

การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินโดยการทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วนด้วยการฉายรังสีแกมมา



นายคัมสิน ตั้งรุ่งโรจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

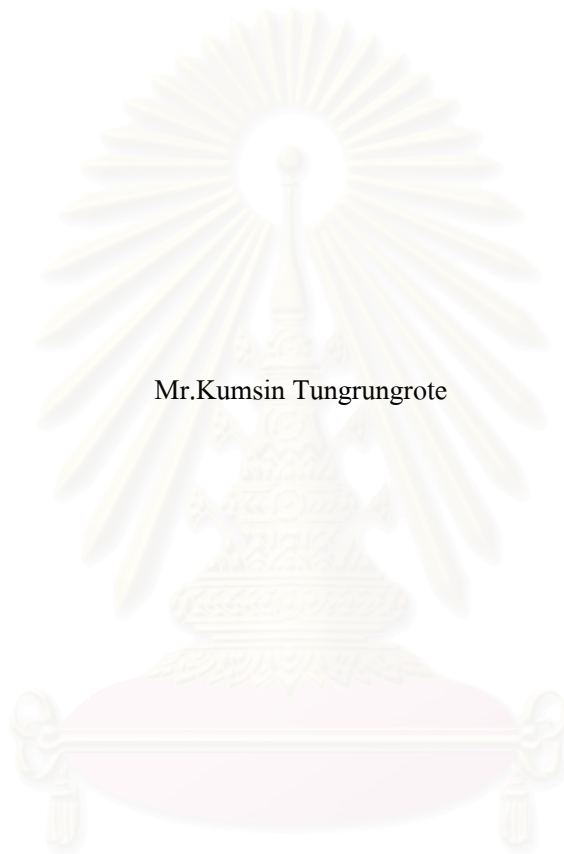
สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MECHANICAL PROPERTIES IMPROVEMENT OF EPDM BY GAMMA IRRADIATION  
INDUCED PARTIAL CROSSLINKING



Mr.Kumsin Tungrungrote

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University



คู่มือค้นคว้า : การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของอีพดีเอ็มโดยการทำให้เกิดครอสลิงค์  
 บางส่วนด้วยการฉายรังสีแกมมา. (MECHANICAL PROPERTIES IMPROVEMENT OF  
 EPDM BY GAMMA IRRADIATION INDUCED PARTIAL CROSSLINKING)  
 อ.ที่ปรึกษา: รศ.ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, 67 หน้า.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดครอสลิงค์บางส่วนของวัสดุอีพดีเอ็มที่มีปริมาณของไดอินแตกต่างกัน 2 ระดับ โดยชนิดหนึ่งคุณสมบัติจะคล้ายกับยาง อีกชนิดหนึ่งจะมีคุณสมบัติคล้ายพลาสติก โดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 การฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างๆ ซึ่งเพียงพอต่อการเกิดครอสลิงค์บางส่วนเท่านั้น คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ โดยจะทำการศึกษาถึงธรรมชาติของอีพดีเอ็ม คุณสมบัติเชิงกล ก่อนและหลังการฉายรังสี เพื่อที่จะได้ข้อแตกต่าง และคุณสมบัติของอีพดีเอ็มแต่ละเกรด ที่ปริมาณรังสีที่ต่าง ๆ กัน ผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนความเป็นเจลที่ปริมาณรังสีที่ศึกษา มีแนวโน้มการเกิดเจลเพิ่มขึ้น ในลักษณะที่แปรผัน โดยตรงกับปริมาณรังสี โดย อีพดีเอ็ม ชนิดที่มีปริมาณไดอินสูงจะมีปริมาณเจลที่สูงกว่าชนิดที่มีไดอินต่ำกว่า ผลการวิจัยการไหลของวัสดุอีพดีเอ็มพบว่าดัชนีการไหลของอีพดีเอ็ม มีแนวโน้มที่ลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดครอสลิงค์ขึ้นทำให้ความเป็นอิสระของโมเลกุลลดลง ทำให้การเคลื่อนตัวโมเลกุลยากขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับ และการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอีพดีเอ็ม พบว่าอีพดีเอ็มทั้งสองชนิด ซึ่งเกิดการครอสลิงค์บางส่วนขึ้นทำให้ค่าด้านทานแรงดึงที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะที่คุณสมบัติคล้ายพลาสติกจะเห็นได้อย่างชัดเจน และค่าความยืดของวัสดุอีพดีเอ็มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดครอสลิงค์เฉพาะส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้นจึงดึงยึดได้ระยะที่มากขึ้น ตามปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับ

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี  
 สาขาวิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี  
 ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4670243321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: EPDM / PARTIAL CROSSLINKING / GAMMA IRRADIATION / MECHANICAL IMPROVEMENT

KUMSIN TUNGRUNGROTE: MECHANICAL PROPERTIES IMPROVEMENT OF EPDM BY GAMMA IRRADIATION INDUCED PARTIAL CROSSLINKING. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHYAGRIT SIRI-UPATHUM, 67 pp.

A study of partial crosslinking of EPDM with two different diene contents was conducted. One of EPDM grade was rubber like another one was plastic like. EPDMs were irradiated by gamma ray in vacuum at different doses just enough to induce partial crosslinking in the polymer chain. Gamma irradiation doses were 1, 2, 3, 4 and 5 kGy. It was found that gel forming at the doses studied gave gradually higher gel content with respect to gamma irradiation doses. EPDM with high diene content gave higher gel content than that of lower diene content. Melt flow index tend was found to be lower with higher radiation doses. Tensile property of EPDMs was improved with radiation doses. It was found however that increasing of radiation doses resulted in increasing of elongation especially plastic grade of EPDM. It was speculated that partial crosslinking of the EPDM was formed only of amorphous region and thus enhanced elongation property.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2006

Student's signature.....

Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปลัมภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ แนะนำเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้แก่ คุณอารักษ์ วิทิตชิรานนท์ พี่หนึ่ง และหน้อย ที่อำนวยความสะดวกในการฉายรังสีและดูแลอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่านจาก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการขึ้นรูปและทดสอบวัสดุ

ขอขอบคุณ คุณสุภาวดี โชตินอก สำหรับการดูแลที่มีให้กันเสมอ พร้อมทั้งกำลังใจมากมายที่คอยเติมเต็มให้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ รวมทั้งบุคลากรทุกคนของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ พร้อมกำลังใจเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณลุง คุณป้า ที่คอยให้กำลังใจในงานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้เกี่ยวกับเคมีโพลีเมอร์.....	4
2.1.1 ความหมายของโพลีเมอร์.....	4
2.1.2 การจำแนกประเภทของโพลีเมอร์.....	4
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ EPDM.....	12
2.2.1 โพลีเอทีลีน.....	12
2.2.2 โพลีโพรพิลีน.....	13
2.2.3 เอทีลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์โพลีเมอร์.....	14
2.3 ความเป็นผลึก.....	15
2.4 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Gamma source) .....	17

บทที่	หน้า
2.5 ปฏิกริยาเคมีเมื่อรังสีผ่านสาร.....	19
2.6 ผลของรังสีที่มีต่อ โพลีเมอร์.....	23
3 วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 การเตรียมการขึ้นรูป EPDM และกระบวนการฉายรังสี.....	32
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	32
3.1.2 การดำเนินงานวิจัย.....	34
3.2 การทดสอบการไหลของ EPDM.....	35
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์.....	35
3.2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM.....	37
3.3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	37
3.3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.4 การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM.....	39
3.4.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	39
3.4.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
4 ผลการวิจัย.....	42
4.1 ผลการศึกษาการไหลของEPDM.....	42
4.2 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM .....	46
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM .....	49
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM.....	53
5.2 สรุปผลการศึกษาการไหลของEPDM.....	55
5.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM .....	56
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	57



	หน้า
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก ข้อมูลวัตถุดิบ.....	61
ภาคผนวก ข Compression Molding.....	63
ภาคผนวก ค Universal Testing Machine.....	64
ภาคผนวก ง Melt Flow Indexer.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลของรังสีต่อโพลีเมอร์.....	23
2.2 ค่าG(X) และค่าG(S) ของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆเมื่อนำรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้ สุญญากาศหรือบรรยากาศในโตรเจน.....	30
3.1 คุณสมบัติของวัสดุ EPDM NORDEL IP 4760P และ NORDEL IP 5565.....	32
4.1 ตารางแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ที่ 21.6 Kg/190°C ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	42
4.2 ตารางแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล(Melt Flow Index) ที่ 21.6 Kg/190°C ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	44
4.3 การศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	46
4.4 การศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	47
4.5 คุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	49
4.6 คุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 .....	51

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างของ EPM และ EPDM.....	14
2.2 แผนผังการสลายตัวของโคบอลต์-60.....	18
2.3 การเชื่อมโยงโมเลกุลของโพลีเอทีลีน.....	26
3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 รุ่น Gammacell 220 Excel.....	33
3.2 เครื่องพ่นสุญญากาศ House-hold vacuum sealer.....	33
3.3 เครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Compression molding).....	34
3.4 MELT FLOW INDEXER Model 10 Davenport (Lloyd Instrument).....	35
3.5 Universal Testing Machines (Instron Model 55R4502).....	37
3.6 Die cutting machine.....	38
3.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบสัดส่วนความเป็นเจล.....	40
4.1 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ที่ 21.6 Kg/190°C ของ EPDM ชนิด NORDEL IP4760P.....	43
4.2 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล(Melt Flow Index) ที่ 21.6 Kg/190°C ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	45
4.3 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	47
4.4 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	48
4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	50
4.6 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาด ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P.....	50
4.7 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	51
4.6 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาด ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565.....	52
5.1 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ IP 5565.....	53

รูปที่

หน้า

5.2 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด  
NORDEL IP 4760P และ IP 5565..... 55



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านนิวเคลียร์มีความสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับความรู้และเทคโนโลยีด้านต่างๆ ไม่ว่าจะใช้ในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อเปลี่ยนแปลงสารเป็นรูปแบบอื่นๆ การฉายรังสีเพื่อควบคุมการแพร่พันธุ์ของศัตรูพืช การยับยั้งการงอกของพืชเพื่อยืดระยะเวลาเป็นประโยชน์ในการขนส่ง ปัจจุบันในหลายประเทศได้มีการนำเทคนิคทางนิวเคลียร์มาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านวัสดุโพลีเมอร์ (Polymeric material) ในบางประเทศที่มีอุตสาหกรรมโพลีเมอร์ปริมาณสูงมีส่วนการใช้งานรังสีสูงถึงกว่า 60% โดยพิจารณาพบว่ามีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยที่ต่ำ และยังมีข้อได้เปรียบอีกหลายๆด้าน เช่น ในการเกิดครอสลิงค์บางส่วน ที่เทคนิคทางเคมีมีข้อจำกัดอย่างมาก เพราะกระบวนการทางรังสีสามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย ไม่เกิดความร้อนสะสมไม่ต้องมีสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารเร่งปฏิกิริยา หากมีการศึกษาในเรื่องนี้อย่างถ่องแท้และจริงจัง ประเทศไทยสามารถที่จะพัฒนาอุตสาหกรรม โดยประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตด้วยรังสี ให้ได้ประโยชน์สูงสุด

ในการพัฒนาคุณสมบัติของยางธรรมชาติโดยการใช้กระบวนการรังสี เช่น การทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน หรือการเลือกหาสารเติมแต่งที่เหมาะสมมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งยางธรรมชาติที่ใช้ต่างก็มีองค์ประกอบที่ไม่แตกต่างกันมาก ในเชิงคุณสมบัติ จึงได้เกิดแนวคิดในการเลือกวัสดุสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติพื้นฐานที่มีช่วงกว้าง มีความหลากหลายในการใช้งานมาปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งโพลีเมอร์สังเคราะห์หากต้องทำการคิดค้นตัวใหม่ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายการลงทุนที่สูงมาก จึงมีแนวคิดที่จะนำโพลีเมอร์ที่มีอยู่ในท้องตลาดมาปรับปรุงด้วยรังสีแกมมา ซึ่งได้พิจารณาแล้วว่า EPDM เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการวิจัยครั้งนี้

อีพดีเอ็ม (EPDM) เป็นวัสดุโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีราคาไม่สูงมาก สามารถใช้งานได้หลากหลาย คุณสมบัติสามารถปรับได้ค่อนข้างอยู่ในช่วงกว้างขึ้นกับองค์ประกอบภายในของโครงสร้างในโมเลกุล โดยที่คุณสมบัติพื้นฐานของ EPDM จะขึ้นกับองค์ประกอบของหมู่ไดอีน (Diene Content) ซึ่งปริมาณของหมู่ไดอีนจะมีผลต่อการเกิดครอสลิงค์ด้วย ในการฉายรังสีสามารถที่จะศึกษาถึงผลได้โดยดูจากคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปที่ปริมาณรังสีต่างๆ ที่เพียงพอให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน โดยจะใช้รังสีแกมมาจากธาตุโคบอลต์-60 ในกระบวนการที่ทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM โดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ใช้ EPDM ที่มีสัดส่วนของไดอินที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ระดับ

1.3.2 ทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วนใน EPDM โดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อให้เกิดสัดส่วนเจลในปริมาณต่างๆ

1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM ภายหลังจากฉายรังสีที่ปริมาณเจลต่างๆ เปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนฉายรังสี

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 หาเงื่อนไขการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ

1.4.3 ทำการขึ้นรูป EPDM ที่ฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ แล้วด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding)

1.4.4 หาปริมาณเจล ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลหลังขึ้นรูปเป็นแผ่น

1.4.5 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์

1.4.6 สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 V. DAKIN<sup>[1]</sup> ทำวิจัยเรื่อง ELASTIC PROPERTIES OF RADIATION-CROSSLINKED BLOCK-COPOLYMER ผลการวิจัยพบว่า อุนหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการฉายรังสีเพื่อคุณสมบัติโมดูลัสที่ดีขึ้นของ SB และ SBR คือ 120 และ 20 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยการฉายรังสีที่ 20 องศาเซลเซียส คุณสมบัติความยืดหยุ่นจะมีคุณสมบัติตอบสนองแบบหน่วง ตามแบบจำลอง อนุกรม-ขนาน

1.5.2 N.G. Salleh, H.J. Glasel. และ R. Mehnert<sup>[2]</sup> ทำวิจัยเรื่อง Develop of hard material by radiation curing technology ผลการวิจัยพบว่า การเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันอนุภาคของ silico-organic สามารถเตรียมได้จากกระบวนการการควบแน่นแบบวิวิธพันธ์ และเกิดการครอสลิงค์ โดยการใช้อิเล็กตรอนบีม พบว่าถึงแม้ผลของอิเล็กตรอนบีมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นในระดับหนึ่ง แต่สามารถที่จะเพิ่มปฏิกิริยาได้โดยการใช้เทคนิค ยูวี ในการบ่ม(curing) และยังพบว่ามีความสามารถในการต้านทานการขูดขีดได้อย่างดีเยี่ยม

1.5.3 J. Bika, W. G"uszcwskib, W.M. Rzymyskia.และ Z.P. Zag Orskib<sup>[3]</sup> ทำการวิจัยเรื่อง EB radiation crosslinking of elatomer งานวิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำให้เกิดครอสลิงค์ของอีลาสโตเมอร์ชนิด EPDM โดยใช้อิเล็กตรอนบีมแทนการใช้กระบวนการทางเคมีเดิม โดยการใช้อิเล็กตรอนบีม 10 Mev ศึกษาช่วงสูงสุดถึง 300 kGy สามารถตรวจสอบได้ว่าเกิดการครอสลิงค์ โดยใช้การศึกษาด้วยการวิเคราะห์โซล-เจล พบว่า ในการเกิดปฏิกิริยา 100 จุดเกิดการตัดทอนโซ่เพียง 6-9 จุด แต่พบว่ายังมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดครอสลิงค์ที่ค่อนข้างต่ำ

1.5.4 Robert S. Maxwell, Rebecca Cohenour, William Sung, David Solyom, Mogon และ Patel<sup>[4]</sup> ทำวิจัยเรื่อง The effect of  $\gamma$ -radiation on the thermal, mechanical, and segmental dynamics of a silica filled, room temperature vulcanized polysiloxane rubber พบว่า การทำการสลายโมเลกุลของโพลีเมอร์ โดยการใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ในอากาศ พบว่าผลจากการฉายรังสีทำให้เกิดครอสลิงค์เพิ่มขึ้นมาก โดยสามารถศึกษาจากการเกิดการบวมตัวของวัสดุ พบว่าการเคลื่อนที่ของโซ่โมเลกุลที่ถูกตัดทอนจะมีความอิสระมากขึ้นในการเคลื่อนที่ ทั้งยังพบอีกว่าผลจากการฉายรังสีทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีในโครงสร้างของโมเลกุลของโพลีเมอร์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลคุณสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะด้านเชิงกล ความยืดหยุ่นของ EPDM เพื่อนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง เช่น ปุ่มยางของแป้นพิมพ์ ยางกันสะเทือน เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับเคมีโพลิเมอร์

##### 2.1.1 ความหมายของโพลิเมอร์<sup>[5]</sup>

โพลิเมอร์คือ สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยซ้ำ ๆ กัน (Repeating unit) ที่เรียกว่าโมโนเมอร์ (monomer) ซึ่งในภาษากรีกโพลิแปลว่า มากหลาย และเมอร์แปลว่าหน่วยหรือส่วน เพราะฉะนั้นโพลิเมอร์จึงเป็นสารที่มีโมเลกุลยาวมาก บางกรณีเป็นสายตรง (linear) บางกรณีเป็นกิ่งก้านสาขา (branch) หน่วยที่ซ้ำ ๆ กันของโพลิเมอร์ปกติจะเหมือนหรือเกือบเหมือนกับโมโนเมอร์

##### 2.1.2 การจำแนกประเภทของโพลิเมอร์

ประเภทของโพลิเมอร์อาจแบ่งได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับว่าจะพิจารณาสິงใดเป็นหลัก เช่น ดูจากความแตกต่างของโครงสร้าง หรือว่าจะพิจารณาการใช้งานโพลิเมอร์ก็ได้ ซึ่งมีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

2.1.2.1 จัดแบ่งประเภทตามส่วนประกอบของอะตอมในสายโซ่โพลิเมอร์จะแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ

2.1.2.1.1 โพลิเมอร์อนินทรีย์ (inorganic polymers) หมายถึงกลุ่มโพลิเมอร์ที่เกิดจากสารอนินทรีย์ ทั้งที่เกิดในธรรมชาติ เช่น ทราช ดิน แล้วไปผ่านกระบวนการต่อไปจะได้ แก้ว อิฐ ซีเมนต์ เป็นต้น และพวกที่สังเคราะห์ได้ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยซิลิคอน คาร์ไบด์ เป็นต้น

2.1.2.1.2 โพลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymers) หมายถึง กลุ่มโพลิเมอร์ที่เกิดจากสารอินทรีย์ มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติ เช่น โพลีซัคคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน กาวธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติ ยางธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนโพลิเมอร์อินทรีย์ที่สังเคราะห์มีมากมาย เช่น ยางสังเคราะห์ พลาสติก เป็นต้น



2.1.2.2 จัดแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งาน (application) จะได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

