

บทที่ 2

ทฤษฎี

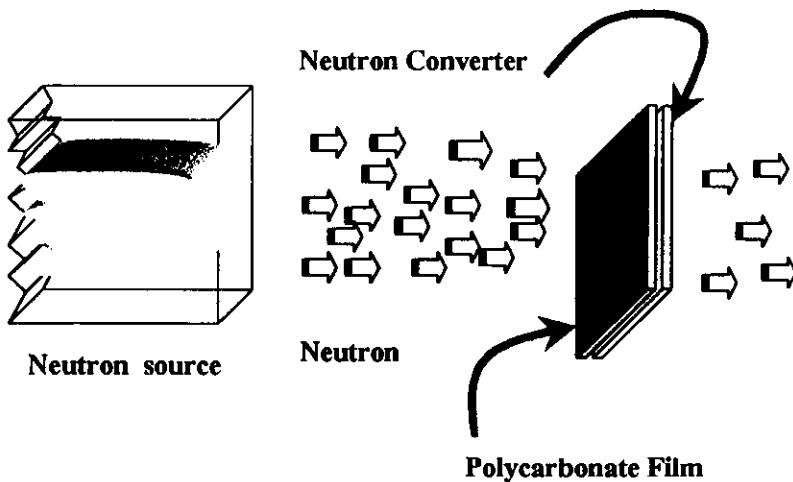
ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับ ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดรอยแฉ่ง และการกัดรอยเพื่อให้ได้รูพรุนตามขนาดที่ต้องการ รวมทั้งการทดสอบสมบัติของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนที่ผลิตขึ้น ดังนี้

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตรูพรุนบนเมมเบรน

การผลิตเมมเบรนมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ การทำให้เกิดรอยบนฟิล์ม (Track Formation) และการกัดขยายรอย (Track Etching) เพื่อให้รอยแฉ่งของอนุภาคบนฟิล์มปรากฏขึ้นมา

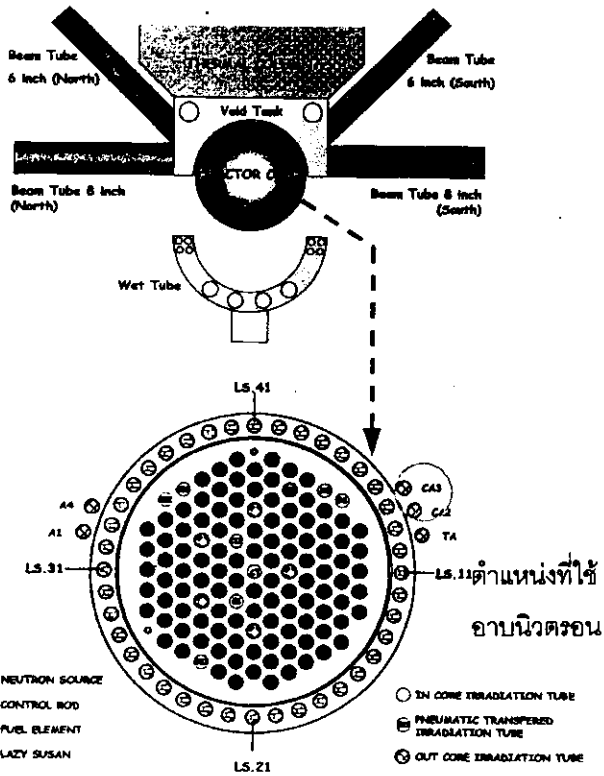
2.1.1 การทำให้เกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม

- ด้วยนิวตรอนช้า โดยการนำจากเปลี่ยนนิวตรอนและแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตไปอาบนิวตรอนโดยจัดวางอุปกรณ์ในการอาบนิวตรอนดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับอาบ thermal neutron

- ด้วยนิวตรอนเร็ว โดยการนำแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยจัดวางอุปกรณ์ในการอาบนิวตรอนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับอานนิวตรอนเร็ว

2.2 นิวตรอน เนื่องจากต้องใช้นิวตรอนเป็นตัวทำปฏิกิริยา จึงควรทำความรู้จักกับนิวตรอนก่อน

2.2.1 สมบัติของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ มีมวล 1.008665 หน่วยอะตอม หรือ 1.6750×10^{-24} กิโลกรัม นิวตรอนอิสระมีครึ่งชีวิต 10.6 นาที (ธวัช ชิตตระกูล, 2541) โดยสลายตัวดังสมการต่อไปนี้



นิวตรอนใช้สัญลักษณ์ 1_0n ค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ในปีพ.ศ. 2475 เพื่ออธิบายสมบัติของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการชนแผ่นเบริลเลียม (Beryllium Foil) ด้วยอนุภาคแอลฟา ซึ่งต่อมาพบว่านิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary

Particles) ชนิดหนึ่ง รวมกับโปรตอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม โดยมีอิเล็กตรอนอยู่ด้านนอก

2.2.2 ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ เนื่องจากเป็นอนุภาคไม่มีประจุ แต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ ด้วยการลดพลังงานลงจากพลังงานตั้งต้น โดยให้ชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เรียกว่าการหน่วงนิวตรอน (Neutron Moderation) นิวตรอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามระดับพลังงาน (ธวัช ชิตตระการ, 2541) ดังตารางที่ 2.1

