

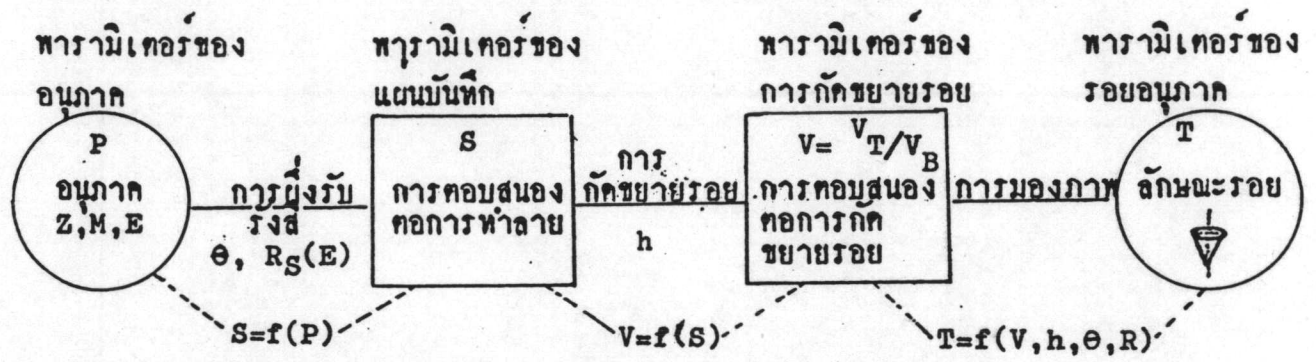
บทที่ 2

ทฤษฎี



2.1 หลักการเบื้องต้น

การวิจัยทางด้านแผนัมน์ทึกรอยแบบโซลิดสเทท ได้วิวัฒนาการมถึชั้น Semogyi (8) จึงไ้รวบรวมพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารอยอนุภาค ตั้งแต่เริ่มค้นจนเกิดเป็นรอยขึ้น หลังจากถูกกัคขยายรอยด้วยสารละลายเคมี เพื่อให้เข้าใจขอบเขตของการศึกษาและง่ายต่อการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ เขาได้เขียนเป็นแผนภาพตามรูป 2.1 พิจารณาจากซ้ายไปขวา แสดงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ในการศึกษารอยอนุภาคบนแผนัมน์ทึกรอย

พารามิเตอร์ของอนุภาค (Particle Parameters) อนุภาคที่วิ่งเข้าสู่แผนัมน์ทึกมีไ้ตั้งแต่โปรตอนไปจนถึงฟิสิชั่นแฟรกเมนต์ของซากุหนัก อนุภาคแต่ละตัวจะประกอบไปค้ด้วยมวล ประจุและพลังงาน

พารามิเตอร์ของแผนัมน์ทึก (Detector Parameters) เป็นคุณสมบัติของแผนัมน์ทึก เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ผ่านไปในเนื้อสารของแผนัมน์ทึก ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานให้กับีเอเลคตรอนในเนื้อสาร ตามทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน แผนัมน์ทึกแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติตอบสนองต่อการทำลายของอนุภาคแตกต่างกัน เช่น แผนัมน์ทึก:

เซลล์ไอโซโทปในทรอสสามารถบันทึกอนุภาคโปรตอนได้ แต่แผ่นบันทึกไมกาสสามารถบันทึกอนุภาค $^{20}_{10}\text{Ne}$ ขึ้นไป

พารามิเตอร์ของการกัดขยายรอย (Etching Parameters) เป็นขบวนการทางเคมี ระหว่างสารละลายเคมีกับแผ่นบันทึก ซึ่งสามารถทำให้รอยอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นพอที่จะสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา ขบวนการกัดรายนี้นี้มี 2 แบบ คือ การกัดรอยตามแนวผิว V_B และการกัดรอยตามแนวของรอย V_T โดยการศึกษาค่าทั้งสองจากความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ ดังนี้ $v = V_T/V_B$ โดยที่ $v=f(s)$ เป็นฟังก์ชันของการทำลายแผ่นบันทึก พารามิเตอร์ของการกัดขยายรายนี้นี้ มีความสำคัญมากในงานเกี่ยวกับปริมาณเช่น การนับจำนวนรอย ในทางปฏิบัติยอมรับกันว่า $v(s, z_1) = v(s, z_2) = \dots = v(s, z_i)$ หมายถึง การกัดรอยจะไม่ขึ้นกับประจุของอนุภาค