- อีลาสโตเมอร์ (elastomers)หรือยาง (rubbers)
- พลาสติก (plastics)
- เส้นใย (fibers)
- วัสดุเคลือบผิวรวมทั้งสีและกาว (paint and adhesives)

2.1.2.3 จัดแบ่งประเภทตามสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ได้ 2 กลุ่มคือ

2.1.2.3.1 กลุ่ม โพลีเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Polymers)

โพลีเมอร์พวกละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิดเมื่อถูกความร้อนแล้วจะสามารถหลอมตัวได้และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัวสามารถทำให้หลอมตัวได้หลาย ๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สูตรโครงสร้างเปลี่ยนไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่มย่อย ๆ ได้อีกคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกสังฐานหรือไม่เป็นผลึก (amorphous thermoplastics) กลุ่มนี้มีคุณสมบัติแข็งและเปราะ เช่น โพลีสไตรีน (polystyrene) โพลีเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate) โคลิโพลีเมอร์อะโครโลไนโตรล บิวตะไดอิน สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer) เป็นต้น อีกกลุ่มหนึ่งคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (partial crystalline thermoplastics) กลุ่มนี้จะมีโครงสร้างของโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบทำให้เรียงตัวได้ดี จะมีความเป็นผลึกปนอยู่ ประกอบกับการอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ถ้าต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้โพลีเมอร์ตัวนั้นมีลักษณะยืดหยุ่นและเหนียวพอสมควร ตัวอย่าง เช่น โพลีเอทีลีน (Polyethylene) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) โพลีเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น

2.1.2.3.2 กลุ่ม โพลีเมอร์พวกเทอร์โมเซต (Thermosetting polymers)

โพลีเมอร์กลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีในการผลิตโดยใช้ความร้อน หรือความดันผลิตผลที่ได้นำไปหลอมละลายอีกไม่ได้ไม่ละลายในตัวทำละลาย คือเกิดกระบวนการไม่ย้อนกลับ โดยเมื่อได้ผลิตผลแล้ว ถ้าจะเปลี่ยนรูปร่างใหม่ไม่สามารถกระทำได้สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของโพลีเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยใช้ความร้อนหรือความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นระบบสามมิติ (Three-dimensional system) มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอม

หลอม ไม่ละลายถ้าให้ความมาก ๆ จะไหม้เกรียมและสมบัติเปลี่ยนจากเดิมตัวอย่างง่าย ๆ ที่เห็นชัดเจนคือ อย่างธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการ วัลคาไนเซชัน ซึ่งจะเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลด้วยกำมะถัน ทำให้แข็งแรงทนทานมากขึ้น ตัวอย่างอื่น ๆ ก็มีพวกอีพอกซี (Epoxy) โพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester) เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน โพลียูรีเทน ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น

#### 2.1.2.4 แบ่งตามลักษณะการจัดตัวของโมโนเมอร์ ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.2.4.1 โฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymers) โพลิเมอร์นี้ในสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียว เช่น ถ้าโมโนเมอร์เป็น A สายโซ่โมเลกุลจะเป็น -A-A-A-A-A- ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีน ในสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วยเอทิลีนชนิดเดียว หรือโพลีสไตรีน ก็ประกอบด้วยโมโนเมอร์สไตรีนชนิดเดียว

2.1.2.4.2 โคโพลิเมอร์ (Copolymer) โซ่โมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาเชื่อมต่อกัน เช่น โคโพลิเมอร์ สไตรีน-บิวตะไดอิน โคโพลิเมอร์ อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน เป็นต้น โคโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 3 ชนิด ก็มีเช่น ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) กรณีโคโพลิเมอร์ที่มาจากโมโนเมอร์ 2 ชนิด ยังอาจแบ่งได้หลายแบบตามลักษณะการเรียงตัวของโมโนเมอร์<sup>[5]</sup> คือ