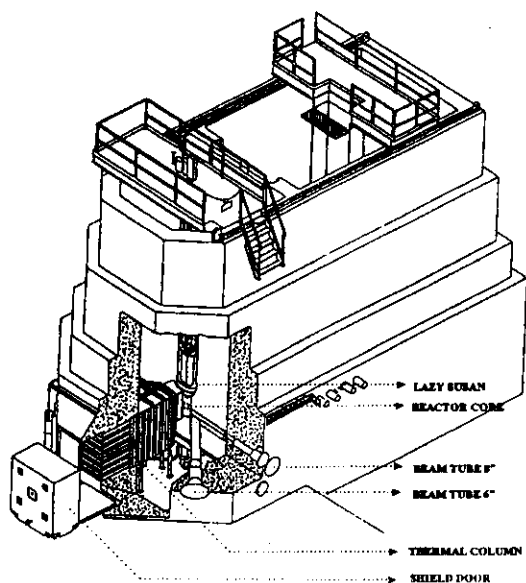
ตารางที่ 2.1 ชนิดและระดับพลังงานของนิวตรอน

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
Cold neutron	<0.01 eV
Thermal neutron	0.01 – 0.3 eV
Epithermal neutron	0.3 eV – 10 keV
Fast neutron	10 keV – 20 MeV
Relativistic neutron	>20 MeV

ต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบ่งตามลักษณะและวิธีการปลดปล่อยนิวตรอน ออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) เป็นต้นกำเนิด ที่มีความเข้มของนิวตรอนสูงที่สุด นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission) ของ U-235 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research Reactor) ส่วนใหญ่มีท่อำนานิวตรอน (Beam Port) จากแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Core) ไปยังตำแหน่งที่ทำการทดลองโดยมีวัสดุหน่วงนิวตรอน (Moderator) ลดระดับพลังงานนิวตรอนให้เหมาะสมกับการทดลอง

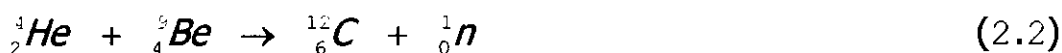


รูปที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กรุงเทพฯ

2. เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแรงสูงเร่งอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูงและควบคุมให้ชนกับวัสดุที่เป็นเป้า ให้ปลดปล่อยนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$

3. วัสดุกัมมันตรังสี (Radioactive sources) แบ่งตามกระบวนการปลดปล่อยนิวตรอน

3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α,n) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา เช่น เรเดียม (Ra) หรือพลูโตเนียม (Pu) ผสมกับเบอริเลียม (Be) หรือ โบรอน (B) แล้วผนึกเข้าด้วยกัน นิวตรอนที่ปล่อยออกมา เกิดจากปฏิกิริยา (α,n) ดังสมการ

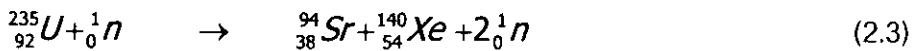


3.2 ต้นกำเนิดจากปฏิกิริยา (γ,n) ประกอบด้วยสารไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยรังสีแกมมา เช่น พลวง-124 (${}^{124}\text{Sb}$) ผสมกับเบอริเลียม

3.3 ต้นกำเนิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission) ได้แก่ สารไอโซโทปรังสีที่มีการแตกตัวแล้วปลดปล่อยนิวตรอนอย่างต่อเนื่อง เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf)

อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสาร

1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) เช่น (n,n)
2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision)
3. กระบวนการจับนิวตรอน (Neutron Capture)
 - ปล่อยรังสีแกมมา เช่น $\text{H}^1(n,\gamma)\text{H}^2$
 - ปล่อยอนุภาคที่มีประจุ เช่น $\text{O}^{16}(n,p)\text{N}^{16}$
4. ปฏิกิริยาให้นิวตรอน เช่น $(n,2n)$, $(n,3n)$
5. ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) เช่น

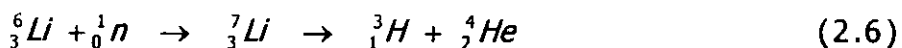
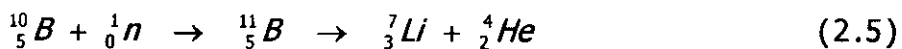


6. ผลิตไอโซโทปที่ทำให้เกิดฟิชชัน (Fissionable isotope production) เช่น



2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนจากเปลี่ยนนิวตรอน(Converter Screen)เมื่อใช้นิวตรอนช้า

เนื่องจากนิวตรอนช้า ไม่สามารถทำให้เกิดรอยบนแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตได้ ดังนั้นจึงอาศัยนิวตรอนช้า ดังกล่าว ผลิตอนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟา ด้วยการระดมยิงไปที่ไอโซโทป ${}_{5}^{10}\text{B}$ จากปฏิกิริยา



2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเมื่อใช้นิวตรอนเร็ว

Recoil Protons จากปฏิกิริยา การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) กับ นิวเคลียสของ Hydrogen ดังปฏิกิริยา (n,n')

2.5 การเกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม

ขณะที่ทำการอบนิวตรอนช้า นิวตรอนจะทำปฏิกิริยา (n, α) กับจากเปลี่ยนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาไปทำให้เกิดการแตกตัว (Ionization) ในเนื้อฟิล์มเป็นรอยแฝง (Latent Track) ขนาด 2-6 นาโนเมตร (nm) ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังรูป
รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายของรอยแฝงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา : Freisher, R. L. และคณะ. (1975 : 6)

การเกิดรอยอนุภาค มีการกล่าวไว้หลายลักษณะ แต่ที่เชื่อถือได้มีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ

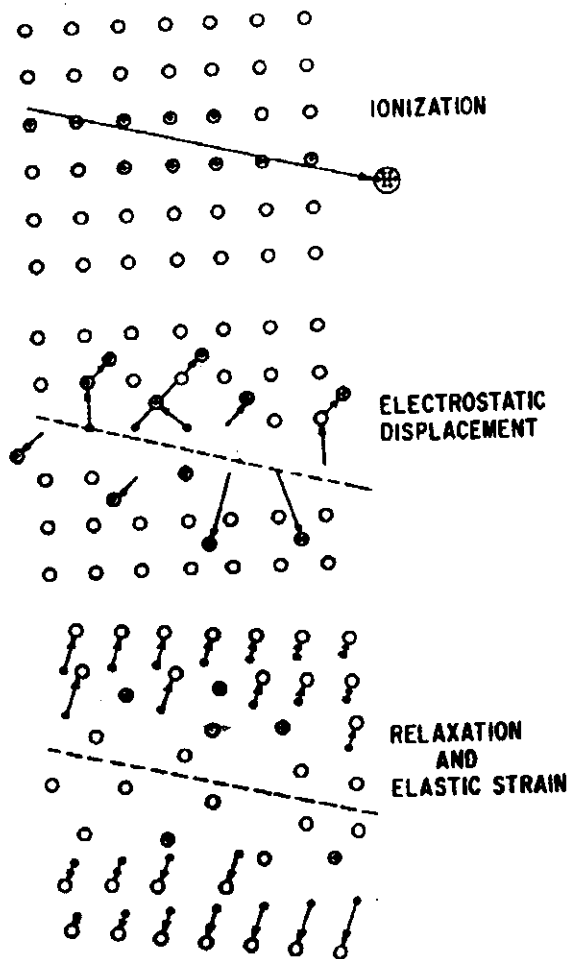
1. ทฤษฎีเทอร์มัลสไปค์ (Thermal Spike)

กล่าวไว้ว่า "เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุใดๆ จะเกิดการแตกตัวและการกระตุ้น (Ionization and Excitation) อย่างรุนแรง ตามแนวทางที่อนุภาควิ่งผ่าน ทำให้เกิดความร้อน และอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าวัตถุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จะสามารถกระจายความร้อนไปสู่บริเวณรอบๆ ทำให้อุณหภูมิที่จุดนั้นสูงไม่มากนัก แต่ถ้าวัตถุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่เลว ก็จะไม่สามารถแผ่กระจายความร้อนไปสู่พื้นที่รอบๆ ได้ ทำให้จุดนั้นร้อนจัด เกิดความเครียดขึ้น และเกิดการขยายตัวมากกว่าพื้นที่รอบๆ โครงสร้างที่จุดนั้นถูกทำลายไป เกิดรอยเสียหายในบริเวณดังกล่าวขึ้นมาแทน"

2. ทฤษฎีไอออนเอกซ์พลอสชันสไปค์ (Ion Explosion Spike)

กล่าวไว้ว่า “เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัตถุใดๆ อะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือนถ้าอะตอมเหล่านั้นได้รับพลังงานมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร เกิดประจุบวกขึ้นรอบๆ แนวทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน และเกิดการผลักกัน ทำให้อะตอมเหล่านั้นไปเบียดกับอะตอมที่อยู่ถัดไป เกิดความเครียดแผ่กระจายออกไป ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นหลังจากที่โมเลกุลได้จัดเรียงตัวจนเกิดสมดุลแล้ว” ดังรูปที่ 2.5

การเกิดช่องว่างหรือรอยของอนุภาคนี้ มองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะเกิดได้กับวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อน เช่น แก้ว ไมกา พลาสติก แต่หากเป็นวัสดุตัวนำความร้อนที่ดี เช่น โลหะ อะตอมที่เป็นไอออนบวก จะจับกับอิเล็กตรอนบริเวณรอบๆ แล้วกลายเป็นกลางกลับเข้าสู่สภาวะเดิม จึงไม่เกิดช่องว่างขึ้น



รูปที่ 2.5 การเกิดรอยอนุภาคตามทฤษฎีไอออนเอกซ์พลอสชันสไปค์

ที่มา : Freisher, R. L. และคณะ. (1975 : 32)

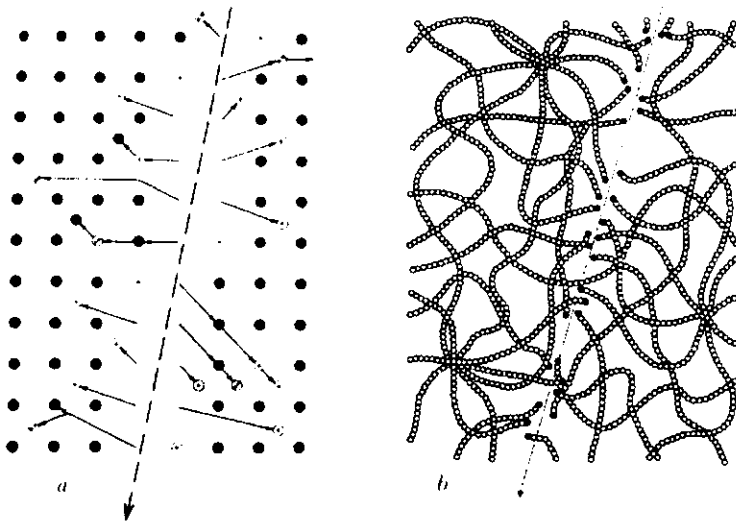
จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นขั้นตอนการเกิดรอยอนุภาค คือ

ขั้นที่ 1 เกิดไอออนไนเซชันหลังจากอนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน

ขั้นที่ 2 อะตอมที่อยู่ถัดไปถูกชนและถูกแทนที่

ขั้นที่ 3 เกิดความเครียดแผ่กระจายกว้างออกไป

รอยอนุภาคที่เกิดมักเป็นรอยแคบๆ (ขนาดไม่เกิน 50 อังสตรอม) มีความคงสภาพ ในการเกิด รอยอนุภาคสามารถแยกได้เป็นวัตถุนิหทัย ได้แก่ โพลีเมอร์ (Polymer) กับวัตถุนิหทัย ได้แก่ ผลึกและแก้ว เป็นต้น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม a) ผลึก b) พลาสติก ที่มา : Fleisher, และคณะ. (1975 : 4)