พารามิเตอร์ของรอย (Track Parameters) เป็นรูปเรขาคณิตของรอยที่ถูกสารละลายเคมีกัด ซึ่งเราศึกษาเกี่ยวกับพิสัย มุมที่ทำกับแผ่นบันทึก พารามิเตอร์ของการกัดขยายรอย และระยะทางที่ถูกกัดในช่วงเวลาหนึ่ง ลักษณะของรอยต่างๆ ไปส่วนใหญ่มักจะเป็นรูปกรวย (cone shape)

2.2 การเกิดรอย

2.2.1 การสูญเสียพลังงานของอนุภาค

เมื่ออนุภาคมีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟาวิ่งผ่านเข้าไปในเนื้อสารใดๆ จะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับอิเล็กตรอนในอะตอมของเนื้อสารทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปอยู่ในระดับโลค (Excited state) อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะหลุดออกเกิดเป็นไอออนปฐมภูมิ (Primary Ionization) ถ้าอิเล็กตรอนที่หลุดนั้นมีพลังงานมากพอ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมอื่นหลุดเป็นไอออนทุติยภูมิ (Secondary Ionization) พลังงานของอนุภาคก็จะลดลงตามลำดับจนกระทั่งหยุดนิ่ง Bethe^(5,9) ได้หาสมการของการสูญเสียพลังงานของอนุภาคต่อหน่วยระยะทางไว้ดังนี้

$$\frac{dE}{dx} = \frac{c_1 z^{*2}}{\beta} \left[\ln \left(\frac{W_{\max}}{I_0} \right) - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad 2.1$$

เขียนในรูปของความหนาแน่นของการเกิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

$$J = \frac{c_1 c_2 z^{*2}}{I_0 \beta^2} \left[\ln \left(\frac{W_{\max}}{I_0} \right) - \beta^2 - \delta + k \right] \quad 2.2$$

$$z^* = z \left[1 - \exp(-130 \beta / z^{2/3}) \right] \quad 2.3$$

z^* = ประจุยั้งผล (effective charge)

$$c_1 = 2 \pi n_e e^4 / mc^2$$

n_e = จำนวนอิเล็กตรอนต่อปริมาตรของแผ่นมันทิก

e = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

c = ความเร็วของแสง

z = เลขอะตอมของอนุภาค

β = ความเร็วของอนุภาค/ความเร็วของแสง

$$W_{\max} = 2mc^2 \beta^2 \gamma^2$$

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

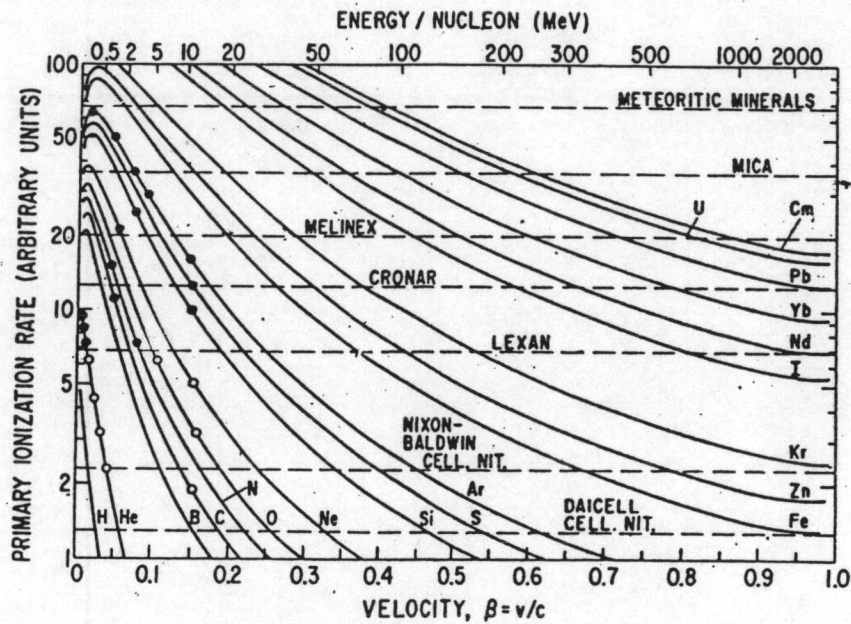
δ = การหักเหเนื่องจากไปลาโรเซชันของตัวกลางของอนุภาคที่ความเร็วสูง