2.1.2.4.2.1 โคโพลิเมอร์แบบสลับ (Alternating copolymers) ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีโมโนเมอร์ A และโมโนเมอร์ B ในสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วย A และ B สลับกันไปอย่างเป็นระเบียบ

~~~~~ABABABABABABABAB~~~~~

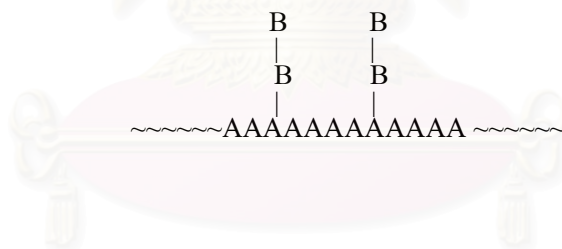
2.1.2.4.2.2 โคโพลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymers) ในสายโซ่โพลิเมอร์จะพบโมโนเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เช่น A และ B อยู่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระบบ เช่น ABAABABBAAB จะเห็นได้ว่าอาจพบ A 1 หน่วยหรือ 2 หน่วยก็ได้ไม่แน่นอน B ก็เช่นกันอาจพบ 1 หน่วยหรือ 2 หน่วยหรือมากกว่าก็ได้



2.1.2.4.2.3 โคโพลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymers) โคโพลิเมอร์พวกนี้จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ 2 ชนิด แต่ละชนิดอยู่กันเป็นกลุ่ม ๆ ในสายโซ่โพลิเมอร์



2.1.2.4.2.4 โคโพลิเมอร์แบบกราฟต์ (Graft copolymer) มีลักษณะเป็นสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีกิ่งแยกจากสายโซ่หลักแต่หน่วยของโมโนเมอร์ในสายโซ่หลักจะมีชนิดเดียว เช่น A ก็เป็น A ตลอด และมีหน่วยของโมโนเมอร์อีกชนิดหนึ่ง เช่น B แยกเป็นกิ่งออกไป



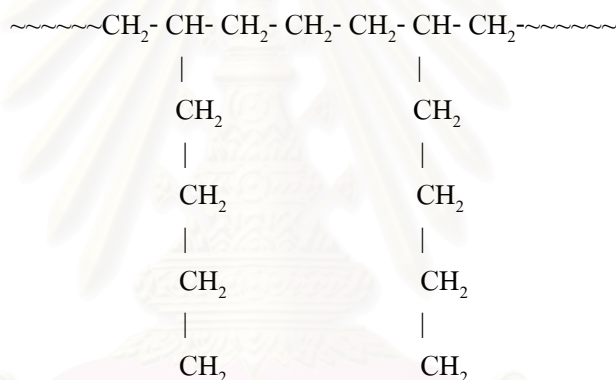
ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่ง ในการกำหนดสมบัติทางกายภาพของโพลิเมอร์นั้นคือ โครงสร้างโพลิเมอร์หรือการจัดเรียงตัวของหน่วยซ้ำ ๆ กันในโพลิเมอร์นั้นเนื่องจากบล็อกและกราฟต์โคโพลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวของหน่วยซ้ำ ๆ กัน แตกต่างกันไปจากโพลิเมอร์แบบสุ่มทำให้โคโพลิเมอร์สองประเภทนี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกับโพลิเมอร์แบบสุ่มและโฮโมโพลิเมอร์ของมัน<sup>[6]</sup>

2.1.2.5 แบ่งตามชนิดโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

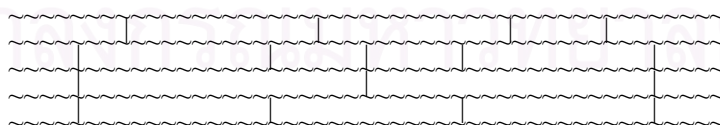
2.1.2.5.1 โพลีเมอร์แบบสายโซ่ตรง (Linear polymers) โพลีเมอร์ชนิดนี้จะมีสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นสายยาว ๆ ไม่มีกิ่งหรือสาขาแยกออกไป เช่น โพลีเอทิลีนแบบสายโซ่ตรง (Linear polyethylene)



2.1.2.5.2 โพลีเมอร์แบบมีกิ่งหรือสาขา (Branched polymers) กลุ่มนี้สายโซ่โมเลกุลจะมีกิ่งก้านสาขาแยกออกไปจากสายโซ่หลัก ตัวอย่างโพลีเมอร์แบบกิ่งมีลักษณะดังนี้



2.1.2.5.3 โพลีเมอร์แบบร่างแห (Network polymers) โพลีเมอร์กลุ่มนี้จะมีสายโซ่โมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโพลีเมอร์แบบเชื่อมโยง (Cross linked polymers) ก็ได้ มีลักษณะคล้ายตาข่ายดังรูป



### 2.1.2.6 วิธีการโพลีเมอไรซ์ (Method of Polymerization)

วิธีการโพลีเมอไรซ์ หมายถึง วิธีการที่จะทำให้โมโนเมอร์แต่ละโมโนเมอร์รวมกัน กลายเป็นโพลีเมอร์ซึ่งวิธีการนี้ได้รวมทั้งวิธีการผสมโมโนเมอร์กับตัวตั้งต้นเข้าด้วยกันโดยอาจจะมี ตัวกลางหรือตัวทำละลายอื่น ๆ ปนเข้าไปด้วย และวิธีการนี้ยังรวมไปถึงลักษณะการถ่ายเทพลังงานที่ ให้ออกมาในขณะการโพลีเมอไรซ์หรือพลังงานที่จะต้องใส่เข้าไปในขณะกำลังโพลีเมอไรซ์

วิธีการโพลีเมอไรซ์ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

- Bulk Polymerization
- Solution Polymerization
- Suspension Polymerization
- Emulsion Polymerization

2.1.2.6.1 Bulk Polymerization เป็นวิธีการในการโพลีเมอไรซ์โมโนเมอร์ โดยที่มีแต่เพียงโมโนเมอร์กับตั้งต้น (Initiator) แต่ไม่มีตัวทำละลายหรือตัวกลางอื่นใดตัวตั้งต้นที่ใช้ใน ปฏิกริยาในส่วนใหญ่เป็นสารที่ละลายได้ในโมโนเมอร์และเป็นสารประเภทที่แตกตัวให้อนุมูล อิสระ (free radical) เช่น พวก organic peroxide เป็นต้น ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดใน Bulk ส่วนใหญ่จะ เป็นกลไกปฏิกิริยาแบบ Free radical polymerization

เนื่องจากการโพลีเมอไรซ์แบบนี้มีแต่เฉพาะตัวตั้งต้น และ โมโนเมอร์ มา ทำปฏิกิริยากันเท่านั้นดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะมีมากเนื่องจากการที่ไม่มีตัวกลาง สำหรับถ่ายเทความร้อนออกไปและความร้อนนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ นอกจากนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นความหนืดของโมโนเมอร์ที่มีโพลีเมอร์ ปนนี้จะยังเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกวนเพื่อให้สารทำปฏิกิริยาเข้ากันได้ดี เนื่องจาก ปัญหาเหล่านี้ ในการเตรียมโพลีเมอร์ โดยวิธี Bulk Polymerization จึงนิยมเตรียมให้มีการ เปลี่ยนแปลงเป็นโพลีเมอร์ ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และพบว่าเมื่อเตรียมให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงเป็นโพลีเมอร์เกิน 60 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดปฏิกิริยา chain transfer ไปยังโพลีเมอร์ และ Gel effect เกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดโพลีเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขา (Branch polymers) และเกิด cross-link ในโพลีเมอร์ด้วย

เพื่อที่แก้ปัญหาอันเนื่องจากความร้อน ที่จากการเกิดปฏิกิริยาในการเตรียม โพลีเมอร์โดยวิธี Bulk Polymerization อาจเตรียมได้โดย แบ่งขั้นตอนของการเตรียมออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 เป็นวิธีการเตรียม Prepolymer โดยการให้โมโนเมอร์ และตัวตั้งต้น ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นโพลีเมอร์ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ความร้อนที่เกิดขึ้นในขั้นนี้จะกระจายออกไปก่อนจะนำ Prepolymer มาให้ทำปฏิกิริยาต่อในขั้นที่ 2 โดยให้ Prepolymer ซึ่งประกอบด้วยโพลีเมอร์บางส่วน โมโนเมอร์ และตัวตั้งต้น มาทำปฏิกิริยาต่อไปจนกระทั่งได้โพลีเมอร์ที่ต้องการ

เนื่องจากโพลีเมอร์ที่เตรียมได้โดยวิธี Bulk Polymerization จะไม่มีสิ่งเจือปนใด ๆ อันเนื่องมาจากตัวทำละลายหรือตัวกลางหรือสารอื่น ๆ ยกเว้นในโมโนเมอร์กับตัวตั้งต้นทั้งนั้นเท่านั้น โพลีเมอร์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง ถ้าหากใช้เตรียมโพลีเมอร์ที่ตกผลึกได้ยาก เช่น Polystyrene หรือ Polymethyl methacrylate แล้ว โพลีเมอร์เหล่านั้นจะมีลักษณะโปร่งใสคล้ายแก้วซึ่งเป็นลักษณะเด่นพิเศษไปกว่าวิธีการโพลีเมอร์แบบอื่น ๆ

2.1.2.6.2 Solution Polymerization เป็นวิธีโพลีเมอร์ไรซ์ โดยการให้โมโนเมอร์ตัวตั้งต้น และตัวทำละลาย กวนเข้าด้วยกัน ให้เกิดเป็นสารละลาย ตัวทำละลายนี้ควรจะเป็นสารที่ไม่ว่องไวในปฏิกิริยาขณะเกิดการโพลีเมอร์ไรซ์

การเกิดโพลีเมอร์ อาจเตรียมได้ 2 แบบคือ

แบบที่ 1 โดยใช้โมโนเมอร์ ตัวตั้งต้น และตัวทำละลาย ที่สามารถละลายได้ทั้งโมโนเมอร์และโพลีเมอร์ ผสมรวมกันเรียก “lacquer method” สารละลายโพลีเมอร์ในตัวทำละลาย เรียก “lacquer” ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ทันที หรืออาจแยกโพลีเมอร์ โดยให้ตกตะกอนแยกออกมาหรือระเหยตัวทำละลายออก

แบบที่ 2 โดยใช้โมโนเมอร์ตัวตั้งต้น และตัวทำละลายที่สามารถละลายโมโนเมอร์ได้ แต่ไม่ละลายโพลีเมอร์ ฉะนั้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา จะได้โพลีเมอร์แยกตกเป็นตะกอน ซึ่งแยกได้โดยการกรอง

ข้อดีของ Solution polymerization คือตัวตั้งต้นจะไม่ถูกเคลือบด้วยโพลีเมอร์ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวตั้งต้นคงเดิม แม้จะเริ่มปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไปบางส่วนแล้ว และการแยกเอาตัวตั้งต้นที่เหลือออกจากโพลีเมอร์ทำได้ง่ายนอกจากนั้นการควบคุมและกำจัดความร้อนที่เกิดในปฏิกิริยาโพลีเมอร์ก็จะทำง่ายเช่นเดียวกัน

ส่วนเสียของ Solution polymerization คือต้องเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในปฏิกิริยาอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันมิให้เกิดปฏิกิริยา chain transfer to solvent ซึ่งอาจจะทำให้โ

ลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำแต่แม้จะเรียกตัวทำละลายที่ค่อนข้างเฉลี่ยเท่าไรก็ตาม ก็ยังอาจเกิดปฏิกิริยา chain transfer to solvent ซึ่งปัญหานั้นจะเกิดมากในปฏิกิริยาที่มีกลไกปฏิกิริยาแบบ free radical มากกว่าแบบ ionic และอีกประการหนึ่งคือ ความยุ่งยากในการแยกตัวทำละลายออกจากโพลิเมอร์ แบบ Solution polymerization ดังนั้น โพลิเมอร์ที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะนิยมใช้ในรูปแบบของสารละลาย

2.1.2.6.3 Suspension Polymerization เป็นวิธีการเตรียมโพลิเมอร์ไรซ์ ประกอบด้วยโมโนเมอร์ ตัวตั้งต้นที่ละลายได้ในโมโนเมอร์ตัวกลาง ใช้ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อน โดยปกติใช้น้ำเป็น Suspending agent นำสารเหล่านี้กวนเข้าด้วยกัน อุณหภูมิของผสมให้ร้อน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ เกิดเป็นโพลิเมอร์ตามต้องการ

ในการโพลิเมอร์แบบ Suspension Polymerization นี้โมโนเมอร์จะต้องทำให้กระจายอยู่ในน้ำในรูปของหยดโมโนเมอร์ ที่เรียกว่า monomer droplet มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.01-0.5 เซนติเมตรซึ่งหยดโมโนเมอร์ที่แขวนลอยจะทำให้คงสภาพอยู่ได้โดยการกวน ละโดยการใส่สารที่ช่วยทำให้เสถียร ซึ่งเรียกว่า suspending agent

suspending agent แบบออกเป็น 2 พวกใหญ่คือ

- อินทรีย์โพลิเมอร์ ที่ละลายได้ในน้ำ
- สารอินทรีย์ไม่ละลายในน้ำ

2.1.2.6.4 Emulsion Polymerization เป็นวิธีการเกิดโพลิเมอร์ไรซ์ ซึ่งเป็นที่นิยมมากในการค้า วิธีการโพลิเมอร์ไรซ์แบบ Emulsion Polymerization จะประกอบด้วย ตัวตั้งต้นตัวกลาง เช่น น้ำ Emulsifying agent และอื่น ๆ Emulsion Polymerization ต่างจาก Suspension Polymerization ที่ ตัวตั้งต้น ละลายได้ในตัวกลาง ส่วน Suspension Polymerization ตัวตั้งต้นละลายได้ในโมโนเมอร์

โพลิเมอร์ที่ได้จาก Emulsion Polymerization จะอยู่ในรูปของที่เป็น latex ลักษณะเป็น คอลลอยด์ มีขนาดอนุภาคประมาณ 1000-20000 Å ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรซ์ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว และ ให้โพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

สารที่ใช้ในปฏิกิริยา Emulsion Polymerization ได้แก่

- โมโนเมอร์ โดยโมโนเมอร์ส่วนใหญ่แล้ว สามารถโพลิเมอร์ไรซ์ได้โดยการ Emulsion Polymerization ตัวอย่างของโมโนเมอร์ที่โพลิเมอร์ไรซ์ด้วยวิธีนี้ได้แก่ Styrene Vinyl Chloride และ Butadiene เป็นต้น

- Dispersion medium ตัวกลางที่นิยมใน Emulsion Polymerization คือ น้ำ เพราะมีราคาถูก น้ำจะเป็นตัวกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทำให้ลดปัญหาที่เกิดกับ Bulk Polymerization ได้

- ตัวตั้งต้น ตัวตั้งต้นที่ใช้ใน Emulsion Polymerization จะต้องละลายในตัวกลางน้ำ ตัวอย่าง เช่น Persulphate ของ ammonium potassium sodium และ organic hydroperoxide

## 2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ EPDM และโพลีเมอร์องค์ประกอบ

### 2.2.1 โพลีเอทิลีน (Polyethylene)

โพลีเอทิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์ จำพวกเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากวิธีการโพลีเมอร์ไรเซชันเอทิลีน โพลีเอทิลีนเป็นพลาสติกที่นิยมใช้เนื่องจากราคาถูก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม ในช่วงของความถี่ มีความต้านทานสนามเคมีที่ดี ขึ้นรูปได้ง่าย มีความเหนียวและความยืดหยุ่นดี เมื่อเป็นฟิล์มบาง ๆ จะมีความโปร่งใส โพลีเอทิลีนที่ได้จากการโพลีเมอร์ไรเซชันเอทิลีน มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นตามกระบวนการผลิต สามารถแบ่งได้ตามความหนาแน่นดังนี้

2.2.1.1 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene) มีความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) 110 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัว 40-50 องศาเซลเซียส

2.2.1.2 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Middle Density Polyethylene) ความหนาแน่น 0.926-0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 124 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัว 60-70 องศาเซลเซียส

2.2.1.3 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) ความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 135 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัว 85 องศาเซลเซียส

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และความหนาแน่นปานกลางได้จากการโพลีเมอร์ไรเซชันที่ความดันสูง (High Pressure Process) ประมาณ 1,000 – 3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิ 150-350 องศาเซลเซียส โมเลกุลของโพลีเอทิลีนที่ได้จะมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากทำให้การจัดเรียงตัวโมเลกุลไม่เป็นระเบียบทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นต่ำและค่อนข้างใส



โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ได้จากการโพลีเมอร์ไรเซชันที่ความดันต่ำ ประมาณ 500-600 บรรยากาศ อุณหภูมิ 93-120 องศาเซลเซียส โมเลกุลของโพลีเมอร์ที่ได้จะเป็นเส้นตรงมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) มากกว่า ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นสูง สะท้อนแสงได้มากกว่า จึงมีสีขุ่นไม่ใส เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นก็จะเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว ความทนต่อแรงดึง ความแข็ง ความคงทนต่อความร้อนและสารเคมี และสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ลดความทนต่อแรงกระแทกและความไสลง

### 2.2.2 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

โพลีโพรพิลีนจัดเป็นโพลีโอเลฟินอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญจัดอยู่ในโพลีเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติหลายอย่างทั้ง ความทนทานต่อสารเคมี ที่ดีเยี่ยม ความหนาแน่นต่ำ และมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติก รวมทั้งราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติ

โพลีโพรพิลีนแตกต่างจากโพลีเอทิลีนตรงที่มีกลุ่มเมทิลยึดติดกับอะตอมของคาร์บอนรวมทั้งมีจุดหลอมเหลวและความแข็งแรงของวัสดุภายใต้แรงดึงสูงกว่า แต่มีความเป็นผลึกน้อยกว่าโพลีเอทิลีน

โพลีโพรพิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์ ที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันแบบซีเกลอร์ แนต์ต้า โครงสร้างที่เกิดขึ้นมี 4 แบบ คือ

2.2.2.1 ไอโซแทคติก (Isotactic) เป็นโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบมากที่สุด มีความแข็งแรงและจุดหลอมเหลวสูง

2.2.2.2 ซินดีโอแทคติก (Syndiotactic) มีคุณสมบัติรองชนิดแรก ไม่นำมาใช้ในทางการค้า

2.2.2.3 อะแทคติก (Atactic) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เป็นอสัณฐาน อ่อนนุ่ม

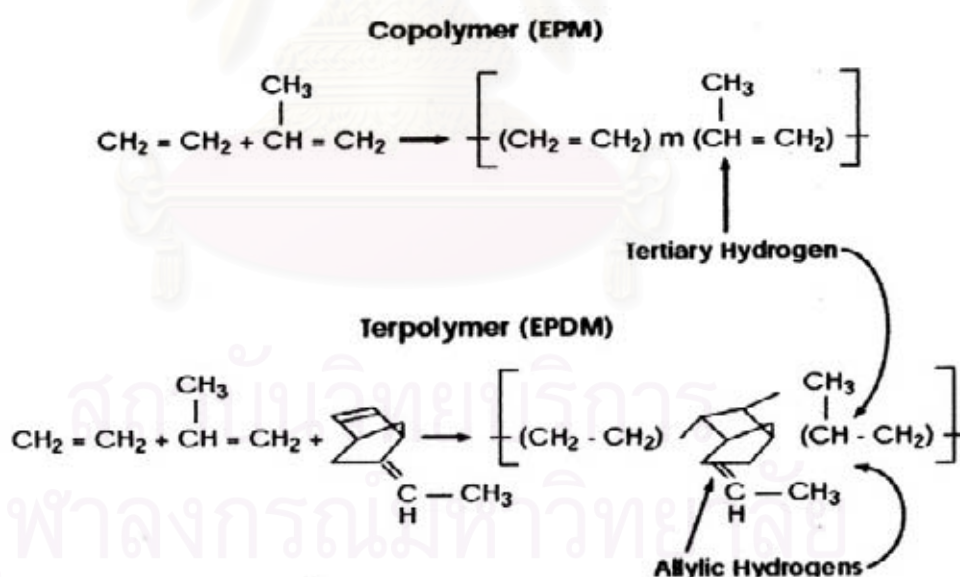
2.2.2.4 สเตอริโอบล็อก (Stereoblock) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยระหว่างไอโซแทคติกและอะแทคติก

โครงสร้างของโพลีโพรพิลีน 90% เป็นแบบไอโซแทคติก โครงสร้างจึงมีความเป็นระเบียบมาก มีมวลโมเลกุลสูงตั้งแต่ 10,000-1,000,000 กรัมต่อโมล ทำให้มีความแข็งแรงทนทานความร้อนได้ดี และมีความแข็งแรงสูงกว่าโพลีเอทิลีน มีจุดหลอมเหลวที่ 165 องศาเซลเซียส

### 2.2.3 เอทิลีน - โพรพิลีน - ไดอีน เทอร์โพลีเมอร์ (Ethylene-Propylene-Diene

Terpolymer : EPDM)

