

บทที่ 2

ทฤษฎี

งานวิจัยนี้มีทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการเตรียมและการทดสอบเยื่อเซรามิก เยื่อบางไคโตแซน และเยื่อคอมโพสิต

2.1 การผลิตเยื่อเซรามิก

การผลิตเซรามิกประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 การขึ้นรูป

การขึ้นรูป คือ การทำให้สารเซรามิกจับตัวกันเป็นก้อนโดยขึ้นงานที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานที่สำเร็จ มีการขึ้นรูปเซรามิกนั้นเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีด้วยกันคือ

ก. การหล่อแบบ (Slip Casting)

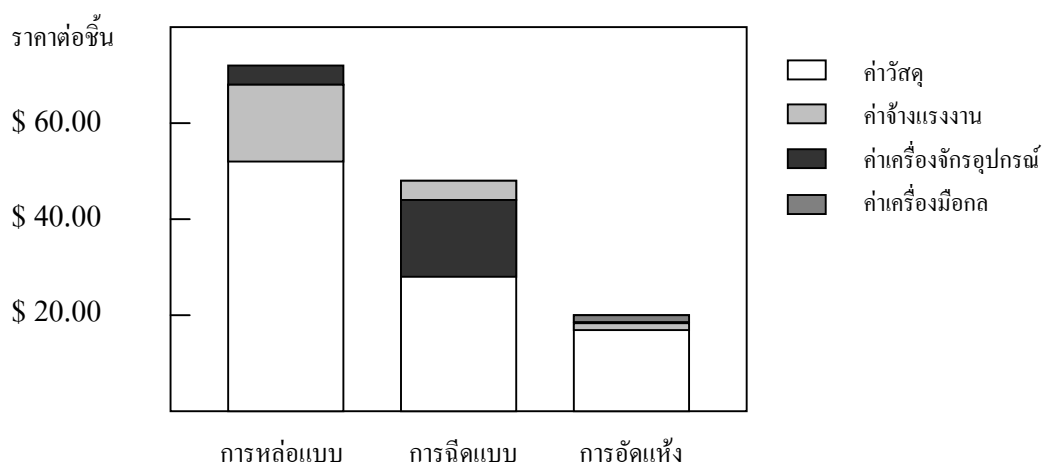
ข. การอัดรีด (Extrusion)

ค. การอัดแห้ง (Pressing)

สำหรับการอัดแห้งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามลักษณะของความดันที่ให้คือ

- Uniaxial press คือการใช้แรงอัดในทิศทางเดียว เป็นการขึ้นรูปแบบง่าย อัตราการผลิตสูงแต่ไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่และมีรูปร่างซับซ้อน
- Isolatic Press คือ การอัดแบบให้แรงอัดในทุกทิศทางเท่า ๆ กัน และมีอัตราการผลิตต่ำกว่าแบบ Uniaxial Press เพราะเครื่องมี ราคาแพง แต่เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะรูปร่างซับซ้อน

การอัดเซรามิกจะต้องทำให้ผงอัดตัวอย่างสม่ำเสมอทุกบริเวณ และไม่มีจุดบกพร่อง (Defect) หรือรอยแตกร้าว (Crack) อยู่ภายในชิ้นงาน ซึ่งแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกันแต่ขั้นตอนตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบการขึ้นรูปและอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเผาแบบอบเชื่อม (Sintering) และผลที่ได้จากกระบวนการ (Process Yield) การอัดเป็นวิธีประหยัดในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างอย่างง่ายไม่ซับซ้อนและ ถ้าหากต้องการผลิตปริมาณมากการอัดรีดจะดีกว่า และถ้าหากชิ้นงานที่ต้องการผลิตมีขนาดใหญ่การหล่อแบบจะดีที่สุด เพราะว่าค่าใช้จ่ายและเครื่องมือจะถูกกว่าวิธีการหล่อแบบและอัด



รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการคิดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างเรียบง่าย (กุลจิรา, 2545)

การเลือกกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับกระบวนการและความต้องการ รูปร่าง และเศรษฐศาสตร์การผลิต (Economic of production) การอัดเซรามิกสามารถผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อน และชิ้นงานที่ได้จะมีรูปร่างเหมือนชิ้นงานสุดท้าย

2.1.2 กระบวนการอบผนึก (Sintering process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารเคลื่อนที่ใกล้ชิดและหลอมรวมตัวกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้มีปัจจัยอยู่หลายประการเช่น แรงกดอัดในการขึ้นรูปสารตัวอย่าง แต่แรงกดอัดนั้นสามารถทำให้อะตอมของสารเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้ เพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะไม่ว่าจะออกแรงกดอัดมากเท่าไรก็จะมีผลอื่น และเมื่อสารตัวอย่างผ่านกระบวนการกดอัดจะคงรูปอยู่ได้ แต่สารยังขาดความแข็งแรงจึงจะต้องนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีช่วงระหว่างครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิหลอมเหลวหรือสองในสามของอุณหภูมิดังกล่าว เนื่องจากอุณหภูมิช่วงนี้ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอม (Atom diffusion) เข้าหากันทำให้เกิดจุดสัมผัสเรียกว่าคอ (Neck) ทำให้อะตอมยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และจากรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณากระบวนการเผาแบบอบผนึกพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ คอเริ่มก่อตัวกันที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค แต่อนุภาคยังแบ่งแยกกันอยู่ต่อมาที่คอเริ่มโตขึ้น ทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคเชื่อมติดกันและสุดท้ายที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคถูกปิดกั้น และการขนส่งระหว่างพื้นผิวและไอถูกกำจัดออกไป ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอะตอมขณะเผาแบบอบผนึกคือการระเหยออกจากผิวหน้าหนึ่งและไปควบแน่นติดกับผิวหน้าหนึ่ง การแพร่ตลอดผิวหน้าของเกรน หรือ การแพร่ในทิศทางตรงข้าม

ระหว่างอะตอมผ่านเกรน จะเห็นว่ากลไกของการเผาอบผนังเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอะตอมโดยตรง การแพร่ในทิศทางตรงข้าม จะทำให้จุดศูนย์กลางของเกรนเคลื่อนเข้าใกล้กัน และทำให้เกิดการหดตัวระหว่างการเผาอบผนัง การหดตัวของเซรามิกหลังการเผาสามารถเกิดขึ้นเชิงเส้นและเชิงปริมาตรซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น

$$S_l = \left[1 - \frac{D_a}{D_b} \right] \times 100 \% \quad (2.1)$$

เมื่อ	S_l	คือ	เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น
	D_a	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางหลังการเผา
	D_b	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการเผา

คำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

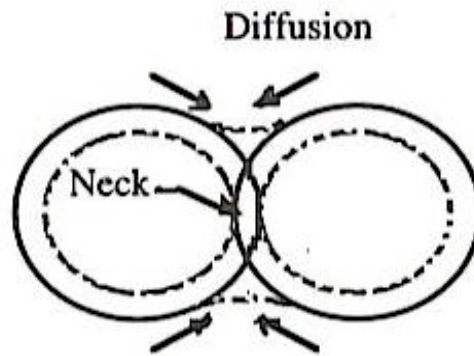
$$S_v = \left[1 - \frac{V_a}{V_b} \right] \times 100 \% \quad (2.2)$$

เมื่อ	S_v	คือ	เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร
	V_a	คือ	ปริมาตรหลังการเผา
	V_b	คือ	ปริมาตรก่อนการเผา

