

การพัฒนาท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวด้วยความร้อน  
โดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60



นาย ธเนศ อินทรลักษณ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2004-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF HEAT-SHRINKABLE POLYETHYLENE/ETHYLENE VINYL ACETATE TUBE  
BY COBALT-60 GAMMA IRRADIATION



Mr. Thanet Intharaluk

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2004-1



ชเนศ อินทรลักษณ์ : การพัฒนาท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนโดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60. (DEVELOPMENT OF HEAT-SHRINKABLE POLYETHYLENE/ETHYLENE VINYL ACETATE TUBE BY COBALT-60 GAMMA IRRADIATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ชยากริต ศิริอุปลักษณ์, 92 หน้า. ISBN 974-17-2004-1.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนโดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ภายใต้เงื่อนไขของปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต รวมทั้งทำการทดสอบหาสมบัติเชิงกล หาสัดส่วนเจล และหาจุดหลอมเหลว โดยผลจากการวิจัยทำให้ทราบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีแกมมา หรือการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต จะทำให้ท่อมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น และค่าความยืดลดลง และเอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่มีปริมาณของไวนิลอะซิเตต 28 % จะมีอิทธิพลกับการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึง และการลดลงของค่าความยืดมากกว่าเอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่มีปริมาณของไวนิลอะซิเตต 18 % อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตยังส่งผลให้ โพลีเมอร์มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเลือกปริมาณรังสีและสัดส่วนผสมที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนไปใช้งาน

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา            นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา        นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา        2545

ลายมือชื่อนิติกร .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        -

## 4270352721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: HEAT-SHRINKABLE TUBE / POLYETHYLENE / ETHYLENE VINYL ACETATE / RADIATION CROSSLINKING

THANET INTHARALUK : DEVELOPMENT OF HEAT-SHRINKABLE POLYETHYLENE/ETHYLENE VINYL ACETATE TUBE BY COBALT-60 GAMMA IRRADIATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHYAGRIT SIRI-UPATHUM, 92 pp. ISBN 974-17-2004-1.

The objective of this research was to study the development of heat-shrinkable polyethylene/ethylene vinyl acetate tube by cobalt-60 gamma irradiation. The studies included variation of radiation doses and quantity of ethylene vinyl acetate. Testing for mechanical properties, gel fraction, and melting point at various radiation doses and various quantity of ethylene vinyl acetate tube were also conducted. The results from the research showed that increasing of radiation dose and increasing of ethylene vinyl acetate resulted in increasing of tensile strength and decreasing of elongation at break respectively. Ethylene vinyl acetate which contained 28 % vinyl acetate gave higher tensile strength and lower elongation at break than that of ethylene vinyl acetate which contained 18 % vinyl acetate. Furthermore, increasing of ethylene vinyl acetate resulted in increasing of flexibility of tube at low temperature. Selection of proper radiation dose and proper ethylene vinyl acetate content in the heat-shrinkable tubes thus related on the applications.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2002

Student's signature .....

Advisor's signature .....

Co-advisor's signature -

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ ความเข้าใจ และกำลังใจอย่างดียิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล และคุณ มานิตย์ ช้อนสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ แนะนำเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือแก่ผู้วิจัยในการใช้เครื่องมือสำหรับการทดลองและทดสอบต่างๆ เป็นอย่างสูง

เนื่องจากทุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิตส่วนหนึ่งได้รับทุนการศึกษาเป็นเวลา 2 ปีการศึกษาจาก Atomic Energy of Canada Limited (AECL) และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณ AECL และบัณฑิตวิทยาลัย ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษา และคำแนะนำด้วยความห่วงใยมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกคนที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัยอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณ คุณ คัทนีย์ แก้วมณี ที่คอยเป็นกำลังใจ และแรงผลักดันให้ผู้วิจัยผ่านช่วงเวลาที่ยากลำบากต่างๆ ไปได้

คุณค่าอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณพ่อและแม่ ผู้ให้ชีวิตให้ทุนทรัพย์ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัย .....	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 โพลีเมอร์ที่ใช้ทำท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตด .....	5
2.1.1 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) .....	5
2.1.2 เอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (Ethylene vinyl acetate) .....	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสี .....	6
2.2.1 คำจำกัดความของน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ .....	7
2.2.2 ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุล .....	9
2.2.3 ทฤษฎีของการตัดทอนโมเลกุล .....	11
2.2.4 การเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลในเวลาเดียวกัน .....	11
2.2.5 ปรากฏการณ์การจำรูปได้ของโพลีเมอร์ (Memory effect) .....	13
2.3 ผลของออกซิเจนที่มีต่อการเชื่อมโยงโมเลกุล .....	14
2.4 การเปรียบเทียบการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยวิธีทางรังสีและทางเคมี .....	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.5 กระบวนการผลิตท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนในอุตสาหกรรม .....	15
2.5.1 วิธีขึ้นรูปเป็นท่อ (Tubing method) .....	15
2.5.2 วิธีห่อเป็นท่อ (Sheet – wrapping method) .....	17
3. วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย .....	18
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	18
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทำท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต .....	18
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการฉายรังสีแกมมา .....	20
3.1.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการหาสัดส่วนเจล (Gel fraction) .....	22
3.1.4 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหาจุดหลอมเหลว .....	23
3.1.5 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการขยายท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต .....	23
3.1.6 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหาความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) .....	25
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย .....	26
3.2.1 วิธีการผสมโพลีเอทิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต .....	26
3.2.2 วิธีการขึ้นรูปท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต .....	26
3.2.3 วิธีการฉายรังสีแกมมา .....	27
3.2.4 วิธีการหาสัดส่วนเจล (Gel fraction) .....	27
3.2.5 วิธีการหาจุดหลอมเหลว .....	27
3.2.6 วิธีการขยายท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต .....	27
3.2.7 วิธีการหดท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต .....	28
3.2.8 วิธีการหาความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) .....	28
3.2.9 วิธีการหาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้องของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิล อะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน .....	28



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลอง .....	29
4.1 การหาสัดส่วนเจลของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสี .....	29
4.2 การหาจุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสี .....	37
4.3 การหาขนาดของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ...	44
4.4 การหาความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน .....	53
4.5 การหาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน .....	63
5. สรุปผลการทดลอง .....	65
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเจลกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของ โพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตด .....	65
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหลอมเหลวกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของ โพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตด .....	67
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของ โพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตด .....	68
5.3.1 ความต้านทานแรงดึง .....	68
5.3.2 ค่าความยืด .....	69
5.3.3 ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ .....	70
5.4 สัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตด เพื่อทำเป็นท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process) .....	70
รายการอ้างอิง .....	74
บรรณานุกรม .....	76
ภาคผนวก .....	77
ภาคผนวก ก การหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ .....	78
ภาคผนวก ข ตัวอย่างรูปภาพแสดงผลการหาจุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตด .....	81
ภาคผนวก ค การหาอุณหภูมิที่ใช้ในการหดท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตด .....	88

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 92



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของโพลีเมอร์ฉายรังสี .....	7
2.2 ค่า G (X) และ G (S) ของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ เมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้ สูญญากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน .....	12
3.1 สมบัติของเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เกรด LD2130F .....	18
3.2 สมบัติของเม็ดพลาสติกเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด เกรด N8038 .....	18
3.3 สมบัติของเม็ดพลาสติกเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด เกรด MV1055 .....	19
4.1 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	29
4.2 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	30
4.3 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	31
4.4 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	32
4.5 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	33
4.6 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	34
4.7 จุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด มีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	37
4.8 จุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด มีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	38
4.9 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ไม่ได้ผ่าน การฉายรังสี ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	45
4.10 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	46

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 18 % .....	47
4.12 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 18 % .....	48
4.13 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ไม่ได้ผ่าน การฉายรังสี ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	49
4.14 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	50
4.15 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	51
4.16 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสี ในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	52
4.17 ความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 18 % .....	53
4.18 ความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	56
5.1 การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและการเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต มี ไวนิลอะซิเตต 18 % .....	71
5.2 การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและการเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต มี ไวนิลอะซิเตต 28 % .....	72
5.3 สัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต เพื่อทำเป็นท่อหดตัวได้ ด้วยความร้อน .....	73
ก.1 ปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ .....	79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1	อุนหภูมิที่ใช้ในการหดท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตด มีไวนิลอะซิเตด 18 % ..... 88
ค.2	อุนหภูมิที่ใช้ในการหดท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตด มีไวนิลอะซิเตด 28 % ..... 90



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมโยงโมเลกุล (---) ของโพลีเอทีลีน .....	9
2.2 ปรากฏการณ์การจำรูปได้ (Memory effect) .....	13
2.3 ความสัมพันธ์ของความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (heat of fusion) ของ โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำกับปริมาณรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 .....	15
2.4 การขยายท่อด้วยวิธีความแตกต่างของความดัน (Differential pressure method) .....	16
2.5 การขยายท่อด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical expanding method) แบบที่ 1 .....	17
2.6 การขยายท่อด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical expanding method) แบบที่ 2 .....	17
2.7 วิธีห่อเป็นท่อ (Sheet – wrapping method) .....	17
3.1 เครื่องผสมโพลีเมอร์ (Twin screw extruder) .....	19
3.2 เครื่องขึ้นรูปท่อ (Single screw extruder) .....	20
3.3 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 .....	20
3.4 ภาพขณะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี .....	21
3.5 ชุดภาชนะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี .....	21
3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับหาสัดส่วนเจล .....	22
3.7 เครื่องหาจุดหลอมเหลว (Differential scanning calorimeter, DSC) .....	23
3.8 อ่างโลหะบรรจุกลีเซอรอล .....	23
3.9 ชุดอุปกรณ์สำหรับขยายท่อ .....	24
3.10 เครื่องวัดความต้านทานแรงดึงและค่าความยืด .....	25
3.11 เครื่องตัด .....	25
4.1 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	35
4.2 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	36
4.3 จุดหลอมเหลวของเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) ภายในท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ .....	40
4.4 จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีนภายในท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	41



## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 จุดหลอมเหลวของเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) ภายในท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ .....	42
4.6 จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีนภายในท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	43
4.7 ความต้านทานแรงดึงของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	59
4.8 ค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 % .....	60
4.9 ความต้านทานแรงดึงของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	61
4.10 ค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 % .....	62
4.11 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน .....	63
4.12 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตด 20 % (18 % ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด) .....	63
4.13 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตด 40 % (18 % ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด) .....	63
4.14 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตด 60 % (18 % ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด) .....	64
4.15 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตด 80 % (18 % ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด) .....	64
4.16 รอยหักของท่อเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) .....	64
5.1 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ .....	65
5.2 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ .....	66
5.3 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ .....	66

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ความต้านทานแรงดึงของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสี ในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ .....	68
5.5 ค่าความยืดของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ .....	69
ก.1 ตำแหน่งในการหาปริมาณรังสี .....	79
ก.2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณรังสี .....	80
ข.1 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีนที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ .....	82
ข.2 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (18 % ไวนิลอะซิเตด) 20 % .....	83
ข.3 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (18 % ไวนิลอะซิเตด) 40 % .....	84
ข.4 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (18 % ไวนิลอะซิเตด) 60 % .....	85
ข.5 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (18 % ไวนิลอะซิเตด) 80 % .....	86
ข.6 จุดหลอมเหลวของท่อเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด (18 % ไวนิลอะซิเตด) ที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ .....	87



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุหดตัวได้ด้วยความร้อนมีความสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมโพลีเมอร์ การบรรจุหีบห่อ การเดินท่อในโรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ ซึ่งโดยปกติวัสดุหดตัวได้ด้วยความร้อนนี้ได้มาจากการเชื่อมโยงบางส่วน (partial crosslink) ของโพลีเอทีลีน โดยกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางรังสีโดยการใช้อิเล็กตรอนจากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน วัสดุที่ได้นี้มีความแข็งแรงไม่ยืดหยุ่น และเสียรูปเมื่อตัดโค้งที่อุณหภูมิต่ำ จึงควรที่จะพัฒนาการผลิตวัสดุหดตัวได้ด้วยความร้อน โดยการใช้โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต (PE/EVA) แทนการใช้โพลีเอทีลีนล้วนๆ เนื่องจากเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นดี ทำให้วัสดุที่ได้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น อีกทั้งเอทีลีนไวนิลอะซิเตตสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ง่าย จึงช่วยลดปริมาณรังสีที่ใช้

นอกจากนี้ควรจะมีการพัฒนาการฉายรังสี โดยใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่แล้วภายในประเทศ อีกทั้งการใช้รังสีแกมมาทำให้สามารถผลิตวัสดุหดตัวได้ด้วยความร้อนในรูปแบบที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ แต่การฉายรังสีแกมมานี้ ต้องฉายรังสีในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะขัดขวางกระบวนการเกิดการเชื่อมโยง ทำให้โพลีเอทีลีนไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนารวมวิธีการเตรียมท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนจากโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต โดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

1.2.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณต่างๆ รวมทั้งการหาสัดส่วนของเจล

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนารวมวิธีการเตรียมท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนจากโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต โดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ สัดส่วนปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีนไวนิลอะซิเตต ปริมาณรังสีแกมมา

1.3.2 หาคความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเจลกับปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต

1.3.3 หาสัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต เพื่อทำเป็นท่อหดตัว ได้ด้วยความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process)

1.3.4 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต ได้แก่ ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ค่าความยืด (Elongation) เป็นต้น

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการทำโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน

1.4.2 ผสมโพลีเอทีลีนกับเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตตามสัดส่วนต่างๆ ที่ต้องการ

1.4.3 ขึ้นรูปท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตตามขนาดที่ต้องการ

1.4.4 ฉายรังสีแกมมาต่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตในบรรยากาศไนโตรเจนที่ปริมาณรังสีต่างๆ

1.4.5 หาคความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเจลกับปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต

1.4.6 ขยายท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตที่ฉายรังสีตามขนาดที่ต้องการ

1.4.7 หดท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตโดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม

1.4.8 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต ได้แก่ ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ค่าความยืด (Elongation)

1.4.9 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

#### 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 Zhang W. X., Liu Y. T. และ Sun J. Z. <sup>[1]</sup> ได้หาคความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของโซล (Sol fraction) กับปริมาณรังสีแกมมา ในกระบวนการฉายรังสีโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต โดยใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ได้ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$R(S + \sqrt{S}) = \frac{1}{q_0 U_1} + \frac{p'_0 R^\beta}{q_0}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{W_1}{\beta_1} + \frac{W_2}{\beta_2}$$

โดย	$R$	คือ	ปริมาณรังสี
	$S$	คือ	สัดส่วนของโซล (sol fraction)
	$q_0$	คือ	crosslinking density
	$U_1$	คือ	initial number average degree of polymerization
	$p'_0$	คือ	ค่าคงที่
	$\beta$	คือ	ตัวแปรที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของโพลิเมอร์
	$\beta_1, \beta_2$	คือ	ค่า $\beta$ ของโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ
	$W_1, W_2$	คือ	ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

1.5.2 Zhang Hui และ Xu Jiufu <sup>[2]</sup> ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพลิเอทีลีน (PE), โพลิเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต (PE/EVA) และโพลิเอทีลีน/คลอโรโพลิเอทีลีน (PE/CPE) ภายหลังจากการฉายรังสี สรุปได้ว่า คุณสมบัติต่างๆ ของโพลิเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตดีกว่า โพลิเอทีลีน โดยเฉพาะความยืดหยุ่น และมีการเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนโพลิเอทีลีน/คลอโร- โพลิเอทีลีนนั้นสามารถทนต่อแรงดึงได้น้อย และผลิตได้ยาก

1.5.3 ชวิษฐ์ อธิพิพนชนกร <sup>[3]</sup> ได้ศึกษาการทำฟิล์มโพลิเอทีลีนหัดตัวได้ด้วยความร้อน โดยใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ทั้งในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยและในสุญญากาศ สรุปได้ว่า ฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติไม่แตกต่างกัน โดยฟิล์มจะมีการต้านทานแรงดึงมากขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณรังสีมากเกินไป คือ ประมาณ 300 ถึง 400 กิโลเกรย์ จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเปราะแตกหักได้ง่าย

1.5.4 Mateev M. และ Karageorgiev S. <sup>[4]</sup> ได้ศึกษาสัดส่วนของเจลของโพลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต หลังจากผ่านการฉายรังสีด้วยเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน สรุปได้ว่า สัดส่วนของเจลจะเพิ่มตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มของสัดส่วนของเจลจะลดลงเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 16 Mrad

1.5.5 Jamaliah Sharif, Sharifah Hanisah Syed Abdul Aziz และ Kamaruddin Hashim <sup>[5]</sup> ได้ศึกษาผลกระทบของรังสีจากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีต่อโพลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต สรุปได้ดังนี้

1.5.5.1 ปริมาณร่างแห 3 มิติของโพลิเอทีลีน, เอทีลีนไวนิลอะซิเตต และโพลิเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต จะเพิ่มตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีไม่เกิน 250 กิโลเกรย์ ซึ่งในโพลิเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ปริมาณของร่างแห 3 มิติจะเพิ่มตามปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่เพิ่มขึ้นด้วย

1.5.5.2 การทนต่อแรงดึงของโพลิเอทีลีนจะเพิ่มตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีไม่เกิน 250 กิโลเกรย์ ส่วนเอทีลีนไวนิลอะซิเตต และโพลิเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต

การทนต่อแรงดึงจะเพิ่มตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีไม่เกิน 150 กิโลเกรย์ แต่จะลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีเกินกว่า 150 กิโลเกรย์

1.5.5.3 ความแข็งของเอทีลินไวนิลอะซิเตตหลังจากฉายรังสีมีค่าสูงกว่าความแข็งของโพลีเอทีลินหลังจากฉายรังสี และในโพลีเอทีลิน/เอทีลินไวนิลอะซิเตตความแข็งจะขึ้นกับส่วนประกอบของโพลีเมอร์

1.5.5.4 การเปลี่ยนรูปของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูงจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีและปริมาณของเอทีลินไวนิลอะซิเตต

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เงื่อนไขจากการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตท่อหัดตัวได้ด้วยความร้อน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

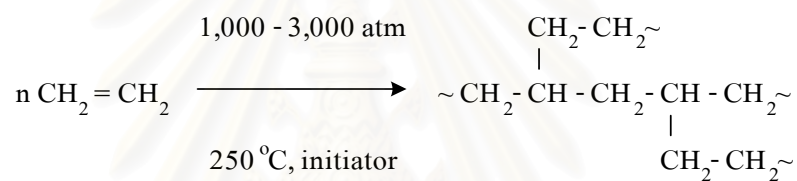
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โพลีเมอร์ที่ใช้ทำท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต

##### 2.1.1 โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) <sup>[3],[6]</sup>

โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) เขียนย่อว่า LDPE หรือ โพลีเอทีลีนความดันสูง (High pressure polyethylene) เป็นโพลีเอทีลีนที่เตรียมจากเอทีลีน โดยใช้ความดันสูงถึง 1,000 – 3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ใช้ออกซิเจน หรือ เบนโซอินเปอร์ออกไซด์เพียงเล็กน้อยเป็นตัวเริ่มต้น (initiator) ส่วนเอทีลีน โมโนเมอร์เตรียมมาจาก น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ

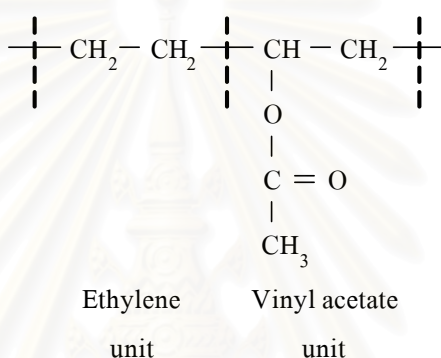


โพลีเอทีลีนอาจเตรียมในสารละลายโดยใช้เบนซีนหรือคลอโรเบนซีนเป็นตัวทำละลายภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาทำนองเดียวกันกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย

สมบัติทางกายภาพของโพลีเอทีลีนแตกต่างกันออกไปบ้างขึ้นกับองศาหรือปริมาณของสาขาโซ่ โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก โพลีเมอร์มีความเป็นผลึกต่ำ เพราะโอกาสที่อะตอมต่างๆ ในโมเลกุลจะจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเพื่อเกิดลักษณะผลึกมีน้อยกว่า สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จุดหลอมตัว ความแข็ง ก็ต่ำลงด้วยเพราะความหนาแน่นต่ำกว่านั่นเอง การแพร่ผ่านของก๊าซและความชื้นต่อโพลีเมอร์จะสูงกว่า อย่างไรก็ตามโพลีเอทีลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูงมีความเป็นผลึกปานกลาง (ทั่วไปมีความเป็นผลึกร้อยละ 50 – 60) มีจุดหลอมเหลวประมาณ 115 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.91 – 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่ละลายในตัวทำละลายหลายชนิดที่อุณหภูมิห้อง ทนต่อกรดแก่และเบสแก่ จากสมบัติดังกล่าวจึงนิยมนำโพลีเอทีลีนมาผลิตเป็นฟิล์มใช้สำหรับห่อของ ห่ออาหาร ทำถุงพลาสติก ฝ้าปูโต๊ะ ใยหุ้ม สายไฟ สายเคเบิล เป็นต้น

### 2.1.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate) <sup>[7]-[9]</sup>

เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate) เขียนย่อว่า EVA เอทิลีนไวนิลอะซิเตตเป็นโคโพลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตต โดยมีไวนิลอะซิเตตประมาณ 5-50 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซิเตตนี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต โดยถ้ามีปริมาณของไวนิลอะซิเตตเพียงเล็กน้อยสมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตจะคล้ายกับโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำแต่มีความยืดหยุ่นมากกว่า ถ้ามีไวนิลอะซิเตต 10 – 15 % สมบัติจะเหมือนกับโพลีไวนิลคลอไรด์ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เพิ่มความยืดหยุ่น ถ้ามีไวนิลอะซิเตต 30 % จะสามารถละลายในตัวทำละลาย เช่น โทลูอีน ได้ ถ้ามีไวนิลอะซิเตต 30 – 40 % สมบัติจะคล้ายกับยาง



เอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีความหนาแน่นประมาณ 0.93-0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูงแม้ที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังทนต่อความร้อนและโอโซนได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นสายเคเบิล, ปะเก็นในรถยนต์, ของเล่น, พื้นรองเท้า เป็นต้น

## 2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสี คือ การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) และการตัดทอนโมเลกุล (degradation) ซึ่งในด้านสมบัติเชิงกล การเชื่อมโยงโมเลกุลทำให้ความแข็ง (hardness) และความต้านทานแรงดึง (tensile strength) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดค่าความยืดที่จุดขาด (elongation at failure) และความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย (solubility) ส่วนการตัดทอนโมเลกุลจะให้ผลในด้านสมบัติเชิงกลในทางตรงกันข้าม

เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลในเวลาเดียวกัน ขึ้นกับว่า กระบวนการใดจะมีอิทธิพลมากกว่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 ชนิดของโพลีเมอร์ชายรังสี<sup>[10]</sup>

การเชื่อมโยงโมเลกุล	การตัดทอนโมเลกุล
โพลีเอทิลีน (Polyethylene)	โพลีไอโซบิวทิลีน (Polyisobutylene)
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	โพลีอัลฟามethylสไตรีน (Poly( $\alpha$ -methylstyrene))
โพลีสไตรีน (Polystyrene)	เซลลูโลส (Cellulose)
โพลีเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide)	เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate)
โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride))	เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate)
โพลีไวนิลอะซิเตต (Poly(vinyl acetate))	โพลีเตตราฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene)
โพลีเอไมด์ (Polyamides)	ไอโซบิวทีน – สไตรีน โคโพลีเมอร์ (Isobutylene – isoprene copolymer)
โพลีเอสเตอร์ (Polyesters)	โพลีเมทาคริเลต (Polymethacrylates)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	โพลีเมทาคริลเอไมด์ (Polymethacrylamide)
โพลีบิวทาไดเอน (Polybutadiene)	โพลีไวนิลลิดีนคลอไรด์ (Poly(vinylidene chloride))
โพลีซิลอกเซน (Polysiloxanes)	

2.2.1 คำจำกัดความของน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์<sup>[11]</sup>

โดยปกติโพลีเมอร์ประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีความยาวต่างๆ กันมากมาย ดังนั้นในการอ้างถึงน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์จึงเป็นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโพลีเมอร์คิดในรูปจำนวน (number average molecular weight,  $M_n$ ) เท่ากับผลรวมของน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสัดส่วนคูณกับสัดส่วนโมลของโมเลกุลนั้น

$$M_n = \sum_{i=1}^{\infty} A_i M_i$$

โดย A คือ สัดส่วนโมล (mole fraction)

M คือ น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)

เมื่อสัดส่วนโมล ( $A_i$ ) มีค่าเท่ากับสัดส่วนของจำนวนโมเลกุล ( $N_i$ ) กับจำนวนโมเลกุลทั้งหมด ( $N$ ) ดังนั้นจะได้

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}{N} \quad \text{หรือ} \quad M_n = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i}$$

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

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

โดย  $M_0$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์  
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโพลีเมอร์คิดในรูปน้ำหนัก (weight average molecular weight,  $M_w$ ) เท่ากับผลรวมของน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสัดส่วนคูณกับสัดส่วนน้ำหนักของโมเลกุลนั้น

$$M_w = \sum_{i=1}^{\infty} W_i M_i$$

โดย  $W$  คือ สัดส่วนน้ำหนัก (weight fraction)  
เมื่อ

$$W_i = \frac{N_i M_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}$$

ดังนั้นจะได้

$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i^2}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}$$

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

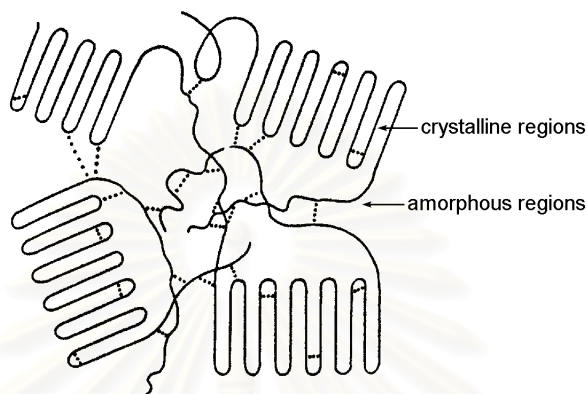
$$X_w = \frac{M_w}{M_0}$$

การหาน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ขึ้นกับวิธีการวัด โดยถ้าวัดด้วยวิธีที่เรียกว่า “end – group analysis” น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่ได้จะคิดในรูปจำนวน เนื่องจากวิธีนี้เป็น การนับจำนวนโมเลกุลในแต่ละน้ำหนักของโพลีเมอร์ แต่ถ้าวัดด้วยวิธีที่เรียกว่า “light scattering and ultra – centrifugation method” น้ำหนักที่วัดได้จะคิดในรูปน้ำหนัก เพราะวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วน น้ำหนักของแต่ละน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งโดยปกติน้ำหนักโมเลกุลที่คิดในรูปน้ำหนักจะมีค่ามากกว่า การคิดในรูปจำนวน ยกเว้นในกรณีที่ทุกโมเลกุลในโพลีเมอร์มีน้ำหนักเท่ากัน ด้วยเหตุนี้สัดส่วน



ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลที่คิดในรูปน้ำหนักกับการคิดในรูปจำนวน ( $M_w / M_n$ ) จึงเป็นตัวบ่งชี้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล หรือที่เรียกว่า “polydispersity index” โดยเมื่อค่า  $M_w / M_n$  มีค่าเท่ากับ 2 แสดงว่า การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์เป็นการกระจายตัวแบบปกติ

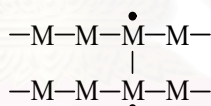
### 2.2.2 ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุล<sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.1 การเชื่อมโยงโมเลกุล (- - -) ของโพลีเอทิลีน<sup>[10]</sup>

ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุลเสนอโดย ชาร์ลส์บี (Charlesby) โดยตั้งสมมติฐานของการเชื่อมโยงโมเลกุล ดังนี้

- การเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นการเชื่อมโยงแบบ “tetrafunctional”



- การเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดแบบสุ่มตามโครงสร้าง
- ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking density,  $q$ ) คือ สัดส่วนของจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่เกิดการเชื่อมโยง

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

โดย  $q_0$  คือ สัดส่วนของจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่เกิดการเชื่อมโยงต่อปริมาณรังสี  
 $D$  คือ ปริมาณรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก

$q_0$  สามารถแสดงในรูปของจำนวนการเชื่อมโยงต่อ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ ( $G$  (crosslinked units)) ถ้า  $n$  คือ จำนวนโมโนเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงหลังจากได้รับปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ และ  $n_0$  คือ จำนวนโพลีเมอร์ 1 กรัม ดังนั้นจะได้

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

$$n = G \text{ (crosslinked unit)} \times 6.24 \times 10^{16} \quad (3)$$

เมื่อปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ เท่ากับการดูดซับพลังงาน  $6.24 \times 10^{18}$  อิเล็กตรอน โวลต์ต่อกรัม และ

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

โดย  $M_0$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์  
จากสมการ (2) ถึง (4) จะได้

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

ให้

$$\delta = q \times X_w \quad (6)$$

โดย  $\delta$  คือ จำนวนของหน่วยที่เกิดการเชื่อมโยงต่อน้ำหนัก  
โมเลกุลเฉลี่ย (crosslinking coefficient)

เมื่อ  $\delta$  มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้ค่า  $M_w$  มีค่าไม่จำกัด ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดโครงสร้าง  
เจล โดยปริมาณรังสีที่จุดนี้ เรียกว่า “the gelling dose ( $D_{gel}$ )”

จากสมการ (1) และ (6) จะได้

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

จากนิยามของ  $D_{gel}$  จะได้

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

จากสมการ (5) และ (7) จะได้

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

เมื่อ 1 การเชื่อมโยง เกิดจากหน่วยที่เกิดการเชื่อมโยง 2 หน่วย และ  $G(X)$  คือ ค่าจี  
ของการเชื่อมโยงโมเลกุล ( $G$  value for crosslinking) จะได้

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

### 2.2.3 ทฤษฎีของการตัดทอนโมเลกุล<sup>[11]</sup>

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

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

โดย  $M_{n,0}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเริ่มต้นคิดในรูปจำนวน  
 $D$  คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับ (absorbed dose) มีหน่วย  
 เป็นอิเล็กตรอน โวลต์ต่อกรัม  
 $N_A$  คือ เลขอะโวกาโดร (Avogadro's number)

### 2.2.4 การเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลในเวลาเดียวกัน<sup>[11]</sup>

เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลในเวลาเดียวกัน ดังนั้นสมการ (10) จะเปลี่ยนแปลงเป็น

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

ซึ่งสมการนี้ เหมาะสำหรับการใช้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสีในช่วงที่เรียกว่า "pre-gel" นอกจากนี้สมการนี้ยังคล้ายกับสมการซึ่งเสนอโดย คิลบ (Kilb) ที่ว่า

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w,0}} + \frac{[G(S) - 4G(X)] \times D}{200 \times N_A} \quad (12)$$

ซึ่งสมการ (12) มีสมมติฐานดังนี้

- การเกิดการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลเป็นกระบวนการแบบสุ่ม
- ค่า  $G(S)$  และ  $G(X)$  ไม่ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับ
- การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

ถ้าการเชื่อมโยงมีอิทธิพลมากกว่าการตัดทอนโมเลกุล โพลีเมอร์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เมื่อค่า  $D$  มีค่ามากกว่า  $D_{gel}$  ทำให้โมเลกุลเริ่มต้นมีการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลาย ส่วนที่ไม่ละลายนี้ เรียกว่า สักส่วนเจล (gel fraction) ในทางตรงกันข้ามส่วนที่ละลาย เรียกว่า สักส่วนโซล (sol fraction)

สำหรับในช่วงที่เรียกว่า “post – gel” นั้น ค่า  $G(S)$  และ  $G(X)$  จะสอดคล้องกับสมการของ ชาร์เลสปีและพินเนอร์ (Charlesby – Pinner equation) ที่ว่า

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

โดย  $S$  คือ สัดส่วนโซล (sol fraction)

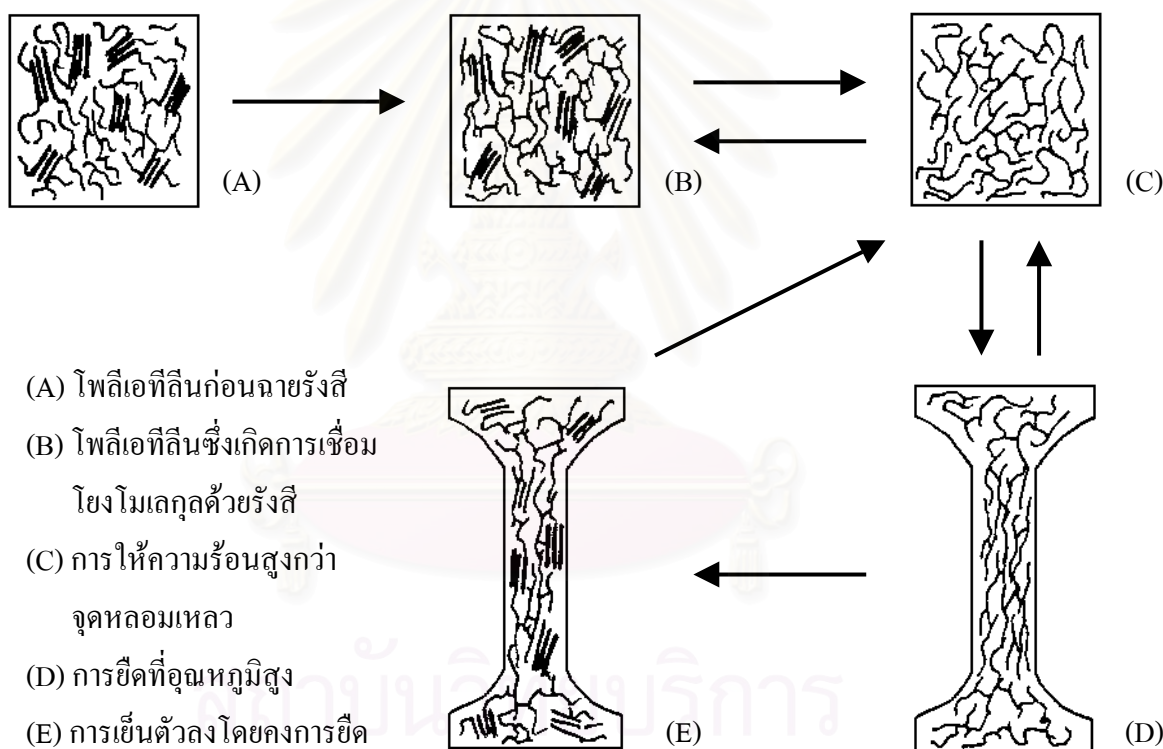
สมการ (13) ถือเป็นสมการที่ใช้อธิบายการเชื่อมโยงและการตัดทอนโมเลกุลซึ่งเกิดในเวลาเดียวกันของโพลีเมอร์ โดยการเชื่อมโยงและการตัดทอนนั้นเกิดขึ้นแบบสุ่ม ซึ่งมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้นของโพลีเมอร์เป็นการกระจายตัวแบบปกติ

ตารางที่ 2.2 ค่า  $G(X)$  และ  $G(S)$  ของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ เมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้สูญญากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน <sup>[3]</sup>

โพลีเมอร์	$G(X)$	$G(S)$
โพลีเอทิลีน (Polyethylene)	3.0	0.88
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene)	2.53	0.4
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	0.6	0.11
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	1.1	0.22
โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride))	2.15	-
โพลีสไตรีน (Polystyrene)	0.045	< 0.018
โพลีเมทิลเมทาคริลเลต (Poly(methyl methacrylates))	-	1.22 – 3.5
โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane)	2.7	< 0.54
บิวทาไดอิน – สไตรีน โคโพลีเมอร์ (butadiene – styrene copolymer, 77 : 23)	2.8	0.39
โพลีโพรพิลีนออกไซด์ (Polypropylene oxide)	0.15	0.22
ไนลอน – 6 (Polycaprolactam, Nylon – 6)	0.33	0.23
ไนลอน – 6, 6 (Poly(hexamethylene adipamide), Nylon – 6, 6)	0.5	0.6

### 2.2.5 ปรัชการณการจํารูปได้ของโพลีเมอร์ (Memory effect) <sup>[12]</sup>

ปรัชการณการณนี้เกิดมาจากการเชื่อมโองโมเลกุลของโพลีเมอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.2 โดยรูป (A) แสดงโพลีเอทีลีนก่อนฉายรังสี และเมื่อมีการฉายรังสีจะเกิดการเชื่อมโองโมเลกุลขึ้นในส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) ดังรูป (B) จากนั้นให้ความร้อนแก่ โพลีเอทีลีนสูงกว่าจุดหลอมเหลวจะทำให้ส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก (crystalline regions) หายไป แต่โองโมเลกุลของโพลีเอทีลีนจะไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากการเชื่อมโองเกิดขึ้นภายใน ดังรูป (C) ในสภาวะนี้โพลีเมอร์จะมีสมบัติคล้ายยาง คือ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย ต่อมาในรูป (D) แสดงการยืดโพลีเอทีลีนที่อุณหภูมิที่สูง จากนั้นปล่อยให้โพลีเอทีลีนเย็นตัวลงโดยการยืด จะได้ดังรูป (E) ซึ่งส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกจะปรากฏอีกครั้ง และเมื่อให้ความร้อนกับโพลีเอทีลีนอีกครั้ง โพลีเอทีลีนจะหดกลับมาเป็นดังรูป (C) อย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเย็นตัวเป็นดังรูป (B)



รูปที่ 2.2 ปรัชการณการจํารูปได้ (Memory effect) <sup>[12]</sup>

### 2.3 ผลของออกซิเจนที่มีต่อการเชื่อมโยงโมเลกุล

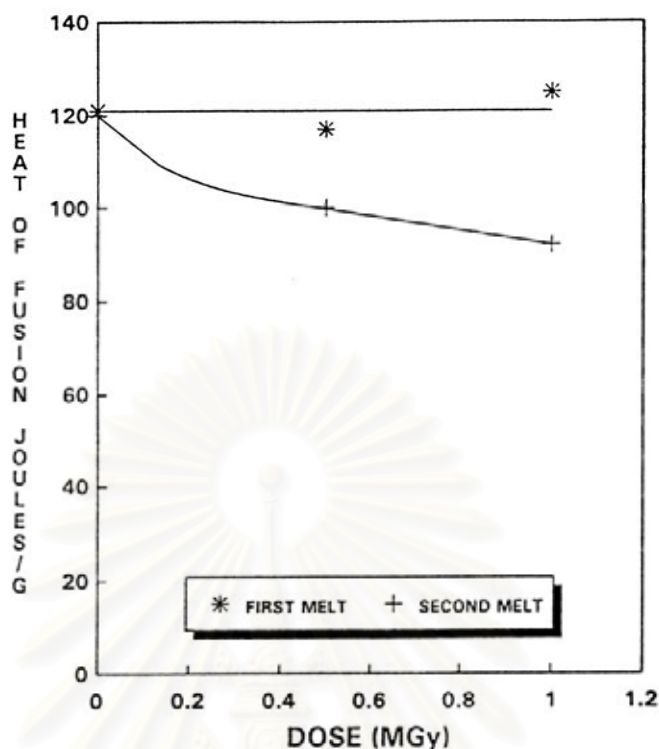
ออกซิเจนที่มีอยู่ระหว่างการฉายรังสีโพลีเมอร์เป็นปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการแตกตัวด้วยรังสี (radiolysis) ของโพลีเมอร์ โดยเมื่อมีการฉายรังสีโพลีเมอร์บางชนิด จะเกิดอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) ซึ่งถ้ามีออกซิเจนอยู่ระหว่างการฉายรังสี ออกซิเจนจะรวมตัวกับอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์เกิดเป็นอนุมูลอิสระของเปอร์ออกซี ทำให้เกิดการตัดทอนโมเลกุล (degradation) ของโพลีเมอร์ โดยแสดงด้วยปฏิกิริยาต่อไปนี้

ขั้นเริ่มต้น (Initiation)	$R \xrightarrow{\text{radiation}} R\cdot$
ขั้นโพรพาเกชัน (Propagation)	$R\cdot \xrightarrow{O_2} RO_2\cdot$
	$RO_2\cdot \xrightarrow{RH} RO_2H + R\cdot$
ขั้นแตกสาขา (Chain branching)	$RO_2H \longrightarrow RO\cdot + \cdot OH$
	$RO\cdot \xrightarrow{RH} ROH + R\cdot$
	$\cdot OH \xrightarrow{RH} H_2O + R\cdot$
กระบวนการนำไปสู่การตัดทอนโมเลกุล	$RO_2H, RO_2\cdot \longrightarrow R' + R'O_2H + \text{etc}$
ขั้นสุดท้าย (Termination)	$2RO_2\cdot \longrightarrow RO_2R + O_2$

### 2.4 การเปรียบเทียบการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยวิธีการทางรังสีและทางเคมี

ผลของอุณหภูมิเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดที่ทำให้การเชื่อมโยงโมเลกุลโดยวิธีทางรังสีและทางเคมีแตกต่างกัน การฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงนั้น อุณหภูมิของกระบวนการจะสูงไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโพลีเอทิลีนมาก ส่วนการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยวิธีทางเคมีจะมีอุณหภูมิสูงถึง 125 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึก (crystalline) ส่วนใหญ่หลอมเหลว ดังนั้นหลังจากการเย็นตัวของโพลีเมอร์การกระจายตัวของกระบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัดส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึก (crystalline fraction) ลดลงอย่างมากในการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยวิธีทางเคมี แต่สำหรับวิธีทางรังสีนั้น สัดส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึกทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีจะมีใกล้เคียงกันมาก โดยปริมาณของโครงสร้างที่เป็นผลึกจะสัมพันธ์กับความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (heat of fusion)





รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (heat of fusion) ของโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำกับปริมาณรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60<sup>[13]</sup>

สำหรับการเชื่อมโพลิเมอร์โดยวิธีทางเคมีจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโครงสร้างที่เป็นผลึก และเมื่อเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (heat of fusion) ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการเชื่อมโพลิเมอร์โดยวิธีทางรังสี เมื่อปริมาณการเชื่อมโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึกลดลงเนื่องจากการเชื่อมโพลิเมอร์จะรบกวนการเกิดโครงสร้างระหว่างการเย็นตัวลงหลังจากการหลอมเหลว ดังรูปที่ 2.3 นอกจากนี้โครงสร้างที่เป็นผลึกจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการหลอมเหลวและเย็นตัวลงครั้งต่อไป

## 2.5 กระบวนการผลิตท่อหัตถ์ได้ด้วยความร้อนในอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตท่อหัตถ์ได้ด้วยความร้อนมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

2.5.1 วิธีขึ้นรูปเป็นท่อ (Tubing method) วิธีนี้เหมาะกับท่อที่มีขนาดเล็กหรือขนาดปานกลาง ที่ต้องการความยาวของท่อมาก โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

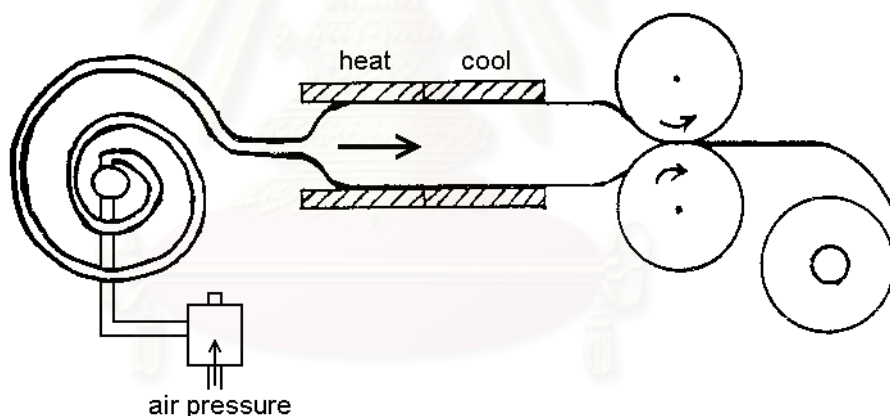
2.5.1.1 การขึ้นรูป (Extrusion) ใช้เครื่องขึ้นรูป (Extruder) ในการผลิตท่อ โดยวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และโคโพลิเมอร์ของเอทิลีน เช่น เอทิลีนไวนิลอะซิเตต เอทิลีนเอทิลอะครีเลต โดยจะมีการเติมสาร

ยับยั้งการเกิดออกซิไดซ์ (anti – oxidizing) สารหน่วงการติดไฟ (flame – retardant) หรือสี ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2.5.1.2 การฉายรังสี (Irradiation) ใช้เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 1.0 – 3.0 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับการฉายรังสีท่อ และพลังงาน 0.5 – 1.0 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับการฉายรังสีแผ่น โดยให้มีปริมาณรังสีประมาณ 10 – 30 เมกกะเรด ซึ่งการฉายรังสีในปริมาณมากเกินไปจะมีผลเสียต่อท่อ เช่น ความทนต่อความร้อนจะลดลง ความต้านทานแรงดึงจะลดลง อีกทั้งการฉายรังสีจำเป็นจะต้องฉายรังสีให้สม่ำเสมอ เพื่อให้การขยายท่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

2.5.1.3 การขยาย (Expansion) วิธีการขยายท่อมียหลายวิธี เช่น

2.5.1.3.1 การขยายท่อด้วยวิธีความแตกต่างของความดัน (Differential pressure method) ทำได้โดยนำปลายหนึ่งของท่อต่อเข้ากับอุปกรณ์ให้ความดัน อีกปลายหนึ่งใส่เข้าไปในแบบ และให้ความร้อนกับท่อ เพื่อขยายเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้วยความดัน จากนั้นเมื่อท่อผ่านไปยังช่วงหลังของแบบ จะถูกทำให้เย็น เพื่อรักษาสภาพหลังการขยายของท่อ ขั้นตอนสุดท้ายท่อจะถูกม้วนเก็บเข้ากับหลอดม้วน ท่อที่ได้จากวิธีการนี้จะมีขนาดขยายประมาณ 1.5-2.5 เท่า

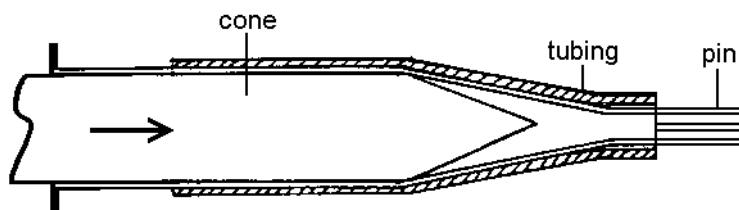


รูปที่ 2.4 การขยายท่อด้วยวิธีความแตกต่างของความดัน (Differential pressure method) <sup>[12]</sup>

2.5.1.3.2 การขยายท่อด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical expanding method) มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

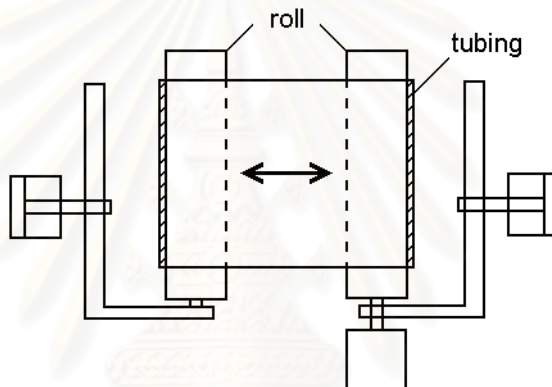
- แบบที่ 1 ทำได้โดยนำท่อที่ร้อนมาสวมไว้รอบมัดของเข็ม (pin) จากนั้นสวมกรวยโลหะเข้าไป ทำให้เข็มขยาย ซึ่งเป็นผลให้ท่อถูกขยายไปด้วย ต่อมาทำให้ท่อเย็น แล้วจึงดึงกรวยโลหะออก วิธีนี้สามารถขยายท่อได้ประมาณ 3-4 เท่า หรือมากกว่านั้น





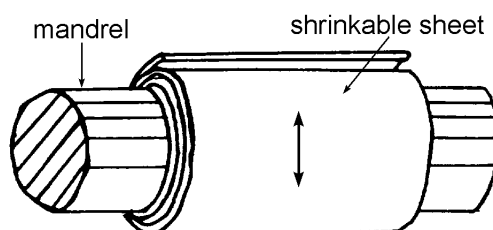
รูปที่ 2.5 การขยายท่อด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical expanding method) แบบที่ 1 <sup>[12]</sup>

- แบบที่ 2 ใช้ลูกกลิ้ง 2 ตัว เพื่อใช้ในการขยายท่อ วิธี  
การนี้เหมาะสำหรับท่อขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 600 – 1,000 มิลลิเมตร โดยท่อที่ได้จากการ  
ขยายวิธีนี้จะมีคามยาวลดลง



รูปที่ 2.6 การขยายท่อด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical expanding method) แบบที่ 2 <sup>[12]</sup>

2.5.2 วิธีห่อเป็นท่อ (Sheet – wrapping method) ท่อที่ได้จากวิธีนี้ไม่ได้ถูกขึ้นรูปเป็นท่อ  
จากเครื่องขึ้นรูป แต่จะได้รับการห่อแผ่นหรือฟิล์มโพลีเมอร์ที่ฉายรังสีและผ่านการยึดแล้ว โดยจะ  
ม้วนแผ่นหรือฟิล์มดังกล่าวรอบแกนหมุน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ  
โพลีเมอร์ ชนิดนั้น เพื่อทำให้ชั้นของแผ่นหรือฟิล์มยึดติดกันจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำให้  
เย็นและนำท่อออกจากแกนหมุน จะได้ท่อหดตัวได้ด้วยความร้อน



รูปที่ 2.7 วิธีห่อเป็นท่อ (Sheet – wrapping method) <sup>[12]</sup>

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทำท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต

3.1.1.1 เม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เกรด LD2130F จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน (1993) จำกัด (Thai Polyethylene (1993) Co., Ltd.) มีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เกรด LD2130F<sup>[14]</sup>

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	ค่า
Melt flow rate	ASTM D1238	0.3 g/10 min
Density	ASTM D1505	0.921 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength at break	ASTM D638	320 kg/cm <sup>2</sup>
Elongation at break	ASTM D638	280 %
Elmendorf tear strength	ASTM D1922	280 g/25 micron
Dart impact strength	ASTM D1709	190 g
Haze	ASTM D1003	12 %
Gloss	ASTM D2457	60 %

3.1.1.2 เม็ดพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตต เกรด N8038 จากบริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด (มหาชน) (Thai Petrochemical Industry Public Co., Ltd.) มีสมบัติดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเม็ดพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตต เกรด N8038<sup>[14]</sup>

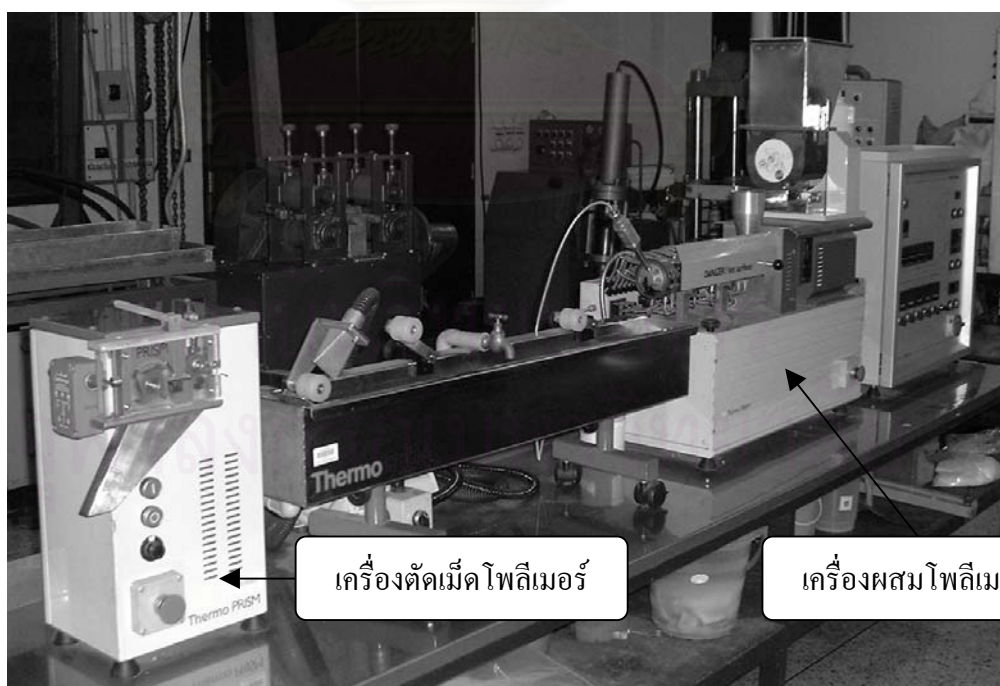
สมบัติ	วิธีการทดสอบ	ค่า
Melt flow rate	ASTM D1238	2.30 g/10 min
Density	ASTM D1505	0.941 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength at yield	ASTM D638	4.0 N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength at break	ASTM D638	18 N/mm <sup>2</sup>
Ultimate elongation	ASTM D638	700 %
Vicat softening	ASTM D1525	58 °C
VA content	-	18.0 %max

3.1.1.3 เม็ดพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตด เกรด MV1055 จากบริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด (มหาชน) (Thai Petrochemical Public Industry Co., Ltd.) มีสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของเม็ดพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตด เกรด MV1055 <sup>[14]</sup>

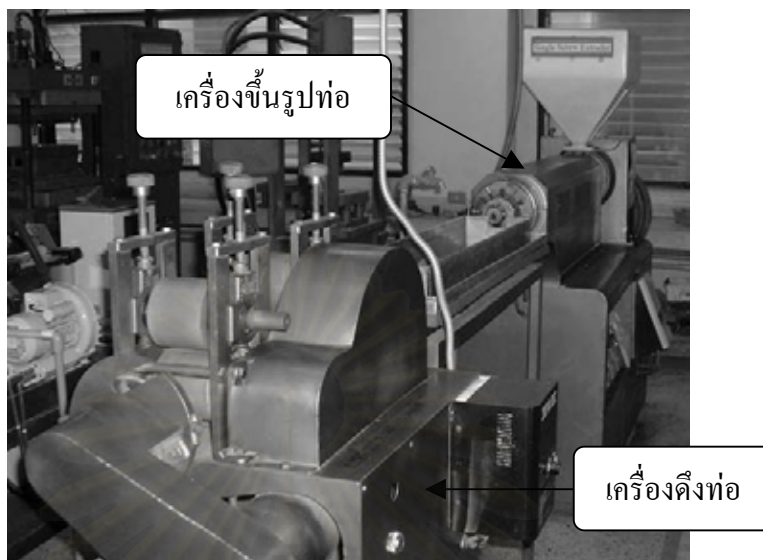
สมบัติ	วิธีการทดสอบ	ค่า
Melt flow rate	ASTM D1238	8.0 g/10 min
Density	ASTM D1505	0.953 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength at yield	ASTM D638	1.2 N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength at break	ASTM D638	10 N/mm <sup>2</sup>
Ultimate elongation	ASTM D638	1200 %
Vicat softening	ASTM D1525	45 °C
VA content	-	28.0 %max

3.1.1.4 เครื่องผสมโพลีเมอร์ (Twin screw extruder) ยี่ห้อ Thermo PRISM รุ่น TSE 16 TC 25 ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมโพลีเมอร์ (Twin screw extruder)

3.1.1.5 เครื่องขึ้นรูปท่อ (Single screw extruder) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปท่อ (Single screw extruder)

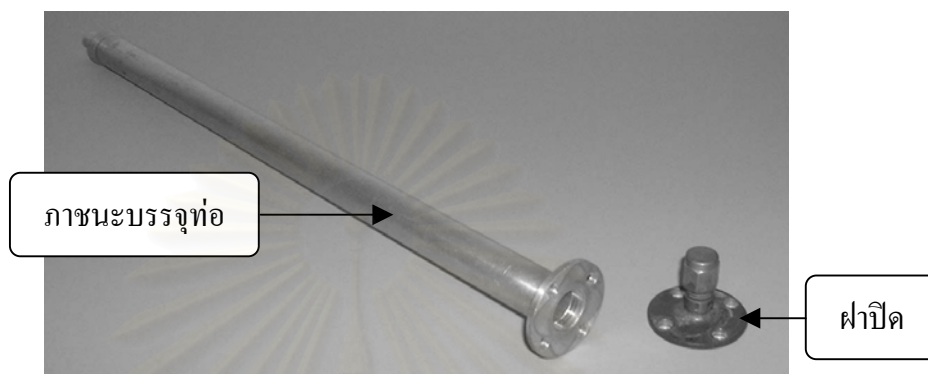
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการฉายรังสีแกมมา

3.1.2.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 จากบริษัท Institute of Isotope ประเทศอังกฤษ รุ่น BSV – 06 ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.3

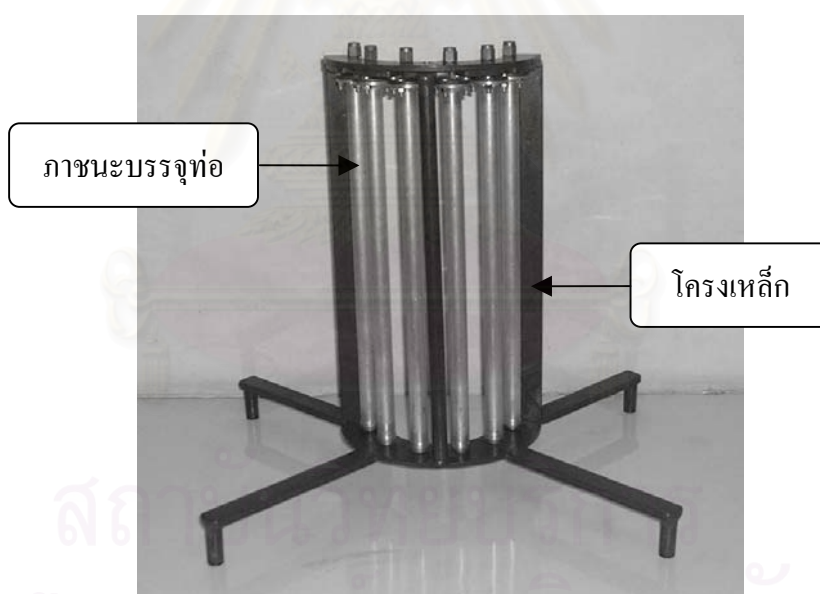


รูปที่ 3.3 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60

3.1.2.2 ชุดภาชนะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี ภาชนะบรรจุท่อทำด้วยอะลูมิเนียม มีช่องเปิดเพียงด้านเดียว ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 1.6 เซนติเมตร มีความยาวภายนอก 40 เซนติเมตร และความยาวภายใน 36.5 เซนติเมตร สามารถบรรจุท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตดได้ 3 ท่อ และมีฝาทำจากทองเหลือง มีวาล์วลูกศรเพื่อบรรจุก๊าซไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยเมื่อฉายรังสีจะประกอบเป็นชุด มีโครงทำจากเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ภาชนะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี



รูปที่ 3.5 ชุดภาชนะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี

3.1.2.3 ปัมป์สุญญากาศ (Vacuum pump) เป็นชนิดปั๊มโรตารี (Rotary pump) มีกำลัง 0.25 แรงม้า

3.1.2.4 ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 % จากบริษัท ไทยอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน) (Thai Industrial Gas Public Co., Ltd.)

3.1.2.5 ท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตด ความยาว 36 เซนติเมตร



### 3.1.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการหาสัดส่วนเจล (Gel fraction)

3.1.3.1 ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 2000 มิลลิลิตร

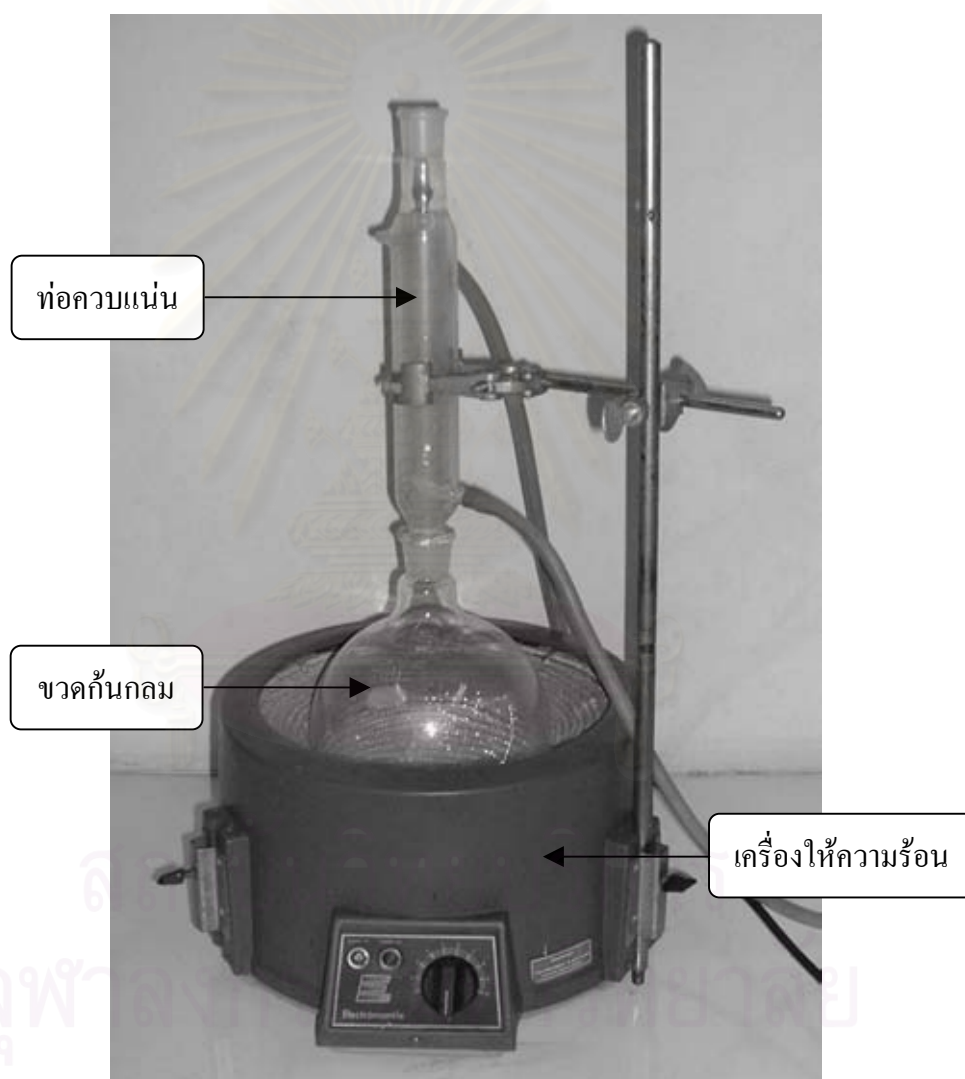
3.1.3.2 ท่อควบแน่น (Condenser)

3.1.3.3 เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle)

โดยนำอุปกรณ์ทั้ง 3 มาประกอบเป็นชุดรีฟลักซ์ (reflux) แสดงดังรูปที่ 3.6

3.1.3.4 ตัวทำละลายไซลีน (Xylene)

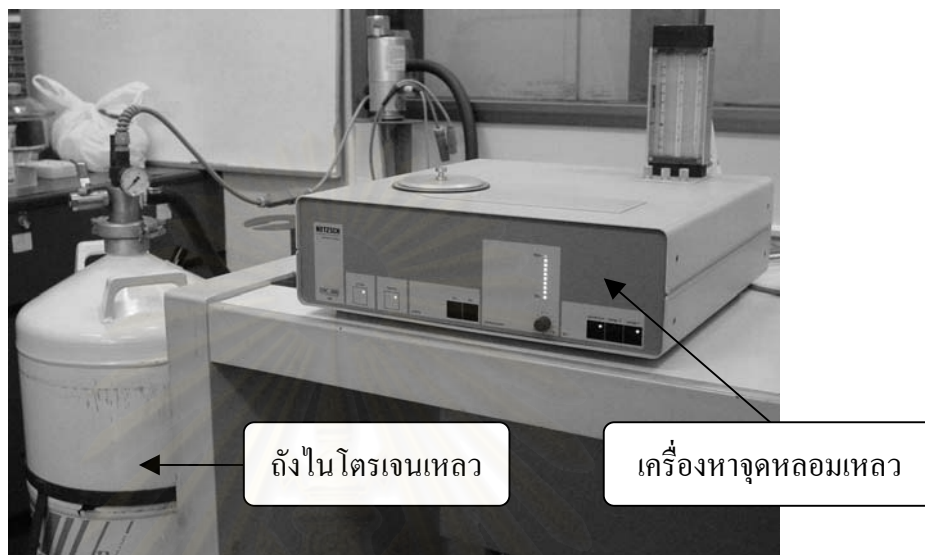
3.1.3.5 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับหาสัดส่วนเจล

### 3.1.4 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหาจุดหลอมเหลว

3.1.4.1 เครื่องหาจุดหลอมเหลว (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 200 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.7



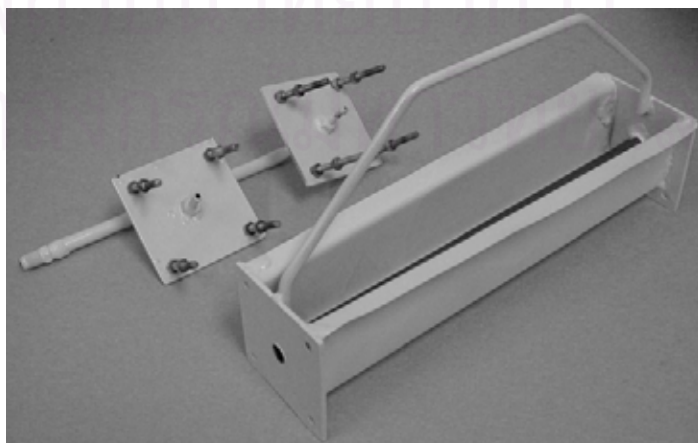
รูปที่ 3.7 เครื่องหาจุดหลอมเหลว (Differential scanning calorimeter, DSC)

#### 3.1.4.2 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

#### 3.1.4.3 ถ้วยอะลูมิเนียม

### 3.1.5 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการขยายท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต

3.1.5.1 อ่างโลหะบรรจุกลีเซอรอล มีท่อโลหะทำมาจากทองแดงอยู่ตรงกลาง เพื่อบรรจุท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต โดยแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อ่างโลหะบรรจุกลีเซอรอล

3.1.5.2 เครื่องวัดอุณหภูมิ โดยใช้ Thermocouple type K

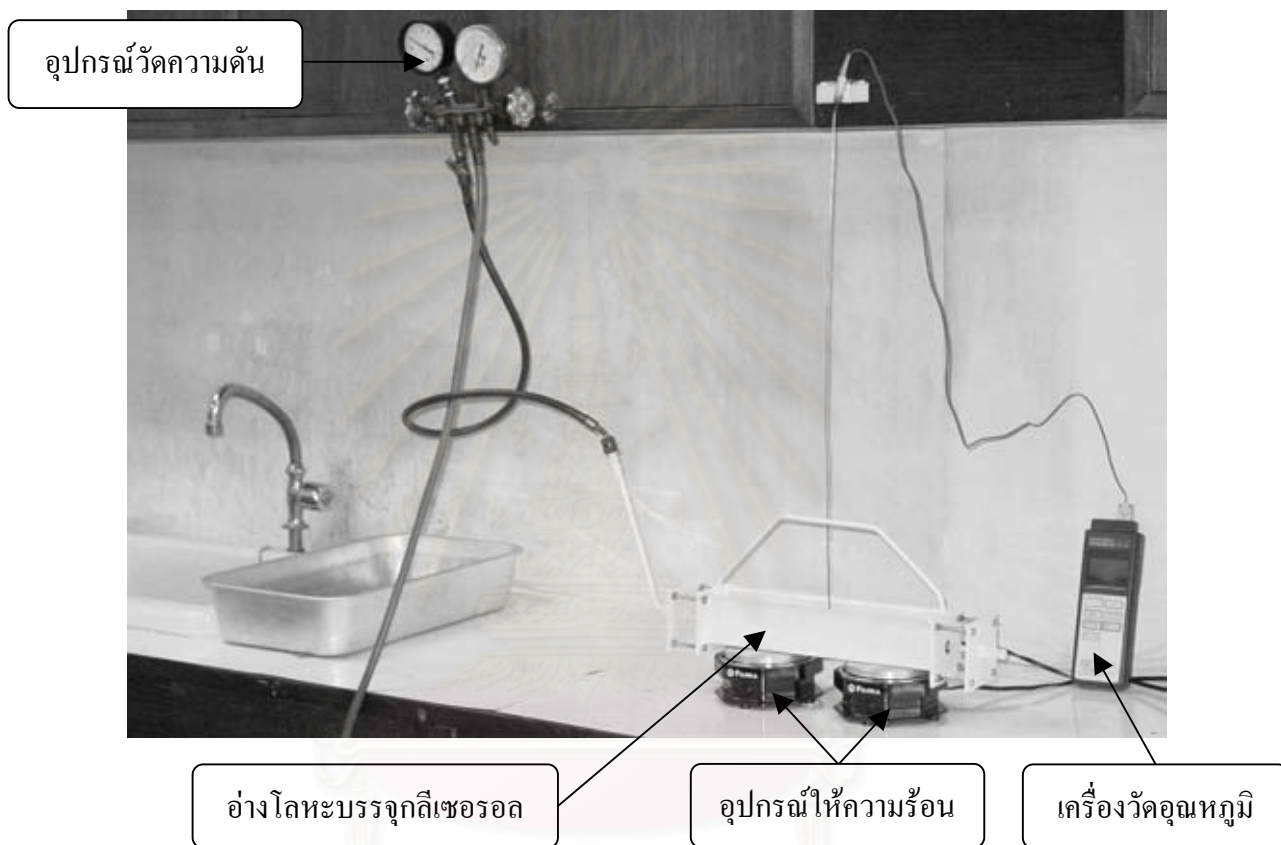
3.1.5.3 ป้อนลม พร้อมอุปกรณ์วัดความดัน

3.1.5.4 อุปกรณ์ให้ความร้อน 2 ชุด

3.1.5.5 กlycerol (Glycerol)

โดยนำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบเป็นชุดอุปกรณ์สำหรับขยายท่อ แสดง

ดังรูปที่ 3.9



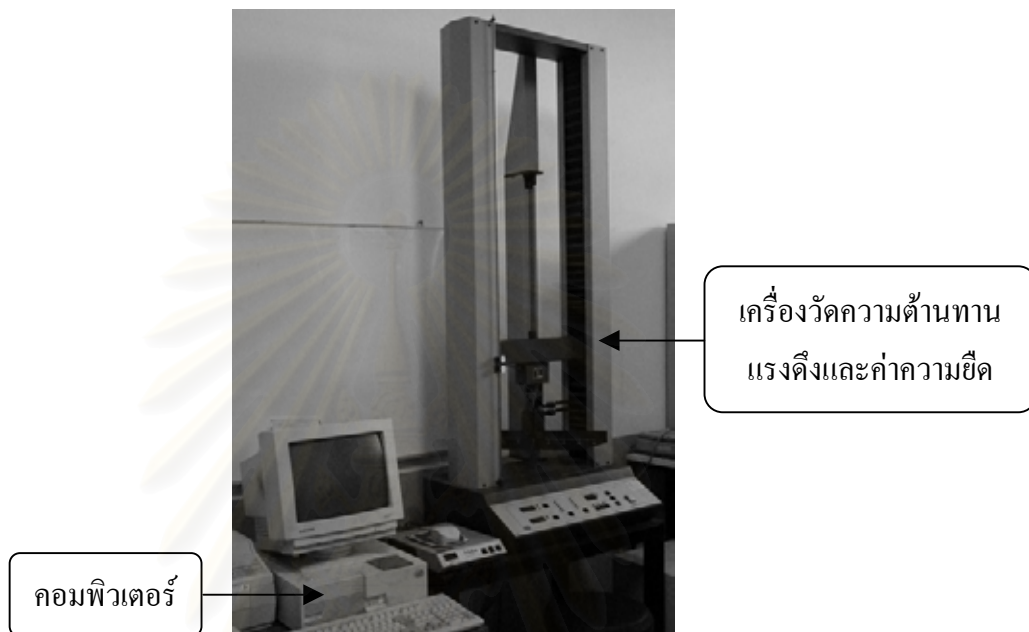
รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์สำหรับขยายท่อ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



3.1.6 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหาความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation)

3.1.6.1 เครื่องวัดความต้านทานแรงดึงและค่าความยืด ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H 10 KM ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความต้านทานแรงดึงและค่าความยืด

3.1.6.2 เครื่องตัด เพื่อทำแผ่นชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D 638<sup>[15]</sup> แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องตัด

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 วิธีการผสมโพลีเอทีลีนกับเอทีลีนไวนิลอะซิเตต

3.2.1.1 ผสมเม็ดโพลีเอทีลีนและเม็ดเอทีลีนไวนิลอะซิเตตตามสัดส่วนที่ต้องการ ใส่ลงเครื่องผสมโพลีเมอร์

#### 3.2.1.2 นิดโพลีเมอร์ผสมโดยใช้เงื่อนไขดังนี้

ความเร็วในการปั่นเม็ดพลาสติก ระดับ 100

อุณหภูมิ	ส่วนที่ 1	90	องศาเซลเซียส
	ส่วนที่ 2	160	องศาเซลเซียส
	ส่วนที่ 3	170	องศาเซลเซียส
	ส่วนที่ 4	180	องศาเซลเซียส
	ส่วนที่ 5	180	องศาเซลเซียส

3.2.1.3 ปรับความเร็วของสกรูให้เหมาะสมกับชนิดและปริมาณของเอทีลีน-ไวนิลอะซิเตตที่ผสม โดยเมื่อส่วนผสมเป็นชนิดที่มีเปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซิเตตมากหรือมีปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมาก จะใช้ความเร็วต่ำ

3.2.1.4 ปรับความเร็วในการตัดเม็ดให้เหมาะสมกับความเร็วของสกรู โดยสังเกตจากความนิ่มของโพลีเมอร์ผสมที่ฉีด

#### 3.2.2 วิธีการขึ้นรูปท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต

3.2.2.1 นำเม็ดโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตมาใส่ลงเครื่องขึ้นรูปท่อ

3.2.2.2 นิดท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต โดยใช้อุณหภูมิ ทั้ง 4 ส่วนมีค่าเท่ากันที่ 140 – 170 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดและปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่ผสม เมื่อส่วนผสมเป็นชนิดที่มีเปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซิเตตมากหรือมีปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมาก จะใช้อุณหภูมิต่ำ

3.2.2.3 ปรับความเร็วสกรูให้เหมาะสมกับขนาดของท่อที่ได้

3.2.2.4 นำน้ำใส่ภายในท่อที่ได้ เพื่อป้องกันการยุบตัวของท่อหลังจากการฉีด

3.2.2.5 ปรับความเร็วในการดึงท่อให้เหมาะสมกับความเร็วของสกรู เพื่อรักษาขนาดของท่อที่ได้ให้เป็นตามต้องการ

### 3.2.3 วิธีการฉายรังสีแกมมา

3.2.3.1 ใส่ท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตลงในภาชนะบรรจุท่อ ปิดฝาให้แน่น

3.2.3.2 คู่อากาศออกจากภาชนะบรรจุท่อเป็นเวลา 3 นาที และแทนที่อากาศในภาชนะด้วยก๊าซไนโตรเจนโดยให้มีความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ ทำสลับกันทั้งหมด 3 ครั้ง

3.2.3.3 นำชุดภาชนะบรรจุท่อที่อัดก๊าซไนโตรเจนแล้วไปฉายรังสีตามปริมาณรังสีที่ต้องการ ได้แก่ 50 100 และ 150 กิโลเกรย์

### 3.2.4 วิธีการหาคัดส่วนเจล (Gel fraction)

3.2.4.1 ตัดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตเป็นชิ้นเล็กๆ โดยมีน้ำหนักรวมประมาณ 0.4 กรัม

3.2.4.2 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส ในตัวทำละลายไซลีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.4.3 นำท่อที่ได้ไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

3.2.4.4 ชั่งน้ำหนักของท่อที่ได้ คำนวณหาคัดส่วนเจล (Gel fraction)

### 3.2.5 วิธีการหาจุดหลอมเหลว

3.2.5.1 ตัดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตเป็นชิ้นเล็กๆ โดยมีน้ำหนักรวมประมาณ 4 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม

3.2.5.2 นำไปหาจุดหลอมเหลว โดยใช้เครื่องหาจุดหลอมเหลว (Differential scanning calorimeter, DSC) ซึ่งการหาจุดหลอมเหลวจะแม่นยำ เมื่อหาจุดหลอมเหลวในครั้งที่ 2 โดยใช้ตัวอย่างเดิม ขอบเขตของการวัดอยู่ระหว่าง 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศไนโตรเจน

### 3.2.6 วิธีการขยายท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต

3.2.6.1 ตัดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตที่ฉายรังสีแล้วให้มีความยาวประมาณ 34 เซนติเมตร บรรจุภายในอ่างโลหะตัดแปลง โดยทากลิเซอรอลเพื่อสะดวกในการนำท่อที่ขยายออกจากอ่างโลหะ

3.2.6.2 นำกลีเซอรอลใส่ในอ่างโลหะตัดแปลง

3.2.6.3 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ โดยนำอ่างโลหะตัดแปลงวางบนอุปกรณ์ให้ความร้อน และรักษาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งระหว่างให้ความร้อนต้องคนกลีเซอรอลเพื่อให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ

3.2.6.4 เปิดวาล์วควบคุมอากาศ เพื่อให้อากาศจากปั๊มลมไหลเข้าสู่อ่างโลหะตัดแปลง โดยมีความดันที่เหมาะสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที

3.2.6.5 เทกลิเซอร์ออกจากอ่างโลหะตัดแปลง จากนั้นใส่น้ำลงในแทนที่

3.2.6.6 เมื่อน้ำในอ่างโลหะตัดแปลงเย็น ปิดวาล์วควบคุมอากาศจากปั๊มลม

3.2.6.7 นำท่อที่ขยายออกจากอ่างโลหะตัดแปลง จากนั้นนำท่อที่ได้ไปล้างด้วยน้ำเพื่อล้างกลีเซอรอลที่ติดอยู่

3.2.6.8 นำมาทิ้งจนแห้ง เพื่อนำไปทดสอบต่อไป

3.2.7 วิธีการหัดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต

3.2.7.1 นำท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตที่ขยายแล้วมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นเวลา 10 นาที

3.2.7.2 นำท่อที่หัดออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็น

3.2.8 วิธีการหาความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation)

3.2.8.1 ตัดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตที่หัดแล้วเป็นรูปคัมเบลล์ โดยใช้เครื่องตัด

3.2.8.2 นำคัมเบลล์ที่ได้ไปตั้งในเครื่องหาความต้านทานแรงดึงและค่าความยืด โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 638<sup>[15]</sup>

3.2.8.3 หาความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อที่จุดขาด

3.2.9 วิธีการหาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหัดตัวได้ด้วยความร้อน

3.2.9.1 นำท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหัดตัวได้ด้วยความร้อนมาแช่ในน้ำแข็งแห้ง ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ -78 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.9.2 นำท่อออกจากน้ำแข็งแห้ง จากนั้นนำมาหักอย่างรวดเร็วโดยเป็นมุมไม่เกิน 45 องศา

3.2.9.3 ทิ้งท่อไว้จนหายเย็น ถ่ายรูปรอยหักที่เกิดขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การหาสัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสี

$$\text{สัดส่วนเจล (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.1 – 4.6 และรูปที่ 4.1 – 4.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิลอะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.403	0.150	37.22	36.95
		0.398	0.146	36.68	
90	10	0.401	0.176	43.89	44.31
		0.398	0.178	44.72	
80	20	0.400	0.219	54.75	54.31
		0.401	0.216	53.87	
70	30	0.398	0.220	55.28	54.97
		0.397	0.217	54.66	
60	40	0.399	0.239	59.90	60.07
		0.400	0.241	60.25	
50	50	0.402	0.188	46.77	46.51
		0.400	0.185	46.25	
40	60	0.402	0.140	34.83	34.08
		0.399	0.133	33.33	
30	70	0.397	0.133	33.50	33.88
		0.400	0.137	34.25	
20	80	0.402	0.149	37.06	36.41
		0.400	0.143	35.75	
10	90	0.399	0.151	37.84	37.94
		0.397	0.151	38.04	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
0	100	0.398	0.146	36.68	37.06
		0.398	0.149	37.44	

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.399	0.279	69.92	69.60
		0.397	0.275	69.27	
90	10	0.400	0.287	71.75	72.35
		0.403	0.294	72.95	
80	20	0.400	0.293	73.25	74.16
		0.397	0.298	75.06	
70	30	0.403	0.300	74.44	75.13
		0.401	0.304	75.81	
60	40	0.401	0.310	77.31	77.85
		0.398	0.312	78.39	
50	50	0.399	0.305	76.44	76.65
		0.402	0.309	76.87	
40	60	0.401	0.279	69.58	68.92
		0.397	0.271	68.26	
30	70	0.402	0.269	66.92	67.42
		0.399	0.271	67.92	
20	80	0.402	0.278	69.15	69.70
		0.400	0.281	70.25	
10	90	0.403	0.284	70.47	70.41
		0.398	0.280	70.35	
0	100	0.400	0.276	69.00	69.57
		0.402	0.282	70.15	



ตารางที่ 4.3 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.400	0.292	73.00	72.81
		0.398	0.289	72.61	
90	10	0.403	0.308	76.43	76.18
		0.399	0.303	75.94	
80	20	0.403	0.309	76.67	77.49
		0.401	0.314	78.30	
70	30	0.398	0.303	76.13	76.48
		0.397	0.305	76.83	
60	40	0.401	0.317	79.05	79.65
		0.400	0.321	80.25	
50	50	0.400	0.315	78.75	79.35
		0.399	0.319	79.95	
40	60	0.401	0.308	76.81	76.25
		0.399	0.302	75.69	
30	70	0.402	0.301	74.88	76.48
		0.397	0.310	78.09	
20	80	0.400	0.328	82.00	81.27
		0.401	0.323	80.55	
10	90	0.399	0.326	81.70	81.93
		0.398	0.327	82.16	
0	100	0.400	0.323	80.75	80.15
		0.401	0.319	79.55	

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 %

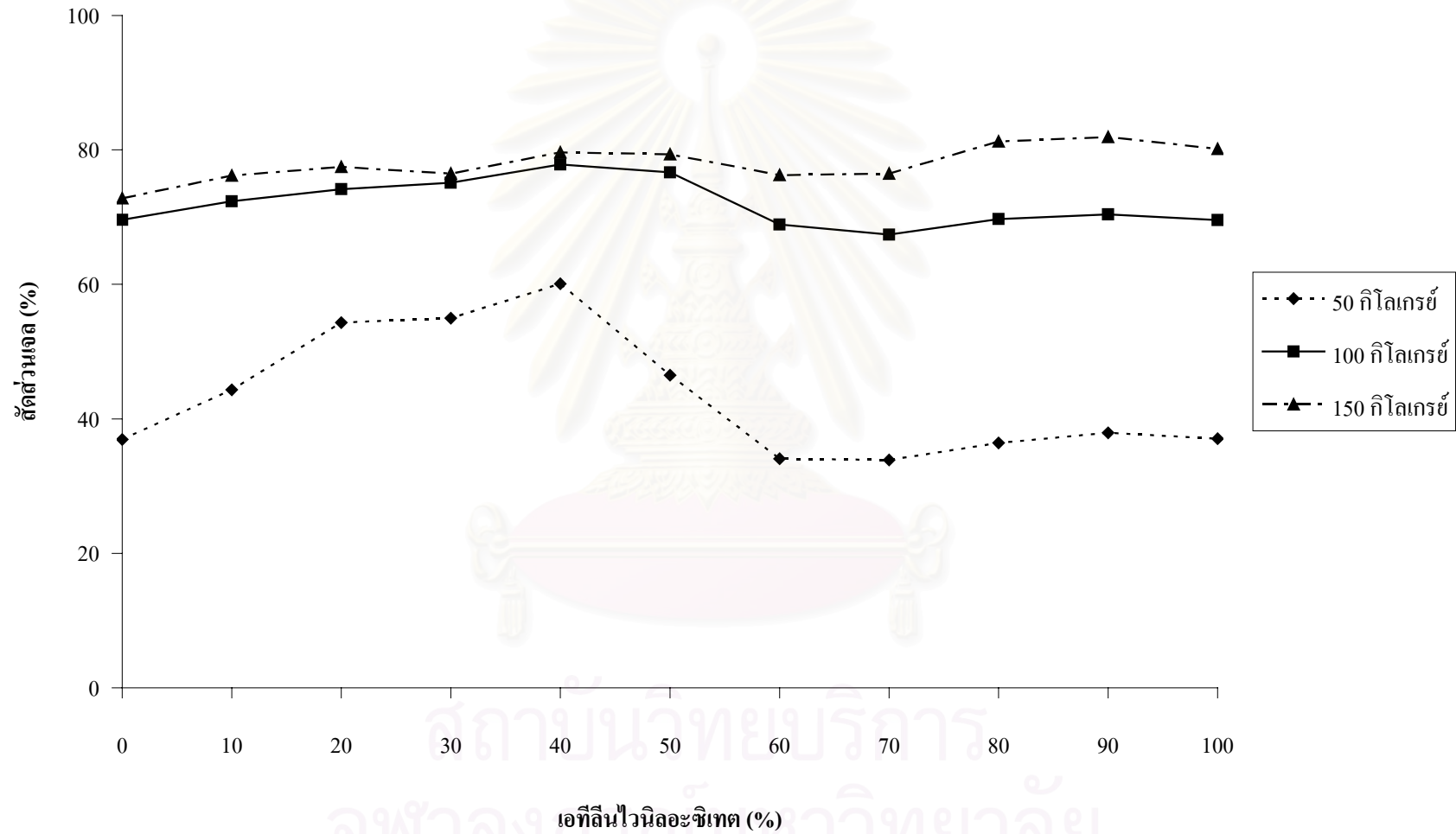
โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.403	0.150	37.22	36.95
		0.398	0.146	36.68	
90	10	0.400	0.126	31.50	31.67
		0.402	0.128	31.84	
80	20	0.399	0.221	55.39	55.08
		0.398	0.218	54.77	
70	30	0.402	0.185	46.02	46.82
		0.399	0.190	47.62	
60	40	0.401	0.167	41.65	41.05
		0.398	0.161	40.45	
50	50	0.400	0.142	35.50	34.79
		0.402	0.137	34.08	
40	60	0.403	0.189	46.90	47.57
		0.400	0.193	48.25	
30	70	0.399	0.155	38.85	39.45
		0.397	0.159	40.05	
20	80	0.401	0.168	41.90	42.88
		0.399	0.175	43.86	
10	90	0.401	0.147	36.66	36.86
		0.402	0.149	37.06	
0	100	0.401	0.211	52.62	52.12
		0.399	0.206	51.63	

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 %

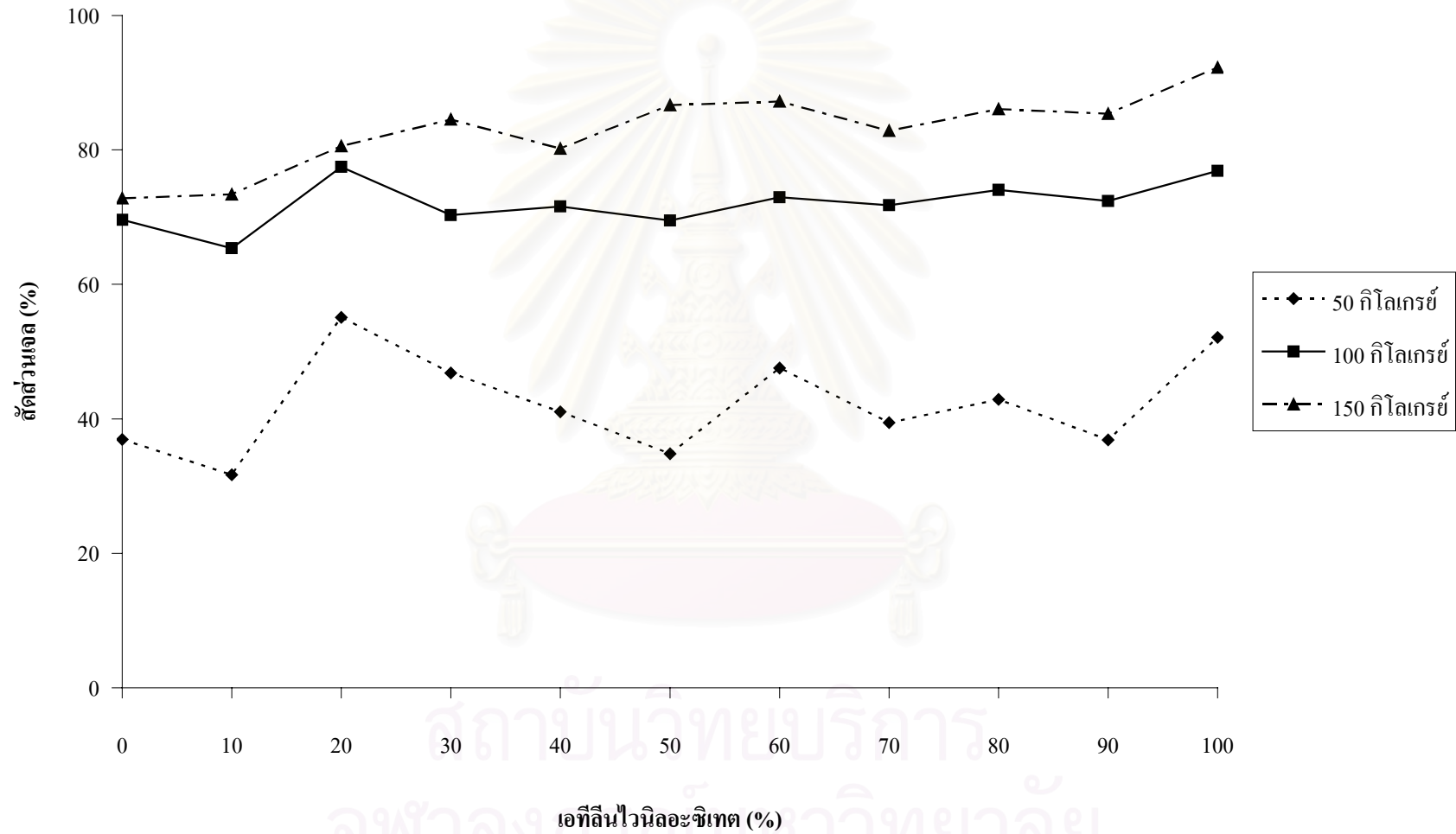
โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.399	0.279	69.92	69.60
		0.397	0.275	69.27	
90	10	0.401	0.261	65.09	65.38
		0.402	0.264	65.67	
80	20	0.400	0.308	77.00	77.47
		0.399	0.311	77.94	
70	30	0.398	0.278	69.85	70.30
		0.400	0.283	70.75	
60	40	0.403	0.290	71.96	71.61
		0.400	0.285	71.25	
50	50	0.401	0.280	69.83	69.50
		0.399	0.276	69.17	
40	60	0.398	0.289	72.61	72.96
		0.397	0.291	73.30	
30	70	0.402	0.291	72.39	71.78
		0.399	0.284	71.18	
20	80	0.398	0.294	73.87	74.06
		0.400	0.297	74.25	
10	90	0.401	0.293	73.07	72.41
		0.400	0.287	71.75	
0	100	0.398	0.306	76.88	76.88
		0.402	0.309	76.87	

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตด (%)	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	สัดส่วนเจล (%)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเจล (%)
100	0	0.400	0.292	73.00	72.81
		0.398	0.289	72.61	
90	10	0.401	0.291	72.57	73.38
		0.399	0.296	74.19	
80	20	0.397	0.323	81.36	80.56
		0.400	0.319	79.75	
70	30	0.399	0.337	84.46	84.54
		0.403	0.341	84.62	
60	40	0.398	0.321	80.65	80.18
		0.399	0.318	79.70	
50	50	0.400	0.344	86.00	86.66
		0.402	0.351	87.31	
40	60	0.397	0.349	87.91	87.22
		0.401	0.347	86.53	
30	70	0.397	0.328	82.62	82.85
		0.402	0.334	83.08	
20	80	0.403	0.343	85.11	86.06
		0.400	0.348	87.00	
10	90	0.399	0.345	86.47	85.38
		0.401	0.338	84.29	
0	100	0.398	0.365	91.71	92.23
		0.400	0.371	92.75	



รูปที่ 4.1 สัดส่วนเถ้าของทอโพลีเอทิลิน/เอทิลินไวนิลอะซิเตดที่ขายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทิลินไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %



รูปที่ 4.2 สัดส่วนเถ้าของทอโพลีเอทิลิน/เอทิลินไวนิลอะซิเตดที่ขายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทิลินไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 %



#### 4.2 การหาจุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสี

การทดสอบหาจุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมา ปริมาณต่างๆ ทำโดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งรูปกราฟที่ได้จะมีจุดหลอมเหลว 2 จุด เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นโพลีเมอร์ผสม โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.7 – 4.8 และรูปที่ 4.3 – 4.6 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 จุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมี ไวนิลอะซิเตด 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิลอะซิเตด (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	จุดหลอมเหลวของเอทีลีน-ไวนิลอะซิเตด (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีน (องศาเซลเซียส)
100	0	0	-	113.2
100	0	50	-	112.9
100	0	100	-	112.7
100	0	150	-	111.6
80	20	0	89.5	112.0
80	20	50	87.9	113.0
80	20	100	86.9	111.6
80	20	150	86.2	111.0
60	40	0	89.3	112.1
60	40	50	86.7	111.3
60	40	100	85.2	110.5
60	40	150	85.6	110.8
40	60	0	88.2	110.7
40	60	50	86.6	110.3
40	60	100	86.0	110.5
40	60	150	85.4	109.5
20	80	0	89.0	110.9
20	80	50	86.3	110.0
20	80	100	85.4	109.0
20	80	150	86.1	109.0

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	จุดหลอมเหลวของเอทีลีน-ไวนิลอะซิเตต (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีน (องศาเซลเซียส)
0	100	0	88.7	-
0	100	50	86.8	-
0	100	100	87.2	-
0	100	150	86.0	-

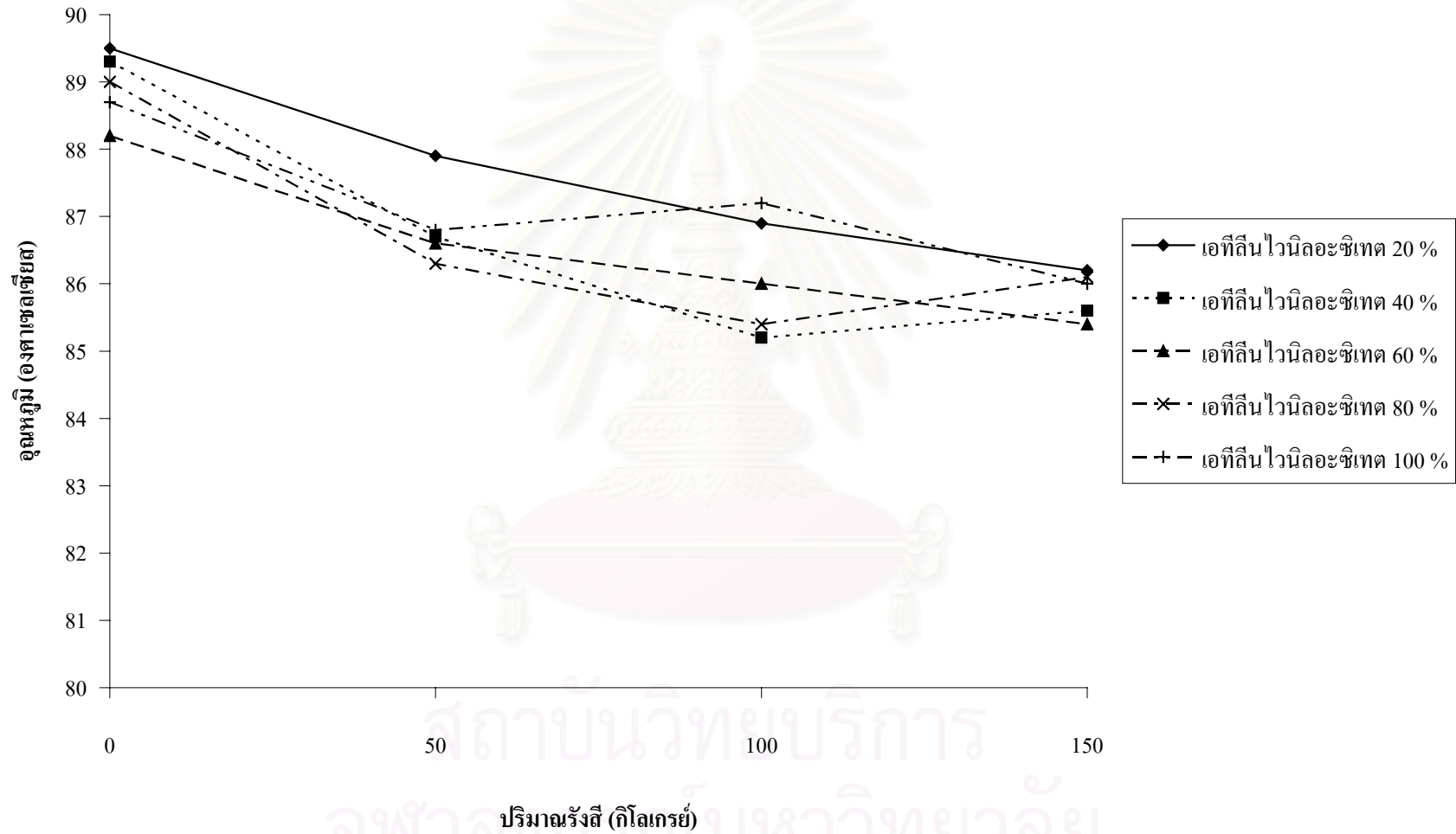
ตารางที่ 4.8 จุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	จุดหลอมเหลวของเอทีลีน-ไวนิลอะซิเตต (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีน (องศาเซลเซียส)
100	0	0	-	113.2
100	0	50	-	112.9
100	0	100	-	112.7
100	0	150	-	111.6
80	20	0	ไม่ชัดเจน	112.0
80	20	50	ไม่ชัดเจน	111.3
80	20	100	ไม่ชัดเจน	112.3
80	20	150	ไม่ชัดเจน	111.4
60	40	0	75.7	111.5
60	40	50	72.2	112.3
60	40	100	69.1	111.2
60	40	150	69.0	110.4
40	60	0	74.3	112.1
40	60	50	70.3	110.8
40	60	100	69.6	111.2
40	60	150	68.6	110.8

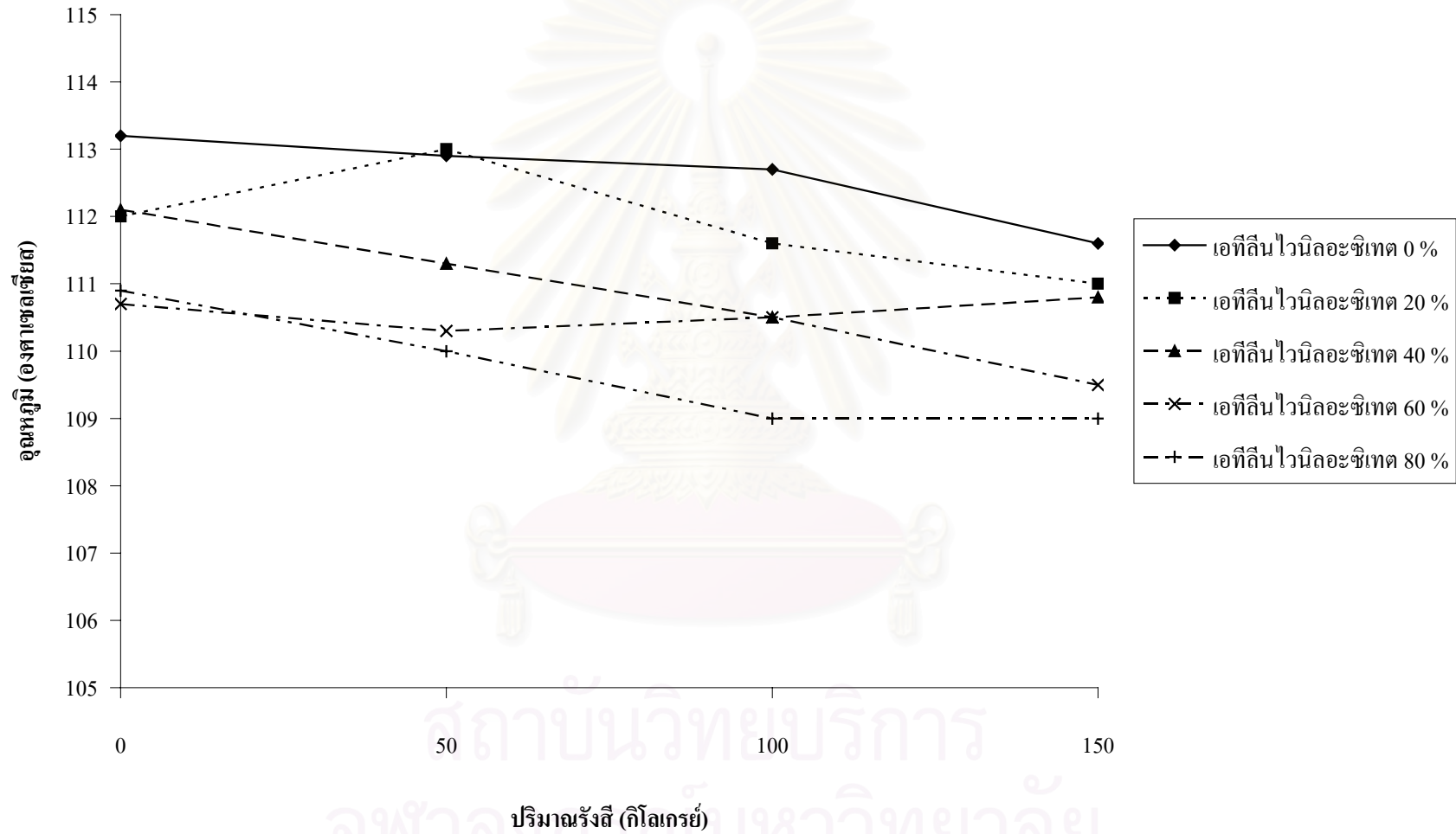
ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	จุดหลอมเหลวของเอทีลีน-ไวนิลอะซิเตต (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลีน (องศาเซลเซียส)
20	80	0	72.9	111.5
20	80	50	69.1	111.0
20	80	100	69.8	110.6
20	80	150	68.9	109.7
0	100	0	70.3	-
0	100	50	68.2	-
0	100	100	68.3	-
0	100	150	67.9	-

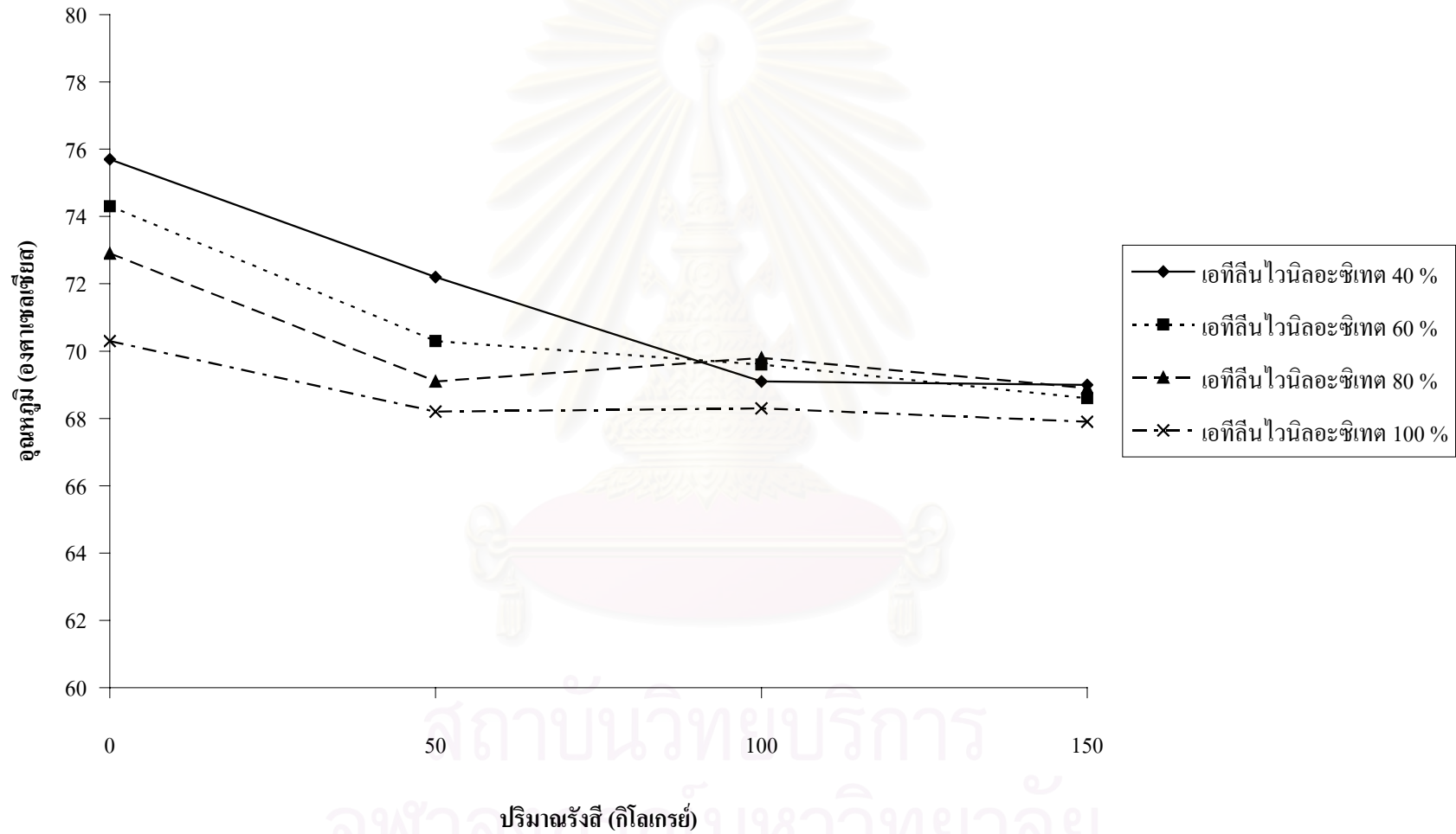
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 จุดหลอมเหลวของเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) ภายในท่อโพลีโอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีเกมมาในปริมาณต่างๆ

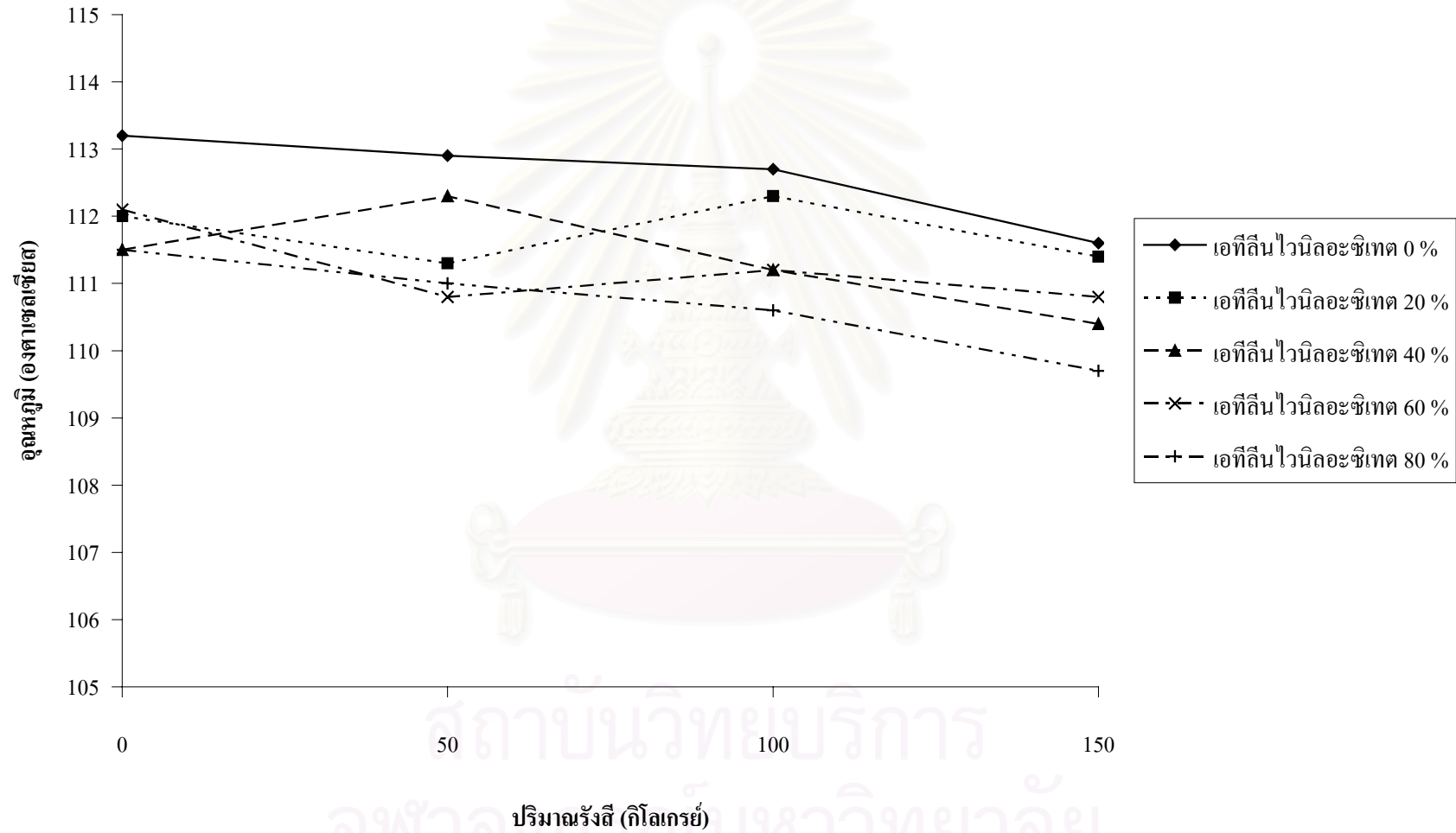


รูปที่ 4.4 จุดหลอมเหลวของโพลีเอทิลีนภายในท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %



รูปที่ 4.5 จุดหลอมเหลวของเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) ภายในท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีเกมมาในปริมาณต่างๆ





รูปที่ 4.6 จุดหลอมเหลวของโพลีเอทิลีนภายในท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตดมีไวโนลอะซิเตด 28 %

#### 4.3 การหาขนาดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน

$$\text{การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (\%)} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหลังการหด} - \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกก่อนการขยาย}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกก่อนการขยาย}} \times 100$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ (\%)} = \frac{\text{ความหนาของท่อหลังการหด} - \text{ความหนาของท่อก่อนการขยาย}}{\text{ความหนาของท่อก่อนการขยาย}} \times 100$$

$$\text{การหดตามแนวยาว (Longitudinal shrink, \%)} = \frac{\text{ความยาวก่อนการหด} - \text{ความยาวหลังการหด}}{\text{ความยาวก่อนการหด}} \times 100$$

โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.9 – 4.16 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 ขนาดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.03	1.07	8.05	0.93	14.51	-13.08	100	89	11
90	10	7.31	1.16	8.52	1.01	16.55	-12.93	100	89	11
80	20	6.71	0.99	7.92	0.94	18.03	-5.05	100	82	18
70	30	6.91	1.05	7.72	1.07	11.72	1.90	100	84	16
60	40	6.86	1.03	8.35	1.06	21.72	2.91	100	79	21
50	50	7.09	0.92	8.40	0.94	18.48	2.17	100	83	17
40	60	6.52	0.90	8.44	0.80	29.45	-11.11	100	84	16
30	70	6.83	0.80	9.48	0.67	38.80	-16.25	100	81	19
20	80	6.99	0.89	8.96	0.76	28.18	-14.61	100	89	11
10	90	6.65	0.96	8.24	0.78	23.91	-18.75	100	93	7
0	100	6.41	0.87	7.73	0.81	20.59	-6.90	100	91	9

ตารางที่ 4.10 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.05	1.10	7.92	1.11	12.34	0.91	100	81	19
90	10	7.32	1.14	8.19	1.19	11.89	4.39	100	86	14
80	20	6.71	1.01	7.45	1.09	11.03	7.92	100	82	18
70	30	6.89	1.05	7.85	1.14	13.93	8.57	100	80	20
60	40	6.86	1.02	7.93	1.07	15.60	4.90	100	81	19
50	50	7.10	0.91	7.85	0.96	10.56	5.49	100	81	19
40	60	6.52	0.89	7.26	0.95	11.35	6.74	100	85	15
30	70	6.84	0.81	7.70	0.85	12.57	4.94	100	86	14
20	80	6.99	0.91	7.76	0.93	11.02	2.20	100	89	11
10	90	6.63	0.97	7.13	0.98	7.54	1.03	100	91	9
0	100	6.42	0.86	7.22	0.85	12.46	-1.16	100	88	12

ตารางที่ 4.11 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.03	1.08	7.51	1.04	6.83	-3.70	100	86	14
90	10	7.31	1.15	7.54	1.18	3.15	2.61	100	90	10
80	20	6.69	1.00	7.13	1.05	6.58	5.00	100	89	11
70	30	6.93	1.05	7.37	1.10	6.35	4.76	100	88	12
60	40	6.89	1.03	7.44	1.07	7.98	3.88	100	87	13
50	50	7.07	0.93	7.40	0.94	4.67	1.08	100	91	9
40	60	6.55	0.90	7.07	0.92	7.94	2.22	100	91	9
30	70	6.82	0.82	7.19	0.81	5.43	-1.22	100	93	7
20	80	7.02	0.91	7.32	0.89	4.27	-2.20	100	95	5
10	90	6.65	0.97	6.98	0.96	4.96	-1.03	100	96	4
0	100	6.41	0.89	6.59	0.86	2.81	-3.37	100	94	6

ตารางที่ 4.12 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.04	1.07	7.36	1.05	4.55	-1.87	100	92	8
90	10	7.29	1.16	7.87	1.12	7.96	-3.45	100	93	7
80	20	6.72	0.99	7.28	1.00	8.33	1.01	100	92	8
70	30	6.90	1.04	7.22	1.08	4.64	3.85	100	92	8
60	40	6.88	1.02	7.17	1.02	4.22	0.00	100	92	8
50	50	7.08	0.91	7.28	0.92	2.82	1.10	100	92	8
40	60	6.54	0.91	7.03	0.89	7.49	-2.20	100	96	4
30	70	6.85	0.82	7.10	0.81	3.65	-1.22	100	96	4
20	80	7.01	0.90	7.26	0.91	3.57	1.11	100	95	5
10	90	6.66	0.98	6.73	0.97	1.05	-1.02	100	97	3
0	100	6.43	0.87	6.61	0.90	2.80	3.45	100	97	3

ตารางที่ 4.13 ขนาดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวไนลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ซึ่งเอทีลีนไวไนลอะซิเตตมีไวไนลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวไนลอะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.03	1.07	8.05	0.93	14.51	-13.08	100	89	11
90	10	6.91	0.91	8.66	0.76	25.33	-16.48	100	88	12
80	20	6.95	1.10	8.30	1.00	19.42	-9.09	100	82	18
70	30	6.87	0.92	8.23	1.00	19.80	8.70	100	77	23
60	40	6.60	0.97	8.04	0.98	21.82	1.03	100	80	20
50	50	6.69	0.76	8.13	0.81	21.52	6.58	100	83	17
40	60	6.87	1.07	8.81	0.85	28.24	-20.56	100	92	8
30	70	6.87	0.85	10.52	0.78	53.13	-8.24	100	65	35
20	80	6.97	1.01	9.45	0.74	35.58	-26.73	100	93	7
10	90	6.70	0.88	8.62	0.66	28.66	-25.00	100	95	5
0	100	6.88	0.93	8.88	0.72	29.07	-22.58	100	95	5



ตารางที่ 4.14 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.05	1.10	7.92	1.11	12.34	0.91	100	81	19
90	10	6.93	0.92	7.95	1.02	14.72	10.87	100	80	20
80	20	6.97	1.11	8.10	1.20	16.21	8.11	100	78	22
70	30	6.89	0.91	8.16	0.98	18.43	7.69	100	77	23
60	40	6.61	0.96	7.40	1.03	11.95	7.29	100	82	18
50	50	6.67	0.75	7.28	0.78	9.15	4.00	100	83	17
40	60	6.89	1.06	7.54	1.05	9.43	-0.94	100	93	7
30	70	6.88	0.84	7.47	0.83	8.58	-1.19	100	93	7
20	80	6.98	1.02	7.34	1.00	5.16	-1.96	100	97	3
10	90	6.71	0.87	6.91	0.88	2.98	1.15	100	91	9
0	100	6.86	0.94	7.26	0.93	5.83	-1.06	100	93	7

ตารางที่ 4.15 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.03	1.08	7.51	1.04	6.83	-3.70	100	86	14
90	10	6.92	0.90	7.37	1.01	6.50	12.22	100	85	15
80	20	6.96	1.12	7.59	1.17	9.05	4.46	100	87	13
70	30	6.86	0.93	7.39	0.99	7.73	6.45	100	87	13
60	40	6.57	0.98	6.97	0.99	6.09	1.02	100	91	9
50	50	6.70	0.76	7.06	0.78	5.37	2.63	100	92	8
40	60	6.86	1.05	7.09	1.04	3.35	-0.95	100	96	4
30	70	6.85	0.86	7.23	0.83	5.55	-3.49	100	96	4
20	80	6.98	1.00	7.29	0.93	4.44	-7.00	100	99	1
10	90	6.71	0.89	7.02	0.91	4.62	2.25	100	95	5
0	100	6.88	0.93	7.24	0.91	5.23	-2.15	100	97	3

ตารางที่ 4.16 ขนาดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อนที่จายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ขนาดก่อนการขยาย		ขนาดหลังการหด		การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ความยาว (มม.)		การหดตามแนวยาว (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มม.)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)	ก่อนการหด	หลังการหด	
100	0	7.04	1.07	7.36	1.05	4.55	-1.87	100	92	8
90	10	6.92	0.91	6.99	0.98	1.01	7.69	100	90	10
80	20	6.94	1.09	7.38	1.14	6.34	4.59	100	91	9
70	30	6.87	0.94	7.19	0.97	4.66	3.19	100	91	9
60	40	6.59	0.97	7.03	0.94	6.68	-3.09	100	94	6
50	50	6.69	0.77	7.12	0.78	6.43	1.30	100	93	7
40	60	6.87	1.08	7.21	1.07	4.95	-0.93	100	98	2
30	70	6.87	0.86	7.14	0.84	3.93	-2.33	100	98	2
20	80	6.96	1.02	7.00	0.99	0.57	-2.94	100	99	1
10	90	6.69	0.86	6.84	0.87	2.24	1.16	100	99	1
0	100	6.87	0.92	6.97	0.91	1.46	-1.09	100	99	1

#### 4.4 การหาความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน

การทดสอบหาความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638<sup>[15]</sup> ซึ่งทำเฉพาะท่อที่สามารถหดตัวได้ด้วยความร้อนตามข้อกำหนดของบริษัท Cremco ประเทศฝรั่งเศส<sup>[16]</sup> โดยต้องมีค่าการหดตามแนวยาว (Longitudinal shrink) ตามตารางที่ 4.9 – 4.16 ไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดแสดงดังตารางที่ 4.17 – 4.18 และรูปที่ 4.7 – 4.10 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.17 ความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
100	0	150	21.52	21.51	1010	1039
			21.29		1020	
			21.71		1086	
90	10	100	20.14	20.10	1346	1301
			19.90		1224	
			20.24		1334	
90	10	150	20.94	21.09	1076	1107
			21.25		1148	
			21.08		1098	
80	20	150	20.84	20.84	1148	1184
			20.74		1172	
			20.94		1233	
70	30	150	20.56	20.68	1246	1281
			20.65		1286	
			20.83		1312	

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
60	40	150	21.85	21.94	1309	1338
			22.04		1312	
			21.94		1392	
50	50	100	22.86	22.76	1674	1648
			22.76		1650	
			22.65		1621	
50	50	150	24.17	24.28	1441	1431
			24.56		1385	
			24.11		1466	
40	60	100	24.02	23.84	1776	1727
			23.80		1721	
			23.70		1684	
40	60	150	25.32	25.30	1569	1556
			25.43		1582	
			25.16		1518	
30	70	100	24.75	24.55	1720	1762
			24.63		1804	
			24.26		1762	
30	70	150	26.17	26.19	1638	1629
			26.42		1672	
			25.99		1576	
20	80	100	25.11	24.96	1804	1810
			24.78		1763	
			25.00		1862	

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
20	80	150	27.02	26.84	1679	1691
			26.91		1722	
			26.57		1673	
10	90	50	24.69	24.74	1955	1987
			24.85		2006	
			24.69		2000	
10	90	100	25.83	25.87	1840	1834
			26.04		1784	
			25.73		1878	
10	90	150	27.32	27.16	1786	1745
			26.91		1744	
			27.27		1704	
0	100	100	26.63	26.43	1889	1858
			26.27		1846	
			26.39		1838	
0	100	150	27.78	27.65	1742	1777
			27.42		1824	
			27.73		1765	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18 ความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัว  
ได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
100	0	150	21.52	21.51	1010	1039
			21.29		1020	
			21.71		1086	
90	10	150	17.73	17.49	1202	1205
			17.47		1174	
			17.27		1239	
80	20	150	18.57	18.55	1315	1294
			18.39		1277	
			18.70		1290	
70	30	150	20.26	20.24	1466	1434
			19.95		1398	
			20.51		1437	
60	40	100	23.21	23.04	1812	1782
			22.86		1760	
			23.06		1774	
60	40	150	25.11	24.89	1612	1568
			24.68		1530	
			24.89		1562	
50	50	100	25.51	25.51	1822	1834
			25.38		1816	
			25.64		1864	
50	50	150	27.63	27.37	1715	1682
			27.18		1652	
			27.31		1678	

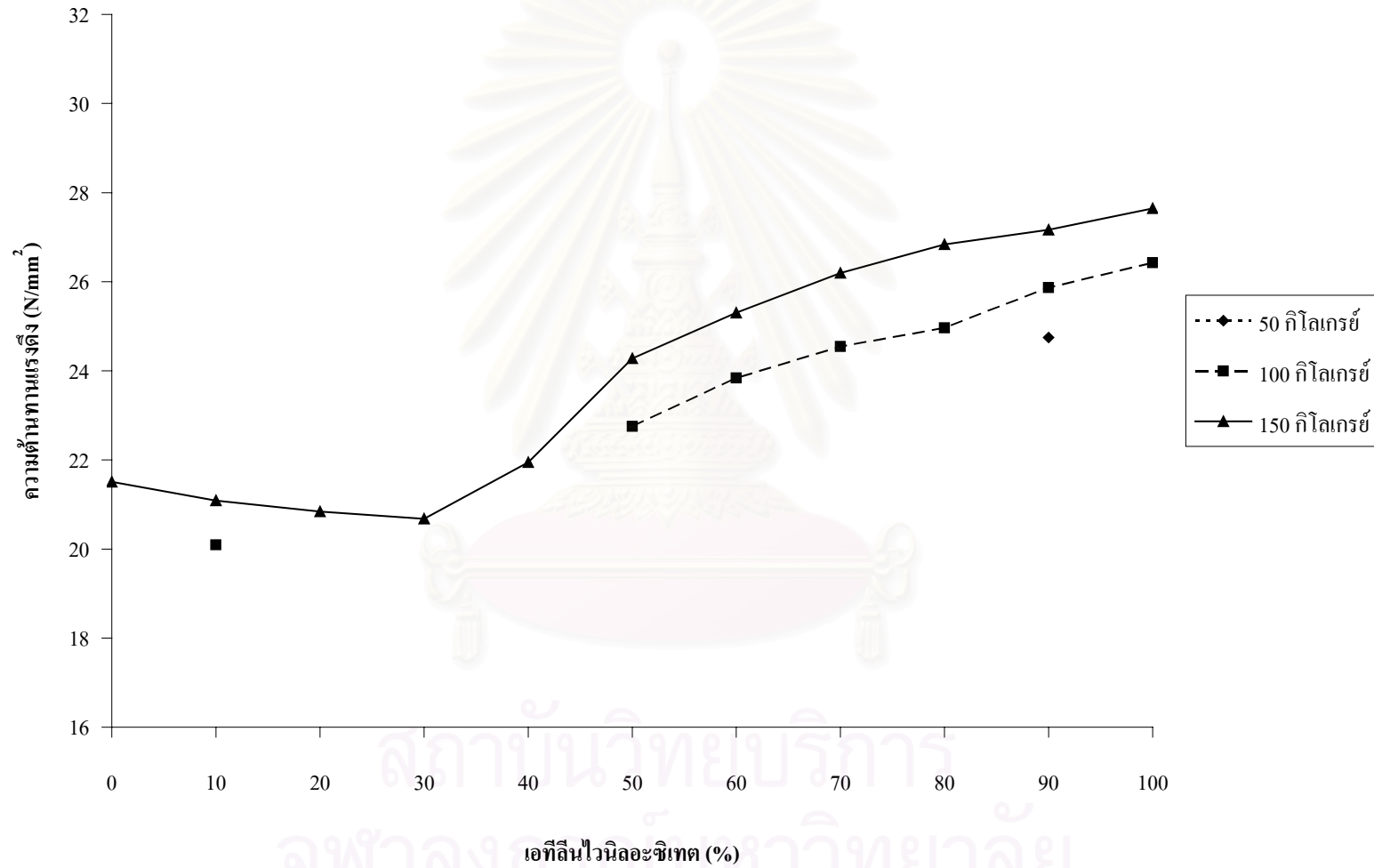


ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

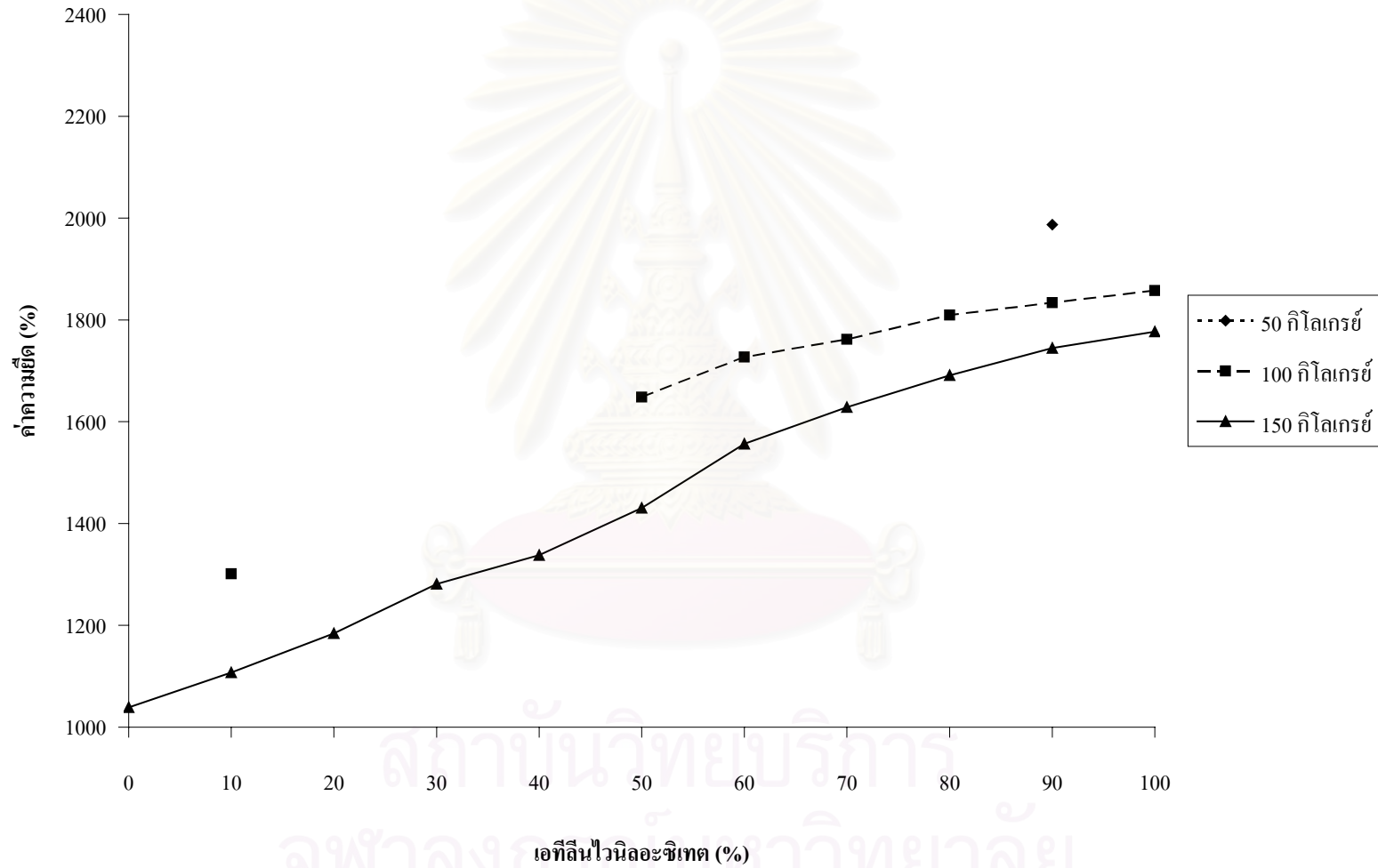
โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
40	60	50	24.53	24.48	2087	2093
			24.25		2059	
			24.67		2133	
40	60	100	26.20	26.22	1921	1907
			26.39		1918	
			26.06		1882	
40	60	150	28.21	28.23	1734	1708
			28.03		1678	
			28.44		1712	
30	70	50	25.36	25.14	2158	2118
			24.94		2103	
			25.12		2094	
30	70	100	27.23	27.23	1936	1954
			27.47		1966	
			26.99		1959	
30	70	150	29.82	29.82	1748	1773
			30.00		1810	
			29.64		1760	
20	80	50	26.35	26.08	2182	2159
			26.05		2158	
			25.85		2138	
20	80	100	28.28	28.06	2012	1971
			27.72		1936	
			28.17		1966	

ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

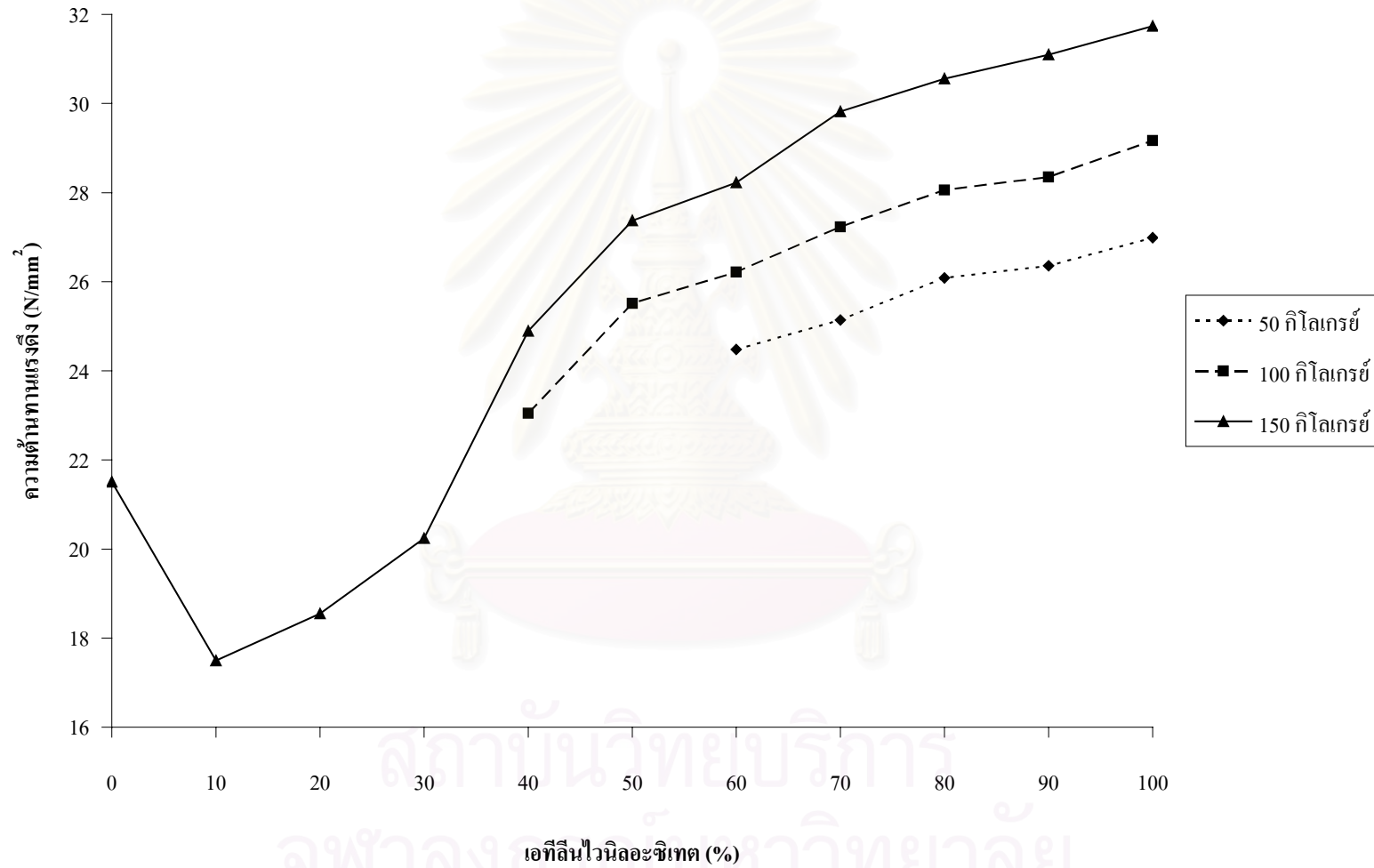
โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล-อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความต้านทานแรงดึง		ค่าความยืด	
			(N/mm <sup>2</sup> )	เฉลี่ย	(%)	เฉลี่ย
20	80	150	30.63	30.56	1866	1826
			30.31		1780	
			30.73		1832	
10	90	50	26.28	26.36	2230	2213
			26.45		2184	
			26.34		2226	
10	90	100	28.57	28.35	2008	2022
			28.13		2040	
			28.35		2017	
10	90	150	30.91	31.10	1882	1877
			31.08		1902	
			31.31		1848	
0	100	50	26.77	26.99	2237	2253
			27.20		2267	
			26.99		2254	
0	100	100	29.17	29.17	2090	2042
			29.06		1985	
			29.27		2052	
0	100	150	31.92	31.74	1920	1902
			31.81		1905	
			31.48		1882	



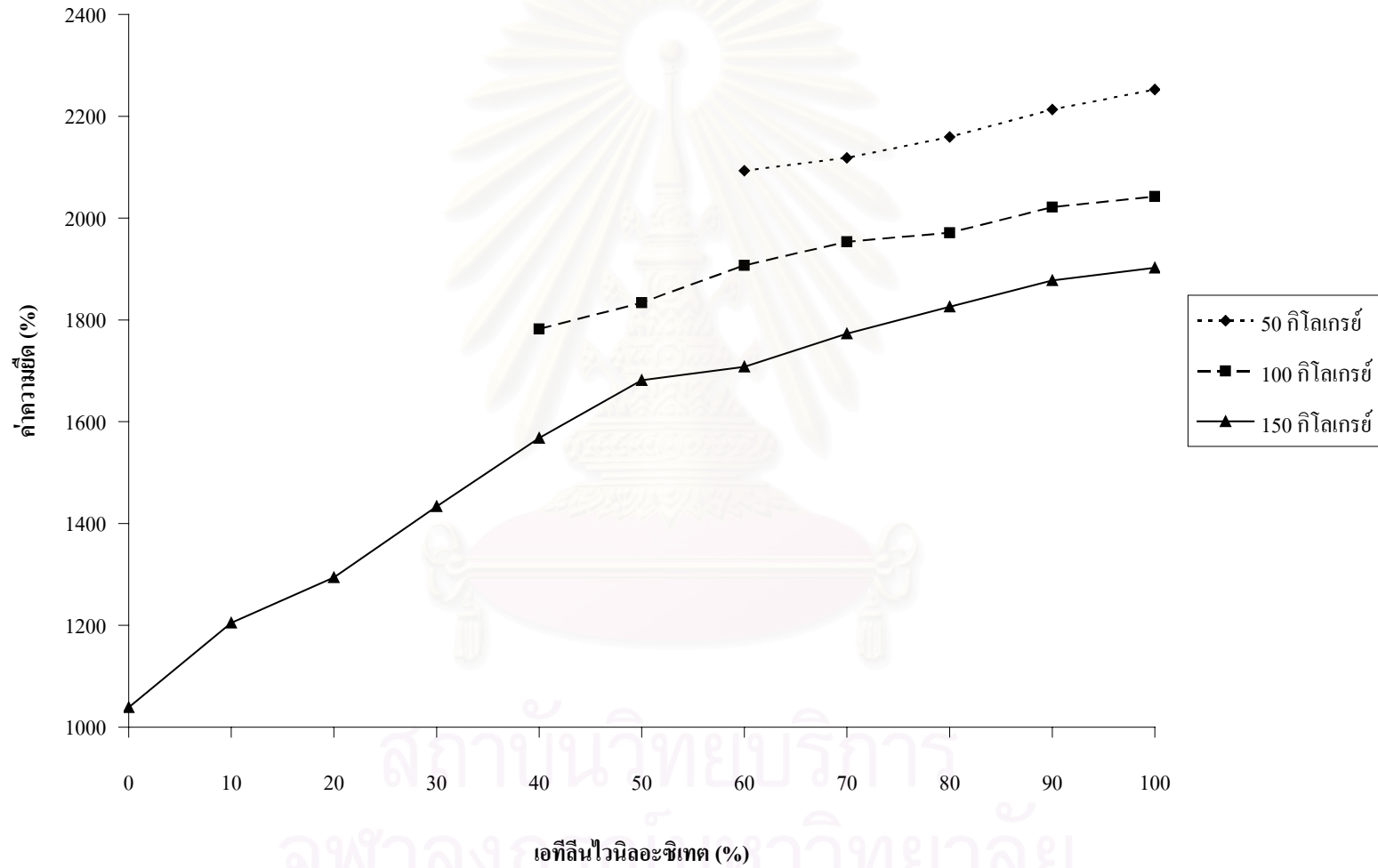
รูปที่ 4.7 ความต้านทานแรงดึงของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหัดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %



รูปที่ 4.8 ค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวโนลอะซิเตดหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทีลีนไวโนลอะซิเตดมีไวโนลอะซิเตด 18 %



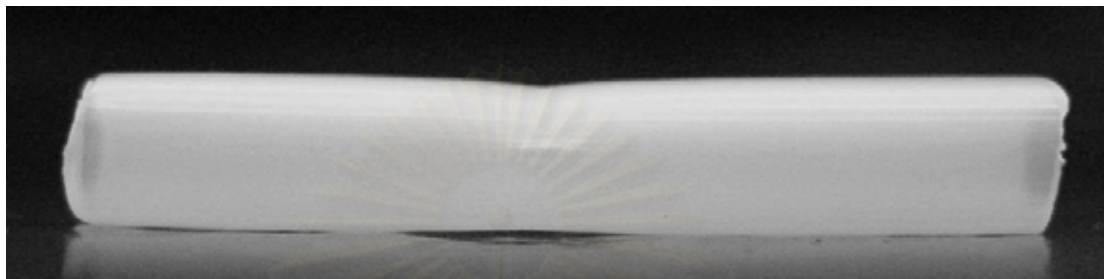
รูปที่ 4.9 ความต้านทานแรงดึงของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหัดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %



รูปที่ 4.10 ค่าความยืดของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 %

#### 4.5 การหาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน

การทดสอบหาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตสังเกตุจากรอยหักของท่อที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ดังรูปที่ 4.11 – 4.16 ต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน

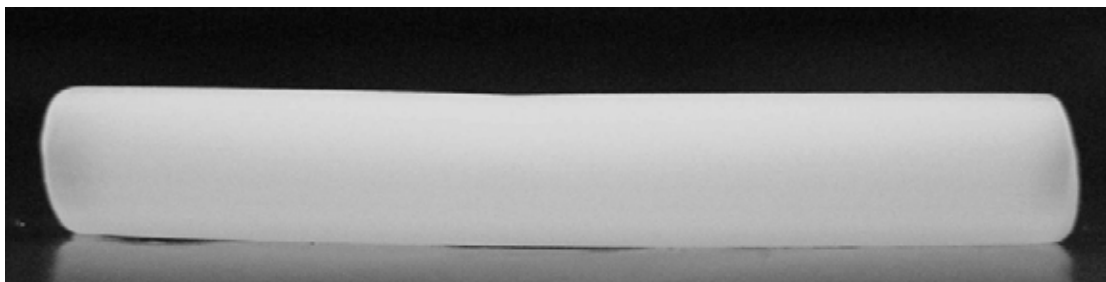


รูปที่ 4.12 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตต 20 % (18 % ไวนิลอะซิเตต)

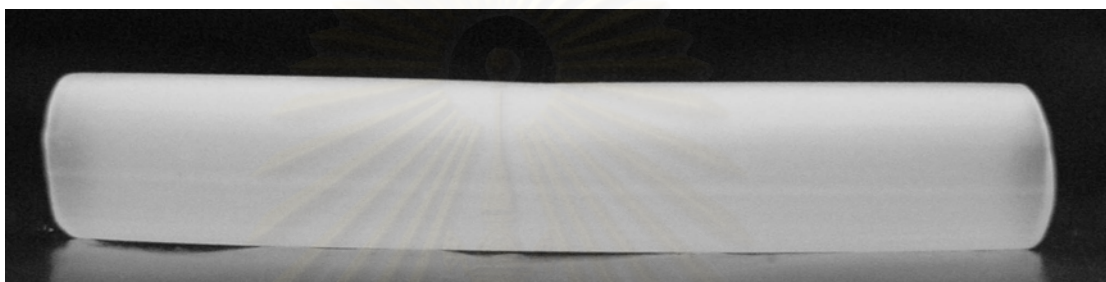


รูปที่ 4.13 รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งมีเอทีลีนไวนิลอะซิเตต 40 % (18 % ไวนิลอะซิเตต)

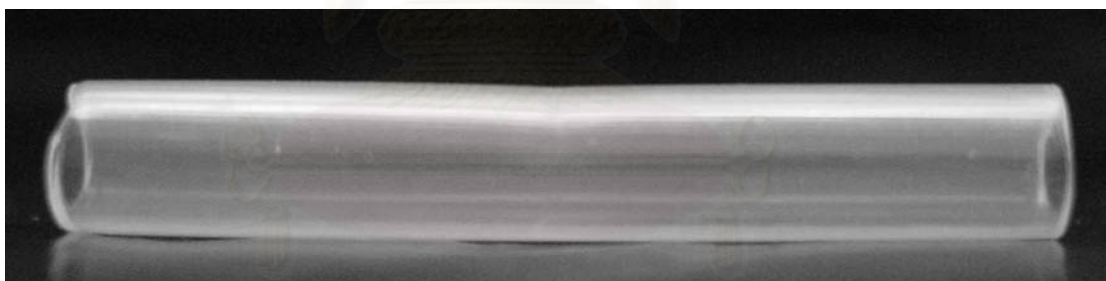




รูปที่ 4.14 รอยหักของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งมีเอทิลีนไวนิลอะซิเตต 60 % (18 %  
ไวนิลอะซิเตต)



รูปที่ 4.15 รอยหักของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต ซึ่งมีเอทิลีนไวนิลอะซิเตต 80 % (18 %  
ไวนิลอะซิเตต)



รูปที่ 4.16 รอยหักของท่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (18 %ไวนิลอะซิเตต)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

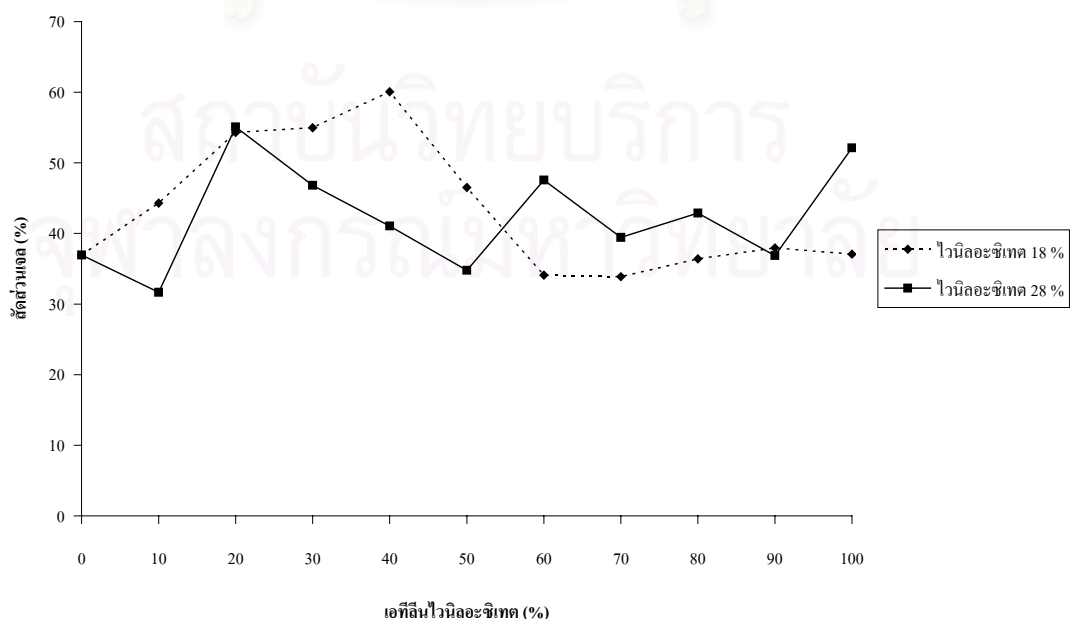
### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเจลกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต

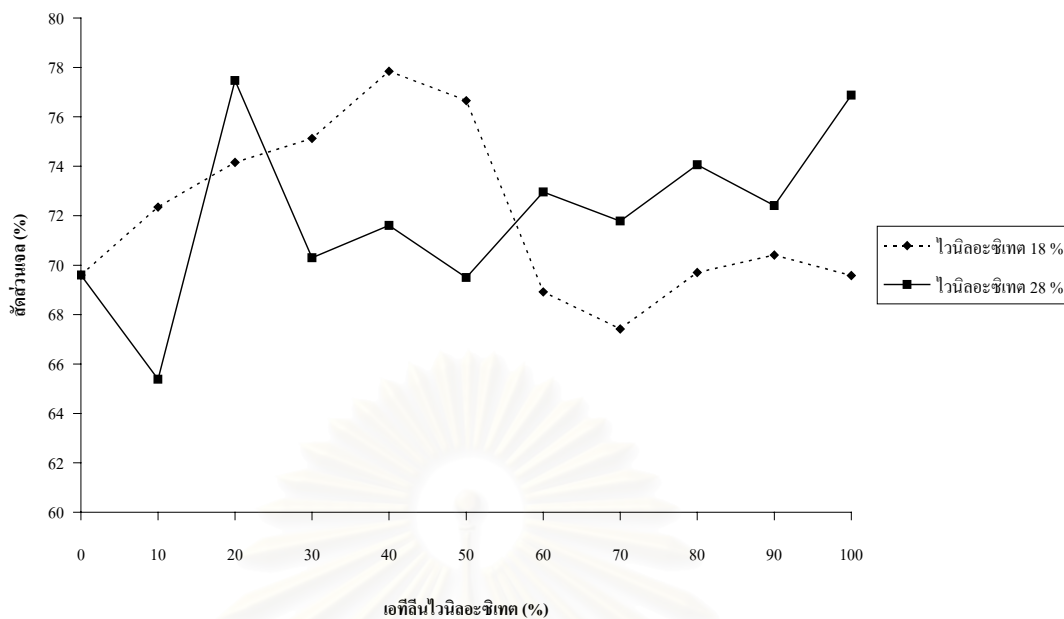
สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต หาได้จากสัดส่วนของน้ำหนักสุดท้ายของท่อภายหลังการละลายด้วยตัวทำละลายไซลีน ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส กับน้ำหนักทั้งหมดของท่อ โดยค่าที่ได้แสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลที่เกิดการเชื่อมโยงจากรังสีแกมมา ซึ่งจากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 จะพบว่า เมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้สัดส่วนเจลเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมาทำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลของโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต โดยการเชื่อมโยงส่วนใหญ่จะเกิดในโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous regions)

ส่วนในแง่ของปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต จากรูปที่ 4.1 ที่ปริมาณรังสี 50 กิโลเกรย์ และ 100 กิโลเกรย์ ปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (18 % ไวนิลอะซิเตต) 40 % ทำให้เกิดสัดส่วนเจลมากที่สุด โดยมีค่าสัดส่วนเจล 60.07 % และ 77.85 % ตามลำดับ แต่ที่ปริมาณรังสี 150 กิโลเกรย์ สัดส่วนเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (18 % ไวนิลอะซิเตต) เพิ่มขึ้น

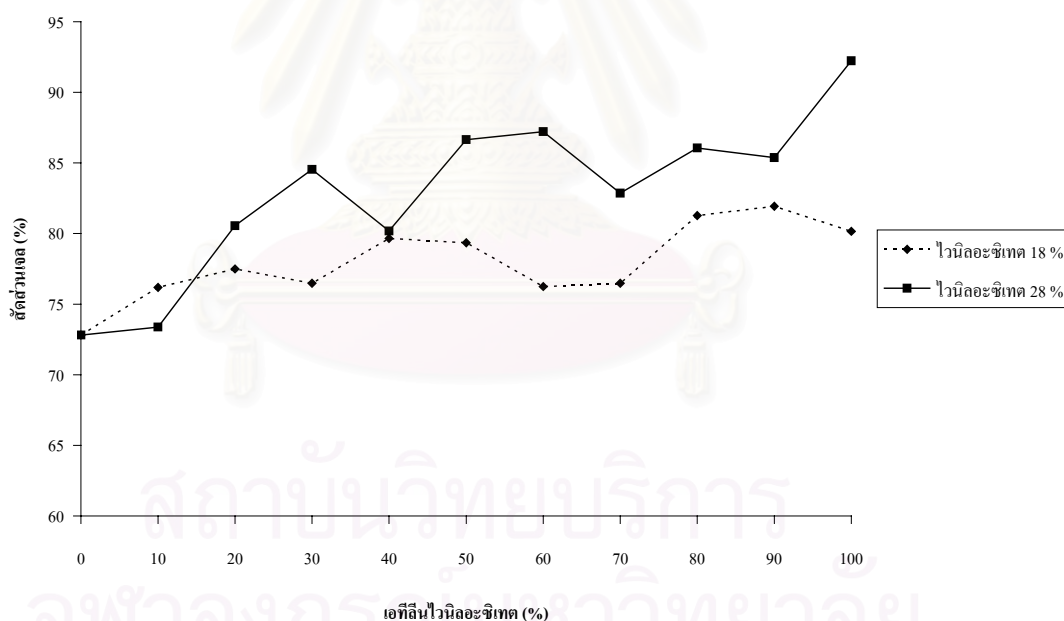
จากรูปที่ 4.2 ที่ปริมาณรังสี 50 กิโลเกรย์ และ 100 กิโลเกรย์ ปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (28 % ไวนิลอะซิเตต) 20 % ทำให้เกิดสัดส่วนเจลมากที่สุด โดยมีค่าสัดส่วนเจล 55.08 % และ 77.47 % ตามลำดับ แต่ที่ปริมาณรังสี 150 กิโลเกรย์ สัดส่วนเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (28 % ไวนิลอะซิเตต) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 สัดส่วนเจลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์



รูปที่ 5.2 สัดส่วนเถ้าของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวโนลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 100 กิโลเกรย์



รูปที่ 5.3 สัดส่วนเถ้าของท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวโนลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์

เมื่อเปรียบเทียบเอทิลีนไวโนลอะซิเตดทั้งสองชนิด จากรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.3 จะพบว่า ที่ปริมาณรังสี 150 กิโลเกรย์ เอทิลีนไวโนลอะซิเตดซึ่งมีไวโนลอะซิเตด 28 % มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเถ้ามากกว่าเอทิลีนไวโนลอะซิเตดซึ่งมีไวโนลอะซิเตด 18 % เนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของไวโนลอะซิเตดที่มีต่อโครงสร้างออสถุณฐานของโพลีเมอร์ผสม ทำให้เกิดการเชื่อมโยง

เพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณรังสี 50 กิโลเกรย์ และ 100 กิโลเกรย์ เอทีลินไวนิลอะซิเตตทั้งสองชนิด ทำให้เกิดสัดส่วนเจลมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน

จากที่กล่าวมาข้างต้นพอจะสรุปความสัมพันธ์ของสัดส่วนเจลกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของ โพลีเอทีลินต่อเอทีลินไวนิลอะซิเตตได้ว่า

- สัดส่วนเจลเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น
- ที่ปริมาณรังสี 50 กิโลเกรย์ และ 100 กิโลเกรย์ สัดส่วนเจลมากที่สุด เมื่อมีปริมาณของ โพลีเอทีลินและเอทีลินไวนิลอะซิเตตเหมาะสม คือ มีปริมาณของโพลีเอทีลินต่อเอทีลินไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 60 : 40 และ 80 : 20 สำหรับเอทีลินไวนิลอะซิเตตที่มีไวนิลอะซิเตต 18 % และ 28 % ตามลำดับ โดยสัดส่วนเจลที่เกิดจากส่วนผสมทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน
- ที่ปริมาณรังสี 150 กิโลเกรย์ สัดส่วนเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของเอทีลินไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น และที่เอทีลินไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 % สัดส่วนเจลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าเอทีลินไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

## 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหลอมเหลวกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของโพลีเอทีลินต่อเอทีลินไวนิลอะซิเตต

การหาจุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลิน/เอทีลินไวนิลอะซิเตต ทำโดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งค่าที่ได้จะมีจุดหลอมเหลว 2 ค่า เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นโพลีเมอร์ผสม การหลอมเหลวของโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดไม่พร้อมกัน โดยจุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลินจะสูงกว่าเอทีลินไวนิลอะซิเตต

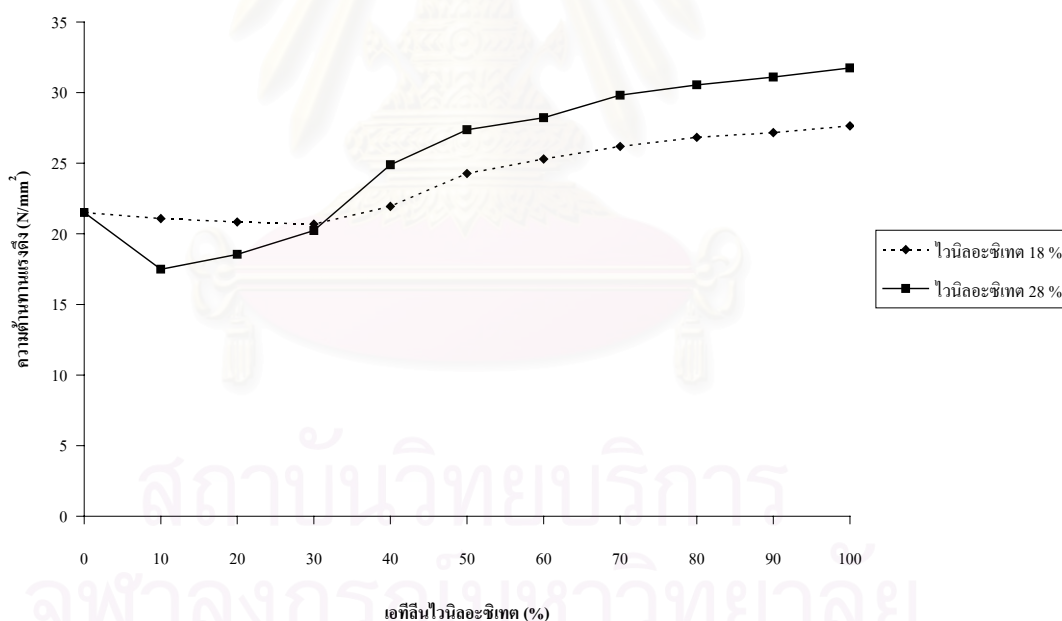
จากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้จุดหลอมเหลวของโพลีเอทีลินและเอทีลินไวนิลอะซิเตตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากรังสีแกมมาทำลายโครงสร้างที่เป็นผลึก (crystalline regions) ซึ่งเมื่อปริมาณของโครงสร้างที่เป็นผลึกลดลง และในกรณีนี้ การวิจัยเป็นการทำการเชื่อมโยงบางส่วน (partial crosslink) โครงร่างแหสามมิติที่เกิดขึ้นยังมีไม่มากพอ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่เป็นผลึกที่ลดลง ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวโพลีเมอร์จะใช้น้อยลง เป็นเหตุให้จุดหลอมเหลวลดลง ส่วนในแง่ของปริมาณของเอทีลินไวนิลอะซิเตต พบว่า จุดหลอมเหลวไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน อาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกที่เหลืออยู่หลังฉายรังสีมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของจุดหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยจนไม่สามารถแยกแยะได้

### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีนไวนิลอะซิเตต

การทดสอบสมบัติเชิงกลของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ทำเฉพาะกับท่อซึ่งสามารถหดตัวได้ด้วยความร้อน โดยต้องมีค่าการหดตามแนวยาว (Longitudinal shrink) ไม่เกินร้อยละ 10

#### 5.3.1 ความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 แสดงความต้านทานแรงดึงของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น ซึ่งการเชื่อมโยงนี้เป็นเหตุให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนในแง่ของปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต พบว่า เมื่อปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต ทำให้โพลีเมอร์ผสมมีโครงสร้างอัดแน่นเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.4 ความต้านทานแรงดึงของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์

เมื่อเปรียบเทียบเอทีลีนไวนิลอะซิเตตทั้งสองชนิด จากรูปที่ 5.4 จะพบว่า เอทีลีนไวนิลอะซิเตตซึ่งมีไวนิลอะซิเตต 28 % มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงมากกว่าเอทีลีนไวนิลอะซิเตตซึ่งมีไวนิลอะซิเตต 18 % เนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของไวนิลอะซิเตต

ที่มีต่อโครงสร้างอสังฐานของโพลีเมอร์ผสม ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นด้วย

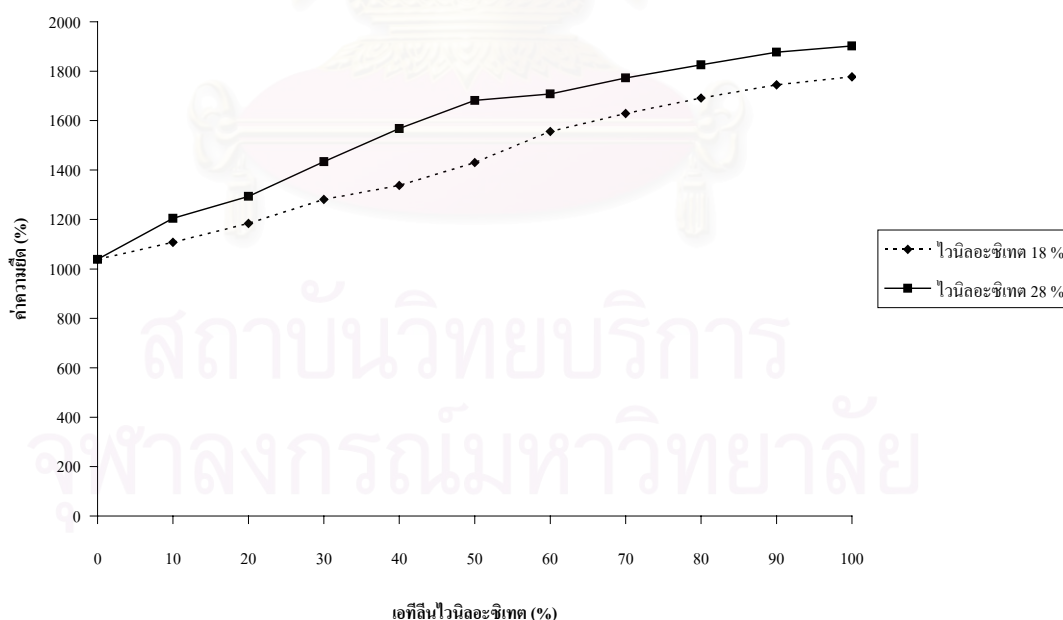
จากที่กล่าวมาข้างต้นพอจะสรุปความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดึงกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีนไวนิลอะซิเตตได้ว่า

- ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น
- ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต

ที่เพิ่มขึ้น และที่เอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 % ความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าเอทีลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

### 5.3.2 ค่าความยืด

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 แสดงค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตหัดตัวได้ด้วยความร้อน พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความยืดลดลง เนื่องจากการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของโพลีเมอร์แข็งแรงขึ้น และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (chain mobility) ลดลง ส่วนในแง่ของปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต พบว่า เมื่อปริมาณของเอทีลีนไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความยืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเอทีลีนไวนิลอะซิเตต ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอสังฐาน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างนี้เป็นเหตุโพลีเมอร์สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ง่าย ทำให้ค่าความยืดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.5 ค่าความยืดของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตตที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์



เมื่อเปรียบเทียบเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตทั้งสองชนิด จากรูปที่ 5.5 จะพบว่า เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตซึ่งมีไวนิลอะซิเตต 28 % มีการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดมากกว่าเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตซึ่งมีไวนิลอะซิเตต 18 % เนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของไวนิลอะซิเตตที่มีต่อโครงสร้างอสังฐานของโพลีเมอร์ผสม ทำให้โครงสร้างอสังฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีค่าความยืดเพิ่มขึ้นด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นพอจะสรุปความสัมพันธ์ของค่าความยืดกับปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณของโพลีเอทีลีนต่อเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตได้ว่า

- ค่าความยืดลดลงตามปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น
- ค่าความยืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตที่เพิ่มขึ้น และที่เอทีลีน ไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 28 % ค่าความยืดจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

### 5.3.3 ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ

ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต หาได้จากการสังเกตรอยหักของท่อที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งนำมาหักหลังจากแช่ในน้ำแข็งแห้งที่มีอุณหภูมิประมาณ -78 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.11 แสดงรอยหักของท่อโพลีเอทีลีน จะพบว่า ท่อโพลีเอทีลีนจะปรากฏรอยหักที่ชัดเจนบริเวณกึ่งกลางท่อ แต่รอยหักของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต ซึ่งมีเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต 20 % ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12 รอยหักของท่อที่ได้จะมีขนาดเล็ก และรอยหักจะมีขนาดเล็กเรื่อยๆ จนไม่ปรากฏรอยหักให้เห็น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตต ดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงว่า ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตใน โพลีเมอร์ผสม เนื่องจากโครงสร้างอสังฐานของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตมีมากกว่าของโพลีเอทีลีน ทำให้การเพิ่มขึ้นของเอทีลีน ไวนิลอะซิเตตเป็นการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอสังฐานด้วย การเพิ่มขึ้นของโครงสร้างนี้ทำให้โพลีเมอร์มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

## 5.4 สัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต เพื่อทำเป็นท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process)

การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทีลีน/เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต เพื่อทำเป็นท่อหดตัวได้ด้วยความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องนั้น พิจารณาจาก

- ค่าการหดตามแนวยาว (Longitudinal shrink) ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ตามข้อกำหนดของบริษัท Cremco ประเทศฝรั่งเศส<sup>[16]</sup>
- ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 11.0 MPa หรือ 11.0 N/mm<sup>2</sup> ตามมาตรฐาน ASTM D 2671<sup>[17]</sup>



- ค่าความยืด (Elongation) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 370 % ตามมาตรฐาน ASTM D 2671 <sup>[17]</sup>

โดยค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.18 และจากการพิจารณาสมบัติต่างๆ ข้างต้น ทำให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมทั้งหมด 41 แบบ ซึ่งต้องนำมาพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อและค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยค่าทั้งสองแสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและการเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีไวนิลอะซิเตต 18 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม	
			เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)
100	0	150	4.55	-1.87
90	10	100	3.15	2.61
90	10	150	7.96	-3.45
80	20	150	8.33	1.01
70	30	150	4.64	3.85
60	40	150	4.22	0.00
50	50	100	4.67	1.08
50	50	150	2.82	1.10
40	60	100	7.94	2.22
40	60	150	7.49	-2.20
30	70	100	5.43	-1.22
30	70	150	3.65	-1.22
20	80	100	4.27	-2.20
20	80	150	3.57	1.11
10	90	50	7.54	1.03
10	90	100	4.96	-1.03
10	90	150	1.05	-1.02
0	100	100	2.81	-3.37
0	100	150	2.80	3.45

ตารางที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและการเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตหดตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตมี ไวนิลอะซิเตต 28 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม	
			เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)
100	0	150	4.55	-1.87
90	10	150	1.01	7.69
80	20	150	6.34	4.59
70	30	150	4.66	3.19
60	40	100	6.09	1.02
60	40	150	6.68	-3.09
50	50	100	5.37	2.63
50	50	150	6.43	1.30
40	60	50	9.43	-0.94
40	60	100	3.35	-0.95
40	60	150	4.95	-0.93
30	70	50	8.58	-1.19
30	70	100	5.55	-3.49
30	70	150	3.93	-2.33
20	80	50	5.16	-1.96
20	80	100	4.44	-7.00
20	80	150	0.57	-2.94
10	90	50	2.98	1.15
10	90	100	4.62	2.25
10	90	150	2.24	1.16
0	100	50	5.83	-1.06
0	100	100	5.23	-2.15
0	100	150	1.46	-1.09

จากตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 จะพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อต่ำที่สุด อยู่ที่สัดส่วนระหว่างโพลีเอทิลีน 20 % ต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) 80 % ซึ่งฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ โดยมีค่าเท่ากับ 0.57 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าพิจารณาประกอบกับราคาของเม็ดพลาสติกซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก โดยโพลีเอทิลีนมีราคาประมาณ 37 บาทต่อกิโลกรัม เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) มีราคาประมาณ 45 บาทต่อกิโลกรัม และเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) มีราคาประมาณ 52 บาทต่อกิโลกรัม จะได้สัดส่วนที่เหมาะสม ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตด เพื่อทำเป็นท่อหดตัวได้ด้วยความร้อน

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (%)		ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	การเปลี่ยนแปลงจากขนาดเดิม		ราคาวัตถุดิบ (บาทต่อกิโลกรัม)	ความต้านทานแรงดึง (N/mm <sup>2</sup> )	ค่าความยืด (%)
	ไวนิลอะซิเตด 18 %	ไวนิลอะซิเตด 28 %		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (%)	ความหนา (%)			
10	90	-	150	1.05	-1.02	44.20	27.16	1745
90	-	10	150	1.01	7.69	38.50	17.49	1205
20	-	80	150	0.57	-2.94	49.00	30.56	1826
0	-	100	150	1.46	-1.09	52.00	31.74	1902

จากตารางที่ 5.3 จะพบว่า ปริมาณรังสีแกมมา 150 กิโลเกรย์ เป็นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับทำท่อหดตัวได้ด้วยความร้อน แต่ในแง่ของสัดส่วนนั้น การเลือกจะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานและราคาของวัตถุดิบ โดยถ้าต้องการให้ท่อมีราคาของวัตถุดิบต่ำกว่า ควรใช้โพลีเอทิลีน 90 % กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) 10 % ซึ่งท่อที่ได้จะมีความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดต่ำ (ค่าทั้งสองสูงกว่ามาตรฐาน ASTM D 2671) อีกทั้งไม่มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ จึงไม่เหมาะกับการทำเป็นท่อรูปโค้งมากๆ แต่ถ้าต้องการให้ท่อมีความต้านทานแรงดึง ค่าความยืด และความยืดหยุ่นสูง ควรใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (28 %ไวนิลอะซิเตด) 100 % ซึ่งท่อที่ได้จะมีราคาของวัตถุดิบสูงกว่า

## รายการอ้างอิง

1. Zhang W. X., Liu Y. T., Sun J. Z. The relationship between sol fraction and radiation dose in radiation crosslink of low-density polyethylene (LDPE) / ethylenevinylacetate (EVA) blend. Radiation Physics and Chemistry. 35, 1-3 (1990) : 163-166.
2. Zhang Hui, Xu Jiufu. The modification of the flexibility of radiation crosslinked PE by blending PE with EVA and CPE. Radiation Physics and Chemistry. 42, 1-3 (1993) : 117-119.
3. ชวิชัย อธิพิพนชนกร. การทำวัสดุโพลีเอทีลีนหดตัวได้ด้วยความร้อน โดยการฉายรังสีแกมมา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. Mateev, M., Karageorgiev, S. The effect of electron beam irradiation and context of EVA upon the gel-forming processes in LDPE-EVA films. Radiation Physics and Chemistry. 51, 2 (1998) : 205-206.
5. Jamaliah Sharif, Sharifah Hanisah Syed Abdul Aziz, Kamaruddin Hashim. Radiation Effect on LDPE/EVA blends. Radiation Physics and Chemistry. 58 (2000) : 191-195.
6. Parkinson, W. W. Encyclopedia of science and technology. Vol. 11 : Radiation-induced reactions. New York : Oak Ridge National Laboratory, 1982.
7. Richard, F. Grossman. The Mixing of Rubber. London : Chapman & Hall, 1997.
8. Rubin. Handbook of Plastic Materials and Technology. New York : A Wiley-Interscience, 1990.
9. Werner Hofmann. Rubber Technology Handbook. New York : Hanser, 1989.
10. Wood, R. J., Pikaev., A. K. Applied Radiation Chemistry : Radiation Processing. New York : A Wiley-Interscience, 1994.
11. Hitoshi Yamaoka. Radiation Chemistry of Polymers. UNDP / IAEA / RCA Regional Training Course on Radiation Chemistry Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment. JAERI, 1991.
12. Joseph Silverman. Trends in Radiation Processing. New York : Pergamon, 1980.
13. Singh, A., Silverman, J. Radiation Processing of Polymer. New York : Hanser, 1992.
14. Physical Properties of POLENE EVA Copolymer. Bangkok : Thai Petrochemical Industry, (n.d.). (Mimeographed)

15. American Society of Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D 638 (2001) : 45-57.
16. Faucher, C. Cremco Co., Ltd. Private Communication, 2000.
17. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Heat-Shrinkable Tubing for Electrical Use. ASTM D 2671 (1999) : 44-61.
18. American Society of Testing and Materials. Standard Practice for Use of a Dichromate Dosimetry System. ASTM E 1401 (1996) : 771-776.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม

- Benning, C. J. Plastic Films for Packing. Lancaster : Technomic, 1983.
- Billmeyer, F. W. Textbook of Polymer Science. 3<sup>rd</sup> ed. New York : A Wiley-Interscience, 1984.
- Clegg, D. W., Collyer, A. A. Irradiation Effects on Polymers. New York : Elsevier Science, 1991.
- Clough, R. L., Shalaby, W. S. Radiation Effects on Polymers. Washington : American Chemical Society, 1991.
- Robert, H. Perry. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 1984.
- Spinks, J. W. T., Wood, R. J. An Introduction to Radiation Chemistry. 3<sup>rd</sup> ed. New York : A Wiley-Interscience, 1990.
- Yoncho Tabata, Yasuo Ito, Seiichi Tagawa. Handbook of Radiation Chemistry. CRC, (1991) : 806-807.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### การหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ

#### 1. วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ

- 1.1 Dichromate dosimeter ประกอบด้วย  $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{HClO}_4$
- 1.2 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
- 1.3 แท่งพลาสติกยาว 5 เซนติเมตร จำนวน 12 แท่ง
- 1.4 หลอดแก้ว 12 หลอด พร้อมจุกยาง
- 1.5 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- 1.6 ชุดภาชนะบรรจุท่อสำหรับฉายรังสี
- 1.7 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60

#### 2. วิธีการหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ (ตามมาตรฐาน ASTM E1401) <sup>[18]</sup>

2.1 ผสมสารละลาย Dichromate dosimeter ประกอบด้วยซิลเวอร์ไดโครเมต ( $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )  $0.5 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )  $2.0 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร ในกรดเปอร์คลอริก ( $\text{HClO}_4$ ) 0.1 โมลต่อลิตร เนื่องจากซิลเวอร์ไดโครเมตละลายช้า โดยใช้เวลาไม่น้อยกว่า 18 ชั่วโมง จึงควรละลายซิลเวอร์ไดโครเมตก่อนเติมโพแทสเซียมไดโครเมต

2.2 ใส่สารละลายที่ได้ลงในหลอดแก้วทั้ง 12 หลอด อุดจุกให้แน่นด้วยจุกยางห่อด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน

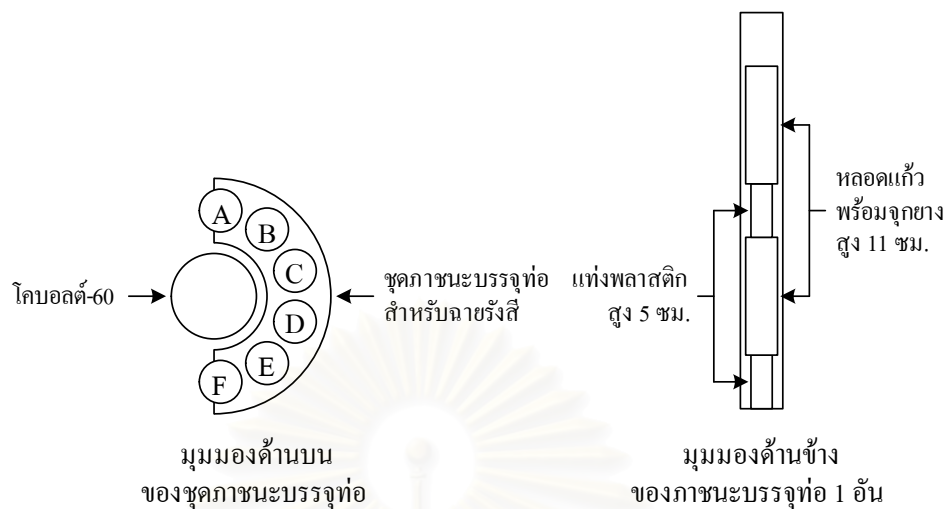
2.3 ใส่แท่งพลาสติกยาว 5 เซนติเมตรและหลอดแก้วลงในภาชนะบรรจุท่อตามลำดับ โดยใส่ภาชนะละ 2 ชุด

2.4 นำชุดภาชนะบรรจุท่อไปฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

2.5 นำสารละลายหลังจากฉายรังสี ไปหาค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

2.6 นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ

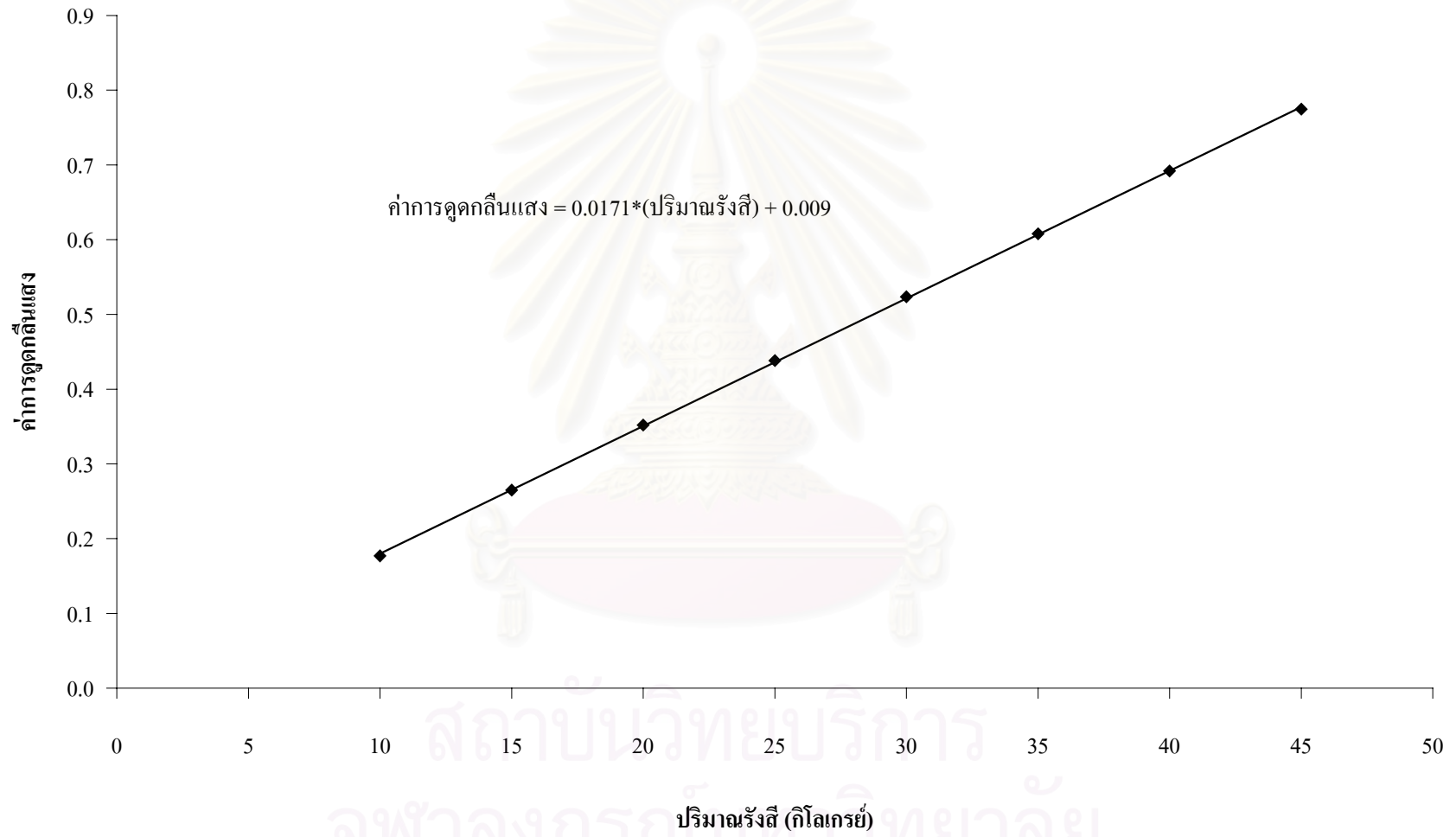
### 3. ผลการหาปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งในการหาปริมาณรังสี

ตารางที่ ก.1 ปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่ง	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์/10 ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์/ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสี (กิโลเกรย์/ชั่วโมง)	
A	บน	0.4499	25.7856	2.5786	2.9677
	ล่าง	0.5830	33.5692	3.3569	
B	บน	0.4197	24.0195	2.4019	2.7160
	ล่าง	0.5271	30.3002	3.0300	
C	บน	0.4230	24.2125	2.4212	2.8151
	ล่าง	0.5577	32.0897	3.2090	
D	บน	0.3774	21.5458	2.1546	2.5634
	ล่าง	0.5172	29.7212	2.9721	
E	บน	0.3568	20.3411	2.0341	2.4291
	ล่าง	0.4919	28.2417	2.8242	
F	บน	0.3395	19.3294	1.9329	2.3455
	ล่าง	0.4806	27.5809	2.7581	