EPDM เป็นยางสังเคราะห์ชนิดโคโพลีเมอร์ ประกอบไปด้วย เอทิลีน โมโนเมอร์ (ethylene monomer) โพรพิลีน โมโนเมอร์ (propylene monomer) และไดอีน (Diene) ในปริมาณเล็กน้อยไดอีนที่ใส่เข้าไปจะเข้าทำปฏิกิริยาทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพันธะคู่ของคาร์บอนไม่อิ่มตัวขึ้น ไดอีนที่ใช้โดยทั่วไปคือ Dicyclopentadiene (DCPD), Ethylidene-2-Norbornene (ENB) และ 1-4 Hexadiene ปริมาณของไดอีน ใน EPDM จะมีค่าตั้งแต่ 1-2 mol% สิ่งที่น่าสังเกตคือ ความไม่อิ่มตัวของ EPDM จะอยู่ตรงกลุ่มที่ห้อยลงมา จะไม่อยู่แนวกระดูกสันหลังของตัวมันเอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ EPM และ EPDM<sup>[7]</sup>

โครงสร้างของหน่วยย่อยใน EPDM มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่เรียงเป็นลำดับของหน่วยย่อยเอทีลีนและโพรพิลีน แต่จะประกอบด้วยส่วนสั้น ๆ ของโพลีเอทีลีนและโพลีโพรพิลีนกระจายอยู่ทั่วไประหว่างโคโพลิเมอร์ การเพิ่มสัดส่วนของไดอินจะทำให้โมเลกุลไม่อิ่มตัวสูงขึ้น

โครงสร้างและส่วนผสมของ EPDM ทำให้ EPDM มีความต้านทานต่อโอโซนและอากาศ สารประกอบที่มี EPDM เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานกลางแจ้งหรืองานที่ต้องอยู่ในสภาวะที่มีโอโซนสูง โดยไม่ต้องใช้สารเติมแต่งที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน น้ำมันหรือสารเติมแต่งอื่น ๆ นอกจากนี้ EPDM ยังทนต่อความร้อนและการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

คุณสมบัติอื่น ๆ รวมไปถึงความต้านทานต่อของไหลที่มีขี้เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ และอะซิเตท ความทนต่อสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ความสามารถในการบิดงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดี และการที่ EPDM มีความหนาแน่นต่ำจึงมีความสามารถในการเติมแต่งสารต่าง ๆ เช่น น้ำมัน หรือสารเติมแต่งอื่น ๆ ในระดับสูงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

EPDM ได้ถูกนำมาใช้ในทางการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1964 โดยใช้กันมากในงานด้านการทำชิ้นส่วนโดยแม่พิมพ์และการขึ้นรูป งานที่นำมาประยุกต์ใช้เช่น ท่อ (Hose) ที่มีระบบหล่อเย็นในตัว ยางในรถยนต์ แผ่นเหล็กที่ทนต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของอากาศ ฉนวนเคเบิลในกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และงานก่อสร้างอาคารและโครงสร้าง

## 2.3 ความเป็นผลึก (Crystallinity)

โพลีเมอร์เป็นวัสดุอยู่ในสภาวะของแข็ง มีรูปแบบเป็นได้ทั้งผลึก กึ่งผลึก และไม่มีผลึก สัณฐานของโพลีเมอร์ จะมีความยาวอยู่ช่วง 5- 50 นาโนเมตร

### 2.3.1 สมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ตามความเป็นผลึก

- ความเป็นผลึกต่ำ การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลอาศัยพันธะโควาเลนต์ ความแข็งแรงน้อย ความหนาแน่นต่ำจุดหลอมเหลวก็จะต่ำ

- ความเป็นผลึกสูง โพลีเมอร์ในกลุ่มนี้อาจมีความเป็นผลึกสูงถึง 98% แต่สิ่งที่เป็นมาในผลึก เช่น ความไม่บริสุทธิ์ สิ่งเจือปน ตามตำแหน่งต่าง ๆ จะลดความเป็นผลึกลงไป จุดหลอมเหลวสูง ความหนาแน่นสูง ความแข็งแรงสูง ลักษณะผลึกแบ่งได้ดังนี้

### **Fringed micelle model**

เป็นแบบจำลองโพลีเมอร์ที่เป็นผลึก โดยประกอบด้วยบริเวณที่เป็นผลึก สลับปะปนกับโพลีเมอร์อสัณฐาน โดยที่โมเลกุลจะเรียงตัวกันแน่นเป็นระเบียบมีความยาวประมาณ 200-300 อังสตรอม (Å) ถ้าโมเลกุลได้รับแรงดึงจะทำให้โพลีเมอร์ที่ไม่เป็นผลึกจัดเรียงตัว ทำให้ความปั่นผลึกสูงขึ้น ความเป็นผลึกจะมีผลกระทบโดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์

### **Folded chain crystallites**

ความเป็นผลึกของโพลีเมอร์ พบเริ่มแรกจากการเป็นผลึกจากสารละลายเจือจางของโพลีเมอร์ ที่นำมาทำให้เย็น หรือทำให้น้ำระเหยออกไป จะได้ผลึกรูปแผ่นบาง เป็นรูปทรงปริมาตร ซึ่งเรียกว่า lamellae ประกอบด้วย folded chain model เป็นแบบจำลองสำหรับผลึกเดี่ยว ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 50-60 ตัว ความหนาของโพลีเมอร์แบบนี้จะขึ้นกับความยาวของโมเลกุลที่ขดตัว และอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

### **Spherulites**

นอกจากสองแบบที่กล่าวมาแล้ว ยังมีโพลีเมอร์ที่เป็นผลึกในแบบที่ต่างออกไป เช่น เป็นลักษณะที่เติบโตจากจุดศูนย์กลางไปตามรัศมี ขนาดของ Spherulites ขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่ ปริมาณของ Spherulites ขนาดใหญ่ ถ้ามีมากโพลีเมอร์จะแข็งและเปราะ ดังนั้นนิยมเติม nucleating agent เพื่อให้ปริมาณของ Spherulites ขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกระแทก ความเปราะจะลดลง

### **องศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity)**

ในการบ่งชี้ถึงความเป็นผลึกมากน้อยเท่าใดของโพลีเมอร์ นิยมกำหนดด้วยองศาของความเป็นผลึก ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 0 – 100% แต่จะไม่มีค่า 100% เนื่องจากความบกพร่องของผลึกเองที่มีปะปนอยู่ อันได้แก่ การหักบิดงอของโมเลกุล อาจกล่าวได้ว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าองศาความเป็นผลึกได้แก่ ขนาดของผลึก การเรียงตัวและการกระจายตัวของช่องว่าง โพรง หรือแม้แต่ความเค้นที่ตกค้างอยู่ในเนื้อโพลีเมอร์ ขนาดความยาวและการกระจายตัวของโมเลกุล เป็นต้น

### 2.3.2 อิทธิพลของความเป็นผลึกต่อสมบัติของโพลีเมอร์

การมีปริมาณผลึกสูง ย่อมมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ พวกที่เป็นผลึกจะทำให้โพลีเมอร์มีความหนาแน่นสูง ความหนาแน่นก็เป็นตัวบ่งชี้ข้อหนึ่งในการวัดความเป็นผลึก

การที่โพลีเมอร์มีปริมาณผลึกสูง ทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นระเบียบมีแรงยึดเกาะสูง เป็นผลให้มีความแข็งแรง และความแข็งสูง

สมบัติทางแสงก็ขึ้นกับความเป็นผลึก โดยทั่วไปโพลีเมอร์ที่ใสและโปร่งแสง มาจากโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐานสมบูรณ์ แต่การที่โพลีเมอร์ไม่โปร่งใสและไม่โปร่งแสง ไม่ใช่เพราะการมีปริมาณผลึกสูงอย่างเดียว อาจเป็นอิทธิพลของสารเติมแต่งก็ได้

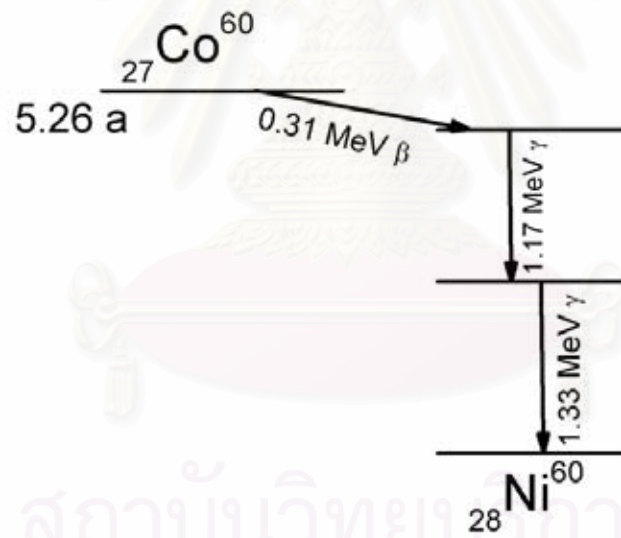
## 2.4 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Gamma source)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้และเป็นแบบไอออนทางอ้อม (Indirectly Ionizing radiation) ในทางอุตสาหกรรมการฉายรังสีมีการใช้งานรังสีแกมมาจากไอโซโทป 2 ชนิด คือ ซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 แต่โดยส่วนใหญ่จะเลือกใช้โคบอลต์-60 มากกว่าเนื่องจากโคบอลต์มีความคงทนในการใช้งานที่สภาวะปริมาณรังสีสูง และทนอุณหภูมิสูงได้ดี<sup>[8]</sup> การเตรียมโคบอลต์-60 จะต้องเตรียมมาจากโคบอลต์-59 โดยจะเตรียมได้ตามความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน มีทั้งแบบผงและแบบแท่ง โดยที่จะเคลือบเม็ดและแท่งโคบอลต์-59 ด้วยนิกเกิล เพื่อป้องกันการการทำปฏิกิริยาระหว่างโคบอลต์-59 กับออกซิเจนในอากาศ

ทางการแพทย์นั้นเม็ดโคบอลต์ จะมีลักษณะเหมือนทรายหยาบบรรจุลงในภาชนะที่มีรูปร่างที่เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน ส่วนโคบอลต์ที่ใช้งานในทางอุตสาหกรรมนั้นจะบรรจุแท่งโคบอลต์ลงในท่อที่เป็นโลหะผสมเซอร์โคเนียม หลังจากนั้นจะทำการปิดผนึกปากท่อด้วยการเชื่อม เพื่อให้ทั้งท่อกลายเป็นแท่งต้นกำเนิด แท่งต้นกำเนิดจะถูกนำมารวมกันเป็นมัด เพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป

กระบวนการต่อมาจะนำมัดแท่งกำเนิดที่ได้ ไปทำการอบนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อจะเปลี่ยนจากโคบอลต์-59 เป็นกลายเป็นโคบอลต์-60 ตามมาตรฐานการประกันคุณภาพและข้อกำหนดเฉพาะเดียวกัน

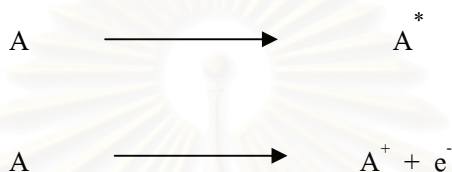
โคบอลต์-60 สลายตัวไปเป็นนิกเกิล-60 โดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา พลังงาน 0.318 MeV และสลายตัวกับรังสีแกมมา 2 โฟตอนต่อการสลายตัวหนึ่งครั้งโดยพลังงานโฟตอนทั้งสองเท่ากับ 1.17 MeV และ 1.33 MeV ตามลำดับหรือคิดเฉลี่ยให้พลังงานโฟตอน 12.5 MeV ต่อการสลายตัวหนึ่งครั้ง ซึ่งเราสามารถใช้ประโยชน์จากรังสีแกมมานี้ได้ในอุตสาหกรรมได้แก่ การฉายรังสีเวชภัณฑ์และการปรับปรุงโพลีเมอร์ เป็นต้น สรุปโดยรวมข้อดีของการใช้ต้นกำเนิดของรังสีแกมมา รังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง (43.2 เซนติเมตร ต่อ 1 MeV ในอากาศ) จึงสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้วัดความหนาแน่น จากโรงงานผลิตพลาสติก ใช้สำรวจหลุมขุดเจาะ เพื่อหาแหล่งแร่ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถฉายรังสีได้อย่างต่อเนื่องเสถียรได้ซ้ำและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนเสริมต้นกำเนิดบ่อยครั้ง



รูปที่ 2.2 แผนผังการสลายตัวของโคบอลต์-60

## 2.5 ปฏิกิริยาเคมีเมื่อรังสีผ่านสาร<sup>[9]</sup>

เมื่อรังสีไม่ว่าจะเป็นประเภทใดก็ตามผ่านเข้าไปในสาร จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางนั้นจะเป็นผลให้อะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางดังกล่าวเกิดการแตกตัว (ionizing) เป็นไอออนบวกและไอออนลบหรือถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาพถูกกระตุ้น (excitation) คืออะตอมหรือโมเลกุลมีระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานสภาวะพื้นฐาน (ground state) ตามสมการดังนี้



เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นแล้วอะตอมหรือโมเลกุลดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยามากอาจจะเข้าร่วมตัวกันเองหรือไปทำปฏิกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

2.5.1 ปฏิกิริยาของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในรูปของไอออนหรืออยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น

2.5.1.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากไอออน

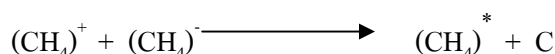
- ปฏิกิริยา Ion Recombination



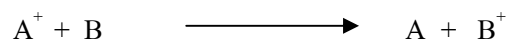
$A^*$  คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น



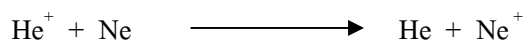
ตัวอย่างเช่น



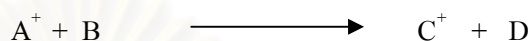
- ปฏิกิริยา Charge Transfer



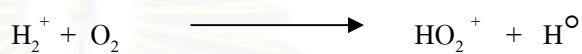
ตัวอย่างเช่น



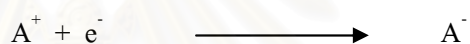
- ปฏิกิริยา Ion – Molecule



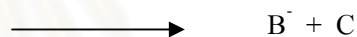
ตัวอย่างเช่น



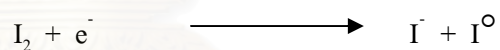
- ปฏิกิริยา Electron Addition



หรือ



ตัวอย่างเช่น



### 2.5.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลในสถานะถูกกระตุ้น

- ปฏิกิริยา Radiative or nonradiative conversion to

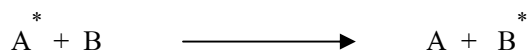
ground state no chemical change



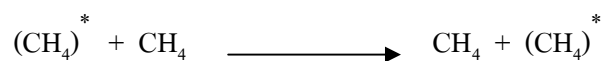
ตัวอย่างเช่น



- ปฏิกิริยา Nonradiative Energy Transfer

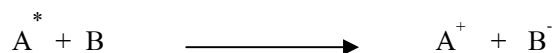


ตัวอย่างเช่น

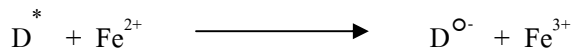




- ปฏิกิริยา Electron Transfer

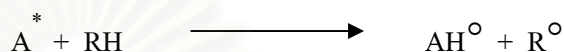


ตัวอย่างเช่น

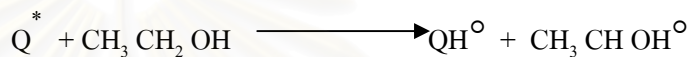


D เป็น โมเลกุลของ methylene blue

- ปฏิกิริยา Hydrogen Abstraction



ตัวอย่างเช่น



Q\* เป็น โมเลกุลของ quinine

- ปฏิกิริยา Addition



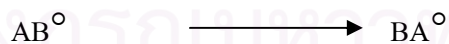
ตัวอย่างเช่น



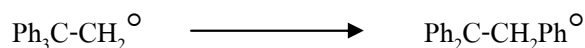
จากปฏิกิริยาของอ็อกซิเจนหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นดังกล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าในบางปฏิกิริยาเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก และมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาด้านรังสี

## 2.5.2 ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

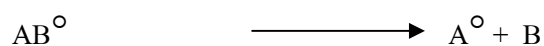
### 2.5.2.1 ปฏิกิริยา Radical Rearrangement



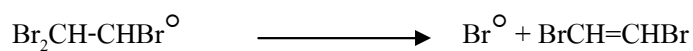
ตัวอย่างเช่น



## 2.5.2.2 ปฏิกิริยา Radical Dissociation



ตัวอย่างเช่น



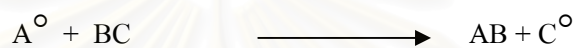
## 2.5.2.3 ปฏิกิริยา Addition



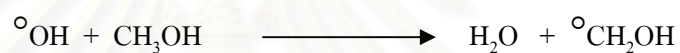
ตัวอย่างเช่น



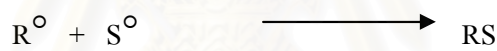
## 2.5.2.4 ปฏิกิริยา Abstraction



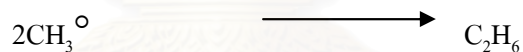
ตัวอย่างเช่น



## 2.5.2.5 ปฏิกิริยา Radical Combination



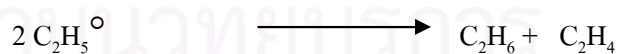
ตัวอย่างเช่น



## 2.5.2.6 ปฏิกิริยา Disproportionation



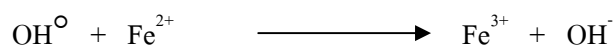
ตัวอย่างเช่น



## 2.5.2.7 ปฏิกิริยา Electron Transfer



ตัวอย่างเช่น



## 2.6 ผลของรังสีที่มีต่อโพลีเมอร์<sup>[9]</sup>

เมื่อสายโพลีเมอร์ถูกรังสีไอโอไนซ์จะเกิดผลขึ้นสองอย่างคือ การเกิดสภาพสายโซ่โพลีเมอร์เกาะกัน (cross Linking) การเกิดสภาพการขาดออกของสายโซ่โพลีเมอร์ (Degradation) ในการเกิด (cross Linking) เกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลและเกิดร่างแหหลายมิติขึ้น แต่ในการเกิด degradation น้ำหนักโมเลกุลจะลดลง โอกาสในการขึ้นภาวะแต่ละอย่างนั้นแยกกันไม่มีกฏตายตัว แต่อย่างไรก็ตามพอจะแยกกลุ่มของโพลีเมอร์เป็นสองกลุ่มตามตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่าโพลีเมอร์กลุ่มที่ 1 จะเกิด cross Linked โดยรังสี และโพลีเมอร์กลุ่มที่สอง จะเป็นกลุ่มที่เกิด Degradation เป็นโมเลกุลเล็ก

เมื่อโพลีเมอร์ กลุ่มที่ 1 ถูกรังสีไอโอไนซ์ จะเกิดโครงข่ายขึ้น ณ จุดที่สภาวะโครงข่ายเริ่มเกิดการไม่ละลายเป็นครั้งแรกเรียกว่า จุดเจล (gel point) และปริมาณรังสีที่มีขนาดทำให้เกิดจุดเจลเรียกว่า เจลโดสส์ (gelling dose) ถ้าในสภาวะที่โครงข่ายบางส่วนเกิดสภาพเจลแล้วแต่ยังมีบางส่วนยังสามารถละลายน้ำได้ จะเรียกว่าโซล (sol)

ตารางที่ 2.1 ผลของรังสีต่อโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดครอสลิงค์หรือเพื่อเสื่อมสลาย<sup>[9]</sup>

| Cross-linking Polymer                | Degrading Polymer           |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Polyethylene                         | Polyisobutylene             |
| Polypropylene                        | Poly-methylstyrene          |
| Polystyrene                          | Polymethacrylates           |
| Polyacrylates                        | Polymethacrylamide          |
| Polyacrylamide                       | Polyvinylidene chloride     |
| Polyvinyl chloride                   | Cellulose and derivatives   |
| Polyamides; Polyesters               | Polytetrafluoroethylene     |
| Polyvinylpyrrolidone; Natural rubber | Polytrifluorochloroethylene |
| Polysiloxanes; Polyvinyl alcohol     |                             |
| Polyacroleine                        |                             |

## 2.6.1 ปฏิกิริยา Polymerization โดยกระบวนการทางรังสี

2.6.1.1 Radical Polymerization Monomer ทุกตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Vinyl monomer สามารถถูกทำให้เกิด Polymerization มีดังนี้

2.6.1.1.1 เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในการทำ Polymerization เราไม่สามารถหลีกเลี่ยงการตกค้างของตัวเร่งปฏิกิริยาใน polymer ได้ ซึ่งตัวนี้มักเป็นตัวการที่ทำให้เกิดผลที่ไม่ต้องการได้ จุดเด่นคือในการใช้รังสีเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิด Polymerization จะไม่มีปัญหาการตกค้างของตัวเร่งปฏิกิริยานี้<sup>[10]</sup>

2.6.1.1.2 ในบางกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Polymerization ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ เป็นการเริ่มปฏิกิริยา แต่การใช้รังสีทำให้เกิด Radical ได้โดยไม่มีตัวแปรของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง การเหนี่ยวนำทำให้เกิด Polymerization สามารถทำได้แม้ในอุณหภูมิต่ำ

2.6.1.2 เทคนิคที่น่าสนใจในปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน (polymerization of Technical interest)<sup>[11]</sup>

ที่ Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) จะใช้วิธีทำปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของตัว ethylene ที่อุณหภูมิต่ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งก็หมายความว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ Polyethylene ปฏิกิริยานั้นมีกระบวนการเกิดขึ้น พร้อมกับกลไกของ radical ผลผลิตที่ได้จะเป็นแบบแบ่งฝั่วนละเอียดยิ่ง จึงดูราวกับว่า degree ของ branching ของ Polyethylene นี้ต่ำมาก ๆ ในอเมริกาได้ศึกษากันว่าปฏิกิริยา Polymerization ของ ethylene จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิและความดัน

การทดลองในระดับ Pilot scale ในการใช้รังสีเหนี่ยวนำปฏิกิริยา Polymerization ของตัว trioxane ทำใน JAERI เป็นที่น่าสังเกตว่า สายผลึก (crystalline) ของ trioxane เมื่อนำมาฉายรังสีโดยตรง ที่สายผลึก (crystalline) ของโพลีเมอร์แบบเส้น (linear polymer) จะมี degree ของการเกิด Polymerization สูงมาก trioxane บริสุทธิ์ถูกนำไปฉายรังสีที่อุณหภูมิห้อง โดยให้ความร้อนก่อนประมาณ 50 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา Polymerization เกิดขึ้นก่อนที่จะมีการฉายรังสีลงบน trioxane เกิดปฏิกิริยา copolymerization กับ monomer ที่เหมาะสม และอุณหภูมิที่คงที่มีผลทำให้ได้โพลีเมอร์

ในการใช้รังสีทำให้เกิด Polymerization ใน Vinyl chloride เราสามารถใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้รังสีทำการบ่ม (curing) และเคลือบ ในขณะที่เป็น prepolymer ของสาร polyesters ชนิดไม่อิ่มตัว epoxy polymers ชนิดไม่อิ่มตัว acrylic polymers ชนิดไม่อิ่มตัว และ diallyl phthalate ต่างถูกบ่ม โดยล้าอเล็กตรอนฉายลงบน monomer และ (หรือ) crosslinking agent การใช้รังสี curing เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานกับวัสดุที่ไม่เหมาะสมกับการใช้ความร้อนทำ curing ซึ่งผลที่ได้ดีไม่แตกต่างกัน

## 2.6.2 การเกิดการเชื่อมต่อและเสื่อมสลายของสายโซ่โพลิเมอร์

การเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ ภายหลังจากฉายรังสีพอลิเมอร์คือการเกิดครอสลิงค์และการเสื่อมสลายการเกิดครอสลิงค์จะทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ดีขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสสูงขึ้นทนทานกับความร้องเปลวไฟ ในทางกลับกันหากเกิดการเสื่อมสลายจะให้ผลการลบที่ตรงกันข้าม

เมื่อรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดถูกปลดปล่อยออกมาแล้วเข้าทำอันตรกิริยากับตัววัสดุพอลิเมอร์จะได้การถ่ายเทพลังงานจากรังสีจนสามารถจะ สร้างสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่นพวก เรดิคอล ซึ่งสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ต่อไป ผลจากอันตรกิริยาเคมีได้ 3 แบบคือ

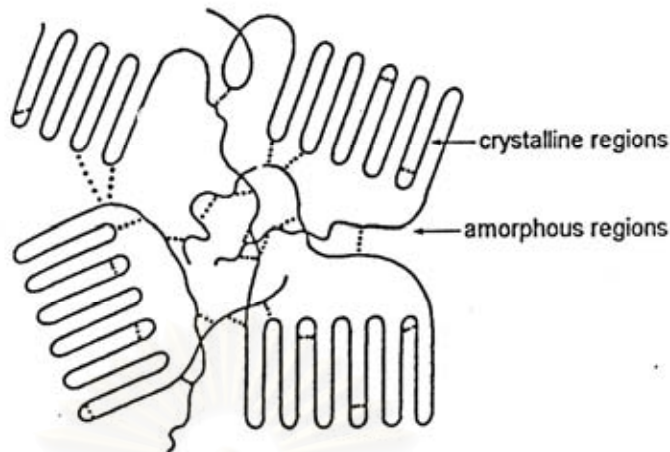
2.2.2.1 Crosslinking หากโซ่พอลิเมอร์ส่วนที่ว่องไวสามารถที่จะจับตัวกันได้จะสามารถทำให้เกิดการเชื่อมต่อเป็นร่างแหได้

2.2.2.2 Degradation หากโซ่พอลิเมอร์นั้นกลับถูกพลังงานที่ได้รับจากรังสีมาทำให้โซ่ขาด ก็สามารถที่จะลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้

2.2.2.3 Grafting หากมีโมโนเมอร์ (monomer) ตัวอื่นที่สามารถเกิดการเชื่อมต่อกับโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวในปฏิกิริยา ทำให้เกิดการต่อกิ่งก้านสาขาออกไป

ค่าที่สำคัญอีกค่าในกระบวนการชักนำโดนรังสี คือ ค่า G-value ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำมาฉายรังสี ในกระบวนการที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์จะเกิดได้ทั้งการเกิดเชื่อมโยงและเกิดการตัดทอนของโซ่ ขึ้นอยู่กับว่าจะเกิดค่า G-value แบบใดสูงกว่ากันเท่านั้นเองอย่างเช่นตัวอย่างที่เป็น อีพีดีเอ็ม จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าค่า G (X) คือความสามารถในการเกิดครอสลิงค์มีมากกว่าความสามารถในการเสื่อมสลายของโซ่ G (S)

### 2.6.3 ทฤษฎีการเชื่อมโยงโมเลกุล<sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.3 การเชื่อมโยงโมเลกุล (-----) ของโพลีเอทีลีน<sup>[9]</sup>

ตามทฤษฎีการเชื่อมโยงโมเลกุล คือ การเชื่อมโยงเป็นแบบ ชาร์ลส์บี (Charlesby) โดยมีสมมติฐานของการเชื่อมโยงโมเลกุล คือ กานเชื่อมโยงแบบ “tetra functional” การเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดแบบสุ่มตามโครงสร้างความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุล (cross linking density,  $q$ ) คือ สัดส่วนจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่หมดที่มีการเชื่อมโยง

$$q = q_0 \times D \quad (1)$$

โดย  $q_0$  คือสัดส่วนของจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่เกิดการเชื่อมโยงต่อปริมาณรังสี

$D$  คือปริมาณรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก

$q_0$  สามารถแสดงในรูปของการเชื่อมโยงต่อ 100 eV ( $G$  (cross linking)) ถ้า  $n$  คือจำนวนโมโนเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงหลังจากได้รับรังสีปริมาณ 1 kGy และ  $n_0$  คือจำนวนโพลีเมอร์ 1 กรัม

$$q_0 = \frac{n}{n_0} \quad (2)$$

$$N = G \text{ (Cross Linked Unit)} \times 6.24 \times 10^{16} \quad (3)$$

เมื่อปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ เท่ากับดูดซับพลังงาน  $6.24 \times 10^{18}$  eV/g และ

$$n_0 = \frac{6.02 \times 10^{23}}{M_0} \quad (4)$$

โดยที่  $M_0$  คือน้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์  
ดังนั้นจากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนได้เป็น

$$q_0 = \frac{M_0 \times G \text{ (crosslinked Unit)}}{0.96 \times 10^7} \quad (5)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad \delta = q \times X_w \quad (6)$$

เมื่อ  $\delta$  = จำนวนของหน่วยที่เกิดการเชื่อมโยงต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (crosslink Coefficient)

เมื่อค่า  $\delta$  มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ค่า  $M_w$  มีค่าเข้าใกล้อนันต์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มเกิดโครงสร้างเจล โดยปริมาณรังสีที่จุดนี้เรียกว่า “The gelling dose ( $D_{gel}$ )” จึงได้ความสัมพันธ์

$$\delta = q_0 \times X_w \times D$$

จากนิยามของ  $D_{gel}$  จะได้

$$1 = q_0 \times X_w \times D_{gel} \quad \text{และ} \quad \therefore D_{gel} = \frac{1}{q_0 \times X_w} \quad (7)$$

จากความสัมพันธ์ต่อมาจะได้ว่า

$$G \text{ (crosslinked unit)} = \frac{0.96 \times 10^7}{D_{gel} \times M_w} \quad (8)$$

เมื่อ 1 การเชื่อมโยงเกิดจากหน่วยที่เชื่อมโยง 2 หน่วยและ  $G(X)$  คือค่าของการเชื่อมโยงโมเลกุล (G-value of crosslinking)

$$G(X) = \frac{0.48 \times 10^7}{D_{gel} \times M_w} \quad (9)$$

#### 2.6.4 ทฤษฎีการตัดทอนโมเลกุล

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{M_n}$  กับปริมาณรังสีที่ได้รับ (absorbed dose,  $D$ ) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงตามสมการ

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w,0}} + \frac{G(S) \times D}{100 \times N_A} \quad (10)$$

โดย  $M_{w,0}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเริ่มต้นในรูปจำนวน

$D$  คือ ปริมาณรังสีที่ดูดกลืนมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ต่อกรัม

$N_A$  คือ เลขอะโวกาโดร (Avogadro's number)

#### 2.6.5 ทฤษฎีการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลในเวลาเดียวกัน

การเชื่อมโยงและการขาดของสายโพลีเมอร์ได้ ในกรณีของตัวอย่างนี้สามารถเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนได้พร้อมกัน สมการที่ (10) จะเปลี่ยนรูปเป็น

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w,0}} + \frac{[G(S) - G(X)] \times D}{100 \times N_A} \quad (11)$$

ซึ่งสมการนี้เหมาะสมสำหรับการใช้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสีในช่วงที่เรียกว่า "pre-gel" นอกจากนี้สมการนี้ยังคล้ายกับสมการซึ่งเสนอโดย คิลป์ (Kilb) ดังนี้

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w,0}} + \frac{[G(S) - 4G(X)] \times D}{100 \times N_A} \quad (12)$$



ซึ่งต้องอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

- การเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลเป็นแบบสุ่ม
- ค่า  $G(S)$  และ  $G(X)$  ไม่ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับ
- การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ

ถ้าการเชื่อมโยงมีอิทธิพลมากกว่าการตัดทอนโมเลกุล โพลีเมอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เมื่อค่า  $D$  มีมากกว่า  $D_{gel}$  ทำให้โมเลกุลเริ่มต้นมีการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลาย ส่วนที่ไม่ละลายนี้ เรียกว่า สัดส่วนเจล (gel fraction) ในทางตรงข้ามส่วนที่ละลายเรียกว่า สัดส่วนโซล (sol fraction)

สำหรับในช่วงที่เรียกว่า “Post-gel” นั้นค่า  $G(s)$  และค่า  $G(X)$  จะสอดคล้องกับสมการของชาร์เลสบีและพินเนอร์ (Charlesby-Pinner Equation)

$$S + S^{1/2} = \frac{G(S)}{2G(X)} + \frac{100 \times N_A}{G(X) \times M_w \times D} \quad (13)$$

โดย  $S$  คือสัดส่วนโซล

สมการ (13) ถือเป็นสมการที่ใช้อธิบายการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุล ซึ่งเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันของโพลีเมอร์ โดยการเชื่อมโยงและการตัดทอนนั้นเกิดแบบสุ่ม ซึ่งมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นของโพลีเมอร์เป็นการกระจายตัวแบบปกติ

ตาราง 2.2 ค่า G (X) และค่า G (S) ของโพลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้  
สุญญากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน<sup>[13]</sup>

| โพลิเมอร์                                                         | G(X)  | G(S)     | G(S)/G(X) |
|-------------------------------------------------------------------|-------|----------|-----------|
| โพลิเอทิลีน(Polyethylene)                                         | 3.0   | 0.88     | 0.299     |
| โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(Liner low density Polyethylene) | 2.53  | 0.4      | 0.158     |
| โพลิโพรพิลีน(Polypropylene)                                       | 0.6   | 0.11     | 0.183     |
| ยางธรรมชาติ(Natural Rubber)                                       | 1.1   | 0.22     | 0.367     |
| โพลิไวนิลคลอไรด์(Polyvinyl chloride)                              | 2.15  | -        | -         |
| โพลีสไตรีน(Polystyrene)                                           | 0.045 | < 0.018  | < 0.4     |
| โพลิเมทิลเมทาคริลเลต(Poly(methyl metacrylates))                   | -     | 1.22-3.5 | -         |
| โพลิไดเมทิลไซลอกเซน(Polydimethylsiloxane)                         | 2.7   | < 0.54   | < 0.2     |
| บิวทาไดอีน-สไตรีน โคโพลิเมอร์(butadiene-styrene copolymer, 77:23) | 2.8   | 0.39     | 0.139     |
| โพลิโพรพิลีนออกไซด์(Polypropylene oxide)                          | 0.15  | 0.22     | 0.1467    |
| ไนลอน-6(Polycaprolactum, Nylon-6)                                 | 0.33  | 0.23     | 0.697     |

เมื่อพอลิเมอร์ถูกฉายรังสีจะมีแนวโน้มที่จะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและครอสลิงค์ แต่ความสามารถในการตอบสนองต่อรังสีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์นั้น ๆ ตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่จะบอกถึงความสามารถในการตอบสนองต่อรังสี เรียกว่า G-value ซึ่งจะบอกถึงผลหรือปริมาณที่ตอบสนองทางเคมีภายหลังจากการฉายรังสี โดยที่ค่า G-value จะนิยามว่าจำนวนโมเลกุลที่ตอบสนองต่อรังสีต่อพลังงาน 100eV เมื่อ

G (s) คือ G-value ของการตัดโซ่โมเลกุล

G (x) คือ G-value ของการเกิดครอสลิงค์

หากพิจารณาเป็นอัตราส่วน G (s) /G (x) น้อยกว่า 1 แสดงว่ามีโอกาสที่จะครอสลิงค์ได้ดี และหากอัตราส่วน G (s) /G (x) มากกว่า 1 แสดงว่ามีโอกาสที่จะเกิดถูกกลดน้ำหนัโมเลกุลได้ดี

### 2.6.6 การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์<sup>[12]</sup>

ในตัวอย่างอีพิตีเอ็มที่นำมาทำการทดสอบจะประกอบด้วยสายโซ่ที่มีความยาวต่าง ๆ กัน รวมตัวกันอยู่ ดังนั้นเมื่อจะระบุน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างที่ได้จะต้องระบุเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งจะมี 2 ชนิด คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number average molecular weight,  $M_n$ ) และค่าน้ำหนักเมื่อโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight average molecular weight,  $M_w$ )

$\overline{M}_n$  = น้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างโพลีเมอร์/จำนวนโมเลกุลทั้งหมดของตัวอย่างโพลีเมอร์

$$= \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i} = \frac{\sum W_i}{\sum N_i}$$

จำนวนเฉลี่ยของดีกรีของโพลีเมอร์ไรเซชัน (number average degree of polymerization,  $X_n$ ) มีค่าเท่ากับ

$$X_n = \frac{M_n}{M_0}$$

$\overline{M}_w$  = จำนวนรวมผลคูณของสัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) กับน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่

$$= \sum \left[ \frac{w_i}{W} \right] M_i$$

น้ำหนักเฉลี่ยของดีกรีของโพลีเมอร์ไรเซชัน (weight average degree of polymerization,  $X_w$ ) มีค่าเท่ากับ

$$X_w = \frac{M_w}{M_0}$$

โดยทั่วไป  $\overline{M}_w$  จะมีค่ามากกว่า  $\overline{M}_n$  เสมอ เป็นไปได้มากที่สุดคือเท่ากับและค่า  $\frac{\overline{M}_w}{\overline{M}_n}$  เป็น

ตัวบ่งชี้การกระจายตัวแจกแจงน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight dispersity)

### บทที่ 3

#### วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การเตรียมการขึ้นรูป EPDM และกระบวนการฉายรังสี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1.1 วัสดุ EPDM องค์ประกอบได้แตกต่างกัน 2 ระดับ ชนิดแรก ลักษณะเป็นเม็ดคล้ายพลาสติก NORDEL IP 4760P ชนิดที่ 2 ลักษณะเป็นแท่งยาง NORDEL IP 5565 จากบริษัท Dow Chemical Company มีรายละเอียดคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ EPDM NORDEL IP 4760P และ NORDEL IP 5565

| Typical Data              | Unit              | NORDEL IP | NORDEL IP | Test Method |
|---------------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|
|                           |                   | 4760P     | 5565      |             |
| Property                  |                   |           |           |             |
