

บทที่ 3

ทฤษฎี

ในบทนี้เป็นการอธิบายทฤษฎีที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับการผลิตตัวกรองอะลูมินาและกระบวนการกรอง เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ ทฤษฎีการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำสลิป , ทฤษฎีการเทแบบ , ทฤษฎีการซินเทอร์ , ทฤษฎีโซล-เจล และ ทฤษฎีการกรอง

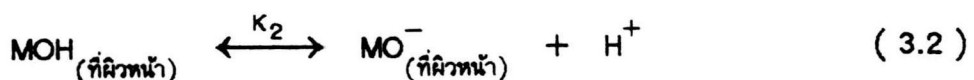
ทฤษฎีการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำสลิป (4)

การกระจายตัวของอนุภาคในน้ำสลิปสามารถเกิดจากสาเหตุได้ดังนี้

1. การดูดซับอออนไว้ที่ผิว เช่น ในกรณีน้ำดิน อออนแอลคาไลน์ถูกดูดซับไว้ที่ผิวดินทำให้เนื้อดินสามารถเกิดการกระจายตัวได้ดี
2. การเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สำหรับโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้าออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดังต่อไปนี้



และ

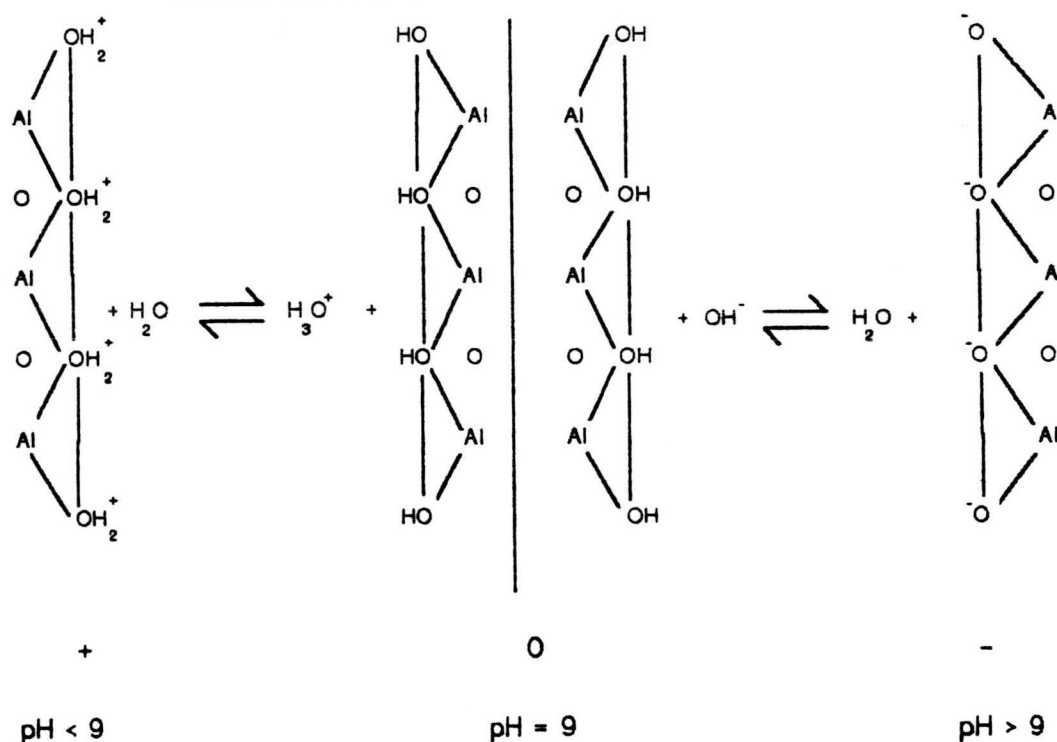


จากสมการข้างบน การกระจายตัวของเนื้อเซรามิกสามารถทำได้โดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสลิป ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสลิปจำเป็นต้องพิจารณาจากจุดที่มีค่าประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge , PZC หรือ Isoelectric point , ICP) คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่าค่า PZC ประจุที่ผิวเป็นประจุลบ และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่าค่า PZC ประจุที่ผิวเป็นประจุบวก แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่า

กับจุด PZC ประจุที่ผิวเป็นกลาง ค่า PZC ของสารต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1 ในกรณีที่เป็น
น้ำสลิปอะลูมินา เมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสลิปจะทำให้ประจุที่ผิวอะลูมินา
เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

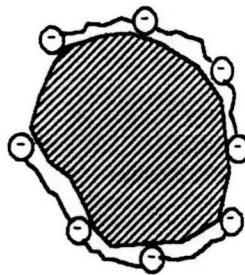
ตารางที่ 3.1 แสดงจุดที่มีค่าประจุเป็นศูนย์ของผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดต่าง ๆ (15)

ผลิตภัณฑ์เซรามิก	สูตรเคมี	PZC
ควอตซ์	SiO_2	2.5
ดีบุกออกไซด์	SnO_2	4.5
ไทเทเนียม	TiO_2	6
เหล็กออกไซด์	Fe_2O_3	8.6
อะลูมินา	Al_2O_3	9
แมกนีเซียม	MgO	12



รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดประจุที่ผิวอะลูมินาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ กัน (4)

3. การดูดซับสารช่วยกระจายตัว ส่วนใหญ่สารช่วยกระจายตัวเป็นเกลือพอลิเมอร์ เกลือพอลิเมอร์เมื่ออยู่ในน้ำสามารถแตกตัวเป็นประจุและเกิดการดูดซับโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีประจุไว้ที่ผิวอนุภาค ทำให้ที่ผิวอนุภาคมีสภาพขั้วเปลี่ยนไปและเป็นการเพิ่มประจุที่ผิวอนุภาค โมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีประจุสามารถถูกดูดซับได้หลายจุดบนผิวอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การทำให้อนุภาคมีประจุด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการทางเซรามิก



รูปที่ 3.2 แสดงการดูดซับอออนพอลิเมอร์ชนิดลบบนผิวเซรามิก (4)

ทฤษฎีการเทแบบ (6)

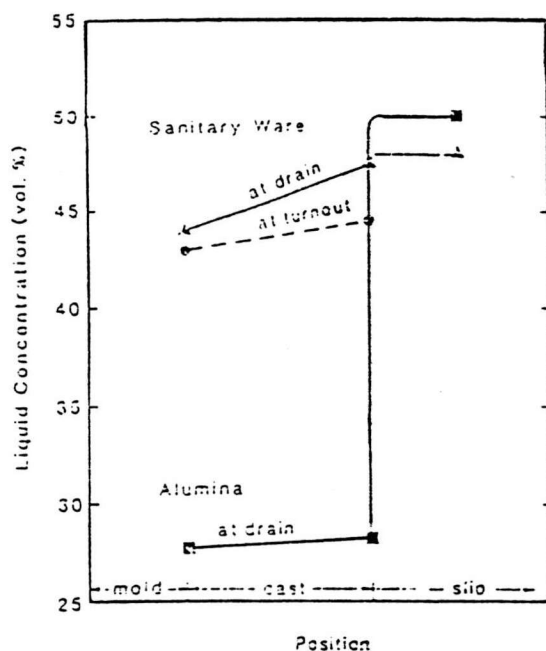
การสร้างชั้นความหนาในแบบพิมพ์เปรียบเทียบกับกระบวนการกรอง คือ เมื่อเทน้ำสลีปลงในแบบ แบบเริ่มดูดซับน้ำจากน้ำสลีป ทำให้เกิดการสร้างชั้นความหนาของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความหนามากขึ้นทำให้อัตราการดูดซับน้ำลดลง ทำให้อัตราการสร้างชั้นความหนาลดลงตามไปด้วย สำหรับสมการที่ใช้ในการหาความหนาของน้ำสลีปแสดงในสมการที่ 3.3 และในรูปที่ 3.3 แสดงปริมาณของน้ำที่อยู่ในน้ำสลีป, ในชิ้นงานขณะเทแบบและในแบบ

$$x = K_1 \sqrt{t} \quad (3.3)$$

เมื่อ x เป็นความหนาของชิ้นงาน

t เป็นเวลาในการเทแบบ

K_1 เป็นค่าคงที่ ขึ้นกับสมบัติของแบบ ความหนืดของน้ำสลีป อุณหภูมิ เป็นต้น



รูปที่ 3.3 แสดงปริมาณน้ำในส่วนต่างๆในขณะเทแบบ (5)

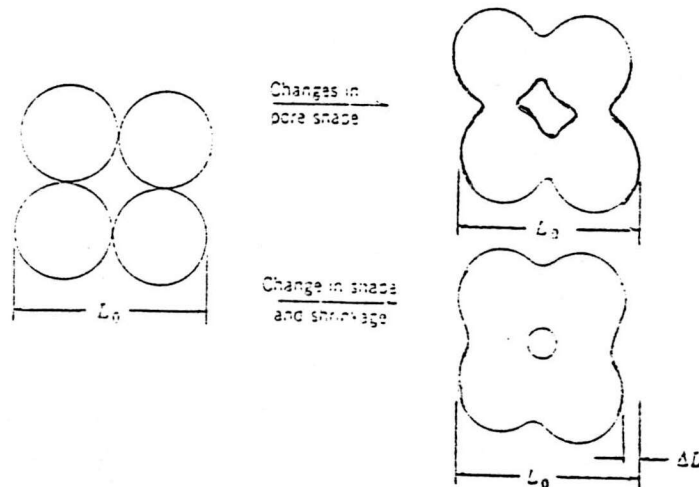
ทฤษฎีการซินเทอร์ (4 , 5 , 6)

การซินเทอร์เป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อเซรามิก โดยปกติ กระบวนการซินเทอร์เป็นการทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและมีความหนาแน่นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นตามทฤษฎี อุณหภูมิที่ใช้ในการซินเทอร์ประมาณ 0.67 ถึง 0.8 ของจุดหลอมเหลวของเนื้อเซรามิก ในการซินเทอร์อะลูมินา อะลูมินามีจุดหลอมเหลวที่ 2054 °ซ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ซินเทอร์จึงประมาณ 1600 - 1800 °ซ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการซินเทอร์ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเกรน
2. การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของรูพรุน
3. การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

ในรูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุน พบว่า ในระยะเริ่มต้นรูพรุน เปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นช่องว่าง ซึ่งเกิดจากการเชื่อมติดกันของอนุภาค การเปลี่ยนแปลงใน

ระยะนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน จากนั้นรูพรุนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้นและมีขนาดเล็กลง การเปลี่ยนแปลงในขั้นนี้จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเปลี่ยนไป กระบวนการซินเทอร์สามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.2



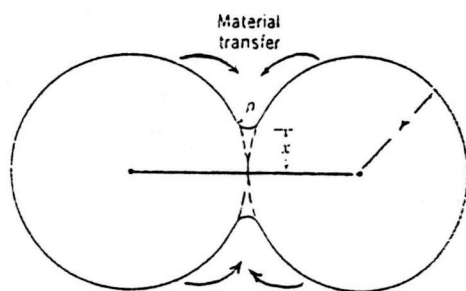
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนรูปร่างของรูพรุนในระหว่างการซินเทอร์ (6)

ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดและกลไกในการซินเทอร์ (5)

ชนิดการซินเทอร์	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-การตกตะกอน (Solution-precipitation)	ความดันแคปิลารี , แรงตึงผิว

การซินเทอร์ที่ใช้ในกระบวนการเซรามิกส่วนใหญ่เป็นการซินเทอร์เฟสไอ, การซินเทอร์ในสถานะของแข็ง และการซินเทอร์เฟสของไหล ในที่นี้จะอธิบายกระบวนการซินเทอร์ที่สภาวะต่าง ๆ

1. การซินเทอร์เฟสไอ แรงขับในการซินเทอร์ชนิดนี้คือความแตกต่างของความดันไอรหว่างผิวโค้ง ดังที่แสดงในรูป 3.5 การถ่ายเทมวลจากผิวนูนภาคโค้งนูนและมีความดันไอลดลงข้างสูงไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค ซึ่งมีผิวโค้งเว้าและมีความดันไอดำกว่า การถ่ายเทนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนและเป็นการเชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกัน กระบวนการซินเทอร์แบบนี้ไม่ทำให้เกิดการหดตัวและไม่เป็นการเพิ่มความหนาแน่น



รูปที่ 3.5 แสดงการถ่ายเทมวลในการซินเทอร์เฟสไอ (6)

2. การซินเทอร์ในสถานะของแข็ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นต้น : เกิดการขยายตัวของคอ (Neck) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค ในขั้นนี้ชิ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

ขั้นกลาง : เป็นช่วงการเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันกับการโตของเกรน ในช่วงนี้อุภาคมีขนาดโตขึ้นจนมีรูปร่างแบบเกรนและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ขั้นสุดท้าย: เป็นช่วงที่อัตราการเพิ่มความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นช่วงสุดท้ายของการเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งในขั้นสุดท้ายนี้ความหนาแน่นมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์

เชันต์ของความหนาแน่นทางทฤษฎี

สำหรับลักษณะจุลโครงสร้างหรือการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้แสดงใน
ตารางที่ 3.3

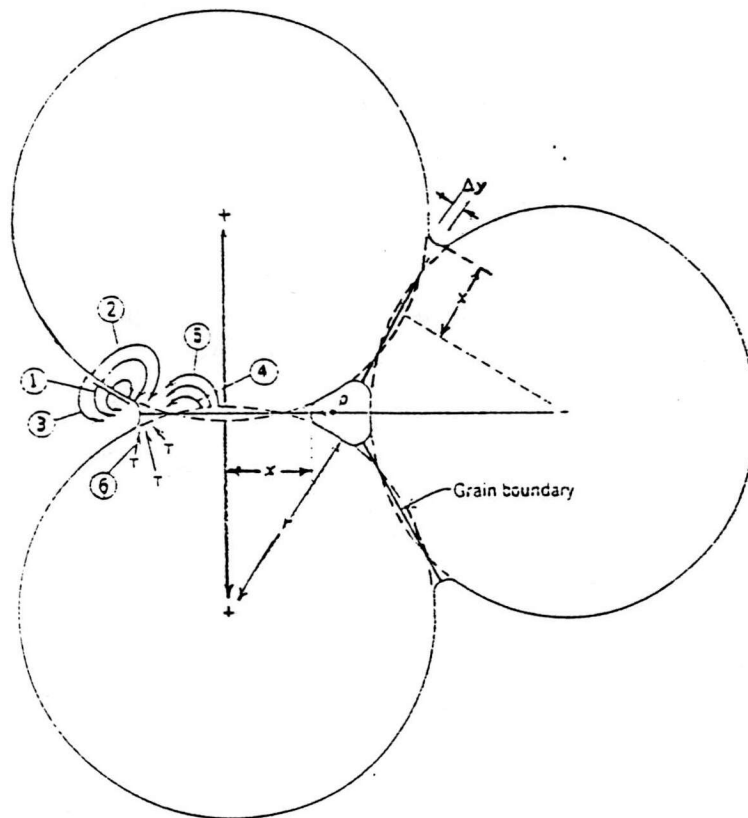
ตารางที่ 3.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุลโครงสร้างในแต่ละขั้นตอนของการซินเทอร์ (4)