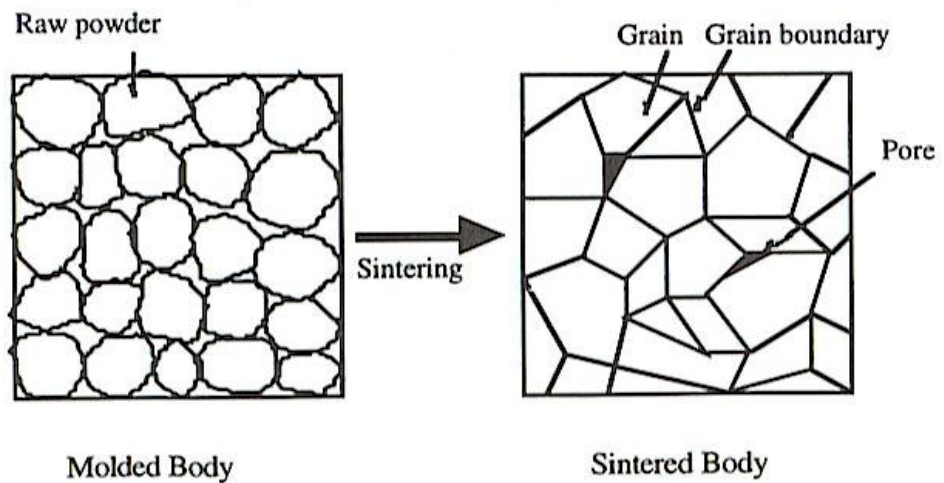
การหดตัวของเซรามิกหลังจากการเผาแบบอบผนังเป็นสมบัติสำคัญเช่นกัน ในการพิจารณาการผลิตเซรามิก จะต้องคำนึงถึงการหดตัวของชิ้นเซรามิกเพราะการหดตัวสูงมากเกินไปเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการโค้งงอ หรือบิดเบี้ยว

การใช้อุณหภูมิสูง ๆ ดังนั้นการควบคุมบรรยากาศเป็นเรื่องสำคัญมากทั้งนี้ เพื่อต้องการขจัดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่ต้องการออกไป เช่น การเกิดออกไซด์ ขณะที่เพิ่มความร้อน ระหว่างเผาอบผนัง และการลดความร้อนจะต้องไม่เร็วเกินไปเพราะว่ามีความสำคัญกับสมบัติของสารตัวอย่างที่ได้ แต่ถ้าหากสารตัวอย่างที่ไม่บริสุทธิ์พอ สารอาจจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่สารชนิด

เดียวกันแต่บริสุทธิ์จะไม่หลอมเหลว ดังนั้น ในกระบวนการเผาแบบอบพ่นิกสารตัวอย่างที่ได้จะมีสมบัติที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของสาร



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดคอ (Uchino, 2000)



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการเผาอบพ่นิก (Uchino,2000)

2.2 การวัดรูพรุน และการกระจายของรูพรุน (Porosity and Pore Size Distribution Measurement)

รูพรุนที่เกิดขึ้นในเซรามิกนั้นเกิดจากการนำผงไปขึ้นรูปและเผาอบผนึก ในกระบวนการเผาอบอนุภาคของสารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและต่อกัน รูจะเป็นช่องว่างที่เชื่อมต่อกันไม่สนิทเป็นพื้นผิวเดียวกัน ดังนั้นนิยามของรูพรุน (Porosity) คือ สัดส่วนของของปริมาตรของรูต่อปริมาตรของวัสดุ เนื่องจากปริมาตรของแข็ง ประกอบด้วยรูหลายประเภท เช่น อนุภาค มีรูภายในที่สามารถเปิดสู่ผิวภายนอกเรียก รูพรุนเปิด (Open pores) หรือหากไม่สามารถเปิดออกสู่ภายนอกเรียก รูพรุนปิด (Close pores) ดังนั้นจะถือได้ว่า รู และ ความพรุนเป็นสมบัติสำคัญของเชื้อเซรามิก เพราะสามารถทำให้ทราบว่า จะนำเชื้อเซรามิกใช้งานอย่างไรเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด การวัดขนาดของรูพรุนทำได้หลายวิธี แต่เทคนิคแต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียดังนี้

2.2.1 Mercury Porosimetry เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์รูพรุนเปิดได้อย่างแม่นยำมาก แต่ไม่สามารถวิเคราะห์รูพรุนแบบปิดได้ และสามารถวัดการกระจายของรูพรุนได้ในช่วง 0.003-360 μm .

