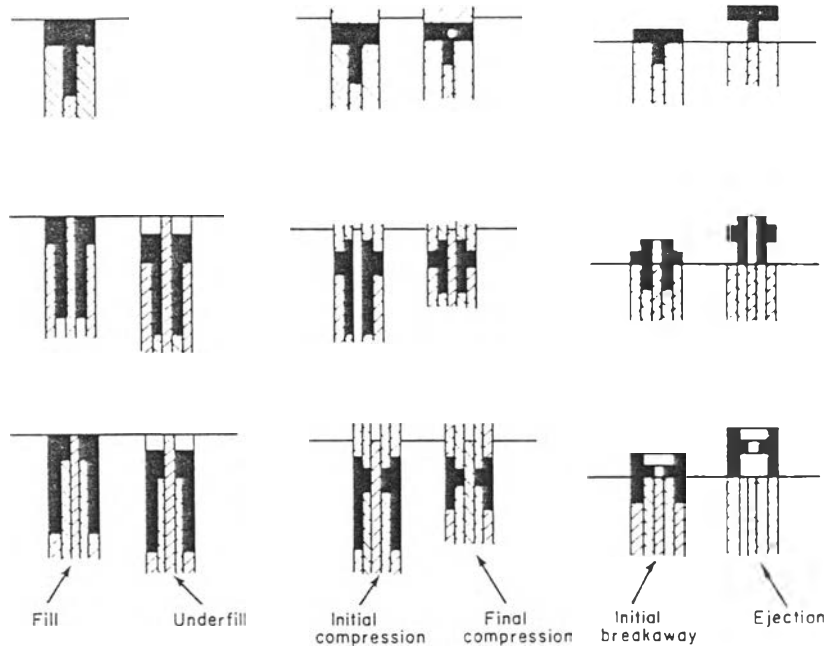
บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นด้านวิชาการ

2.1 การอัดขึ้นรูป (Dry Pressing)

สมบัติ และโครงสร้างจุลภาคภายหลังการเผาคือ สิ่งสำคัญในขบวนการผลิตเซรามิกที่มีหลายผลึก (polycrystalline) เกิดขึ้นได้จากการนำผงเซรามิกที่ละเอียดมาทำเป็นชิ้นงานแล้วผ่านความร้อน โดยกระบวนการซินเตอร์ วิธีที่จะทำให้ได้เซรามิกที่ดีคือ การควบคุมขั้นตอนในกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยการผสมน้ำและตัวประสาน(binder)ที่เป็นสารอินทรีย์ใช้อัดในแม่พิมพ์ การควบคุมที่ดีประกอบกับการทำงานอัตโนมัติของเครื่องอัดจะเพิ่มประสิทธิภาพการขึ้นรูปได้สูง เช่น การอัดขึ้นรูปอลูมิน่า(aluminas) ทิทาเนต(titanates) และเฟอร์ไรท์(ferrites) มีขนาดเล็กกว่า 1 มิล จนถึงขนาดที่โตหลายนิ้วมีอัตราการผลิตสูงถึง 5000 ชิ้นต่อนาที การขึ้นรูปโดยการอัดเหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานที่ไม่มีความยุ่งยาก ถ้าชิ้นงานเป็นแผ่นบางสามารถผลิตต่อเนื่องด้วยวิธีเทปคาสติ้ง (tape casting) ส่วนชนิดที่มีรูปร่างซับซ้อนต้องใช้วิธีอื่น การอัดขึ้นรูปเซรามิกจากผงมีลำดับขั้นในการอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2 มีการป้อนสารขณะที่กระบอกอัดตัวล่าง(lower punch) หยุดนิ่งอัดด้วยกระบอกอัดตัวบน(upper punch) ตามด้วยกระบอกอัดตัวล่าง แล้วปลดชิ้นงานออก วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เลือกตามชนิดของสารที่จะอัด สำหรับผงที่ไม่แข็งใช้เหล็กที่ชุบแข็ง โดยมีค่าความยืดหยุ่น(Young's modulus elasticity) สูง ถ้าผงที่เป็นเม็ดทรายใช้วัสดุทำแม่พิมพ์พวกเหล็กพิเศษหรือพวกคาร์ไบด์จะทำให้มีอายุการใช้งานได้นาน แรงอัดสามารถใช้ได้อยู่ในช่วงหลายสิบถึงหลายพันปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วของการอัดน้อยกว่าหนึ่งวินาทีต่อครั้ง



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานของการขึ้นรูปโดยวิธีอัด(Reprinted from Treatise on Materials Science and Technology,"Dry Pressing"Ceramic Fabrication Processes, volume 9)

1. ตัวแปรในกระบวนการอัด

1.1 การออกแบบชุดแม่พิมพ์ต้องคำนึงถึงรูปร่างที่มีทรงเรขาคณิต เนื้อวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ และช่องว่างระหว่างส่วนที่เคลื่อนที่และส่วนที่ยึดติดอยู่กับที่

1.2 กลไกในการป้อนผงและแรงขับเคลื่อนสำหรับการเติมผง

1.3 สมบัติของผงด้านการไหล(flow) และการอัดตัว(compaction) ทำโดยการควบคุมลักษณะของผงโดยการผสมตัวประสาน ตัวหล่อลื่น และการคัดเลือกขนาด

1.4 อุณหภูมิและบรรยากาศของการป้อนผงลงแม่พิมพ์

1.5 แรงอัดในการกด(punch pressure) หรือโปรแกรมการเคลื่อนที่ และช่วงเวลาการหยุดนิ่ง