ขั้นของการซินเทอร์	การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในชิ้นงาน
ขั้นต้น	ผิวอนุภาคเรียบ , เกิดการสร้างขอบเกรนและการสร้างคอ ทำให้รูพรุนเปิดมีรูปร่างกลม , เกิดการแพร่ของตัวเติมที่ว่าง ไว, ความพรุนลดลง (น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์)
ขั้นกลาง	เกิดการหดตัวของรูพรุนเปิดระหว่างขอบเกรน ความพรุนลดลงอย่างเด่นชัด , เกรนโตขึ้นอย่างช้า ๆ
ขั้นสุดท้าย (1)	เกิดรูพรุนปิดที่มีแก๊สอยู่ภายใน , มีความหนาแน่นประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี, พบรูพรุนปิดที่จุดตัดของขอบเกรน รูพรุนเกิดการหดตัวจนกระทั่งหายไป ในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า การหดตัวของเกรนจะเกิดช้า
ขั้นสุดท้าย(2)	เกรนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ภายในเกรนและรูพรุนหดตัวค่อนข้างช้า

กลไกการซินเทอร์ (6)

ในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นกลไกการถ่ายเทมวลของอนุภาคในลักษณะภาพตัดขวางสอง
มิติของรูพรุนที่ติดกับขอบเกรน รูปร่างของเกรนจะเกิดการหดตัวเมื่อเกิดการถ่ายเทมวลสาร
ระหว่างเกรนแล้วไปสะสมที่ผิวรูพรุน กลไกการถ่ายเทมวลสามารถแบ่งออกได้เป็นกลไกเพิ่ม
ความหนาแน่น (Densification mechanism) และกลไกไม่เพิ่มความหนาแน่น (Non-

densification mechanism) ดังที่แสดงในตารางที่ 3.4 กลไกไม่เพิ่มความหนาแน่นเป็นการถ่ายเทมวลรอบ ๆ ผิวนูน หรือเป็นการถ่ายเทมวลจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่ง โดยไม่ทำให้จุดศูนย์กลางของเกรนเกิดการเคลื่อนที่พร้อมกัน ดังนั้นในการขึ้นเทอร์ต้องเลือกภาวะที่เหมาะสม เช่น กลไกไม่เพิ่มความหนาแน่นเกิดได้ช้าและทำให้ได้โครงสร้างที่ไม่ต้องการ ส่วนกลไกเพิ่มความหนาแน่นเกิดการแพร่ของขอบเกรนและการแพร่ของปริมาตรเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3.6 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นเทอร์ (6)

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

ตารางที่ 3.4 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการซินเทอร์

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

แรงขับในกระบวนการซินเทอร์ (4)

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในกระบวนการซินเทอร์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นโดยการลดพื้นที่ผิวและทำให้พลังงานอิสระที่ผิวดำลงเมื่อกำจัดผิวหน้าระหว่างของแข็งและไอ แรงขับคือการลดพลังงานอิสระรวมของระบบ (ΔG_T) ดังสมการ

$$\Delta G_T = \Delta G_V + \Delta G_B + \Delta G_S \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔG_V เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพันธ์ปริมาตร

ΔG_B เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพันธ์ขอบเขต

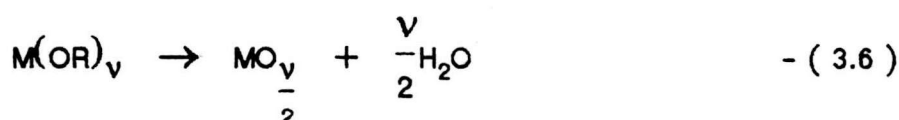
ΔG_S เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสัมพันธ์ที่ผิวเกรน

3. การซินเทอร์เฟสของไหล เป็นการซินเทอร์ของไหลหนืดซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิซินเทอร์และเป็นกลไกหลักในการเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งกลไกชนิดนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระบบซิลิเกต การซินเทอร์เฟสของไหลเกิดขึ้นเมื่อของไหลคลุมผิวอนุภาค ทำให้ความดันแคปิลารีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทไอมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการโตของเกรน

ทฤษฎีโซล-เจล (15)

กระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบาง, เส้นใยและอนุภาคขนาดเล็กเย็ด โซลเกิดจากอนุภาคของแข็งกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว ในขณะที่เจลเกิดจากอนุภาคของแข็งเรียงตัวกระจายเป็นโครงตาข่ายทั่ว ๆ ไปในของเหลวทั้งเฟสของเหลวและของแข็งต่อเนื่องกัน อนุภาคของแข็งในโซลมีขนาดตั้งแต่ $10^{-14} - 10^{-7}$ เซนติเมตร เมื่อโซลเกิดการสูญเสียน้ำ จะทำให้โซลเปลี่ยนแปลงเป็นเจล