2.2.2 Gas adsorption เทคนิคนี้ไม่เหมาะกับรูพรุนขนาดใหญ่แต่เหมาะสำหรับรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และสามารถวัดการกระจายของรูพรุนได้ในช่วง 0.00035-0.5 μm .

2.2.3 Image analysis เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะรูพรุนเปิด รูพรุนปิดหลังจากการขัดเท่านั้น

2.2.4 Helium pycnometry เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ค่าความพรุนตัวทั้งหมด คือ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด แต่ไม่สามารถทราบขนาดที่แน่นอนของรูพรุนได้

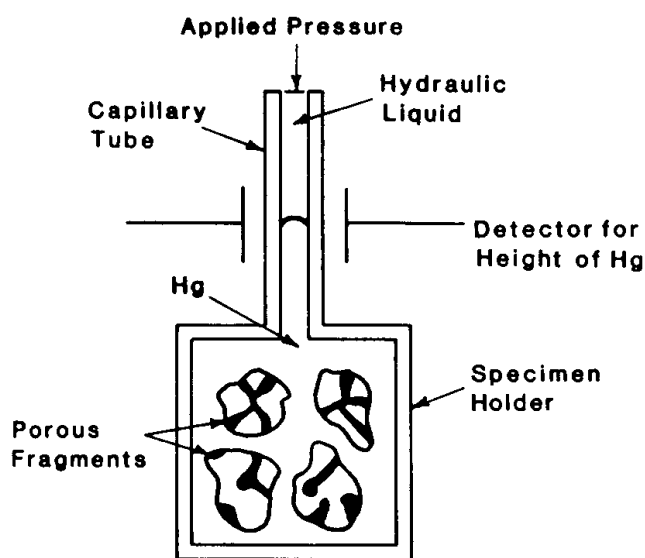
2.2.5 Water adsorption เทคนิคนี้ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูพรุน เช่น ขนาดและการกระจายตัวได้

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวัดรูพรุนซึ่งมี 2 วิธีด้วยกันดังนี้

Mercury Porosimetry เป็นการวัดความพรุน โดยใช้ปรอท วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้น ในปี ค.ศ. 1945 ซึ่ง ปรอทเป็นของเหลวที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ เนื่องจากว่าปรอทมีความตึงผิวสูง และสามารถเปียก (Wet) ของวัสดุได้น้อยชนิด และไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ด้วยตัวเอง ดังนั้น พื้นฐานการตรวจวัดจึงเป็นไปตามสมการ Washburn equation ดังสมการที่ 2.3 ที่ความสัมพันธ์ของความดันในการดันปรอทให้อยู่ภายในรูพรุน และช่องที่รูพรุนเชื่อมติดกัน แรงดัน (Pr) ขึ้นอยู่กับมุมสัมผัส (θ) และความตึงผิว (γ)

$$Pr = -2 \cos \theta \tag{2.3}$$

Washburn equation เกิดจากการคำนวณแรงขับปรอทออกจากรูเท่ากับความดันที่อัดปรอทเข้าไปในรู



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Mercury Pore Seizer (Reed, 1995)