| MFI 21.6/kg/190°C         | g/10min           | 25.6      | 4.8       | ASTM D1238  |
| Density                   | g/cm <sup>3</sup> | 0.87      | 0.86      | ASTM D297   |
| Tensile strength at yield | N/mm <sup>2</sup> | 1         | 0.5       | ASTM D638   |
| Tensile strength at break | N/mm <sup>2</sup> | 4         | 0.2       | ASTM D638   |
| Ultimate elongation       | %                 | 703       | 200       | ASTM D638   |

##### 3.1.1.2 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 Gammacell 220 Excel

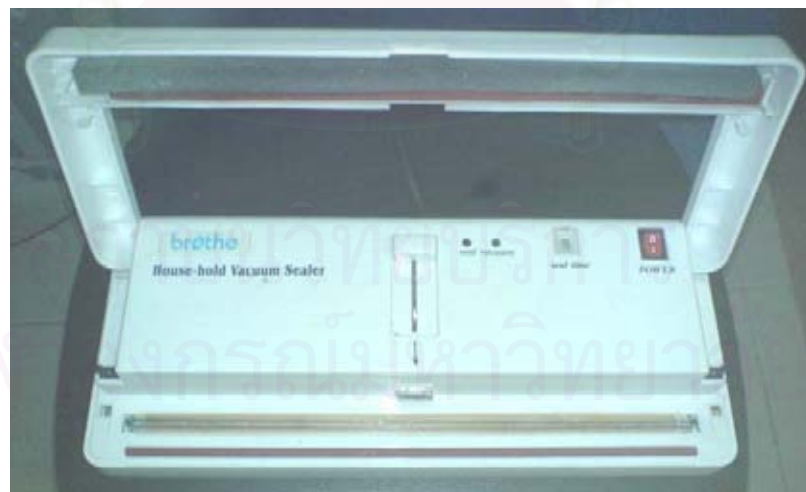
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก โคบอลต์-60 รุ่น Gammacell 220 Excel ที่สำนักงานปริมาณ เพื่อสันติ

3.1.1.3 ถังผนึกสุญญากาศทำจากโพลีเอทิลีนขนาด 8x12 ตารางนิ้ว

3.1.1.4 เครื่องผนึกสุญญากาศ House-hold vacuum sealer, D2-280A, Brothe, China.



รูปที่ 3.2 เครื่องผนึกสุญญากาศ House-hold vacuum sealer, D2-280A, Brothe, China.

3.1.1.5 เครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Compression molding) จากบริษัท LABTECH ENGINEER Co., Ltd. ของ ห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



รูปที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Compression molding)

3.1.1.6 เครื่องชั่ง

3.1.2 การดำเนินงานวิจัย

3.1.2.1 นำ EPDM แบ่งใส่ถุงๆละประมาณ 200 กรัมโดย EPDM แต่ละเกรดจะแบ่งใส่ ทั้งหมด 12 ถุง โดยทำการไล่อากาศในถุงด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วทำการไล่ไนโตรเจนออกจากถุง โดยใช้เวลาทำสุญญากาศ 10 วินาที และเวลาปิดผนึก 3 วินาที

3.1.2.2 นำถุงที่บรรจุแต่ละเกรดแบ่งออกเป็นชุดๆละ 3 ถุงตามปริมาณรังสีที่กำหนด คือ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์

3.1.2.3 นำแต่ละถุงไปทำการฉายรังสีแต่ละปริมาณแบ่งเป็นการฉาย 3 ครั้ง

3.1.2.4 เมื่อทำการฉายรังสีเสร็จนำ EPDM ที่ได้แต่ละครั้ง ในแต่ละปริมาณรังสี ทั้ง 3 ครั้ง มาคลุกเคล้ารวมกัน

3.1.2.5 นำ EPDM ในข้อ 3.1.2.4 ในแต่ละปริมาณรังสี ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด 12x12 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Compression molding) ณ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงกด 2000 กิโลกรัม ตามรายละเอียดดังนี้

|              |   |      |
|--------------|---|------|
| อุ่นวัตถุดิบ | 5 | นาที |
| กดอัดขึ้นรูป | 4 | นาที |
| หล่อเย็น     | 5 | นาที |

นำแผ่น EPDM ที่ได้ใส่ถุงพร้อมติดฉลาก เพื่อนำไปทดสอบในขั้นตอนนี้ต่อไป

### 3.2 การทดสอบการไหลของ EPDM

#### 3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

##### 3.2.1.1 เครื่อง MELT FLOW INDEXER Model 10 Davenport

(Lloyd Instrument) with displacement transducer ห้องปฏิบัติการรีโอโลยี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



รูปที่ 3.4 MELT FLOW INDEXER Model 10 Davenport (Lloyd Instrument) with displacement transducer

##### 3.2.1.2 เครื่องชั่งความละเอียดสูง

##### 3.2.1.3 ถาดอะลูมิเนียม

#### 3.2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.2.1 เลือกอุณหภูมิและน้ำหนักที่ทำการทดสอบ เวลาในการอุ่นให้ความร้อน (preheat) เวลาที่จะตัดโพสิเมอร์แต่ละครั้ง ในการทดสอบนี้จะใช้น้ำหนักกดที่ 21.6 กิโลกรัม เวลา

ในการอุ่นให้ความร้อน 6 นาที เวลาในการตัดโพลีเมอร์แต่ละครั้งของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 เวลา 60, 120 และ 180 วินาที ส่วนนำวัสดุ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P เวลา 5 วินาที จำนวนที่ตัด 3 ครั้งทุกการทดสอบ

3.2.2.2 ปรับกระบอกทดสอบให้อยู่แนวตั้งโดยใช้ระดับน้ำ

3.2.2.3 ทำความสะอาดเครื่องมือ ให้ความร้อนกับกระบอกสุบจนได้อุณหภูมิที่ต้องการใส่หัวฉีดและแท่งลูกสูบ (piston) ลงไปจนสุดความลึกของกระบอกทดสอบ ให้ความร้อนต่อไปอีก 15 นาที จึงเริ่มทำการทดสอบ ในการทดสอบครั้งต่อไปไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนอีกก็ได้

3.2.2.4 เอาแท่งลูกสูบออกนำโพลีเมอร์ที่ฉายรังสีเตรียมไว้ประมาณ 5-8 กรัมเติมลงในกระบอกทดสอบโดยผ่านกรวย (funnel) เพื่อกันไม่ให้โพลีเมอร์เปื้อนหรือไหลออกนอกกระบอกทดสอบ

3.2.2.5 ใช้แท่งกด (charging tool) กดให้แน่นเพื่อไม่ให้มีฟองอากาศ จากนั้นใส่แท่งลูกสูบ และต้อน้ำหนักกดลงไป ให้ความร้อน 6 นาที การเอาโพลีเมอร์ออกจากกระบอกทดสอบต้องทำภายใน 4 นาทีแรกเท่านั้น

3.2.2.6 หลังจากเวลาในการให้ความร้อนครบแล้ว ใช้เกรียง (sample cut off tool) ตัดโพลีเมอร์ที่ไหลออกมาทิ้งพร้อมกับกดปุ่มเริ่มต้น โพลีเมอร์จะไหลออกมาตามเวลาที่กำหนด เมื่อมีสัญญาณเตือน ตัดโพลีเมอร์ทุกๆสัญญาณเตือนจนครบ 3 ครั้ง นำโพลีเมอร์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ถ้าโพลีเมอร์ที่ไหลออกมามีฟองอากาศต้องทำการทดลองใหม่อีกครั้ง

3.2.2.7 นำข้อมูลที่ได้มาป้อนลงในคอมพิวเตอร์ เพื่อจะคำนวณ โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{อัตราการไหล} = \frac{\text{น้ำหนักโพลีเมอร์ต่อการตัดหนึ่งครั้ง}}{\text{เวลาในการตัดหนึ่งครั้ง}} \times 600 \text{ (กรัม/10นาที)}$$

3.2.2.8 กดน้ำหนักใส่โพลีเมอร์ที่เหลือออกให้หมด เอาน้ำหนักแท่งลูกสูบ และหัวฉีดออก ทำความสะอาดกระบอกทดสอบ

Melt Flow Index (MFI) เป็นค่าที่บ่งถึงความสามารถในการไหลของพลาสติกหลอมเหลว ณ.อุณหภูมิหนึ่งโดยใช้น้ำหนักกดคงที่ (อุณหภูมิและน้ำหนักกดของพลาสติกแต่ละชนิดจะกำหนดในมาตรฐาน ASTM D1238<sup>[14]</sup> melt flow index แสดงค่าเป็น g/10min ตามด้วยอุณหภูมิ (°C)/น้ำหนัก (kg))



### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM

#### 3.3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.3.1.1 เครื่อง Universal Testing Machine (Instron Model 55R4502) จากบริษัท Instron Corp., Canton, Mass., U.S.A. ของห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



รูปที่ 3.5 Universal Testing Machine (Instron Model 55R4502) จากบริษัท Instron Corp.

#### 3.3.1.2 เครื่องตัดโพลีเมอร์เป็นรูปคัมเบลล์ Die cutting machine



รูปที่ 3.6 Die cutting machine

### 3.3.1.3 ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดความหนา

## 3.3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.2.1 นำ EPDM ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ โดยชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จะเป็นมาตรฐาน ASTM D638<sup>[15]</sup>

3.3.2.2 วัดความหนาบริเวณ gauge length สามจุด พร้อมทั้งเฉลี่ยหาค่าความหนา

3.3.2.3 จับชิ้นทดสอบด้วยหัวจับให้แน่น เพื่อไม่ให้เกิดการบิดตัวในขณะทำการทดสอบ

3.3.2.4 ดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที รายงานผลเป็นแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด( $N/mm^2$  และ MPa) จนชิ้นทดสอบขาดคุณสมบัติด้านทานแรงดึงแล้วบันทึกผล

$$\text{Tensile strength} = \frac{F}{A}$$

โดย  $F =$  แรงดึงที่ใช้กับชิ้นทดสอบ (N)

$A =$  พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด ( $mm^2$ )

$$\text{Elongation at break} = \frac{100 \times (L - L_0)}{L_0}$$

โดย  $L =$  ระยะชิ้นทดสอบถูกยึดตัวจนขาด (mm)

$L_0 =$  ระยะก่อนทำการทดสอบ (mm)

โมดูลัส (modulus) หมายถึง ความเครียด (stress) ของชิ้นทดสอบเมื่อยืดออก ค่าโมดูลัสหาได้ โดยการบันทึกแรงดึงขณะที่ชิ้นทดสอบถูกดึงยืดออก โดยค่าความยืด (elongation) ที่ 100%, 300% และ 500% เป็นต้น

### 3.4 การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM

#### 3.4.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.4.1.1 เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle)

3.4.1.2 ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 2000 มิลลิลิตร

3.4.1.3 ท่อคอนเดนเซอร์ (Reflux condenser)

3.4.1.4 ตัวยึดจับอุปกรณ์สำหรับ Reflux

3.4.1.5 ตู้อบ Hot air dryer

3.4.1.6 กรรวย Sieve 100 mesh ขนาด 1.5x1.5x1.5 ลบ.ซม.

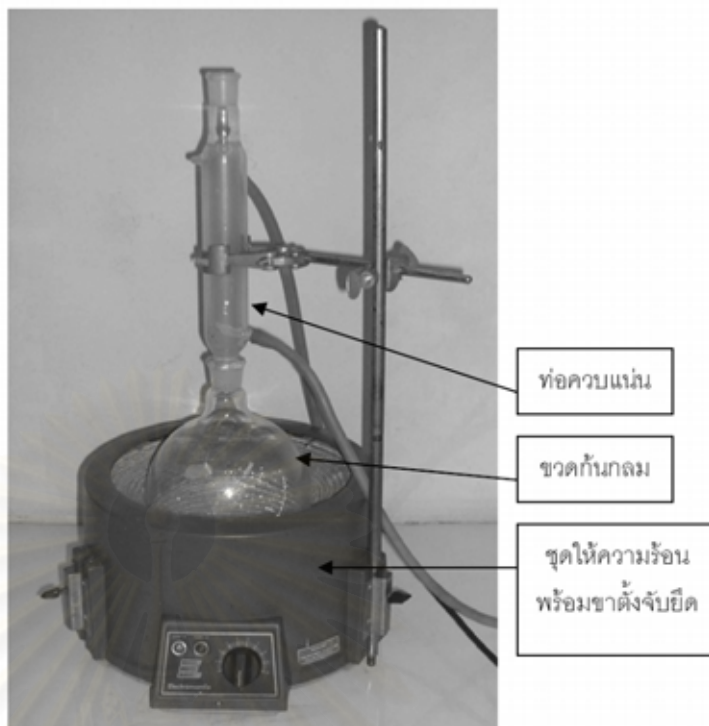
3.4.1.7 บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.1.8 สายยาง

3.4.1.9 สารละลายโทลูอีน Toluene AR-grade

3.4.1.10 สารละลายไซลีน Xylene AR-grade

3.4.1.11 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบสกัดส่วนความเป็นเจล

### 3.4.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.2.1 ชั่งน้ำหนักถ่วง Sieve พร้อมติดฉลากและบันทึกค่า

3.4.2.2 ตัดแผ่น EPDM ที่ผ่านการฉายรังสีแล้วให้เป็นชิ้นเล็กๆพร้อมทั้งนำมาชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 1 กรัมต่อถ่วง Sieve และบันทึกค่า

3.4.2.3 นำ EPDM จากข้อ 3.1.2.4 บรรจุในถ่วง Sieve

3.4.2.4 ผสมสารละลายโทลูอีนและไซลีน อัตราส่วน 1 :1 ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ลงในขวดกั้นกลม

3.4.2.5 นำ Sieve จากข้อ 3.4.2.3 บรรจุลงในขวดกั้นกลม พร้อมทั้งติดตั้ง ชุดอุปกรณ์ทดสอบสกัดส่วนความเป็นเจล เปิดสวิตช์ และ Reflux ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

3.4.2.6 นำ Sieve ออกจากขวดกั้นกลม พร้อมทั้งนำไปกำจัดความชื้น ด้วยการนำเข้าไปอบในตู้อบ Hot air dryer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

3.4.2.7 นำน้ำหนักของ EPDM ก่อน Reflux และหลัง Reflux มาคำนวณหา สัดส่วนความเป็นเจล

$$\% \text{Gel Content} = (W_2/W_1) \times 100$$

โดย  $W_1 =$  น้ำหนักก่อน Reflux (g)

$W_2 =$  น้ำหนักหลัง Reflux (g)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการศึกษาการไหลของ EPDM

จากการวิจัยในหัวข้อที่ 3.2 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการไหลของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ภายหลังจากฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.1 และ 4.2

จากผลการวิจัยในการหาค่าดัชนีการไหลของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ภายหลังจากฉายรังสีที่ ปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.1

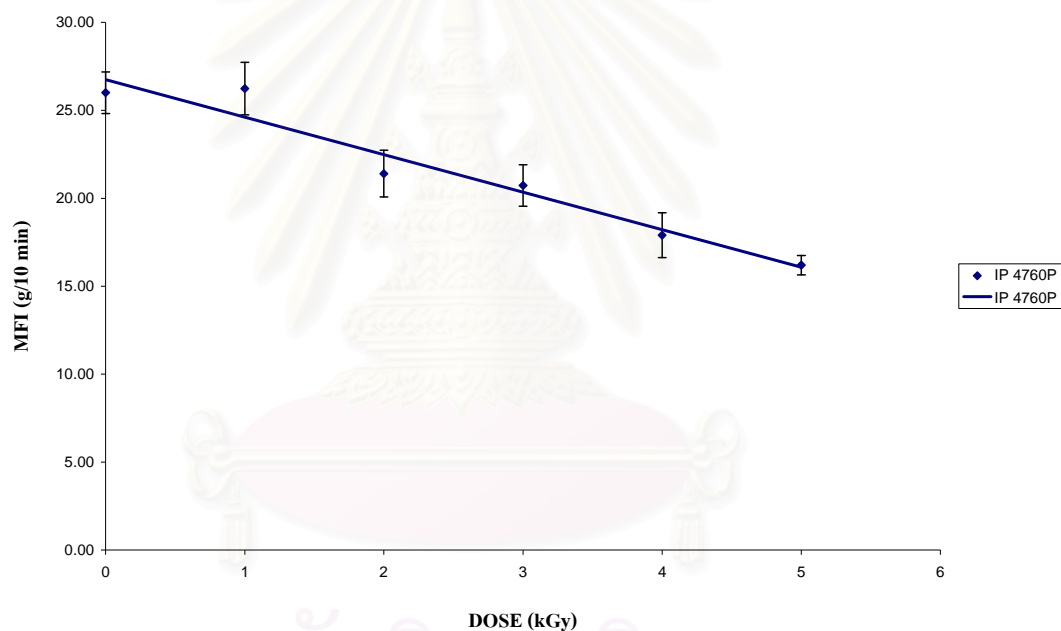
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ที่  $21.6 \text{ Kg}/190^{\circ}\text{C}$  ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | ดัชนีการไหล (กรัม/10 นาที) | เฉลี่ย (กรัม/10 นาที) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 0                       | 25.68                      | $26.00 \pm 1.18$      |
|                         | 26.40                      |                       |
|                         | 25.92                      |                       |
| 1                       | 25.68                      | $26.24 \pm 1.49$      |
|                         | 25.92                      |                       |
|                         | 27.12                      |                       |
| 2                       | 21.36                      | $21.40 \pm 1.33$      |
|                         | 21.24                      |                       |
|                         | 21.60                      |                       |
| 3                       | 20.2                       | $20.73 \pm 1.2$       |
|                         | 20.6                       |                       |
|                         | 21.4                       |                       |
| 4                       | 18.6                       | $17.90 \pm 1.27$      |
|                         | 18.2                       |                       |
|                         | 16.9                       |                       |

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ที่ 21.6 Kg/190°C ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P (ต่อ)

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | ดัชนีการไหล (กรัม/10 นาที) | เฉลี่ย (กรัม/10 นาที) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 5                       | 17.5                       | 16.20 ± 0.55          |
|                         | 16.9                       |                       |
|                         | 16.2                       |                       |

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

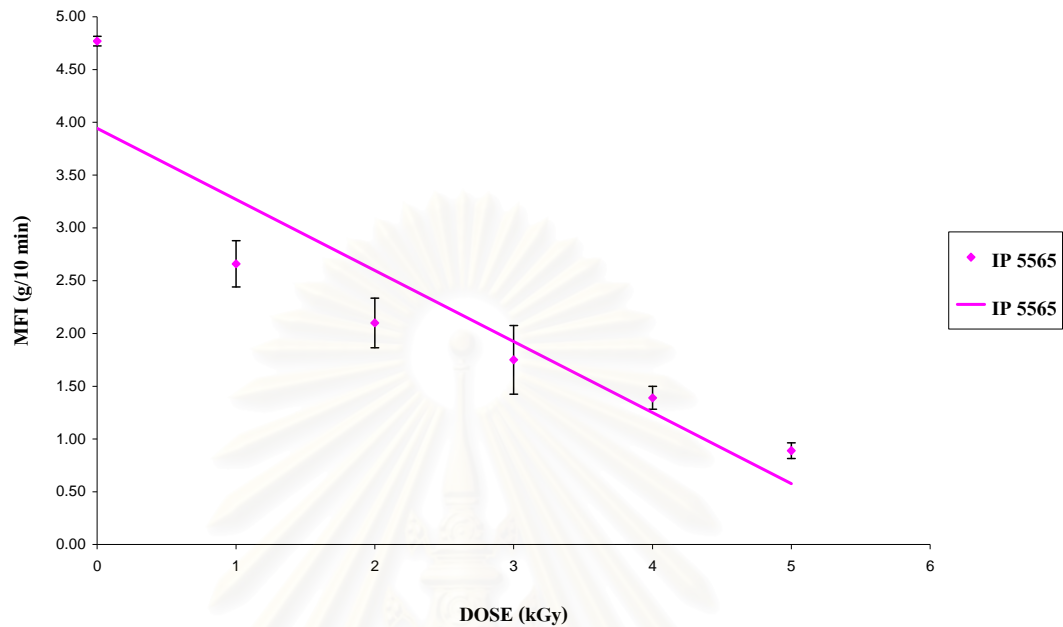
จากผลการวิจัยในการหาค่าดัชนีการไหลของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ภายหลังการฉายรังสีที่ กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ที่  $21.6 \text{ Kg}/190^{\circ}\text{C}$  ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | ดัชนีการไหล (กรัม/10 นาที) | เฉลี่ย (กรัม/10 นาที) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 0                       | 4.81                       | $4.77 \pm 0.05$       |
|                         | 4.78                       |                       |
|                         | 4.72                       |                       |
| 1                       | 2.89                       | $2.66 \pm 0.22$       |
|                         | 2.63                       |                       |
|                         | 2.46                       |                       |
| 2                       | 2.37                       | $2.10 \pm 0.24$       |
|                         | 1.95                       |                       |
|                         | 1.97                       |                       |
| 3                       | 2.11                       | $1.75 \pm 0.33$       |
|                         | 1.64                       |                       |
|                         | 1.49                       |                       |
| 4                       | 1.51                       | $1.39 \pm 0.11$       |
|                         | 1.35                       |                       |
|                         | 1.30                       |                       |
| 5                       | 0.97                       | $0.89 \pm 0.07$       |
|                         | 0.83                       |                       |
|                         | 0.86                       |                       |



จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

#### 4.2 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM

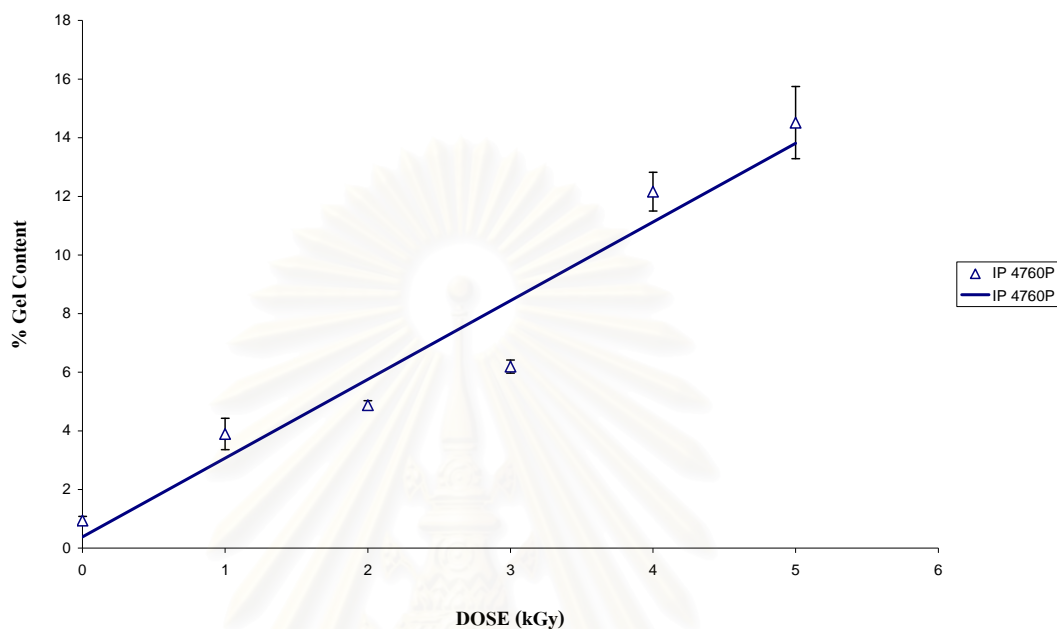
จากการวิจัยหัวข้อที่ 3.4 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 แสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

จากผลการวิจัยในการหาค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ภายหลังจากการฉายรังสีที่ กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | สัดส่วนเจล (%) |          | เฉลี่ย (%)         |
|-------------------------|----------------|----------|--------------------|