ดังนั้นการเตรียมสารละลายโซล-เจลจำเป็นต้องสร้างอนุภาคขนาดคอลลอยด์ ในการเตรียมขนาดอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี คอลลอยด์สามารถเตรียมได้จากเกลืออนินทรีย์ของโลหะ เช่น $Al(NO_3)_3$ หรือสารประกอบแอลคอกไซด์ เช่น $Al(OC_4H_9)_3$ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการเตรียมสารละลายคอลลอยด์หรือสารละลายโซล-เจลจากสารประกอบแอลคอกไซด์ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะแอลคอกไซด์ ($M(OR)_v$) และน้ำทำให้ได้โลหะออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ดังสมการ 3.5 และ 3.6

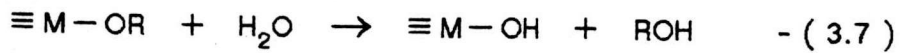


เมื่อ M เป็นโลหะที่มีประจุบวก v

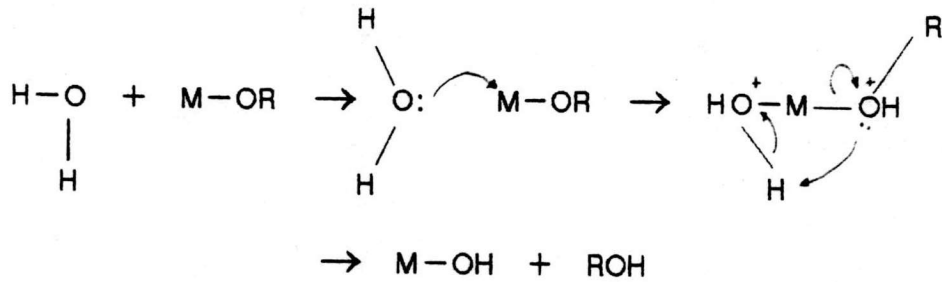
R แทนหมู่อัลคิล (C_nH_{2n+1})

โลหะแอลคอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาได้พร้อมกันสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดไลซิส (สมการ 3.7) และปฏิกิริยาควบนั่น (สมการ 3.8 และ 3.9)

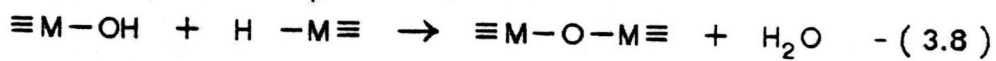
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction)



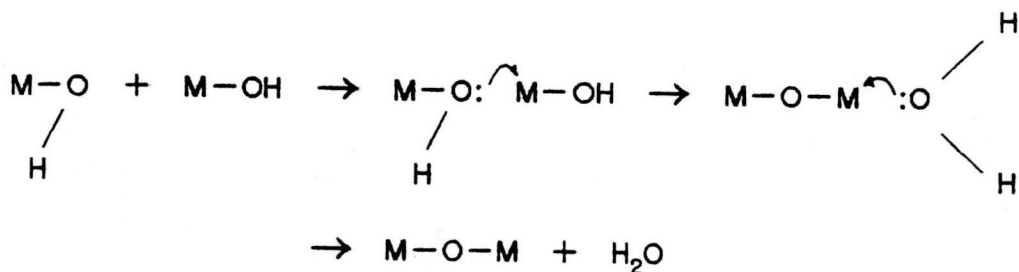
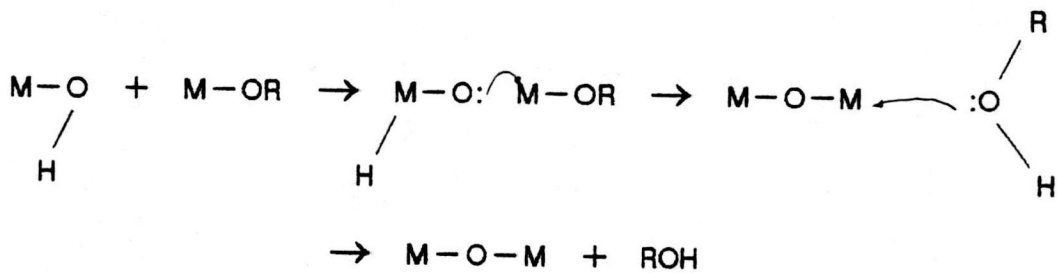
กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังนี้



ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction)



กลไกการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่น เริ่มต้นด้วยกลไกการแทนที่แบบนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic substitution, S_N) แล้วตามด้วยกลไกการเติมแบบนิวคลีโอ

ไอพิลลิก (Nucleophilic addition , A_N) จากนั้นเกิดการย้ายโปรตอนจากโมเลกุลที่ชนไปยังกลุ่มแอลคอกไซด์ ($-OC_nH_{2n+1}$) หรือกลุ่มไฮดรอกซิล ($-OH$) หลังจากนั้นโมเลกุลของแอลกอฮอล์หรือโมเลกุลน้ำจะหลุดออกไป