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณรังสี

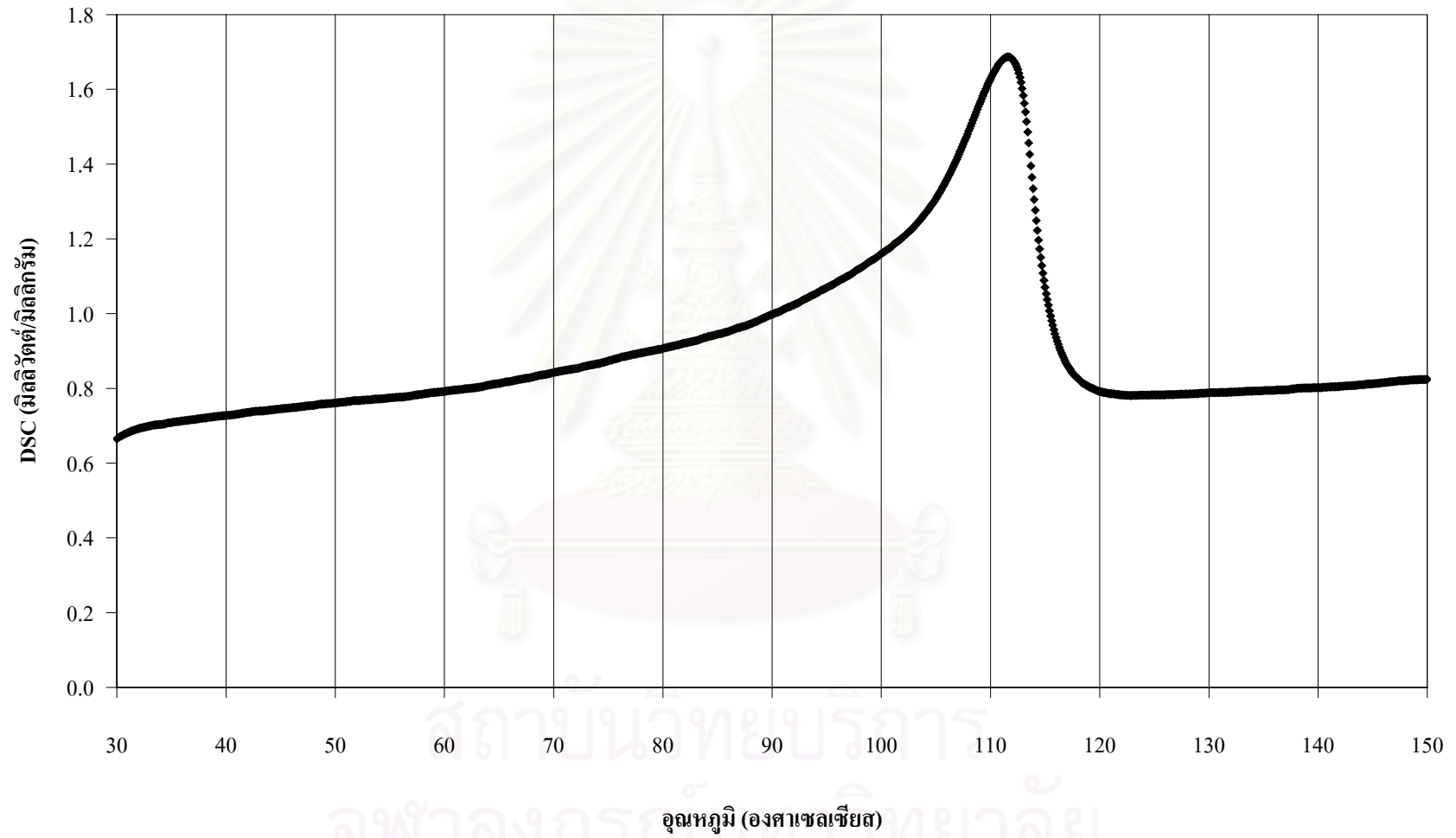
## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างรูปภาพแสดงผลการหาจุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต

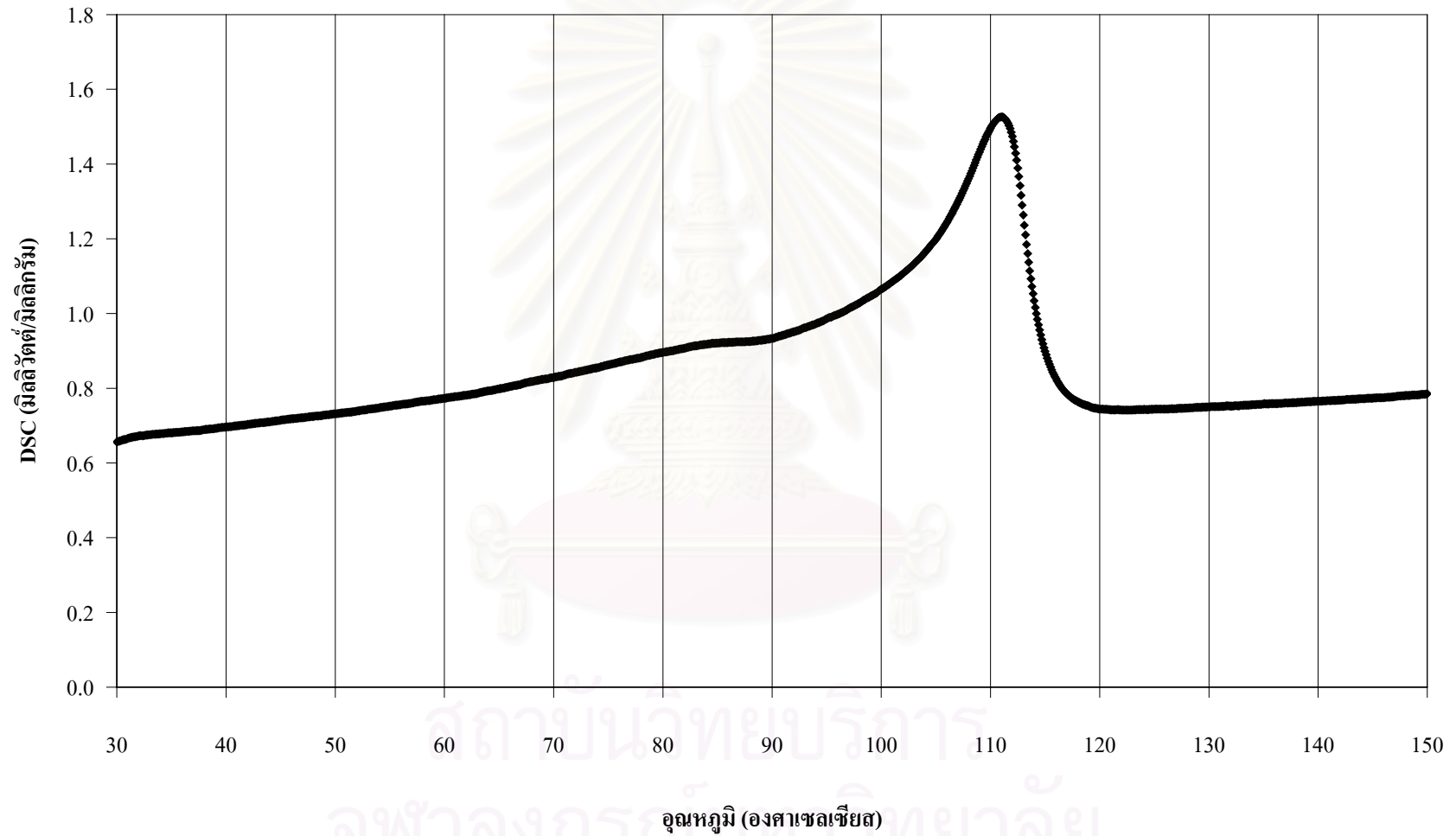
การหาจุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตต ทำได้โดยใช้เครื่องหาจุดหลอมเหลว (Differential scanning calorimeter, DSC) ซึ่งขอบเขตของการวัดอยู่ระหว่าง 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศไนโตรเจน



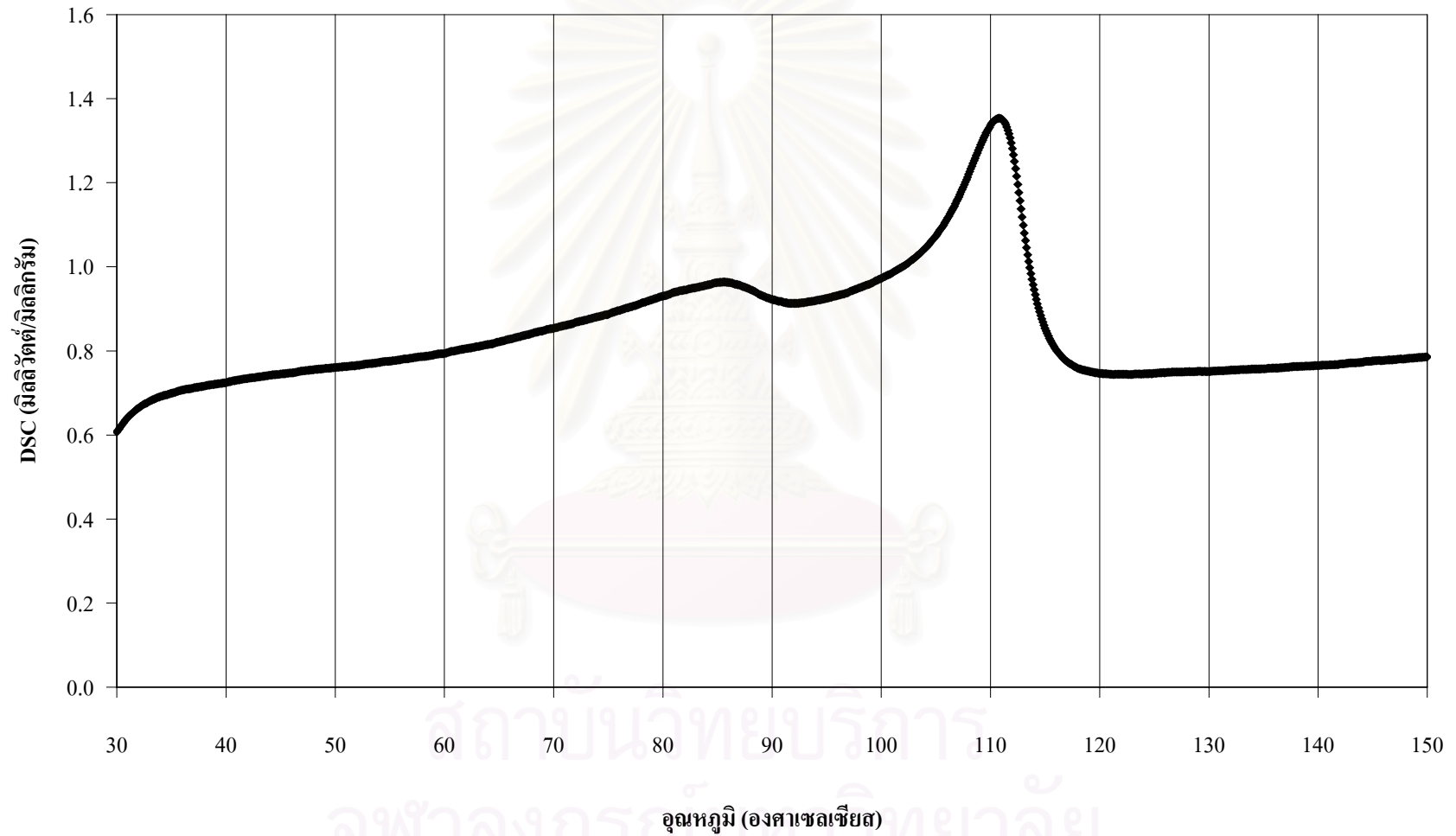
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 จุดหลอมเหลวของท่อโพลีเอทิลีนที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์

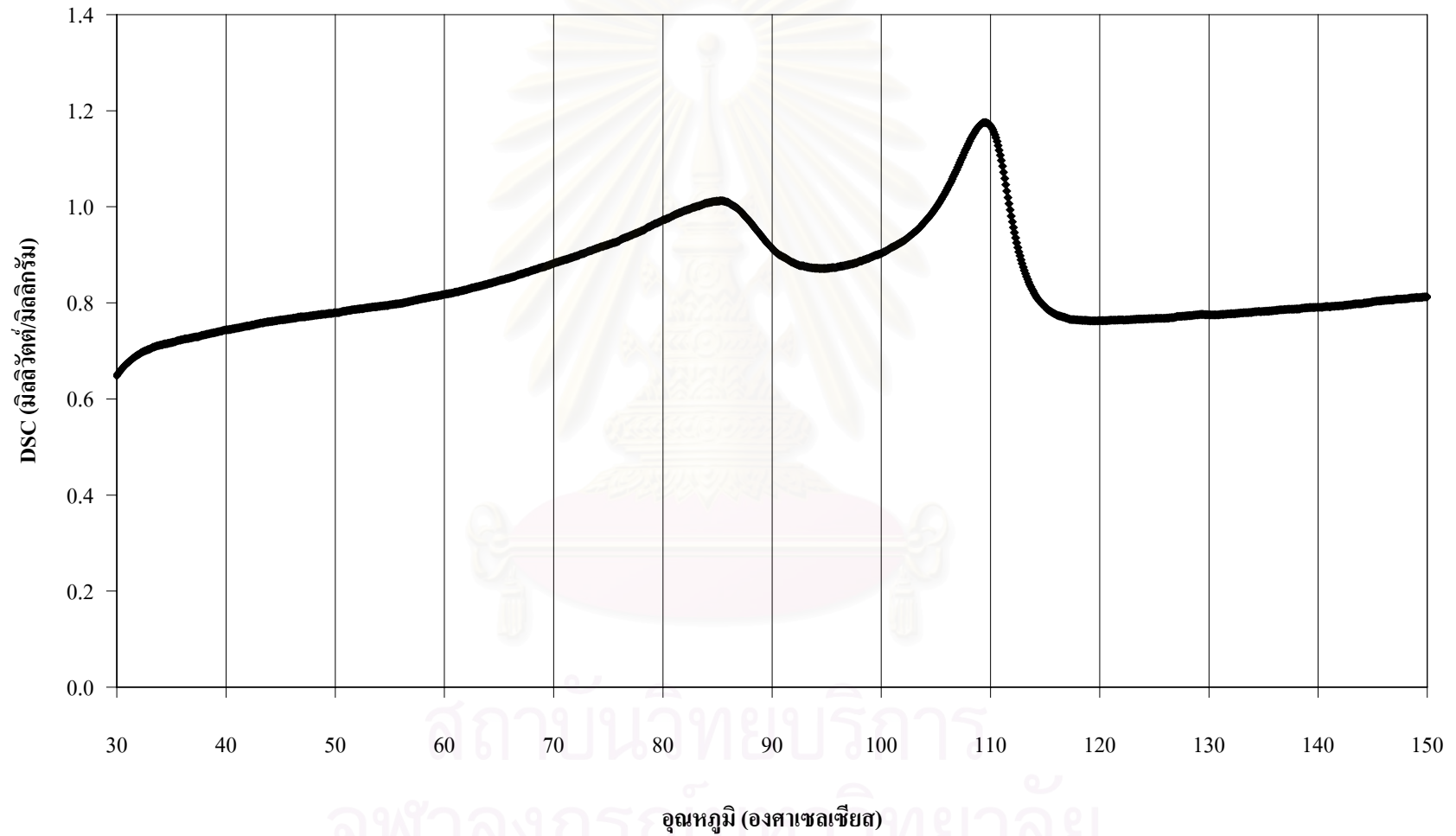


รูปที่ ข.2 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) 20 %

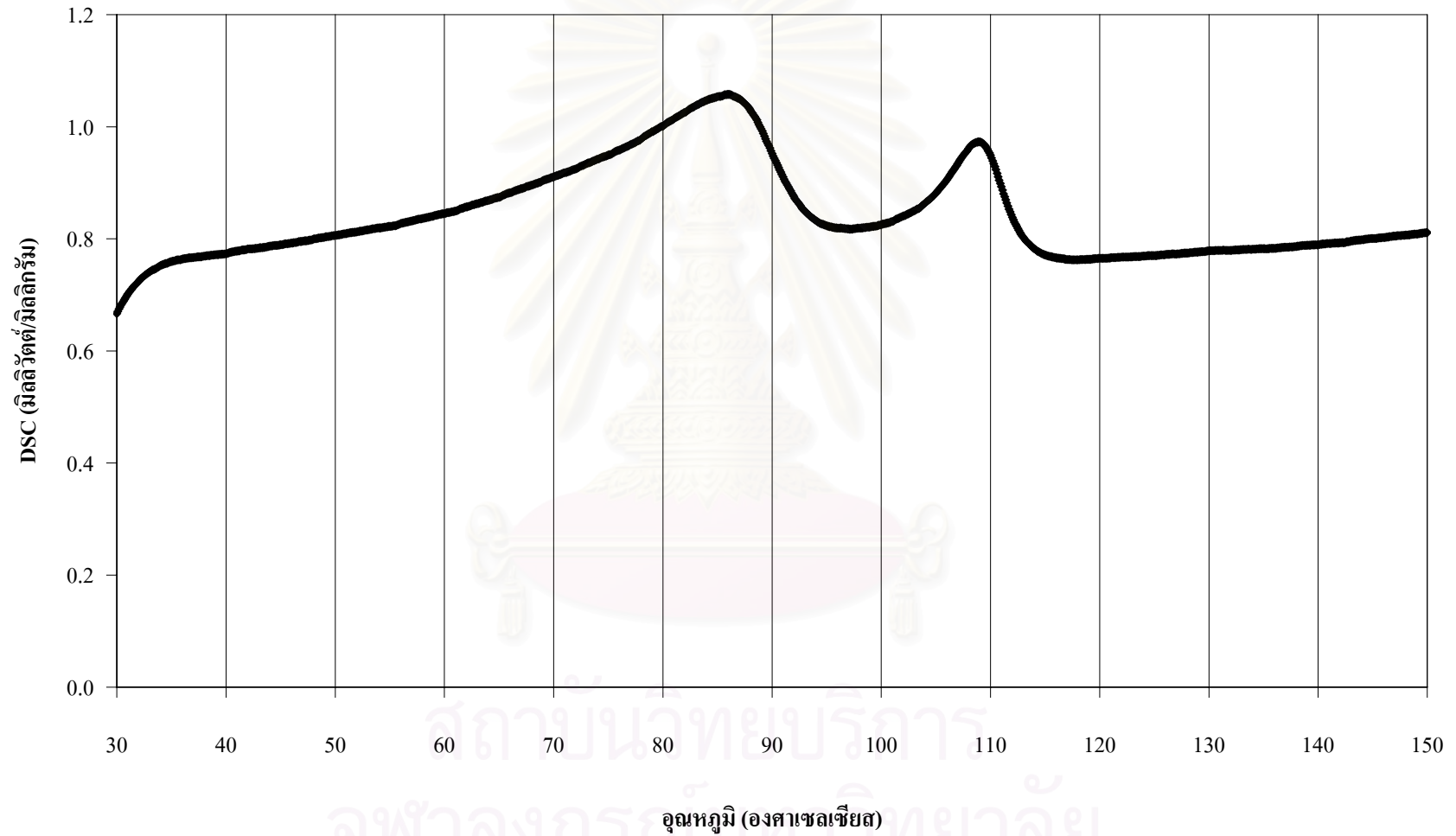


รูปที่ ข.3 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) 40 %

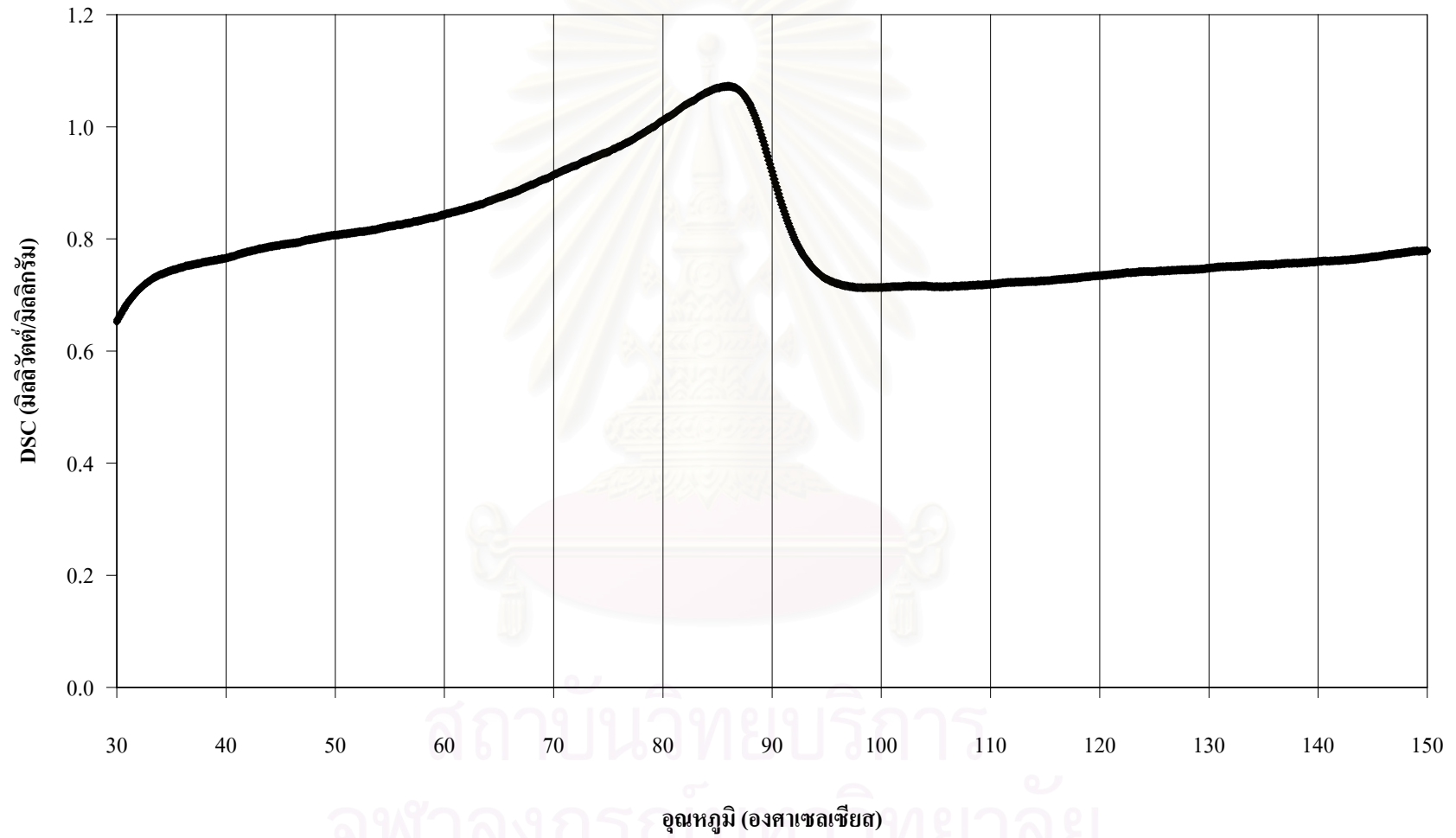




รูปที่ ข.4 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) 60 %



รูปที่ ข.5 จุดหลอมเหลวของท่อ โพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์ ซึ่งประกอบด้วยเอทีลีนไวนิลอะซิเตด (18 %ไวนิลอะซิเตด) 80 %



รูปที่ ข.6 จุดหลอมเหลวของท่อเอทีสึนไวไนลอะซิเตด (18 %ไวไนลอะซิเตด) ที่ฉายรังสีในปริมาณ 150 กิโลเกรย์

## ภาคผนวก ค

### การหาอุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด

#### 1. วิธีการหาอุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด

1.1 นำท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตดที่ขยายแล้วมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

1.2 นำท่อที่หุดออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำท่อมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความหนา

1.3 ทำซ้ำในข้อ 1.1 และ 1.2 โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาอบอีก 5 องศาเซลเซียส ทำจนกระทั่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความหนาของท่อไม่เปลี่ยนแปลง

1.4 บันทึกอุณหภูมิค่าที่สุดที่ทำให้ท่อที่หุดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความหนาไม่เปลี่ยนแปลง

#### 2. ผลการหาอุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด

จากการหาอุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด พบว่า ท่อที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีแกมมาไม่สามารถหุดตัวได้ แต่ท่อที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาจะสามารถหุดตัวได้ โดยแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อดังตารางที่ ค.1 และ ค.2

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทีลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 18 %

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิลอะซิเตด (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการหדת่อ (องศาเซลเซียส)
100	0	50	135
100	0	100	135
100	0	150	135
90	10	50	135
90	10	100	135
90	10	150	135
80	20	50	135

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิล อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการหดต่อ (องศาเซลเซียส)
80	20	100	135
80	20	150	135
70	30	50	135
70	30	100	135
70	30	150	135
60	40	50	135
60	40	100	135
60	40	150	135
50	50	50	135
50	50	100	135
50	50	150	135
40	60	50	130
40	60	100	130
40	60	150	130
30	70	50	130
30	70	100	130
30	70	150	130
20	80	50	125
20	80	100	125
20	80	150	125
10	90	50	125
10	90	100	125
10	90	150	125
0	100	50	120
0	100	100	120
0	100	150	120

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการหดท่อโพลีเอทิลีน/เอทิลีนไวนิลอะซิเตด ซึ่งเอทิลีนไวนิลอะซิเตดมีไวนิลอะซิเตด 28 %

โพลีเอทิลีน (%)	เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการหดท่อ (องศาเซลเซียส)
100	0	50	135
100	0	100	135
100	0	150	135
90	10	50	135
90	10	100	135
90	10	150	135
80	20	50	135
80	20	100	135
80	20	150	135
70	30	50	135
70	30	100	135
70	30	150	135
60	40	50	135
60	40	100	135
60	40	150	135
50	50	50	130
50	50	100	130
50	50	150	130
40	60	50	130
40	60	100	130
40	60	150	130
30	70	50	120
30	70	100	120
30	70	150	120

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

โพลีเอทีลีน (%)	เอทีลีนไวนิล อะซิเตต (%)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการหดต่อ (องศาเซลเซียส)
20	80	50	110
20	80	100	110
20	80	150	110
10	90	50	110
10	90	100	110
10	90	150	110
0	100	50	105
0	100	100	105
0	100	150	105

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชเนศ อินทรลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่โรงพยาบาล พุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และจบการศึกษาในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย