมไมเซชัน (Atomization) ซึ่งบรอนซ์เป็นวัสดุที่นิยมใช้ทำตัวกรอง ชนิดของผงบรอนซ์ที่ใช้ประกอบด้วย 90-92%Cu และ 8-10%Sn ตัวกรองที่ทำจากบรอนซ์นี้มีความหนาแน่น 5.0-5.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การที่ตัวกรองจะมีความสามารถในการซึมผ่านได้มากนั้นต้องทำให้มีขนาดรูพูนที่โตมาก ดังนั้นการเลือกใช้น้ำขนาดอนุภาคก็มีความจำเป็นเช่นกัน

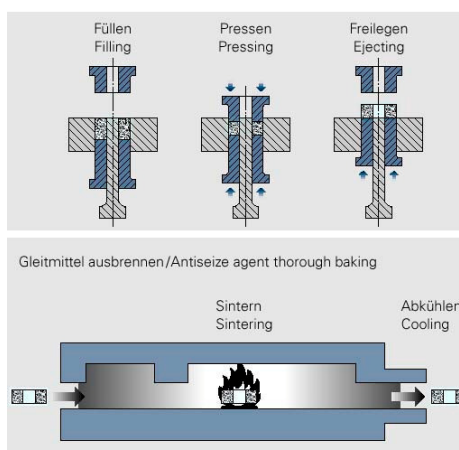
การควบคุมขนาดอนุภาคของผงวัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวกรองจะทำให้ได้ขนาดความพูนที่ต้องการ ซึ่งขนาดของความพูนที่ได้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 5-125 ไมโครเมตร ตัว

กรองที่ทำจากผงบรอนซ์มีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) อยู่ในช่วง 20-140 เมกะปาสกาล (3-20 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีความเหนียว (Ductility) สูงถึง 20% อีลองเกชัน (Elongation)

### 1.3.1 วิธีการผลิตโลหะพูนทางด้านโลหะกรรมวัสดุผง

วิธีการผลิตโลหะพูนทางด้านโลหะกรรมวัสดุผงนั้น สามารถจะจำแนกวิธีการผลิตที่นิยมทำกันได้ดังต่อไปนี้

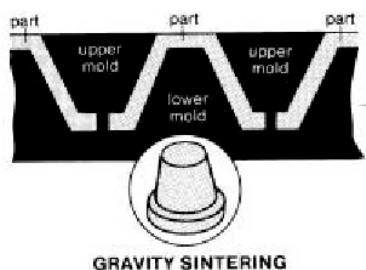
**1.3.1.1 การอัดขึ้นรูปและการอบผนึก (Compacting and sintering) (ดังรูปที่ 1.3)** วิธีนี้ผงโลหะจะถูกอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ โดยให้ความดันที่ทำให้ผงอนุภาคเกาะยึดกันที่จุดสัมผัสมีความแข็งแรงเพียงพอ ดังนั้นชิ้นงานสามารถที่จะหยิบจับได้ภายหลังจากที่ออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานดิบที่ได้นี้จะถูกเรียกว่า “Green” เนื่องจากยังไม่ผ่านการอบผนึก ความแข็งแรงของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผงโลหะนั้นๆ เช่นการผสม ขนาดอนุภาค รูปร่าง ความบริสุทธิ์ และการอัดขึ้นรูป ภายหลังจากขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปให้ความร้อนหรือถูกอบผนึกในบรรยากาศควบคุมที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมของโลหะ ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคมีพันธะการจับยึดเกิดขึ้น ดังนั้นชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น วิธีการนี้ถูกประยุกต์สำหรับผลิตชิ้นงานจากบรอนซ์ ข้อดีของวิธีการนี้คือ อัตราการผลิตสูงควบคุมความสามารถในการซึมผ่านได้ดี และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดที่ถูกต้อง



รูปที่ 1.3 การอัดขึ้นรูปและการอบผนึก [http://www.gkn-filters.com]

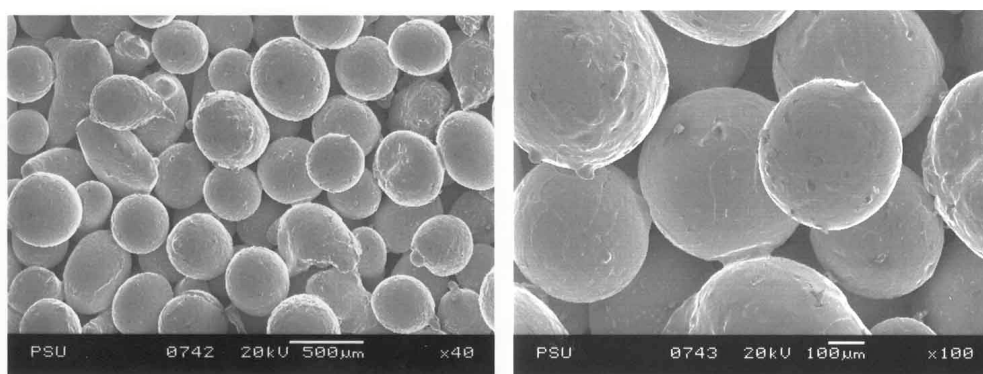
**1.3.1.2 การอบผนึกแบบกราวิตี (Gravity sintering) หรือ “Loose powder” (รูปที่ 1.4)** การอบผนึกใช้ทำชิ้นงานโลหะพูนจากผง เกิดจากกระจายพันธะจับยึดอย่างง่าย ชิ้นงาน

ที่ผลิตส่วนมากทำจากบรอนซ์ ขั้นตอนแรกในการผลิตบรอนซ์ตัวกรอง คือเติมผงบรอนซ์ทรงกลมเข้าไปในแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ถูกทำให้เรียบและสันสะท้อน ผงที่ใช้ในการทดลองได้จากการทำอะตอมไมเซชันของเหลว 90%Cu และ 10%Sn



รูปที่ 1.4 การอบผนึกแบบกราวิตี้ [<http://www.mpif.org>]

แม่พิมพ์ที่นิยมใช้ทำมาจากกราฟไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งรูปร่างของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับตัวกรองที่จะนำไปอบผนึก ผงโลหะจะถูกเติมลงไปแม่พิมพ์จนเต็มและนำไปอบผนึกที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เส้นแข็งตัว (Solidus temperature) ของวัสดุผสมนั้นใช้เวลาประมาณ 30 นาที โดยมีการควบคุมบรรยากาศภายใน ช่วงความพรุนที่ได้จะอยู่ระหว่าง 40-50% ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับทำตัวกรอง เนื่องจากพันธะการจับยึดที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคผงทรงกลม (รูปที่ 1.5)



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของบรอนซ์พูน

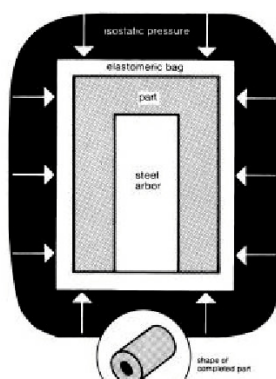
เมื่อพิจารณาการอบผนึกแบบกราวิตี้ของชิ้นงาน วิศวกรจะออกแบบโดยคำนึงถึงรูปร่างชิ้นงานขั้นสุดท้ายที่เสร็จสมบูรณ์อยู่ภายในแม่พิมพ์ และมีรูทางเข้าด้านบนเพื่อใช้เติมผงให้เต็มช่องว่าง รูปร่างที่ขึ้นรูปแล้วนั้นสามารถที่จะเอาออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายหลังการอบผนึก โดย

ออกแบบให้มีมุมเอียง 1 องศา ที่ด้านข้างของชิ้นงานสำหรับนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งแปรผันกับความลึกและเกรดวัสดุ ตัวอย่างสมบัติของวัสดุตัวกรองจากผงบรอนซ์แสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 สมบัติของวัสดุตัวกรอง 4 เกรด ผลิตแบบ loose powder โดยการอบผนึกผงบรอนซ์รูปทรงกลม [ASM, 1990]