1.6 โปรแกรมการปลดชิ้นงาน

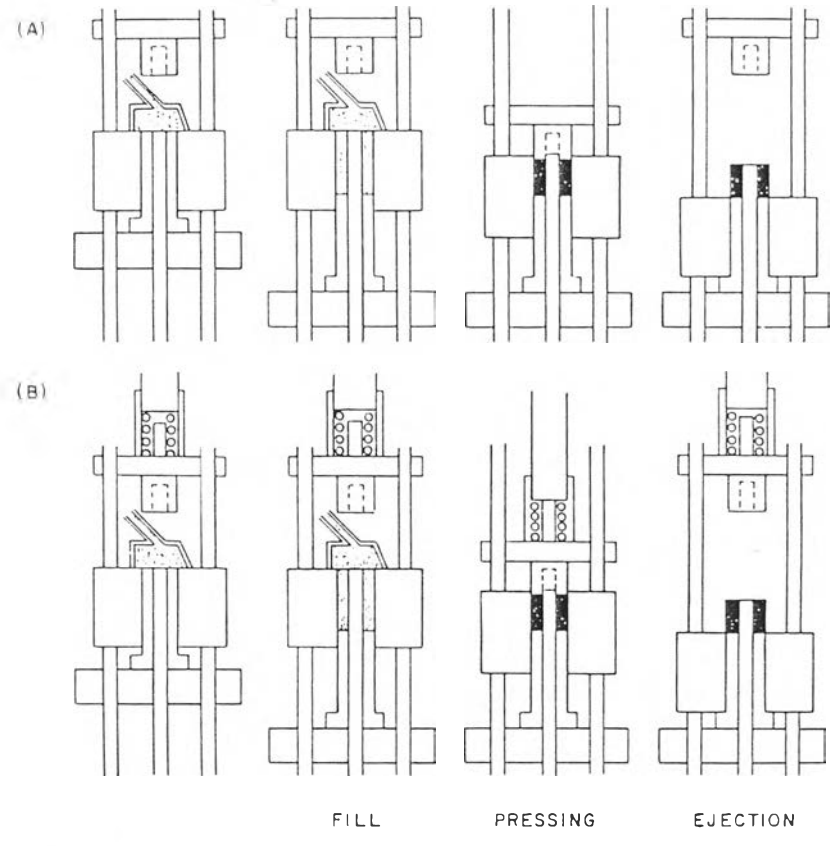
สิ่งที่เกี่ยวข้องคือ การอัดต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ และความเที่ยงตรง รับประกันลักษณะและรูปทรงหลังอัดแล้วสามารถปลดชิ้นงานได้ วิธีการอัดแตกต่างกันมีการเลือกที่เป็นไปได้ในตารางที่ 1 การอัดที่ง่ายที่สุดคือ วิธีที่อยู่ในรูป 3A ซึ่งใช้สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถอธิบายตามรูปที่ 4 ได้ดังนี้ ตอนแรกมีแม่พิมพ์อยู่ในตำแหน่งไม่เคลื่อนที่ กระบอกกดตัวล่างเคลื่อนลงขณะเทผง ตัวกดตัวบนเคลื่อนลงแล้ว แม่พิมพ์ก็จะเคลื่อนลง หลังจากนั้นก็หยุดนิ่งช่วงเวลาหนึ่ง แล้วตัวกดตัวบนก็เคลื่อนที่ขึ้น ต่อมาแม่พิมพ์จะลดระดับต่ำลงอีกเพื่อปลดชิ้นงาน แล้วทำซ้ำๆ เป็นวัฏจักร สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนมากกว่านี้ เช่น เฟอร์ไรท์รูปร่างเป็นแกนรูปถ้วย นำสปริงมาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยยึดที่ตัวกดตัวบน วงจรการทำงานแสดงไว้เป็นรูป 2B ในการอัดชิ้นรูปขั้นตอนหนึ่งที่วิกฤติมากที่สุด คือการเติมผงในแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 วิธี-การอัดขึ้นรูปแบบต่างๆ(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

Type	Top punch	Die	Bottom punch	
			Pressing	Ejection
Single action	Moves	Fixed	Fixed	Moves
Double action	Moves	Fixed	Moves	Moves
Floating die	Moves	Moves	Fixed	Moves
Multiple motion	Simple or composite		Composite	
	Moves	Fixed	Moves[a]	Moves
Floating die, multiple motion	Simple or composite		Composite	
	Moves	Moves	Moves[a]	Moves

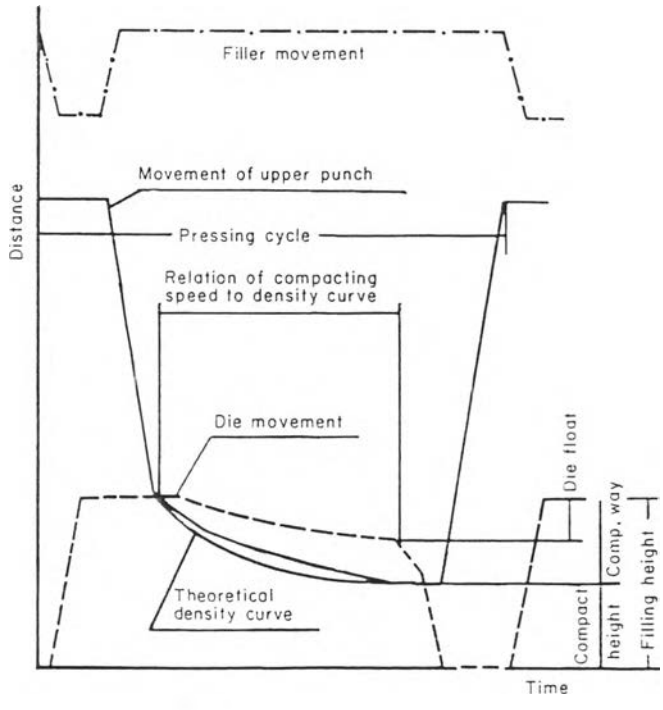
[a] Lowest level component may be stationary.

เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอ เป็นการทำที่ยากมากกับอนุภาคที่ละเอียด เพราะว่าการติดกันของอนุภาคกับอนุภาค(agglomorate) ที่เกิดเพิ่มขึ้น วิธีแก้ปัญหาให้ผงที่เติมเกิดความสม่ำเสมออย่างมาก ทำได้โดยการทำให้เกิดลมดูด(suction)ขึ้น เมื่อลูกสูบตัวล่างเคลื่อนที่ลงสัมพันธ์กับการเทผงลงแบบลมดูดจะช่วยทำให้ผงที่เติมสม่ำเสมอ ปริมาณผงที่เติมจะต้องเท่ากับความลึกของโพรง(cavity)ทรงกระบอกของแม่พิมพ์ตัวที่มาประกอบ(composite punches)



รูปที่ 3 การอัดแบบ A แบบง่าย และแบบ B มีสปริงช่วยกดลง
(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

แรงอัดของตัวกดอัดอาจจะใช้ไฮดรอลิกส์หรือแมกคานิกส์ การอัดในอุตสาหกรรมเป็นการทำงานต่อเนื่องมีการเติมผง การอัดและการปลดชิ้นงานต่อเนื่องกันไป โดยในรูปที่ 4 จะแสดงถึงโปรแกรมการขึ้นรูปโดยการอัด



รูปที่ 4 โปรแกรมการขึ้นรูปโดยการอัด(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

