

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การเกิดอนุภาคแอลฟา

2.1.1 การปลดปล่อยรังสีแอลฟานั้นเป็นปรากฏการณ์ผลัดกันทางควมอมบ์ที่เกิดขึ้นในนิวเคลียส ซึ่งขนาดของแรงผลักจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดของเลขอะตอมยกกำลังสอง ในปี 1909 รัทเธอร์ฟอร์ด ได้ทำการทดลองและสามารถระบุว่อนุภาคแอลฟานั้นเป็นนิวเคลียสของแก๊สฮีเลียม กระบวนการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาของธาตุนั้นนั้นเพื่อต้องการลดประจุและมวลอย่างรวดเร็ว โดยตามธรรมชาติมักจะมีพลังงาน 4 – 10 MeV โดยพิสัย (range) ของอนุภาคแอลฟาที่สามารถวิ่งผ่านไปใอากาศได้โดยแสดงไว้ใน ตาราง 1

ตาราง 1 แสดงพิสัยของอนุภาคแอลฟาที่เดินทางในอากาศ

พลังงาน (MeV)	พิสัย (range)	
	ซม.	นิ้ว
4.0	2.5	1.0
4.2	2.7	1.06
4.4 และ 4.6	2.9 และ 3.1	1.15 ถึง 1.2
4.8	3.3	1.3
5.1	3.6	1.4

ที่มา: อุไรวรรณ จุณภาต. (2534 : 136)

การวัดพลังงานของอนุภาคแอลฟา มักจะวัดพิสัยที่อนุภาคสามารถวิ่งผ่านไปได้ในตัวกลางนั้นๆ เพราะสะดวกกว่าการวัดความเร็วของอนุภาค โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาควิ่งผ่านไปได้ตามภาพประกอบ 1 จะสามารถหาค่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาได้

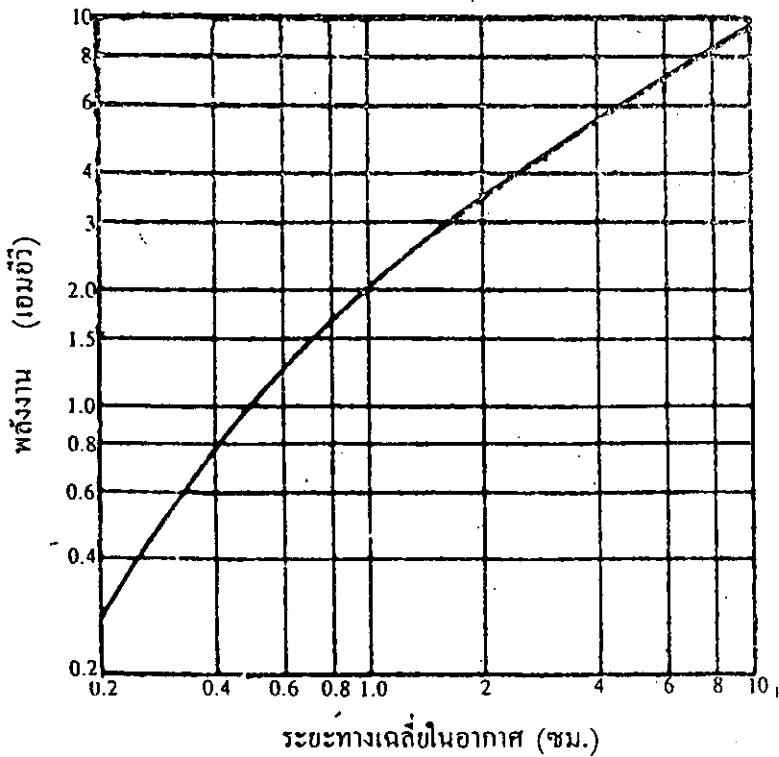
ในช่วงพลังงาน 4-7 MeV พิตซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงาน กราฟที่ได้จะเป็นไปตามสมการ

$$R = 0.318 E^{3/2} \quad (1)$$

$$E = 2.12 R^{2/3} \quad (2)$$

R = พิตซ์ (cm) ในอากาศ

E = พลังงานเคิม (MeV)



ภาพประกอบ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พิตซ์ - พลังงาน ของอนุภาคแอลฟาในอากาศ

ที่มา : อุไรวรรณ จุณภาด. (2534 :139)

แบร์ก - คลีแมน (Bragg - Kleeman) ได้แสดงสูตรความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยที่อนุภาคแอลฟาผ่านไปได้ในสารใด ๆ กับในอากาศอย่างประมาณได้ว่า

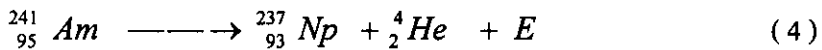
$$R_s = \frac{3.2 \times 10^{-4} R \cdot A^{\frac{1}{2}}}{\rho} \quad (3)$$

$R_s$  เป็นพิสัยในวัสดุของแข็งความหนาแน่น  $\rho$

$A$  เป็นเลขมวล

$R$  คือพิสัยในอากาศ

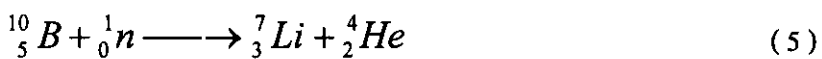
ตัวอย่างของการเกิดอนุภาคแอลฟา



ซึ่งในสมการนี้จะให้พลังงานจลน์ของแอลฟาออกมาประมาณ 5.48 MeV และ 5.43 MeV

### 2.1.2 การเกิดอนุภาคแอลฟาจากแผ่นคอนเวอร์เตอร์นิวตรอนชนิด โบรอน - 10

แผ่นคอนเวอร์เตอร์นิวตรอนจะผลิตจากการใช้แผ่นไมก้า เคลือบด้วยสาร โบรอน-10 ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์กับอนุภาคนิวตรอน แล้วจะทำให้อนุภาคแอลฟาออกมา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



พลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนที่เข้าไป โดยทั่วไปแล้วพลังงานของนิวตรอนที่เข้าไปจะเป็นนิวตรอนพลังงานขนาดกลางคือ มีพลังงานขนาด 0.5 eV - 10 keV จะทำให้ได้อนุภาคแอลฟาออกมาที่มีพลังงานเป็นช่วง ๆ ของพลังงาน