Particle size of spherical powder particles		Tensile strength		Recommended minimum filter thickness		Largest dimensions of particles retained, $\mu\text{m}$	Viscous permeability coefficient, $\text{m}^2$
Mesh Range	Range in $\mu\text{m}$	MPa	ksi	mm	in		
20-30	850-600	20-22	2.9-3.2	3.2	0.125	50-250	$2.5 \times 10^{-4}$
30-40	600-425	25-28	3.6-4.1	2.4	0.095	25-50	$1 \times 10^{-4}$
40-60	425-250	33-35	4.8-5.1	1.6	0.063	12-25	$2.7 \times 10^{-5}$
80-120	180-125	33-35	4.8-5.1	1.6	0.063	2.5-12	$9 \times 10^{-6}$

**1.3.1.3 การอัดขึ้นรูปทุกทิศทาง (Isostatic compaction)** กระบวนการนี้จะใช้แรงดันที่สม่ำเสมออัดแม่พิมพ์ซึ่งเป็นวัสดุที่ให้ตัวได้ในทุกทิศทาง จนผงโลหะที่บรรจุอยู่ภายในถูกอัดขึ้นรูป วิธีการนี้ใช้เฉพาะในการผลิตชิ้นส่วนที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีค่าสูง ในระบบนี้โดยทั่วไปจะประกอบด้วยภาชนะเก็บความดันที่ถูกออกแบบมาเพื่อบรรจุของไหลความดันสูง แม่พิมพ์ที่ให้ตัวได้และแกนกลาง (Arbors) ในกรณีชิ้นงานเป็นท่อหรือมีรูปทรงพิเศษ ดังรูปที่ 1.6 แม้ว่าชิ้นงานพูนส่วนมากจะทำที่อุณหภูมิห้อง แต่การเลือกใช้ปรับความดันของของไหลและแม่พิมพ์ที่เหมาะสมก็จะทำให้กระบวนการนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิสูง (Hot isostatic pressing) ชิ้นงานคืบที่ได้จะนำไปอบผนึกในขั้นตอนต่อไป



## รูปที่ 1.6 การอัดขึ้นรูปทุกทิศทาง [<http://www.mpif.org>]

**1.3.1.4 การทำแผ่นบาง (Sheet making)** วิธีการทำโลหะพรมเป็นแผ่นบางสามารถที่จะทำกับเหล็กกล้าไร้สนิม บรอนซ์ นิกเกิล นิกเกิลอัลลอย และไทเทเนียม แผ่นบางจะทำได้โดยการรีดผงโลหะโดยตรง หรือการอบผนึกแบบกราวตีผงโลหะในอากาศที่ดันและกว้าง ความพรมกำหนดได้จากการเลือกขนาดผงอนุภาคที่เหมาะสมแผ่นโลหะพรมที่ผลิตได้จะมีความหนาอยู่ระหว่าง 1.5-3 มิลลิเมตร ( $\frac{1}{16}$  -  $\frac{1}{8}$  นิ้ว) และมีขนาดตั้งแต่ 60-150 เซนติเมตร (20-60 นิ้ว) แผ่นบางนี้สามารถที่จะถูกตัดเหมือน ภูกรีต และเชื่อมเป็น โครงสร้างต่างๆ ได้

**1.3.1.5 การพ่นโลหะ (Metal spraying)** โครงสร้างโลหะพรมแบบนี้จะทำโดยการพ่นน้ำโลหะเหลวไปยังพื้นผิวแบบซึ่งควบคุมความพรมโดยสภาวะของการพ่น

**1.3.1.6 การเคลือบโลหะ (Metal coating)** ผงโลหะจะถูกผสมเข้ากับสารยึดชนิดพิเศษเพื่อทำเป็น slurry ที่สามารถใช้ขึ้นรูปขึ้นส่วน จากนั้นนำไปอบผนึกเพื่อกำจัดสารยึดและให้ได้รับความพรม

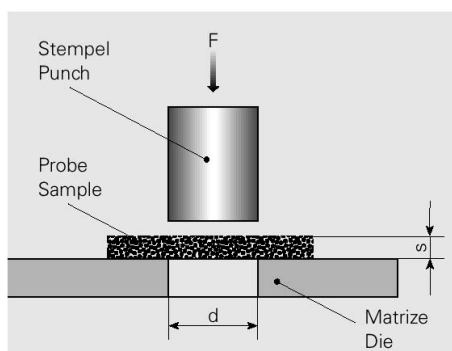
**1.3.1.7 การฉีดขึ้นรูป (Metal injection molding)** วิธีนี้ทำโดยการผสมผงโลหะเข้ากับสารยึดที่เป็นสูตรเฉพาะจำนวนหนึ่ง เพื่อให้เป็นวัสดุที่มีความหนืดสำหรับการฉีดที่ความดันสูง ความหนาแน่นในการขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของของวัสดุและการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปของแต่ละชิ้นงาน เนื่องจากมีการหดตัวมากเกิดขึ้นในระหว่างการกำจัดสารยึดออก ดังนั้นอุปกรณ์การกำจัดสารยึดและการอบผนึกจึงมีความจำเป็นสำหรับการผลิตวัสดุโดยวิธีการนี้

## 1.3.2 คุณลักษณะที่สำคัญของตัวกรองโลหะพรม

**1.3.2.1 ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength)** มีอิทธิพลกับอัตราส่วนของพื้นที่ต่อความหนาของตัวกรองขนาดใหญ่ โดยเฉพาะภายใต้สภาวะความดันสูง ความแข็งแรงเชิงกลเป็นเครื่องบ่งชี้ที่เชื่อถือได้ของพันธะการจับยึดระหว่างอนุภาค เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ

ตัวกรองที่ไม่ใช่โลหะ ตัวกรองแบบโลหะมีความแข็งแรงมากเพียงพอและทนต่อการแตกหักในการใช้งาน ที่พิเศษคือวัสดุตัวกรองส่วนมากจะมีความเหนียวแน่นเพียงพอ เพื่อป้องกันการแตกหักภายใต้แรงกระแทกหรือด้วยความร้อน

Hoffman และ Kapoor (1976) กล่าวว่า การทดสอบความแข็งแรงเฉือน เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการกำหนดความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุตัวกรอง แสดงดังรูปที่ 1.7 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือนได้จากสมการที่ 1.4



รูปที่ 1.7 การทดสอบแรงเฉือนแบบ blanking-shear tests [<http://www.gkn-filters.com>]

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot s} \quad (1.4)$$

- เมื่อ  $\tau$  คือ ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงาน (MPa)  
 $F$  คือ แรงกระทำที่วัดได้ (N)  
 $A$  คือ พื้นที่ผิว ( $\text{mm}^2$ )  
 $d$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)  
 $s$  คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)

สถาบัน MPIF (1994) ได้ตีพิมพ์เอกสารวิธีการทดสอบมาตรฐานสำหรับผงโลหะและผลิตภัณฑ์ทางโลหะกรรมวัสดุผงขึ้นมา โดยได้กำหนดวิธีการสำหรับหาสมบัติของผงตัวกรองบรอนซ์ไว้ใน MPIF Standard 39 Issued 1968, Revised 1983 ซึ่งในส่วนของการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลนั้นมีการรับแรงในลักษณะการตัด

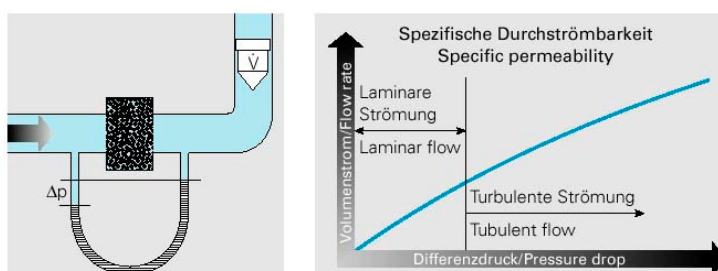
**1.3.2.2 ความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน (Permeability)** จะถูกกำหนดโดยวิธีการทดสอบที่ได้อธิบายไว้ใน ISO4022 (รูปที่ 1.8) ความดันที่ลดลง และอัตรา



ปริมาณการไหล วัดโดยให้ของไหลทดสอบที่ทราบความหนืดและความหนาแน่นไหลผ่านชั้นทดสอบ เมื่อใดการไหลของของไหลหนืดมากขึ้นจะใช้สมการ Darcy's law (สมการที่ 1.5)

$$\frac{\Delta P}{e} = \frac{Q \cdot \eta}{A \cdot \psi_v} \quad (1.5)$$

- เมื่อ  $\Delta P$  คือ ความดันที่ลดลง (Pa)  
 $e$  คือ ความหนาของชั้นทดสอบ (m)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชั้นทดสอบ ( $m^2$ )  
 $\eta$  คือ ความหนืดพลวัตของไหลทดสอบ (kg/m.s), (Pa.s)  
 $Q$  คือ อัตราการไหลของของไหล ( $m^3/s$ ) เท่ากับอัตราการไหลโดยมวลของของไหลหารด้วยความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของของไหล  
 $\psi_v$  คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $m^2$ )



รูปที่ 1.8 การทดสอบความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน [http://www.gkn-filters.com]

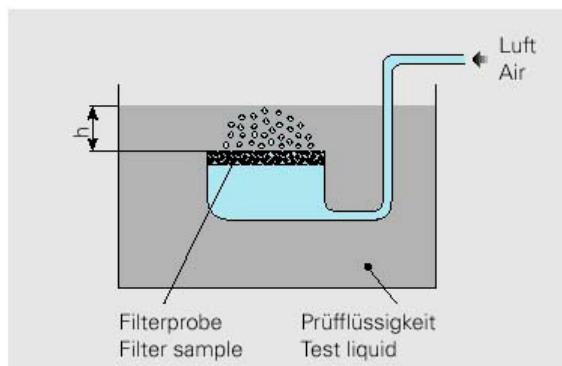
**1.3.2.3 การกักเก็บอนุภาคของแข็ง (Solid particle retention)** โดยการให้ตะกอนแขวนลอยของอนุภาคที่ทราบขนาดไหลผ่านตัวกรอง จากนั้นกำหนดค่าตัวกรองด้วยขนาดของอนุภาคที่ถูกกักเก็บได้โดยตัวกรอง แต่เมื่อขนาดอนุภาคที่แขวนลอยถูกปล่อยให้ไหลผ่านตัวกรองโลหะที่มีความหนามาก ตัวกรองไม่เพียงแต่เก็บอนุภาคที่โตกว่าขนาดที่ให้แต่ยังสามารถกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าด้วย

วิธีการที่ใช้กันกว้างขวางสำหรับหาค่าประมาณของการกักเก็บอนุภาค คือ การทดสอบฟองอากาศประเมินขนาดรูพรุน รูปแบบของการทดสอบนี้ตีพิมพ์ในมาตรฐาน ISO4003 (รูปที่ 1.9) ชั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกแช่ลงในของเหลวทดสอบ แล้วปล่อยอากาศไหลเข้ามาทางด้าน

ล่างของชั้นงานภายใต้แรงดันที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองอากาศ ดังนั้นฟองอากาศที่ถูกพ่นออกมาครั้งแรกจากผิวหน้าของชั้นงานคือขนาดของรูพรุน โดสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1.6

$$d = \frac{4 \cdot \gamma}{p} \quad (1.6)$$

- เมื่อ  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุน โดสุด (m)  
 $\gamma$  คือ ความตึงผิวของของเหลวทดสอบ (N/m)  
 $p$  คือ ค่าความแตกต่างของความดันที่ผ่านชั้นงานทดสอบ (Pa) เท่ากับ  $p_g - p_i$  เมื่อ  $p_g$  คือ ความดันของก๊าซ และ  $p_i$  เท่ากับ  $9.81\rho h$  เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว ( $\text{kg/m}^3$ ) และ  $h$  คือ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าบนสุดของชั้นงานทดสอบกับระดับของของเหลวทดสอบ (m)



รูปที่ 1.9 การทดสอบฟองอากาศประเมินขนาดรูพรุนแบบ bubble-point tests

[<http://www.gkn-filters.com>]

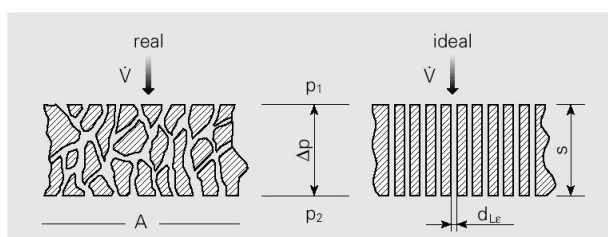
**1.3.2.4 ความต้านทานการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อม (Resistance to environmental attack)** โดยตัวกรองที่ทำจากบรอนซ์จะทนการกัดกร่อนจาก gasoline, benzol, น้ำมันทุกชนิด กรดคาร์บอนิก (Carbonic acid) น้ำสะอาด การนำไปใช้ในอากาศ (Oxidizing gases) สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 180 องศาเซลเซียส หรือไนรีดิวซิงก๊าซ (Reducing gases) ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 400 องศาเซลเซียส

**1.3.2.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average CCE pore diameter)** ค่าขนาดเฉลี่ยเป็นขนาดเสมือนกำหนดไว้เพื่ออธิบายถึงวัสดุตัวกรองใดๆ ให้ชัดเจนขึ้น โดยกำหนดขนาดของรูพรุนให้เป็นหลอดรูปทรงกระบอกซึ่งสามารถลดความดันลงได้เหมือนกับวัสดุตัวกรอง (รูปที่ 1.10) ในกรณีนี้ความยาวของหลอดจะสอดคล้องกับความหนาของวัสดุตัวกรอง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1.7

$$d_{L\varepsilon} = \sqrt{\frac{32 \cdot e \cdot Q \cdot \eta}{A \cdot \Delta P \cdot \varepsilon}} \quad (1.7)$$

- เมื่อ  $d_{L\varepsilon}$  คือ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (m)  
 $\eta$  คือ ความหนืดพลวัตของไหลทดสอบ (kg/m.s), (Pa.s)  
 $e$  คือ ความหนาของตัวกรอง หรือความยาวของหลอด (m)  
 $Q$  คือ อัตราการไหลของของไหล ( $m^3/s$ )  
 $\Delta P$  คือ ความดันที่ลดลง (Pa)  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวตัวกรอง ( $m^2$ )  
 $\varepsilon$  คือ ความพรุน (%) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1.8

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{solid}} - \rho_{\text{porous}}}{\rho_{\text{solid}}} \times 100\% \quad (1.8)$$



รูปที่ 1.10 การหาขนาดรูพรุนเฉลี่ย [<http://www.gkn-filters.com>]

### 1.3.3 การอบผนึก (Sintering)

การอบผนึกเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกัน

**1.3.3.1 หลักมูลการอบผนึก (Sintering fundamentals)** การอบผนึกเป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็ง แต่ในวัสดุหลายชนิดจะเกี่ยวกับการฟอร์มตัวของเฟสของเหลว เมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับจุลภาค การเพิ่มขนาดของคอคออด (neck growth) ที่เชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคสองอนุภาค

อนุภาคเชื่อมต่อกันโดยการเคลื่อนที่ของอะตอม การเชื่อมต่อกันของอนุภาคเป็นการกำจัดพลังงานพื้นผิวที่มีอยู่สูงของผงวัสดุ ปริมาณพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยปริมาตรขึ้นกับส่วนกลับของขนาดอนุภาค และการประเมินพลังงานพื้นผิวประเมินจากพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าทำให้อบผนึกได้เร็วกว่า อย่างไรก็ตามไม่ใช่พลังงานพื้นผิวทุกอย่างที่ใช้ได้สำหรับการอบผนึก สำหรับของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึกบริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคทั้งหมดกลายเป็นของเกรน ดังนั้นในกรณีนี้จึงเกี่ยวข้องกับพลังงานขอบเกรน ขอบเกรนซึ่งมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคจัดเป็นข้อบกพร่องชนิดหนึ่งดังนั้นภายในบริเวณนี้จึงมีการเคลื่อนที่ของอะตอมสูง กลไกของการอบผนึกอธิบายได้ในรูปของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอะตอมทำให้เกิดการไหลของมวล สำหรับผงโลหะกลไกการอบผนึกเป็นกระบวนการแพร่ผ่านพื้นผิว แพร่ผ่านขอบเกรน หรือแพร่ผ่านแลตทิซของผลึก ขั้นตอนกระบวนการอบผนึกอธิบายได้โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงขับและจลนศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะอบผนึกมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขนาดของคอคออดที่ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ (transport mechanisms) ที่ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแพร่ และการแพร่เป็นกระบวนการที่กระตุ้นด้วยความร้อนได้ (thermally activated) และจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของอะตอม การที่อะตอมจะเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับอะตอมนั้นมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นที่ทำให้อะตอมแยกตัวเป็นอิสระจากตำแหน่งปัจจุบัน และเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งที่ว่าง (vacant site) จำนวนตำแหน่งว่างและจำนวนอะตอมที่มีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าไปในตำแหน่งเหล่านั้นแปรตามความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius temperature relation) ดังนี้

$$N/N_0 = \exp(-Q/RT) \quad (1.9)$$

เมื่อ  $N/N_0$  คือ อัตราส่วนของจำนวนตำแหน่งว่างหรือจำนวนอะตอมที่ถูก  
กระตุ้นต่อจำนวนอะตอมทั้งหมด

Q คือ พลังงานกระตุ้น

R คือ ค่าคงที่แก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่อุณหภูมิสูงการอบผนึกเร็วขึ้นเพราะจำนวน  
อะตอมที่ถูกกระตุ้นและตำแหน่งว่างเพิ่มขึ้น

ขณะอบผนึกพื้นที่ผิวของอนุภาคลดลงอย่างรวดเร็วจากพื้นที่ผิวเริ่มต้น ( $S_0$ ) ปริมาณพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลง (ปริมาณพื้นที่ผิวเริ่มต้นลบด้วยปริมาณพื้นที่ผิวสุดท้าย) ส่วนด้วยพื้นที่ผิวเริ่มต้นวัดอยู่ในรูปของพารามิเตอร์แบบไม่มีหน่วย ( $\Delta S/S_0$ ) และพารามิเตอร์นี้เป็นตัวบอกปริมาณการอบผนึก การวัดพื้นที่ผิววัดได้หลายวิธี เช่น วัดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางจุลภาค (microscopic analysis) วัดปริมาณการดูดซับแก๊ส (gas adsorption) หรือวัดความสามารถการซึมผ่านได้ของแก๊ส (gas permeability)

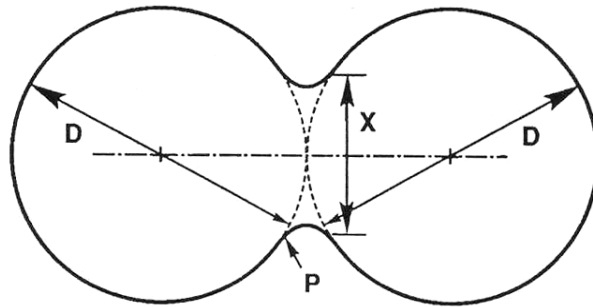
การวัดปริมาณการอบผนึกวิธีอื่นๆ เช่น การหาอัตราส่วนขนาดคอคอดสัมผัส  $X/D$  ซึ่งกำหนดจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอคอดหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 1.11 เมื่อคอคอดมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานหลังการอบผนึกหดตัวลง มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของคอคอดระหว่างอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวลดลงเกิดขึ้นในชิ้นงาน โดยปราศจากการหดตัวขณะปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงชนิดอื่นที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขนาดของคอคอดแสดงไว้ในรูปที่ 1.12 สำหรับที่อุณหภูมิสองค่า การหดตัว ( $\Delta L/L_0$ ) เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังอบผนึกส่วนด้วยความยาวเริ่มต้นหรือก่อนอบผนึก การหดตัวทำให้ชิ้นงานแน่นตัวขึ้นจากความหนาแน่นกรีน ( $\rho_G$ ) ไปเป็นความหนาแน่นหลังอบผนึก ( $\rho_S$ ) ดังความสัมพันธ์

$$\rho_S = \rho_G / (1 - \Delta L/L_0)^3 \quad (1.10)$$

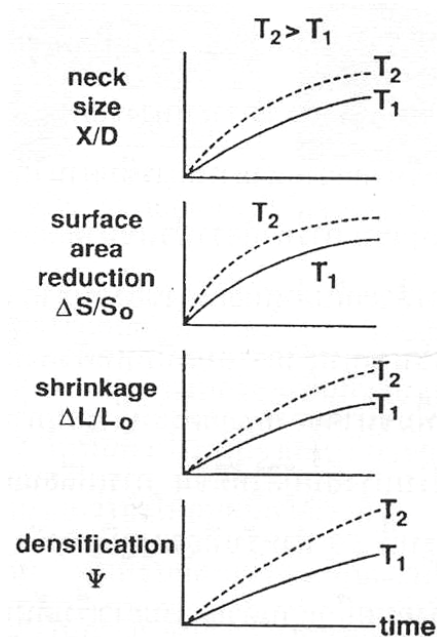
พารามิเตอร์การแน่นตัว (หรือ densification parameter, แทนด้วย  $\Psi$ ) คือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากการอบผนึกส่วนด้วยการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นเพื่อให้ได้ชิ้นงานแข็งที่ปราศจากรูพรุน โดยพารามิเตอร์การแน่นตัวมีค่าดังนี้

$$\Psi = (\rho_s - \rho_G) / (\rho_T - \rho_G) \quad (1.11)$$

เมื่อ  $\rho_T$  คือความหนาแน่นทางทฤษฎี จะเห็นได้ว่าการวัดค่าปริมาณการแน่นตัว ความหนาแน่นสุดท้ายขนาดคอคอด พื้นที่ผิว และการหดตัว ล้วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดรูพรุนขณะอบแห้ง



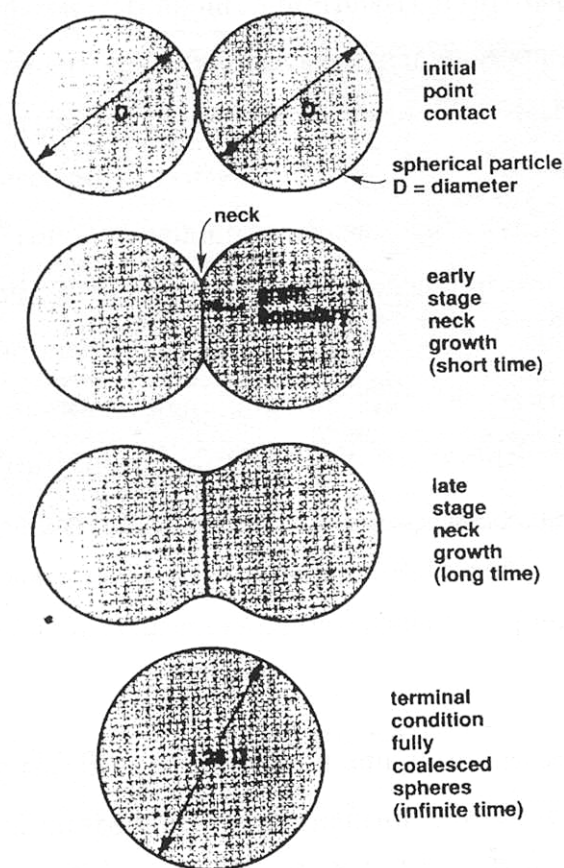
รูปที่ 1.11 การอบแห้งอนุภาคทรงกลมขนาดคอคอด X ขนาดอนุภาค D และเส้นรอบคอคอดมีรัศมี p [German, 1994]



รูปที่ 1.12 ผลของเวลาในการอบแห้งต่ออัตราส่วนขนาดคอคอด พื้นที่ผิวที่ลดลง การหดตัว และการแน่นตัว [German, 1994]

### 1.3.3.2 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering theory)

1.3.3.2.1 แนวคิดพื้นฐาน (Basic concept) พิจารณาบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 1.13 (ภาพบนสุด) โดยทั่วไปในการอัดแน่นผงอนุภาคแต่ละอนุภาคมีบริเวณสัมผัสหลายกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณ พันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายโตขึ้นและรวมตัวกัน (merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (solid-vapor interface) ดังรูปที่ 1.13 การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้อนุภาคสองอนุภาครวมเป็นหนึ่งอนุภาคขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเมื่อเริ่มต้น



รูปที่ 1.13 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาค และในที่สุดรวมเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่ [German, 1994]

ขั้นตอนการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (initial stage) ที่คอคอดระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนที่ต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (intermediate stage) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะทรงกระบอก (cylindrical nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานมีการพัฒนา ในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางเกิดการโตของเกรน (grain growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลง กรณีเกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โดดเดี่ยวของรูพรุนและอัตราการอบผนึกช้าลง

เมื่อความพรุนหดตัวลงประมาณ 8% (หรือความหนาแน่นทางทฤษฎี 92 %) ทำให้โครงข่ายรูพรุนเปิดไม่เสถียร จากรูปลักษณะโครงข่ายของรูพรุน ณ จุดนี้ทำให้รูพรุนรูปทรงกระบอกยุบตัวลง (collapse) กลายเป็นทรงกลม ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพในการทำให้เกรนโตช้าลง การที่เห็นรูพรุนเดี่ยวปรากฏขึ้นแสดงว่าขั้นตอนการอบผนึกมาถึงขั้นตอนสุดท้ายแล้ว ขณะเดียวกันอัตราการแน่นตัวช้าลงก๊าซที่ค้างอยู่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศ จึงทำให้ได้ความหนาแน่นสูงขึ้นตรงเท่าที่โลหะยังไม่เกิดการระเหย

ขั้นตอนการอบผนึกยังไม่มีการแบ่งอย่างชัดเจน แต่พอจะแยกออกจากกันตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ ขั้นตอนที่แรกเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคที่มีความแตกต่างระหว่างความโค้งมาก (curvature gradient) ทั้งอัตราส่วนขนาดคอคอดและการหดตัวมีค่าน้อย และขนาดเกรนไม่โตกว่าขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น ในขั้นตอนกลางรูพรุนมีความราบเรียบมากขึ้นและมีความหนาแน่นประมาณ 70-92 % ของความหนาแน่นทฤษฎี และมีการโตของเกรนดังนั้นเกรนจึงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเริ่มต้น เมื่อถึงขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึกรูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกลมและปิดและเห็นการโตของเกรนอย่างชัดเจน

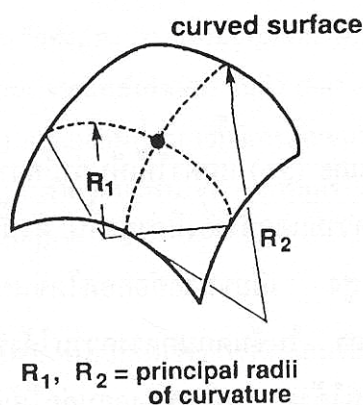
จากสมการลาปลาซ (Laplace equation) กำหนดให้ความเค้น ( $\sigma$ ) เกี่ยวกับผิวโค้งมีค่าดังนี้

$$\sigma = \gamma (R_1^{-1} + R_2^{-1}) \quad (1.12)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือความตึงผิว (surface tension)  $R_1$  และ  $R_2$  เป็นรัศมีหลักของผิวโค้ง รูปที่ 1.14 เป็นรูปวาดแสดงให้เห็นจุดต่างๆ บนผิวโค้งรวมทั้งรัศมีทั้งสองคือค่า  $R_1$  และ  $R_2$  เมื่อรัศมีหลักตั้งอยู่ภายในมวลใช้เครื่องหมายบวกสำหรับค่ารัศมี ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เว้าเข้าข้างในจะมีเครื่องหมายเป็นลบ และพื้นที่ผิวที่เรียบจะไม่มีค่าความเค้น ดังนั้นขณะอบผนึกให้กับพื้นผิวใดๆ ที่โค้งขึ้น (bump) หรือเว้าลง (dip) จะราบเรียบ (flatten) ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



พิจารณาขั้นตอนแรกของการอบผนึกเป็นตัวอย่างเพื่อการลงใช้สมการลาปลาซ บริเวณคอคอดสามารถวาดภาพให้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 1.11 และขยายสเกลออกเป็นระดับอะตอม ในรูปที่ 1.15 บริเวณที่เรียกว่าพื้นผิวคือบริเวณที่พันธะอะตอมขาดจากกัน ขอบเกรนก็จัดเป็นบริเวณบกพร่องอย่างหนึ่ง ดังนั้นบริเวณคอคอดมีโอกาที่จะขาดจากกันสูง ที่ระยะต่างๆ ตามพื้นผิวห่างจากคอคอด ความโค้งมีค่าคงที่ ทั้ง  $R_1$  และ  $R_2$  มีค่าเท่ากับรัศมีของอนุภาคทรงกลมคือ  $D/2$  ดังนั้นจากสมการที่ (1.12) จะได้



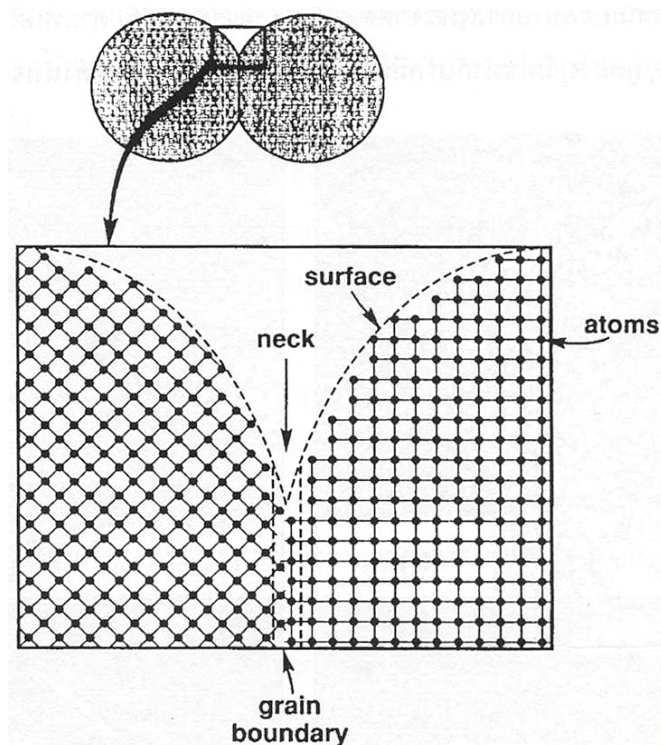
รูปที่ 1.14 ลักษณะความโค้งบนพื้นผิวโค้งที่บอกในรูปของรัศมีหลักสองค่า [German, 1994]

$$\sigma = 4\gamma / D \quad (1.13)$$

โดยการประมาณรูปร่างของคอคอดเป็นวงกลมด้วยรัศมี  $p$  เมื่อ  $p$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $X^2/D$  ดังนั้นพื้นที่ผิวโค้งของคอคอดทำให้ความเค้นมีค่าดังนี้

