

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินาในธรรมชาติอาจเกิดเป็นสารเดี่ยวหรือสารประกอบก็ได้ ซึ่งเป็นวัตถุบิตัวหนึ่งที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ คือ ใช้ผสมทั้งในเนื้อดินปั้น และน้ำเคลือบ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมไฟน์เซรามิกส์ อะลูมินายังใช้เป็นวัตถุบิตัวหลักตัวหนึ่งในการทำสิ่งใหม่ ๆ ทางเซรามิกส์ เช่น วัตถุทนไฟ สิ่งขัดถู นี้อต ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ กระจกยานอวกาศ หลอดไฟใช้แรงดันสูง ชิ้นส่วนต่างๆ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และแท่งกรองเซรามิกส์ที่จะได้ทำการศึกษาในครั้งนี้

อะลูมินา เป็นวัตถุทนไฟ และเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง จะมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ในธรรมชาติอาจเกิดในรูปของสารบริสุทธิ์ เช่น คอรันดัม และพวกอัญมณี (พลอย) หรือเกิดในรูปของสารประกอบไฮเดรท เช่น บ็อกไซต์ หรือไดอะสเปอร์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

อะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ จัดแบ่งเป็นรูปผลึกได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกัน คือ แบบชนิดแอลฟา-อะลูมินา แกมมา-อะลูมินา และเบตา-อะลูมินา สามารถดูการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของอะลูมินาได้ในตารางที่ 3.2

แอลฟา-อะลูมินา เป็นอะลูมินาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ทนต่ออุณหภูมิสูงและไม่แปรเปลี่ยนรูปแบบที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่เย็นตัว คุณสมบัติต่างๆ ได้ในตารางที่ 3.3

แกมมา-อะลูมินา เป็นชนิดที่เกิดจากการใช้อะลูมินาไฮเดรท มาทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันในอุณหภูมิต่ำที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส แต่ถ้าได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1150-1200 องศาเซลเซียส ก็จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นแอลฟา-อะลูมินา คุณสมบัติได้ในตารางที่ 3.3

เบตา-อะลูมินา เป็นอะลูมินาชนิดที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ แอลฟา-อะลูมินาผสมกับโซเดียมออกไซด์ ในอัตราส่วนอะลูมินา 11 ส่วน กับโซเดียมออกไซด์ 1 ส่วน ($11Al_2O_3:Na_2O$)

หรืออะลูมินา 12 ส่วนกับโซเดียมออกไซด์ 1 ส่วน ($12\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Na}_2\text{O}$) แล้วผ่านการเผา (Calcine) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป (Commercial grade)

ตารางที่ 3.1 สูตรทางเคมี และรูปแบบผลึกของอะลูมินาชนิดต่างๆ (18)

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 3.2 การแปรเปลี่ยนรูปแบบผลึกของอะลูมินา (18)

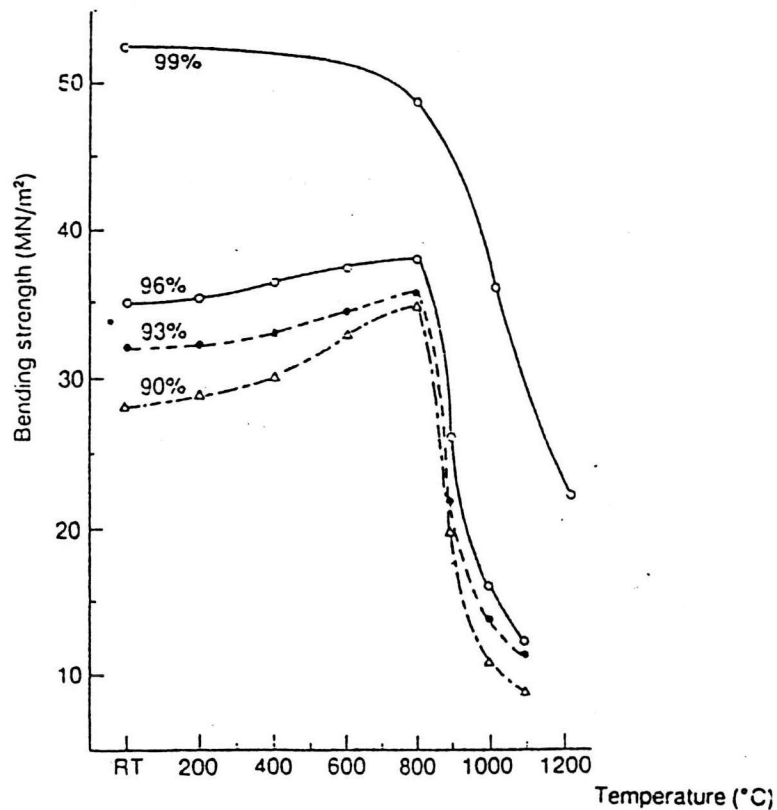
แบบ แกมมา ณ.อุณหภูมิต่ำ (γ -Series at low temperature)	สูตรทางเคมี (Chemical formular)	แบบ แอลฟา ณ.อุณหภูมิสูง (α -Series at high temperature)
ยิบไซท์	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	เบย์ไรท์
บ็อกไซท์	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	ไดอะสเปอร์
แอลฟา-อะลูมินา	Al_2O_3	คอร์ันดัม

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของอะลูมินา (Al_2O_3) (18)

คุณสมบัติ	แกมมา-อะลูมินา	แอลฟา-อะลูมินา
ความถ่วงจำเพาะ (S.G)	3.5-3.9	4.0
รูปผลึก (Crystalline form)	เฮกซะโกนอล	ไตรโกนอล
น้ำหนักโมเลกุล (M.W)	101.94	101.94
จุดหลอมเหลว (M.P)	2050 องศาเซลเซียส	2050 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (B.P)	2250 องศาเซลเซียส	2250 องศาเซลเซียส

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

ความแข็งแรง (Bending strength) ของอะลูมินาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม (Composition) (ดูรูปที่ 3.1) ความพรุนตัว (Porosity) ขนาดเม็ด (Grain size) และอุณหภูมิในการเผา (Firing temperature)



รูปที่ 3.1 ความแข็งแรงของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน (18)

3.2 สารช่วยในการขึ้นรูปแท่งกรองอะลูมินา

ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์นั้นจะมีสารช่วยในการขึ้นรูปแตกต่างกันไป ซึ่งสารเหล่านี้จะมีหน้าที่ในการทำงานแตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 สารช่วยการยึดเกาะ (Binder)

สารช่วยการยึดเกาะ หมายถึง สารที่ใช้ผสมเพื่อช่วยในการเกาะตัวของอนุภาคให้ดีขึ้น ในงานเกี่ยวกับเซรามิกส์ต่างๆ ไปจะใช้สารพวกพอลิเมอร์ (ดูตารางที่ 3.4)

เนื่องจากอะลูมินาเป็นสารที่ไม่มีความเหนียว จึงจำเป็นจะต้องเติมสารช่วยการยัดเกาะ เพื่อช่วยในการขึ้นรูป (Forming) และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงพอที่จะเคลื่อนย้ายได้สะดวกในขณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Greenware)