## 2.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน

### 2.2.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

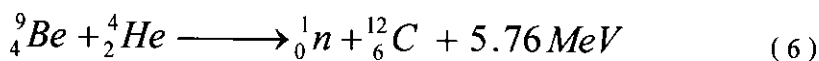
นิวตรอนจะมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ คือ มีมวลขนาด  $1.68 \times 10^{-24}$  กรัม (1.00899 amu) มีค่ามากกว่ามวลของโปรตอนเล็กน้อย นิวตรอนอิสระจะสลายตัวไปเป็นโปรตรอนด้วยครึ่งชีวิต 12 นาที พร้อมกับให้อนุภาคอิเล็กตรอนและนิวทริโนและเนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุจึงไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงทำได้ยากต่อการควบคุมอนุภาคนิวตรอนนี้ การที่จะทำให้อนุภาคนิวตรอน เบี่ยงเบนได้ โดยให้ชนกับอนุภาคอื่น ๆ และจากการที่อนุภาคนี้ไม่มีประจุก็มีส่วนช่วยให้นิวตรอนมีอำนาจทะลุทะลวงสูง จะถูกหยุดยั้งได้ก็ต่อเมื่อชนกับตัวขวางกั้นที่มีความหนามาก ๆ หรือให้กระเจิงกับตัวกลางที่เป็นอะตอมของธาตุเบาจะทำให้อนุภาคนิวตรอนลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็วด้วยปฏิกิริยากระเจิงแบบยืดหยุ่น สำหรับนิวตรอนช้า (slow neutron) จะถูกดูดกลืนโดยโบรอนและแคดเมียมได้ดี

### 2.2.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน

นิวตรอนจะถูกผลิตได้ด้วย 2 กระบวนการคือ (1) การระดมยิงนิวเคลียร์ และ (2) การแบ่งแยกนิวเคลียสในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

แหล่งนิวตรอนที่เคลื่อนที่ได้โดยใช้หลักการระดมยิงนิวเคลียร์นั้นมีสองแบบคือ (1) โดยอาศัยแหล่งกำเนิดสารกัมมันตรังสีและ (2) โดยอาศัยเครื่องเร่งอนุภาคที่มีประจุโดยใช้ความต่างศักย์สูง

อุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีนั้นเรียกว่า ปืนใหญ่นิวตรอน (neutron Howitzer) หรือถ้านำก้อนยูเรเนียมมาหุ้มรอบแหล่งกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นการทวีคูณจำนวนของนิวตรอน โดยปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ได้วิกฤต (sub - critical ) แหล่งกำเนิดนิวตรอนจะประกอบไปด้วยผงละเอียดเบริลเลียมผสมกับตัวปลดปล่อยรังสีแอลฟาในรูปของเม็ดนิวตรอน จะถูกปลดปล่อยออกมาโดยปฏิกิริยา  $(\alpha, n)$  ของเบริลเลียม



ปฏิกิริยาที่ผลิตนิวตรอนอื่น ๆ คือ  ${}^3\text{H}(\alpha, n){}^6\text{Li}$  และ  ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$  ในแต่ละปฏิกิริยานั้น ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีของอนุภาคที่ใช้ระดมยิง หรือโฟตอนของธาตุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ก็มีโบรอนและลิเทียมซึ่งจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาเมื่อถูกระดมยิงด้วยอนุภาคแอลฟา

แหล่งกำเนิดแอลฟาเพื่อใช้ในวัตถุประสงค์นี้ ประกอบด้วย เรเดียม-226 พอลอเนียม-210 ทอเรียม-228 พลูโทเนียม-239 และ แอกทิเนียม-227 เราสามารถแยกแยะแหล่งกำเนิดนิวตรอนได้ดังนี้

ตาราง 2 ชนิดของแหล่งกำเนิดนิวตรอน

แหล่งกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ผลิตผล (n/s/Ci)	ฟลักซ์นิวตรอนที่ 1 เมตร (n / cm <sup>2</sup> /s)	รังสีแกมมาที่ให้ (mr - h - m/Ci)
<sup>226</sup> Ra : Be	1620y	1.2 x 10 <sup>7</sup>	95	850
Re -- DEF : Be	21y	2.6 x 10 <sup>6</sup>	20.7	22
<sup>210</sup> Po : Be	138d	2.6 x 10 <sup>6</sup>	20.7	0.1
<sup>228</sup> Th : Be	1.9y	1.8 x 10 <sup>7</sup>	143	575
<sup>239</sup> Pu : Be	24360y	2.2 x 10 <sup>6</sup>	17.5	3.7
<sup>227</sup> Ac : Be	22y	1.8 x 10 <sup>7</sup>	143	146

ที่มา : ธวัช ชิตระการ. (2541 :144)

แหล่งกำเนิดพลูโทเนียม - เบริลเลียม นั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่มีครึ่งชีวิตยาว ผลิตนิวตรอนสูง ฟลักซ์แกมมาต่ำ และราคาไม่สูงมากนัก ปืนใหญ่นิวตรอนประกอบด้วยแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่หุ้มล้อมรอบด้วยพาราฟินหรือน้ำในภาชนะพลาสติก อะลูมิเนียม หรือ โลหะไร้สนิม จะมีปล่องหรือช่องที่เจาะทะลุถึงแหล่งกำเนิดนิวตรอนรวมทั้งจะมีการเตรียมพื้นที่และตำแหน่งให้สำหรับวางสารตัวอย่าง เพื่ออาบรังสีนิวตรอน หรือจะทำไว้เพื่อเป็นตัวผลิตลำนิวตรอน พาราฟินและน้ำนั้นจะอุดมไปด้วยโปรตอน จึงเป็นตัวลดระดับพลังงานของนิวตรอนได้ดีเป็นอย่างยิ่ง โดยการที่นิวตรอนเร็วจะชนกับโปรตอน พร้อมกับสูญเสียพลังงานจนนำไปอย่างรวดเร็ว และจะวิ่งช้าลงจนกลายเป็นนิวตรอนเทอร์มัล ตัวกำเนิดของนิวตรอนซึ่งใช้เพื่อการผลิตนิวตรอนนั้นราคายังไม่สูงมาก โดยเครื่องชนิดนี้จะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่จะให้อนุภาคคิวเทรอนพลังงานสูงออกมา เมื่อให้อนุภาคเหล่านี้ชนกับเป้าของ <sup>3</sup>H - เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (Zr<sup>3</sup>H<sub>4</sub>) จะให้นิวตรอนออกมาตามปฏิกิริยา



ซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนได้ถึง  $10^8$  ตัวต่อวินาที พลังค์นิวตรอนที่ได้จะสูงกว่าเครื่องป้อนใหญ่ นิวตรอนประมาณ 10 ถึง 50 เท่า

### 2.2.3 การจำแนกชนิดของนิวตรอน

การจำแนกนิวตรอนนั้นจะอาศัยความเร็วของนิวตรอนเป็นหลัก ตามตาราง 3

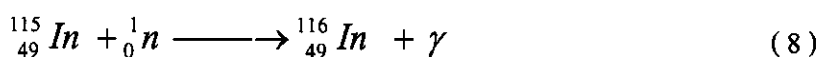
ตาราง 3 การจำแนกชนิดของนิวตรอน

ชื่อ	พลังงาน	อันตรกิริยาหลัก	หมายเหตุ
เทอร์มัล	0.025 eV (ที่ 22°C)	การจับ	ความเร็วเฉลี่ย = 2200 m/s การกระจายพลังงานเป็นแบบแมกซ์เวลล์
ขนาดกลาง	0.5 eV – 10 keV	การกระเจิงแบบ ยืดหยุ่นและการจับ	การดูดกลืนเป็นไปตามกฎ $1/V$ และ แสดงยอดการดูดกลืน
เร็ว	10 keV – 20 MeV	การกระเจิงแบบไม่ ยืดหยุ่น	นิวตรอนส่วนใหญ่จะถูกปลดปล่อย ออกมาจากนิวเคลียสด้วยพลังงานในช่วง นี้
สัมพัทธภาพ	> 20 MeV	การแตกเป็นเสี่ยง	มวลสัมพัทธภาพจะมีค่ามากกว่ามวลนิ่ง

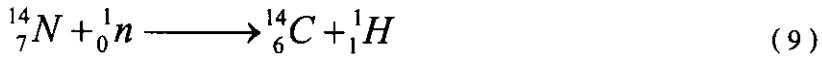
ที่มา : ธวัช ชิตตระกูล. (2541 : 147)

ปฏิกิริยาการจับนิวเคลียสส่วนใหญ่เมื่อจับนิวตรอนเข้าไปจะทำให้พลังงานเพิ่มขึ้น 8 MeV บวกกับพลังงานจลน์ของนิวตรอน นิวเคลียสจะอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเมื่อจะกลับสู่สภาวะพื้นจะปลดปล่อยอนุภาคหรือโฟตอนออกมา ปฏิกิริยาการจับแบบนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนที่ตกกระทบ

1. ปฏิกิริยานิวตรอนช้าเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปพลังงานของนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้นมีเพียง 8 MeV ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคหลุดออกมาได้ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปฏิกิริยาการก่อกัมมันต์แบบ  $(n,\gamma)$  เลขอะตอม  $Z$  คงเดิม แต่ค่าเลขมวล  $A$  จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วยดังสมการ



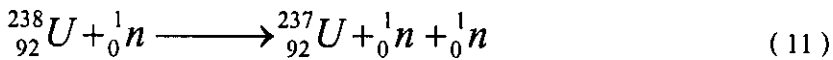
2. นิวตรอนพลังงานขนาดกลาง การจับแบบนี้อาจจะเป็นแบบที่ 1 แต่นิวเคลียสที่ผสมที่เกิดอาจมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวและปลดปล่อยอนุภาค เช่น โปรตอน นิวตรอน หรือ อนุภาคแอลฟาออกมาได้ ปฏิกิริยาแบบนี้ ส่งผลให้เกิดธาตุใหม่รวมเรียกว่า การแปรธาตุ เช่นปฏิกิริยาของ  $(n, p)$  คือ



หรือปฏิกิริยาแบบ



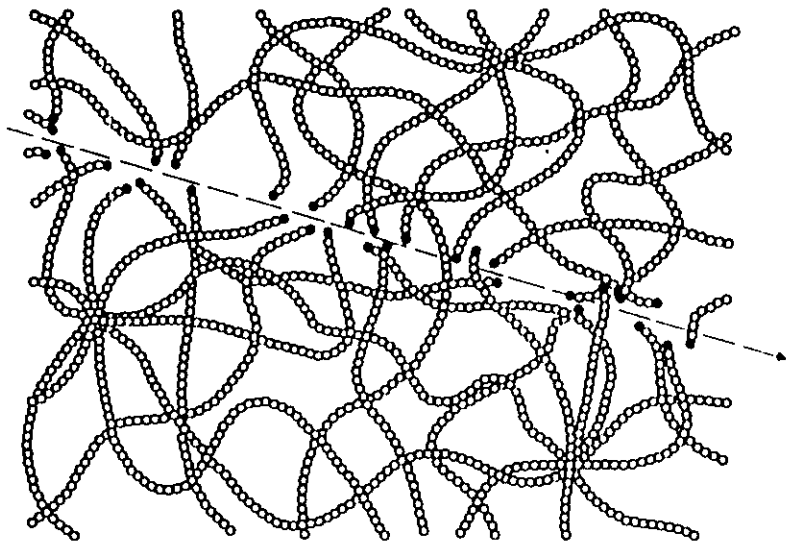
3. นิวตรอนเร็ว พลังงานจนถึงสูงถึง 10 MeV จะทำให้นิวเคลียสมีพลังงานเพิ่มถึง 18 MeV ในขณะที่พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวคลีออนมีค่าเพียง 8 MeV ด้วยเหตุนี้อนุภาคทั้งสองอาจถูกปลดปล่อยออกมา เช่น ปฏิกิริยา  $(n, 2n)$



4. นิวตรอนสัมพัทธภาพ จะมีนิวคลีออนหลายตัวที่จะถูกขับออกมาจากนิวเคลียสได้ด้วย นิวตรอนที่มีพลังงานสูงขนาดนี้ เช่น ปฏิกิริยา  $(n, 3n)$  และ  $(n, 2np)$

### 2.3 ทฤษฎีการเกิดรอยเมื่ออนุภาคพุ่งผ่านแผ่นฟิล์มบาง

เมื่ออนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในสสารจะมีการสูญเสียพลังงานโดยการคายพลังงานให้แก่โมเลกุลของสารตัวกลาง ทำให้โมเลกุลของสารแตกตัวเป็นไอออนตามแนวทางที่อนุภาคที่มีประจุนั้นผ่าน สำหรับวัตถุที่เป็นฉนวนรอยจะปรากฏอยู่อย่างถาวร ดังแสดงในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงความเสียหายของโครงสร้างโมเลกุลประเภทสารพอลิเมอร์ซึ่งโมเลกุลมีการเรียงตัวกันยาวแบบลูกโซ่เมื่ออนุภาคหรือรังสีวิ่งผ่านตามแนวจะไปทำให้อะไรของโมเลกุลขาดลง

ที่มา: สมหมาย ช่างเขียน. (2539 : 3)

### 2.3.1 รอยรังสีแอลฟาจากปฏิกิริยา ( $n, \infty$ )

เมื่อนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ  $^{10}\text{B}$  แล้วให้อนุภาคแอลฟาออกมา แล้วทำให้นิวเคลียสของ  $^{10}\text{B}$  เปลี่ยนไปเป็น  $^7\text{Li}$  ตามปฏิกิริยา ( $n, \infty$ ) สามารถตรวจวัดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้โดยใช้พลาสติกที่มีความไวสำหรับอนุภาคแอลฟาพลังงานต่ำ ในทางกลับกันเทอร์มัลและเอพิเทอร์มัลนิวตรอนที่มีฟลักซ์ต่ำก็สามารถตรวจวัดโดยใช้พลาสติกที่มีความไวต่ออนุภาคแอลฟาที่ติดด้วยแผ่นฟอยล์ที่ประกอบด้วย  $^6\text{Li}$  และ  $^{10}\text{B}$  หรือใช้แผ่นพลาสติกที่มีความไวต่ออนุภาคแอลฟาซึ่งมี  $^6\text{Li}$  และ  $^{10}\text{B}$  แยกกันอย่างสม่ำเสมอที่ระดับพลังงานต่ำๆ ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยา ( $n, \infty$ ) จะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราเร็วสำหรับเทอร์มัลนิวตรอน ภาคตัดขวางของ  $^{10}\text{B}$  เท่ากับ 3840 barn Fleischer, R.L. และคณะ. (1975) ได้ค้นพบว่าเมื่อใช้เครื่องวัดที่ประกอบด้วยแผ่น  $^{10}\text{B}$  ซึ่งหนา  $\sim 0.2$  cm และแผ่นเซลลูโลสไนเตรด หรือเซลลูโลสอะซีโตนที่เรด จะเป็นตัววัดอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมาได้ดี



ตาราง 4 ตารางเปรียบเทียบความไวต่อปฏิกิริยาของตัววัด

A. Inorganic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Hypersthene	$Mg_{1.5}Fe_{0.5}Si_2O_6$	100 MeV $^{56}Fe$
Olivine	$MgFeSiO_4$	
Labradorite	$Na_2Ca_3Al_8Si_{12}O_{40}$	
Zircon	$ZrSiO_4$	
Bronzite	$Mg_{1.7}Fe_{0.3}Si_2O_6$	
Enstatite	$MgSiO_3$	
Diopside	$CaMg(SiO_3)_2$	170 MeV $^{56}Fe$
Augite	$CaMg_3Fe_3Al_2Si_4O_{19}$	170 MeV $^{56}Fe$
Oligoclase	$Na_4CaAl_6Si_{14}O_{40}$	4 MeV $^{28}Si$
Bytownite	$NaCa_4Al_9Si_{11}O_{40}$	4 MeV $^{28}Si$
Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	100 MeV $^{40}Ar$
Quartz	$SiO_2$	100 MeV $^{40}Ar$
Phlogopite Mica	$KMg_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$	
Muscovite Mica	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	2 MeV $^{20}Ne$
Silica Glass	$SiO_2$	16 MeV $^{40}Ar$
Flint Glass	$18SiO_2:4PbO:1.5Na_2O:K_2O$	2-4 MeV $^{20}Ne$
Tektite Glass (Obsidian similar)	$22SiO_2:2Al_2O_3:FeO$	
Soda Lime Glass	$23SiO_2:5Na_2O:5CaO:Al_2O_3$	20 MeV $^{20}Ne$
Phosphate Glass	$10P_2O_5:1.6BaO:Ag_2O:2K_2O:2Al_2O_3$	

## ตาราง 4 ต่อ

B. Organic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Amber	$C_2H_3O_2$	Full-energy fission fragments
Phenoplaste	$C_7H_6O$	
Polyethylene	$CH_2$	Fission fragments
Polystyrene	$CH$	
Polyvinylacetochloride	$C_6H_9O_2Cl$	42 MeV $^{32}S$
Polyvinylchloride - Polyvinylidene chloride copolymer	$C_2H_3Cl + C_2H_2Cl_2$	42 MeV $^{32}S$
Polyethylene Terephthalate (Cronar, Melinex)	$C_5H_4O_2$	
Polyimide	$C_{11}H_4O_4N_2$	36 MeV $^{16}O$
Ionomeric Polyethylene (Surlyn)		36 MeV $^{16}O$
Bisphenol A-polycarbonate (Lexan, Makrofol)	$C_{16}H_{14}O_3$	0.3 MeV $^4He$
Polyoxymethylene (Delrin)	$CH_2O$	28 MeV $^{11}B$
Polypropylene	$CH_2$	1 MeV $^4He$
Polyvinylchloride	$C_2H_3Cl$	
Polyethylmethacrylate (Plexiglas)	$C_5H_8O_2$	3 MeV $^4He$
Cellulose Acetate Butyrate	$C_{12}H_{18}O_7$	
Cellulose Triacetate (Cellit, Triafol-T, Kodacel TA-401 unplasticized)	$C_3H_4O_2$	
Cellulose Nitrate (Daicell)	$C_6H_8O_9N_2$	0.55 MeV $^1H$

ที่มา : Fleischer, R.L. และคณะ. (1975 : 19 - 20)

#### 2.4 การกัดขยายรอย (Tracks Etching)

รอยของอนุภาคที่ปรากฏในวัตถุจะมองเห็นได้ก็ต่อเมื่อคู่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือขยายรอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยนำร่องรอยจากการชนของอนุภาคบนวัสดุต่าง ๆ มากัดขยายรอยทางเคมีโดยใช้สารเคมีที่เหมาะสม การกัดขยายรอยของอนุภาคนี้มีปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- ก. ความเข้มข้นของสารเคมีซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย
- ข. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- ค. เวลาในการทำปฏิกิริยา

แผ่นบันทึกรอยที่ไปกัดขยายรอยในสารละลายเคมี ทำให้เนื้อสารที่อยู่บนแผ่นบันทึกรอย มีอัตราการหลุดออกไป 2 แบบ คือ (Fleischer, R.L. และคณะ., 1975)

1. อัตราการขยายรอยทั่วไป (General etching rate,  $V_G$ ) คือ อัตราการกัดผิวหน้าซึ่งจะเกิดบนผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอยทั้งบริเวณที่ถูกทำลายและไม่ถูกทำลาย

2. อัตราการขยายรอยอนุภาค (Track etching rate,  $V_T$ ) คือ อัตราการกัดขยายรอยซึ่งเป็นการกัดผิวตามแนวทางที่อนุภาคผ่านแล้วทำให้เกิดรอย ค่า  $V_T$  นี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สูญเสียไปของไอออนโดยทั่วไปพิจารณาให้มีค่าคงที่

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและทำให้เนื้อสารหลุดไปจากผิวหน้าแผ่นบันทึกรอย อธิบายได้โดยการประยุกต์หลักของฮอยเกนส์ (Huygens' Principle) ดังนี้ (Enge, 1980)

พิจารณาผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอย ดังภาพประกอบ 3 ทุก ๆ ตำแหน่งจะมีอัตราการกัดผิวหน้าออกไปทุกทิศทางด้วยอัตราเร็วเท่ากัน เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  ผิวหน้าจะถูกกัดออกไปเป็นรูปทรงกลมทุก ๆ ตำแหน่งด้วยรัศมี  $V_G t$  ทำให้ผิวหน้าถูกกัดออกไปเป็นระยะ

$$H = V_G t \quad (12)$$

สำหรับกระบวนการกัดตามรอย (etching track  $V_T$ ) ก็อธิบายได้อย่างเดียวกันคือ ทุก ๆ ตำแหน่งของแนวทางที่อนุภาคผ่าน จะมีอัตราการกัดตามรอยเป็น  $V_T$  ซึ่งค่า  $V_T$  นี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่สูญเสียให้แก่โมเลกุลของสารในการพิจารณาจะให้มีความคงที่ ดังนั้นเมื่อเวลาที่ถูกกัดเป็น  $t$  ความยาวของรอยที่ถูกกัดจะเป็นไปตามสมการ

$$L = V_T t \quad (13)$$

สิ่งที่น่าจะพิจารณาอีกอย่างหนึ่งในการเกิดรอยที่ได้จากการกัดขยายรอยคือ มุมวิกฤติ ดังภาพประกอบ 4 ในการกัดขยายรอยจะเห็นรอยได้ก็ต่อเมื่อมุมที่อนุภาคตกกระทบ ( $\alpha$ ) กับแผ่นบันทึกรอยต้องมากกว่ามุมวิกฤติ  $\alpha_0$  และอัตราการกัดขยายรอยในแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคต้องมากกว่าอัตราการกัดขยายตามผิวด้วยตามภาพประกอบ 4 จะได้ว่า

ก. ความเข้มข้นของสารเคมีซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย

ข. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ค. เวลาในการทำปฏิกิริยา

แผ่นบันทึกรอยที่ไปกัดขยายรอยในสารละลายเคมี ทำให้เนื้อสารที่อยู่บนแผ่นบันทึกรอย มีอัตราการหลุดออกไป 2 แบบ คือ (Fleischer, R.L.และคณะ., 1975)

1. อัตราการขยายรอยทั่วไป (General etching rate,  $V_G$ ) คือ อัตราการกัดผิวหน้าซึ่งจะเกิดบนผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอยทั้งบริเวณที่ถูกทำลายและไม่ถูกทำลาย

2. อัตราการขยายรอยอนุภาค (Track etching rate,  $V_T$ ) คือ อัตราการกัดขยายรอยซึ่งเป็นการกัดผิวตามแนวทางที่อนุภาคผ่านแล้วทำให้เกิดรอย ค่า  $V_T$  นี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สูญเสียไปของไอออนโดยทั่วไปพิจารณาให้มีค่าคงที่

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและทำให้เนื้อสารหลุดไปจากผิวหน้าแผ่นบันทึกรอย อธิบายได้โดยการประยุกต์หลักของฮอยเกนส์ (Huygens' Principle) ดังนี้ (Enge, 1980)

พิจารณาผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอย ดังภาพประกอบ 3 ทุก ๆ ตำแหน่งจะมีอัตราการกัดผิวหน้าออกไปทุกทิศทางด้วยอัตราเร็วเท่ากัน เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  ผิวหน้าจะถูกกัดออกไปเป็นรูปทรงกลมทุก ๆ ตำแหน่งด้วยรัศมี  $V_G t$  ทำให้ผิวหน้าถูกกัดออกไปเป็นระยะ

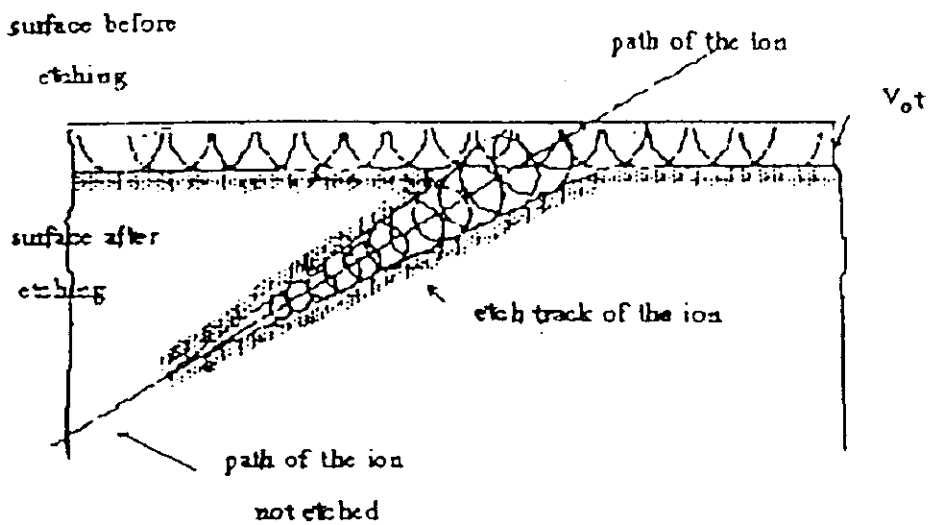
$$H = V_G t \quad (12)$$

สำหรับกระบวนการกัดตามรอย (etching track  $V_T$ ) ก็อธิบายได้อย่างเดียวกันคือ ทุก ๆ ตำแหน่งของแนวทางที่อนุภาคผ่าน จะมีอัตราการกัดตามรอยเป็น  $V_T$  ซึ่งค่า  $V_T$  นี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่สูญเสียให้แก่โมเลกุลของสารในการพิจารณาจะให้มีความคงที่ ดังนั้นเมื่อเวลาที่ถูกกัดเป็น  $t$  ความยาวของรอยที่ถูกกัดจะเป็นไปตามสมการ

$$L = V_T t \quad (13)$$

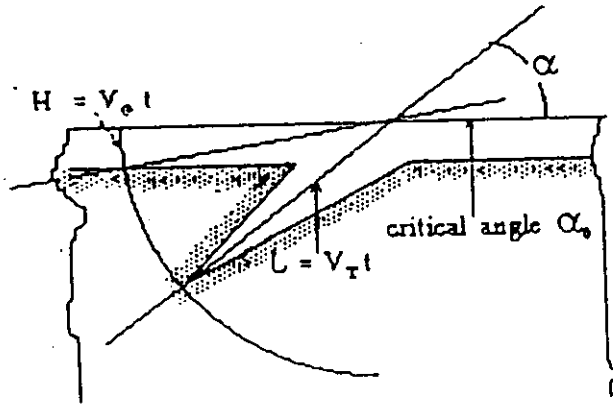
สิ่งที่น่าจะพิจารณาอีกอย่างหนึ่งในการเกิดรอยที่ได้จากการกัดขยายรอยคือ มุมวิกฤติ ดังภาพประกอบ 4 ในการกัดขยายรอยจะเห็นรอยได้ก็ต่อเมื่อมุมที่อนุภาคตกกระทบ ( $\alpha$ ) กับแผ่นบันทึกรอยต้องมากกว่ามุมวิกฤติ  $\alpha_0$  และอัตราการกัดขยายรอยในแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคต้องมากกว่าอัตราการกัดขยายตามผิวด้วยตามภาพประกอบ 4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \sin \alpha_0 &= H/L \\
 &= V_G t / V_T t \\
 &= V_G / V_T \\
 \text{หรือ} \quad \alpha_0 &= \sin^{-1} (V_G / V_T) \quad (14)
 \end{aligned}$$



ภาพประกอบ 3 แสดงการกัดตามรอยและการกัดผิวน้ำโดยใช้หลักการของออยเกนส์อธิบายการกัดขยาย  
รอย

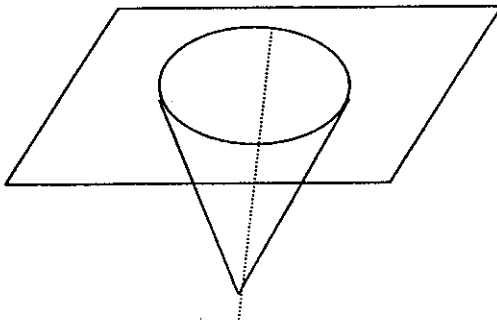
ที่มา : สมหมาย ช่างเขียน. (2539 : 5)



ภาพประกอบ 4 แสดงด้านข้างของรอยที่เกิดขึ้นและมุมวิกฤต  $\alpha_0$

ที่มา : สมหมาย ช่างเขียน. (2539 : 5)

นอกจากนี้การกักขायรอยจะต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้รอยที่ได้หลังจากการกักขायรอยเกิดเป็นรอยที่เด่นชัดและทะลุไปยังอีกด้านหนึ่งเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ที่จะเป็นตัวกรองได้ โดยตอนเริ่มแรกของรอยจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สูญเสียไปของอนุภาคซึ่งพลังงานนี้จะแผ่กระจายออกไปในแนวตั้งฉากกับแนวทางที่อนุภาคผ่านทุกทิศทางหลังจากกักขायรอยแล้วจะเป็นรูปกรวย(สมหมาย,2539) ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงรูปร่างของรอยที่เกิดจากอนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านแบบตรง ๆ บนแผ่นฟอลิเมอร์

ในกรณีที่อนุภาคผ่านเข้าไปเป็นแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของพอลิเมอร์ เมื่อผ่านกระบวนการกักขยารอยจะได้รูปร่างของรอยบนผิวหน้าบนแผ่นพอลิเมอร์เป็นวงกลมและรอยที่ถูกขยารอยนั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ ตามภาพประกอบ 6 ดังนี้ ถ้ากำหนดให้

$V_T$  = อัตราเร็วของการกักขยารอยตามแนวทาง

$V_G$  = อัตราเร็วของการกักตามผิว

$l$  = ระยะความลึกของผิวหน้าที่ถูกกักแล้วถึงที่ถูกกักตกลงไป

$L$  = ระยะความลึกของผิวหน้าเดิม

$R$  = ระยะความลึกของผิวหน้าถึงตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงไปถึง

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอย

$t$  = เวลาของการกักขยารอย

ถ้า  $V_T$  เป็นค่าคงที่ตลอดตามแนวทาง

$V_G$  เป็นค่าคงที่ทุกทิศทาง ( Constant and isotropic ) จะได้

$$V_G / V_T = \text{ค่าคงที่}$$

$$l = (V_T - V_G)t \quad (15)$$

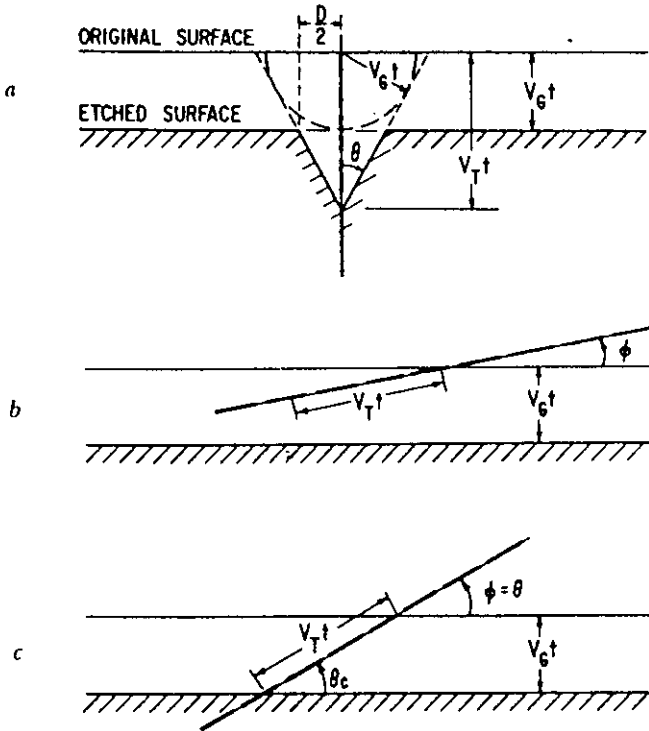
$$d = 2 V_G t [(V_T - V_G) / (V_T + V_G)]^{1/2} \quad (16)$$

จากสมการ 15 และ 16 พบว่า ถ้า  $V_G = V_T$  แล้วทั้ง  $l$  และ  $d$  จะมีค่าเป็นศูนย์นั้นคือจะไม่เกิดรอย





ส่วนของผิวที่ถูกกัดออกภายใต้เงื่อนไขเฉพาะหนึ่ง ๆ ซึ่งจะมีรูปของรอยที่แตกต่างกันคือ อนุภาคที่ผ่านผิวจะเกิดรอยอย่างตื้นเนื่องเมื่อ  $V_T > V_G$  แสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงแนวของอนุภาคพุ่งผ่าน

- a) แสดงถึงมุม  $\theta$  ขึ้นกับทั้ง  $V_T$  และ  $V_G$
- b) แสดงถึงเมื่อ  $V_T \sin \theta$  น้อยกว่า  $V_G$  จะไม่เห็นรอยแฝง
- c) เงื่อนไขวิกฤติเมื่อ  $\phi = \theta$

ที่มา : Fleischer, R.L.และคณะ. (1975 : 55)

สัดส่วนของรอยแฝงในมุมตันซึ่งถูกกัดออกคือ

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^\theta 2\pi \cos \theta' d\theta' = \sin \theta \tag{17}$$

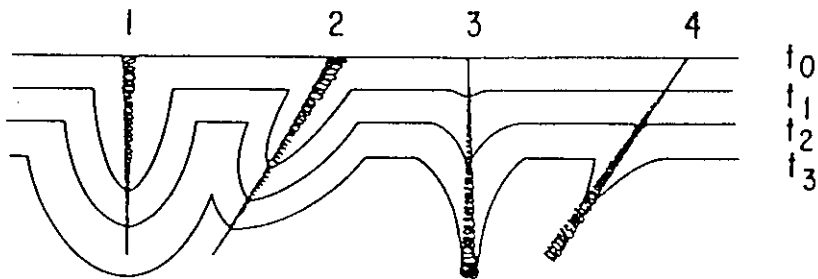
ในกรณีนี้ถ้า  $\eta = 1 - \sin \theta$  ซึ่งเท่ากับจำนวนรอยที่เกิดขึ้นในมุมตัน ในกรณีนี้เมื่อรอยจากอนุภาคเริ่มต้นทั้งหมดอยู่ในปริมาตรของฟิล์ม รอยแฝงที่เกิดขึ้นโดยการกัดขยายรอยเริ่มต้น

ในช่วง 0 ถึง  $H$  เมื่อ  $H$  คือความลึกสูงสุดที่อนุภาคสามารถทำได้ซึ่งคิดจากผิวถึงก้นรอยและความลึก  $\delta$  สามารถเข้าไปถึงมุมระหว่าง  $\arcsin(\delta/H)$  และ  $90^\circ$  เพราะว่าผิวที่ถูกกัดขยารอยต้องมีมุมมากกว่า  $\theta$  ซึ่งรอยที่เกิดขึ้นที่ความลึกต่าง ๆ จากการกัดขยารอยจะเริ่มที่ผิวโดยให้  $\delta > H \sin\theta$  สำหรับ  $\delta < H \sin\theta$  หรือส่วนของรอยที่เฉียงน้อยกว่า  $\theta$  ( $\theta_c$ ) จะไม่ปรากฏรอยหลังจากการกัดขยารอย

ความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพการกัดขยารอยหลังจากที่รอยอนุภาคพุ่งผ่านทำมุมเฉียง  $\theta$  อยู่ในแผ่นฟิล์มจะไม่แสดงออกมาให้เห็นถ้าไม่มีการกัดขยารอยจะเห็นเด่นชัดหรือไม่ขึ้นอยู่กับแนวทางที่อนุภาคพุ่งผ่านถ้าเป็นการกัดขยารอยของอนุภาคที่ตกกระทบแบบตั้งฉาก (normal incidence) จะชัดเจนส่วนแนวทางของอนุภาคที่เกิดขึ้นตกกระทบที่ไม่ตั้งฉากอาจจะไม่พบรอยนั้นแต่เป็นไปได้ว่ารอยนั้นอาจเกิดขึ้นได้ดังภาพประกอบ 8

#### 2.4.2 ผลของการกัดขยารอยโดยใช้เวลานาน (Prolonged Etching Effect)

เมื่อเวลาที่กัดขยารอยนานขึ้น มักจะไม่มีผลต่อรอยมากนักสมมุติให้  $\theta$  คงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ รอยบางรอยจะถูกกัดให้เห็นแต่บางรอยก็ยังไม่ถูกกัดขยารอยสัมพันธ์การกัดขยารอยจะเพิ่มขึ้นทั้งการคำนวณเชิงตัวเลขและจากการวัดโดยตรง ซึ่งเกิดขึ้นเพราะ  $V_T / V_G$  สูง ๆ การกัดขยารอยตามความยาวจะมากขึ้น รอยที่มีมุมของ  $\theta$  น้อยก็จะถูกลบเลือนไป ส่วนผิวหน้าที่ถูกกัดขยารอยนาน ก็จะเกิดเป็นหลุมที่ปุ่มลงไปก็จะมองว่าเป็นรอยที่เกิดขึ้น ถ้าเริ่มคิดจากการเริ่มต้นของการกัดขยารอย  $\theta$  ที่เกิดขึ้นไม่ลึกแนวอนุภาคที่ถูกกัดขยารอยจะเห็นได้ชัดแต่เมื่อกัดขยารอยต่อไปรอยพวกนี้จะมองไม่ชัด แต่ถ้า  $\theta$  เกิดที่ลึก ๆ ตอนแรกที่กัดขยารอยจะไม่เห็นแต่เมื่อกัดขยารอยนานรอยจะเห็นชัดขึ้น ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การเกิดรอยบนแผ่นฟอติเมอร์ซึ่งเกิดจากอนุภาคและผลของ Prolonged etching effect

ที่มา : Fleischer, R.L. และคณะ. (1975 : 63)

จากภาพประกอบ 9 รอยหมายเลข 3 และหมายเลข 4 ที่  $t_1$  เป็นผลของ Prolonged etching effect หมายเลข 1 และ หมายเลข 2 เกิดจากการกัดขยายรอยจากเริ่มแรก ทำให้เกิดรอยสำหรับ 3 เหตุผลหลัก คือ

- 1) ร่องรอยเล็ก ๆ ที่ไม่ได้เกิดจากการเริ่มต้นจะถูกขยาย
- 2) รอยใหม่จากเริ่มต้นและสุดท้ายภายใต้ผิวเริ่มต้นถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น
- 3) ผลจากข้างต้น การกัดตามรอยมีรอยที่บุ๋มลงไปและการทำลายเพิ่มขึ้นทำให้ส่วนของรอยเกิดตามความยาวมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 10 ซึ่งจะช่วยให้รอยไม่ชัดเจน เมื่อกำหนดเงื่อนไขการกัดขยายรอยและเวลา  $V_0T$  จะถูกคัดออกจากผิวฟิล์มมาตรฐาน หลุมก็จะเพิ่มขึ้น

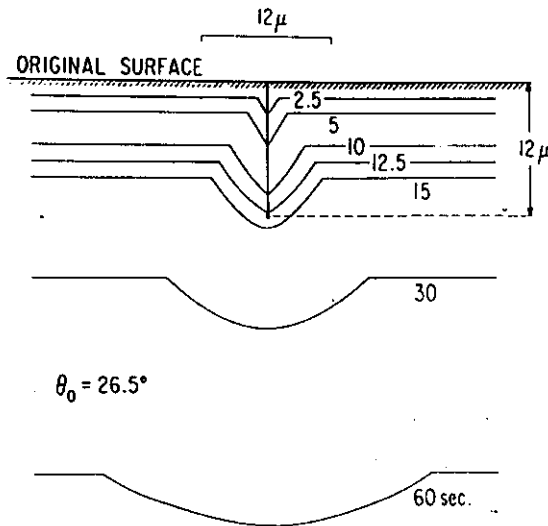
ซึ่งจะมีผลต่อการนับจำนวนของรอยเพราะอัตราที่ปรากฏสำหรับรอยใหม่จะสมดุลโดยเมื่อมีความยาวเต็มทีรอบ ๆ รอยเก่าซึ่งมีความหนาแน่นโดยไม่ทับกัน แต่วิธีที่ดีที่สุดคือนับรอยเป็นฟังก์ชันของเวลาและแปลงกลับไปเป็นความหนาแน่นของรอยเมื่อเวลาเท่ากับศูนย์

#### 2.4.3 เทคนิคการกัดขยายรอย

การกัดขยายรอยเพื่อให้เกิดรอยบนตัวอย่างและการใช้เงื่อนไขของสารละลาย อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิดดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2 ซึ่งเป็นการทำการทดลองที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยมีหลักการที่ทำให้เกิดผลดังนี้

1. ใช้ตัวอย่างที่รู้ว่ามียอยเกิดแน่ที่ผิวเมื่อกัดขยายรอย โดยใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอน  $^{252}\text{Cf}$  ซึ่งมีฟลักซ์ต่ำประมาณ  $10^7$  ฟิชชันต่อวินาทีจากพื้นที่ 0.2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเป็นที่แน่นอนว่าจะเกิดรอยขึ้นและคงอยู่ในแผ่นตัวอย่าง

2. การกัดขยายรอยทางเคมีมักจะเกิดที่มุมหรือขอบของวัสดุ จะเห็นรอยไม่ชัดเจนแต่ต้องกัดขยายรอยให้ทั่วบริเวณและต่อเนื่อง โดยจะต้องใช้สารละลายที่เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 อัตราการกัดขยารอยตามชนิดของพอลิเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายในการกัดขยารอย

ที่มา : Fleischer, R.L. และคณะ. (1975 : 55)

3. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเคมี เพื่อควบคุมอัตราการ กัดขยารอยที่เกิดขึ้นแต่จะไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 10

Blanford, และคณะ (1970) สังเกตพบว่าถ้าเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 1 N เป็น 12 N อัตราการกัดขยารอย  $V_G$  จะเพิ่มขึ้น 100 เท่า, 1.6 เท่า และ 5.1 เท่า สำหรับ Polycarbonate (Lexan) , cellulose nitrate(Nixon Baldwin) และ cellulose acetate butyrate (Bayer)ตามลำดับความเข้มข้นของสารละลายเกิน 6N เซลลูโลสในเตรทจะไม่ไวต่อความเข้มข้นเมื่อ  $V_G$  สำหรับโพลีคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

Somogyi, และคณะ (1970)ค้นพบว่ามุมกรวยที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นของเซลลูโลสอะซิเตตและโพลีคาร์บอเนตโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% ถ้าผสมแอลกอฮอล์ในการกัดขยารอยจะเพิ่มอัตราการกัดขยารอย เช่น ถ้าเพิ่มแอลกอฮอล์ในสารละลาย  $\text{KOH} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งกัดขยารอยที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ค่า  $V_G$  ของโพลีคาร์บอเนตจะเพิ่ม 100 เท่า การเพิ่มเอทานอลจะเพิ่มความไวและอัตราการกัดขยารอยได้มากขึ้นในทำนองเดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเพิ่มอัตราการกัดขยารอยได้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 6.25 N เพิ่มอุณหภูมิอีก  $30^\circ\text{C}$  จะเพิ่มอัตราการกัดขยารอยบน polycarbonate (Lexan)10 เท่า

การกัดขยารอยที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะทำให้มีมุมกรวยที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุ สำหรับวัสดุที่มีมุมกรวยเล็ก ๆ จะมีความยาวของรอยตามสมการ (15) และสำหรับมุมกรวยขนาดใหญ่ความยาวของกรวยก็จะเป็นไปตามสมการที่ (16)

รูปแบบของการกัดขยารอยโดยจะให้รอยชัดเจนและดูง่ายจากแผ่นฟิล์มที่มีความไวต่ออนุภาค เช่น พวกลิโธกราฟบอเนต หรือเซลลูโลสไนเตรท ก็จะมีการกัดขยารอยที่หลากหลาย

Peterson, (1970) ได้ศึกษาการกัดขยารอย เลกเซน โพลีคาร์บอเนต (Lexan polycarbonate) เชื่อว่าการกัดขยารอยที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  ก่อนอิมิต์จะได้ผลผลิตที่เหมือนกับอัตราการระดมยิงอย่างสม่ำเสมอ

Paretzke, และคณะ. (1973) แสดงให้เห็นว่าวิธีการเหล่านี้ใช้ได้ดีกับเลกเซน โพลีคาร์บอเนต แต่ไม่ใช้สำหรับมาโครฟอยล์โพลีคาร์บอเนต (Makrofoil Polycarbonate)

Price, และคณะ. (1968) การกัดขยารอยในโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ผลที่ได้จะเห็นชัดเจนแต่บางรอยจะถูกสมานให้หายไปซึ่งจะมีผลกระทบต่อจำนวนรอยและการจำแนกอนุภาค

Price, และคณะ. (1970) การใช้ส่วนผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเอทานอลเป็นวิธีที่สะดวกในการกัดขยารอยที่อุณหภูมิห้อง