| 0                       | 0.89856        | 1.12085  | 0.94575 ± 0.13588  |
|                         | 0.71457        | 0.87450  |                    |
|                         | 0.98745        | 1.07856  |                    |
| 1                       | 3.75895        | 3.12569  | 3.89475 ± 0.53532  |
|                         | 3.89478        | 3.58795  |                    |
|                         | 4.87564        | 4.12547  |                    |
| 2                       | 4.78950        | 4.68856  | 4.88012 ± 0.15298  |
|                         | 4.89458        | 5.02458  |                    |
|                         | 5.12456        | 4.75895  |                    |
| 3                       | 5.89780        | 6.12545  | 6.19498 ± 0.22424  |
|                         | 5.99985        | 6.57895  |                    |
|                         | 6.25478        | 6.01589  |                    |
| 4                       | 12.45789       | 13.25479 | 12.15776 ± 0.65896 |
|                         | 11.24548       | 11.47895 |                    |
|                         | 12.25478       | 12.25469 |                    |
| 5                       | 14.05789       | 12.22160 | 14.51515 ± 1.23203 |
|                         | 15.21445       | 16.12544 |                    |
|                         | 15.21458       | 14.25692 |                    |

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสี กับ สัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

จากผลการวิจัยในการหาค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ภายหลังจากฉายรังสีที่ กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.4

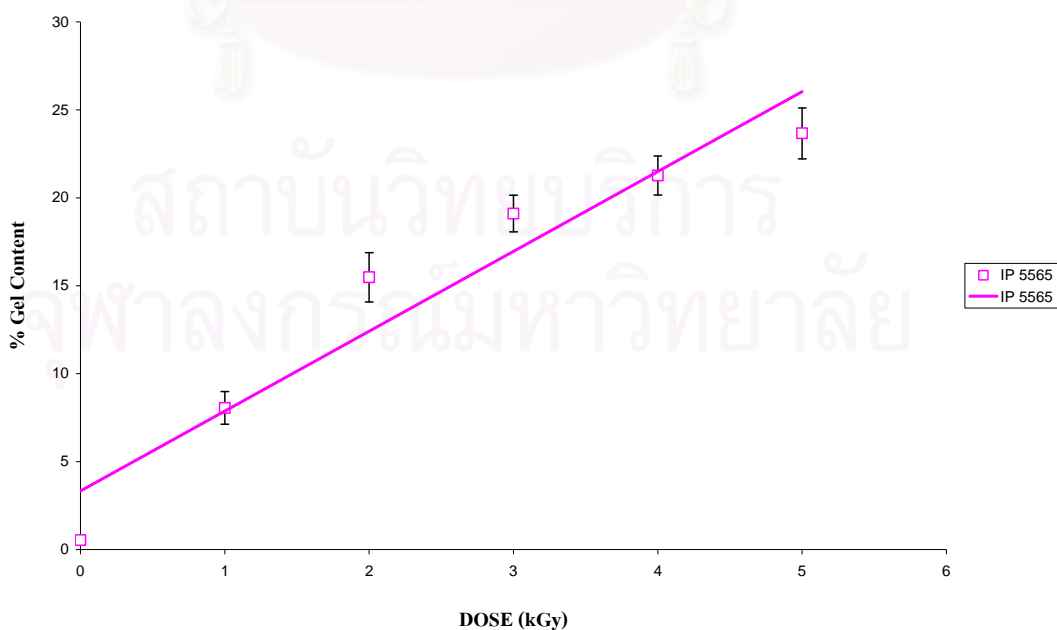
ตารางที่ 4.4 การศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | สัดส่วนเจล (%) |         | เฉลี่ย (%)        |
|-------------------------|----------------|---------|-------------------|
| 0                       | 0.45789        | 0.58974 | 0.53872 ± 0.07750 |
|                         | 0.47892        | 0.47895 |                   |
|                         | 0.54789        | 0.67895 |                   |
| 1                       | 7.22556        | 7.14578 | 8.05587 ± 0.92130 |
|                         | 8.25468        | 9.50005 |                   |
|                         | 7.25455        | 8.95462 |                   |

ตารางที่ 4.4 การศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการฉายรังสี EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 (ต่อ)

| ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์) | สัดส่วนเจล (%) |          | เฉลี่ย (%)         |
|-------------------------|----------------|----------|--------------------|
| 2                       | 16.44587       | 15.21454 | 15.48144 ± 1.40768 |
|                         | 17.22546       | 14.25478 |                    |
|                         | 16.54789       | 13.20012 |                    |
| 3                       | 18.54698       | 18.54685 | 19.10744 ± 1.04711 |
|                         | 19.26855       | 20.23562 |                    |
|                         | 20.23154       | 17.25466 |                    |
| 4                       | 22.25479       | 22.02365 | 21.26982 ± 1.10526 |
|                         | 20.21354       | 21.02457 |                    |
|                         | 19.54789       | 22.55446 |                    |
| 5                       | 24.54789       | 25.23564 | 23.66281 ± 1.44865 |
|                         | 23.56899       | 25.01258 |                    |
|                         | 22.35698       | 21.25479 |                    |

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสี กับ สัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

#### 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM

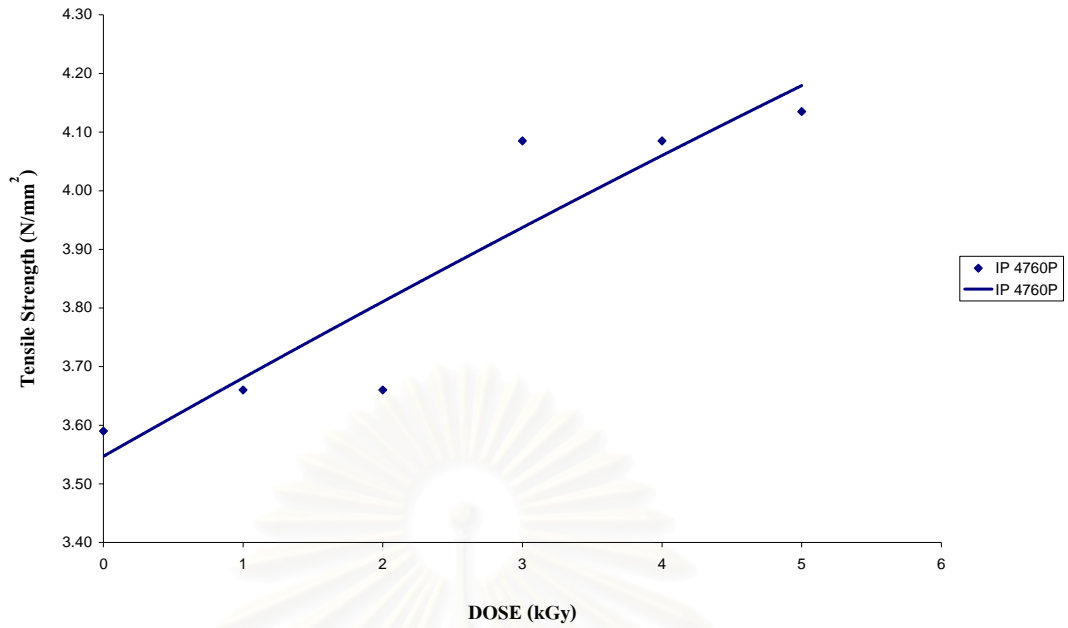
จากการวิจัยที่ 3.3 เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ภายหลังจากฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

จากผลการวิจัยในการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ภายหลังจากการฉายรังสีที่ ปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

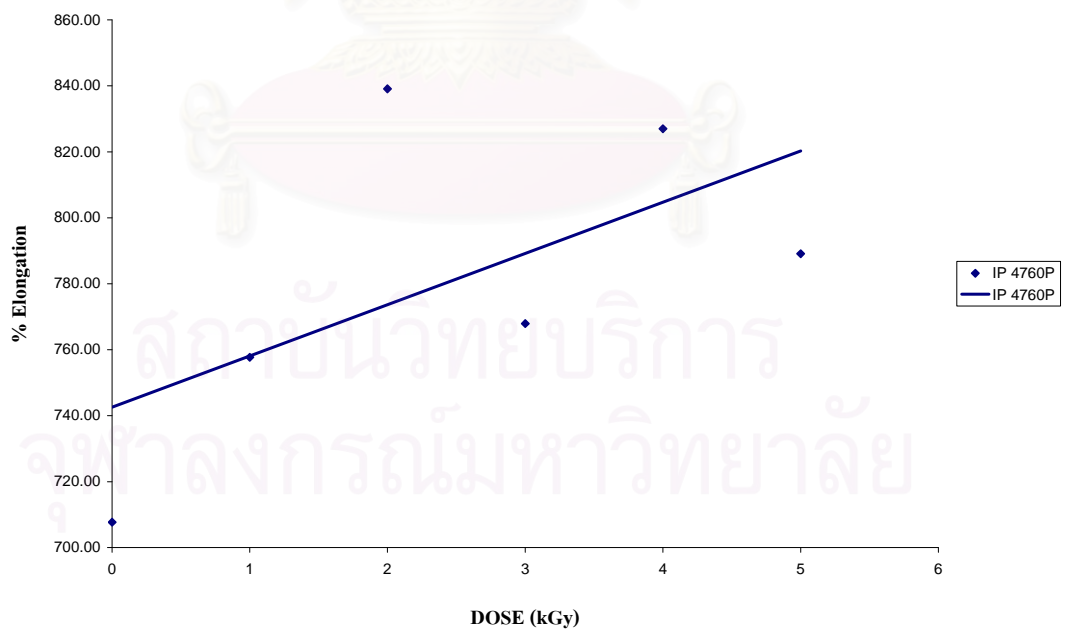
| 4760P | Load At Max Load<br>(N) | Stress At Max Load<br>(Tensile Strength)<br>(MPa) | Stress At Auto Break<br>(MPa) | Modulus<br>(MPa) | Stress At offset yield<br>(MPa) | Maximum Strain<br>(%) |
|-------|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 0     | 43.71                   | 3.59                                              | 3.59                          | 8.97             | 0.69                            | 707.70                |
| 1     | 43.48                   | 3.66                                              | 3.66                          | 9.00             | 0.69                            | 757.69                |
| 2     | 43.68                   | 3.66                                              | 3.66                          | 9.06             | 0.70                            | 839.09                |
| 3     | 49.41                   | 4.09                                              | 4.09                          | 8.79             | 0.78                            | 767.95                |
| 4     | 49.25                   | 4.09                                              | 4.09                          | 9.06             | 0.81                            | 826.99                |
| 5     | 50.13                   | 4.14                                              | 4.14                          | 8.92             | 0.80                            | 789.08                |

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาด ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาด ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

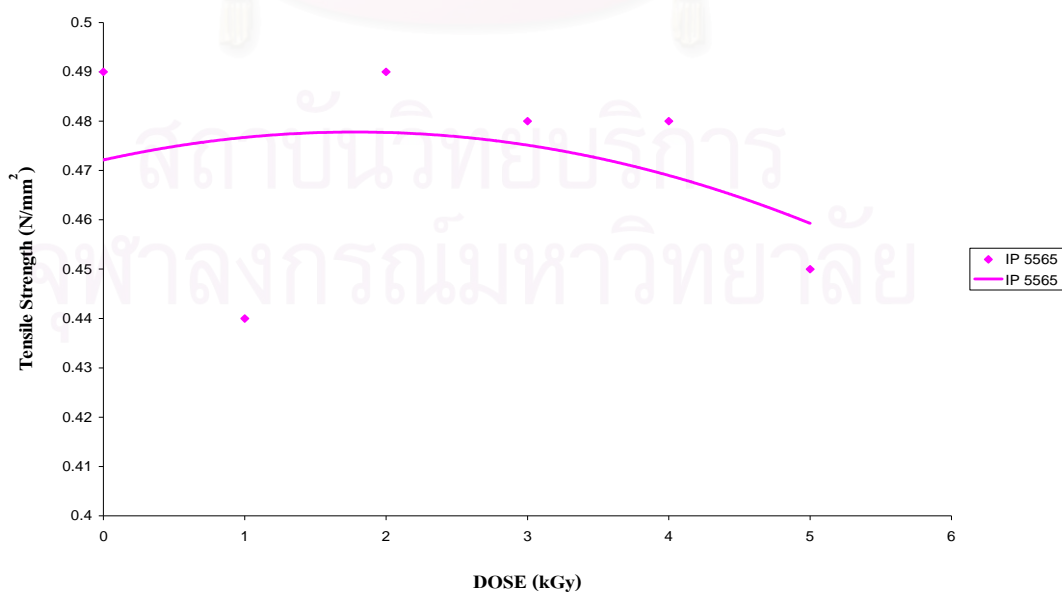
จากผลการวิจัยในการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ภายหลังจากการฉายรังสีที่ กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ ผลที่ได้แสดงตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติเชิงกล EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

| 5565 | Load At Max Load<br>(N) | Stress At Max Load<br>(Tensile Strength)<br>(MPa) | Stress At Auto Break<br>(MPa) | Modulus<br>(MPa) | Stress At offset yield<br>(MPa) | Maximum Strain<br>(%) |
|------|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 0    | 5.52                    | 0.48                                              | 0.27                          | 2.49             | 0.19                            | 194.87                |
| 1    | 5.56                    | 0.46                                              | 0.26                          | 2.22             | 0.17                            | 219.23                |
| 2    | 5.77                    | 0.48                                              | 0.19                          | 2.36             | 0.18                            | 293.59                |
| 3    | 6.12                    | 0.48                                              | 0.21                          | 2.17             | 0.20                            | 301.28                |
| 4    | 6.32                    | 0.48                                              | 0.22                          | 2.29             | 0.18                            | 196.16                |
| 5    | 5.68                    | 0.42                                              | 0.23                          | 1.97             | 0.15                            | 278.21                |

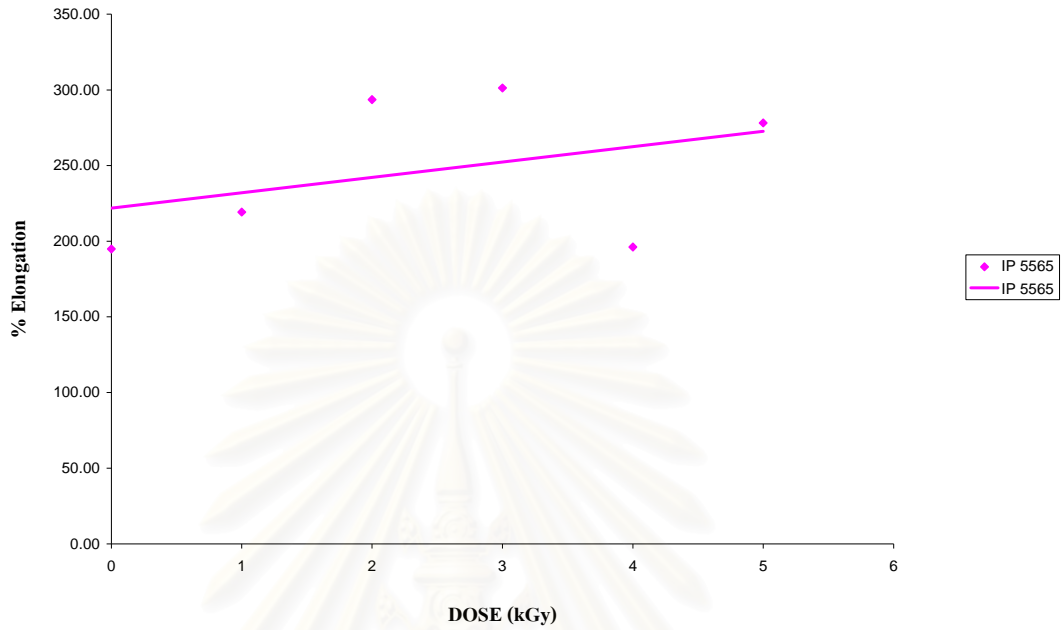
จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่

4.7



รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานแรงดึง ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

จากผลการวิจัยนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาดของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 กับปริมาณรังสีที่ระดับ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ แสดงดังรูปที่ 4.8



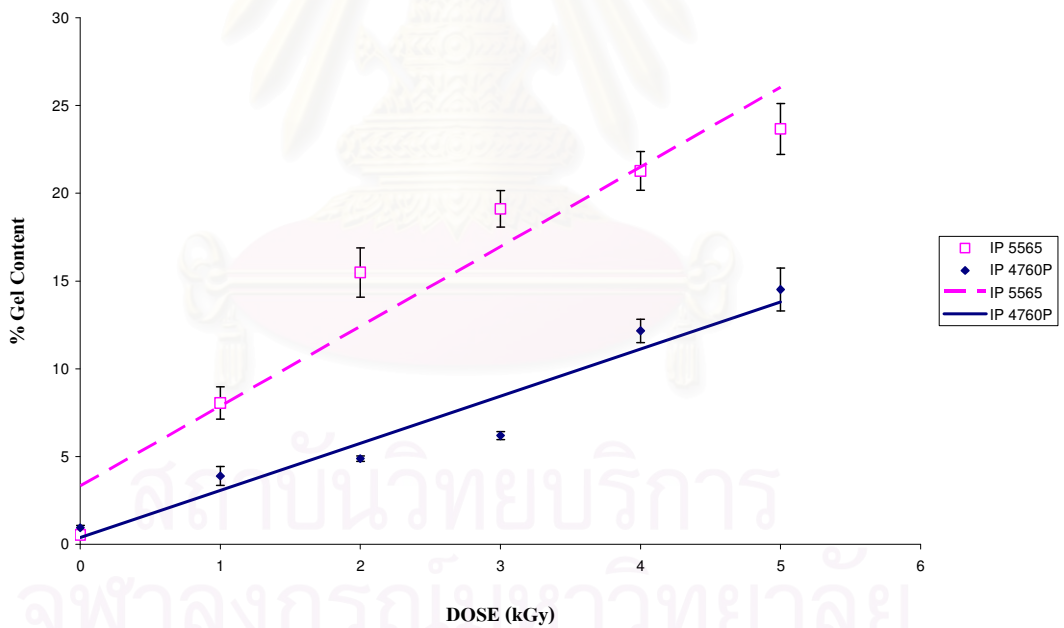
รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีกับความต้านทานต่อการยืดจนขาด ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565



สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM

สัดส่วนความเป็นเจลของ EPDM หลังจากผ่านกระบวนการฉายรังสี หาได้จากสัดส่วนน้ำหนักสุดท้ายของ EPDM ภายหลังจากละลายในตัวทำละลายด้วย โทลูอีน กับ ไชลีน ซึ่งสามารถทำละลายได้ทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ในสัดส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส กับน้ำหนักก่อนการทำละลายของ EPDM สัดส่วนความเป็นเจลที่ได้หมายถึง โครงสร้างภายในโพลีเมอร์ เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โพลีเมอร์ระหว่างกัน (crosslinking) จากรังสีแกมมา โดยผลที่ได้ดังในรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนความเป็นเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรังสีแกมมาทำให้เกิดการครอสลิงค์ของ EPDM โดยการครอสลิงค์ส่วนใหญ่จะเกิดกับโครงสร้างอสัณฐาน(amorphous) และรอยต่อของส่วนที่เป็นอสัณฐานกับส่วนที่เป็นผลึก(crytalline)



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าสัดส่วนความเป็นเจล ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ IP 5565

หากพิจารณาถึงในระดับโครงสร้างของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 มีโครงสร้างทั้งหมดเป็นอสัณฐาน ที่มีโครงสร้างค่อนข้างยุ่งเหยิงไม่เป็นระเบียบ เป็นผลให้โอกาสที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลได้มาก ทำให้สัดส่วนเจลมีค่าที่สูงกว่าชนิด EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก(semi crystalline) คือมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานและเป็นผลึกรวมกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าการครอสลิงค์ส่วนใหญ่จะเกิดกับ โครงสร้างอสัณฐานทำให้สัดส่วนเจลของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P เกิดขึ้นได้น้อยกว่า EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 แต่ EPDM ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มในการเกิดเจลที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี

อีกส่วนที่มีผลต่อการเกิดการครอสลิงค์คือองค์ประกอบของ EPDM เนื่องจาก EPDM เป็น โคลโพลีเมอร์ซึ่งมีปริมาณองค์ประกอบภายในที่แตกต่างที่สำคัญคือหมู่ไดอิน ซึ่งมีพันธะคู่และสามารถเกิดการครอสลิงค์ได้ โดย EPDM ที่ใช้เป็น EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 มีปริมาณหมู่ไดอิน 7.5% โดยน้ำหนัก และ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P มีปริมาณหมู่ไดอิน 5.0% ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับปริมาณหมู่ไดอินในองค์ประกอบ EPDM

จากข้อมูลข้างต้นพอจะสรุปความสัมพันธ์ของสัดส่วนเจลกับปริมาณรังสีแกมมาได้ว่า

- สัดส่วนเจลเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น
- EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ซึ่งมีปริมาณไดอินที่สูงกว่า EPDM ชนิด

NORDEL IP 4760P พบว่า EPDM ที่มีหมู่ไดอินสูงสามารถที่จะเกิดการครอสลิงค์ได้ดี

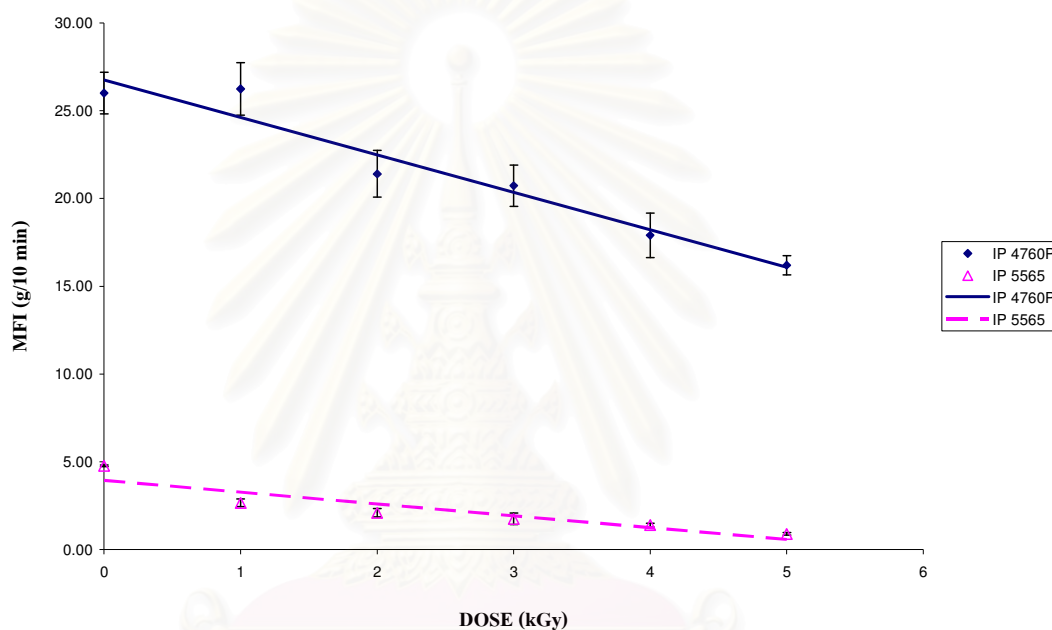
- โครงสร้างที่เป็นอสัณฐานสามารถที่จะเกิดการครอสลิงค์ ได้สูงกว่าพวกกึ่งผลึก

จากข้อสรุปทั้ง 3 ข้อล้วนแต่มีผลต่อการเกิดการครอสลิงค์ทั้งหมด หากมองจากคุณสมบัติของวัสดุ EPDM จะพบว่าปริมาณของไดอินที่ต่างกัน และโครงสร้างที่แตกต่างทำให้ผลของสัดส่วนเจลที่ได้ภายหลังการฉายรังสีแกมมาแตกต่างกัน แต่ไม่ชัดเจนว่าปริมาณไดอินกับผลของโครงสร้างสิ่งใดมีผลมากกว่ากัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 สรุปผลการศึกษาการไหลของEPDM

การหาค่าดัชนีการไหลของ EPDM ทำได้โดยการใช้เครื่อง Melt Flow Indexer โดยการทดสอบใช้แรงกดที่ 21.6 กิโลกรัม อุณหภูมิที่ 190 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีการไหลของ EPDM ทั้ง 2 ชนิด มีค่าที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และโครงสร้างที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยภายหลังจากการรังสีแกมมาพบว่า EPDM ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มของค่าดัชนีการไหลที่ลดลง อันเนื่องมาจากการเกิดการครอสลิงก์กันระหว่างโมเลกุลทำให้ความอิสระของสายโซ่โพลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 5.2 แผนภูมิแสดงปริมาณรังสีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ EPDM ชนิด

NORDEL IP 4760P และ IP 5565

จากรูปที่ 5.2 เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าดัชนีการไหลของ EPDM มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากรังสีแกมมา ทำให้เกิดการครอสลิงก์ขึ้น แต่ปริมาณรังสีที่ไม่สูงมากจะทำให้เกิดการครอสลิงก์แค่บางส่วน หากพิจารณา EPDM แต่ละชนิดจะพบว่า EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P จะมีค่าดัชนีการไหลที่ลดลงได้ชัดเจนกว่า EPDM ชนิด NORDEL IP 5565

ค่าดัชนีการไหลนี้จะเป็นผลมาจากความอิสระของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งพิจารณาในโครงสร้าง EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ที่มีค่าดัชนีการไหลที่ลดลงชัดเจน มีผลอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นกิ่งผลึก ที่โครงสร้างมีความแข็งแรงที่ค่อนข้างสูงมีความอิสระ ในโครงสร้างน้อย เมื่อเกิดการครอสลิงก์ขึ้นทำให้ความอิสระของโซ่ยังลดลงไปมาก เป็นผลให้ดัชนีการไหลลดลง

ชุดเงิน EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 มีโครงสร้างที่เป็นอสังฐาน ซึ่งมีความอิสระของโซ่ที่มากกว่า EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P ทำให้อัตราการลดลงของค่าดัชนีการไหล มีค่าน้อยกว่า EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P