$$\sigma = \gamma \left( \frac{1}{X} - \frac{D}{X^2} \right) \quad (1.14)$$

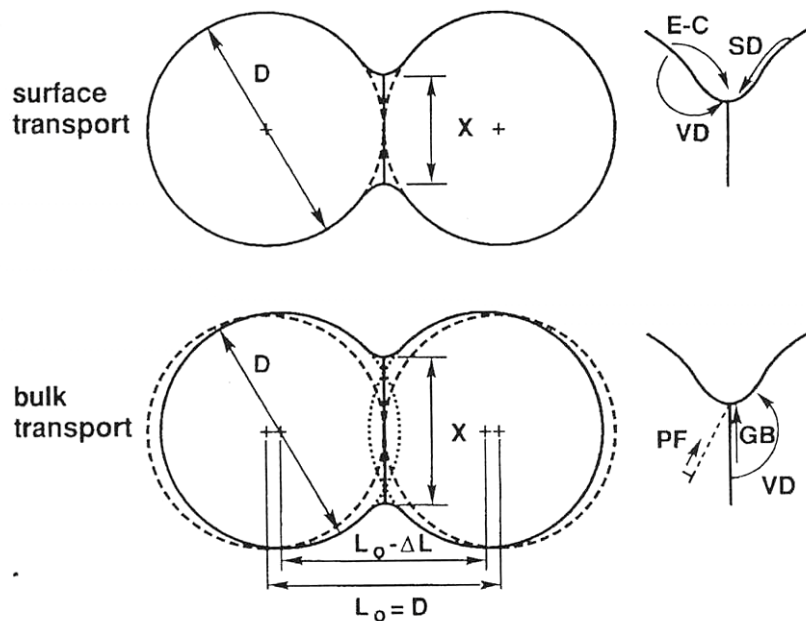
การเปรียบเทียบสมการที่ (1.13) และ (1.14) แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างความเค้นในบริเวณคอคอดสูง ยิ่งคอคอดมีขนาดเล็กความแตกต่างยิ่งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นยิ่งระยะห่างมีค่าน้อยยิ่งมีแรงขับสำหรับการไหลของมวลไปยังคอคอดสูง เมื่อขนาดคอคอดโตขึ้น ความแตกต่างระหว่างความโค้งผ่นคลายลงและกระบวนการอบผนึกช้าลง ในขั้นตอนกลางความโค้งที่อยู่รอบรูพรุนทรงกระบอกทำให้เกิดแรงขับและในขั้นตอนสุดท้ายความโค้งรอบรูพรุนทรงกลมก่อให้เกิดการหดตัว



**รูปที่ 1.15** ระดับอะตอมแสดงพันธะระหว่างอนุภาคจากการอบผนึก อะตอมที่ไม่เรียงอยู่ในแนวเส้นเดียวกันกลายเป็นขอบเกรน คอคอดคือบริเวณที่มีการขาดกัน เกิดขึ้นโดยกระบวนการเคลื่อนที่ [German, 1994]

กลไกการการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็นสองประเภทคือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (bulk transport) ทั้งสองกลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวลดังแสดงด้วยอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 1.16

การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค (นั่นคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่อบผนึกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบผนึกคือการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวมีความสำคัญในการอบผนึกโลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการอบผนึกเหล็กด้วย ส่วนการระเหย-การควบแน่นไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำแต่มีความสำคัญต่อการอบผนึกโลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว



**รูปที่ 1.16** แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหย - การควบแน่น, SD = การแพร่ตามพื้นผิว, VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) การเคลื่อนที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน (PF = การไหลแบบพลาสติก, GB = การแพร่ตามขอบเกรน, VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) ดังนั้นเฉพาะกลไกการเคลื่อนที่มวลรวมเท่านั้นที่ทำให้เกิดการหดตัวของอนุภาค [German, 1994]

ในทางตรงข้ามการอบผนึกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัวมวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอคอด กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุการแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติก และการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญที่สุดในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง โดยทั่วไปความเค้นของแรงดึงผิวไม่เพียงพอที่จะสร้างดิสโลเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นเมื่อดิสโลเคชันถูกอบอ่อน(จากการให้ความร้อน) ให้เคลื่อนออกจากผงอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงข้ามสำหรับวัสดุพื้นฐาน เช่น แก้วและพลาสติก การอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดที่อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกันถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากในการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิว

และการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอคอดมีการเพิ่มขนาด แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่น (หรือการหดตัว) ระหว่างการอบผนึก โดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

**1.3.3.2.2 ขั้นตอนแรก (Initial stage)** การประยุกต์ใช้สมการที่ (1.12) กับในการอบผนึกสำหรับขั้นตอนแรก ที่ยอมให้มีการประมาณค่าความแตกต่างของความดันไอ (vapor pressure) ความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก (vacancy concentration) และความเค้นโดยรวมของการอบผนึก ตัวอย่างเช่น ความดันไอที่บริเวณคอคอดมีค่าต่ำกว่าที่ภาวะสมดุลเพราะบริเวณคอคอดมีความโค้งงอเป็นความโค้งเว้า อย่างไรก็ตามมวลรวมของผงจะปล่อยไอออกมาที่ความดันสูงกว่าสมดุลเพราะมวลของผงมีความโค้งงอ ดังนั้นจึงมีมวลสุทธิไหลเข้าสู่บริเวณคอคอด ในทำนองเดียวกันปริมาณความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก  $C$  ภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้นกับความโค้งงอ

$$C = C_0[1 - (\gamma\Omega/kT)(R_1^{-1} + R_2^{-1})] \quad (1.15)$$

- เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของช่องว่างในผลึกที่ภาวะสมดุล  
 $\gamma$  คือ พลังงานพื้นผิว  
 $\Omega$  คือ ปริมาตรของอะตอม  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์แมนน์  
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ยิ่งพื้นผิวมีความโค้งมากยิ่งทำให้ห่างจากภาวะสมดุลมาก สำหรับพื้นผิวเว้าความเข้มข้นของช่องว่างในผลึกสูงกว่าสมดุล แต่ในพื้นผิวนูนจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าสมดุล

แบบจำลองสำหรับการอบผนึกในขั้นตอนแรกเน้นที่การเพิ่มขนาดของคอคอดที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal) โดยการวัดจากอัตราส่วนคอคอด ( $X/D$ )

$$(X/D)^n = Bt/D^m \quad (1.16)$$

- เมื่อ  $X$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของคอคอด  
 $D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  
 $t$  คือ เวลาในการอบผนึก  
 $B$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดและรูปทรงของวัสดุ

ค่า  $m$ ,  $n$  และ  $B$  ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ของมวลคั่งแสดงในตารางที่ 1.3 โดยทั่วไปแบบจำลองในสมการที่ (1.16) ใช้ได้สำหรับอัตราส่วนขนาดคอคอดที่มีค่าต่ำกว่า 0.3 สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ถูกรวมอยู่ในพารามิเตอร์  $B$  และมีค่าผันแปรตามอุณหภูมิอาร์เรเนียส คล้ายกับสมการที่ (1.9)

ถึงแม้ว่าผลที่ได้จากสมการที่ (1.16) ไม่ค่อยมีความแม่นยำมากนัก แต่แสดงให้เห็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการ จากสมการจะเห็นได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กทำให้การอบผนึกเร็วขึ้นเพราะการอบผนึกขึ้นกับส่วนผกผันของอนุภาค การแพร่ตามพื้นผิวและการแพร่ตามขอบเกรนทำให้เร็วขึ้นได้โดยการลดขนาดอนุภาค ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปกลไกที่ใช้ในการอบผนึกผงโลหะหมายถึงถึงการแพร่ผ่านแลตทิซ (lattice diffusion) ในทุกกรณีการอบผนึกขึ้นกับอุณหภูมิในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบต่ออัตราการอบผนึก กล่าวโดยสรุปได้ว่าเวลาเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและขนาดอนุภาค

ตารางที่ 1.3 สมการที่ใช้ในขั้นตอนแรกของการอบผนึก  $(X/D)^n = Bt/D^m$  [German, 1994]

Mechanism	n	m	B
viscous flow	2	1	$3\gamma / (2\eta)$
plastic flow	2	1	$9\pi\gamma b D_v / (kT)$
evaporation-condensation	3	1	$(3P\gamma / \rho^2) (\pi / 2)^{1/2} (M / (kT))^{3/2}$
lattice (volume) diffusion	5	3	$80 D_v \gamma \Omega / (kT)$
grain boundary diffusion	6	4	$20\delta D_b \gamma \Omega / (kT)$
surface diffusion	7	4	$56 D_s \gamma \Omega^{4/3} / (KT)$
<b>Symbols</b>			
$\gamma$ = surface energy			$D_v$ = volume diffusivity
$\eta$ = viscosity			$D_s$ = surface diffusivity
$b$ = Burgers vector			$D_b$ = grain boundary diffusivity
$k$ = Boltzmann's constant			$P$ = vapor pressure
$T$ = absolute temperature			$M$ = molecular weight
$\rho$ = theoretical density			$\Omega$ = atomic volume
$\delta$ = grain boundary width			

กระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเปลี่ยนแปลง เมื่อคอคอดมีขนาดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1.16 ผลที่ได้คือชิ้นงานมีการหดตัว การเข้าใกล้กึ่งกลางของอนุภาคประมาณได้จากความสัมพันธ์กับขนาดของคอคอด ดังนี้

$$(\Delta L/L_0) = (X/D)^2 \quad (1.17)$$

เมื่อการหดตัว  $\Delta L/L_0$  คือความยาวที่เปลี่ยนส่วนด้วยความยาวเริ่มต้น การหดตัวขณะอบผงในชั้นตอนแรกเมื่อใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันจะมีลักษณะคล้ายกับสมการ (1.16) ดังนี้

$$(\Delta L/L_0)^{n/2} = Bt/(2^n D^m) \quad (1.18)$$

เมื่อ  $n/2$  มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 3 ค่า  $D$  เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค และ  $t$  เป็นเวลาที่อุณหภูมิคงที่ พารามิเตอร์  $B$  ในสมการ (1.16) และ (1.18) ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์และมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้

$$B = B_0 \exp(-Q/RT) \quad (1.19)$$

- เมื่อ
- $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
  - $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
  - $B_0$  คือ พารามิเตอร์รวมของวัสดุ (พลังงานพื้นผิวขนาดอนุภาค ความถี่ของการสั่นอะตอม ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ)
  - $Q$  คือ พลังงานกระตุ้น ที่เป็นตัววัดความยากในการกระตุ้นให้อะตอมเคลื่อนที่

การหดตัวในการอบผงใช้ได้เฉพาะในกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวม การวัดการหดตัวอย่างง่ายโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างกันในเวลาที่แตกต่างกันและวัดความยาวของชิ้นงานที่ได้ การใช้ไดลาโตมิเตอร์ (dilatometer) หรือเทคนิคการ ใช้รูปจำลองโดยตรงเป็นทางเลือกในการเก็บข้อมูลการหดตัวอย่างต่อเนื่องขณะให้ความร้อน โดยทั่วไปการใช้เทคนิคไดลาโตมิเตอร์ทำได้โดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ เช่น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที หรือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหรือการหดตัวตาม

อุณหภูมิถูกบันทึกไว้ทุกอุณหภูมิ เพื่อใช้ในการหาบริเวณที่มีการหดตัวมาก วิธีการนี้ใช้การทดลองเพียงการทดลองเดียวในการบอกค่าอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดของตัวอย่าง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานมีประโยชน์สำหรับกระบวนการที่ต้องทำการหลังการอบผนึกเพราะช่วยให้ไม่ต้องวัดขนาดของคอคอดแต่ละอันเพื่อหาปริมาณการหดตัว โดยทั่วไปชิ้นงานทางด้านโลหกรรมวัสดุผอมมองการหดตัวออกเป็นสองลักษณะ คือลักษณะแรกเป็นชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นผู้ผลิตที่ต้องการความแม่นยำของชิ้นส่วนสูงมักไม่ต้องการให้เกิดการหดตัวในชิ้นงาน ถ้าหลีกเลี่ยงการหดตัวได้ชิ้นงานจะมีความแม่นยำสูง การออกแบบเครื่องมือสำหรับชิ้นงานที่มีการหดตัวต้องมีการให้มีการเผื่อขนาดของชิ้นงานไว้เพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายหลังการอบผนึกอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการผลิต ถ้าชิ้นงานมีความหนาแน่นต่างกันส่งผลมีการหดตัวต่างกันระหว่างการอบผนึกด้วย ดังนั้นการอบผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว (warpage) การอบผนึกเป็นเวลานานควบคู่กับการใช้อุณหภูมิต่ำในการอบผนึกโดยใช้แรงอัดสูงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนขนาดน้อยที่สุด ลักษณะที่สองเป็นชิ้นงานที่ต้องการความหนาแน่นสูง ในวัสดุบางอย่างต้องการความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปใช้งานได้ดีจึงยอมให้มีการหดตัวระหว่างการอบผนึกได้ ดังนั้นการหดตัวเป็นสิ่งที่ต้องการหรือต้องหลีกเลี่ยงขึ้นอยู่กับวัสดุ ความยากง่ายในการอัดและสมบัติที่ต้องการ

**1.3.3.2.3 ขั้นตอนกลาง (Intermediate stage)** สมการที่ (1.18) ใช้ได้ดีในกรณีที่มีการหดตัวเพียงเล็กน้อย (เช่น การหดตัวในขั้นตอนแรก) ความสำคัญของขั้นตอนกลางคือการกำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการอบผนึก ลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือความโค้งมนของรูพรุน (pore rounding) การแน่นตัวและการโตของเกรน

การใช้ลักษณะทางเรขาคณิตอธิบายการอบผนึกเป็นดังนี้ สมมติให้รูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกอยู่ตามขอบเกรน และให้รูปร่างของเกรนเป็นรูปทรงที่มีหลายหน้าหรือเตตราไอคิเดคาฮีดรอน (tetraikadekahedron) อัตราการแน่นตัวขึ้นอยู่กับการแพร่ของช่องว่างในผลึกออกห่างจากรูพรุน ดังนั้นอัตราการแน่นตัว  $dp/dt$  เป็นดังนี้

$$dp/dt = J A N \Omega \quad (1.20)$$

- เมื่อ
- J คือ ฟลักซ์ของการแพร่ (จำนวนอะตอมต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่)
  - A คือ พื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน
  - $\Omega$  คือ ปริมาตรอะตอม
  - N คือ จำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร

สมมติให้กระบวนการกำจัดรูพรุนเป็นการแพร่ในเนื้อวัสดุ โดยให้ขอบเกรนเป็นแหล่งรวมช่องว่างในผลึก (และช่องว่างในผลึกถูกทำลายที่นั่น) ดังนั้นการผสมผสานกันของกฎข้อที่หนึ่งของฟิกค์ (Fick's first law) กับรูปทรงเรขาคณิตของรูพรุน ให้ผลดังนี้

$$\rho_s = \rho_i + B_i \ln (t/t_i) \quad (1.21)$$

- เมื่อ  $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นหลังอบผนึก  
 $\rho_i$  คือ ความหนาแน่นเมื่อเริ่มต้นขั้นตอนกลาง (หรือขั้นตอนที่สอง)  
 $B_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการที่ (1.19)  
 $t_i$  คือ เวลาตั้งแต่เริ่มต้นขั้นตอนที่สอง  
 $t$  คือ เวลาอบผนึกในช่วงอุณหภูมิคงที่ (สูงกว่า  $t_i$ )