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างของสารช่วยการยัดเกาะ

กลุ่มสารยัดเกาะ	
ละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
1. พอลิไวนิล อะซิเตอ (Polyvinyl acetate)	1. พอลิไวนิล บิวไทเรอ (Polyvinyl butyral)
2. พอลิไวนิล ออลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol)	2. พอลิเมทิล เมทาไครเลต (Polymethyl methacrylate)
3. พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide)	3. เอทิล เซลลูโลส (Ethyl cellulose)
4. พอลิไวนิลไพโรไลดอน (Polyvinylpyrrolidone)	
5. คาร์บอกซิลิก พอลิเมอร์ (Carboxylic Polymer)	
6. ไฮดรอกซีเอทิล เซลลูโลส (Hydroxyethyl cellulose)	
7. โซเดียม คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose)	
8. ไฮดรอกซีโพรพิล เมทิล เซลลูโลส (Hydroxypropyl methyl cellulose)	
9. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate)	
10. สตาร์ช (Starch) , เด็กซ์ตริน (Dextrin)	

สารช่วยยัดเกาะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถเป็นตัวเพิ่มความเหนียวของส่วนผสมได้ดี โดยการเติมในอัตราที่น้อยกว่า 8-10 เปอร์เซ็นต์
2. แก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวระหว่างการเผา ไม่มีอันตรายต่อคนและชิ้นงาน
3. เมื่อผ่านการเผาแล้ว จะสลายตัวหมดไม่มีสิ่งใดเหลืออยู่ในเนื้อชิ้นงาน
4. มีราคาถูก

5. มีความทนทานต่อบรรยากาศคือไม่ทำให้ชิ้นงานเสื่อมระหว่างที่เก็บ
6. สามารถใช้ร่วมกับสารช่วยในการขึ้นรูปอื่นอย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.2 สารช่วยให้ความเหนียว (Plasticizer)

สารช่วยให้ความเหนียว คือสารที่ใช้ผสมเพื่อให้เนื้อเซรามิกส์มีความเหนียว ได้แก่ เอทิลีน ไกลคอล (Ethylene glycol), ไดเอทิลีน ไกลคอล (Diethylene glycol), ไทเอทิลีน ไกลคอล (Triethylene glycol), เทตระเอทิลีน ไกลคอล (Tetraethylene glycol), พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol), กลีเซอรอล (Glycerol), ไดบิวทิล ทาเรท (Dibutyl phthalate), และ ไดเมทิล ทาเรท (Dimethyl phthalate).

3.2.3 สารช่วยในการหล่อลื่น (Lubricant)

สารช่วยในการหล่อลื่น คือสารที่ช่วยในการหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างเนื้อเซรามิกส์กับหัวแบบ โดยสารช่วยในการหล่อลื่นที่นิยมใช้กันคือ พาราฟิน แวกซ์ (Paraffin wax), อลูมิเนียม สเตียเรต (Aluminum stearate), บิวทิล สเตียเรต (Butyl stearate), ลิเทียม สเตียเรต (Lithium stearate), แมกนีเซียม สเตียเรต (Magnesium stearate), โซเดียม สเตียเรต (Sodium stearate), สเตียริก แอซิด (Stearic acid), ซิงค์ สเตียเรต (Zinc stearate), โอเลอิก แอซิด (Oleic acid), พอลิไกลคอล (Polyglycols), Talc(platey form), และ กราไฟต์ (Graphite) จำพวก โบรอน ไนไตรด์ (boron nitride).

3.3 การขึ้นรูปเซรามิกส์

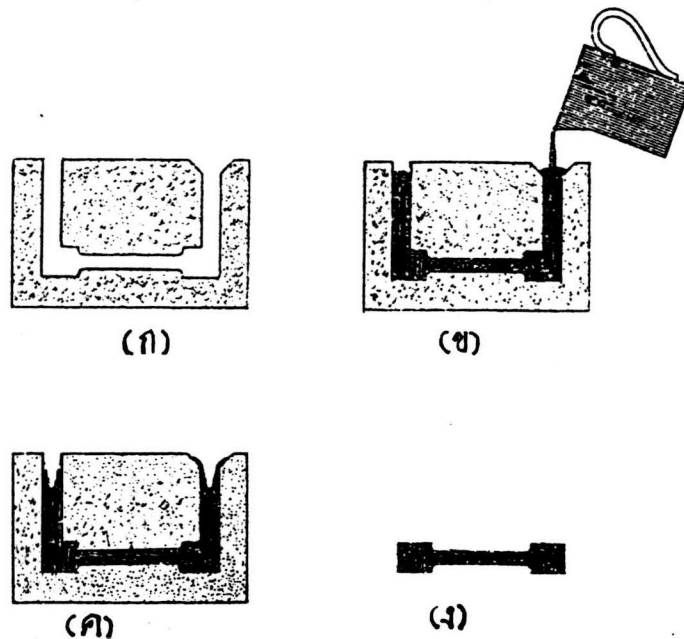
การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ มีวิธีการแตกต่างกันหลายวิธีขึ้นกับชนิดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณภาพและคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการผลิต การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันในโรงงานอุตสาหกรรมอาจแบ่งได้เป็น 5 วิธีดังนี้คือ

3.3.1 การขึ้นรูปโดยการเทแบบ (Slip Casting)

น้ำเซรามิกส์ทุกชนิดที่ใช้สำหรับขึ้นรูปโดยวิธีการเทแบบควรมีคุณสมบัติไหลตัวได้ดี มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งสูง กระจายลอยตัวอยู่ในของเหลว ปกติแล้วใช้น้ำโดยมีสารเคมีเป็นตัวช่วยทำให้เกิดการกระจายลอยตัวได้ดี ซึ่งการขึ้นรูปโดยวิธีนี้แบ่งย่อย ๆ เป็น 2 วิธีคือ

3.3.1.1 การเทแบบโดยให้น้ำเซรามิกส์แข็งตัวในแบบเลย (Solid Casting)

การเทแบบในลักษณะนี้จะเหมาะกับการเทแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาและมีรูปร่างแปลก ๆ โดยน้ำเซรามิกส์ควรจะมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.75-1.95 หรือค่าความหนืด 5-50 Poises ดังแสดงในรูปที่ 3.2