การควบคุมพิกัดในการอัดน้ำหนัก ±1 % ความหนา ±0.001 นิ้ว และความขนาน ±0.0002 นิ้ว อัตราการผลิตแบบการอัดทางเดียว(single-action) ผลิตได้ตั้งแต่ 1 ถึง 300 ชิ้นต่อนาที และการอัดแบบหมุนได้รอบตัว ด้วยความเร็วสูง(high speed rotary) ผลิตได้มากกว่า 5000 ชิ้นต่อนาที อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ใช้ผลิตชิ้นงานได้มากกว่าหลายแสนชิ้น ตัวอย่างของลักษณะเฉพาะของเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ขนาด 12 ตัน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ขนาด 12 ตัน(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

	Minimum	Maximum
Ram force-pressing		
Upper ram	1.0 ton	12.5 ton
Lower main ram	0.2	12.9
Lower auxiliary ram	02.	2.8
Ram force-withdrawal		
Upper ram	0.7	8.0
Lower main ram	0.7	8.2
Lower auxiliary ram	0.2	2.8
Powder fill depth		3 in.
Cycle rate		47 strokes/min
Operating pressure	250 psi	3000 psi
Cycling pressure	250	500
Upper ram speed-down (unloaded)		10.2 in./sec
(loaded)		1.5
Upper ram speed-up		16.4
Lower ram speed-up (unloaded)		10.2
(loaded)		1.5
Lower ram speed-down		16.4
Upper ram stroke		4 in.

[a] Model HC-12, Hydramet American Inc., Royal Oak, Michigan.

2. ลักษณะเฉพาะของผง(Powder Characteristics)

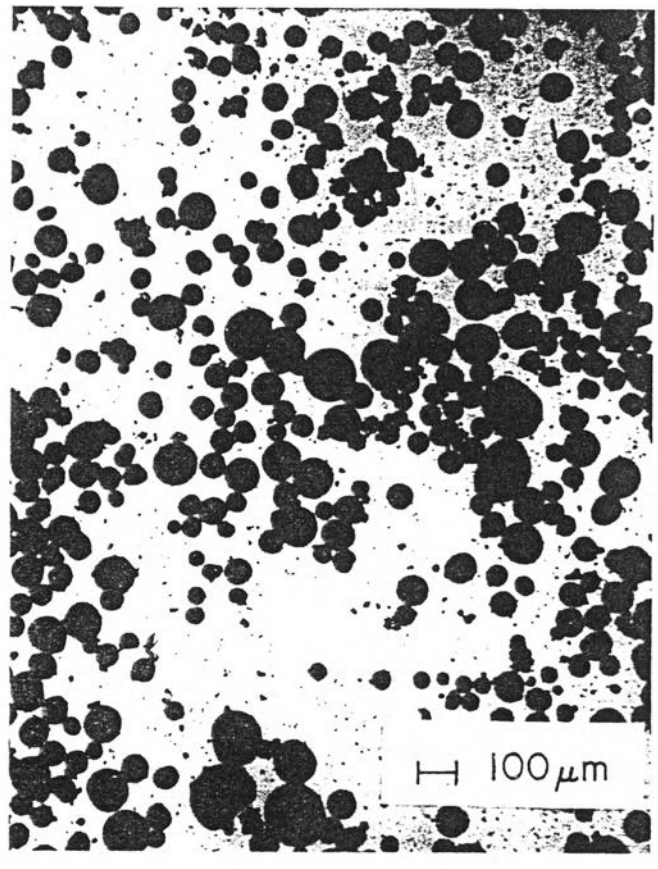
สิ่งที่กล่าวถึงว่าความสม่ำเสมอในการเติมผงลงในแม่พิมพ์เป็นสิ่งสำคัญมากในการอัดขึ้นรูป แล้วยังมีสิ่งอื่นอีกคือ การไหลตัวของผงที่สม่ำเสมอ หรือความสามารถในการไหลเทลงแบบ (pourability) ที่ดี อัตราการไหลของผงที่สามารถวัดได้โดยใช้มาตรฐาน ASTM(American Society of Testing Materials no B212-82) หน่วยวัดอัตราการไหลเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที การวัดจะวัดโดยการใส่ผงให้ไหลผ่านรูของภาชนะรูปทรงกรวย โดยทั่วไปแล้วอนุภาคที่หยาบจะไหลสม่ำเสมอมากกว่าอนุภาคที่ละเอียด และการกระจายของขนาดของแกรนูล(granule) อยู่ระหว่าง 35 ถึง 50 เมช(mesh) ปริมาณ 90 % อีก 10 % เป็นผงละเอียดอยู่ระหว่าง 50 ถึง 140 เมช ช่วยทำให้ผงมีลักษณะการไหลอิสระขึ้น การกระจายของขนาดของอนุภาค และการอัด(packing) ของอนุภาค เป็นสิ่งจำเป็นในการอัดผงเซรามิก ด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กโดยเฉลี่ย เช่นผงเฟอร์ไรท์ ผงอลูมิน่า และผงอื่นๆ อีกมากที่ผลิตโดยการตกตะกอน(precipitation) การฉีดพ่นด้วยพลาสม่า(plasma spraying) สิ่งที่สำคัญกับผงสิ่งแรกคือ การทำเป็นเม็ดกลมด้วยผงที่มีอนุภาคที่ละเอียดให้เป็นก้อนใหญ่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลตัว สำหรับเทคนิคการทำแกรนูลมี 3 แบบคือแบบแรกอัดให้แตก(crushing) แล้วร่อนเพื่อคัดขนาด แบบที่ 2 คือการบดด้วยลูกบด และร่อนเพื่อ

คัดขนาดแบบสุดท้ายเป็นการอัดผ่านความร้อนทั้ง 3 แบบ จะใช้ตัวประสานเพิ่มเข้าไประหว่างกระบวนการทำแกรนูล