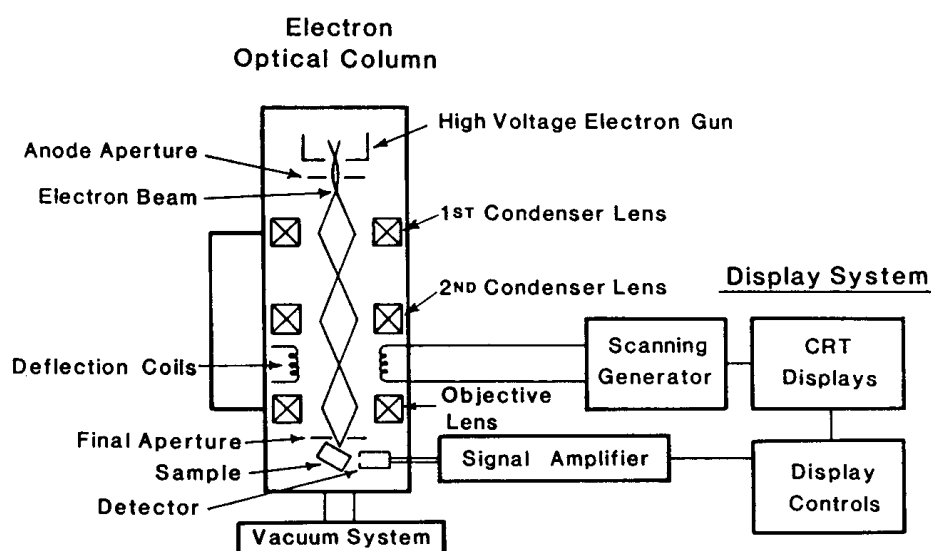
Water adsorption โดยอาศัยหลักการของอาคิมีดีส (Archimedes , principle) ซึ่งเมื่อวัตถุจุ่มในของเหลววัตถุนั้นจะถูกพยุงขึ้นด้วยแรงที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ วัสดุพรุนเปิดหรือรูพรุนปรากฏได้จาก

$$P_r = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \tag{2.4}$$

- P_r คือ เปอร์เซ็นต์ความพรุนของสารตัวอย่าง
- W_1 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างขณะจุ่มน้ำชั่งในน้ำ
- W_2 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างขณะจุ่มน้ำชั่งในอากาศ
- W_3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังอบแห้ง

2.3 การศึกษาโครงสร้างของแผ่นเซรามิก

การศึกษาโครงจุลภาคของเยื่อเซรามิก โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) คือการที่เร่งอนุภาคอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนด้วยความเร็วสูงผ่าน Electro magnetic lens ชุดต่าง ๆ ภายในคอลัมน์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวบีบลำอิเล็กตรอนให้เล็กลงและตกลงบนผิวตัวอย่างพอดี และมี Scanning coil เป็นตัวบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านบนผิวตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงชนสารตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณหลายชนิดและมี Detector เป็นตัวทำหน้าที่จับสัญญาณและจะมี Display system เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณต่างๆ เป็นรูปภาพที่จอร์รับภาพ



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Reed, 1988)

2.4 สภาพการยอมผ่านของน้ำ (Hydraulic Permeability)

สมการ (2.5) พบทั่วไปในการศึกษาเยื่อบางที่ต้องการหาจำนวนรูพรุนต่อพื้นที่ โดยการวัด J (เพอมีเอทฟลักซ์) สำหรับแต่ละ ΔP (ความดัน) แล้วเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ (หน่วย $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) เทียบกับความดัน จะได้ความชันของกราฟซึ่งหมายถึงสภาพน้ำ หรือนิยมเรียกว่า สภาพยอมให้น้ำผ่าน ซึ่งในที่นี้แทนด้วย L_p

$$J = L_p \Delta P \quad (2.5)$$

ส่วนกลับของ L_p คือสภาพการยอมให้น้ำผ่าน (Howell, 1993)

ค่าฟลักซ์ (Flux, J) เป็นค่าที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะของกระบวนการ MF และ UF ค่าหนึ่งเป็นค่าที่บอกถึงอัตราการไหลของเพอมีเอทต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อบางและต่อเวลา ($L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