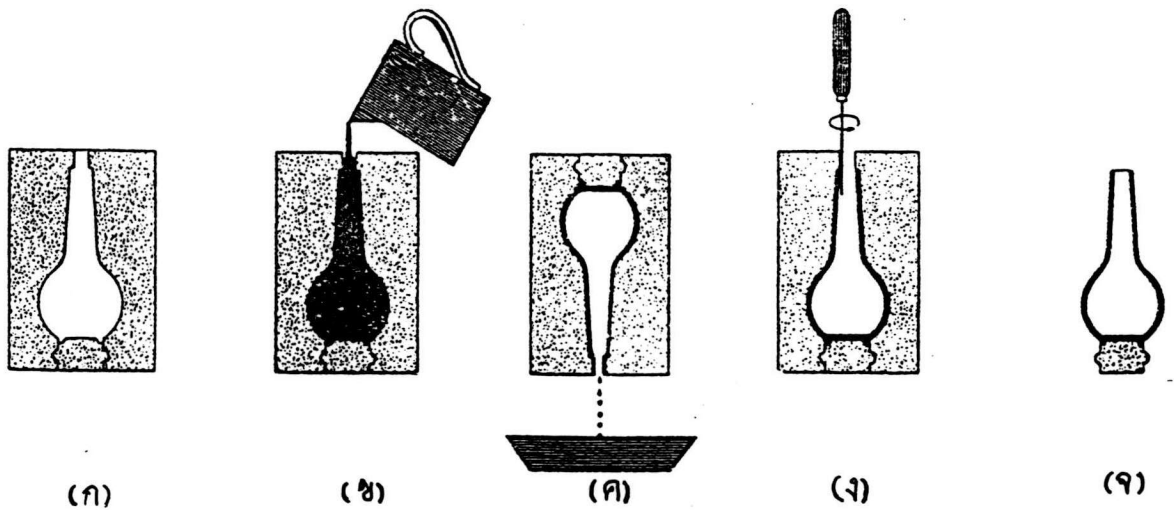


รูปที่ 3.2 แสดงการเทแบบโดยให้น้ำเซรามิกส์แข็งตัวในแบบเลย (19)

- (ก) แบบที่ ประกอบแล้ว
- (ข) เทน้ำเซรามิกส์ลงในแบบ
- (ค) ปล่อยให้ น้ำเซรามิกส์ไว้ในแบบ
- (ง) ผลิตภัณฑ์ดิบที่ตักแต่งเรียบร้อยแล้ว

3.3.1.2 การเทแบบโดยมีการเทน้ำเซรามิกส์ที่เหลือทิ้ง (Drain Casting)

การเทแบบในลักษณะนี้จะเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผนังบางๆ และต้องการความหนาอย่างสม่ำเสมอ โดยน้ำเซรามิกส์ควรมีความถ่วงจำเพาะ 1.65-1.80 หรือ ค่าความหนืด 1-5 Poises ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการเทแบบโดยมีการเทน้ำเซรามิกส์ที่เหลือทิ้ง (19)

- (ก) แบบที่ประกอบแล้ว
- (ข) เทน้ำเซรามิกส์ลงในแบบ
- (ค) เทน้ำเซรามิกส์ที่เหลือลงในแบบ
- (ง) ตัดแต่งปากผลิตภัณฑ์
- (จ) ผลิตภัณฑ์หลังจากถอดแบบ

3.3.2 การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว

การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว จะอาศัยองค์ประกอบของความเหนียวด้วยกัน 5 ประการคือ

1. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค อนุภาคละเอียดมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคหยาบ อนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นระเบียบมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม ทั้งนี้เพราะว่าอนุภาคที่มีความละเอียดและมีรูปร่างไม่เป็นระเบียบจะมีเนื้อที่สัมผัสกันมากกว่าอนุภาคหยาบ ๆ หรืออนุภาคที่มีรูปร่างลูกบาศก์หรือทรงกลม จึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันมากกว่า

2. การใช้ของเหลวที่มีประจุและมีความหนืดมากเป็นส่วนผสมจะช่วยปรับปรุงให้มีความเหนียวดีขึ้น

3. ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่ถูกดูดซับบนผิวของเนื้อเซรามิกส์ ก็มีอิทธิพลทำให้มีความเหนียวต่าง ๆ กัน เช่น เนื้อเซรามิกส์ที่มี H^+ หรือ Ca^{+2} อยู่บนผิวจะมีความเหนียวดีกว่าเนื้อเซรามิกส์ที่มี Na^+ อยู่บนผิว

4. สารอินทรีย์ช่วยทำให้ความเหนียวดีขึ้น เช่น การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เนื้อเป็น Al_2O_3 มักจะใช้พวกกาว แป้ง และซีเมนต์ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความเหนียว

5. การหมักและนวดจะช่วยทำให้ความเหนียวดีขึ้น เนื่องจากการหมักทำให้เนื้อเซรามิกส์กับน้ำรวมตัวกันได้ดี และทั่วถึง รวมทั้งการกระทำของแบคทีเรียก็มีส่วนช่วยให้มีความเหนียวดีขึ้น

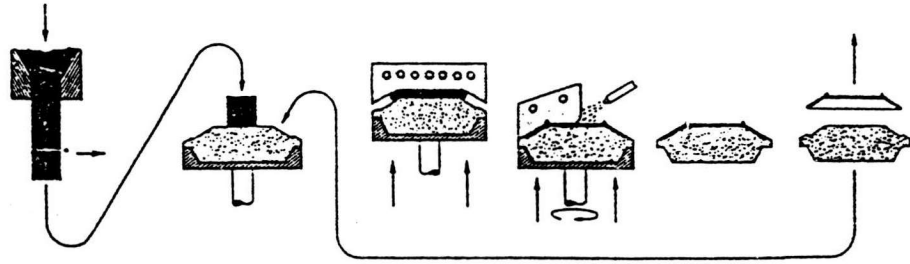
การขึ้นรูปในหัวข้อนี้มีด้วยกันหลายวิธีคือ

3.3.2.1 การขึ้นรูปโดยอาศัยแป้นหมุน (Throwing)

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ วิธีนี้ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่าย ๆ เช่น แจกัน และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงบางชิ้น

3.3.2.2 การขึ้นรูปโดยอาศัยเครื่อง Jig (Jiggering)

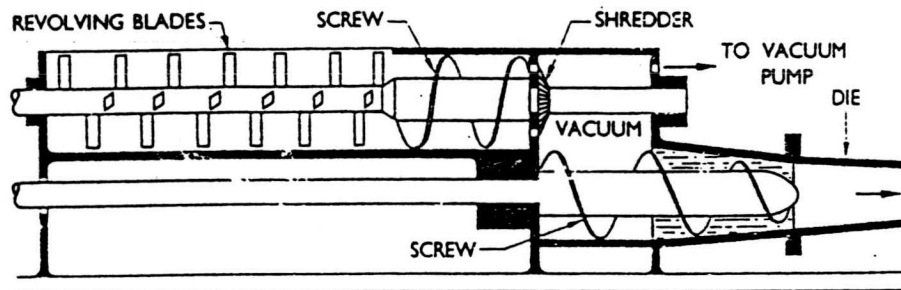
การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ดัดแปลงมาจากการขึ้นรูปโดยอาศัยแป้นหมุน คือวางเนื้อเซรามิกส์บนแบบพลาสติกซึ่งติดอยู่กับแป้นหมุนแล้วกดแม่แบบอีกอันหนึ่งลงบนเนื้อเซรามิกส์บน ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ ซึ่งด้านหนึ่งจะเหมือนแบบพลาสติก ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเหมือนแบบที่กดลงบนเนื้อเซรามิกส์บน การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมทำถ้วย ชาม ขั้นตอนในการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดย Jigger (19)

3.3.2.3 การขึ้นรูปโดยวิธีการรีดเนื้อเซรามิกส์ปั้นผ่านกระบอกลูบและหัวแบบ ซึ่งอยู่ตอนปลายของกระบอกลูบ (Extrusion)

การขึ้นรูปวิธีนี้ทำโดยรีดเนื้อเซรามิกส์ปั้น ซึ่งมีความเหนียวผ่านแผ่นโลหะซึ่งมีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง จากนั้นจึงอัดเนื้อเซรามิกส์ปั้นผ่านกระบอกลูบซึ่งอาจมีการดูดอากาศออกด้วย และถ้าต้องการให้มีรูปร่างอย่างไร อาจใส่แบบไว้ที่ปลายกระบอกลูบ เมื่อเนื้อเซรามิกส์ปั้นผ่านแบบออกมาจะได้ผลิตภัณฑ์รูปร่างตามแบบ หรืออาจให้เนื้อเซรามิกส์ปั้นผ่านกระบอกลูบออกมา แล้วตัดแต่งเซรามิกส์เอาไว้ตามความเหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูปต่อไป



Cross section of a vacuum auger.

รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องรีดแบบสกรู (19)

3.3.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์โดยอาศัยแรงอัด

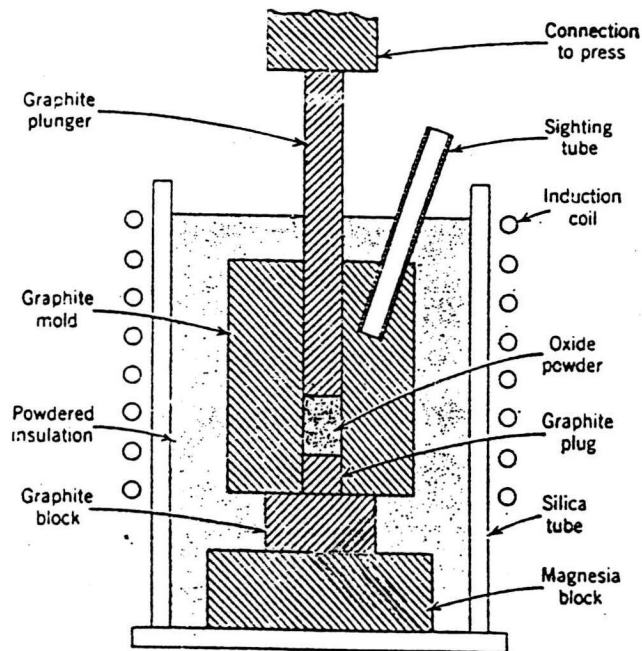
การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัตถุทนไฟ กระเบื้อง และผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดลงบนแบบ ซึ่งมีผงเนื้อเซรามิกส์บั่นแห้ง ๆ หรือมีความชื้นเล็กน้อยอยู่ภายในแบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง การขึ้นรูปวิธีนี้แบ่งเป็น 2 วิธีย่อย ๆ ได้ดังนี้คือ

3.3.3.1 การขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อเซรามิกส์แห้ง ๆ (Dry And Dust Pressing)

ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ใช้ในงานทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เป็นวิธีการอัดผงกลม ๆ ของเนื้อเซรามิกส์บั่นแห้ง ๆ ภายในแบบโลหะด้วยแรงอัดที่สูง ความชื้นภายในผงเซรามิกส์บั่นไม่เกิน 4% ผงเนื้อเซรามิกส์บั่นกลม ๆ เคลื่อนที่ได้อิสระแต่มีความเหนียวไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อถูกแรงอัดจะอัดตัวได้หนาแน่นดี ซึ่งส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมทำกระเบื้องต่าง ๆ

3.3.3.2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการอัดพร้อมกับการใช้ความร้อนช่วย (Hot Pressing)

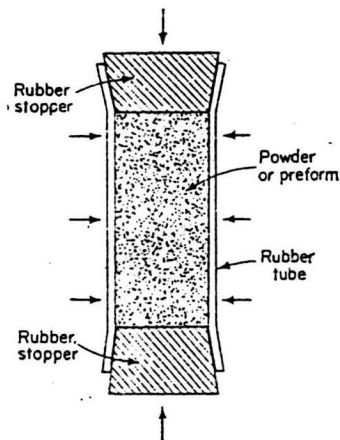
วิธีการนี้ต้องใช้ทั้งความดันและอุณหภูมิสูง แบบที่ใช้ในการผลิตจะต้องมีความแข็งแรงดีที่อุณหภูมิสูง วัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้ทำแบบได้แก่ แกรไฟต์ ซึ่งมีความทนทานต่อแรงดัน 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่อุณหภูมิห้อง และทนได้ถึง 7000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่อุณหภูมิ 2500 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบที่ใช้ศึกษาได้จากรูปที่ 3.6 แบบแกรไฟต์อาจให้ความร้อนโดยอาศัยกระแสเหนี่ยวนำ หรือวัสดุอื่นที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้ความร้อน ผลิตภัณฑ์ถูกอัดด้วยแท่งแกรไฟต์ ความดันที่ใช้อยู่ระหว่าง 2000-3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดผลิตภัณฑ์เซรามิกส์พร้อมใช้ความร้อน (19)

3.3.5 การขึ้นรูปโดยใช้วิธีไอโซสแตติกเพรสซิง (Isostatic Pressing)

วิธีการนี้ทำโดยการอัดเนื้อเซรามิกส์ซึ่งใส่ไว้ในแบบยึดหยุ่นได้โดยแรงอัดชนิดไอโซสแตติก ข้อดีของวิธีนี้ก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกอัดด้วยแรงอัดที่เกือบเท่ากันโดยตลอด ซึ่งหมายความว่าผลิตภัณฑ์ทุกส่วนจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่โค้งงอและไม่แตกเมื่อเผา วิธีนี้สามารถใช้ความดันสูง ๆ ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการแตกเนื่องจากความดัน ข้อเสียของวิธีการนี้ก็คือ ไม่ได้รูปร่างภายนอกของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ วิธีการนี้แสดงได้ด้วยรูปง่าย ๆ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องไอโซสเตติกเพรสซิง (19)

วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เพื่อให้เข้าใจว่าการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์อย่างคร่าว ๆ ว่ามีอะไรบ้าง และในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยอาศัยการรีดเนื้อเซรามิกส์ผ่านหัวแบบ (Extrusion)

ตัวแปรที่มีผลต่อวิธีการขึ้นรูปต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อวิธีการขึ้นรูปต่างๆ

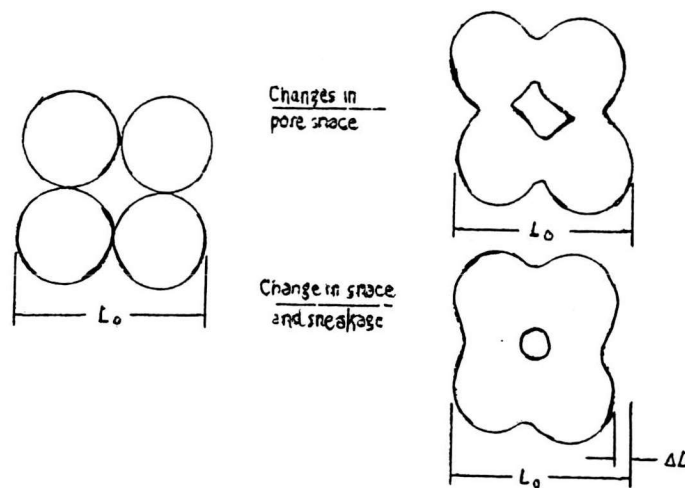
ตัวแปรต่างๆ	การรีด (Extrusion)	การเทแบบ (Slip casting)
ปริมาณน้ำ	น้อย	มาก
สารช่วยยึดเกาะ	ใช่	ใช่
สารให้ความเหนียว	ใช่	ไม่ใช่
สารช่วยในการกระจายตัวของอนุภาค	ไม่ใช่	ใช่
ขนาดอนุภาค	เล็ก	เล็ก

3.4 การเผา (Sintering)

การเผาเป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อเซรามิกส์ โดยปกติกระบวนการเผาเป็นการทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและมีความหนาแน่นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นตามทฤษฎี อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 0.67 ถึง 0.8 ของจุดหลอมเหลวของเนื้อเซรามิกส์ ในการเผาอะลูมินา อะลูมินามีจุดหลอมเหลวที่ 2054 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจึงประมาณ 1600 ถึง 1800 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา คือ

1. การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเกรน
2. การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของรูพรุน
3. การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

ในรูปที่ 3.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุน พบว่า ในระยะเริ่มต้นรูพรุนเปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นช่องว่าง ซึ่งเกิดจากการเชื่อมติดกันของอนุภาค การเปลี่ยนแปลงในระยะนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน จากนั้นรูพรุนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้นและมีขนาดเล็กลง การเปลี่ยนแปลงในขั้นนี้จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเปลี่ยนไป กระบวนการเผาสามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.6



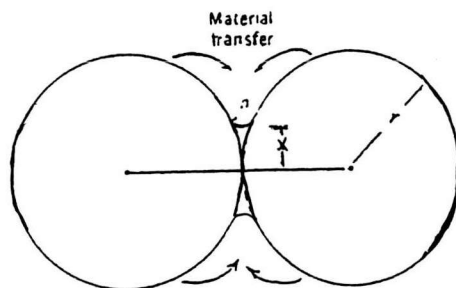
รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนรูปร่างของรูพรุนในระหว่างการเผา (20)

ตารางที่ 3.6 แสดงชนิดและกลไกในการเผา (21)

ชนิดการเผา	กลไกการถ่ายเทมวลสาร	แรงขับเคลื่อน
เฟสไอ (Vapor phase)	การระเหย-การควบแน่น (Evaporation-condensation)	ความแตกต่างของความดันไอ
สถานะของแข็ง (Solid state)	การแพร่ (Diffusion)	ความแตกต่างระหว่างพลังงานอิสระหรือความต่างศักย์เคมี
เฟสของเหลว (Liquid phase)	การไหลหนืด (Viscous flow), การแพร่	ความดันแคปิลารี, แรงตึงผิว
ของเหลวว่องไว (Reactive liquid)	การไหลหนืด, การละลาย-การตก ตะกอน (Solution-precipitation)	ความดันแคปิลารี, แรงตึงผิว

การเผาที่ใช้ในกระบวนการเซรามิกส์ส่วนใหญ่เป็นการเผาเฟสไอ, การเผาในสถานะของแข็ง และการเผาเฟสของไหล ในที่นี้จะอธิบายกระบวนการเผาที่สถานะต่าง ๆ

1. การเผาเฟสไอ แรงขับเคลื่อนในการเผาชนิดนี้คือความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิวโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การถ่ายเทมวลสารจากผิวอนุภาคโค้งนูนและมีความดันไอค่อนข้างสูงไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค ซึ่งมีความโค้งเว้าและมีความดันไอลดกว่า การถ่ายเทนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนและเป็นการเชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกัน กระบวนการซิเนเทอร์แบบนี้ไม่ทำให้เกิดการหดตัวและไม่เป็นการเพิ่มความหนาแน่น



รูปที่ 3.9 แสดงการถ่ายเทมวลสารในการเผาเฟสไอ (21)

2. การเผาในสถานะของแข็ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ
ขั้นที่ 1 เกิดการขยายตัวของคอ (Neck) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค ในขั้นนี้ชิ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

ขั้นที่ 2 เป็นช่วงการเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันกับการโตของเกรน ในช่วงนี้ อนุภาคมีขนาดโตขึ้นจนมีรูปร่างแบบเกรนและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ขั้นที่ 3 เป็นช่วงที่อัตราการเพิ่มความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นช่วงสุดท้ายของการเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งในขั้นสุดท้ายนี้ความหนาแน่นมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นตามทฤษฎี

สำหรับลักษณะจุลโครงสร้างหรือการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้แสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุลโครงสร้างในแต่ละขั้นตอนของการเผา (22)

ขั้นตอนการเผา	การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในชิ้นงาน
ขั้นที่ 1	ผิวอนุภาคเรียบ, เกิดการสร้างขอบเกรนและการสร้างคอ ทำให้รูพรุนเปิดมีรูปร่างกลม, เกิดการแพร่ของตัวเติมที่ว่องไว, ความพรุนลดลง (น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์)
ขั้นที่ 2	เกิดการหดตัวของรูพรุนเปิดระหว่างขอบเกรน ความพรุนลดลงอย่างชัดเจน, เกรนโตขึ้นอย่างช้า ๆ
ขั้นที่ 3	เกิดรูพรุนปิดที่มีแก๊สอยู่ภายใน, มีความหนาแน่นประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี, พบรูพรุนปิดที่จุดตัดของขอบเกรน รูพรุนเกิดการหดตัวจนกระทั่งหายไป
ขั้นที่ 4	ในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า การหดตัวของเกรนจะเกิดช้า เกรนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ภายในเกรนและรูพรุนหดตัวค่อนข้างช้า

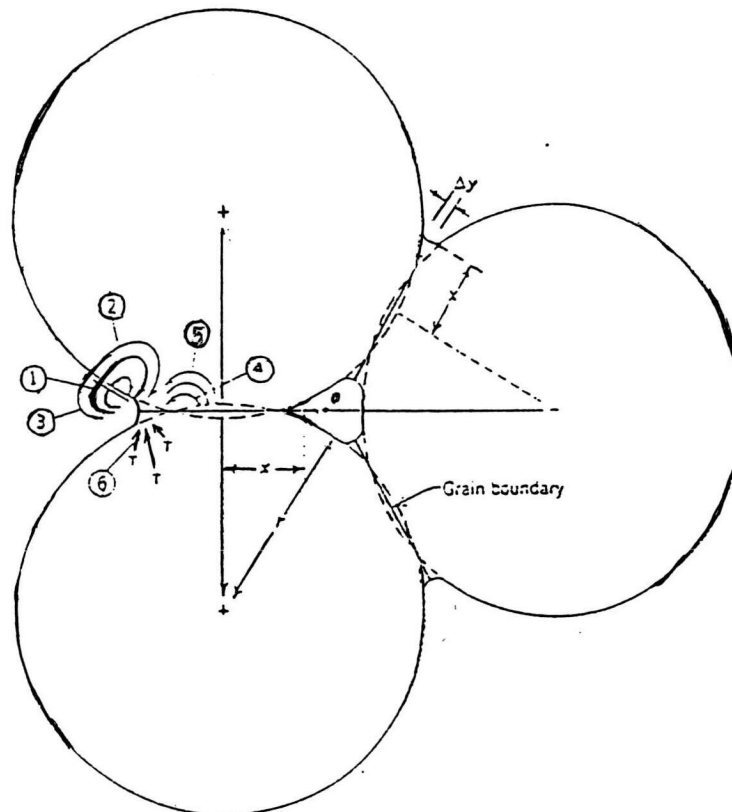
3.4.1 กลไกการเผา

ในรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นกลไกการถ่ายเทมวลของอนุภาคในลักษณะตัดขวางสองมิติของรูพรุนที่ติดกับขอบเกรน รูปร่างของเกรนจะเกิดการหดตัวเมื่อเกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างเกรนแล้วไปสะสมที่ผิวรูพรุน กลไกการถ่ายเทมวลสารสามารถแบ่งออกได้เป็นกลไกเพิ่มความหนาแน่น (Densification mechanism) และกลไกไม่เพิ่มความหนาแน่น (Non-densification mechanism) ดังแสดงในตารางที่ 3.8 กลไกไม่เพิ่มความหนาแน่นเป็นการถ่ายเทมวลรอบ ๆ ผิวรูพรุน หรือรูปเป็นการถ่ายเทมวลจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่ง โดยไม่ทำให้จุดศูนย์กลางของเกรนเกิดการเคลื่อนที่พร้อมกัน ดังนั้นในการเผาต้องเลือกภาวะที่เหมาะสม

เช่น กลไกไม่เพิ่มความหนาแน่นเกิดได้ช้าและทำให้ได้โครงสร้างที่ไม่ต้องการ ส่วนกลไกเพิ่มความหนาแน่นเกิดการแพร่ขอบเกรนและการแพร่ของปริมาตรเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 3.8 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผา (21)

กลไกการถ่ายเทมวล	กลไกเพิ่มความหนาแน่น	กลไกไม่เพิ่มความหนาแน่น
การแพร่ของขอบเกรน	✓	
การแพร่ของปริมาตร	✓	
การระเหย-การควบแน่น		✓
การแพร่ที่ผิว		✓
การรวมตัวจากการแพร่ของปริมาตร		✓
การแพร่เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่ง	✓	



รูปที่ 3.10 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา (20)

1. การแพร่ของขอบเกรน
2. การแพร่ของปริมาตร
3. การระเหย-การควบแน่น
4. การแพร่ที่ผิว
5. การรวมตัวจากการแพร่ของปริมาตร
6. การแพร่เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่ง

3.4.2 แรงขับในกระบวนการเผา

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในกระบวนการเผาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นโดยการลดพื้นที่ผิวและทำให้พลังงานอิสระที่ผิวต่ำลงเมื่อกำจัดผิวหน้าระหว่างของแข็งและไอ แรงขับคือการลดพลังงานอิสระรวมของระบบ (ΔG_T) ดังสมการ

$$\Delta G_T = \Delta G_V + \Delta G_B + \Delta G_S \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔG_V เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพัทธ์ปริมาตร

ΔG_B เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพัทธ์ชั้นขอบเขต

ΔG_S เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพัทธ์ที่ผิวเกรน

จากสมการที่ 3.1 สามารถบอกได้ว่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาเซรามิกส์ แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือพลังงานระหว่างปริมาตรของสารช่วยในการยึดเกาะและสารช่วยให้ความเหนียวซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างก่อนเผาและหลังเผา, พลังงานระหว่างชั้นขอบเขตซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างพื้นผิวอนุภาคและสารช่วยในการยึดเกาะและสารช่วยให้ความเหนียว และสุดท้ายคือพลังงานระหว่างผิวเกรน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานระหว่างพื้นผิวของอนุภาคด้วยกัน

3.5 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

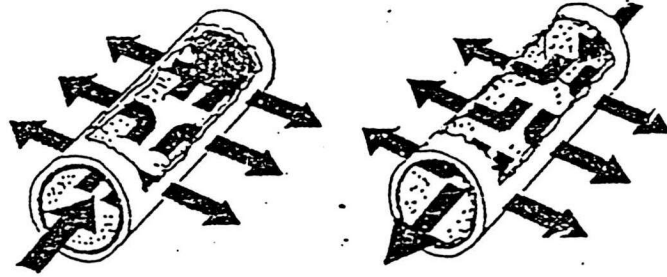
ในปัจจุบันกระบวนการแยกสารโดยใช้เยื่อแผ่นเป็นที่สนใจและนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลที่ว่าประสิทธิภาพการแยกสูง ไม่ต้องใช้ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานในการแยกกับระบบการแยกอื่นๆ พบว่าใช้พลังงานต่ำกว่ามาก ทำให้เกิดความพยายามที่จะนำกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นมาใช้ในอุตสาหกรรมมาก

ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration : MF) เป็นกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นประเภทหนึ่ง ซึ่งใช้แยกอนุภาคหรือคอลลอยด์ โดยใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 0.05 ถึง 10 ไมโครเมตร โดยใช้ความดัน 1-5 บาร์ เป็นการแยกสารด้วยการคัดเลือกขนาดอนุภาค (sieving mechanism) การประยุกต์ใช้งานของไมโครฟิลเตรชัน ได้แก่ การแยกเซลล์ การทำให้น้ำหมักใส ซึ่งใช้ในการผลิตไวน์และเครื่องดื่ม

การแยกสารโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะพบปัญหา ค่าฟลักซ์ที่ลดลง เนื่องจากมีการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ชั้นเจล ทำให้มีการหาวิธีการใหม่ ๆ เพื่อแก้ไขปัญหานี้

การกรองแบบไหลขนาน โดยการป้อนสารด้วยความดันในแนวขนานไปกับผิวเยื่อแผ่น (ดังรูปที่ 3.11) เพื่อเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเป็นการลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวและลดอัตราการ

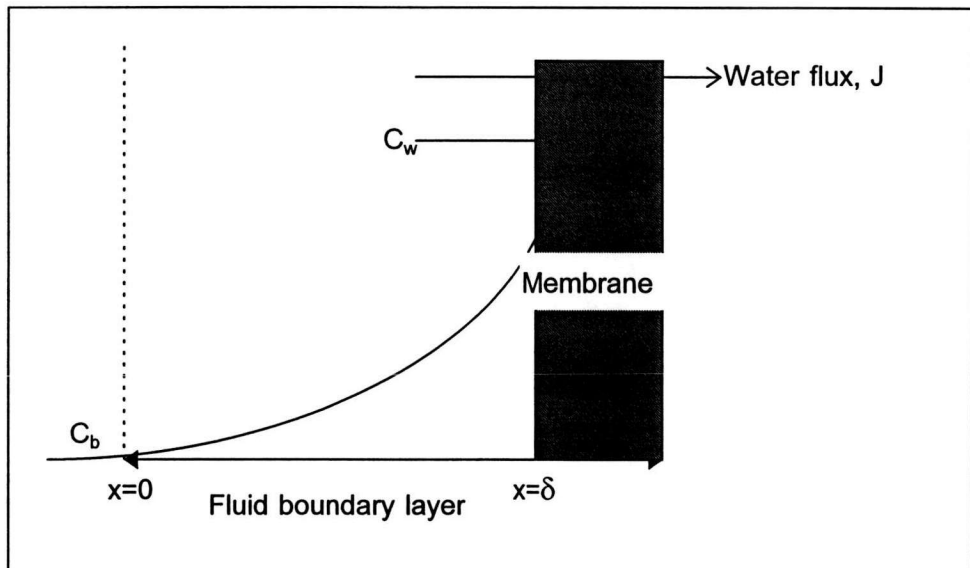
ลดลงของฟลักซ์



รูปที่ 3.11 ลักษณะการกรองของเยื่อแผ่นในระบบไมโครฟิลเตรชัน

3.5.1 กลไกการไหลผ่านเยื่อแผ่น

เมื่อใช้ความดันอัดสารละลายผ่านเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนของเยื่อแผ่นจะสามารถผ่านออกไปได้ จะเหลือแต่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สะสมที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น เป็นผลให้เกิดเกรเดียนต์ความเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงเกรเดียนต์ของความเข้มข้น

ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยจะมีค่าสูงสุดที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นและเมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดการแพร่กลับของอนุภาคแขวนลอยที่จุดนั้นและภายใต้ภาวะคงที่อัตราการเกิดการถ่ายโอนมวลสารผ่านการกรองจะสมดุลกับการแพร่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.2

$$J C - D_v \frac{dC}{dx} = J C_p \quad (3.2)$$

เมื่อ J = เพอร์มิเอชันฟลักซ์ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

C = ความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่นที่จุด X ใดๆ (กรัมต่อลิตร)

C_p = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสายเพอร์มิเอท(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D_v = ความสามารถในการแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเมตรต่อวินาที)

จากสมการที่ 3.2 สามารถทำการอินทิเกรตภายในชั้นขอบเขต(ดังแสดงในรูปที่ 3.12)

$$J = \frac{D_v}{\delta} \ln \frac{C_w}{C_b} \quad (3.3)$$

เมื่อ C_w = ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)

C_b = ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยในสารละลายป้อน (กรัมต่อลิตร)

δ = ความหนาชั้นขอบเขต (เมตร)

แทนค่า $\frac{D_v}{\delta}$ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient : K)

$$J = K \ln \frac{C_w}{C_b} \quad (3.4)$$

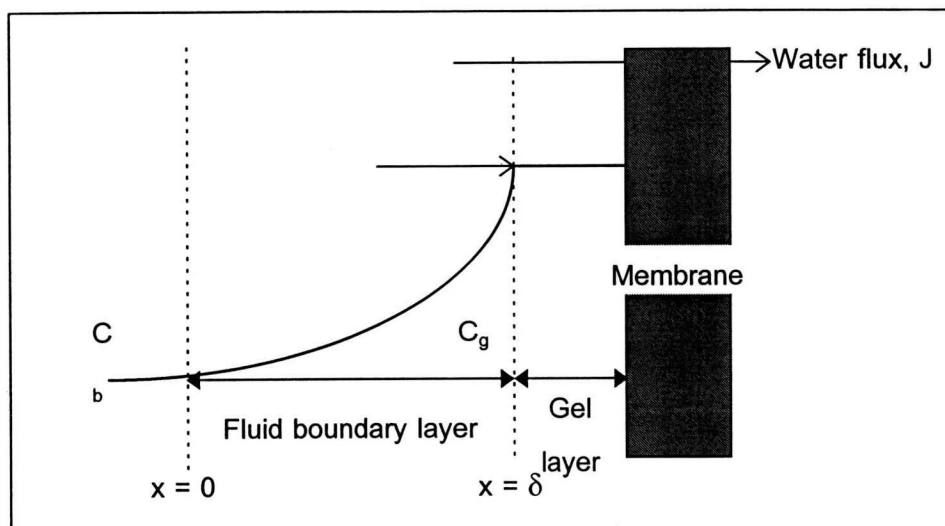
โดยที่ K ไม่ได้เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้น แต่จะขึ้นกับแรงขับของความดันและการไหลของของไหลผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งมีผลต่อความหนาของชั้นขอบเขต

การเพิ่มค่าอัตราฟลักซ์ของการกรองทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น (C_w) เพิ่มขึ้น แต่ค่า C_w จะมีค่าสูงสุดที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้อนุภาคแขวนลอยจะเกิดเป็นชั้นเจล และความเข้มข้นของเจล (C_g) เป็นค่าสูงสุดของ C_w (ดังแสดงในรูป 3.13)

$$J = K \ln \frac{C_g}{C_b} \quad (3.5)$$

ค่า C_g จะขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง คือ ความดัน อุณหภูมิ ค่าการละลายและค่าความเป็นกรด-ด่าง อาจกล่าวได้ว่า C_g คือค่าความเข้มข้นที่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดความดันกลับออสโมติกสูงจนไม่เกิดฟลักซ์ได้

ชั้นเจลเปรียบเสมือนเป็นเยื่อแผ่นชั้นที่สอง ที่จะสกัดกั้นการไหลผ่านของตัวทำละลายทำให้ค่าฟลักซ์ของการกรองลดลง

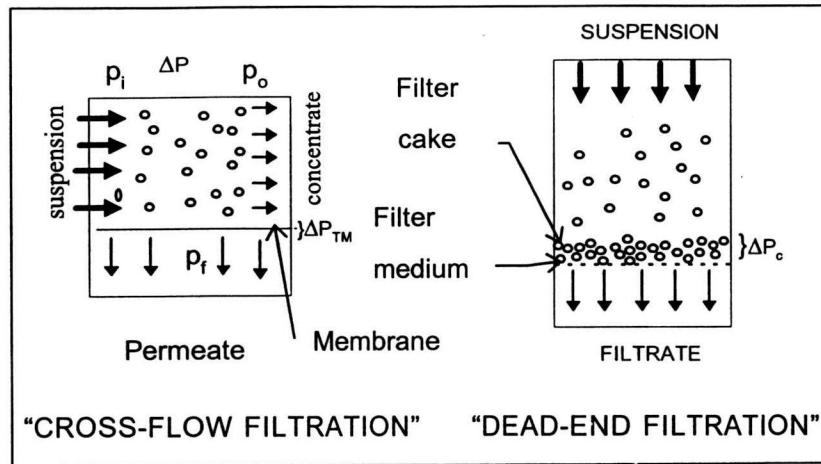


รูปที่ 3.13 แสดงเกรเดียนต์ของความเข้มข้นหลังจากเกิดเจลโพลาริเซชัน

การเกิดเจลโพลาริเซชันที่ความเข้มข้นต่ำ อัตราฟลักซ์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ และสามารถหาค่าฟลักซ์ได้ตามสมการที่ 3.5 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดชั้นเจลขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าการลดลงแบบ log

จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องลดการเกิดเจลโพลาริเซชัน ดังนั้นจึงใช้วิธีการกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.14

การกรองแบบขนานจะเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวกรองทำให้อนุภาคบริเวณผิวกรองเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ชั้นความหนาของเจลมีค่าลดลง มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า สายป้อนจะวิ่งขนานกับตัวกรองด้วยความแตกต่างของแรงดันขาเข้า (P_i) กับแรงดันขาออก (P_o)



รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบการกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น และการกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น

ดังนั้น

$$\Delta P = P_i - P_o \quad (3.6)$$

ความดันลดนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหล หรือความเร็วในการไหล ดังสมการของ Poiseuille สำหรับการไหลแบบลามินาร์

$$\Delta P = \frac{C_1 \mu L V}{d^2} = \frac{C_2 \mu L Q}{d^4} \quad (3.7)$$

เมื่อ μ = ค่าความหนืด (ปาสคาล-วินาที)

L = ความยาวของตัวกรอง (เมตร)

d = ความสูงของช่องว่างของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น (เมตร)

C_1, C_2 = ค่าคงที่ของรูปทรงของช่อง

สมการของ Fanning หรือ Darcy สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$$\Delta P = \frac{C_3 f L V^2}{d} = \frac{C_4 f L Q^2}{d^5} \quad (3.8)$$

เมื่อ f = แฟคเตอร์ที่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์

C_3, C_4 = เป็นค่าคงที่ของรูปทรงของช่องว่าง

แรงขับผ่านเยื่อแผ่นคือ ความแตกต่างระหว่างความดันก่อน และหลังผ่านเยื่อแผ่นโดยค่าเฉลี่ยของค่าแรงขับผ่านเยื่อแผ่น (ΔP_{TM}) มีค่าดังนี้

$$\Delta_{PTM} = \frac{P_i + P_o}{2} - P_f \quad (3.9)$$

โดยทั่วไปสายเพอร์มิเอทออกสู่ความดันบรรยากาศ ดังนั้น P_f จะมีค่าเป็นศูนย์ (ความดันเกจ)

$$\Delta_{PTM} = P_i - \left(\frac{\Delta P}{2} \right) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.10 จะเห็นว่าเมื่อควบคุมความดันขาป้อนเข้าให้คงที่ การเปลี่ยนความเร็วในการไหลแบบขนาน จะมีผลต่อค่า Δ_{PTM}

BLATT และคณะ (23) ได้แสดงสมการที่ชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ของค่า K กับความเร็วของของไหลที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นเป็นดังนี้

$$Sh = \frac{(K \cdot d)}{D_v} = A Re^B Sc^{1/3} \quad (3.11)$$

โดยที่ Sh = เซอร์วูด นัมเบอร์ (Sherwood number)
 d = ความสูงของช่องว่างของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น (เมตร)
 Re = เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold number)
 Sc = สมิท นัมเบอร์ (Schmit number)

ในทางทฤษฎีแล้วค่า B มีค่าเท่ากับ 0.33 สำหรับการไหลแบบลามินาร์ และเป็น 0.80 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน แต่โดยทั่วไป B มีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับลามินาร์ และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นค่า K เป็นสัดส่วนกับรากที่สองของความเร็วในการไหลแบบลามินาร์ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับค่า C_g จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ , ความสามารถในการละลาย , ค่า ความเป็นกรด-ด่าง และรูปทรงของช่อง และความเร็วในการไหล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล และค่า C_g

ส่วนค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะขึ้นกับค่า Δ_{PTM} ดังสมการ

$$J = \frac{\Delta_{PTM}}{(R_M + R_G) \cdot \mu} \quad (3.12)$$

เมื่อ R_M = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (เมตร⁻¹)

R_G = ความต้านทานของชั้นเจล (เมตร⁻¹)

โดยค่า R_M มีค่าคงที่ ดังนั้นในช่วงการกรองที่ยังไม่มีการเกิดเจลโพลาริเซชัน ค่าฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับค่า ΔP_{TM} จนกระทั่งเมื่อเกิดชั้นเจลจะทำให้ค่าอัตราการไหลรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงเรื่อยจนกระทั่งมีค่าคงที่

จากสมการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้น ค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ 4 ค่าคือ

1. ความดัน (จากสมการที่ 3.9 ,3.10 และ 3.12)

ค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้จะแปรผันตรงกับความดันในระบบซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดชั้นฟิล์มบนผิวเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นการเพิ่มความต้านทานรวมของการกรอง และการเพิ่มความดันในระบบจะเป็นการเพิ่มความหนาและความต้านทานของชั้นฟิล์มอีกด้วย ดังนั้นค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถไหลผ่านเยื่อแผ่นได้จะมีค่าสูงที่สุดและค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับความดัน

2. ความเร็วในกระแสเวียนกลับ (จากสมการที่ 3.8, 3.10 และ 3.11)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตรงกับความเร็วในกระแสเวียนกลับ (ดังสมการที่ 3.8) ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มความเร็วในกระแสเวียนกลับจะเป็นการเพิ่มความแรงเฉือนที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นจึงทำให้ค่าความหนาและความต้านทานของชั้นเจลลดลง แต่ค่าแรงขับเฉลี่ยจะลดลงซึ่งแปรผกผันกับค่าความเร็วในกระแสเวียนกลับซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

3. อุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้จึงแปรผันตรงกับอุณหภูมิ

4. ความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลาย (จากสมการที่ 3.5)

ค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ลดลงซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลาย

3.5.2 ความสามารถในการกักเก็บของเยื่อแผ่น (Rejection)

ประสิทธิภาพในการกักเก็บของเยื่อแผ่น สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\sigma = 1 - \frac{C_p}{C_b} \quad (3.13)$$

เมื่อ σ = สัมประสิทธิ์ของการกักเก็บของเยื่อแผ่น

C_p = ความเข้มข้นของสารที่ต้องการกรองในสายเพอร์มิเอท (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_b = ความเข้มข้นของสารที่ต้องการกรองในสายป้อน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ถ้าเยื่อแผ่นที่เตรียมได้มีความสามารถในการกักเก็บอย่างสมบูรณ์ ค่า σ จะมีค่าเป็น 1 และ C_p มีค่าเป็นศูนย์ ความสามารถในการกักเก็บจะขึ้นกับความเข้มข้น และ ΔPTM นั้นหมายความว่า ถ้าความเข้มข้นสูง ค่า σ จะสูง และถ้า ΔPTM มาก ค่า σ จะสูงด้วย