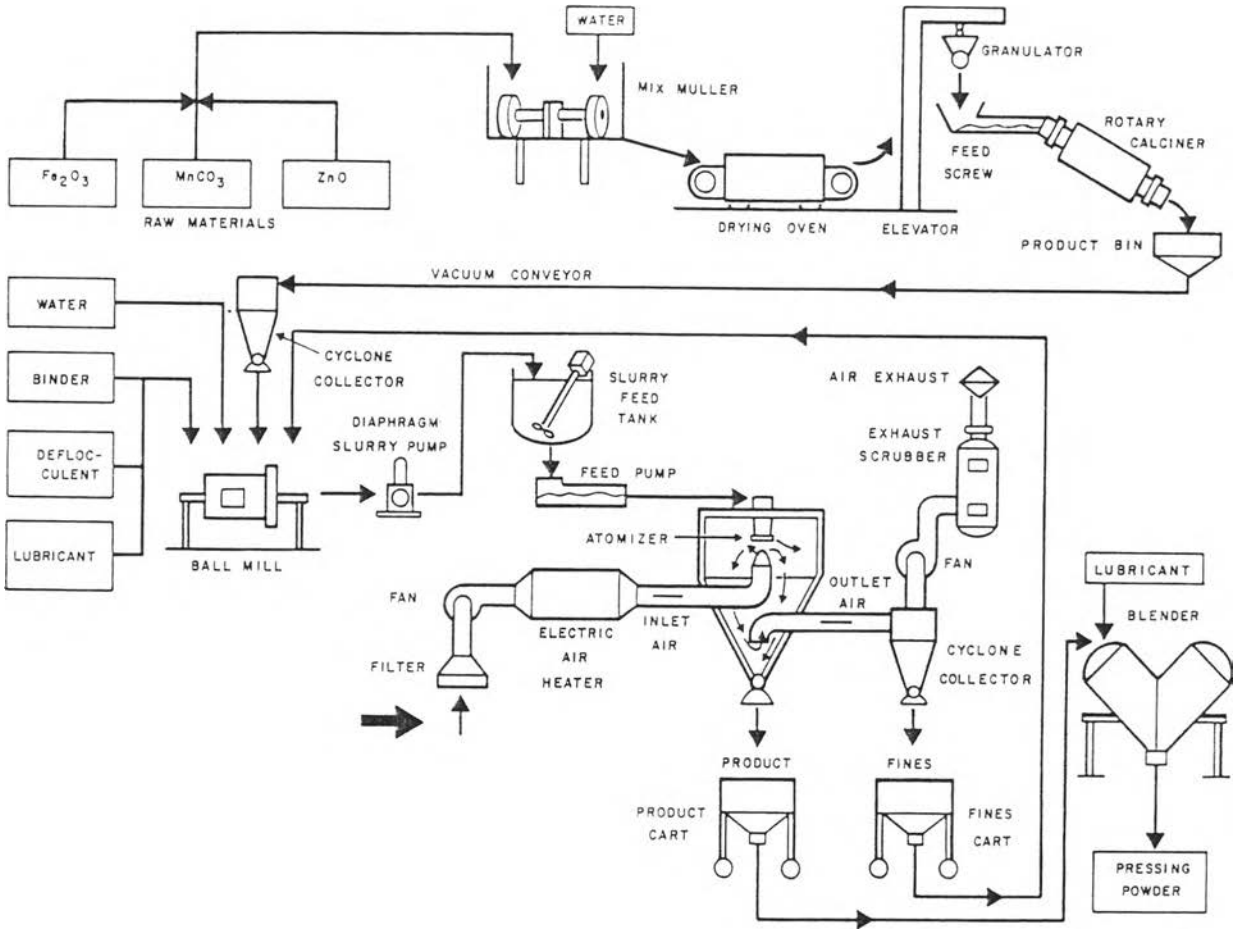
<u>วิธีการบดอัด</u> การทำแกรนูลด้วยวิธีนี้เหมาะสมกับผงที่มีปริมาณน้อย เช่น การบดอลูมิน่าจะได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.3 ไมครอน(μm) (อลูมิน่าผสมกับแมกนีเซี่ยมคาร์บอเนต 0.25 % ของน้ำหนัก) โดยนำอลูมิน่าไปใส่ในถุงที่เป็นยาง ใช้การอัดแบบไอโซสแตติก (isostatic press) ที่แรง 1,000 ถึง 16,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพื่อให้เนื้อแน่นแล้วจึงบดชิ้นวัสดุที่อัดได้ให้แตกด้วยมือ และร่อนผ่านตะแกรงขนาดระหว่าง 16 ถึง 100 เมช

<u>วิธีการบดด้วยลูกบด</u> วิธีนี้เหมาะกับการทำแกรนูลของเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณปานกลาง ทำโดยการตกตะกอนของผงแมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรท์มีขนาดเฉลี่ย 0.2 ไมครอน ใช้เวลาในการบด 2 ชั่วโมง ด้วยน้ำ 42 % ของน้ำหนัก ใช้ตัวประสานคือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) 0.5 % ของน้ำหนัก ใช้ตัวทำกระจาย(deflocculant) คือ กัมอาราบิค(gum arabic) 0.3 % ของน้ำหนัก และใช้ตัวหล่อลื่น(lubricant) คือ ซิงค์สเตียเรต(zinc stearate) 3.3 % ของน้ำหนัก ใช้น้ำผสมกับสารเคมีแล้วทำให้แห้ง ทำให้เป็นผงแกรนูลโดยผ่านตะแกรงขนาดระหว่าง 80 ถึง 200 เมช

<u>วิธีการฉีดพ่นผ่านความร้อนเพื่อทำให้แห้ง</u> วิธีนี้เหมาะกับการทำผงเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณมากๆ ขั้นตอนในการทำจะต้องผสมผงเฟอร์ไรท์ น้ำ สารเคมีที่ประกอบด้วยตัวประสาน ตัวหล่อลื่น และตัวทำกระจาย แล้วพ่นให้กระจายผ่านอากาศที่ร้อนระหว่างกระบวนนี้น้ำจะระเหยไปทำให้ผงแห้งจะได้แกรนูล แกรนูลที่มีการกระจายแคบมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร เป็นเม็ดหยาบ มีลักษณะกลมเกาะกันเป็นก้อนแบบตัวอย่างของผงเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการฉีดพ่นแล้วทำให้แห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 5 วิธีนี้จะทำงานอัตโนมัติในการควบคุมความชื้นขั้นสุดท้าย ตัวประสานและตัวช่วยหล่อลื่นให้มีความผิดพลาดน้อยกว่า $\pm$0.5 % การควบคุมพารามิเตอร์ทั้งหมดของขบวนการแสดงในรูปที่ 6 สิ่งหนึ่งที่ขบวนการนี้ควบคุมได้ดี คือ ลักษณะของผงที่กลม ทำให้เกิดสมบัติการไหลที่ดี



รูปที่ 5 แสดงผงเฟอร์ไรท์ที่ได้จากขบวนการหน่นผ่านความร้อน
(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)



รูปที่ 6 แสดงขบวนการพ่นผ่านความร้อนของผงเฟอร์ไรท์(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

3. ตัวเติมพิเศษ(Additives)

การเลือกและการใช้งานของตัวเติมพิเศษที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับความต้องการในการปรับปรุงเนื้อสารให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปพวกตัวประสาน(binder) หมายถึงตัวที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ตัวหล่อลื่น(lubricant) ช่วยให้เม็ดแกรนูลมีความลื่นและปลดออกจากแบบได้ง่าย ตัวที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุ(plasticizers) ช่วยให้ไม่แตกง่าย และตัวทำกระจาย(deflocculant) ช่วยให้การผสมมีความสม่ำเสมอ หน้าที่ของสารเติมพิเศษ(additive) ต่างๆ ของผงเซรามิก แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 หน้าที่ของตัวเติมชนิดต่างๆ(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

Additive	Function
Binder	Green strength
Lubricant	Mold release, interparticulate sliding
Plasticizer	Rheological aids, improving flexibility of binder films, allowing plastic deformation of granules
Deflocculant	pH control, particle-surface charge control, dispersion
Wetting agent	Lowering surface tension of liquid
Water retention agent	Preventing squeezing-out of water during pressure application
Antistatic agent	Charge control
Antifoaming agent or foam stabilizer	Preventing foam or strengthening wanted foams
Chelating or sequestering agent	Inactivating undesirable ions
Fungicide and bactericide	Stabilizing against degradation with aging

[a] After Pincus and Shipley (1969).

สารเติมพิเศษจะทำให้การไหลตัวของแกรนูลดีขึ้น ความแข็งแรงในการเกาะยึดดีขึ้น เพิ่มการหล่อลื่นภายใน และภายนอก หรือหล่อลื่นผนังของแม่พิมพ์ ทำให้มีผลดีในการขึ้นรูป และเพิ่มความสม่ำเสมอในการอัดขึ้นรูป หรือเพิ่มความหนาแน่นภายหลังการขึ้นรูป (green density) ของชิ้นงานเซรามิก สารเติมพิเศษจะถูกเผาไหม้ ในช่วงเวลาการเผาขั้นต้น หรือช่วงการซินเตอร์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์

ตารางที่ 4 วัสดุต่างๆที่ใช้เป็นตัวประสาน(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

Organics	Inorganics
Starches	Water
Dextrins	Clays
Gums	Bentonites
	Magnesium aluminum silicates
Flours	Soluble silicates
Casein	Organic silicates
Gelatins	Colloidal silica
Albumins	Phosphates
Proteins	Borophosphates
Lignins	Aluminates
Celluloses	Coiloidal alumina
Bitumens	
Rubbers	
Resins	
Natural	
Synthetic	
Alginates	
Chlorinated hydrocarbons	
Waxes	
Paraffin	
Microcrystalline	
Synthetic alcohols, esters, and glycols	
Hydrogenated oils	

[a] After Pincus and Shipley (1969).

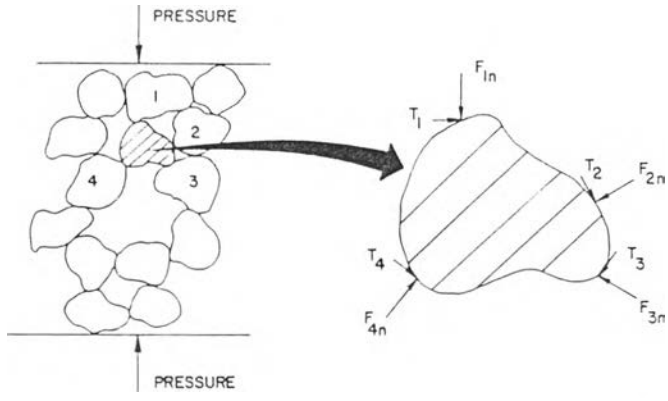
ตารางที่ 4 "Pincus และ Shipley, 1969" ได้รวบรวมชนิดของสารเติมพิเศษจำนวนมาก ทั้งชนิดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ใช้กับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก มีให้เลือกใช้แบบกว้างๆ ขึ้นอยู่กับประสบการณ์การทำงาน สารเติมพิเศษเหล่านี้จะมีผลกับลักษณะของผงเซรามิก ทำหน้าที่ควบคุมผิวหน้าของอนุภาคของเซรามิกในการเชื่อมต่อกัน ตัวอย่างการเลือกใช้ตัวประสาน ตัวช่วยให้เกิดความยืดหยุ่น และตัวหล่อลื่นในอุตสาหกรรมเซรามิกชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวเติมชนิดต่างๆ กับงานในอุตสาหกรรมเซรามิก(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

	Binders	Plasticizers	Lubricants
Ferrite core Steatite insulator	Polyvinyl alcohol Microcrystalline wax	Gum arabic	Zinc stearate Magnesium stearate
Alumina sparkplug	Low oil content Microcrystalline wax Emulsion	1:1 Potassium hydroxide: tannic acid	Wax emulsion also provides lubrication
Alumina, magnesia or magnesia-chrome refractory brick	Ca- or Na-Lignosulfonate	—	Stearic acid

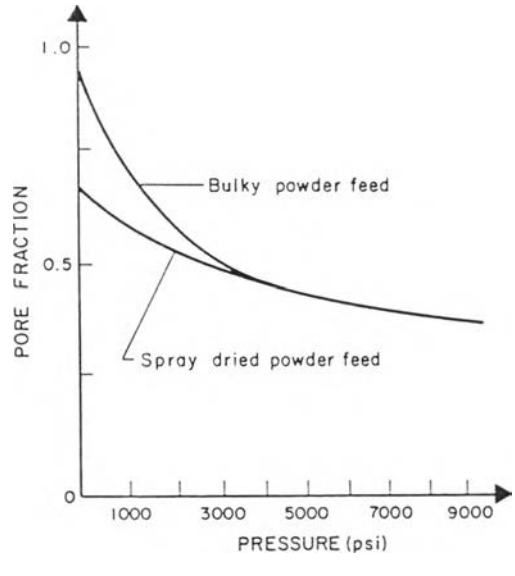
4. พฤติกรรมของการอัดตัว(Compaction Behaviour)

การเกิดความเค้นในการอัดผงเซรามิก ระหว่างการอัดผงที่กระจายอยู่จะมารวมติดกัน มีการเพิ่มการยึดเกาะของอนุภาคมากขึ้น เมื่อเพิ่มแรงยึดมากขึ้นรูพรุนก็จะลดลง แรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวกด อัดให้อนุภาคติดกัน ความเค้นปกติและความเค้นในการตัดเฉือนที่มีความฝืด จะทำให้เกิดการแตะกันของอนุภาคไม่สมดุลย์ ในรูปที่ 7 จะเห็นอนุภาคเปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ และถูกจัดเรียงใหม่แรงต้านของอนุภาคที่ติดกันจะเกิดขึ้น เพราะเนื้อที่ที่จำกัดในการเคลื่อนที่ การจัดให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามที่ต้องการเป็นไปไม่ได้ หลายๆ อนุภาคจะเลื่อนและจัดเรียงตัวใหม่ สามารถเกิดการยุบตัวได้ถ้ารูพรุนรอบๆ อนุภาคใหญ่กว่า จึงควรลดรูพรุนที่ขนาดใหญ่ ให้มีรูพรุนมีขนาดเล็กลงโดยเฉลี่ย การใช้แรงอัดเพิ่มขึ้นความเค้นในการแตะกันก็จะเพิ่มขึ้น และความฝืดของแรงอัดก็จะเพิ่มขึ้น ความฝืดจะมีมากขึ้นจากการแตะกันของอนุภาคในการอัด และจุดของส่วนที่แตะกันก็จะเลื่อนไปในเนื้อที่ที่จำกัดทำให้เกิดจุดวิกฤติขึ้น เพราะว่าการรวมของพื้นที่ในการแตะหรือสัมผัสกันทำให้เกิดความเค้นในการสัมผัสกัน(contact stress) เป็นเหตุให้เกิดการยึดตัว และเกิดการไหลในการยึดตัว หรือเกิดการแตกที่ตำแหน่งที่ สัมผัสกัน ฉะนั้นการเพิ่มจำนวนของการสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร ควรจะเคลื่อนที่ให้ช้าลง ลักษณะของอนุภาคจะดูดซับแต่ละชั้นของเซอร์แฟคแตนซ์(surfactants) ซึ่งจะลดสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานระหว่างอนุภาคเป็นการลดแรงที่ทำให้แตกเป็นแรงปกติ จะช่วยให้การอัดได้ผลดี



รูปที่ 7 แรงกระทำระหว่างการอัดอนุภาค(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

<u>ขั้นตอนในการอัด</u> เมื่อเพิ่มแรงอัดความพรุนตัวจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของรูพรุนของชิ้นงานที่อัดจากผงลักษณะต่างกัน 2 แบบ แสดงในรูปที่ 8

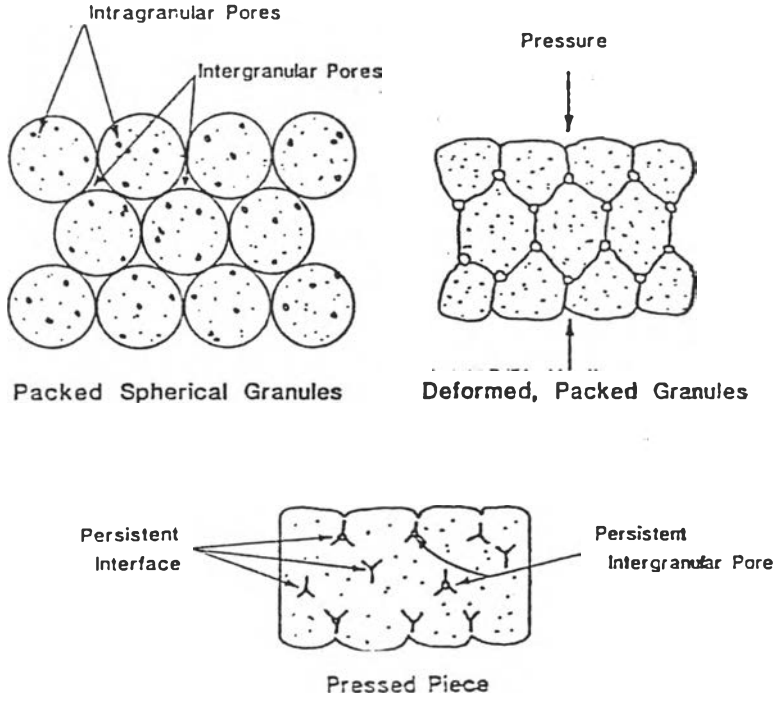


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและรูพรุนในการอัด(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

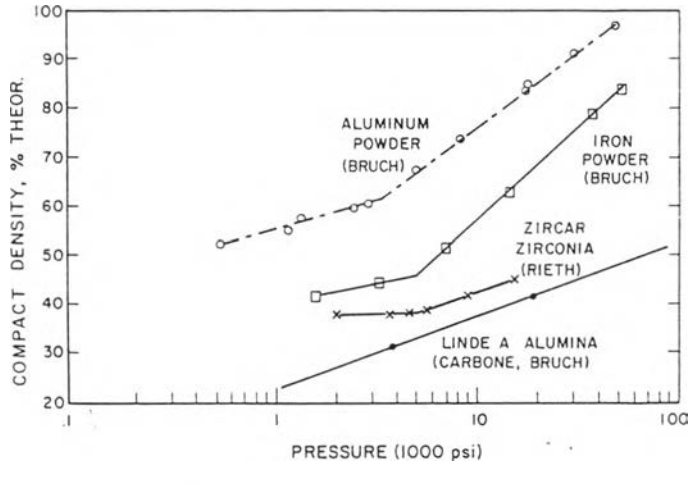
5. กลไกที่เกิดขึ้นจากการอัดตัว(Compaction Mechanic)

การเลื่อนของอนุภาค และการจัดเรียงของอนุภาคที่ปราศจากการแตก(particle sliding and rearrangement without fracture) การอัดขั้นแรกที่แรงอัดน้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้เกิดการจับตัวของอนุภาคเป็นแบบไม่แข็งแรง(weakly agglomerated) เนื่องจากอนุภาคไหลย้อนกลับไม่ได้ ความพรุนตัวของผงที่เติมขึ้นอยู่กับการเตรียม ถ้าเป็นผงทั่วไปที่เป็นก้อนมีความพรุนตัว(pore fraction) 0.8-0.95 สำหรับแกรนูลจากการพ่นอบแห้ง มีความหนาแน่นมากกว่า มีความพรุนตัว 0.6-0.75 ถ้าศึกษาด้วยโครงสร้างจุลภาคของการอัด จะพบความแตกต่างระหว่างผงที่เป็นแกรนูล และผงที่เป็นก้อน อนุภาคการอัดตัวในแกรนูลมีความแข็งแรงในการติดกันของแกรนูลดีกว่ามาก และเป็นสิ่งสำคัญมากในการควบคุมโครงสร้างของโพรงอากาศ(pore structure) นอกจากนี้ยังช่วยการเลื่อนตัวของอนุภาคให้ติดกันในช่วงของการอัดระยะแรก ในการอัดควรหลีกเลี่ยงอากาศที่อยู่ในแม่พิมพ์ และตัวกด ในการอัดถ้ามีอากาศปนอยู่จะทำให้รูพรุนมีอัตราการขยายตัวสูง

การเปลี่ยนรูป(local deformation) และการแตกตัว(fracturing) ของอนุภาคที่จุดสัมผัส ในอนุภาคหนึ่งอนุภาคจะมีจุดสัมผัสหลายจุด ดังรูปที่ 9 การเพิ่มแรงอัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้อนุภาคที่ใกล้ชิดกันเกิดการรวมตัว ทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น เมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดหนึ่งแกรนูลจะยุบพังและแตกที่จุดที่มีความเค้นมากๆ ที่เรียกว่าจุดวิกฤต



รูปที่ 9 แสดงถึงการอัดตัวของแกรนูล(James S.Reed "Introduction to the Principles of Ceramic Processing")



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นในการอัดและแรงอัดที่เป็นล็อก(Log) (แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

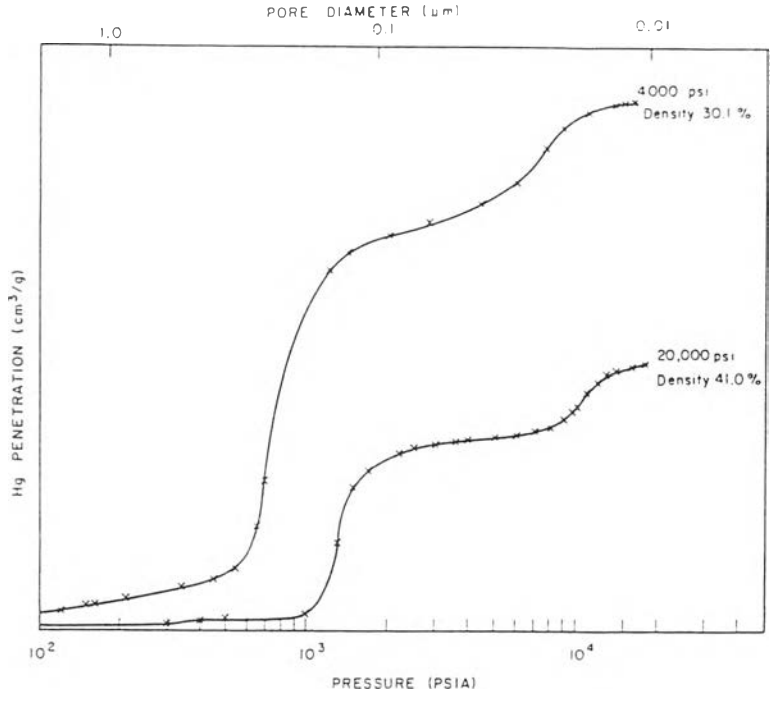
ความเค้นวิกฤติเกิดขึ้นสอดคล้องกับการเปลี่ยนความลาดเอียงของเส้นตรง และเป็นตัวชี้ถึงการแตกของแกรนูล รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นที่ใช้แรงอัดเท่าๆ กันของสารหลายชนิด ซึ่งมีลักษณะของผงที่แตกต่างกัน ในด้านค่าความยืดหยุ่น และความแข็ง(hardness) ทำให้มีพฤติกรรมการอัดต่างกัน

ในการเพิ่มความหนาแน่น ทำโดยเพิ่มแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ และจะทำให้เกิดการกำจัดรูที่มีขนาดใหญ่ในอนุภาค หรือลดขนาดและปริมาณของโพรงอากาศ การกำจัดรูที่มีขนาดใหญ่เป็นสิ่งจำเป็นมาก ช่วยทำให้ความหนาแน่นสูงระหว่างการซินเตอร์ การอัดให้มีความหนาแน่นสูงมากๆ จะช่วยลดการหดตัวในการเผา ทำให้เวลาและอุณหภูมิในการซินเตอร์น้อยลงกล่าวคือประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

การใช้ตัวหล่อลื่นและตัวประสาน จะช่วยเพิ่มแรงจับยึดของอนุภาคที่ติดกัน และทำให้ความแข็งแรงในด้านการอัดดีขึ้น และบทบาทที่สำคัญของสารหล่อลื่นก็คือ ช่วยลดความฝืดของผนังแม่พิมพ์

การยืดหดตัวในการอัด ในช่วงแรงอัดระหว่าง 10,000 ถึง 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การเพิ่มพลังงานในการอัดมากขึ้นทำให้อนุภาคขยายตัวมากขึ้น เมื่อปลดชิ้นงานออกจากแบบ มีการยืดตัวขึ้นกับความเค้น ดังเช่นการอัดโปรตัสเซี่ยมโบรไมด์ให้เป็นชิ้นทดสอบด้วยแรงอัด 80,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้ผงสารมีความหนาแน่นตามทฤษฎี(theoretical density) แต่การอัดผงเซรามิกมีความแตกต่างของการยืดหยุ่นของผงและสารเติมต่างๆ ในการผสมทำให้เปราะขึ้นเหตุมาจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นเมื่อถูกแรงอัดความเครียดของการยืดหดตัว(elastic strain) นี้ เป็นสิ่งที่ทำยุ่งยากในการอัด การอัดด้วยความเร็วสูงและใช้แรงอัดที่เกินกว่า 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในการอัดชิ้นเซรามิกใหญ่ๆ จะทำได้ยาก และเป็นการเพิ่มการสึกหรอให้แม่พิมพ์มากขึ้น

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของผงอลูมิน่า(linde A) ที่นำมาอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่ต่างกัน ชิ้นงานที่อัดด้วยแรงอัดสูง(20,000 psi) จะมีความหนาแน่นสูงซึ่งวัดโดยใช้การอัดด้วยปรอท(mercury penetration) จะอัดได้น้อยกว่าอีกชนิดหนึ่ง



รูปที่ 11 การอัดผงอลูมิน่าที่ทำให้ความหนาแน่นต่างกัน(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

2.2 การปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

พลังงานที่สะสมไว้จากการอัด จะถูกปล่อยออกเมื่อปลดชิ้นงาน(spring back) เป็นผลให้ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้น แรงอัดที่ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุน จะช่วยให้ปลดชิ้นงานได้ง่าย รูพรุนก็จะเป็นทางให้แก๊สผ่านออกไปอย่างช้าๆ เพราะการอัดตัวไม่แน่นเกินไป ส่วนสารที่ช่วยหล่อลื่นจะเป็นตัวช่วยลดแรงอัดในการปลดชิ้นงานการอัดจะสัมพันธ์กับการดึงชิ้นงานออกจากแบบ จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เกิดความเค้นขึ้น และเป็นเหตุให้ชิ้นงานที่ปลดออกมาแตกได้

2.3 การควบคุมตำหนิ(Defect)ในการอัดตัว

การอัดอลูมิน่าที่มีตัวประสานเป็นโพลีเอทธีลีนกลีคอล(polyethylene glycol) 1% ของน้ำหนักความแข็งแรงที่ทนต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับแรงที่ใช้อัด เช่น แรงอัด 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงดึงได้ 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และแรงอัด 60,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงดึงได้ 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การอัดต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะให้คงรูปทรงอยู่ได้ขณะปลดชิ้นงานออก และแข็งแรงต่อการจับ หรือถือก่อนนำไปซินเตอริ่ง ส่วนรอยตำหนิจะเกิดขึ้น หลังจากปลดชิ้นงานออก มักจะเกิดในทิศทางตั้งฉากกับตัวกด และอาจจะมองไม่เห็นจนกว่าจะผ่านการซินเตอริ่ง

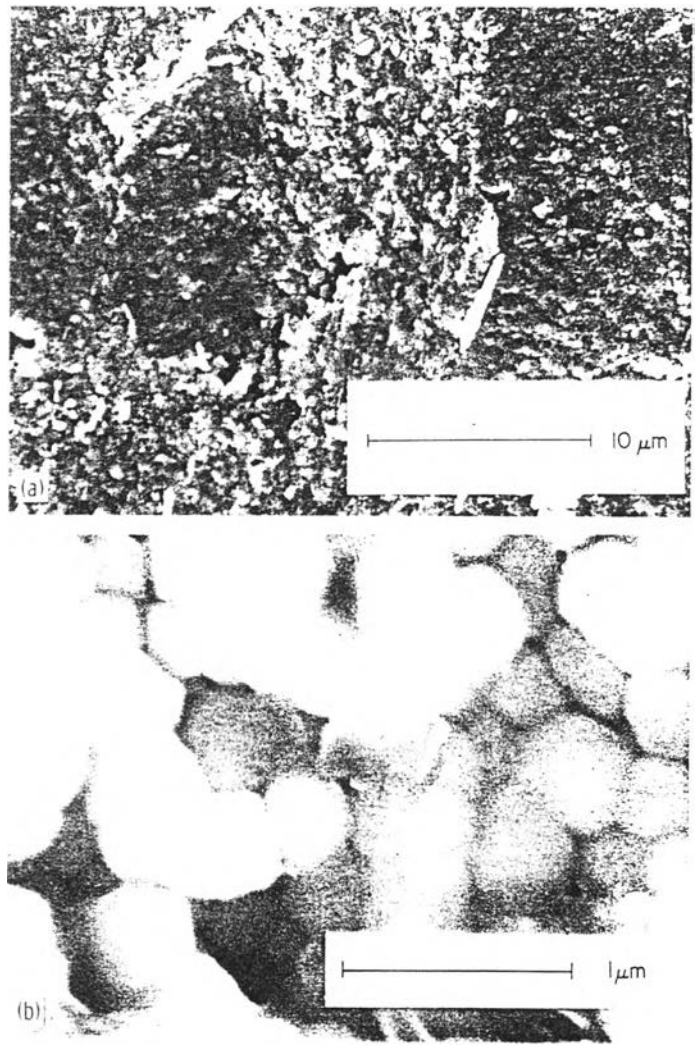
สาเหตุของการเกิดความเค้นในชิ้นงาน

1. การปล่อยของพลังงานที่ทำให้ยืดหรือหดในการอัดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้น

2. เกิดความเค้นที่ผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากความฝืดผนังแม่พิมพ์ในขณะปลดงาน รอยแยกที่เกิดจากการอัดแก้ได้โดยลดแรงอัดลง ทำลักษณะของผงให้ดีขึ้น โดยทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น หล่อลื่นผนังของแม่พิมพ์ เปลี่ยนแม่พิมพ์โดยออกแบบใหม่ นำสารเติมพิเศษมาใช้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การอัดให้มีความหนาแน่นสูง ต้องใช้แรงอัดสูง อัตราการอัดต้องช้า และอัดแล้วต้องหยุดนิ่งเป็นเวลานานๆ ผงจะต้องมีความหนาแน่นสูง ใช้สารหล่อลื่น อัตราความลึกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องน้อย เป็นการอัดแบบสองทิศทาง แม่พิมพ์ต้องเลื่อนขึ้นลงได้ การเติมผงต้องสม่ำเสมอ

การใช้ผงที่มีความละเอียดมากๆ(ultrafine) คือขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอน การซินเตอร์จะทำได้ง่าย แต่ขบวนการอัดทำได้ยาก ภายหลังจากการซินเตอร์แล้วดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบว่ามีโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดจากการเกาะตัวเป็นก้อนก่อนการอัด มีตัวอย่างแสดงให้เห็นดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด(แหล่งที่คัดลอกมาเหมือนรูปที่ 2)

การเตรียมการอัดแบบง่ายๆ ใช้อัดรูปทรงง่ายๆ เช่นแผ่นกลม(disk) การทำแกรนูล ต้องเลือกสารเติมพิเศษผสมกับผงและให้มีการไหลที่ดี ทำหลายๆ ชิ้นทดลองอัดด้วยแรงอัดต่ำสุดที่ทำให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการจับหรือถือ แล้วค่อยๆ เพิ่มแรงอัดให้สูงขึ้นจนถึงจุดก่อนที่แรงอัดจะทำให้เกิดการแตกเป็นแผ่น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้และความหนาแน่นหลังการอัด(green density) ทำได้โดยการหาความหนาแน่นแบบหยาบๆ คือน้ำหนักต่อปริมาตรของทรงเรขาคณิต ชิ้นงานที่ความหนาแน่นสูงสุดหลังอัดที่ไม่มีรอยแยกหรือต่ำหนิจะให้ความหนาแน่นภายหลังการซินเตอร์ที่สูงสุดเช่นกัน แต่ต้องพิจารณากระบวนการซินเตอร์ด้วย ฉะนั้นการอัดจะเกี่ยวข้องกับการเผาหรือการซินเตอร์ให้ได้ลักษณะที่ต้องการ เมื่อได้การอัดที่เหมาะสมและนำไปเผาแล้ว ก็จะนำชิ้นงานมาหาค่าพิกัดของขนาดหลังจากการเผาจะทำให้ทราบเปอร์เซนต์การหดตัวของชิ้นงาน