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นเกิดได้เร็วเมื่อมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมกรดปริมาณเล็กน้อยลงในสารละลายทำให้อัตราการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมด่างในปริมาณเล็กน้อยทำให้อัตราเร็วการควบแน่นเพิ่มขึ้น กลุ่มแอลคอกไซด์ที่เหลือ ($-OR$) จากการควบแน่นในสมการ 3.7 สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก เช่น อะตอมของโลหะประจุสามบวกที่มีกลุ่มอัลคอกไซด์ได้ 3 กลุ่มสามารถเกิดการควบแน่น ทำให้เกิดการเชื่อมของพันธะระหว่างออกซิเจนและโลหะได้สามพันธะ

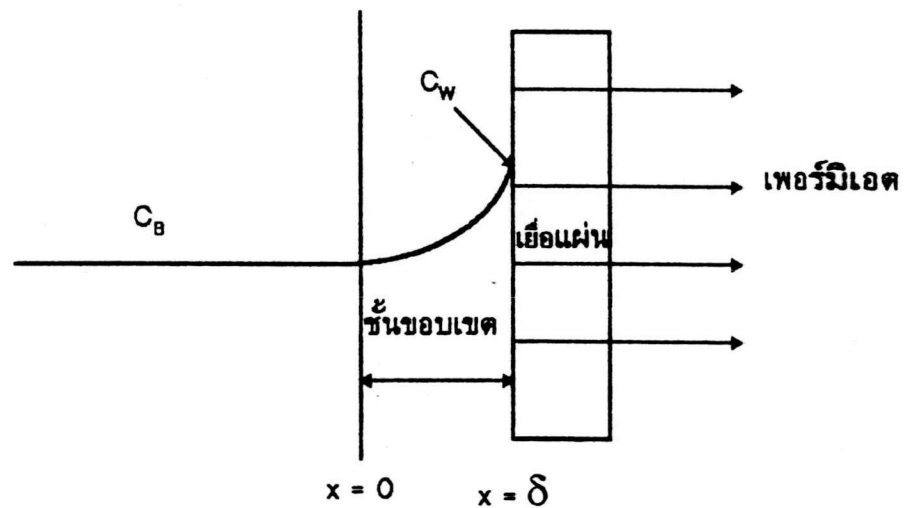
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นขึ้นกับความเข้มข้นของแอลคอกไซด์ในสารละลาย, ชนิดของแอลคอกไซด์, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, อัตราส่วนระหว่างน้ำและแอลคอกไซด์, ความเข้มข้นของน้ำและแอลคอกไซด์ที่ใช้ และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เตรียมได้

เมื่อเตรียมสารละลายโซลเรียบร้อยแล้ว ในขั้นต่อมาเป็นการระเหยเอาตัวทำละลายออกจากสารละลายโซลจนกระทั่งถึงจุดที่สารละลายโซลเปลี่ยนเป็นเจล หลังจากการอบเจลจนแห้ง เจลที่ได้จะมีความพรุนต่อเนื่อง รูพรุนที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อนข้างแคบ และมีขนาดไม่กี่ร้อยนาโนเมตร สำหรับขนาดรูพรุนขึ้นกับกระบวนการที่ใช้เตรียมเจล ถ้าเตรียมเจลจากการอบแห้งในอากาศ เช่น โนเตาอบ สารที่ได้เรียกว่าซีโรเจล (Xerogel) ส่วนการอบแห้งโดยใช้ของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluid) สารที่ได้เรียกว่าแอโรเจล (Aerogel) ของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่ใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตต่ำ และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป

ทฤษฎีการกรอง (25)

การกรองเป็นการแยกเอาของแข็งออกจากของเหลวโดยการผ่านของไหลไปยังตัวกรองทำให้เกิดการสะสมของของแข็งบนผิวหน้าของตัวกรอง การกรองแบ่งออกตามขนาดของสารที่ถูกกรอง ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันใช้กรองสารขนาด 0.1 ถึง 10 ไมโครเมตร การถ่ายเทมวลและคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Mass Transfer and Concentration Polarization)

เมื่อใช้ความดันอัดสารละลายผ่านเยื่อแผ่น โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนของเยื่อแผ่นสามารถผ่านออกไปได้ ทำให้เกิดการสะสมของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นและในสารละลาย ความแตกต่างของความเข้มข้นนี้เรียกว่าคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ดังที่แสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงความแตกต่างของความเข้มข้นที่บริเวณต่างๆ (25)

ความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่าสูงสุดที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดการแพร่กลับของตัวถูกละลาย ที่สภาวะคงที่ อัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างการกรองสมดุลกับการแพร่กลับของตัวถูกละลายในทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังสมการที่ 3.10

$$J C - D_v \frac{dC}{dx} = 0 \quad - (3.10)$$

เมื่อ

- J = อัตราการกรอง (flux)
- C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุด x
- D_v = ความสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย

จากสมการที่ 3.10 ทำการอินทิเกรตภายในชั้นขอบเขตจากจุด $x = 0$, $C = C_B$ ถึง $x = \delta$, $C = C_w$ (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7)

$$J = \left(\frac{D_v}{\delta} \right) \ln \left(\frac{C_w}{C_B} \right) \quad - (3.11)$$

เมื่อ

- C_w = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น
- C_B = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย
- δ = เป็นความหนาของชั้นขอบเขต