2.6 อนุภาคแอลฟาและโปรตอน

โดยปกติแล้วอนุภาคแอลฟาและโปรตอนจะทำให้ก๊าซแตกตัวเมื่อมันวิ่งผ่าน และจะสูญเสียพลังงานและความเร็ว เมื่อความเร็วของอนุภาคลดลงมา จะดูดจับอิเล็กตรอนไว้ แล้วกลายเป็นสถานะเป็นอะตอมที่เป็นกลาง

2.6.1 กลไกการสูญเสียพลังงาน

อนุภาคที่มีประจุเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในสสารจะมีการสูญเสียพลังงานดังนี้

1. เกิดอันตรกิริยาคูลอมบ์ (Coulomb Interaction) กับอิเล็กตรอนและนิวเคลียส (โดยอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญมากกว่าอันตรกิริยากับนิวเคลียส) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = \frac{kZe^2}{r^2} \quad (2.7)$$

โดยที่ Ze เป็นประจุของอนุภาค

ผลจากแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ทั้งนี้ขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้ามา

2. ปลดปล่อยรังสีเบรมสตราลุง์ (Bremsstrahlung) เมื่ออนุภาคที่มีประจุ เคลื่อนที่เข้าใกล้อะตอมจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (พลังงานเปลี่ยนแปลงลดลง) พลังงานที่ลดลงนี้จะเปลี่ยนไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า เบรมสตราลุง์ (Bremsstrahlung) หรือรังสีเอกซ์พลังงานต่อเนื่อง (Continuous X-ray) การสูญเสียพลังงานในการเกิดเบรมสตราลุง์ จะเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีมวลน้อย (อิเล็กตรอน) เป็นส่วนใหญ่ และในตัวกลางที่มีมวลมาก

3. เกิดการสันดาปของโมเลกุลในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน
4. เกิดการแตกสลายของโซ่โมเลกุล (break a molecular chain)
5. ปลดปล่อยรังสีเชอเรนคอฟ (Cerenkov Radiation)

2.6.2 กำลังหยุดยั้งและพิสัย (Stopping Power and Range)

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของตัวกลาง และอนุภาคจะสูญเสียพลังงาน การคิดอัตราการสูญเสียพลังงานจะคิดในรูปอัตราการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ เรียกว่า "กำลังหยุดยั้ง" (Stopping Power) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dE}{dx} (\text{MeV} / \text{m}) = 4\pi r_0^2 Z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} N Z \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ m คือมวลนิ่งของอนุภาค

β คือ v/c

N คือความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง หน่วย อะตอมต่อลูกบาศก์เมตร

Z คือเลขอะตอมของตัวกลาง

z คือ ขนาดประจุของอนุภาค

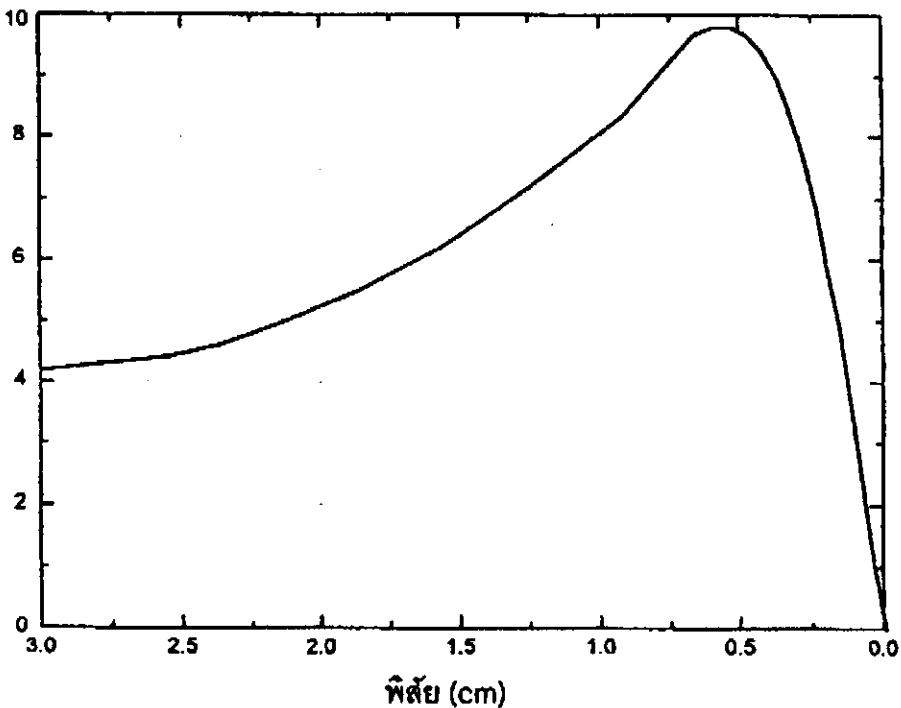
I คือ พลังงานศักย์กระตุ้นเฉลี่ย (Mean Excitation Potential) ของตัวกลาง หน่วย MeV

ค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยสามารถคำนวณหาจากสูตร

$$I(\text{eV}) = (9.76 + 58.8Z^{-1.19})Z \quad (2.9)$$

อัตราการการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยระยะทางจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความเร็วลดลง ดังนั้นความหนาแน่นของการแตกตัวเป็นไอออน (Density of Ionization) ในช่วงท้ายๆ ของการเคลื่อนที่จะมีค่าสูง และเมื่ออนุภาคมีความเร็วลดลงจนใกล้จะหยุดอนุภาคจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในตัวกลางกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลางทำให้ประจุของอนุภาคลดลงค่าอัตราสูญเสียพลังงานต่อระยะทางก็จะลดลงด้วย สามารถแสดงได้ด้วยกราฟของ แบริก (Bragg Curve)