สมการ (2.6) เป็นที่รู้จักกันทั่วไป เรียกว่า Poiseuille's equation

$$J = \frac{\varepsilon}{\tau} \frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2.6)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์น้ำ (m/s)

ε คือ ความพรุน

η คือ ความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)

ΔP คือความดัน (Pa)

Δx คือความหนาเยื่อบาง (m)

τ คือความคดเคี้ยวของเยื่อบาง

2.5 ความสามารถในการกักกัน (% Rejection)

สมบัติอีกประการหนึ่งของเยื่อบางคือ สมบัติการกักกันสาร (% Rejection) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของเยื่อบางในการกักกันตัวถูกละลายไม่ให้ผ่านออกมาได้มากนักเพียงใด

$$\%R = \left[1 - \left(\frac{C_p}{C_b} \right) \right] \times 100 \quad (2.7)$$

โดยที่ %R คือ เปอร์เซ็นต์การกักกันสารของเยื่อบาง

C_p คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมีเอท

C_b คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารป้อน

2.6 การบวมน้ำ

เยื่อบางโพลีเอทิลีนที่เตรียมได้เป็นเยื่อบางประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อนำไปใช้งานในการกรองที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะทำให้เยื่อบางพองตัวเนื่องจากดูดซับน้ำทำให้รูพรุนเยื่อบางเปลี่ยนแปลงได้ จึงจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมการบวมน้ำของเยื่อบาง การดูดซับน้ำหรือการบวมน้ำเยื่อบาง หมายถึงปริมาณน้ำที่เยื่อบางสามารถดูดซับได้ในระยะเวลาที่กำหนด ค่าการบวมน้ำของเยื่อบางสามารถวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้โดยการชั่งน้ำหนักเยื่อบางแผ่นแห้งและน้ำหนักเยื่อบางขณะเปียก ในช่วงเวลาต่างๆ โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำคำนวณจาก

$$SI = \left[\frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100 \quad (2.8)$$

SI คือ เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ

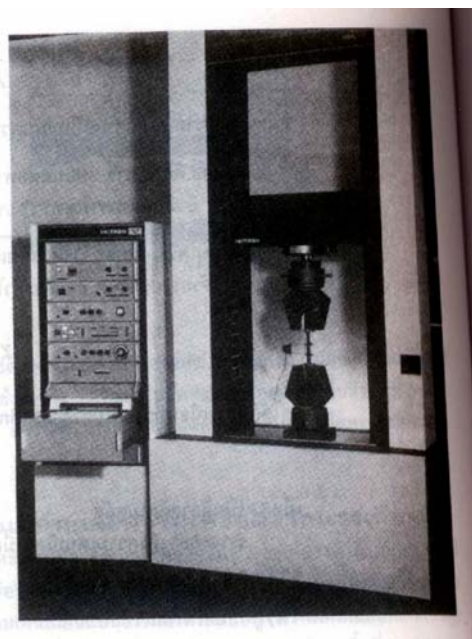
W_w คือ น้ำหนักเยื่อบางแห้ง ชั่งที่เวลาต่าง ๆ

W_d คือ น้ำหนักเยื่อบางที่บวมน้ำ

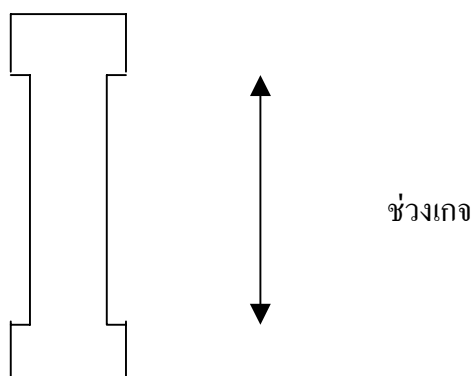
(Wan., *et. al.*, 2003)

2.7 การทดสอบความสามารถด้านแรงดึง (Tensile property)

ความสามารถด้านแรงดึงเป็นสมบัติที่ได้จากการทดสอบด้วยการดึงยึดขึ้นตัวอย่างจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงยึดที่คงที่ค่าหนึ่ง ความแข็งแรง ณ จุดขาด ซึ่งมักจะเรียกว่า ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เป็นตัวบ่งชี้ถึงการทนแรงดึง ถ้าค่านี้มากขึ้นแสดงว่าขึ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 2.6 แสดงภาพเครื่องทดสอบการต้านแรงดึง (a) เชื่อบางที่ตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (b)

การทดสอบการต้านแรงดึงจะต้องทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ เช่น มาตรฐาน มอก. ASTM หรือ ISO วิธีการทดสอบจะต้องระบุวิธีการเตรียมชิ้น ลักษณะของแรงภายนอกที่มากกระทำ อัตราเร็วของแรงที่มากกระทำ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบขณะนั้น สำหรับค่าที่อ่านได้จากเครื่องจะมีค่าดังนี้

ความเค้น (Stress, σ)	=	แรง/พื้นที่	(N/m^2)
ความเครียด (Strain, ϵ)	=	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง/ความยาวเดิม(%)	
Cross-sectional area (A)	=	พื้นที่หน้าตัดรับแรงที่มากกระทำ	

Gauge length (L_0) = ความยาวของชิ้นตัวอย่างบริเวณ Gauge

ค่าความเค้นและความเครียด

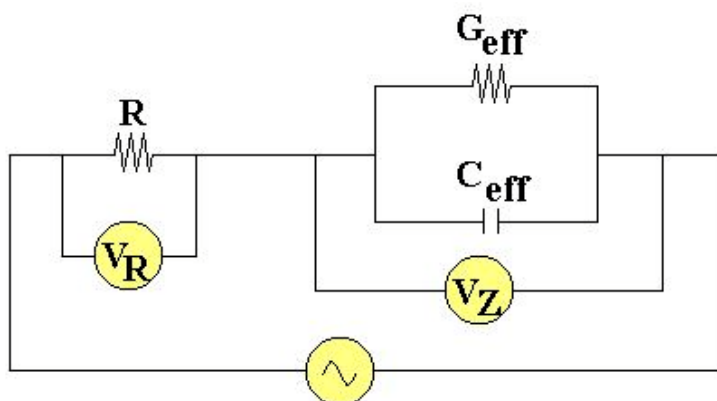
ความเค้น (Stress) คือ แรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของวัสดุแรงต้านภายในจะกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่รับแรงนั้น และ หน่วยของความเค้นคิดได้จากอัตราส่วนของแรงกระทำภายนอกต่อหน่วยพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุนั้น จะมีหน่วย N/m^2

ความเครียด (Strain) คือ เมื่อวัสดุได้รับแรงภายนอกมากกระทำ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางที่แรงมากกระทำ สำหรับหน่วยของความเครียด

ค่าความแข็งแรงดึง คำนวณได้จากค่าความเค้น (stress) ณ จุดขาด ที่เป็นค่าความเค้นสูงสุด หากค่าความเค้นที่จุดขาดมีค่าสูงสุดจะไม่เรียกว่า ความแข็งแรงดึง นิยมเรียกว่า ความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break หรือ breaking stress) ค่าพื้นที่หน้าตัด (A) ที่ใช้ในการคำนวณ ได้จากการวัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานบริเวณ Gauge length ก่อนที่จะทำการทดสอบ ระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break หรือ breaking strain) คำนวณได้จากระยะยืดที่จุดขาดหารด้วยความยาวของ Gauge length (L_0)

2.8 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเยื่อบาง

เยื่อบางที่กั้นระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์เปรียบเสมือนไดอิเล็กทริกที่มีความต้านทานไฟฟ้าขนาดหนึ่งทำให้ไอออน (ประจุไฟฟ้า) ในสารละลายไม่สามารถเคลื่อนผ่านได้ง่าย ซึ่งนิยามว่าเป็นค่าความนำไฟฟ้า G_m (หรือความต้านทานไฟฟ้า, R_m) ของเยื่อบาง ตรงรอยต่อระหว่างเยื่อบางกับสารละลายทั้งสองด้านจะแสดงสภาพความจุไฟฟ้า (C_m) ระดับหนึ่งเสมอ ขึ้นกับชนิดของสารละลาย หรือระดับ pH และชนิดของวัสดุที่ทำเป็นเยื่อบางนั้นๆ ในกรณีที่เป็นเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุ นอกจากจะศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนประจุบวก หรือลบ ของเยื่อบางแล้ว ยังศึกษาความต้านทานไฟฟ้ารวมของเยื่อบางกัน ซึ่งในที่นี้รวม G_m และ C_m เข้าด้วยกัน เรียกว่าค่า อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z_m)



รูป 2.7 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง

หากต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าในสารละลายวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง ซึ่งรวมความต้านทานในสารละลายทั้งสองด้านไว้ปริมาณหนึ่งด้วย ในที่นี้จะให้สารละลายทั้งสองด้านคือสารละลาย NaCl ที่มีความเข้มข้นเดียวกัน เพื่อให้ค่า G_e (e =electrolyte) เท่ากัน จึงเขียนวงจรไฟฟ้าของระบบที่ศึกษา พร้อมทั้ง Phasor Diagram ได้ ดังรูปที่ 2.8 โดยรวมค่า G_m และ G_e ไว้ด้วยกันเป็น G_{eff} (eff =effective) และรวม C_m แต่ละด้านของเยื่อบาง (ซึ่งอาจไม่เท่ากัน ขึ้นกับการกระจายของประจุในเยื่อบาง) เป็น C_{eff}

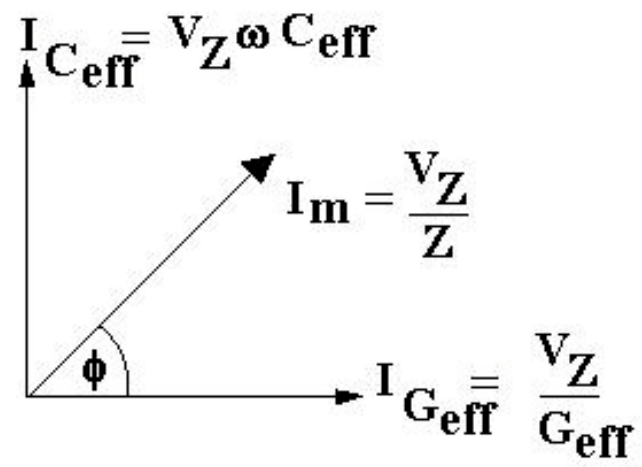
ส่วนค่า Z_m สามารถคำนวณได้จาก V_Z/I_Z หรือเขียนใหม่เป็นในเทอมของฟังก์ชันความถี่สัญญาณไฟฟ้า (ω) ดังนี้

$$Z(\omega) = \frac{1}{G_{eff}(\omega) + j\omega C_{eff}(\omega)} \quad (2.8)$$

โดย

$$G_{eff}(\omega) = \frac{1}{|Z|} \cos \Delta\phi \quad \text{and} \quad C_{eff}(\omega) = \frac{1}{\omega|Z|} \sin \Delta\phi \quad (2.9)$$

เมื่อ $\Delta\phi$ คือผลต่างมุมเฟส (Phase difference) ระหว่าง I_R กับ I_m การทดลองนี้จะวัดมุม $\Delta\phi$ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ในที่นี้เรียก V_R และศักย์ที่ตกคร่อมเยื่อบางในระบบซึ่งเรียก V_Z ด้วยจ้อออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.8 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเยื่อบางในการคำนวณหาค่า $Z_{C_{\text{eff}}}$ และ G_{eff}