ค่า  $B_i$  แปรผกผันกับกำลังสามของขนาดเกรน สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของขอบเกรนในการอบผนึก ดังนั้นการทำให้เกรนโตช้าลงและการส่งเสริมการแพร่ให้มากขึ้นช่วยในการแน่นตัวของวัสดุ โดยทั่วไปทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและโครงสร้างจุลภาค

ขนาดเฉลี่ยของเกรน  $G$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการอบผนึก ( $t$ ) ดังนี้

$$G^3 = G_0^3 + kt \quad (1.22)$$

- เมื่อ  $G_0$  คือ ขนาดเกรนเริ่มต้น  
 $k$  คือ พารามิเตอร์ที่กระตุ้น โดยความร้อนคล้ายกับพารามิเตอร์  $B$

เกรนมีรูปร่างเป็นเตตราไฮเดรคาล์ดราฮีดรอนที่มีรูพรุนรูปทรงกระบอกอยู่ตามริมเกรน มีลักษณะทางเรขาคณิตดังนี้ คือ รัศมีรูพรุน ( $r$ ) ขนาดเกรน ( $G$ ) และความพรุน ( $\varepsilon$ ) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\varepsilon = 4 \pi (r/G)^2 \quad (1.23)$$

สมมติให้ขอบเกรนเชื่อมต่อกับโครงสร้างรูพรุน จากความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่า เกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อรูพรุนมีการเกาะตัวกัน (pores coalesce) ส่งผลให้รัศมีรูพรุนเพิ่มขึ้น ( $r$  เพิ่มขึ้น) หรือเมื่อความพรุนถูกกำจัด ( $\varepsilon$  ลดลง)



การแน่นตัวในขั้นตอนกลางเกิดจากการแพร่ในเนื้อวัสดุและการแพร่ตามขอบเกรน รูพรุนที่อยู่บนขอบเกรนจะหายไปเร็วกว่ารูพรุนที่อยู่ตามลำพัง การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกลางเห็นได้จากการที่รูพรุนมีลักษณะความกลมมนขึ้นและมีกรอพยพรวมไปกับขอบเกรนขณะที่มีการโตของเกรน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวไม่ทำให้เกิดการแน่นตัวหรือการหดตัว

การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการแพร่ การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุนต่างเป็นกระบวนการที่กระตุ้นได้ด้วยความร้อน วัสดุส่วนใหญ่อัตราเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะเฉพาะ (เช่น ขนาดเกรน ขนาดรูพรุน และระยะห่างระหว่างรูพรุน) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะอบผนึก ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อกระบวนการอบผนึก

**1.3.3.2.4 ขั้นตอนสุดท้าย (Final stage)** การอบผนึกในขั้นตอนนี้สุดท้ายเป็นกระบวนการที่ช้า เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดการหดตัวด้วยกลไกการแพร่แบบมวล รูพรุนแยกกันอยู่ตามมุมของเกรนในขั้นตอนนี้สุดท้ายของการอบผนึก ทำให้ได้โครงสร้างขั้นตอนนี้สุดท้ายของการอบผนึกเกิดรูพรุนทรงกลมกระจายอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสแข็ง-ไอเกิดเป็นร่องเรียกว่ามุมสองหน้า (dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างนูนสองด้านเหมือนเลนส์นูนสองอันประกบกัน เมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ด้วยเหตุนี้รูพรุนจึงมีรูปร่างแปรตามบริเวณที่อยู่ รูพรุนที่ไม่อยู่ติดกับขอบเกรนมีลักษณะมนหลายเหลี่ยม ดังนั้นรูพรุนต้องแพร่ช่องว่างในผลึกให้ห่างจากขอบเกรนเพื่อทำให้เกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นกระบวนการที่ช้ามากถ้าให้ความร้อนต่อไปรูพรุนเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนโตขึ้นและจำนวนรูพรุนลดลง ความแตกต่าง ระหว่างความโค้งของรูพรุนต่างๆ นำไปสู่การโตของรูพรุนขนาดใหญ่และสูญเสียรูพรุนขนาดเล็กซึ่งเป็นรูพรุนที่มีความเสถียรน้อยกว่า เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (Ostwald ripening) ถ้าภายในรูพรุนมีก๊าซติดค้างอยู่ความสามารถในการละลายก๊าซในเมทริกซ์ส่งผลกระทบท่ออัตราการกำจัดรูพรุน ดังนั้น จึงต้องกำจัดรูพรุนในขั้นตอนนี้สุดท้าย เพราะการโตของรูพรุนทำให้ความหนาแน่นลดลงและส่งผลให้การอบผนึกในขั้นตอนนี้สุดท้ายนานขึ้น

อัตราการกำจัดรูพรุนในขั้นตอนนี้สุดท้ายเกี่ยวกับผลกระทบที่สำคัญสองอย่างคือพลังงานพื้นผิว และความดันก๊าซในรูพรุน สมการอัตราการแน่นตัวที่เหมาะสมเป็นดังนี้

$$\frac{dp}{dt} = \frac{12D_v \Omega}{kTG^3} \left( \frac{2\gamma}{r} - P_g \right) \quad (1.24)$$

- เมื่อ  $p$  คือ ความหนาแน่น  
 $t$  คือ เวลา  
 $\Omega$  คือ ปริมาตรอะตอม  
 $D_v$  คือ สภาพแพร่ในเนื้อวัสดุ  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลท์แมนน์  
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์  
 $G$  คือ ขนาดเกรน  
 $\gamma$  คือ พลังงานพื้นผิวเฟสของแข็ง-ไอ  
 $r$  คือ รัศมีรูพรุน  
 $P$  คือ ความดันก๊าซในรูพรุน

จากสมการแสดงให้เห็นว่าเมื่อก๊าซถูกขังอยู่ในรูพรุน อัตราการแน่นตัวจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ก่อนที่รูพรุนทั้งหมดจะถูกกำจัดออก ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศเท่านั้นจึงได้ความหนาแน่นสูงสุด

ในงานวิจัยที่ได้นำเสนอไปนั้นส่วนใหญ่จะใช้วิธีที่มีการอัดขึ้นรูปชิ้นงานก่อน ซึ่งจะทำให้การควบคุมสมบัติของสมบัติของโลหะพูนด้วยการควบคุมแรงอัด และสารยึด ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จะทำการทดลองผลิตโลหะบรอนซ์พูนแบบกราวดี โดยไม่ใช้สารยึดและแรงในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

การผลิตโลหะบรอนซ์พูนครั้งนี้ จะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิและเวลาในการอบผนึก และชนิดของแม่พิมพ์ที่ใช้ ทั้งนี้เพื่อดูว่าอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อสมบัติอะไรบ้างของโลหะบรอนซ์พูนที่ผลิตได้

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.4.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การผลิตโลหะบรอนซ์พูนจากผงบรอนซ์
- 1.4.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมบัติของโลหะบรอนซ์พูน
- 1.4.3 เพื่อเสนอแนวทางในการดำเนินการผลิตโลหะบรอนซ์พูนที่มีประสิทธิภาพ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถผลิตชิ้นงานโลหะบรอนซ์พูนใช้ได้เองในห้องปฏิบัติการ
- 1.5.2 รู้อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของโลหะพูน
- 1.5.3 ได้พื้นฐานความรู้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ผลิตชิ้นส่วนโลหะพูนจากผงวัสดุชนิดอื่นๆต่อไป
- 1.5.4 เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาสู่ภาคการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

### 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นในการเลือกขนาดของผงบรอนซ์ที่เหมาะสมมาผลิตเป็นโลหะพูน ทำการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการผลิต ผลิตโลหะบรอนซ์พูน และทดลองเพื่อหาคุณลักษณะของโลหะบรอนซ์พูนที่ผลิตได้ สรุปผลการทำงาน โดยใช้เทคนิคการอบผนึกแบบ กราวิตี้ (Gravity sintering)