### 5.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM

#### 5.3.1 ความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.5 และ 4.7 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 พบว่า ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากขึ้น ซึ่งการเชื่อมโยงเป็นเหตุให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น การเกิดครอสลิงค์บางส่วนไม่ได้มากจนทำให้ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P แข็งจนเปราะจึงเห็นเพียงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเท่านั้น ส่วน EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 ผลที่ได้มีการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงในภายหลัง เนื่องมาจากการเกิดครอสลิงค์ของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 มีปริมาณสูงจนทำให้ความเปราะของชิ้นตัวอย่างมากขึ้น เป็นผลให้ใช้แรงดึงที่ลดลง ทั้งนี้หากพิจารณาตารางที่ 4.6 ค่าแรงกระทำสูงสุด (Stress At Max Load) กับค่าแรงกระทำที่จุดขาด (Stress At Auto Break) มีค่าที่แตกต่างกันมาก ซึ่งหากมองที่ระดับโครงสร้างโมเลกุลของ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 มีโครงสร้างที่เป็นอสังฐานทั้งหมดวิเคราะห์ออกมาได้ว่าเกิดการครอสลิงค์บางส่วนในโครงสร้างโมเลกุลของ EPDM โดยที่แรงกระทำสูงสุดจะทำลายพันธะของครอสลิงค์ที่เกิดขึ้นก่อน และเมื่อพันธะถูกทำลายหมดแล้ว โครงสร้างจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงจนขาดในที่สุด ซึ่งสาเหตุที่แรงกระทำที่จุดขาดนี้จะใช้แรงน้อยกว่าในช่วงแรกเนื่องจากไม่มีพันธะระหว่างโซ่โมเลกุล แรงนี้เพียงพอต่อการทำลายโครงสร้างเท่านั้น

ส่วน EPDM ชนิด IP 4760P ผลที่ได้ในตารางที่ 4.5 มีพบว่าค่าแรงกระทำสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงกระทำที่จุดขาด ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง EPDM ชนิด IP 4760P เป็นการจัดเรียงตัวแบบกึ่งผลึก ซึ่งส่วนที่เป็นผลึกจะมีความแข็งแรงมากจึงต้องใช้แรงกระทำที่ค่อนข้างสูงในการทำลายโครงสร้าง ทำให้การเชื่อมโยงโมเลกุลถูกทำลายไปพร้อมกับการทำลายโครงสร้างในโมเลกุล จึงต้องใช้แรงที่เท่ากันจนขึ้นทดสอบขาด

### 5.3.2 ค่าความยืด

จากรูปที่ 4.6 และ 4.8 แสดงค่าความยืดของ EPDM ชนิด NORDEL IP 4760P และ EPDM ชนิด NORDEL IP 5565 พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความยืดมีค่าที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน จะใช้รังสีแกมมาเพียงปริมาณไม่สูงมาก ไม่ได้ทำให้โครงสร้างหลักของ EPDM ทั้ง 2 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นคุณสมบัติพื้นฐานอันเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของ EPDM คือ ความเป็นยาง ที่มีความยืดหยุ่นที่สูง ได้รับการเพิ่มคุณสมบัติจากการทำให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน เป็นผลให้ค่าความยืดที่ได้เพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับทฤษฎีการเกิดครอสลิงค์ทั่วไป เมื่อปริมาณครอสลิงค์สูงๆจะทำให้ชิ้นงานมีระยะยืดที่ลดลงเนื่องจากโมเลกุลมีความแข็งเพิ่มขึ้น

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

EPDM ที่ทำการศึกษาพบว่าเกิดการครอสลิงค์บางส่วนไม่ได้โดดเด่นเรื่องค่าความต้านทานแรงดึง แต่โดดเด่นในด้านรีโอโลยี (Rheology) ซึ่งการใช้งานที่จะมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากคือการใช้งานช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) เพราะค่าดัชนีการไหล (MFI) ที่เปลี่ยนแปลงสูงมาก หากไปทำการผสมกับวัสดุพวก โพลีเอทิลีน หรือ โพลีโพรพิลีน จะสามารถที่จะขึ้นรูปที่หลากหลายได้ เนื่องจากค่าดัชนีการไหลยิ่งต่ำจะยิ่งขึ้นรูปได้ดี แต่ต้องใช้กับเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูง กำลังต้องสูง ซึ่งเงินลงทุนต้องสูงงอีกเช่นกัน ค่าที่เด่นอีกค่าคือค่า green strength ที่เป็นค่าที่บอกความสามารถในการคงตัวในระหว่างการขึ้นรูปในขณะที่เกิดการครอสลิงค์ยังไม่สมบูรณ์ มีค่าสูง ซึ่งสามารถที่จะออกแบบผลิตภัณฑ์ ที่มีรูปแบบซับซ้อนและการขึ้นรูปที่อาศัยเทคนิคอื่น ๆ ได้ เช่น การขึ้นรูปแบบฉีดที่มีแม่พิมพ์ ที่ออกแบบแม่พิมพ์ซับซ้อน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] V. DAKIN, Elastic Properties of Radiation-crosslinked Block- Copolymers, Radiat Phys. Chem. 45, 5(1995): 715-718.
- [2] N.G.Salleh, H.J. Gl.asel, R. Mehnert, Development of hard materials by radiation curing technology, Radiation Physics and Chemistry. 63(2002): 475-479.
- [3] J. Bika, W. G”uszewskib, W.M. Rzymyskia, Z.P. Zag Orskib, EB radiation crosslinking of elastomers, Radiation Physics and Chemistry. 67(2003):421-423,
- [4] Robert S. Maxwell, Rebecca Cohenour, William Sung, David Solyom, Mogon Patel, The effects of  $\gamma$ -radiation on the thermal, mechanical, and segmental dynamics of a silica filled, room temperature vulcanized polysiloxane rubber, PolymerDegradation and stability. 80(2003):433-450.
- [5] Billmeyer, F.W., Textbook of Polymer Science, pp.14-18, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [6] Spink, J. W. T., and R. J. Wood. An Introduction to Radiation Chemistry. 2<sup>nd</sup> ed, New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [7] Jean-Michel Charrier. Polymeric Material and Processing. New York: Hanser 1990.
- [8] A. D. Jenkins. Progress in Polymer Science, Oxford: Pergamon Press, 1990.
- [9] Wood, R.J. and Alexei k. Pikaev. Applied Radiation Chemistry: radiation processing. United States: John Wiley & Sons, 1994.
- [10] พิริยธร สุวรรณมาลา และ เกศินี เหมวิเชียร. นิวเคลียร์ปริทัศน์. ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2547.
- [11] Danno, A., Modification of Plastics by Crosslinking and Grafting. Report Paper of the Takasaki Radiation Chemistry Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, 1970.
- [12] Hitoshi Yamaoka. Radiation Chemistry of Polymers. UNDP/IAEA/RCA Regional Training Course on Radiation Chemistry Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment. JAERI, 1991.
- [13] ธวัชชัย อธิธิพนชนกร. การทำวัสดุโพลีเอทิลีนหดรตัวได้ด้วยความร้อนโดยการฉายรังสีแกมมา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

- [14] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method For Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. ASTM D1238, 1999.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic. ASTM D638, 2001.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลวัตถุดิบ

Technical Information

**NORDEL IP 4760P**

Hydrocarbon Rubber

NORDEL™ IP 4760P Hydrocarbon Rubber is a semi-crystalline, ethylene-propylene-diene (EPDM) terpolymer. The polymer's unique bimodal ethylene distribution provides a balance of processing characteristics not seen in other semi-crystalline EPDMs. NORDEL IP 4760P provides better low temperature performance and higher green strength compared to a competitive control polymer.

**Main****Characteristics**

- Semi-crystalline
- Medium diene
- Bimodal ethylene distribution
- Balance of low temperature properties and high green strength
- Complies with U.S. FDA 21 CFR 177.2600, U.S. FDA 21 CFR 177.1520,<sup>(1)</sup> U.S. FDA 21 CFR 175.105,<sup>(2)</sup> U.S. FDA 21 CFR 177.1210. Consult the regulations for complete details.

**Applications**

- Extruded profiles
- Hoses

**Properties<sup>(3)</sup>**

| Typical Polymer                    | Test Method | Value   |
|------------------------------------|-------------|---------|
| Mooney Viscosity, ML 1 + 4 @ 125°C | ASTM D 1646 | 60      |
| Polymer Composition, mass %        |             |         |
| Ethylene                           | ASTM D 3900 | 67.5    |
| Propylene                          | ASTM D 3900 | 27.5    |
| Ethylidenenorbornene               | ASTM D 6047 | 5.0     |
| Molecular Weight Distribution      | Dow Method  | Medium  |
| Product Density, g/cc              | ASTM D 297  | 0.87    |
| Product Form                       |             | Pellets |

- (1) Can be used in contact with all foods except water in oil emulsions, high or low fat, and low moisture fats and oil.  
 (2) Adhesives only.  
 (3) These are typical properties only and are not to be regarded as sales specifications.

**Storage and Handling**

The quality of EPDM products may be affected by exposure to artificial or natural light. This product should be stored indoors in its original packaging and out of direct sunlight.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Technical Information

**NORDEL IP 5565**

## Hydrocarbon Rubber

NORDEL™ IP 5565 Hydrocarbon Rubber is an amorphous, high diene ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM) grade designed for extruded applications requiring fast cure rates. It is ideally suited for continuously cured dense and sponge profiles. Molded applications will also benefit from the fast cure response, allowing shorter cycle times.

**Main Characteristics**

- Amorphous
- High diene
- High molecular weight
- Fast cure
- Good low temperature properties
- Complies with U.S. FDA 21 CFR 175.105.<sup>(1)</sup>
- Consult the regulations for complete details.

**Applications**

- Extruded profiles/weather strip
- Sponge profiles

**Properties<sup>(2)</sup>**

| Typical Polymer                    | Test Method | Value       |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Mooney Viscosity, ML 1 + 4 @ 125°C | ASTM D 1646 | 65          |
| Polymer Composition, mass %        |             |             |
| Ethylene                           | ASTM D 3900 | 50          |
| Propylene                          | ASTM D 3900 | 42.5        |
| Ethylidenenorbornene               | ASTM D 6047 | 7.5         |
| Molecular Weight Distribution      | Dow Method  | Medium      |
| Product Density, g/cc              | ASTM D 297  | 0.86        |
| Residual Transition Metal, ppm     | Dow Method  | 10 maximum  |
| Ash Content, mass %                | ASTM D 5667 | 0.1 maximum |
| Total Volatiles, mass %            | Dow Method  | 0.4 maximum |
| Product Form                       |             | 25 kg Bales |

(1) Adhesives only.

(2) These are typical properties only and are not to be regarded as sales specifications.

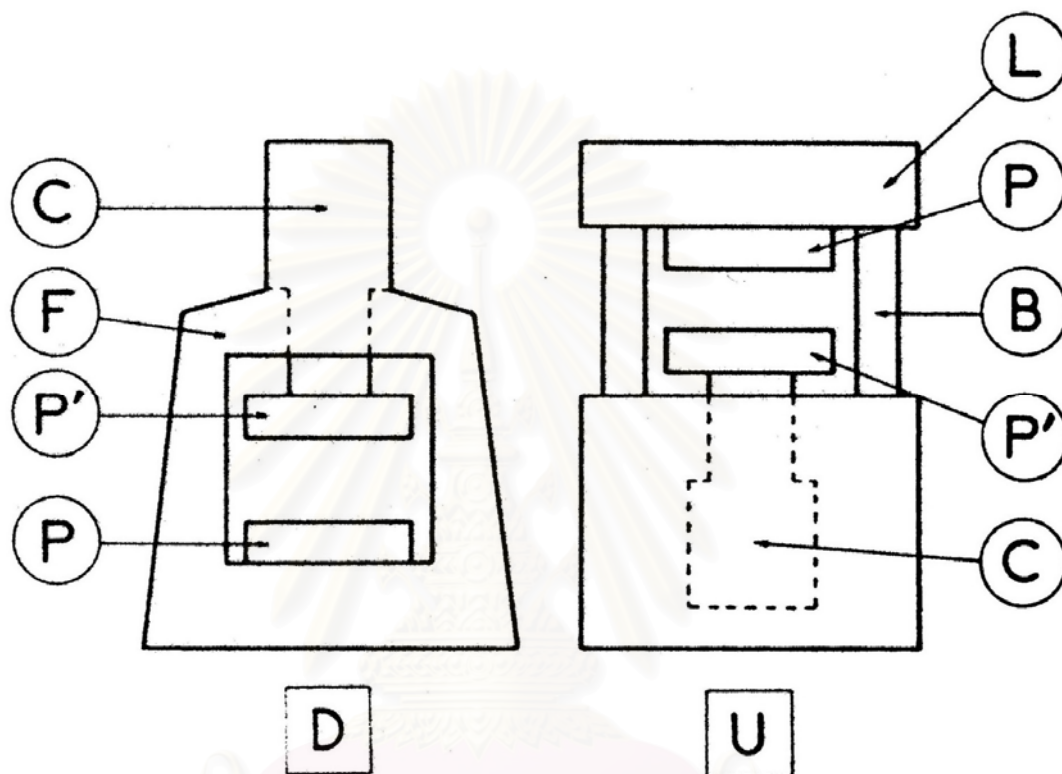
**Storage and Handling**

The quality of EPDM products may be affected by exposure to artificial or natural light. This product should be stored indoors in its original packaging and out of direct sunlight.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

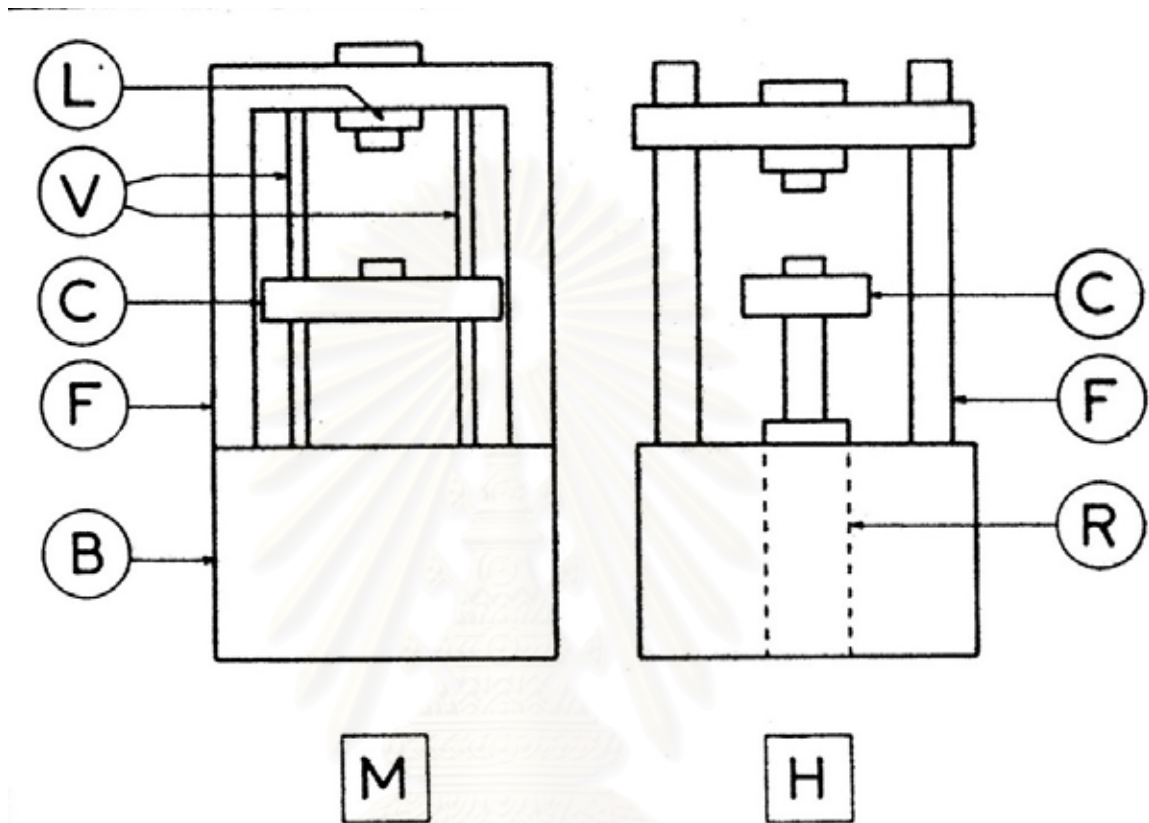
## Compression Molding



Compression Molding มีทั้งแบบกดจากบนลงล่าง [D] หรือแบบกดจากล่างขึ้นข้างบน [U] โดยใช้ไฮดรอลิกเป็นตัวกดแรง [C] โดยมีเฟรม [F] เป็นตัวรองรับ แต่หากเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กจะใช้แท่งเหล็กค้ำ [B] และจานรองแม่พิมพ์ [L] ความสามารถในการกดประมาณ 10 ตัน เพื่อใช้ทดสอบในห้องทดลองทั่วไป จนถึงขนาดกว่า 100 ตัน ในกระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยที่มีขนาดแม่พิมพ์ 15 x 15 เซนติเมตรจนถึงกว่า 1 x 2 เมตร หากเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กสามารถที่จะติดตั้งระบบหล่อเย็นได้ ซึ่งใช้กันแพร่หลายในห้องทดลอง

## ภาคผนวก ค

## Universal testing Machine

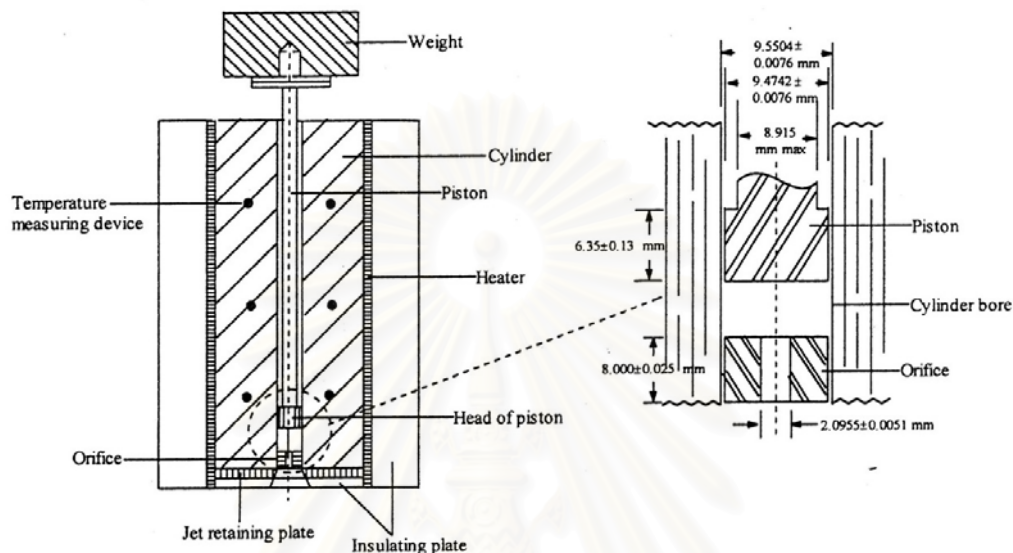


Universal Testing Machine เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้งานในการทดสอบวัสดุมีโครงสร้างอย่างง่ายประกอบด้วยเฟรมข้าง [F] ส่วนเคลื่อนไหว [C] การเคลื่อนไหวของส่วนเคลื่อนไหวจะถูกคอมพิวเตอร์บันทึกระยะ แรงไว้ตลอดการทดสอบบางครั้งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับ [M] อีกแบบจะใช้เซอร์โว ไฮดรอลิก [H] โดยในกาทดสอบสามารถควบคุมความเร็วในการดึง แรงดึง

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

## Melt Flow Indexer



**Cylinder:** ทำมาจากเหล็กกล้าปลอดสนิมเป็นท่อกลวงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 mm ความยาว 162 mm ระบายผิวด้านในของ Cylinder ต้องมีผิวเรียบ และตรง โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในเป็น  $9.5504 \pm 0.0076$  mm ผิวด้านนอกรอบๆ Cylinder จะเจาะรูสำหรับใส่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ด้านปลายสุดตรงหัวฉีดจะมีแผ่นโลหะหนาขนาด 3.2 mm สำหรับพยุงหัวฉีดเอาไว้โดยที่แผ่นดังกล่าวจะมีรูตรงกลาง ในตำแหน่งหัวฉีดพอดี

**DIE:** ทำมาจากโลหะปลอดสนิมเกรดดี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น  $9.5504 \pm 0.0076$  mm และยาว  $8.000 \pm 0.025$  mm ทำให้เคลื่อนที่ขึ้น ลง ภายใน Cylinder ได้อย่างอิสระ ขนาดรูของหัวฉีดที่ตำแหน่งกลางจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น  $2.0955 \pm 0.0051$  mm รูของหัวฉีดต้องไม่มีรอยขีดข่วนที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ที่อาจเกิดเนื่องมาจากเครื่องมือเจาะ

**Piston:** ส่วน Piston จะทำจากโลหะปลอดสนิม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในส่วนปลายเป็น  $9.4742 \pm 0.0076$  mm และยาว  $6.35 \pm 0.13$  mm โดยที่ปลายจะแบนราบน้ำหนักรวมของ Piston และน้ำหนักที่ใช้กดไม่ควรจะมีค่าคลาดเคลื่อนเกินกว่า  $\pm 0.5\%$

**Heater:** ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วงระยะ 10 mm เหนือตำแหน่งของหัวฉีดให้มีค่าอุณหภูมิคงที่ภายในระดับ $\pm 0.2$  องศาเซลเซียส และ จะต้องควบคุมอุณหภูมิจากระดับ 10 mm ถึง 75 mm เหนือหัวฉีด ให้คงที่ภายใน $\pm 1$  องศาเซลเซียส ของอุณหภูมิที่ตั้งไว้ แหล่งความร้อนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิกวมาจากแผ่นความร้อนไฟฟ้าที่หุ้มโอบรอบ Cylinder อุปกรณ์ให้ความร้อนนี้ต้องผ่านการทำมาตรฐานอุณหภูมิ (Temperature Calibration) มาแล้ว

**Temperature Controller:** อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และ ตัวรับแปลงสัญญาณ จะต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในช่วงน้อยที่สุด $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส

**Temperature Measuring Device:** อาจจะใช้เทอร์โมมิเตอร์ ที่มีสเกลวัดละเอียดได้เป็น  $\pm 0.2$  องศาเซลเซียส หรืออาจใช้เป็นพวก thermocouple หรือพวก Platinum Resistance Temperature Sensor สอดเข้าไปเป็นช่วงๆในระยะ 10 mm เหนือตำแหน่งหัวฉีด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคุ้มสิน ตั้งรุ่งโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 3 มกราคม พ.ศ.2523 ที่โรงพยาบาลสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และจบการศึกษาในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย