



ข้อมูลเบื้องต้นทางวิชาการ

ในเรื่องนี้เกี่ยวกับการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินาใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาไว้หลายท่าน ซึ่งผู้เชี่ยวชาญในขั้นนี้ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและประมวลความรู้จากตำรา เอกสาร วารสารต่าง ๆ ตลอดจนความรู้จากการศึกษาดูงาน ซึ่งจะได้จำแนกอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลความรู้ทางวิชาการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.1 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินาในธรรมชาติอาจเกิดเป็นสารเดี่ยวหรือสารประกอบก็ได้ เป็นวัตถุดิบตัวหนึ่งที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเซรามิก คือ ใช้ผสมทั้งในเนื้อดินปั้น และน้ำเคลือบ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมไฟน์เซรามิก ใช้เป็นวัตถุดิบหลักตัวหนึ่งในการทำสิ่งใหม่ ๆ ทางเซรามิก เช่น พวกวัตถุดิบไฟ สิ่งขัดถู เนื้อ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ กระจกยานอวกาศ หลอดไฟชนิดใช้แรงดันสูง และชิ้นส่วนต่าง ๆ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น แผ่นรองรับวงจร ที่จะได้ศึกษาในครั้งนี้

อะลูมินา เป็นวัตถุดิบไฟ และเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง จะมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ในธรรมชาติอาจเกิดในรูปของสารบริสุทธิ์ เช่น คอรันดัม และพวกอัญมณี (พลอย) หรือเกิดในรูปของสารประกอบไฮเดรต เช่น บ็อกไซต์ ยิบไซต์ หรือไดอะสเปอร์

อะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก จัดแบ่งตามรูปผลึก แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกัน คือ แบบชนิด แอลฟา-อะลูมินา แกมมา-อะลูมินา และเบตา-อะลูมินา

แอลฟา-อะลูมินา เป็นอะลูมินาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ทนต่ออุณหภูมิสูง และไม่แปรเปลี่ยนรูปแบบ ที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะเย็นตัว

แกมมา-อะลูมินา เป็นชนิดที่เกิดจากการใช้อะลูมินาไฮดรอกไซด์ มาทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันในอุณหภูมิต่ำ ที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส แต่ถ้าได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น ถึง 1150-1200 องศาเซลเซียส ก็จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นแอลฟา-อะลูมินา

เบตา-อะลูมินา เป็นอะลูมินาชนิดที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ แอลฟา-อะลูมินา ผสมกับโซเดียมออกไซด์ ในอัตราส่วนอะลูมินา 11 ส่วน กับโซเดียมออกไซด์ 1 ส่วน ($11 \text{ Al}_2\text{O}_3 : \text{Na}_2\text{O}$) หรืออะลูมินา 12 ส่วน กับโซเดียมออกไซด์ 1 ส่วน ($12 \text{ Al}_2\text{O}_3 : \text{Na}_2\text{O}$) แล้วผ่านการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอะลูมินาที่ใช้อุตสาหกรรมทั่วไป (Commercial grade)

ตารางที่ 5 สูตรทางเคมี และรูปแบบผลึกของอะลูมินาชนิดต่าง ๆ (Singer, 1963)

สูตรทางเคมี	ชื่อแร่	รูปแบบผลึก	
		ระบบอังกฤษ	ระบบอเมริกา
Al_2O_3	คอร์ันดัม	α	α
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	ไดอะสเปอร์	α	β
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	ยิบไซท์	α	α
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	โบไมท์	γ	α
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	เบย์ไรท์	α	β

ตารางที่ 6 การแปรเปลี่ยนรูปแบบผลึกของอะลูมินา (Singer, 1963)

แบบ γ ณ.อุณหภูมิต่ำ (γ - Series at low temperature)	สูตรทางเคมี (Chemical formula)	แบบ α ณ.อุณหภูมิสูง (α - Series at high temperature)
ยิปโซท์	$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	เบย์ไรท์
บ็อกไซต์	$Al_2O_3 \cdot H_2O$	ไดอะสปอร์
α - อะลูมินา	Al_2O_3	คอร์ันดัม

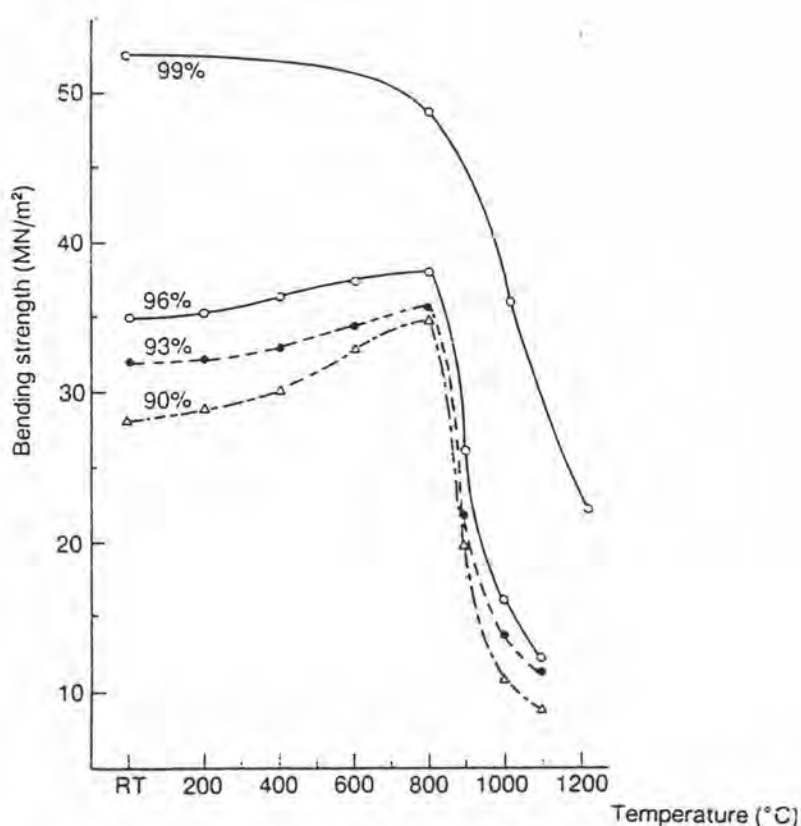
ตารางที่ 7 สมบัติของอะลูมินา (Al_2O_3) (Singer, 1963)

คุณสมบัติ	γ - อะลูมินา	α - อะลูมินา
ความถ่วงจำเพาะ (S.G.)	3.5 - 3.9	4.00
รูปผลึก (Crystalline form)	เฮกซะโกนอล	ไตรโกนอล
น้ำหนักโมเลกุล (M.W.)	101.94	101.94
จุดหลอมตัว (M.P.)	2050 องศาเซลเซียส	2050 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (B.P.)	2250 องศาเซลเซียส	2250 องศาเซลเซียส

ส่วนคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของอะลูมินาที่เผาถึงจุดสุดท้ายนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสม (Composition) ความพรุนตัว (Porosity) ขนาดเม็ด (Grain size) และวิธีการขึ้นรูป (Forming method)

อะลูมินาในอุตสาหกรรมไฟน์เซรามิก ที่ใช้ประกอบกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากใช้ทำแผ่นรองรับวงจรต่าง ๆ เช่น ICS LSTIs ใช้ในการทำแผ่นรองรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องคิดเลข กล้องถ่ายภาพ นาฬิกา วิทยุ โทรทัศน์ เครื่องซักผ้า คอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋ว จนถึงขนาดใหญ่ ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรต่าง ๆ เป็นต้น มีความหนาตั้งแต่ 0.65-5.00 มิลลิเมตร

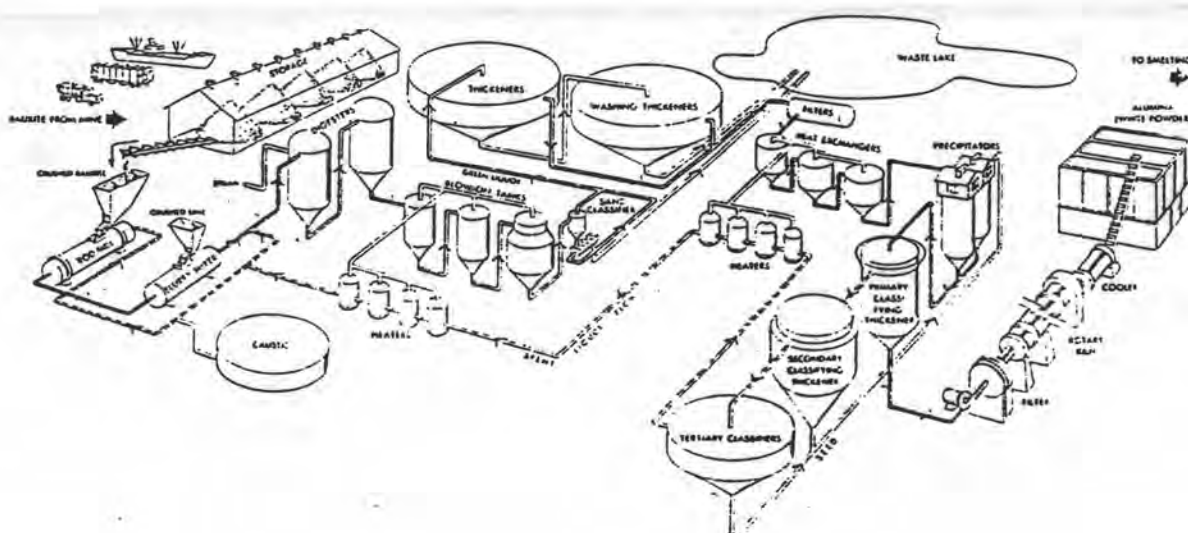
ความแข็งแรง (Bending Strength) ของอะลูมินาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสม (Composition) (ดูภาพ 3) ความพรุนตัว (Porosity) ขนาดเม็ด (Grain size) และอุณหภูมิในการเผา (Firing temperature)



ภาพที่ 3 Bending strength ของอะลูมินาเซรามิกที่มีอัตราส่วนต่าง ๆ กัน

ที่มา : Structure ceramics p.167

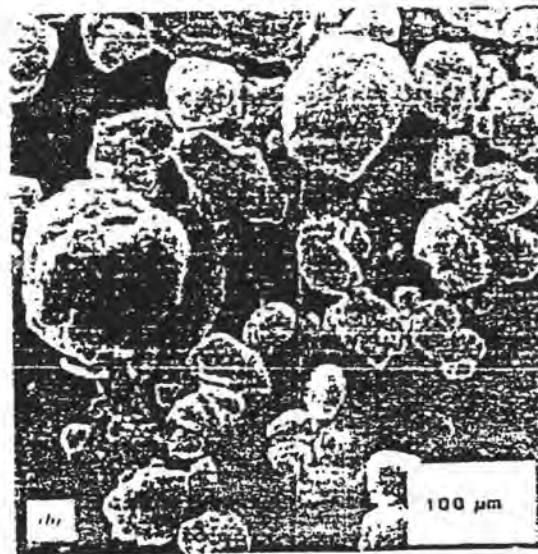
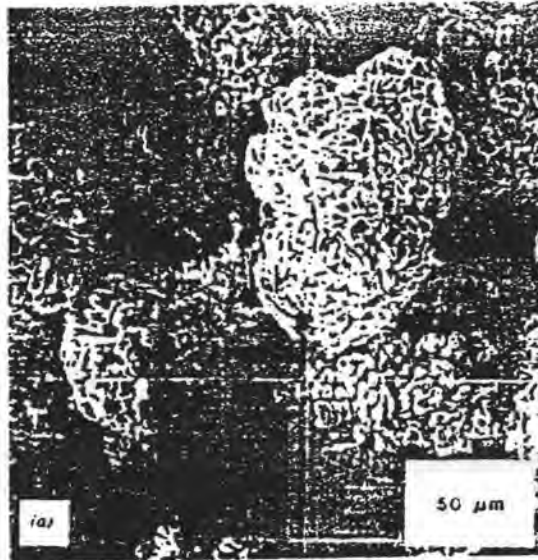
ในปัจจุบันมีอะลูมินาชนิดหนึ่งเรียกว่า แทบูลาร์-อะลูมินา เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูงตั้งแต่ 92-99.8% เป็นแอลฟา-อะลูมินา ผ่านกระบวนการแต่งแร่ ที่เรียกว่าเบเยอร์ (Bayer process) เพื่อแยกพวกสิ่งเจือปน เช่น SiO_2 , Fe_2O_3 และ TiO_2 ออกไป แล้วผ่านการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1650 องศาเซลเซียส เป็นเกรดที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ วัตถุดิบหลักที่ใช้ คือ แร่บอกไซต์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการสกัดแร่บอกไซต์โดยกระบวนการเบเยอร์

ที่มา : Reed, 1988, P.37

อะลูมินาที่ผ่านการเผาในกระบวนการเบเยอร์ มีลักษณะของเกรน ดังแสดงในภาพที่ 5

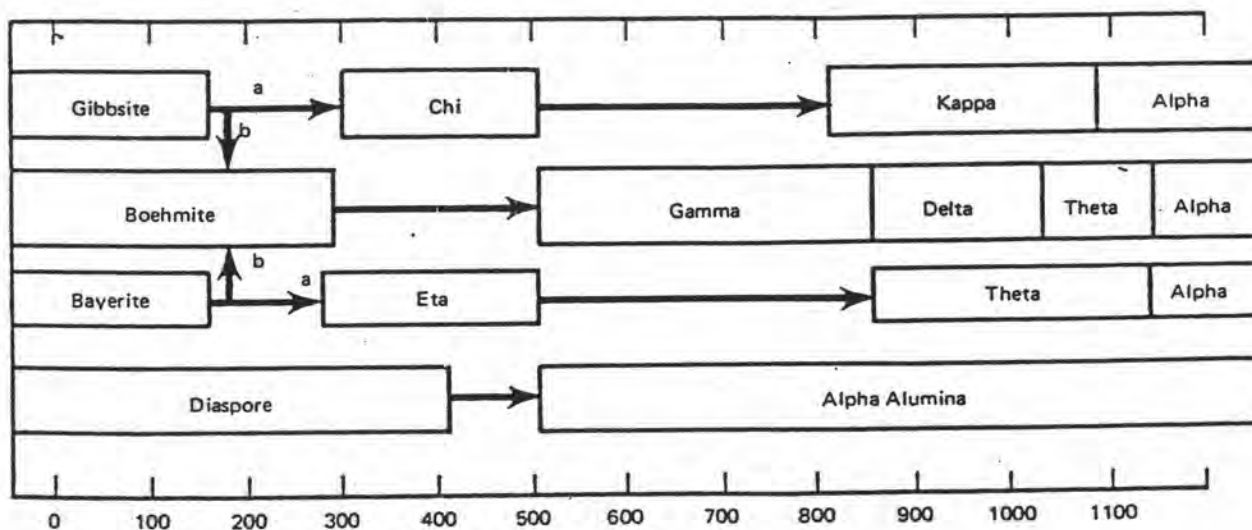


ภาพที่ 5 (ก) รูปลักษณะของ เกรนก่อนอบ

(ข) รูปลักษณะของ เกรนหลังอบ

ที่มา : Reed, 1988, p.39

แร่บอกไซต์ เป็นแร่ที่ประกอบด้วยสารอะลูมิเนียมอยู่ในช่วง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับแหล่งแร่ ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบนผืนโลก สิ่งเจือปนหลัก ที่มักพบในแร่บอกไซต์ คือ ซิลิกา เหล็กออกไซด์ และไทเทเนียมออกไซด์ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปโดยกระบวนการเบเยอร์ (Bayer process) โดยนำแร่บอกไซต์ มาทำให้สลายตัว โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีการควบคุมความดัน และอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส และทำการแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก ก็จะได้อะลูมินาไฮเดรตที่มีปริมาณน้ำในโครงสร้างผลึกปริมาณต่าง ๆ กัน ต่อไปก็นำอะลูมินาไฮเดรตนี้ไปผ่านการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้น เพราะการสูญเสียน้ำในผลึกไป (ดูภาพที่ 6) ถ้านำอะลูมินาไฮเดรตนี้ ไปผ่านการเผา (Calcined) ที่ 1650 องศาเซลเซียส ก็จะได้ แอลฟา-อะลูมิเนียม ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)



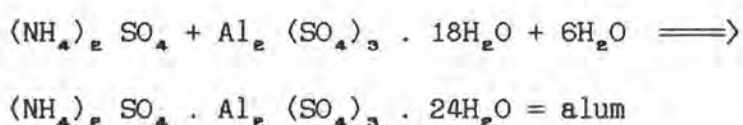
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอะลูมินาไฮเดรตในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กัน

ที่มา : Gilzen, 1970, p.17



อะลูมินาที่เตรียมโดยวิธีการเบเยอร์และผ่านการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิสูงจะมีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เป็นสิ่งเจือปนอื่นได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีปนอยู่เพียงน้อยนิด

เนื่องจากวิทยาการและเทคโนโลยี มีการพัฒนาไม่หยุดยั้ง ในปัจจุบันจึงมีผู้ค้นคิด วิธีการเตรียมอะลูมินาที่บริสุทธิ์ และมีความละเอียดยิ่งขึ้น โดยวิธีการทางเคมีที่เรียกว่าอะลัม (Alum) โดยอาศัยหลักการละลาย และตกผลึกซ้ำ เพื่อลดสิ่งเจือปน (Impurities) โดยใช้แอมโมเนียมซัลเฟต ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมซัลเฟตไฮเดรต ดังสมการ



จากนั้นจึงนำอะลัมที่เตรียมได้ไปผ่านการเผา (Calcined) ที่ 1000 องศาเซลเซียส จะได้แกมมาอะลูมินา และถ้าเผาถึง 1150 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนรูปผลึกเป็น แอลฟาอะลูมินา ซึ่งจะมีเสถียรภาพสูงสุด และมีความบริสุทธิ์ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ (JACK L.HENRY and HAL J.KELLY, 1965)

2.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์หรือแมกนีเซียถือได้ว่าเป็นสารที่สำคัญตัวหนึ่งของอุตสาหกรรมเซรามิกซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ในรูปของแมกนีไซต์ (MgCO_3) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ถูกนำไปผ่านกระบวนการล้าง การตกตะกอน การกรอง เพื่อแยกสารที่ไม่ต้องการออกและผ่านการเผา (Calcined) ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (< 900 องศาเซลเซียส) ก็จะได้แมกนีเซีย ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 40.32

คุณสมบัติของแมกนีเซียมขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตหรือวิธีการเตรียมและอุณหภูมิในการเผา (Calcine) ตลอดจนสิ่งเจือปนอื่นที่ผสมอยู่ (Impurities) การเพิ่มเวลา และอุณหภูมิในการเผาจะทำให้ขนาดของผลึกโตขึ้น แต่ความพรุนตัวและการหดตัวขยายตัวจะลดลง (Albert N.Copp, 1990) แต่ถ้าเรานำแมกนีเซียมไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นแคดเบิร์ตแมกนีเซียม ที่มีการหดตัวขยายตัวเมื่อถูกความร้อนน้อย แต่จะทนต่อการเสียดทานสูง ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในงานวัสดุทนไฟ ถ้าเรานำแมกนีเซียมไปเผา ถึง 2750 องศาเซลเซียส ก็จะหลอมตัว หรือที่เรียกว่าฟิวส์แมกนีเซียม ซึ่งจะมีความแข็งสูง ทนต่อการขัดสี และจะไม่มีการหดหรือขยายตัวเมื่อถูกความร้อน จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ที่ต้องการคุณภาพสูง หรือใช้เป็นวัสดุทนไฟ

แมกนีเซียม (MgO) นี้ถ้าใช้อย่างโดดเดี่ยวจะทนไฟสูง แต่ถ้าใช้ร่วมกับสารอื่น เช่น อะลูมินา จะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์อย่างแรง (Strong flux) คือ การผสมแมกนีเซียม (MgO) ในปริมาณ 0.25-4.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในอะลูมินา จะมีผลทำให้อุณหภูมิในการเผา (Sintering) ลดลง และทำให้อะลูมินาที่ผ่านการเผา (Sintered) นั้น มีความหนาแน่นสูงขึ้น ความพรุนตัวลดลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อการป้องกันการโตของเกรน (Grain growth) ได้ด้วย (Coble, 1961)

2.3 สารช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant)

สารช่วยการกระจายลอยตัว หมายถึง สารที่เติมเข้าไปในส่วนผสมแล้ว ทำให้ผิวของอนุภาค (Particle) เกิดประจุที่เหมือนกันเป็นจำนวนมาก เป็นการเพิ่มประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวของอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิต ทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยในสารละลายได้ เช่น ในน้ำดิน เราใช้โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือ โซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ถ้าใช้ในอะลูมินาหลายตัวด้วยกัน ดังนี้

สารช่วยการกระจายลอยตัวที่ใช้กับอะลูมินา

Fatty acids (glyceryl trioleate)

Fish oil

Synthetic surfactants (benzenesulfonic acid)

Oil-soluble sulfonates

Alkylaryl polyether alcohols

Ethyl ether of poly (ethylene glycol)

Ethyl phenyl glycol

Polyoxyethylene acetate

Polyoxyethylene ester

Alkyl ether of poly (ethylene glycol)

Oleic acid ethylene oxide adduct

Sorbitan trioleate

Phosphate ester

Steric acid amide ethylene oxide adduc

Sodium polyacrylate

Ammonium polyacrylate

Sodium citrate

Sodium succinate

Sodium tartrate

Sodium polysulfonate

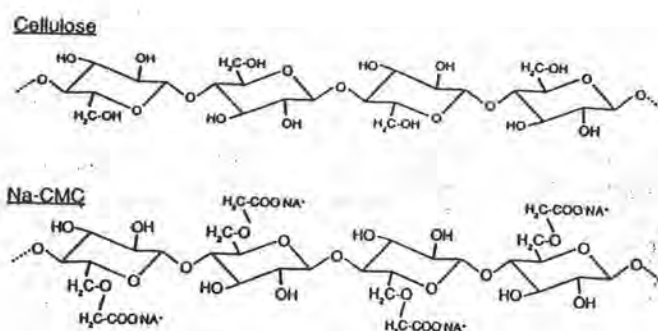
Ammonium citrate

(Richard E.

Mistler, 1990)

(Reed, 1989)

ในปัจจุบันมีสารตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยกระจายลอยตัว และสารช่วยยึดเกาะ สารตัวนั้นคือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na. CMC) ซึ่งเป็นทั้งสารชนิดคอลลอยด์เล็กโตรไลท์ และออสโมติกไบโเตอร์ สารตัวนี้เป็นสารช่วยการกระจายลอยตัวได้ดี เพราะสามารถดูดซับบนผิวของอะลูมินาไดดี (ANDREW J. RUYS and CHARLES C. SORRELL, 1990)



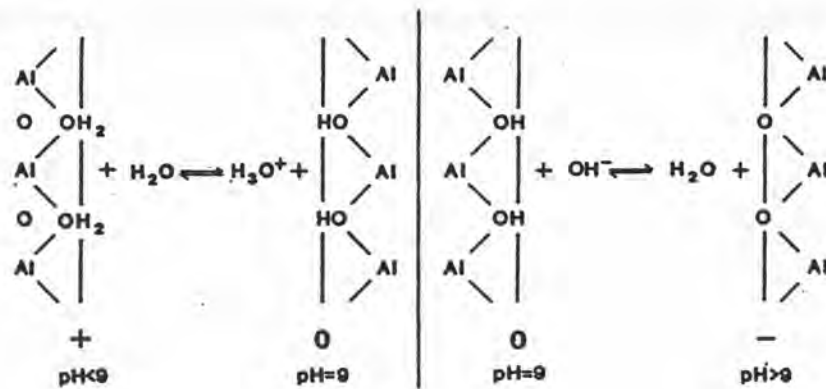
ภาพที่ 7 การทำปฏิกิริยาของ OH^- จับยึดตัวเป็นกลุ่มกับ $\text{OCH}_2\text{COO}^- \text{Na}^+$

ที่มา : Andrew J. Ruys and Charles C. Sorrel, 1990

การกระจายและลอยตัวในน้ำของอะลูมินา อนุภาคของเนื้อสารควรจะมีการกระจายขนาด เพื่อให้ได้อะลูมินาสเลอรี่คุณภาพดี การกระจายขนาดจะต้องมีอนุภาคปริมาณหนึ่งซึ่งมีขนาดเป็นคอลลอยด์ ($< 0.2 \mu\text{m}$) และจะต้องมี สารที่มีคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และเคมี ที่จะช่วยทำให้เกิดการกระจายลอยตัวได้ดีในของเหลว เมื่อเติมสารตัวที่ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัว (Deflocculant) ลงไปในของเหลว จะมีผลต่อความหนืด (Viscosity) ของสเลอรี่เช่นการเติม 0.5% ของ Sodium Carboxylated Polyelectrolyte หรือ DAVAN 7 ในอะลูมินาสเลอรี่

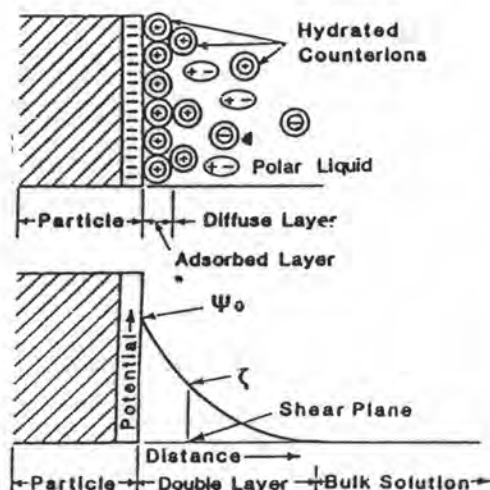
สารช่วยการกระจายลอยตัวของอะลูมินาสเลอรี่ใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งจะมีผลต่อผิวของอนุภาค (Surface shielding) ของ H^+/OH^- นอกจากนั้นสารช่วยการกระจายลอยตัว ยังขึ้นอยู่กับ pH ของอะลูมินาด้วย

ผงอะลูมินาเมื่อได้รับความชื้น บริเวณผิวของอนุภาค จะดูดความชื้นและจับตัวกันเป็นกลุ่มเล็ก ๆ (Agglomeration) เมื่อนำไปผสมกับน้ำในกระบวนการผสมแบบเปียก (Wet process) ดังแสดงในภาพที่ 8 การเติมสารช่วยการกระจายตัวในอะลูมินาเลอรัรี สารตัวนั้นจะมีคุณสมบัติทำให้ประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวของอนุภาคของอะลูมินาเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคของอะลูมินา ทำให้เกิดการแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้ ในหลักการที่ว่า ถ้าเกิดประจุเหมือนกันอนุภาคจะผลักกัน ถ้าเกิดประจุต่างกันอนุภาคจะดูดกัน ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาระหว่างผิวของอะลูมินาที่อิมิดด้วยน้ำกับ H_3O^+ หรือ OH^-

ที่มา : Reed, 1989, p.134



ภาพที่ 9 Electrical double-layer สำหรับการทำให้อนุภาคเกิดประจุในของเหลว
มีขั้ว และการเกิดไฟฟ้าสถิต

ที่มา : Reed, 1989, p.140

2.4 สารช่วยการยึดเกาะ (Binders)

สารช่วยยึดเกาะ หมายถึง สารที่ใช้ผสมเพื่อช่วยในการเกาะตัวของอนุภาคให้ดีขึ้น
ในงานเกี่ยวกับเซรามิกทั่ว ๆ ไป ใช้สารพวกโพลีเมอร์

เนื่องจากอะลูมินาเป็นสารที่ไม่มีความเหนียว จึงจำเป็นต้องเติมสารช่วยการยึด
เกาะ เพื่อช่วยในการขึ้นรูป (Forming) และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงที่จะเคลื่อนย้ายได้สะดวก
ในขณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Greenware)

ตัวอย่างสารช่วยการยึดเกาะที่ใช้กับอะลูมินา (Richard E.Mistler, 1990)

- Cellulose acetate butyrate
- Nitrocellulose
- Petroleum resins
- Poly (ethylene)

- Polyacrylate esters
- Poly (methyl methacrylate)
- Poly (vinylalcohol)
- Poly (Vinyl chloride)
- Vinyl chloride acetate
- Ethyl cellulose
- Poly (tetrafluorethylene)

สารช่วยยึดเกาะ (Binders) ที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถเป็นตัวเพิ่มความเหนียวของส่วนผสมได้ดี โดยการเติมในอัตราที่น้อยกว่า

8-10 เปอร์เซ็นต์

2. แก๊สที่เกิดขึ้น จากการสลายตัวระหว่างการเผา ไม่มีอันตรายต่อคนและชั้นงาน
3. เมื่อผ่านการเผาแล้ว จะสลายตัวหมดไม่มีสิ่งใดเหลืออยู่ในเนื้อชิ้นงาน
4. มีราคาถูก
5. มีความทนทานต่อบรรยากาศ คือไม่ทำให้ชิ้นงานเสื่อมระหว่างที่เก็บ
6. สามารถใช้ร่วมกับสารช่วยในการขึ้นรูปอื่นอย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 สารไล่ฟองอากาศ (Defoamer)

สารไล่ฟองหรือป้องกันการเกิดฟอง เป็นสารที่มีค่าแรงตึงผิวต่ำ ป้องกันการเกิดฟองในสารละลายน้ำ เช่น ฟลูออโรคาร์บอน ซิลิโคน แอลกอฮอล์โมเลกุลสูง เป็นต้น

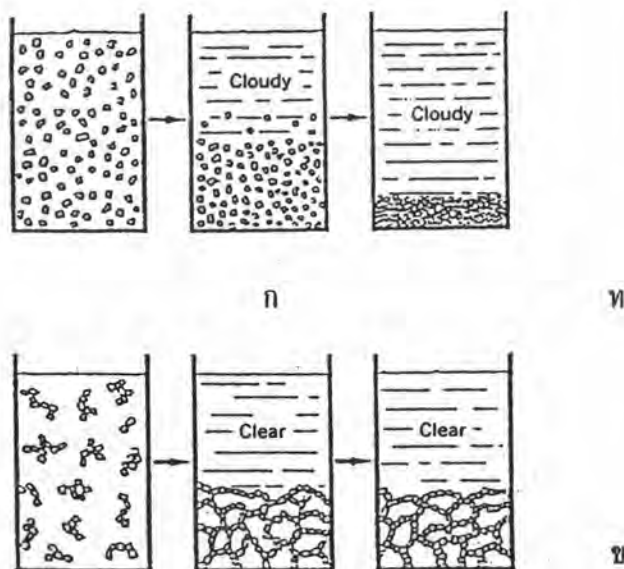
2.6 พฤติกรรมการไหลตัวของวัสดุทางเซรามิก (Rheology of ceramic materials)

พฤติกรรมทาง Rheology ของวัสดุทางเซรามิก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปแบบหล่อ (Casting slips) การควบคุม rheology ที่ดีจะมีผลต่อการขึ้นรูป (Forming)

ความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผา (green strength) ดี และความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่เผาแล้ว (Firing strength) สูง ตลอดจนมีการหดตัว (shrinkage) น้อย และมีแรงเกาะกันระหว่างอนุภาค (Particle) มาก พฤติกรรมที่กล่าวมานี้ จะมีผลต่อความหนาแน่น (Density) ของผลิตภัณฑ์ด้วย ซึ่งเกี่ยวข้องกับสิ่งต่อไปนี้

ความหนืด (Viscosity) ของอะลูมินาสเลอรั้จำเป็นจะต้องมีการควบคุมให้มีความสม่ำเสมอ ค่านี้สามารถวัดได้โดย Viscometer มีหน่วยวัดเป็น "พอยส์" (poise)

ทิกโซโทรปี (Thixotropy) หมายถึง พฤติกรรมของสเลอรั้ที่มีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อทิ้งสเลอรั้ไว้เฉย ๆ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่า เกิดโครงสร้างชั้นภายในสเลอรั้ ดังภาพที่ 10 ซึ่งโครงสร้างนี้ จะถูกทำลายโดยวิธีการกวน ค่านี้วัดได้โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วงระยะเวลาหนึ่ง



ภาพที่ 10 การเกิดโครงสร้างภายในของอะลูมินาสเลอรั้

(ก) ขณะทำการกระจายลอยตัว

(ข) ขณะตกตะกอน

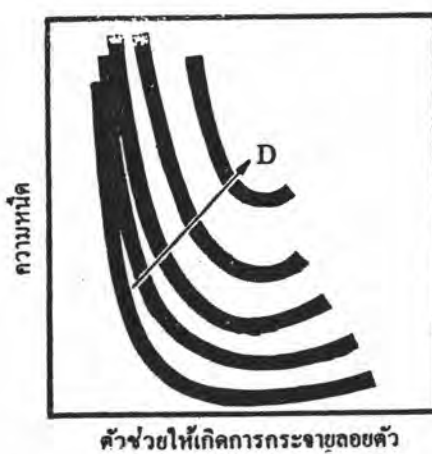
ที่มา : Reed, 1988, p. 148



ภาพที่ 11 : การกระจายลอยตัว

ที่มา : ปรีดา นิรม์ขาวขำ, 2532, p.118

เมื่อปริมาณตัวช่วยให้เกิดการกระจายลอยตัว (Deflocculated) เพิ่มขึ้นการกระจายลอยตัวจะมีมากขึ้นความหนืดจะลดลง มีความหนืดต่ำสุด (Full Deflocculated) ถ้าเติมตัวช่วยให้เกิดการกระจายลอยตัวลงไปอีกความหนืดจะมีค่าสูงขึ้น



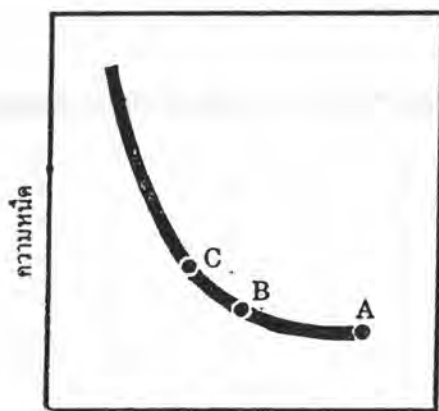
ภาพที่ 12 ผลของความหนาแน่น

ที่มา : ปรีดา นิรม์ขาวขำ, 2532, p. 118

แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่น (D) ของสเลอรี่ต่ำกว่า จะมีความหนืดต่ำกว่า เมื่อสภาวะอื่น ๆ เหมือนกัน มีวิธีการ 3 วิธี ในการทำให้สเลอรี่มีความหนืดเปลี่ยนไป คือ

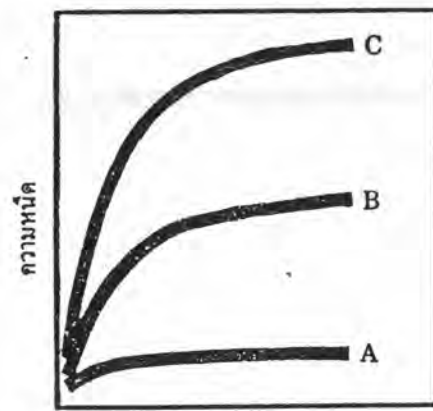
1. เติมสารช่วยกระจายลอยตัว
2. เติมน้ำ
3. ระเหยน้ำ

อย่างไรก็ตาม ต้องระลึกไว้ว่าวิธีการเหล่านี้มีผลต่อ Thixotropy แตกต่างกัน



ตัวช่วยให้เกิดการกระจายลอยตัว

(ก)



เวลา

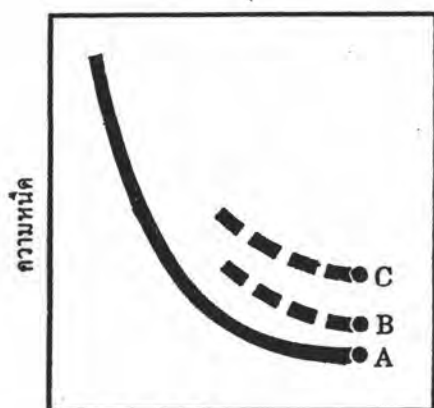
(ข)

ภาพที่ 13 อิทธิพลของสารช่วยการกระจายลอยตัวต่อ Thixotropy

- (ก) กราฟแสดงการกระจายลอยตัวในสเลอรี่จุด A,B และ C แสดงให้เห็นความแตกต่างของความหนืดและปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัวที่เติมลงไปในสเลอรี่
- (ข) กราฟแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของ Thixotropy โดยทั้งสเลอรี่ A,B และ C ใช้นาน 60 นาที

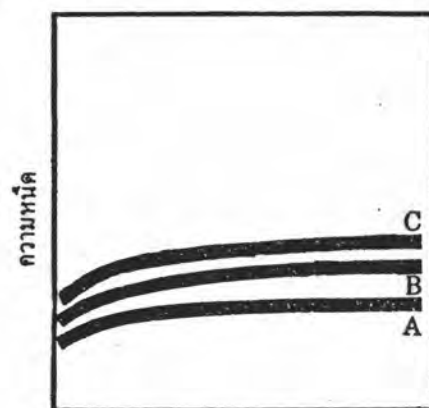
ที่มา : ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2532, p. 119





ตัวช่วยให้เกิดการกระจายตัวของตัว

(ก)



เวลา

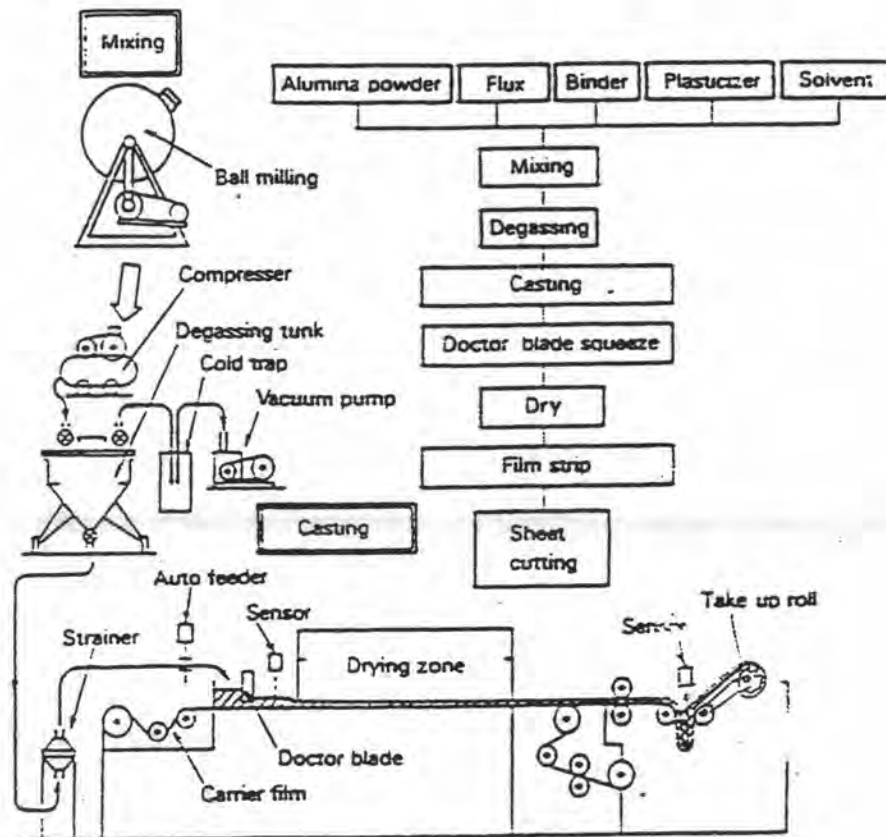
(ข)

ภาพที่ 14 อิทธิพลของน้ำต่อ Thixotropy

- (ก) แสดงให้เห็นว่า สามารถปรับความหนาแน่นได้โดยวิธีเติมน้ำ และจะสามารถปรับความหนืดตาม ภาพที่ 13 (ก) ได้
- (ข) แสดงให้เห็นว่า หลังทิ้งสเลอรี่ไว้นาน 60 นาที จะเกิดโครงสร้างในสเลอรี่ ซึ่งทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไป

ที่มา : ปรีดา พิมพ์ขาวซ่า, 2532, p. 119

2.7 กระบวนการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา (Alumina Substrates Fabrication)

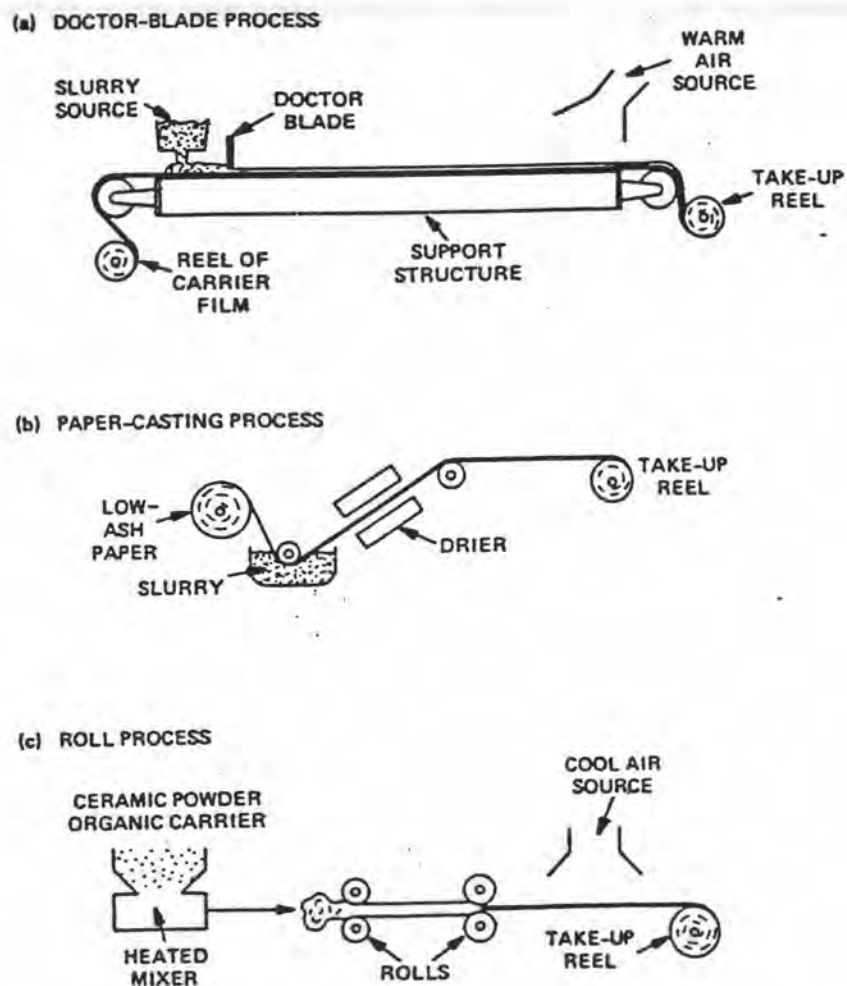


ภาพที่ 15 กระบวนการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินาที่ใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา : Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980, p.191

แผ่นรองรับอะลูมินาเริ่มแรกจะผลิตด้วยวิธีการอัด (Pressing) หรือการหล่อ (Sheet Casting) การหล่อแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ คือ Extrusion, Calender roll method และ doctor blade method ดังแสดงในภาพที่ 15 วิธี doctor blade เป็นวิธีการหลักที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา เพราะเป็นวิธีที่ง่ายสะดวก สามารถควบคุมความหนาของแผ่นได้ดี (Sheet thickness) ได้อย่างแม่นยำ เป็นวิธีการที่ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาจนเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง คือ สะดวก รวดเร็ว จะมีเสถียรภาพทางขนาดสูง (Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada)

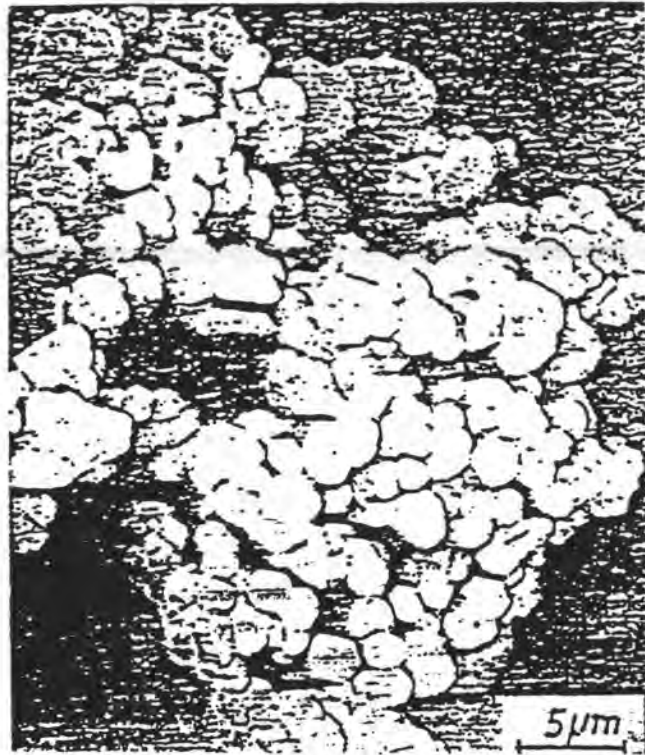
การหล่อด้วยวิธีดอกเตอร์เบลคนี้ เป็นวิธีการที่นำอะลูมินาสเลอรี่ไปหล่อ (Cast) บนสายพานที่กำลังเคลื่อนที่ เริ่มแรกถูกนำไปใช้ในการผลิตเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกของสารไทเทเนียม (TiO_2) ในปี ค.ศ.1947 หลังจากนั้นในปี ค.ศ.1960 ได้มีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินาสำหรับใช้งานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในอเมริกาได้มีบุคคลหลายท่านที่ได้นำวิธีการนี้มาใช้ เช่น J.L. Park, J.J. Thompson, H.W. Stetson, W.J. Gyurk เป็นต้น



ภาพที่ 16 การขึ้นรูป แผ่นรองรับอะลูมินา

ที่มา : P. Boch and T. Chartier, 1988, p.821

2.7.1 การเตรียมผงอะลูมินา อะลูมินาที่ใช้ส่วนมากจะเป็นชนิดที่ผลิตด้วยวิธีการเบเยอร์ (Bayer method) เพราะว่าผงอะลูมินาที่ผลิตด้วยวิธีการนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ (Stable) ทำให้มีคุณภาพและราคาได้มาตรฐานด้วย ซึ่งผงอะลูมินาที่เตรียมโดยวิธีการเบเยอร์นี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ลักษณะของอะลูมินาที่ผลิตโดยวิธีเบเยอร์

ที่มา : Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980, p.186

ขนาดของผงอะลูมินาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา ส่วนมากจะมีขนาด 1-3 μm . ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิในการเผาด้วย ส่วนคุณสมบัติของแผ่นรองรับอะลูมินานั้น ส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) ของส่วนผสม และสิ่งเจือปน (Impurities) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ในช่วงนี้จะต้องมีการควบคุม Particle size, Particle size distribution, Specific surface area ของผงอะลูมินาด้วย เพราะว่าคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะมีผลต่ออุณหภูมิในการเผา (Sintering) การหดตัว

(Shrinkage) ความหนาแน่นขณะเป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Green density) และความหนาแน่นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Bulk density) ด้วย

2.7.2 ฟลักซ์ (Chemicals recycle sheets)

ผงอะลูมินาที่มีขนาด 1-3 μm . จะต้องผ่านการเผา (Sintered) ที่อุณหภูมิสูงถึง 1700-1750 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิระดับนี้จะสูงกว่าอุณหภูมิที่เตาเผาสามารถจะทนได้ โดยทั่วไปเตาเผาชนิดอุณหภูมิสูงจะใช้งานอยู่ได้ระหว่างอุณหภูมิ 1500-1650 องศาเซลเซียส ถ้าเติมฟลักซ์เพียงเล็กน้อยลงในส่วนผสมจะสามารถทำให้ลดอุณหภูมิในการเผาได้ นั่นหมายถึงเราสามารถประหยัดต้นทุนลงได้อย่างมากทีเดียว ไม่ว่าจะเป็นตัวต้นทุนในการซื้อเตาเผาหรือค่าเชื้อเพลิง โดยปกติแล้ว ฟลักซ์ (Sintering promotor agents) ที่เติมลงในอะลูมินาเซรามิกจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดเฟสของเหลว (Liquid phase) ในการเผาให้เร็วขึ้น คือช่วยลดอุณหภูมิในการเผานั้นเอง อย่างไรก็ตามชนิดและคุณสมบัติทางเคมีของฟลักซ์ส่วนใหญ่นั้น จะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติ (Properties) ของแผ่นรองรับอะลูมินา ดังนั้นในการเลือกส่วนนี้จึงสำคัญมาก ฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่ว ๆ ไป ได้แก่ แมกนีเซีย (MgO) แคลเซีย (CaO) หรือทัลค์ ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวนี้ จะมีจุดหลอมต่ำขณะเผาพร้อมสารอะลูมินา และทำให้เกิดเฟสของเหลว (Liquid Phase) ขึ้นในเนื้ออะลูมินา ทำให้โครงสร้างของอะลูมินาที่เผาแล้วเกาะกันแน่นขึ้น โดยเฉพาะแมกนีเซีย จะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการโตของเกรน (Grain growth) ของอะลูมินาได้ด้วย

2.7.3 การบดผสม (Mixing)

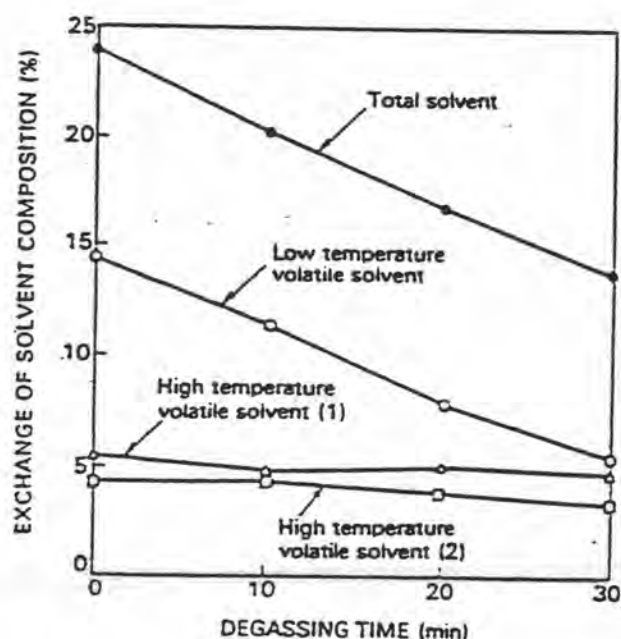
การบดผสมนี้ เป็นกระบวนการทำให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous mixture) ระหว่างผงอะลูมินา (Alumina powder) สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ (Binder) สารช่วยละลาย (Solvent) สารช่วยกระจายลอยตัว (Deflocculant) สารช่วยลดอุณหภูมิในการเผา (Flux) และอื่น ๆ กระบวนการนี้ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด เพราะ

ว่าไม่ว่าจะเป็นวิธีการผสม การบด การกระจายลอยตัว การไล่ฟอง และอื่น ๆ ในกระบวนการบดผสม มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ (Properties) ของแผ่นรองรับอะลูมินาทั้งสิ้น

การบดผสมสอรรี่ในปัจจุบัน ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้มากที่สุดก็คือ การบดด้วยหม้อบด (Ball mill) หม้อบดและลูกบด จะทำด้วยอะลูมินา 86 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป (High alumina) เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราส่วนการผสมแปรเปลี่ยนไป เนื่องจากการสึกกร่อนของผนังหม้อบดและลูกบด เพื่อที่จะได้อะลูมินาสอรรี่ที่มีคุณภาพคงที่ (Stable)

ขณะที่ส่วนผสมอยู่ในลักษณะสลิป จะมีฟองอากาศ (Air bubbles) จำนวนมากเข้าไปช่วงระหว่างการบดผสม ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) ของแผ่นรองรับอะลูมินา ฉะนั้นจำเป็นจะต้องมีการขจัดออกไป โดยการเติมสารช่วยไล่ฟอง (Degassing) ซึ่งจะทำพร้อมกับการบดผสม

ถ้ามีการไล่ฟอง (Degassing) ควรทำอย่างระมัดระวัง เพราะขณะที่ฟองอากาศถูกขจัดออกไป จะเป็นช่วงระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลาย (Solvent formation) ซึ่งตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลาย แสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลาย

ที่มา : Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980, p.190

การไล่ฟอง (Degassing) ที่เร็วเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น และมีผลทำให้สารละลายเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวข้นขึ้น ทำให้อัตราความเร็วในการระเหยที่ช่วงอบแห้ง (Drying) เร็วขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้ชิ้นงาน (Green Sheets) เกิดการแตกร้าว (Cracking) ได้ การไล่ฟองนอกจากจะเป็นการลดฟองอากาศในสลิปแล้ว ยังเป็นการปรับความหนืด (Viscosity) ของสลิปด้วย (Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980)

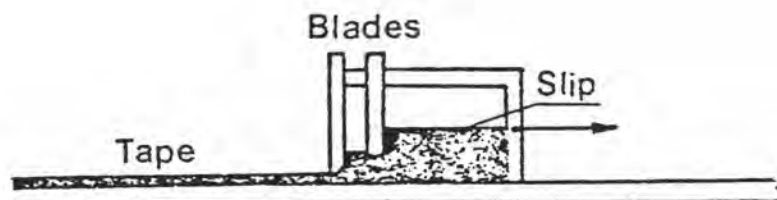
2.7.4 การหล่อ (Casting or Sheeting)

ในกระบวนการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา ดังแสดงในภาพที่ 10 จะมีการปรับความหนืด (Viscosity) พร้อมไปกับการไล่ฟองอากาศ (Degassing) จากนั้นสเลอรี่จะผ่านตะแกรงกรอง (Sieve) และส่งผ่านไปอยู่ที่ฝักสเลอรี่ (Strainer reserver) และป้อนไปสู่เครื่องผลิตแผ่นซีท (Sheet manufacturing machine) โดยทั่วไปจะเรียกเครื่อง

นี้ว่า ดอกเตอร์เบลด (Doctor blade mach squeeze) ดังแสดงในภาพ 19 และ 20 ซึ่งสเลอรี่จะถูกส่งเข้าไปในเครื่องอย่างต่อเนื่อง โดยมีตัวบังคับสเลอรี่ (Blade) ให้ออกตามต้องการ สเลอรี่ที่ถูกบังคับออกไป จะไปเคลือบบนแผ่นฟิล์มที่วางอยู่บนสายพาน และเคลื่อนที่ไปตามสายพาน ผ่านเตาอบ (Dryer) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการอบประมาณ 200 องศาเซลเซียส อะลูมินาสเลอรี่ที่ติดอยู่บนแผ่นฟิล์มจะแห้ง และมีวนเก็บไว้ เพื่อผ่านกระบวนการตัดชิ้นรูป (Sheet Cutting or Punching) ต่อไป

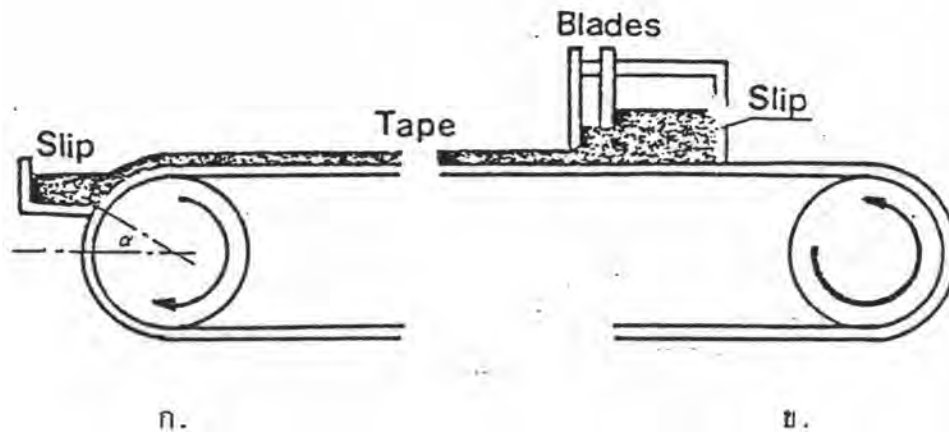
คุณภาพของแผ่นรองรับอะลูมินาจะดีหรือไม่ กระบวนการนี้มีส่วนสำคัญมากเช่นกัน โดยเฉพาะความหนา (Thickness) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนาก็คือ

1. ความหนืดของสเลอรี่ (Slurry viscosity)
2. อัตราการเทแบบ (Casting speed)
3. ระยะการตั้งที่บังคับสเลอรี่ (Doctor blad gap)
4. ความสูงในการตั้งถังสเลอรี่ (Slurry head hight)



ภาพที่ 19 - การขึ้นรูปโดยดอกเตอร์เบลด วิธีให้ตัวบังคับสเลอรี่เป็นตัวเคลื่อนที่

ที่มา : P. Boch and Chartier, 1988, p.814



ภาพที่ 20 ก และ ข การขึ้นรูปโดยดอกเตอร์เบลด วิธีให้สายพานเป็นตัวเคลื่อนที่

ที่มา : P. Boch and Chartier, 1988, p.815

2.7.5 การตัดขึ้นรูป (Sheet cutting or Punching)

การตัดขึ้นรูป เป็นกระบวนการต่อจากม้วนอะลูมินาที่ติดอยู่บนแผ่นฟิล์ม (Green sheet) และผ่านการอบแห้ง (Drying) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสแล้ว โดยจะนำกรีนชีทไปวางบนแท่นสำหรับตัด ซึ่งมีการออกแบบตัวตัด เป็นแม่พิมพ์โลหะสำหรับปั๊ม ให้ได้ขนาดและรูปแบบตามต้องการ

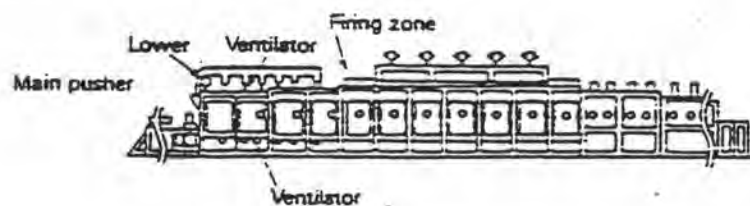
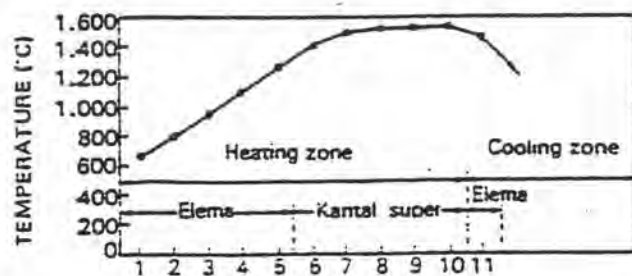
2.7.6 การเผา (Sintering)

การเผา (Sintering) หมายถึง กระบวนการที่ทำให้อนุภาคในผลิตภัณฑ์ติดกันแน่น และมีความแข็งแรงในระดับที่จะใช้งานได้ดี โดยใช้กระบวนการความร้อน หรือการทำให้อนุภาคเกาะติดกันเป็นก้อนแข็ง (Aggregate) โดยกระบวนการความร้อนนั่นเอง

สิ่งสำคัญในกระบวนการนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงสุด แต่ประหยัดที่สุด เพื่อลดต้นทุน

ในการเผา (Sintering) จะเป็นกระบวนการขจัดสารอินทรีย์ (Organic materials) และสารอนินทรีย์ (Inorganic materials) หรือสารโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในเนื้อ

ผลิตภัณฑ์ (Polymer compound) สารดังกล่าวนี้จะเกิดการสลายตัวหายไปเมื่อได้รับอุณหภูมิระดับหนึ่ง โดยเฉพาะพวกโพลีเมอร์ จะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศขณะนั้น ซึ่งจะทำให้เกิดออกไซด์พวกไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และคาร์บอนิลกรุป นอกจากนี้อนุภาคขนาดใหญ่ (Macromolecules) จะถูกสลายตัวเล็กลง (Decomposed) และน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) จะลดลง ในสภาวะออกซิเดชัน เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้จุดเดือดจะเกิดการระเหย (Vaporize) ของออกไซด์และสิ่งเจือปนอื่น ทำให้น้ำหนักของชิ้นงานลดลงอีก แต่ถ้าการเผากระทำในบรรยากาศที่เป็นสุญญากาศ หรือในแก๊สเฉื่อย ที่ไม่มีออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น อนุภาคขนาดใหญ่ (Macromolecules) จะเกิดการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) สาเหตุเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ (macromolecules) ในชิ้นงาน เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง และบางส่วนกลายเป็นไอ (Vaporize) (Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980)

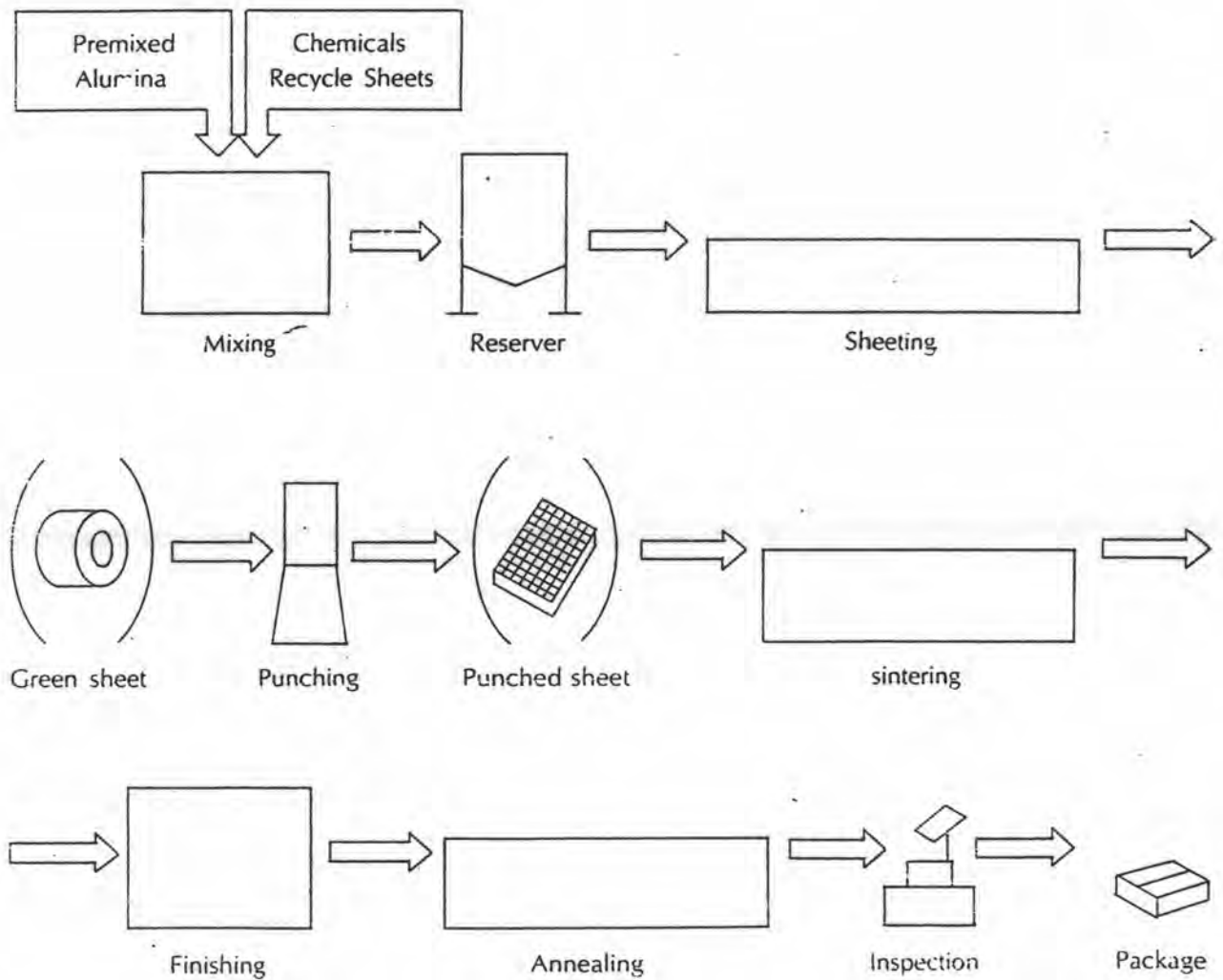


ภาพที่ 21 การควบคุมอุณหภูมิในการเผาและเตาที่ใช้ในการเผา

ที่มา : Tamotsu Ueyama and Hiroshi Wada, 1980, p.193



อุณหภูมิเริ่มแรกจะต้องเพิ่มอย่างช้าๆ ถ้าหากเพิ่มอุณหภูมิเร็วเกินไปในขณะเผา (Sinter) จะทำให้ชิ้นงานหดตัวอย่างรวดเร็ว ความแข็งแรง (Bending strenght) ก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน เนื่องจากสารช่วยยึดเกาะ (Binder) และสารช่วยให้มีความเหนียว (Plasticizer) ที่ผสมอยู่ในเนื้ออะลูมินาละเอียดและแยกสลายตัว ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าว (Crack) และบิดงอ (Warping) ของชิ้นงาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการเผาอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 องศาเซลเซียส และอีกประการหนึ่งถ้าหากการเผาเร็วเกินไป อาจทำให้สารพวกโพลีเมอร์ในส่วนผสมสลายตัวออกไม่ทัน ทำให้เกิดคาร์บอนค้างอยู่ในเนื้ออะลูมินา (Al_2O_3) ดังนี้ Al-O, Al-O-C ในช่วงอุณหภูมิ 1250-1650 องศาเซลเซียส อันเป็นสาเหตุทำให้คุณสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไป ฉะนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเผาชิ้นงานให้เป็นไปอย่างช้า ๆ ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 22 สรุปกระบวนการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา

ที่มา : Electro Ceramics Co.,Ltd.

2.7.7 การตัดคุณภาพ (Quality control)

แผ่นรองรับอะลูมินาที่ผ่านการเผา (Sintered) แล้ว จะต้องมีการตัดคุณภาพ ที่จะต้องควบคุมอันดับแรก ก็คือ ความถูกต้องของชิ้นงาน (Uniformly of sheet) ซึ่ง ประกอบด้วยขนาด (Size) การบิดงอ (Warping) รอยแตก (Cracks) รูอากาศ (Pores) หรือตำหนิอื่น ๆ อันเกิดจากสิ่งเจือปนอื่น (Impurities) เช่น จุดต่างดำ, สี เป็นต้น

ขนาดและการบิดงอ จะถูกคัดคุณภาพด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะได้ขนาดที่แน่นอน ส่วนรอยแตก รุ้อากาศ รอยดำ และสี นั้น จะถูกคัดคุณภาพด้วยสายตา โดยอาศัยแสงสว่างจากหลอดไฟกำลังสูง

ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความแข็งแรง (Bending strength) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน (Thermal expansion) ความต้านทานไฟฟ้า (Electical resistance) เป็นต้น จะมีการสุ่มไปทดลองในห้องทดลอง เป็นระยะ ๆ

ผลิตภัณฑ์ที่มีการบิดงอเพียงเล็กน้อย จะต้องนำไปเผาอบ (Annealing) ใหม่อีกครั้ง ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเผาครั้งแรก คือ ประมาณ 1450 องศาเซลเซียส การเผาอบครั้งนี้จะต้องใช้ก้อนอะลูมินาที่มีน้ำหนักพอสมควร ทับแผ่นอะลูมินาที่ผ่านการเผาแล้วขณะเผาอบ ซึ่งจะมีผลทำให้แผ่นอะลูมินาคีกรูป เป็นแผ่นที่ราบเรียบได้

2.8 การบดและเครื่องบด (Milling and Mill Equipment)

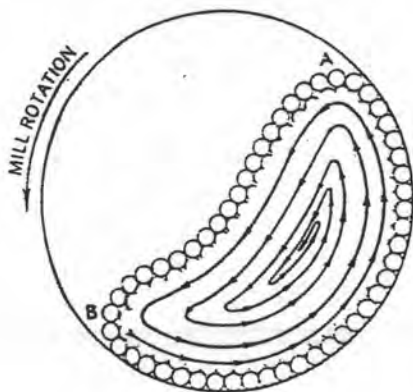
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า การบดเป็นกระบวนการทำให้ขนาดของวัตถุดิบมีขนาดเล็ก และเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่วิธีการที่จะให้คุณสมบัติดังกล่าว ต้องมีการเลือกวิธีการ และเครื่องบดที่เหมาะสม เพราะว่าวัตถุดิบแต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน โดยเฉพาะความแข็ง ฉะนั้นการเลือกชนิดของเครื่องบดจึงมีความสำคัญมากสำหรับงานบด

เครื่องบดมีหลายชนิด เช่น Ball mill, Rod mill, Vibratory mill, Attrition mill, Fluid energy mill เป็นต้น ซึ่งเครื่องบดแต่ละชนิด นอกจากจะมีระบบการทำงานต่างกันแล้ว ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่ต่างกัน และมีความสำคัญมากในการบด สิ่งนั้น คือ วัสดุที่ใช้กรูภายในหม้อบด (Linner) และลูกบด (Media)

วัสดุที่ใช้กรูหม้อบดมีหลายชนิด เช่น พอร์ซเลน, ยาง, ไฮอะลูมินา, ไฮเซอรัคโคเนีย และโลหะ เป็นต้น การเลือกใช้ต้องให้เหมาะสมกับวัตถุดิบและชนิดของงานที่ต้องการจะบด การบดจึงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.8.1 เครื่องบด (Mill equipment)

2.8.1.1 Ball mill และ Rod mill

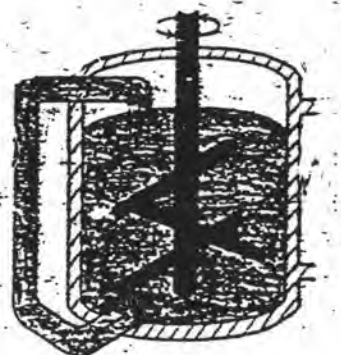


ภาพที่ 23 ลักษณะการเคลื่อนตัวของลูกบด

ที่มา : Reed, 1989, p.257

ใช้สำหรับงานบดที่ต้องการให้มีขนาด 200 - 325 เมช ใช้บดได้ทั้งบดแห้งและบดเปียก โดยอาศัยลูกบดเป็นตัวย่อยขนาด

2.8.1.2 Attrition mill

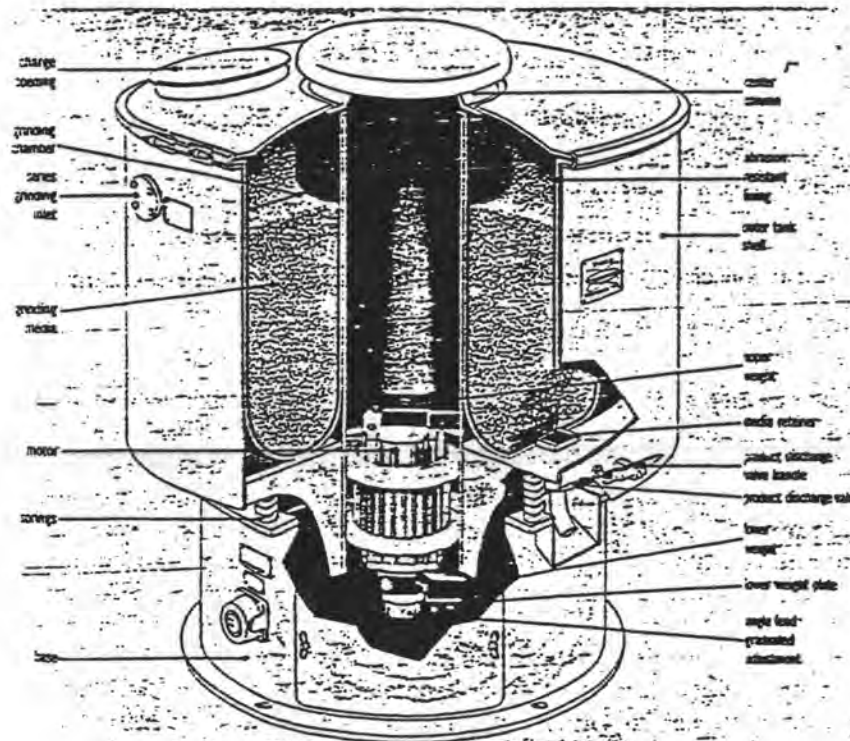


ภาพที่ 24 :ลักษณะของ Attrition mill

ที่มา : Reed, 1989, p.259

ใช้สำหรับงานบดที่ต้องการให้มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน สามารถบดได้ภายใต้บรรยากาศที่บรรจุด้วยแก๊สเฉื่อย และสามารถควบคุมอุณหภูมิของสเลอรรี่ได้ เหมาะกับงานที่ต้องการขนาดเป็นซึบไมครอน มีลูกบดเป็นตัวย่อยขนาด

2.8.1.3 Vibratory mill

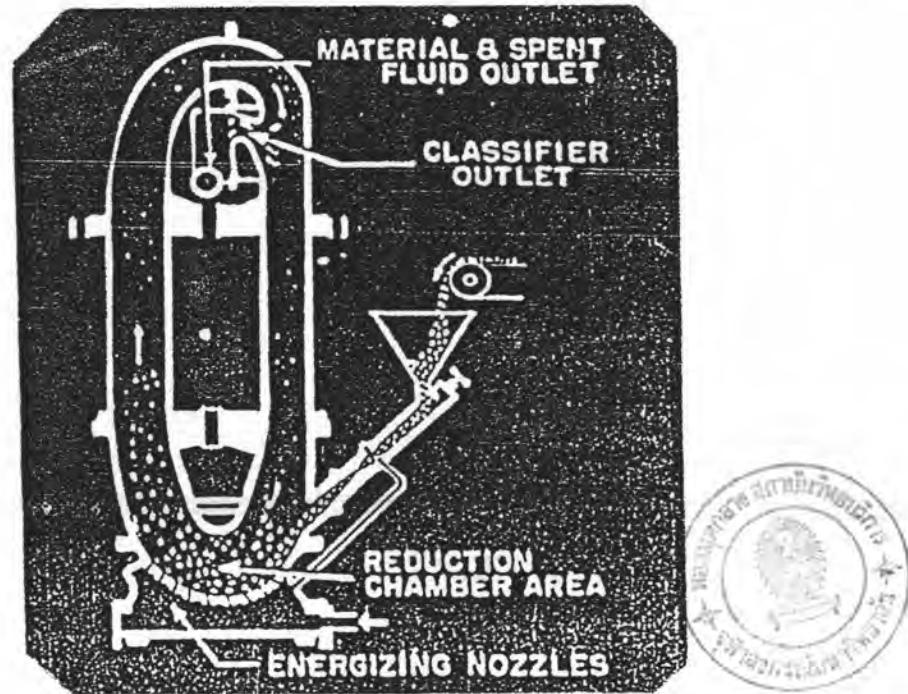


ภาพที่ 25 ลักษณะของ Vibratory mill

ที่มา : Reed, 1989, p.258

ใช้สำหรับงานบดที่ต้องการบดเปียก สามารถบดได้ละเอียดถึงซึบไมครอน มีประสิทธิภาพสูง ถ้าเป็นหม้อบดขนาดใหญ่จะสามารถบดได้ 2 ตันต่อชั่วโมง โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือน โดยมีลูกบดเป็นตัวทำการย่อยขนาด

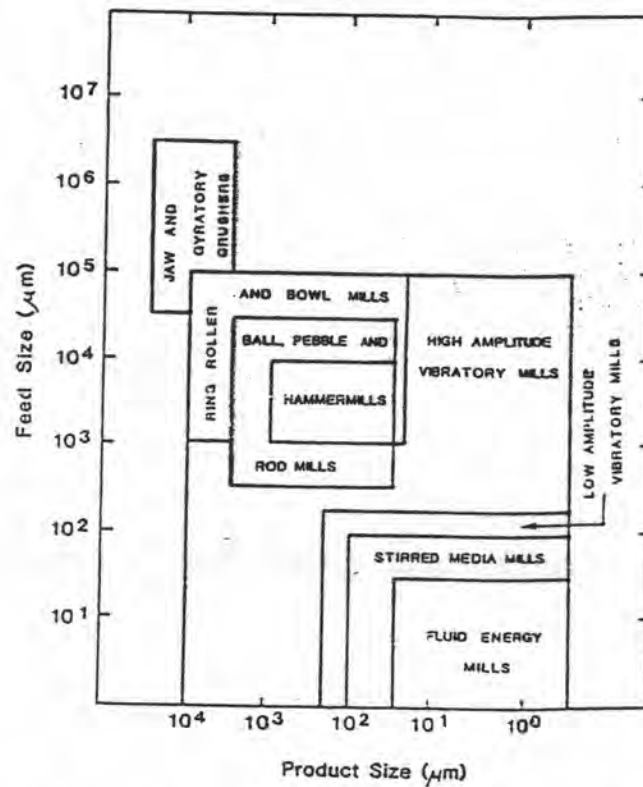
2.8.1.4 Fluid energy mill



ภาพที่ 26 ลักษณะของ Fluid-energy mill

ที่มา : C.J.Koenig, 1986, p.232

ใช้สำหรับบดวัตถุดิบที่มีขนาดตั้งแต่ 5 มิลลิเมตรลงไป หลักการทำงานอาศัยของเหลวเป็นตัวช่วยพาวัสดุให้วิ่งด้วยความเร็วสูงเกิดการกระทบกระแทกกันเอง จนเกิดการแตกละเอียด สามารถบดได้หลายตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพในการบดของเครื่องบดชนิดต่าง ๆ

ที่มา : Reed, 1989 (อ้างถึง Wada Summers, 1983) p.257

2.8.2 ประสิทธิภาพในการบด

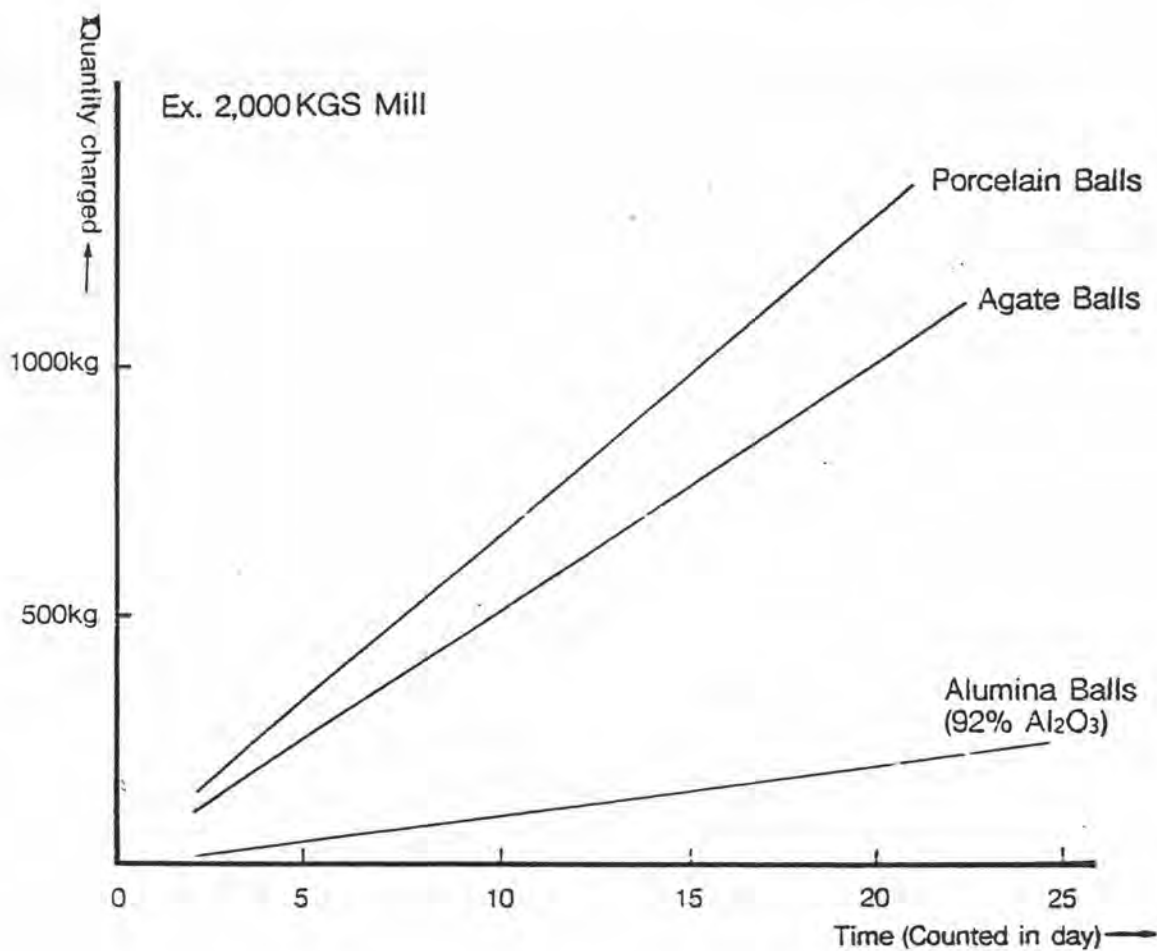
ประสิทธิภาพในการบดจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

2.8.2.1 ความเร็วรอบในการทำงานของเครื่องบด

ความเร็วรอบในการทำงานของเครื่องบด ถ้าหากเครื่องมีความเร็วรอบสูง จะต้องใส่ลูกบดจำนวนมาก ซึ่งเครื่องบดสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง มักจะใช้ความเร็วรอบสูง ทำให้ลูกบดกระทบกันด้วยความถี่สูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ทำให้ย่อยขนาดได้เร็ว

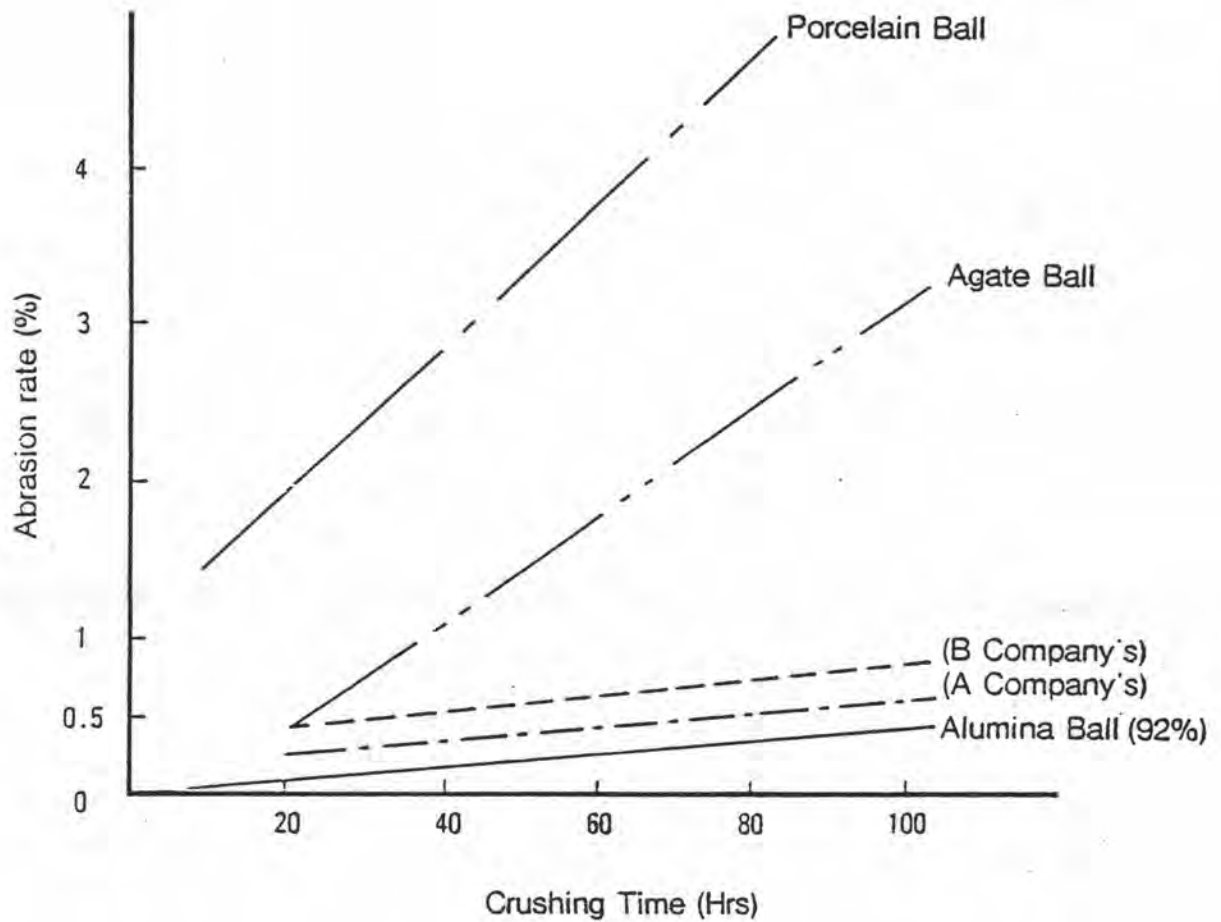
2.8.2.2 วัสดุที่ใช้ในการกรูหม้อบดและลูกบด

การบดจะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อ วัสดุที่ใช้กรูหม้อบดและลูกบดมีความแข็งแกร่งกว่าวัสดุที่จะบด เช่น หม้อบดและลูกบดชนิดไฮอะลูมินา ใช้สำหรับบดสารอะลูมินา หรือสารอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่า เช่น บดเนื้อพอร์ซเลน เซอร์โคเนีย เป็นต้น แต่ถ้าเราใช้หม้อบดและลูกบดชนิดฮาร์ดพอร์ซเลนไปบดสารอะลูมินา จะทำให้การบดไม่ได้ผลเท่าที่ควร และยังทำให้มีสิ่งเจือปนอื่นเข้าไปในส่วนผสมได้ เนื่องจากการสึกกร่อนของผนังหม้อบดและลูกบด



ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพในการบดของลูกบด 3 ชนิด

ที่มา : Electro Ceramics Co.,Ltd.



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบดกับความสามารถในการทนต่อการขัดสี
ของลูกบด 3 ชนิด
ที่มา : Electro Ceramic Co.,Ltd.

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการทนต่อการขัดสี (Abrasion rate)
โดยใช้สูตรดังนี้

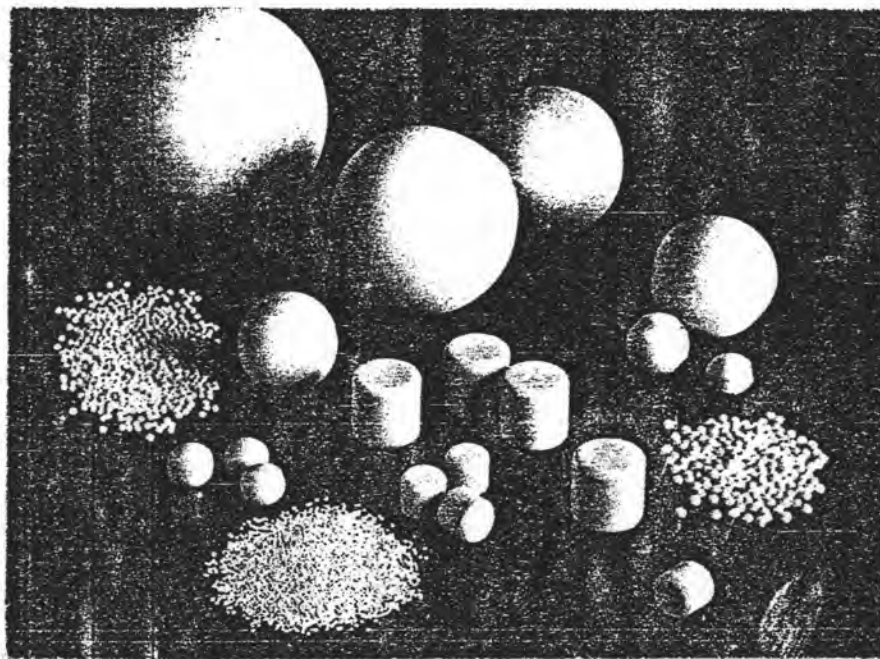
$$\% \text{ ทนต่อการขัดสี} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ} - \text{น้ำหนักหลังทดสอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}} \times 100$$

2.8.2.3 รูปร่างและขนาดของลูกบด

ลูกบดที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดกลม และ ทรงกระบอก (Spherical and Cylindrical media) จากการทดลอง พบว่าลูกบดชนิด ทรงกระบอกจะมีประสิทธิภาพในการบดสูงกว่าชนิดกลม เพราะมีพื้นที่ผิวที่จะกระทบกันมากกว่า ในขณะที่เดียวกันขนาดของลูกบดก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการบดเช่นกัน แม้ว่าลูกบดที่มี ขนาดใหญ่จะสามารถบดสารได้ดีกว่าลูกบดขนาดเล็ก เพราะมีน้ำหนักมากก็ตาม แต่มีใช้ว่าจะมี ประสิทธิภาพสูงกว่าลูกบดขนาดเล็ก ถ้าเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสกันระหว่างลูกบดจะเห็นว่า ลูกบด ขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากกว่าลูกบดขนาดใหญ่ในปริมาตรบรรจุที่เท่า ๆ กัน ฉะนั้นการบด ที่มีประสิทธิภาพสูงจะต้องใช้ลูกบดหลายขนาดอย่างน้อย 3 ขนาด คือ

ลูกบดขนาดใหญ่	ประมาณ	20 - 25 เปอร์เซ็นต์
ลูกบดขนาดกลาง	ประมาณ	50 - 60 เปอร์เซ็นต์
ลูกบดขนาดเล็ก	ประมาณ	20 - 25 เปอร์เซ็นต์

ส่วนจำนวนลูกบดที่ใช้แล้วแต่ชนิดของลูกบด (ดูภาพที่ 30) แต่โดยทั่ว ๆ ไปควรใช้ ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภายในของหม้อบด

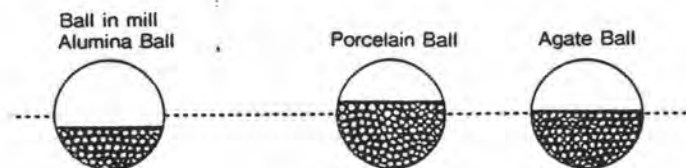


ภาพที่ 30 : รูปร่างและขนาดต่าง ๆ ของลูกบด

ที่มา : NISSIN TOKI Co.,Ltd.



Data	Sub. Alumina Ball (Al ₂ O ₃)	Porcelain Ball	Agate Ball
Specific Gravity	3.6	2.4	2.6
Specific Index	100	66.7	72.2
Difference		-33.3	-27.8



ภาพที่ 31 เปรียบเทียบปริมาณบรรจุที่เหมาะสมของลูกบดแต่ละชนิด

ที่มา : NISSIN TOKI Co.,Ltd.

จากภาพที่ 31 จะเห็นว่าถ้าเป็นลูกบดชนิดไฮอะลูมินาจะใช้จำนวนน้อยกว่าลูกบดชนิดพอร์ซเลนและชนิดที่เป็นเรซิน ฉะนั้นจึงสามารถบดวัตถุดิบแต่ละครั้งได้มากกว่า และได้คุณภาพใกล้เคียงกันในปริมาตรบรรจุของหม้อบดที่เท่ากัน

2.8.2.4 ความหนาแน่น (Density) ของลูกบด

ลูกบดที่มีความหนาแน่นสูง จะมีน้ำหนักมาก ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการบดสูงเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าความหนาแน่นของลูกบดแต่ละชนิด

Material	Density (Mg/m ³)
Flint pebbles	2.4
Porcelain	2.3
Steatite porcelain	2.7
High-density alumina	3.6
Zircon	3.7
Zirconia	5.5
Steel (hardened or carburized)	7.8
Tungsten carbide	15.6

ที่มา : Reed, 1989, p.261

2.8.2.5 ความหนืด (Viscosity) ของส่วนผสม

ถ้าความหนืดของส่วนผสมสูง จะทำให้ลูกบดเคลื่อนที่ไปได้ยากลำบาก ตรงกันข้ามถ้าความหนืดต่ำไป ก็จะทำให้อนุภาพของสารเคลื่อนหนี ซึ่งทำให้การบดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ฉะนั้นการบดสารควรจะให้มีความหนืดพอดี ๆ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการจะบดด้วย โดยทั่ว ๆ ไป จะใช้น้ำผสมในกระบวนการบดเปียกประมาณ 30 - 40 เปอร์เซ็นต์ และไม่ควรมากเกิน 55 เปอร์เซ็นต์

2.8.2.6 เวลาที่ใช้ในการบด (Milling time)

การบดจะมีประสิทธิภาพดี นอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้ง 5 ดังกล่าวแล้ว ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบดด้วย

2.9 การตรวจเอกสาร (Literature Survey)

1. นายมิสเลอร์ มอเชน และเซนฟีลด์ (1974) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties) ทางเคมี (Chemical properties) ทางกลไก (Mechanical properties) ทางไฟฟ้า (Electrical properties) และขนาดเม็ด (Grain size) ของแผ่นรองรับอะลูมินาไว้ดังนี้

- คุณสมบัติทางฟิสิกส์

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดอนุภาค (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
1460	0.74	3.86
1485	0.86	3.90
1500	1.04	3.91
1525	1.36	3.91

การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน วัดที่ 250 - 900 องศาเซลเซียส จะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว $8.04 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

ส่วนขนาดความหนา ขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่น และลักษณะการใช้งาน มีตั้งแต่ 0.06 - 5.00 มิลลิเมตร แต่จะต้องมีเปอร์เซ็นต์ความบิดเบี้ยวไม่เกิน 0.003 cm/cm

- คุณสมบัติทางกลไก วัดค่าความแข็งแรง (Bending strength) ได้ 94,000 psi.

- คุณสมบัติทางไฟฟ้า มีความต้านทานไฟฟ้าสูง ถึง 4×10^{11} โอห์มที่ 185 °C

2. นายเคิร์ทเนอและกรูเวอร์ (1984) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแผ่นรองรับอะลูมินา โดยการควบคุมรูอากาศ (Pores) และขนาดเม็ด (Grain size) เขากล่าวว่า ถ้ามีการควบคุมขนาดเม็ด และรูอากาศในเนื้ออะลูมินาแล้ว ควรจะได้ผลดังนี้

ความหนาแน่น (Density)	3.93 g/cm^3
ความแข็งแรง (Bending Strength)	440 MN/m^2
การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน (Thermal expansion)	$7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
การเป็นสื่อความร้อน	17 W/mk

3. ข้อมูลจากบริษัท E.C.T. Electro-Ceramic (1990) ผู้ผลิตแผ่นรองรับ อะลูมินา (Alumina substrate) แห่งแรก และแห่งเดียวในประเทศไทย เขารายงานไว้ว่า วัสดุที่ใช้คือ อะลูมินา ชนิด 96% เเผาที่ 1500-1700 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติดังนี้

ความบริสุทธิ์ของสาร (Purity)	96% Al_2O_3
การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	0%
ความแข็งแรง (Bending strength)	3,300 Kg/cm^2
ความแข็ง (Hardness)	9 Moh's
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่ออุณหภูมิร้อน (Thermal Expansion Coefficient)	

ดังนี้

25 - 150 °C	$3.4 \times 10^{-6} / ^\circ C$
150 - 400 °C	$8.4 \times 10^{-6} / ^\circ C$
400 - 800 °C	$9.1 \times 10^{-6} / ^\circ C$

การเป็นสื่อความร้อน (Thermal Conductivity)

ที่ 20 °C	0.04 Cal./Cm.Sec °C
-----------	---------------------

ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity)

20 °C	$> 10^{15} \Omega \cdot Cm.$
100 °C	$> 10^{15} \Omega \cdot Cm.$
200 °C	$> 10^{14} \Omega \cdot Cm.$
300 °C	$> 10^{11} \Omega \cdot Cm.$