U = การหักเหที่ความเร็วต่ำของอิเล็กตรอนในวงจรรันใน

k = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของตัวกลาง

- I = ค่าเฉลี่ยศักย์ การแตกตัวเป็นไอออนของแผ่นบันทึก
- I_0 = ศักย์การแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กตรอนที่สูญเสียง่ายที่สุดของแผ่นบันทึก
- C_2 = สัดส่วนของผลของอิเล็กตรอนในแผ่นบันทึกในสถานะที่สูญเสียง่ายที่สุด

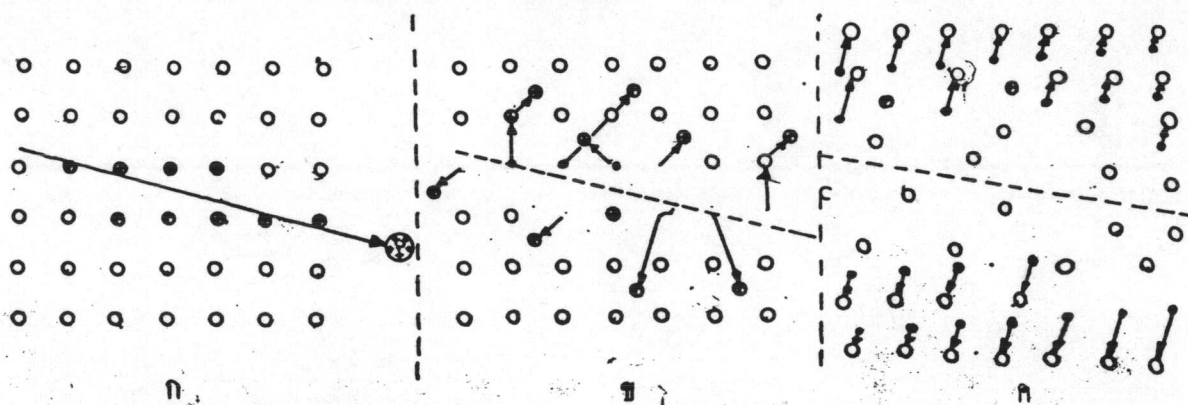
อนุภาคที่จะทำให้รอยปรากฏขึ้น จะต้องมีการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยระยะทาง $(\frac{dE}{dx})$ มากกว่า การสูญเสียพลังงานวิกฤตต่อหน่วยระยะทาง $(\frac{dE}{dx})_c$ ของแผ่นบันทึกนั้นๆ ซึ่งมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นบันทึก จึงจะมองเห็นไต๋ควายกลองจุลทรรศน์หลังจากถูกกัดขยายรอยโดยสารเคมี



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงการเกิดไอออนปฐมภูมิในแต่ละความเร็วของอนุภาคของแผ่นบันทึกต่างๆ (5)

2.2.2 กลไกการเกิดรอย (5,6)

อนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในเนื้อสารตามหัวข้อ 2.2.1 นั้น จะทำให้เกิดความเสียหายตามทางที่อนุภาควิ่งผ่าน ในแต่ละอนุภาคจะมีความเสียหายมากขึ้นอยู่กับความเร็วของอนุภาคพอเหมาะที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน แบบจำลองที่อธิบายกลไกการเกิดรอยโคที่ที่สุดคือ แนวทางระเบิดของไอออน (ion explosion spike) ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนตามรูป 2.3 แบบจำลองนี้ใช้ได้กับการเกิดรอยสำหรับแผ่นมันทิกที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic substance) เช่น แผ่นไมกา อัญมณี แก้ว เป็นต้น