การแตกตัวเป็นไอออน



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดไอออนกับระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในตัวกลาง

ที่มา : พงศกร สุวรรณเดชา (2540 : 110)

สำหรับตัวกลางที่เป็นของผสม กำลังหยุดยั้งสำหรับตัวกลางที่เป็นสารประกอบหรือของผสมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dk} \right)_{comp} = \sum_i w_i \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{dE}{dk} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารประกอบหรือของผสม

ρ_i คือ ความหนาแน่นของธาตุที่ i

$\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{dE}{dk} \right)_i$ คือ กำลังหยุดยั้งในหน่วย MeV/kg/m² สำหรับธาตุที่ i

อนุภาคที่มีประจุเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสสารจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียสของสสาร ผลที่สุดอนุภาคจะหยุดนิ่งและรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในสสารกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลาง เช่น

โปรตอน + อิเล็กตรอน \longrightarrow อะตอมของไฮโดรเจน

แอลฟา + อิเล็กตรอนสองตัว \longrightarrow อะตอมของฮีเลียม

ความหนาของสสารที่สามารถหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้พอดีเรียกว่า "พิสัย" (Range) R มีหน่วยเป็นระยะทาง หน่วยที่นิยมใช้คือ kg/m^2

ความหนาของตัวกลางที่ทำให้จำนวนอนุภาคที่ทะลุผ่านตัวกลางเหลือครึ่งหนึ่งของอนุภาคทั้งหมดเรียกว่า "พิสัยเฉลี่ย" (Mean Range) ส่วนความหนาของตัวกลางที่ทำให้ไม่มีอนุภาคใดๆสามารถทะลุผ่านมาได้เลย เรียกว่า "พิสัยประมาณ" (Extrapolated, R_0) ค่าที่นิยมใช้คือค่า พิสัยเฉลี่ย ซึ่งมักจะเรียกว่า "พิสัย"

พิสัยของอนุภาคแอลฟาในตัวกลางใดๆสามารถหาได้จาก

$$R(mm) = 3.2 \times 10^{-1} \frac{\sqrt{A_{ef}}}{\rho(kg/m^3)} R_{air}(mm) \quad (2.11)$$

$$\sqrt{A_{ef}} = \left(\sum_{i=1}^L \frac{W_i}{\sqrt{A_i}} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} R_{air}(mm) &= \exp[1.61\sqrt{E_k(MeV)}] \quad (1 < E_k \leq 4 \text{ MeV}) \\ &= (0.05E_k + 2.85)E_k^{3/2} \quad (4 \leq E_k \leq 15 \text{ MeV}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

พิสัยของอนุภาคโปรตอนในตัวกลางใดๆสามารถหาได้จาก

$$R_p = 4 \frac{M_p}{M_\alpha} R_\alpha - 2(mm, air) \quad (2.14)$$

เมื่อ R_p เป็นพิสัยในอากาศของแอลฟาที่มีอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วของโปรตอน

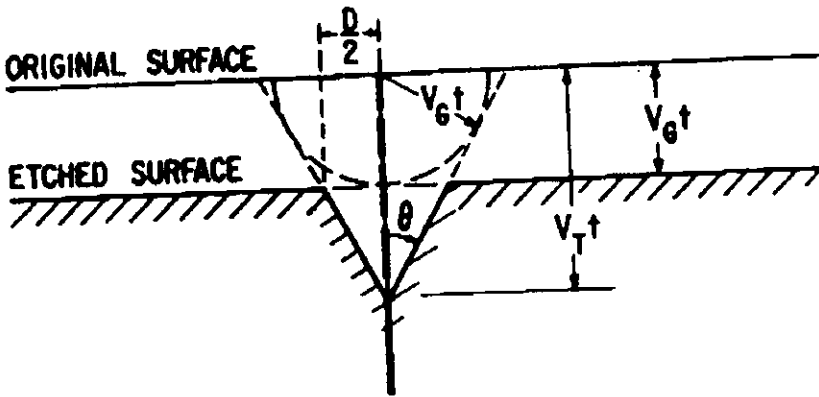
M เป็นมวลของอนุภาคโปรตอน

M_α เป็นมวลของอนุภาคแอลฟา

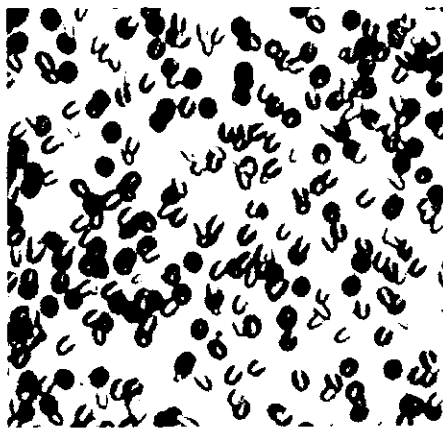
2.7 การกัดขยายรอย

ฟิล์มที่ถ่ายภาพแล้วเมื่อล้างกัดรอยในสารละลายต่าง เช่น สารละลายโปรตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะละลายของเนื้อฟิล์มออกทั้งในแนวราบและแนวลึก จะทำให้รอยแฝงมีขนาดใหญ่ขึ้น จนทำให้รอยแฝงปรากฏขึ้นมา

ขณะที่ทำการกัดรอย ทุกส่วนของฟิล์มมีการละลายออกมาตลอดเวลา โดยรอยแฝงของอนุภาคมีอัตราการละลายเร็วกว่าบริเวณอื่นจากรูปที่ 6 ให้อัตราการละลายของฟิล์มในทิศทางของรอยอนุภาคเป็น V_T (Track Etch Rate) และอัตราการละลายของฟิล์มในบริเวณอื่นเป็น V_G (General Surface Etch Rate) รูปร่างของรอยที่เกิดขึ้นภายหลังการล้างกัดรอยขึ้นกับอัตราส่วนของ V_T/V_G จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1 เมื่ออัตราการละลายทุกทิศทางมีค่าเท่ากันแสดงว่าไม่เกิดรอยของอนุภาค



รูปที่ 2.8 ผิวฟิล์มที่ละลายออกในกระบวนการล้างกัดรอย ที่มา : Fleisher, และคณะ. (1975:58)



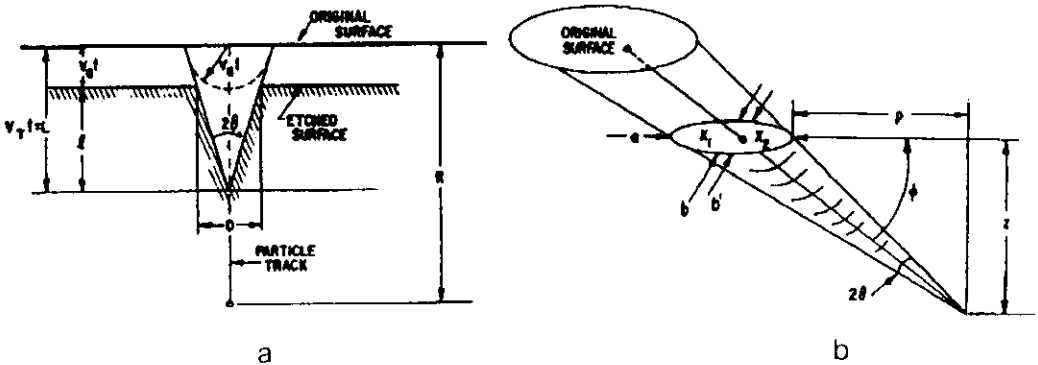
รูปที่ 2.9 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงรอยอนุภาคที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว
ที่มา : Fleisher, และคณะ. (1975 : 5)

2.7.1 รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยอนุภาค (track Geometry)

2.7.1.1 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ V_T คงที่

ในการกัดขยายรอยนั้น จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ที่ทำให้รอยอนุภาคขยายใหญ่ขึ้น คือ

- ความเร็วในการกัดขยายรอยอนุภาค ด้วยสารละลายเคมีตามแนวอนุภาค (V_T)
- ความเร็วในการกัดขยายรอยอนุภาค ด้วยสารละลายเคมีบนพื้นผิวทั่วไปและบนพื้นผิวภายในของรอยอนุภาคอีกเล็กน้อย (V_G)



รูปที่ 2.10 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ความเร็ว V_T และ V_G คงที่ a. อนุภาคทำมุมแนวตั้ง b. อนุภาคทำมุม ϕ ที่มา : Fleisher, R. L. และคณะ. (1975 : 51)

จากรูปที่ 2.10 แสดงการเกิดรอยอนุภาครูปทรงกรวย ซึ่งมีรอยอนุภาคเดิมตามแกนเส้นประสมมติให้

V_T เป็นค่าคงที่ตามแนวรอยที่เกิด

V_G เป็นค่าคงที่ไอโซทรอปิก (Isotropic)

V_T / V_G มีค่าคงที่ และประมาณว่าที่ระยะเวลาที่ตรอยสั้นๆ เป็นจริง มีระยะเท่ากับ $V_T t$ (t เป็นเวลาในการกัดขยายรอย)

l เป็นความยาวของรอยอนุภาค

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาค

ในรูป 2.10 a. เวลาที่ใช้กัดขยายรอยเดียวกัน ผลที่เกิดจากค่าของ V_T และ V_G สามารถเขียนในเทอมของพารามิเตอร์ (Parameter) กัดขยายรอยได้ดังนี้

$$l = (V_t - V_G)t \quad (2.15)$$

$$D = 2V_G t \sqrt{(V_T - V_G)/(V_T + V_G)} \quad (2.16)$$

ถ้าเขียนในรูปปริมาณการวัด จะได้

$$V_T/V_G = 2\sqrt{(D/2)^2 + l^2}/D = \csc\theta \quad (2.17)$$

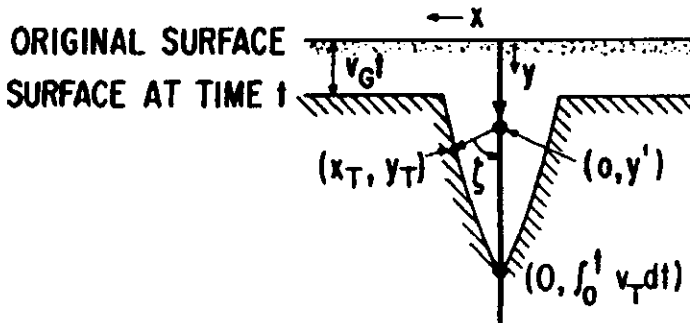
$$\begin{aligned} V_G t &= (D/2)[D/2l + \sqrt{(D/2)^2 + l^2}/l] \\ &= (D/2)(\tan\theta + \sec\theta)/2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} V_T t &= \sqrt{(D/2)^2 + l^2} \cdot [D/2l + \sqrt{(D/2)^2 + l^2}/l] \\ &= D \csc\theta (\tan\theta + \sec\theta)/2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

และจากรูป 2.10 b. แสดงรอยอนุภาคทำมุม ϕ กับพื้นผิว รอยอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปวงรี (Ellipse) มุมกรวยของรอยอนุภาคเป็น θ

2.7.2 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ V_T ไม่คงที่

เมื่อ V_T ไม่คงที่ มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความยาวอนุภาค ย่อมทำให้เกิดความซับซ้อนในรอยของอนุภาคที่ถูกกัดขยาย ซึ่งวัสดุส่วนมากไม่ว่าจะเป็นพลาสติก แก้วหรือผลึก ค่า V_T จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการแตกตัว



รูปที่ 2.11 รูปทรงรอยอนุภาคที่เกิดเมื่อค่า V_T เพิ่มขึ้น (รอยอนุภาคโค้งออกมากขึ้น)

ที่มา : Fleisher, และคณะ. (1975 : 53)

จากรูปที่ 2.11 พบว่า

$V_T(y)$ เป็น ความเร็วในการกัดขยายรอยอนุภาค ซึ่งไม่คงที่ตามแนวแกน y

(X_T, Y_T) เป็นรูปด้านข้างของรอยอนุภาค ที่เกิดจากระยะเวลาการกัดขยายรอยในการหา
ค่า L คำนวณได้จาก

$$t = \int_0^L dy / V_T(y) \quad (2.20)$$

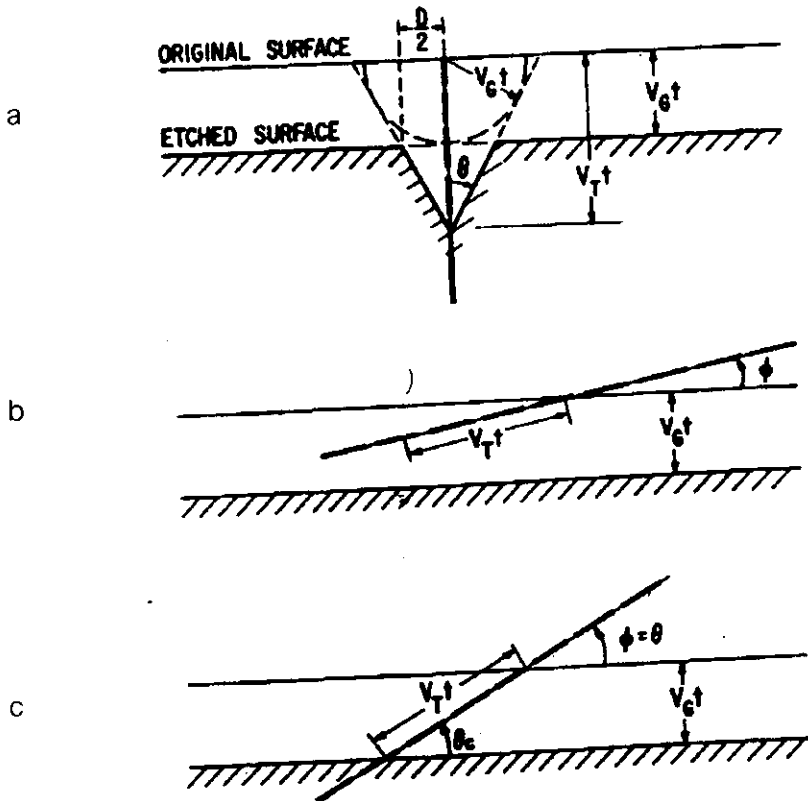
และเวลาที่ใช้กัดขยายรอยจนถึงจุด (X_T, Y_T) คือ

$$t = \int_0^{y'} dy / V_T(y) + [(y_t - y')^2 + x_t^2]^{1/2} / V_G \quad (2.21)$$

2.7.3 ประสิทธิภาพการกัดขยายรอย (Etching Efficiency)

ประสิทธิภาพการกัดขยายรอยสมมติให้เป็น n ซึ่ง

$$n = \frac{\text{ความหนาของ ผิวดัดก่อนกัดขยายรอย}}{\text{ความหนาของ ผิวดัดหลังกัดขยายรอย}}$$



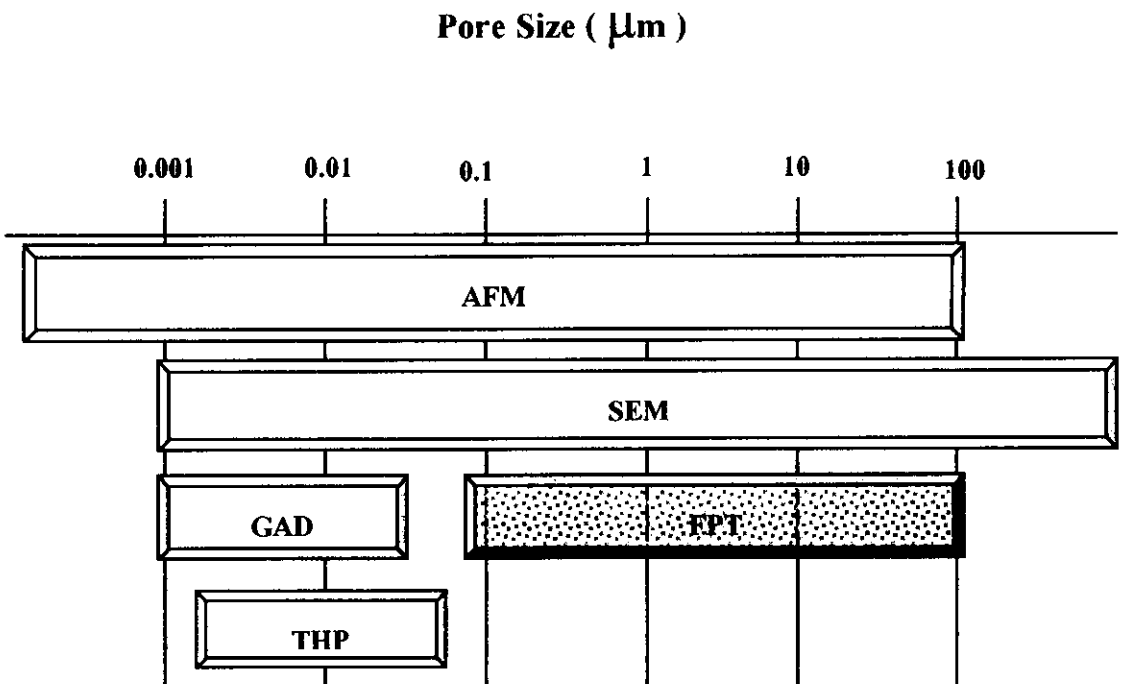
รูปที่ 2.12 รูปร่างของรอยอนุภาคที่ถูกกัดขยายรอยในลักษณะต่างๆ