กำหนดให้ $\frac{D_v}{\delta}$ เท่ากับ K (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล , mass transfer coefficient) แทนลงในสมการ 3.11

$$J = K \ln \left(\frac{C_w}{C_B} \right) \quad - (3.12)$$

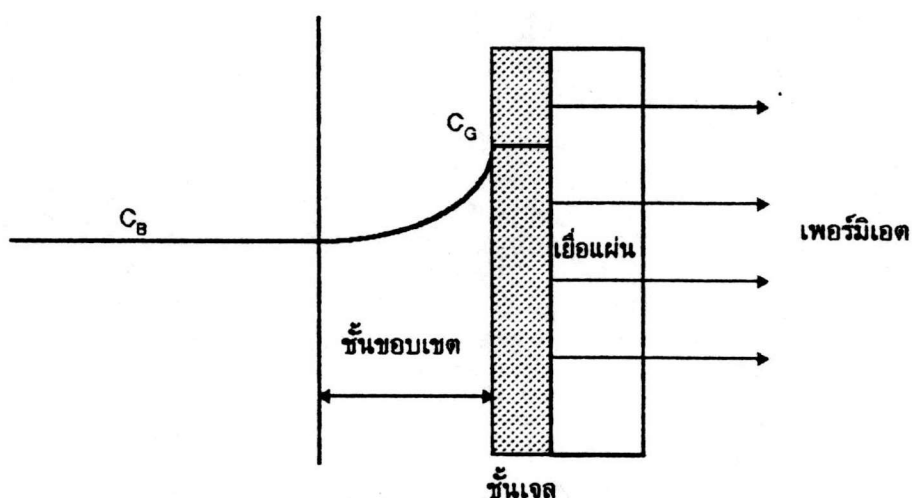
ค่า K ไม่เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย แต่เป็นฟังก์ชันกับแรงขับของความดันและลักษณะการไหลของของไหลผ่านเยื่อแผ่น

เจลโพลาริเซชัน (Gel Polarization)

อัตราการกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากแรงขับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น (คือค่า C_w) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า C_w สามารถเพิ่มขึ้นได้ถึงจุดหนึ่งเท่านั้น และที่จุดนี้เรียกว่าชั้นเจล ดังนั้น C_w มีค่าสูงสุดเท่ากับความเข้มข้นของเจล (C_G) ดังที่แสดงใน

รูป 3.8

$$J = K \ln \left(\frac{C_G}{C_B} \right) \quad - (3.13)$$

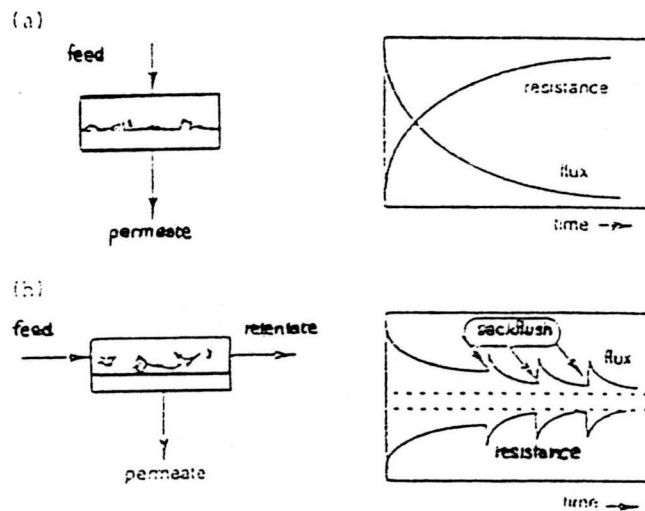


รูปที่ 3.8 แสดงการเกิดเจลโพลาริเซชัน (25)

ค่า C_G ขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง รวมทั้ง ความดัน อุณหภูมิ ค่าการละลาย และค่าความเป็นกรด-ด่างอาจกล่าวได้ว่า C_G คือค่าความเข้มข้นที่สูงเพียงพอที่ทำให้เกิดความดันกลับออสโมติกสูงจนไม่มีฟลักซ์เกิดขึ้น ชั้นเจลเปรียบเสมือนเป็นเมมเบรนชั้นที่สองซึ่งสกัดกั้นการไหลผ่านของตัวทำละลาย

เราสามารถลดการเกิดเจลโพลาริเซชันได้หลายวิธี โดยทำให้ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่นได้มากที่สุดและลดความหนาของชั้นเจล ดังนั้นจึงใช้วิธีการกรองแบบไหลผ่านกลับเยื่อแผ่น การกรองแบบไหลขนานเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นทำให้

โมเลกุลหรือสารที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นเกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นความหนาของเจลที่สร้างขึ้น จึงมีค่าลดลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สายป้อนจะไหล ขนานกับเยื่อแผ่นและทำให้เกิดความแตกต่างของความดันขาเข้า (P_i) และความดันขาออก (P_o)



รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการกรองแบบตั้งฉากและการกรองแบบทั่วไป (26)

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta P = P_i - P_o \quad - (3.14)$$

ค่าความดันลด (ΔP) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล (Q) หรือความเร็วในการไหลผ่านผิวหน้าเยื่อแผ่น

ความดันลดเป็นไปตามสมการของ Poiseuille สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$\Delta P = \frac{C_1 \mu L V}{d^2} = \frac{C_2 \mu L Q}{d^4} \quad - (3.15)$$

เมื่อ μ = ค่าความหนืด

L = ความยาวของตัวกรอง

d = ความสูงของช่องของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น

C_1, C_2 = ค่าคงที่ของรูปทรงของช่อง

ความดันลดเป็นไปตามสมการของ Fanning หรือ Darcy สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$$\Delta P = \frac{C_3 f L V^2}{d} = \frac{C_4 f L Q^2}{d^5} \quad - (3.16)$$

เมื่อ f เป็นแฟคเตอร์ที่ขึ้นกับค่า Renold number

C_3, C_4 เป็นค่าคงที่ของรูปทรงของช่อง

แรงขับผ่านเยื่อแผ่นเป็นความแตกต่างระหว่างความดันด้านสายป้อนและความดันด้านเพอร์มิเอต เนื่องจากความแตกต่างนี้มีค่ามากที่สุดที่บริเวณทางเข้าของสายป้อนและมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำสุดที่ทางออกของสายป้อน ดังนั้น แรงขับเฉลี่ย (Δ_{PTM}) จึงนิยามดังนี้

$$\Delta_{PTM} = \frac{P_i + P_o}{2} - P_f \quad - (3.17)$$

โดยทั่วไปค่า ความดันด้านเพอร์มิเอต (P_f) มีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้น

$$\Delta_{PTM} = \frac{P_i + P_o}{2} = P_i - \left(\frac{\Delta P}{2} \right) \quad - (3.18)$$

การหาอัตราการกรอง

ในกระบวนการการกรองแบบไหลขนาน อัตราการกรองเป็นฟังก์ชันกับ 1) ความดันผ่านเยื่อแผ่น (transmembrane pressure , Δ_{PTM}) , 2) ความเข้มข้นที่ขึ้นเจด (C_G) , 3) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K) และ 4) ความเข้มข้นของสารละลาย (C_B) สำหรับตัวแปรสามตัวสุดท้ายสามารถหาได้จากสมการเจดโปลาไรเซชัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเป็นฟังก์ชันกับความเร็วของของไหลผ่านหน้าเยื่อแผ่นตาม Sherwood number (Sh)

$$Sh = \frac{K_d}{D_v} = AR^B Sc^{1/3} \quad - (3.19)$$

โดยที่ Sh = Sherwood number
 Re = Reynolds number
 Sc = Schmit number

ในทางทฤษฎี ค่า B มีค่าเท่ากับ 0.33 ในการไหลแบบราบเรียบ และมีค่าเท่ากับ 0.80 ในการไหลแบบปั่นป่วน แต่โดยทั่วไปค่า B ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.5 ในการไหลแบบราบเรียบ และมีค่าเท่ากับ 1 ในการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจึงเป็นรากที่สองของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการไหลเมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับค่าความเข้มข้นที่ชั้นเจล (C_g) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ , ความสามารถในการละลาย , ค่า พีเอช , รูปทรงของช่อง และความเร็วในการไหล แต่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและค่าความเข้มข้นที่ชั้นเจลเป็นอย่างมาก

ตัวแปรที่ใช้หาอัตราการกรองคือค่า ΔPTM ดังสมการ

$$J = \left(\frac{\Delta PTM}{R_M + R_G} \right) \quad - (3.20)$$

เมื่อ R_M เป็นความต้านทานการไหลของเยื่อแผ่น

R_G เป็นความต้านทานการไหลของชั้นเจล

โดยทั่วไปความต้านทานเนื่องจากเยื่อแผ่นมีค่าคงที่ ดังนั้นในช่วงการกรองที่ยังไม่มีการเกิดเจลโพลารไรเซชัน ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับค่า ΔPTM สำหรับในกรณีน้ำเปล่า เมื่อเริ่มใช้สารละลายจะเกิดการสร้างชั้นเจลขึ้น ทำให้เกิดความต้านทานการไหลรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าฟลักซ์จึงมีค่าลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าคงที่

รีเจคชัน (Rejection)

รีเจคชัน (σ) เป็นค่าแสดงสมบัติของเยื่อแผ่นในการกักเก็บสาร ซึ่งหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเยื่อแผ่นกักไว้หรือไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ ค่ารีเจคชันสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.21

$$\sigma = 1 - \frac{C_p}{C_b} \quad - (3.21)$$

เมื่อ C_p เป็นความเข้มข้นของสารที่ต้องการกรองในสายเพอร์มิเอต

C_b เป็นความเข้มข้นของสารที่ต้องการกรองในสายป้อน

เยื่อแผ่นที่เตรียมได้มีความสามารถในการกักเก็บอย่างสมบูรณ์ นั่นคือค่า σ มีค่าเป็น 1 และ C_p มีค่าเป็น 0 ค่ารีเจคชันขึ้นกับความเข้มข้นของสารในสายป้อนและค่าความดันผ่านเยื่อแผ่น