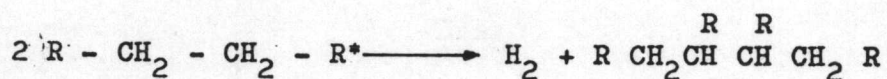
รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนของการเกิดรอย

- ก. เกิดการเป็นไอออน
- ข. เกิดการชกทางไฟฟ้า
- ค. เกิดการฉีกขาดความเครียด

2.2.3 การเกิดรอยในโพลีเมอร์ (5,10)

แผ่นมันทิก โพลีเมอร์เป็นแผ่นมันทิกชนิดสารอินทรีย์ (organic substance) มีความไวต่อการถูกทำลายโคที่กว่าแผ่นมันทิกสารอนินทรีย์ เมื่ออนุภาคนิกเดียวกันวิ่งผ่านกลไกการเกิดรอยนอกจากจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนจากการระเบิดเป็นทางของไอออนแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมโดยอิเล็กตรอน

ถูกกระตุ้น (excitation) ซึ่งจะใช้พลังงานน้อยกว่าการแตกตัวเป็นไอออน และรังสี
 เดลตา (delta ray) ที่ได้จาก การแตกตัวเป็นไอออนปฐมภูมิ สามารถทำความเสียหาย
 แก่โครงสร้างทางเคมี ซึ่งบริเวณดังกล่าวเมื่อถูกสารละลายเคมีก็กระจายรอย จะทำให้
 บริเวณนั้นมีผลต่อสารละลายเคมีมากกว่าบริเวณอื่นๆ ความเสียหายดังกล่าวทั้งหมดของ
 แผ่นบันทึกโพลีเมอร์ จะอธิบายเกี่ยวกับการตัด (scission) และการเชื่อม (cross -
 linking) แขนของโมเลกุล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมี ตัวอย่างโครง
 สร้างทั่วไปในการเกิด cross - linking



โครงสร้างทั่วไปของปฏิกิริยาการตัด

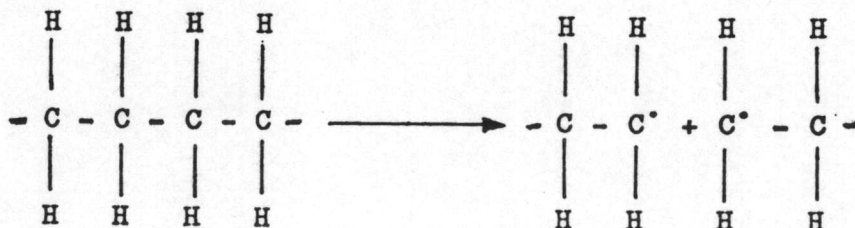


R เป็นโมเลกุลของกลุ่มแอลคิล (alkyl group)

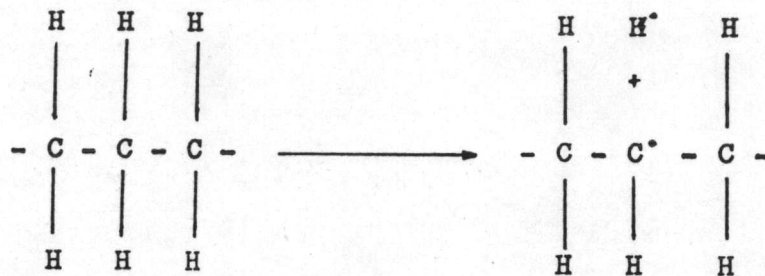
R* เป็นโมเลกุลของกลุ่มแอลคิลที่ถูกกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน

R, R* เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนเท่านั้น ก็จะได้รูปแบบง่ายๆ เป็นโพลี
 เอทิลีน (polyethylene) $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$
 การตัดในกรณีโพลีเอทิลีนมีทั้งการตัดแขนโมเลกุลระหว่างคาร์บอน - คาร์บอน (C-C bond)

คือ



หรือโดยการแตกแขนงของโมเลกุลระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน



C^{\bullet} คือคาร์บอนเรดิคัล (carbon radical) H^{\bullet} คือไฮโดรเจนเรดิคัล (hydrogen radical)

2.3 การกัดขยายรอย (Track Etching)

รอยอนุภาคที่ปรากฏบนแผ่นบันทึกในหัวข้อที่ 2.2 มีขนาดเล็กมากสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แต่โดยใช้เทคนิคการกัดขยายรอยโดยสารละลายเคมีที่เหมาะสม จะทำให้รอยมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา จากรอยที่ถูกกัดขยายนี้ สามารถศึกษารูปร่างเรขาคณิตของรอยได้

2.3.1 เงื่อนไขการกัดขยายรอย

โดยทั่วไปสารละลายเคมีจะมีปฏิกิริยากับวัสดุ แต่มีสารละลายเคมีบางชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยากับแผ่นบันทึกหลังจากบันทึกอนุภาคมีประจุแล้ว มีคุณสมบัติกัดขยายรอยตามแนวรอย V_T มากกว่าการกัดตามแนวผิว V_B รอยจึงปรากฏให้เห็น เช่นแผ่นบันทึกที่เป็นแก้วหรือแร่ธาตุบางชนิดใช้กรกไฮโดรฟลูออริก ถ้าเป็นแผ่นโพลีเมอร์ ใช้สารละลายด่าง (NaOH หรือ KOH) Fleischer และคณะ⁽⁵⁾ ได้รวบรวมเงื่อนไขสำหรับแผ่นบันทึกที่บันทึกฟอสฟอรัสแตรกเมนต์ไว้ ดังแสดงในตาราง (2-1) เป็นส่วนหนึ่งเฉพาะแผ่นบันทึกโพลีเมอร์

ตารางที่ 2-1 แสดงเงื่อนไขการกัดขยายรอยของแผ่นพลาสติกชนิดต่างๆ

Plastic(Trade Names)	Etching Conditions
amber	30 g $K_2Cr_2O_7$: 50 ml conc. H_2SO_4 , 40 h, 28°C
cellulose acetate (Kodacel; Triafol T; Cellit)	1 ml 15% $NaClO$: 2 ml 6.25 $NaOH$ 1 h, 40°C 25g $NaOH$: 20g KOH : 4.5g $KMnO_4$: 90g H_2O , 2-30min, 50°C
cellulose acetate butyrate	6.25N $NaOH$, 12min, 70°C
cellulose nitrate (Biacel; Nixon-Baldwin)	6.25N $NaOH$, 2-4 h, 23°C
cellulose propionate (Cellidor)	28% KOH , 100min, 60°C
cellulose triacetate (Kosacel TA 401, unplasticized; Bayer TN)	1 ml 15% $NaClO$: 2 ml 6.25 $NaOH$, 1 h, 40°C
formophenol (ambrolithe, phenoplaste)	6N $NaOH$, 1 h, 40°C; 48% HF , 30 sec, 40°C, in sequence
HBpaIT (polyester, $C_{17}H_{19}O_2$)	6.25 N $NaOH$, 8 min, 70°C
ionomeric polyethelene (Surlyn)	10g $K_2Cr_2O_7$: 35 ml 30% H_2SO_4 1 h, 50°C
polyamide (H-Film)	$KMnO_4$ (25%aq), 1.5 h 100°C
polyimide	$KMnO_4$ in H_2O
polycarbonate (Lexan; Makrofol; Merlon; Kimfol)	6.25 N $NaOH$, 20 min, 50°C 6.25 N $NaOH$ + 0.4% Benax†; 20 min 70°C
polyethelene	10 g $K_2Cr_2O_7$: 35 ml 30% H_2SO_4 30 min, 85°C
polyethelene terephthalate (Mylar; Chonar; Melinex; terphane)	6.25 N $NaOH$, 10 min 70°C $KMnO_4$ (25%, aq), 1 h 55°C

Plastic (Trade Names)	Etching Conditions
polymethyl methacralate (Plexiglas; Lucite)	sat. KMnO_4 , 8 min, 85°C
polyxymethylene (Delrin)	5% KMnO_4 , 10 h, 60°C
polyphenoxide	KMnO_4 , (25% aq.), 4 min, 100°C
poly 1-4 butylene terephthalate	1 ml 6.25 N NaOH : 1 ml ethanol, 24 h, 23°C
polypropylene (Cryovac-Y)	35 ml 30% H_2SO_4 : 10 g. $\text{Cr}_2\text{K}_2\text{O}_7$, 5 min, 94°C
polystyrene	sat. KMnO_4 , 2.5 h, 85°C 10 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: 35 ml, 30 H_2SO_4 3 h, 85°C
polyvinylaceto-chloride	KMnO_4 (25% aq.) 30 min, 100°C
polyvinylchloride	sat. KMnO_4 , 2.5 h, 85°C
polyvinylidene chloride (Saran)	KMnO_4 (25% aq.), 2 h, 55°C
silicone-polycarbonate copolymer	6.25 N NaOH 20 min, 50°C

เงื่อนไขตามตาราง 2-1 จะเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกสารละลายเคมี และเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมอย่างไร และเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่สามารถทำให้รอยขยายใหญ่ขึ้น ยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถดักขยายรอยให้ใหญ่ขึ้นได้ เช่น การเติมออกซิโคซิงเอเจน⁽⁵⁾ (oxidizing agent) เพื่อเร่งปฏิกิริยา การผสมสารละลายต่างกับอัลกอฮอล์⁽²⁾ การเลือกใช้ความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมและการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งแต่ละวิธีก็ทำให้อัตราการทำลายเพิ่มขึ้น

การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเคมีพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเคมีกับแผ่นบันทึกรอยแปรผันกับอุณหภูมิ ตามทฤษฎีการก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเคมี (activation theory of chemical reaction) (11,12) ดังสมการ

$$V = Ae^{-Q/kT} \quad 2.4$$

$$V = \text{อัตราเร็วในปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายเคมีกับแผ่นบันทึก} \\ V_B \text{ หรือสารละลายเคมีกับบริเวณรอยอนุภาค } V_T$$

$$A = \text{ค่าคงที่}$$

$$k = \text{ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ (8.67 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K})}$$

$$T = \text{อุณหภูมิสมบูรณ์ของสารเคมี (K)}$$

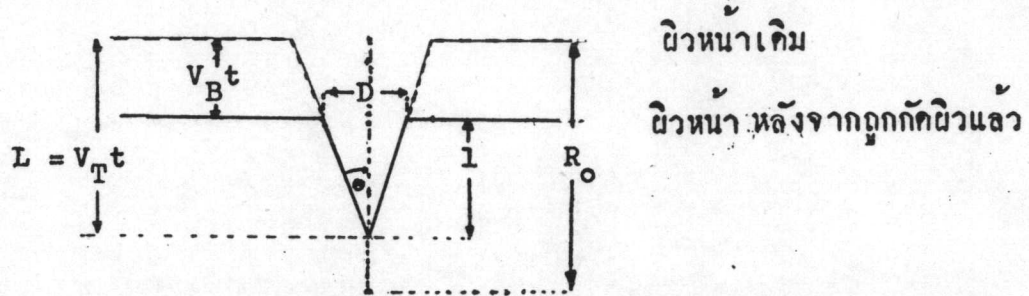
$$Q = \text{พลังงานการก่อกัมมันต์ของสารละลายเคมี}$$

สมการ 2.4 จะแยกพิจารณาเฉพาะ V_B , V_T หรือจะพิจารณาอัตราส่วน V_T/V_B ก็ได้

2.3.2 รูปทรงเรขาคณิตของรอย^(5,6)

ลักษณะรอยที่ปรากฏให้เห็น ส่วนใหญ่จะเป็นรูปกรวย (cone shape) มองเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะในแผ่นบันทึกแบบโพลีเมอร์ และบ่อยครั้งที่พบว่ารอยมีลักษณะไม่ใช่กรวยแบบสมบูรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงคณิตศาสตร์ซับซ้อน ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณี

ที่อนุภาคตกตั้งฉากกับแผ่นมันทิก และผ่านการกัดขยายรอยจากสารละลายเคมีเป็นเวลา t ดังรูป



รูปที่ 2.4 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของรอยในแนวตั้งฉากกับแผ่นมันทิกหลังจากการกัดขยายรอยแล้ว

V_T = ความเร็วของการกัดขยายรอยตามแนวรอย

V_B = ความเร็วของการกัดขยายรอยตามแนวผิว

L = ระยะความลึกเดิมของรอย

l = ระยะความลึกของรอยหลังจากถูกกัดคามผิวแล้ว

R_0 = ความลึกจากผิวถึงตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่จนหยุด

D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรอย

t = เวลาของการกัดรอย



พิจารณาในกรณีที่ V_T คงที่ตลอดแนวรอย

V_B คงที่และสมลักษณะ (constant and isotropic)

จะได้ $V_T/V_B =$ ค่าคงที่

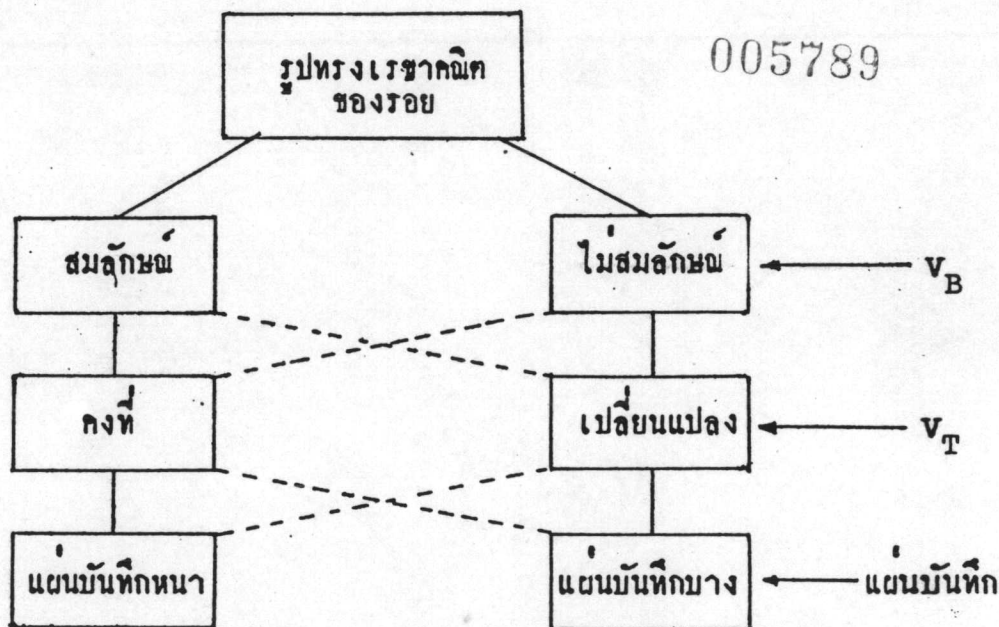
$$l = (V_T - V_B)t$$

$$D = 2V_B t \left[\frac{V_T - V_B}{V_T + V_B} \right]^{1/2} \quad 2.6$$

จากรูป $V_B/V_T = \sin \theta$
 จะโคมุมกรวย (cone angle) ของรอย

$$\theta = \sin^{-1} V_B/V_T \quad 2.7$$

จากสมการ 2.5 และ 2.6 ถ้า $V_T = V_B$ จะไม่เห็นรอยปรากฏอยู่โดยทั่วไปแล้ว แผ่นมันติกบางชนิด V_B ไม่คงที่เท่ากันหมดทุกทิศทาง (anisotropic) คงที่เฉพาะแผ่นมันติกที่เป็น high polymer ดังนั้นการศึกษารูปลักษณะของรอยแล้วต้องคำนึงถึงตัวประกอบต่างๆ จึงได้สรุปรวบรวมไว้ในแผนผังที่แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงตัวประกอบต่างๆ ในการศึกษารอยของแผ่นมันติก