ที่มา : Fleisher, R. L. และคณะ. (1975 : 58)

- จากรูปที่ 2.12
- แสดงให้เห็นว่ามุม θ ขึ้นกับค่า V_T และ V_G
 - พื้นผิวที่ถูกกัดขยายรอยตามแนวอนุภาค ($V_T \sin \phi$) น้อยกว่า V_G (การกัดขยายรอยพื้นผิวทั่วไป) นั่นคือ เมื่อ V_T น้อยกว่า V_G จะไม่เกิดรอยอนุภาค
 - แสดงให้เห็นว่าเมื่อ $\phi = \theta$ รอยอนุภาคจะเริ่มถูกกัดหายไป

2.8 การหาขนาดใหญ่ที่สุดของรูบนเมมเบรน ด้วยเทคนิคฟองอากาศ

ปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกันที่ใช้หาขนาดและการกระจายของรูบนแผ่นเมมเบรน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 แต่ที่เลือกใช้เทคนิคการแทนที่ด้วยของเหลว (Fluid Penetration Techniques) เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและ ใช้ต้นทุนในการทดลองต่ำ



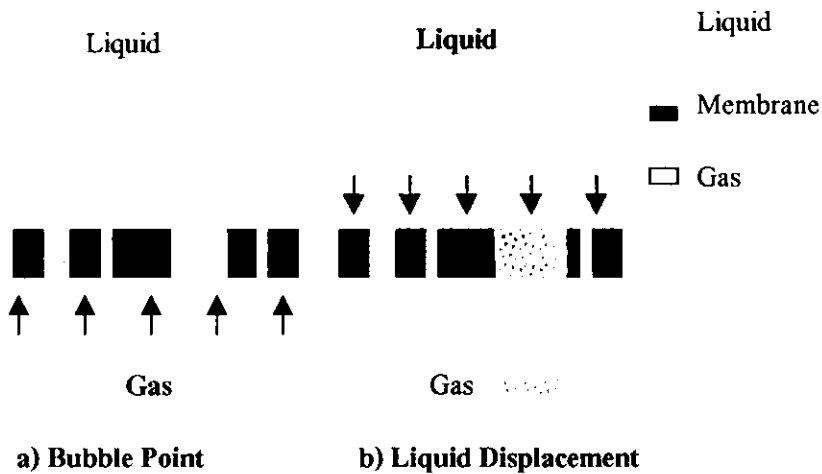
AFM = Atomic Force Microscopy , SEM = Scanning Electron Microscopy ,
 GAD = Gas adsorption – Desorption , FPT = Fluid Penetration Technique ,
 THP = Thermoporometry

รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการต่างๆที่ใช้สำหรับหาขนาดการกระจายของรูบนเมมเบรน

Fluid Penetration Techniques ประกอบด้วย 2 เทคนิคหลัก คือ

- Gas – Liquid Interface (ผิวสัมผัสระหว่าง ก๊าซกับของเหลว)ประกอบด้วย 2 เทคนิคหลัก (ดังรูปที่ 2.14)คือ

- Bubble Point Method: .ให้ความดันก๊าซเข้าไปแทนที่ของเหลวที่อยู่ในรูของเมมเบรน
 - Liquid Displacement method: ให้ความดันของเหลวเข้าไปแทนที่ก๊าซที่อยู่ในรูของเมมเบรน
- Liquid – Liquid Interface(ผิวสัมผัสระหว่าง ของเหลวกับก๊าซ)



รูปที่ 2.14 แสดงความแตกต่างของ a) Bubble Point Method กับ b) Liquid Displacement Method

จากรูปที่ 2.14a ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับขนาดของรูแสดงโดย Cantor Equation

$$r_{(\Delta P)} = -\frac{2\gamma_L \cos \theta}{\Delta P} \quad (2.22)$$

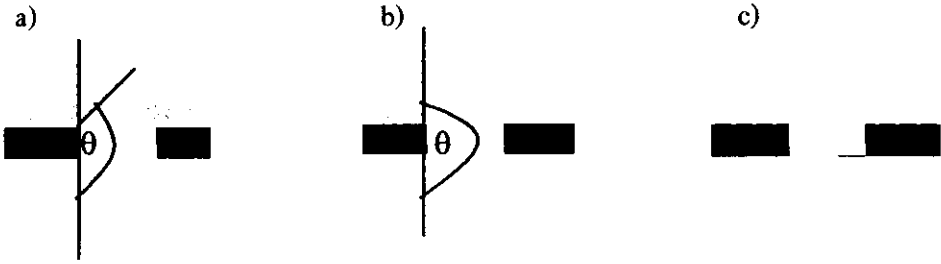
$r_{(\Delta P)}$ คือ รัศมีของรู

γ_L คือ สัมประสิทธิ์ความตึงผิวของของเหลว

θ คือ มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับเมมเบรน

ΔP คือ ความดัน

มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับเมมเบรนที่ความดันต่างๆมีค่าไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.15



$$r_{(\Delta P_1)} = \frac{2\gamma_L \cos \theta}{\Delta P}$$

$$r_{(\Delta P_2)} = \frac{2\gamma_L}{\Delta P}$$

$$\Delta P \geq \Delta P_2$$

รูปที่ 2.15 แสดงมุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับเมมเบรนที่ความดันต่างๆ

ที่มา : Piatkiewicz.w และคณะ (1997 : 92)