

การขึ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ไอส์ปาร์และ  
สารดูดกลืนนิวตรอน



นางสาวชญานิษฐ์ จำปี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF NEUTRON SHIELDING MATERIAL COMPRISING OF NATURAL  
RUBBER/SYNTHETIC SBR BLENDS AND NEUTRON ABSORBER



Miss Chayanit Jumpee

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขึ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพารา  
ธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสบีอาร์และสารดูดกลืน  
นิวตรอน

โดย

นางสาว ชญานิษฐ์ จำปี

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


อาจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

ชญาณิชฐ์ จำปี : การขึ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพาราธรรมชาติกับ  
 ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์และสารดูดกลืนนิวตรอน. (FABRICATION OF NEUTRON  
 SHIELDING MATERIAL COMPRISING OF NATURAL RUBBER/SYNTHETIC  
 SBR BLENDS AND NEUTRON ABSORBER ) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :  
 อ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง, 96 หน้า.

ได้ทำการขึ้นรูปน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมวัลคาไนซ์และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์  
 ในอัตราส่วนต่างๆร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอน ได้แก่ กรดบอริกชนิดผง ผงโบรอน สารละลาย  
 แคลเซียมไนเตรทและผงแคลเซียมไนเตรทในส่วนที่ต่างกัน โดยใช้วิธีการผสมส่วนประกอบ  
 ทั้งหมดด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer ที่ความเร็ว 450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และเท  
 ลงบนแบบพิมพ์แก้วที่มีความหนา 2 มม. ผลการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วยน้ำ  
 ยางพาราธรรมชาติพร้อมวัลคาไนซ์และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนใน  
 อัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริกชนิดผง 4 phr ผสมกับผงโบรอน 0.7 phr มีคุณสมบัติทาง  
 กายภาพเหมาะสมมากที่สุด จากการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนพบมีการกระจายตัวของวัสดุ  
 ดูดกลืนนิวตรอนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและสามารถกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีได้ดี  
 และไม่ทำให้เกิดรังสี Prompt gamma จากการกำบังรังสีนิวตรอน ความหนาที่เหมาะสมใน  
 การกำบังรังสีนิวตรอนมากที่สุดคือ 16 มม.ที่ได้จากการเรียงซ้อนชิ้นงานจำนวน 8 ชิ้น ซึ่งวัสดุ  
 กำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้นี้มีค่า HVL ประมาณ 0.8 ซม. และมีค่า ภาคตัดขวางมหภาคต่อ  
 รังสีนิวตรอน  $0.8705 \text{ ซม.}^{-1}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2553.....





## 5170274621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : NEUTRON SHIELDING / NATURAL RUBBER / SYNTHETIC SBR /  
NEUTRON ABSORBER

CHAYANIT JUMPEE : FABRICATION OF NEUTRON SHIELDING MATERIAL  
COMPRISING OF NATURAL RUBBER/SYNTHETIC SBR BLENDS AND  
NEUTRON ABSORBER. THESIS ADVISOR : DOONYAPONG  
WONGSAWAENG Ph.D, 96 pp.

Fabrication was made using various ratios of pre-vulcanized natural rubber, SBR blend and neutron absorbers which were boric acid powder, boron powder, cadmium nitrate solution and cadmium powder. All the constituents were blended together in a magnetic stirrer at 450 rpm for 10 minutes. The mixture was subsequently poured onto glass plates to obtain samples with 2 mm thickness. Studied results revealed that pre-vulcanized natural rubber and synthetic SBR blend with 70:30 ratio loaded with 4 phr boric acid powder and 0.7 phr boron powder exhibited the most suitable physical properties. Neutron radiography illustrated that the distribution of the neutron absorber was uniform throughout the shielding material. The shielding can effectively shield neutrons from the neutron source without generating prompt gamma ray. The most suitable thickness for neutron shielding was 16 mm. obtained by stacking 8 pieces of the shielding material together. The fabricated neutron shielding material exhibited the HVL value of approximately 0.8 cm. and the macroscopic cross section for neutron of  $0.8705 \text{ cm}^{-1}$ .

Department : ..... Nuclear Technology ..... Student's Signature .....  .....  
Field of Study : ..... Nuclear Technology ..... Advisor's Signature .....  .....  
Academic Year : ..... 2553 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ แนะนำและสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัยและค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต่างๆ

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่าน จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ เกษตร ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับวัตถุดิบและวิธีการในการขึ้นรูปยางพาราธรรมชาติ

ขอขอบพระคุณบริษัท DOW CHEMICAL THAILAND LTD ที่ให้ความอนุเคราะห์ นำยางสังเคราะห์ เอส บี อาร์ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆและน้องๆนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาวที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเสมอมาจนสามารถสำเร็จการศึกษาได้อย่างลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3. ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	5
2.1. บทนำ.....	5
2.1.1. คุณสมบัติของนิวตรอน.....	5
2.1.2. การจำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	5
2.1.3. อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารและเนื้อเยื่อ.....	6
2.1.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering).....	6
2.1.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering).....	7
2.1.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture).....	7
2.1.3.4 ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction).....	7
2.1.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge-particle emission).....	8
2.1.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction).....	8
2.1.4. ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section).....	8
2.1.5. อัตราการเกิดอันตรกิริยา.....	14
2.1.6. การลดพลังงานของนิวตรอน.....	15
2.1.7. ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.1.7.1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor).....	16
2.1.7.2. เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator).....	16
2.1.7.3. ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope Neutron Source)..	17
2.2. ยาง.....	19
2.2.1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber).....	19
2.2.1.1. รูปแบบของยางธรรมชาติ.....	19
2.2.1.2. น้ำยาง.....	19
2.2.1.3. ยางแห้ง.....	20
2.2.1.4. โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	20
2.2.1.5. คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	22
2.2.1.6. การผสมเคมียาง.....	24
2.2.1.7. การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น.....	25
2.2.2. ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene – Butadiene Rubber, SBR).....	27
2.2.2.1. โครงสร้าง การผลิต และคุณสมบัติของยาง SBR.....	27
2.2.2.2. คุณสมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวตาไดอีน.....	28
2.2.2.3. การผสมเคมียาง.....	31
2.2.2.4. การผสมยางเอสปีอาร์กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ.....	31
2.2.2.5. การใช้งาน.....	31
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1. วัสดุและอุปกรณ์วิจัย.....	32
3.2. วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.2.1. การหาคัดส่วนของยางที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน.....	37
3.2.1.1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	37
3.2.1.2. การหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอน.....	38
3.2.2. การหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม.....	39
3.2.2.1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	39
3.2.2.2. การหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอน.....	41
3.2.3. การหาการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังนิวตรอนที่ผลิตได้.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.3.1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	41
3.2.3.2. การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอน.....	44
3.2.4. การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน.....	44
3.2.4.1. ถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน.....	44
3.2.5. การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	46
3.2.5.1. นับวัดรังสี Prompt Gamma.....	46
3.2.6. การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน....	47
3.2.6.1. วิธีดำเนินการวิจัยทดลองหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุ กำบังรังสีนิวตรอนโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสี ด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA).....	47
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	48
4.1. การหาสัดส่วนของน้ำยาที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน.....	48
4.2. การหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม.....	51
4.3. การลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้.....	54
4.4. การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน.....	57
4.5. การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	67
4.6. การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	68
5. อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	69
5.1. อภิปรายผลการวิจัย.....	69
5.1.1. การหาสัดส่วนของยาที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน.....	69
5.1.2. การหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม.....	69
5.1.3 การลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้.....	73
5.1.4 การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน .....	76
5.1.5 การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	77
5.1.6 การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน....	78
5.2. สรุปผลการวิจัย.....	79
5.3. ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลำนิวตรอนกระทบเป้า.....	8
2.2	ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกดโดลิเนียม แคลเดียม โบรอน และไฮโดรเจน.....	13
2.3	แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	21
2.4	แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของยาง SBR.....	27
3.1	อุปกรณ์โพลิเอทิลีนทงกระบอกจุ่มกำเนิดนิวตรอน <sup>241</sup> Am/Be.....	33
3.2	เครื่องแก้วที่ในงานวิจัย.....	35
3.3	แผ่นรองกระจกเพื่อปรับระนาบขณะขึ้นรูปชิ้นงานและอุปกรณ์วัดระดับความ เป็นระนาบ (Spirit level) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.4	เครื่องชั่งที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.5	Laboratory Stirrer/Hotplate ที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.6	ตุ้บที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.7	ระบบวัดรังสีนิวตรอนนิวตรอน.....	38
3.8	ชิ้นงานของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	44
3.9	ระบบการถ่ายภาพนิวตรอนชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	45
3.10	ระบบวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการการกฏกระตุ้นชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน....	46
4.1	กราฟจำนวนนับรังสีนิวตรอนของของยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปี อาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	50
4.2	กราฟค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของของยางพาราธรรมชาติกับยาง สังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	50
4.3	กราฟจำนวนนับรังสีนิวตรอนของชิ้นงานแต่ละชนิด.....	53
4.4	กราฟค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของชิ้นงานแต่ละชนิด.....	53
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีผลต่อค่านับ วัดรังสีนิวตรอน.....	56
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีผลต่อค่า ร้อยละของการลดทอนรังสีนิวตรอน.....	56
4.7	ภาพถ่ายนิวตรอนของชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.8	ตำแหน่งการสแกนค่า PhotoStimulated Luminescence (PSL) ของภาพถ่าย นิวตรอนชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.....	58
4.9	กราฟความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูป วงกลม.....	59
4.10	กราฟความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL ตามความหนาต่างๆของชิ้นงานรูป ชิ้นแบนได้.....	60
4.11	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 1.....	60
4.12	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 2.....	61
4.13	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 3.....	61
4.14	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 4.....	62
4.15	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 5.....	62
4.16	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 4 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 6.....	63
4.17	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 6 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 7.....	63
4.18	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 8 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 8.....	64
4.19	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 10 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 9.....	64
4.20	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชิ้นแบนได้ หนา 12 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 10.....	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.21	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หนา 14 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 11.....	65
4.22	กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันไดในแต่ละตำแหน่งของความหนาตั้งแต่ 2-14 มิลลิเมตร.....	66
4.23	สเปกตรัมรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน <sup>241</sup> Am/Be.....	67
4.24	สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการใช้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้กำบังรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอน <sup>241</sup> Am/Be.....	67
4.25	สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทันทีด้วยวิธี NAA.....	68
4.26	สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหลังจากทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี NAA.....	68
5.1	โครงสร้างทางเคมีของ Cetearyl Alcohol (and) Sodium Cetearyl Sulfate.....	79
ค.1	สเปกตรัมรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี <sup>241</sup> Am/Be ที่ได้จากหัววัดรังสีนิวตรอนชนิด <sup>6</sup> Li Glass scintillator.....	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	6
2.2	ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ.....	12
2.3	ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha, n$ ).....	17
3.1	อัตราส่วนและปริมาตรของน้ำยาฟาราธรรมชาติพร้อมวัดคาโนซ์และน้ำยา สังเคราะห์ เอส บี อาร์.....	37
3.2	ปริมาณและชนิดของวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่ใช้ผสมกับน้ำยาฟารา ธรรมชาติพร้อมวัดคาโนซ์และยาสังเคราะห์ เอส บี อาร์.....	39
3.3	การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป จากส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ของยางฟาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ เอส บี อาร์ ใน อัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนชนิดกรดบอริกชนิดผงและผง ไบรอน.....	41
3.4	การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป จากส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ของยางฟาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ เอส บี อาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนชนิดกรดบอริกชนิดผง.....	42
4.1	ผลการหาสัดส่วนของน้ำยาที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน.....	47
4.2	ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการทดลองกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิด รังสีของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ น้ำยาฟาราธรรมชาติ : ยางสังเคราะห์ เอส บี อาร์ต่างๆ.....	49
4.3	ผลการหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม.....	51
4.4	ผลการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้.....	54
4.5	ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการทดลองกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิด รังสีของชิ้นงานที่มีความหนาต่างๆ.....	55
4.6	ค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูปวงกลม.....	58
4.7	ค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในตำแหน่งหรือความหนาต่างๆของชิ้นงานรูป ชิ้นแบนได้.....	59
ก.1	คุณสมบัติทั่วไปของ ลิเทียม.....	84
ก.2	คุณสมบัติทั่วไปของ ไบรอน.....	86

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ก.3	คุณสมบัติทั่วไปของ แคดเมียม.....	88
ก.4	คุณสมบัติทั่วไปของ แกดโดลิเนียม.....	90



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำนิวตรอนมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านการแพทย์ ด้านการเกษตรและด้านอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การใช้นิวตรอนในการผลิต สารเภสัชรังสีที่ใช้ทางด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์ การปรับปรุงพันธุ์พืช การตรวจสอบความชื้น การถ่ายภาพวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำด้วยนิวตรอน เป็นต้น ซึ่งนิวตรอน เป็นอนุภาคที่เป็นกลาง ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เนื่องจากสามารถผ่านกลุ่มหมอกอเล็กตรอนของอะตอมไปทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้โดยตรง นอกจากนั้นนิวตรอนยังสามารถถ่ายโอนพลังงานเกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของธาตุที่มีมวลใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอน ซึ่งนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต มีขนาดใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอน ดังนั้น เมื่อนิวตรอนทำอันตรกิริยากับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตจึงส่งผลให้อะตอมของไฮโดรเจนได้รับพลังงานส่วนใหญ่จากนิวตรอนแล้วเคลื่อนที่ออกไปด้วยความเร็วสูงเหมือนกับ อนุภาคโปรตอน ซึ่งมี Linear Energy Transfer (LET) สูง ทำให้เนื้อเยื่อเกิดการแตกตัวได้สูงเช่นกัน จึงทำให้ในการทำงานเกี่ยวกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ ดังนั้นการคำนึงถึงหลักการป้องกันอันตรายจากรังสีจึงมีความสำคัญอย่างมากเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีนิวตรอนมีความปลอดภัยในการทำงานมากที่สุด นอกจากใช้เวลาให้สั้นที่สุด และทำงานในระยะทางที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุดแล้ว วัสดุที่ใช้กำบังรังสีก็นับว่ามีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก และเพื่อความสะดวกในการทำงานในภาคสนามวัสดุที่ใช้ในการกำบังรังสีจึงควรเป็นวัสดุที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถสวมใส่ขณะปฏิบัติงานได้ เช่น เสื้อกำบังรังสี

นิวตรอนสามารถถูกดูดกลืนได้ดีในธาตุหรือวัสดุที่มีค่าโอกาสการดูดกลืนนิวตรอนสูง (High neutron absorption cross section) แต่นิวตรอนเหล่านี้ต้องเป็นนิวตรอนที่อยู่ในย่านเทอร์มัลนิวตรอน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการหน่วงความเร็วของนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนเพื่อให้โอกาสการดูดกลืนในวัสดุดูดกลืนนิวตรอนสูงขึ้น โดยมักใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นของอะตอมไฮโดรเจนในวัสดุอยู่สูง เป็นตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ประเภทยางหรือ พอลิเมอร์ต่างๆ เป็นต้น



จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการศึกษาวิธีการออกแบบ เสื่อกำบังรังสีนิวตรอนโดยใช้ยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ เป็นวัสดุหลัก โดยมีธาตุที่สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีเป็นองค์ประกอบ

## 1.2. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์และสารดูดกลืนนิวตรอน

## 1.3. ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ขึ้นรูปแผ่นยางที่มีขนาดไม่เกิน 100 ตร.ซม. โดยใช้ส่วนผสมของน้ำยางพาราพร้อมพรีวัลคาไนซ์ (Vulcanizable natural rubber latex) และยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ร่วมกับสารดูดกลืนนิวตรอน
- 1.3.2 ใช้ตะกั่ว เพื่อประกอบการป้องกัน Prompt Gamma และ Delayed Gamma ที่เกิดจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับวัสดุ
- 1.3.3 ประเมินการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจาก Am-241/Be-9
- 1.3.4 ประเมินปริมาณรังสีนิวตรอนโดยใช้เครื่องวัดรังสีนิวตรอน
- 1.3.5 ประเมินปริมาณรังสี Prompt gamma และ Delayed Gamma โดยใช้ Gamma spectrometer

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสารชนิดต่างๆ
- 1.4.2 จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็น
- 1.4.3 ศึกษาวิธีการขึ้นรูปแผ่นยางจากน้ำยางพาราพร้อมพรีวัลคาไนซ์ และยางสังเคราะห์เอสปีอาร์
- 1.4.4 ขึ้นรูปแผ่นตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของสารดูดกลืนนิวตรอน
- 1.4.5 ทดสอบการลดทอนรังสีนิวตรอนของแผ่นยางตัวอย่าง
- 1.4.6 ประเมินและเลือกวัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่เหมาะสม
- 1.4.7 ขึ้นรูปแผ่นยางโดยมีส่วนประกอบน้ำยางพาราพร้อมพรีวัลคาไนซ์ กับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่เหมาะสม
- 1.4.8 ส่งทดสอบหาความคงทนของชิ้นงาน โดยวิธี Tensile test, Ageing test และ Tear test หรือวิธีอื่นที่เหมาะสม เพื่อประเมินหาอัตราส่วนของน้ำยางที่เหมาะสม
- 1.4.9 ทดลองและประเมินการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนจากแผ่นยางตัวอย่าง

- 1.4.10 ประเมินปริมาณและพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับแผ่นยางตัวอย่างและกำหนดความหนาของตะกั่วที่ต้องใช้
- 1.4.11 ผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้
- 1.4.12 ประเมินค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมาของชิ้นงานที่ผลิตได้
- 1.4.13 สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีขึ้นรูปและส่วนผสมของวัสดุกำบังนิวตรอนที่เหมาะสมในการผลิตเสื้อกำบังนิวตรอน

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1.6.1 S.E. Gwaily , M.M. Badawy , H.H. Hassan , M. Madani [1] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Natural rubber composites as thermal neutron radiation Shields I.  $B_4C/NR$  composites ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถของ  $B_4C$  ที่ผสมอยู่ในยางพาราธรรมชาติ( $B_4C :40$  HAF/NR) ในอัตราส่วนต่างๆ ในการลดทอนรังสีนิวตรอน พบว่าอัตราส่วนที่ประกอบด้วย  $B_4C$  20 phr ทำให้ได้ค่า linear absorption coefficient ที่สูงที่สุด คือ 0.34 cm และทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส่วนประกอบที่ผลิตได้ร่วมด้วย
- 1.6.2 S.E. Gwaily , M.M. Badawy , H.H. Hassan , M. Madani [2] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields II —  $H_3BO_3/NR$  composites โดยศึกษา ส่วนผสมวัสดุที่มีส่วนผสมของกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) กับยางพาราธรรมชาติ (40 phr of HAFcarbon blac) ในการกำบังเทอร์มัลนิวตรอน พบว่าที่ส่วนผสมของกรดบอริก 30 phr จะมีค่า total macroscopic cross section สูงที่สุด เท่ากับ  $0.29 \text{ cm}^{-1}$  และทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุกำบังรังสีในอัตราส่วนต่างๆผลิตได้ร่วมด้วย ซึ่งพบว่า Thermal oxidative aging มีผลกระทบต่อวัสดุเหล่านี้มากกว่าผลจากค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- 1.6.3 **สรายุทธ พรหมเมศร [3]** ได้ทำการทำการวิจัยเรื่อง วัสดุกำบังนิวตรอนซ้ำที่สามารถปั้นขึ้นรูปได้ เป็นการใช้วัสดุ ได้แก่ FIMO, ดินน้ำมันไฮเคลย์ กับ ไดออกทิลฟอสเฟต หรือ กลีเซอรอล ผลการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วย FIMO กับ ไดออกทิลฟอสเฟตและกรดบอริกในอัตราส่วน 1:0.6:0.7 สามารถผสมเข้ากันได้ดี สามารถปั้นขึ้นรูปได้ง่าย และมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับกำบังนิวตรอนซ้ำ ซึ่งพบว่าค่า HVL และภาคตัดขวางมหภาคต่อนิวตรอนซ้ำของส่วนผสมนี้มีค่าประมาณ 0.2 ซม. และ 3.4767 ซม.<sup>-1</sup> ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

การออกแบบและประเมินเสื่อกำบังรังสีนิวตรอนในงานวิจัยนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจในคุณสมบัติและข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับนิวตรอนเสียก่อน โดยในตอนนี้จะกล่าวถึงนิวตรอนในหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของนิวตรอน ชนิดของนิวตรอน อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร ภาคตัดขวางของนิวตรอน การลดทอนพลังงานของนิวตรอน และต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

##### 2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน[4]

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ. 1932 ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นพอลอเนียม (Polonium foil) มารวมไว้กับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยออกจากพอลอเนียมเข้าชนกับแผ่นเบริลเลียม ก็มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาเรียกว่า อนุภาคนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary particles) ชนิดหนึ่ง ซึ่งรวมอยู่กับโปรตอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม โดยมีกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (Electron cloud) อยู่รอบนอก อนุภาคนิวตรอนแทนด้วยสัญลักษณ์  $n$  มีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit; amu) หรือ  $1.67492 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม มีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา และอนุภาคแอนตินิวตริโน โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที

##### 2.1.2 การจำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงาน

นิวตรอนมีหลายระดับพลังงานขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดของนิวตรอน ตั้งแต่ เทอร์มัล นิวตรอน ที่มีพลังงานในระดับอิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงพลังงานสูงในระดับ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียสของเป้าแตกต่างกันตามชนิดของนิวเคลียสและระดับพลังงานของนิวตรอน ดังนั้นในการทำความเข้าใจพฤติกรรมของนิวตรอนจึงได้จำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงานออกเป็นกลุ่มๆ (ซึ่งอาจมีการซ้อนทับกันของบางกลุ่ม) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงาน

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0 eV – $10^3$ eV
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV – 0.3 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	0.3 eV – $10^4$ eV
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1 eV – $10^2$ eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	$10^3$ eV – 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	> 20 MeV

### 2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารและเนื้อเยื่อ

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน เมื่อชนกับอะตอมจะไม่ได้รับผลจากอิเล็กตรอนหรือจากประจุหรือจากประจุบวกในนิวเคลียส นิวตรอนจึงสามารถผ่านกลุ่มอิเล็กตรอนเข้าไปทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียส ทำให้นิวตรอนเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ เพราะนอกจากที่เมื่ออนุภาคนิวตรอนเกิดอันตรกิริยากับบางนิวไคลด์แล้วได้อนุภาคมีประจุซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อเยื่อแล้ว อนุภาคนิวตรอนยังสามารถกระตุ้นให้นิวไคลด์ที่เสถียรเปลี่ยนไปเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ และเนื่องจากอนุภาคนิวตรอนมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง จึงทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตระดับลึกไม่ใช่เพียงแต่ผิวหนังอย่างเช่นอนุภาคมีประจุอื่นๆ

นิวตรอนสามารถทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้หลายแบบดังนี้

**2.1.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)** มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ (n,n) การชนแบบนี้นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สภาวะปกติ (Ground state) ด้วยความเร็วค่าหนึ่งแล้วทำให้นิวตรอนกระเจิง (Scatter) ออกมาโดยมีทิศทางและความเร็วที่เปลี่ยนไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สภาวะพื้น การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนยังมีค่าคงที่ อันตรกิริยามีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า บางครั้งเรียกว่า Potential scattering

**2.1.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)** มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ  $(n,n')$  การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้มีลักษณะคล้ายการชนแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกระดม กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสลดพลังงานกลับสู่สภาวะปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยืดหยุ่นเป็น Threshold reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) ค่า  $Q$  ของปฏิกิริยาเป็นลบ เป็นอันตรกิริยาที่มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน

**2.1.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ Radiative capture)** มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ  $(n,\gamma)$  ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) อันตรกิริยานี้ นิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลาง กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติ จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า Captured gamma-rays หรือ Neutron captured gamma-rays ซึ่งอาจมี 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน (Exothermic reaction) ค่า  $Q$  ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่มากกว่าพลังงานนิวเคลียสเดิม รวมกับพลังงานของนิวตรอนเสมอ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA)

**2.1.3.4 ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction)** นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น  $(n,f)$  เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวออกเป็นสองส่วน ได้นิวเคลียสที่มีมวลไม่เท่ากัน พร้อมกับให้



อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)

### 2.1.3.5 ปฏิกริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge-particle emission)

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแล้วจะปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน ปฏิกริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุนี้มีทั้งแบบปฏิกริยาชนิดคายพลังงาน และปฏิกริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน แต่เกิดปฏิกริยาชนิดคายพลังงานน้อยกว่า ได้แก่ ปฏิกริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 ( $^{10}\text{B}$ ) ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดและการกำบังนิวตรอน

### 2.1.3.6 ปฏิกริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) ปฏิกริยานี้เกิด

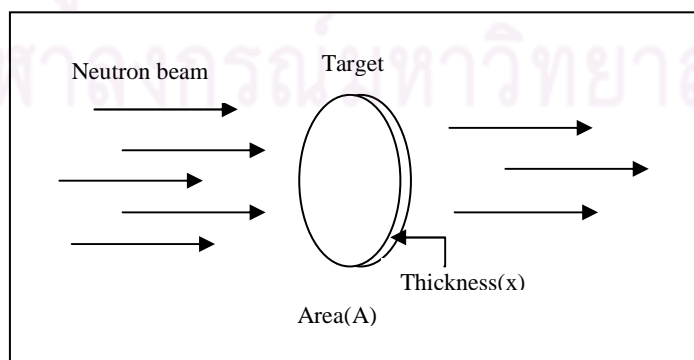
กับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกริยาจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกริยา (n, 2n) ปฏิกริยา (n, 3n)

### 2.1.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง แสดงในเทอมของปริมาณที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (Cross section) อธิบายได้โดย พิจารณาแผ่นวัสดุบางชนิดหนึ่ง มีพื้นที่หน้าตัด A มีความหนา x และมีความหนาแน่นอะตอม N อะตอมต่อหน่วยปริมาตร โดยที่มีลำนิวตรอน (Neutron beam) ตกกระทบ ดังรูปที่ 1 ถ้ามีนิวตรอนจำนวน n นิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร และมีความเร็ว v ดังนั้น

$$I = n \quad (1)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของลำนิวตรอน (Intensity of neutron beam)



ภาพที่ 2.1 ลำนิวตรอนกระทบเป้า

ถ้า  $n$  มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  $v$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้น  $I$  จะมีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (neutron/cm<sup>2</sup>-sec)

จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้า พื้นที่  $A$  ต่อวินาที เท่ากับ  $IA$  แต่จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้า ไม่ได้ทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนาแน่นของเป้า และค่าภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma AX \quad (2)$$

$\sigma$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอนนิยมใช้หน่วยเป็น บาร์น (barn;b) โดยที่ 1 บาร์น (b) มีค่า  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบ ดังนั้นค่าภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมจึงมีหลายค่าเช่นเดียวกัน ถ้าให้  $\sigma_t$  เป็นภาคตัดขวางรวม (Total cross section) ของนิวเคลียสต่อหนึ่งหน่วยนิวตรอนจะได้

$$\sigma_t = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} + \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} + \dots \quad (3)$$

เมื่อ  $\sigma_{(n,n)}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,n')}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,\gamma)}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,\alpha)}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคแอลฟา

$\sigma_{(n,p)}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n,f)}$  คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแตกตัว

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรก คือ ภาคตัดขวางการกระเจิง (Scatter cross section;  $\sigma_s$ ) ซึ่งหมายถึง ภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สอง คือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน (Absorption cross section;  $\sigma_a$ ) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของอันตรกิริยาอื่น ๆ นอกเหนือจากอันตรกิริยาในกลุ่มแรก พิจารณาสสมการ (2) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma_t Ax \quad (4)$$

เมื่อ  $Ax$  คือ ปริมาตรของเป้า

ดังนั้น จำนวนอันตรกิริยาต่อปริมาตรต่อวินาที ซึ่งเรียกว่า ความหนาแน่นของอันตรกิริยา (collision density;  $F$ ) เขียนได้ดังนี้

$$F = IN\sigma_t \quad (5)$$

ผลคูณ  $N\sigma$  ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\Sigma$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  ผลคูณของ  $N\sigma_t$  ในสมการ (5) จึงใช้สัญลักษณ์เป็น  $\Sigma_t$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section) และสามารถเขียนสมการ (5) ในเทอมของภาคตัดขวางมหภาครวมได้เป็น

$$F = I\Sigma_t \quad (6)$$

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Sigma_{mix} = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots$$

$$\Sigma_{mix} = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \quad (7)$$

$\Sigma_{mix}$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ

$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...ตามลำดับ

$N_1, N_2, N_3, \dots$  คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...ตามลำดับ

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$  คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...ตามลำดับ

ในทางปฏิบัติข้อมูลที่ทราบมักไม่ใช่ความหนาแน่นเชิงจำนวนของนิวเคลียสว่าเป็นสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume fraction,  $\alpha_j$ ) ของนิวเคลียสชนิดต่างๆ ภายในตัวกลาง ดังนั้นอาศัยค่า

ความหนาแน่นเชิงมวล ( $\rho_i$ ) ของนิวเคลียสนั้น ๆ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเชิงปริมาตรและความหนาแน่นเชิงจำนวนของนิวเคลียส  $i$  ได้เป็น

$$N_i = \frac{\alpha_i \rho_i}{m_i} \quad (8)$$

และ

$$\Sigma = \sum_{i=1}^j \frac{\alpha_i \rho_i}{m_i} \sigma_i \quad (9)$$

เมื่อ  $\alpha_i$ ,  $\rho_i$  และ  $m_i$  คือ สัดส่วนเชิงปริมาตร ความหนาแน่นเชิงมวล และมวลโมเลกุลของโมเลกุล  $i$  ซึ่งมีนิวเคลียสตัวกลางที่สนใจเป็นองค์ประกอบตามลำดับ



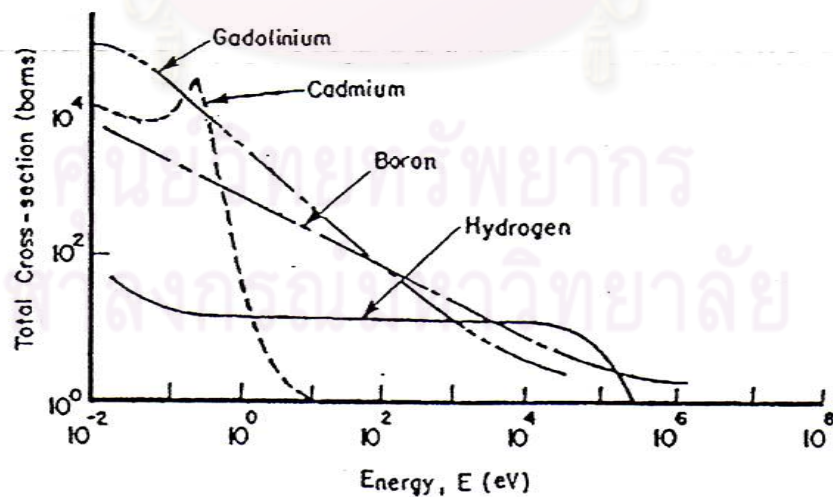
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ[5]

Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			$\sigma_t$ (b)	$\sigma_a$ (b)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_t$ (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_t$ (b)	$\sigma_a$ (b)	$\Sigma_t$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )
Al	27	2.7	1.61	0.232	0.097	0.014	2.37	0.000	0.143	0.000
B	10	2.3	3845	3843	533	532	2.68	0.189	0.371	0.026
B	11	2.3	5.28	0.005	0.655	0.0006	2.13	0.000	0.268	0.000
Be	9	9	6.35	0.01	3.82	0.006	3.25	0.003	1.96	0.002
C	12	1.9	4.95	0.003	0.472	0.0003	2.58	0.000	0.246	0.000
Nat Ca	40.08	1.55	3.46	0.433	0.081	0.101	1.14	0.004	0.027	0.000
Cd	112	8.7	2470	2462	115.5	115.2	6.5	0.058	0.304	0.003
Nat Cl	34.45	Gas	50.2	33.4	Gas	Gas	2.3	0.001	Gas	Gas
Nat Cu	63.55	8.94	12.5	3.8	1.06	0.322	3.4	0.011	0.288	0.001
F	19	Gas	3.72	0.01	Gas	Gas	3.15	0.000	Gas	Gas
Fe	56	7.9	14.07	2.56	1.19	0.217	5.19	0.003	0.441	0.000
Nat Gd	157.25	7.95	49153	48981	1496	1491	7.33	0.223	0.223	0.007
H	1	Gas	30.62	0.33	Gas	Gas	4.26	0.000	Gas	Gas
H	2	Gas	4.25	0	Gas	Gas	2.87	0.000	Gas	Gas
He	3	Gas	5337	5336	Gas	Gas	2.87	0.879	Gas	Gas
He	4	Gas	0.86	0	Gas	Gas	7.08	0.000	Gas	Gas
Li	6	0.534	938	937	50.3	50.2	1.28	0.230	0.069	0.012
Li	7	0.534	1.16	0.036	0.053	0.0017	1.57	0.000	0.072	0.000
Nat Mg	24.31	1.74	3.47	0.063	0.15	0.0027	2.66	0.001	0.115	0.000
Mn	55	7.2	14.5	13.2	1.14	1.04	3.17	0.003	0.25	0.000
N	14	Gas	12.22	1.9	Gas	Gas	2.39	0.021	Gas	Gas
Na	23	0.971	3.92	0.529	0.1	0.0134	3.17	0.000	0.081	0.000
Ni	59	8.9	23.08	4.58	2.1	0.416	3.66	0.001	0.322	0.000
O	16	Gas	3.87	0.000	Gas	Gas	8.22	0.000	Gas	Gas
Pb	204	11.34	11.40	0.18	0.381	0.006	4.39	0.003	0.147	0.000
Pu	238.05	19.6	599.3	562.0	29.72	27.87	6.66	0.190	0.330	0.0094
Pu	239.05	19.6	1021	270	50.4	13.3	7.01	0.026	0.364	0.0013
Pu	240.05	19.6	294	293	14.5	14.4	7.15	0.108	0.352	0.0053
Pu	241.06	19.6	1390	362	68.1	17.7	7.98	0.117	0.391	0.0057
Pu	242.06	19.6	26.7	18.9	1.30	0.922	7.31	0.098	0.357	0.0048
Nat Si	28.09	2.42	2.24	0.161	0.116	0.0084	4.43	0.01	0.230	0.0001
Th	232	11.3	20.4	7.50	0.598	0.220	7.00	0.135	0.205	0.0040

ตารางที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ (ต่อ)[5]

Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			$\sigma_t$ (b)	$\sigma_a$ (b)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_t$ (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_t$ (b)	$\sigma_a$ (b)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_t$ (cm <sup>-1</sup> )
U	233.04	19.1	587	45.8	29.0	2.26	6.78	0.069	0.335	0.0034
U	234.04	19.1	116	103	5.70	5.07	8.02	0.363	0.394	0.0178
U	235.04	19.1	703	96.9	34.3	4.74	6.84	0.117	0.335	0.0057
U	236.05	19.1	13.3	5.16	0.648	0.251	7.73	0.363	0.377	0.177
U	237.05	19.1	487.5	476.4	23.6	23.1	6.72	0.135	0.326	0.0066
U	238.05	19.1	11.63	2.71	0.562	0.131	7.10	0.123	0.343	0.0059
Nat U	238.05	19.1	16.49	3.39	0.797	0.1637	7.01	0.120	0.343	0.0058
Nat W	183.85	19.3	23.08	18.05	1.459	1.141	6.95	0.057	0.439	0.0036
CH <sub>2</sub>	14	0.94			2.68	0.027			0.449	0.000
H <sub>2</sub> O	18	1.0			2.18	0.022			0.560	0.000
D <sub>2</sub> O	20	1.1			0.410	0.000			0.420	0.000
Average Fission Products of:										
<sup>235</sup> U	117		4496	4486			7.43	0.0004		
<sup>239</sup> Pu	119		2087	2086			7.48	0.0009		



ภาพที่ 2.2 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกดโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน



### 2.1.5 อัตราการเกิดอันตรกิริยา[6]

จากคำนิยามของค่าภาคตัดขวางมหภาคซึ่งบ่งชี้ถึงความน่าจะเป็นที่อนุภาคนิวตรอนหนึ่ง ๆ อาจเกิดอันตรกิริยาได้ภายในหนึ่งหน่วยระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้น ๆ อย่างไรก็ตามคำนิยามข้างต้นเหมาะสำหรับการพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างนิวเคลียสใด ๆ กับนิวตรอนเฉพาะหนึ่ง ๆ เท่านั้น ในกรณีที่มีนิวตรอนจำนวนมากเคลื่อนผ่านตัวกลางในทิศทางเดียวกันด้วยอัตราเร็วหนึ่ง จะสามารถคำนวณอัตราที่นิวตรอนเกิดอันตรกิริยาต่อหน่วยเวลาภายในระยะทางหนึ่งหน่วยของการเคลื่อนที่ได้คือ  $A$  โดยที่

$$A = \Sigma I \quad (10)$$

โดยที่  $I$  คือ จำนวนนิวตรอนที่เคลื่อนผ่านตัวกลาง และ  $\Sigma$  คือค่าภาคตัดขวางมหภาคของอันตรกิริยาที่สนใจ

ในทางปฏิบัติปริมาณ  $I$  ที่พิจารณาอาจเป็นได้ทั้งกระแสนิวตรอนซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์หรือนิวตรอนฟลักซ์ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์ อย่างไรก็ตามปริมาณดังกล่าวล้วนบ่งชี้ถึงจำนวนนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยภายในหนึ่งหน่วยเวลาทั้งสิ้น

หากพิจารณาว่า  $I$  คือกระแสนิวตรอนในทิศทางเฉพาะและหากพิจารณาว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นผลให้จำนวนนิวตรอนถูกลดทอนลงจากกระแสนิวตรอนดังกล่าวแล้ว จะสามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดลงของกระแสนิวตรอนต่อหน่วยระยะทาง  $x$  สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dI}{dx} = -\Sigma x \quad (11)$$

หากกำหนดให้ค่ากระแสนิวตรอน ณ ตำแหน่ง  $x = 0$  คือ  $I_0$  จะได้ว่า ค่ากระแสนิวตรอนที่ตำแหน่ง  $x$  ใด ๆ ก็คือ

$$I = I_0 e^{-\Sigma x} \quad (12)$$

พึงสังเกตว่าลักษณะฟังก์ชันของ  $I_0$  ข้างต้นเป็นลักษณะเดียวกันกับฟังก์ชันที่ใช้อธิบายการสลายตัวโดยการแผ่รังสี จากลักษณะฟังก์ชันข้างต้นนี้ปริมาณ  $\Sigma$  สามารถเรียกเป็นสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) เมื่อพิจารณาการลดลงของค่ากระแสเป็น

หลักในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณการสลายตัวโดยการแผ่รังสี เราสามารถคำนวณค่าคงที่อันเกี่ยวเนื่องกับ  $\Sigma$  ได้ในลักษณะเดียวกันกับการค่าคงที่อันเกี่ยวเนื่องกับค่าคงที่การสลายตัว  $\lambda$  ค่าคงที่หนึ่งซึ่งมีประโยชน์ใช้งานมากในการคำนวณเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างนิวเคลียสกับนิวตรอน คือ ค่าทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ซึ่งคือ ระยะทางโดยเฉลี่ยที่นิวตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนจะเกิดอันตรกิริยาที่กำหนดกับนิวเคลียส ค่าทางอิสระเฉลี่ยซึ่งปกติเขียนแทนด้วย  $\lambda$  เช่นกันนั้น ในกรณีนี้เพื่อมิให้สับสนกับ  $\lambda$  ซึ่งหมายถึงค่าคงที่การสลายตัวจะเขียนแทนด้วย  $L$  โดยที่

$$L = \int_0^{\infty} x e^{-\Sigma x} dx = \frac{1}{\Sigma} \quad (13)$$

นั่นคือค่าทางอิสระเฉลี่ย  $L$  มีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าภาคตัดขวางมหภาคนั่นเอง

อาศัยคำนิยามข้างต้น จะสามารถขยายความได้ว่า ค่าทางอิสระเฉลี่ยสำหรับการกระเจิงคือ  $L_s$  และค่าทางอิสระเฉลี่ยสำหรับการดูดกลืน  $L_a$  มีค่าเท่ากับ  $1/\Sigma_s$  และ  $1/\Sigma_a$  ตามลำดับ

### 2.1.6 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้มีพลังงานอยู่ระหว่าง 2-14 MeV แต่การที่นิวตรอนจะทำอันตรกิริยากับตัวดูดกลืนนิวตรอนได้ดีต้องมีพลังงานอยู่ในช่วง 0.01-10 keV ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้สารหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) ที่เหมาะสมซึ่งมีภาคตัดขวางของการกระเจิงนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ เบริลเลียม สารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ได้แก่ ยางพารา ยางเอสปีอาร์ เป็นต้น

นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนถูกลดพลังงานลงโดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอนจะทำให้ความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วง นิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (Thermalization factor)”

$$\text{เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm}^2 \cdot \text{s)}}$$

ค่าเทอร์มัลไลเซนซ์แพกเตอร์ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

(1) ชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วต่างชนิดกันจะปลดปล่อยนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานต่างกัน ในสารหน่วงนิวตรอนชนิดเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าจะให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนสูงกว่าเมื่อมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเท่ากัน

(2) ชนิดของสารหน่วงนิวตรอน

ธาตุที่สามารถหน่วงพลังงานนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ ไฮโดรเจน ดังนั้นสารหน่วงนิวตรอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน ที่มีความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนสูง จะให้ความเข้มข้นสูงสุดของนิวตรอนช้าสูงกว่า

### 2.1.7 ต้นกำเนิดนิวตรอน

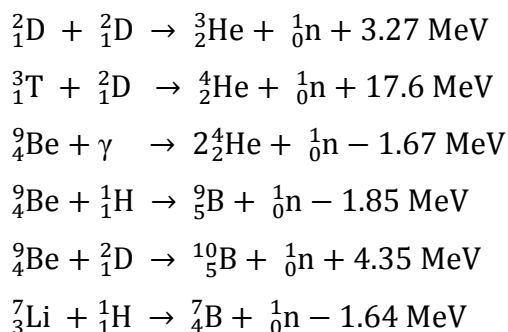
ลำนิวตรอนที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งตามลักษณะและวิธีการปลดปล่อยนิวตรอนออกเป็น 3 ประเภท คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear research reactor) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) และไอโซโทปรังสี (Radioisotope Neutron source)

#### 2.1.7.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor)

ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มข้นของนิวตรอนสูงสุดโดยนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของ ยูเรเนียม-235 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain Reaction) พลังงานของนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวมีค่าประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งส่วนใหญ่มีน้ำเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน การควบคุมปริมาณนิวตรอนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้โดยการสอดแท่งควบคุมซึ่งทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนสูงเข้าไปในแกนปฏิกรณ์เพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ และทำการปรับระยะการใส่แท่งควบคุมให้เหมาะสมเพื่อรักษากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้สม่ำเสมอ

#### 2.1.7.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เป็นเครื่องผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยอุปกรณ์ชนิดนี้ ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในการเร่งอนุภาคที่มีประจุหรือนิวเคลียสชนิดหนึ่งให้มีพลังงานสูงเพื่อไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งที่เป็นเป้า (Target) แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยนิวตรอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



### 2.1.7.3 ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope Neutron Source)

มี 3 ประเภท ได้แก่

#### (1) ประเภท ( $\alpha$ , n)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกิริยา ( $\alpha$ , n) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น พอลอเนียม-210 ( ${}^{210}\text{Po}$ ) เรเดียม-226 ( ${}^{226}\text{Ra}$ ) พลูโทเนียม-238 ( ${}^{238}\text{Pu}$ ) อะเมริเซียม-241 ( ${}^{241}\text{Am}$ ) โดยสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 4-6 MeV ผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบริลเลียม และโบรอน โดยเฉพาะเบริลเลียม-9 เป็นไอโซโทปของเบริลเลียมที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เบริลเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$  อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้มีค่าประมาณ  $2.2 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท( $\alpha$ , n) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha$ , n)

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (Half life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี
${}^{210}\text{Po}$ -Be	138 วัน	$3.0 \times 10^6$
${}^{226}\text{Ra}$ -Be	1,620 ปี	$1.5 \times 10^7$
${}^{238}\text{Pu}$ -Be	86.4 ปี	$2.2 \times 10^6$
${}^{239}\text{Pu}$ -Be	2.43 ปี	$1.6 \times 10^6$
${}^{241}\text{Am}$ -Be	458 ปี	$2.2 \times 10^6$

(2) ประเภท ( $\gamma, n$ )

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกิริยา ( $\gamma, n$ ) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ผสมกับเบริลเลียม-9 เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียมจะมีนิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 (Antimony-124;  $^{124}\text{Sb}$ ) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV ผสมกับเบริลเลียม อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี  $^{124}\text{Sb-Be}$  ประมาณ  $1.3 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี ของ  $^{124}\text{Sb}$  ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน แต่สามารถผลิตได้ง่ายจากการนำ  $^{123}\text{Sb}$  ไปอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเพื่อผลิต  $^{124}\text{Sb}$  จากปฏิกิริยา  $^{123}\text{Sb}(n, \gamma)^{124}\text{Sb}$

## (3) ประเภทแตกตัวเอง (Self fission หรือ Spontaneous fission)

ต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิดตั้งแต่ ทอเรียม ขึ้นไป ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะให้นิวตรอนออกมาหลายตัว เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252;  $^{252}\text{Cf}$ ) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี จะมีการสลายตัวด้วยการแตกตัวเองประมาณร้อยละ 3.2 การแตกตัวแต่ละครั้งจะปล่อยนิวตรอนออกมาเฉลี่ย 3.76 ตัว อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 มีค่าประมาณ  $4.3 \times 10^9$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี หรือประมาณ  $2.34 \times 10^{12}$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี ต่อแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัม ซึ่งมีความสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท ( $\gamma, n$ ) และ ( $\alpha, n$ )

นอกจากแคลิฟอร์เนียม-252 แล้วยังมีธาตุอื่นที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้ ได้แก่ พลูโทเนียม-236 ( $^{236}\text{Pu}$ ) พลูโทเนียม-238 ( $^{238}\text{Pu}$ ) ยูเรเนียม-238 ( $^{238}\text{U}$ ) พลูโทเนียม-240 ( $^{240}\text{Pu}$ ) พลูโทเนียม-242 ( $^{242}\text{Pu}$ ) คูเรียม-242 ( $^{242}\text{Cm}$ ) พลูโทเนียม-244 ( $^{244}\text{Pu}$ ) คูเรียม-244 ( $^{244}\text{Cm}$ ) และ แคลิฟอร์เนียม-254 ( $^{254}\text{Cf}$ )

## 2.2 ยาง[7]

ในงานวิจัยนี้วัสดุหลักที่จะนำมาทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงความเร็วนิวตรอนเพื่อให้มีโอกาสในการทำอันตรกิริยากับตัวดูดกลืนนิวตรอนได้สูงขึ้น คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมของไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ ยางพาราธรรมชาติ และยางสไตรีน บิวทาไดอีน ซึ่งการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหล่านี้จึงควรเข้าใจถึงธรรมชาติและคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้สามารถนำวัสดุเหล่านี้มาใช้งานให้ถูกวิธีและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

#### 2.2.1.1 รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ Hevea Braziliensis ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่ น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ประมาณ 30 % (โดยน้ำหนัก) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางแห้งขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่

#### 2.2.1.2 น้ำยาง

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และ ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อแบคทีเรียได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือ สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้สารเคมีแอมโมเนียเข้มข้นสูงถึง 0.7 % ร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้น น้ำยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า High Ammonia



Latex หรือ Ha latex ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียมีความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% ก็จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ร่วมด้วยเช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% หรือใช้ Santobrite 0.2% เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชนิดหลังนี้เรียกว่า Low Ammonia หรือ LA latex

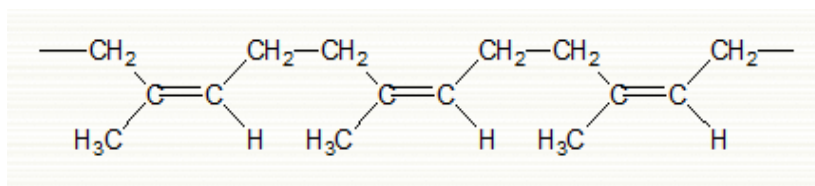
น้ำยางชั้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถกำจัดน้ำออกได้ง่าย นั่นคือ ผลิตภัณฑ์นั้นต้องบางหรือมีรูพรุนเพื่อให้น้ำระเหยออกได้ง่ายตามรูพรุนเหล่านั้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกนม เบ้าหล่อปูนปลาสเตอร์ ฟองน้ำที่นอน และหมอนฟองน้ำ เป็นต้น

### 2.2.1.3 ยางแห้ง

ยางแห้งได้จากการนำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบได้แก่ ยางแผ่น (Rubber Sheet) ยางเครฟ (Crepe Rubber) ยางแห้ง (Technically Classified Rubber)

### 2.2.1.4 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ประมาณ  $-72^\circ\text{C}$  นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-72^\circ\text{C}$  คุณสมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว



ภาพที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีน ( $\alpha$ -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันอยู่ ดังนั้นพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ หรือการปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่างๆเหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัว ของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิหรือที่เรียกว่า 'low temperature crystallization' จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $20^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน โดยยางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-26^{\circ}\text{C}$  การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่นๆได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิ  $50-70^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า "strain-induced crystallization" จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางจะทำให้ยางมีคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) ซึ่งจะสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้ การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น

นั่นคือ ยางจะมีความคงทนต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น

### 2.2.1.5 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

**ความยืดหยุ่น (elasticity)** คุณสมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

**ความเหนียวติดกัน (tack)** ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกันเช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

**ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้สามารถแตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (~20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าไปช่วยเท่านั้น

**ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength)** เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

**คุณสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties)** ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

**ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance)** ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงแต่ยังด้อยกว่ายางสังเคราะห์เอสบีอาร์เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

**ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulation)** ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง  $10^{15}$  หรือ  $10^{16}$  ohm·cm

**ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance)** เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปซึ่งจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังมีความทนต่อการกัดและต่างเชื้ออาจได้ดีแต่ไม่ทนต่อการกรัดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

**การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties)** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยา ออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ anti-degradants และ ไช:wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

**การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility)** ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ

Compression set ยางธรรมชาติมีค่า Compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มเสียไป ในขณะที่ค่า Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้คุณสมบัติ Compression set ดีลดลง

### 2.2.1.6 การผสมเคมียาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรโดยคุณสมบัติต่างๆจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเยิ้มเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง การผสมที่ได้หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber compound) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยางหรือในทางเทคนิคจะเรียกว่ากระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (vulcanized) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

แม้ว่ายางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีที่มีพลังงานสูง แต่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันยังคงเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติต้องการปริมาณกำมะถันมากกว่าแต่ต้องการปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า เพราะในยางธรรมชาติมีสารประกอบอินทรีย์บางตัวที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการคงรูปได้

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมเคมีจึงต้องทำการบดยางเพื่อลดความเหนียวของยางโดยการตัดโมเลกุลของยาง (นำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัย



แรงเฉือนในเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll-mill) ในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนั้นเรียกว่า “มาสติเคชัน” (mastication) ปกติการบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีเพราะยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูง ยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งส่งผลทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอัดเนื่องจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกันโดยการเติมสารเปปไทเซอร์ (peptizer) ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมีดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่

เนื่องจากการบดยางที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางสามารถรับสารตัวเติมในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงสามารถยืดหยุ่น คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้น การบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-55^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $70^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิใช้งานสูงเกินไป คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

#### 2.2.1.7 การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) และยางบิวตาไดอีน (ER) นอกจากนี้ในบางครั้งอาจผสมกับยางไนไตรล์ (NBR) ได้ในระดับหนึ่ง (ควรใช้ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ต่ำและถ้าเป็นไปได้ควรทำการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) ลงไปด้วยเล็กน้อยเพื่อให้ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาคุณสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและ



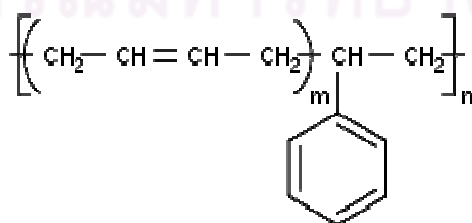
ยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน กล่าวคือ คุณสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่จะถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน คุณสมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความร้อนสะสมที่ตำระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกัน คุณสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการก็จะถูกถ่ายเทให้แก่ยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขาด (เมื่อผสมกับยางบิวตาไดอีน BR) ความทนทานต่อความร้อน (เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ NBR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมोनอเมอร์ EPDM ) ความทนทานต่อน้ำมัน (เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ NBR) หรือความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน (เมื่อผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมोनอเมอร์ EPDM ) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการผสมยางธรรมชาติให้เข้ากับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของยางผสมอันได้แก่ ความหนืดและระบบการคงรูปของยางที่จะนำมาผสมกัน โดยทั่วไปแล้ว ก่อนที่จะนำยางทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกันนั้นควรทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดตั้งต้นใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อน เพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อย เช่น ยางบิวไทล์ (IIR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมोनอเมอร์ (EPDM) ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดซึ่งมีคุณสมบัติการคงรูปที่แตกต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันในระยะว่างกระบวนการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงอาจช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคงรูปได้ นอกจากความหนืดและระบบการคงรูปแล้ว ในบางกรณีที่ต้องการนำยางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาผสมกัน อาจจำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกันด้วย (โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา) เพราะสารตัวเติมหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกัน และสารเคมีเหล่านี้ก็ชอบที่จะอยู่ในเฟสของยางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับตัวมันเองเท่านั้น ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบเหล่านี้ในยางแต่ละเฟส อาจทำให้คุณสมบัติของยางผสมที่ได้ ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

## 2.2.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene – Butadiene Rubber, SBR)

ยางเอสปีอาร์เป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญ และใช้กันมานานมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม การสังเคราะห์ และผลิตยางเอสปีอาร์ในเชิงการค้าได้ถูกริเริ่มในประเทศเยอรมัน ในช่วงสงครามโลก (ในช่วงปี ค.ศ. 1930) โดยการเตรียมโคลิพอลิเมอร์ ระหว่างสไตรีนและบิวตาไดอีนด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรซ์เซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ได้เป็นยางเอสปีอาร์ ซึ่งมีชื่อเรียกในสมัยนั้นว่า ยาง Buna-S และได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตมาเรื่อยๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1942 ในระหว่างการเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 ญี่ปุ่นได้ครอบครองประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้ปริมาณการผลิตยางเอสปีอาร์ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศในแถบยุโรป โดยในช่วงระยะเวลาระหว่างปี ค.ศ. 1942-1944 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิตยางเอสปีอาร์ มากถึง 1 ล้านตันภายใต้ชื่อว่ายาง GR-S (Government Rubber Styrene) ปัจจุบัน ยางเอสปีอาร์จัดว่าเป็นยางสังเคราะห์ เอนกประสงค์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีราคาไม่แพง และมีราคาค่อนข้างคงที่

### 2.2.2.1 โครงสร้าง การผลิต และคุณสมบัติของยางเอสปีอาร์

ยางเอสปีอาร์ เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสไตรีน (styrene monomer) และมอนอเมอร์ทั้งสองของบิวตาไดอีน (butadiene monomer) โดยมีปริมาณของสไตรีนอยู่ในช่วง 23-40 % มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน (random copolymer) นอกจากนี้ สายโมเลกุลของยางเอสปีอาร์ ยังมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ เวลาใช้งานจึงจำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย



ภาพที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางเอสปีอาร์

ยางเอสปีอาร์ ที่ใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในรูปของอิมัลชัน (emulsion polymerization) และยางที่ได้จะใช้ชื่อย่อว่า E-SBR แต่ในบางกรณียางเอสปีอาร์ ก็อาจผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในรูปของสารละลาย (solution polymerization) ได้เช่นกัน และเรียกกยางที่ได้ว่า L-SBR

ยาง E-SBR ยังแบ่งย่อยได้อีกเป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ยาง E-SBR แบบเย็น (cold rubber) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ประมาณ 5°C และยาง E-SBR แบบร้อน (hot rubber) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ประมาณ 50 °C หรือสูงกว่านี้ ยาง E-SBR ที่มีขายเชิงการค้าส่วนใหญ่จะเป็นยางแบบเย็นที่มีค่าความหนืดมูนนี่ ML 1+4 @ 100°C อยู่ในช่วง 30-120 หรือมีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 250,000-800,000 ยางเอสปีอาร์ เกรดที่มีความหนืดต่ำจะทำให้กระบวนการผสมบนลูกกลิ้งเป็นไปได้โดยง่าย สามารถผสมสารตัวเติมและน้ำมันให้เข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ ยางยังมีการหดตัวน้อยกว่าและยางที่ได้จากการอัดผ่านตายออกมา (extrudate) จะมีพื้นผิวที่เรียบสวยกว่ายางเอสปีอาร์เกรดที่มีความหนืดสูง ในทำนองกลับกันยางเอสปีอาร์ เกรดที่มีความหนืดสูงก็จะทำให้ยางที่อยู่ในสภาพที่ยังไม่คงรูปมีความแข็งแรงสูงกว่า (higher green strength) ทำให้ยางคงรูปมีรูพรุนน้อยกว่า สามารถเติมสารตัวเติมและน้ำมันลงไปได้อย่างได้มากกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาต่ำกว่า นอกจากนี้ยางเอสปีอาร์ เกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ยังทำให้ยางคงรูปที่ได้มีคุณสมบัติการกระด้างกระดอนที่สูงกว่าและมีคุณสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง และค่า compression set ที่ดีกว่าอีกด้วย

### 2.2.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวตาไดอีน

ยางเอสปีอาร์ เป็นยางประเภทใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เพราะสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ยางเอสปีอาร์ มีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 0.93 g/cm<sup>3</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ มีคุณสมบัติสม่ำเสมอว่าการนำไปใช้งานและสมบัติของยางคงรูปจึงสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ยางเอสปีอาร์ ยังมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และที่สำคัญคือไม่ต้องบดยางให้ نرم ก่อนทำการผสมเคมียางเนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนัก ยางจึงมีความหนืดเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดีและยางสามารถไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูปแบบต่างๆ ยิ่งไปกว่านั้น

ยางเอสปีอาร์ ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่ายางธรรมชาติ (less tendency to scorch in processing) เพราะยางเอสปีอาร์ มีอัตราเร็วในการคงรูปซ้ำ และถูกออกซิไดส์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ (ทนต่อความร้อนได้ดีกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย) ดังนั้นจึงทำให้สามารถทำการผสมยางในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงกว่าได้ ด้วยเหตุนี้ ยางเอสปีอาร์ จึงมีข้อดีเหนือกว่ายางธรรมชาติโดยมีกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่า ประหยัดทั้งกำลังงานและเวลา ตลอดจนต้นทุนการผลิต

### **ความเหนียวติดกัน (tack)**

ยางเอสปีอาร์ มีคุณสมบัติความเหนียวติดกันต่ำ ดังนั้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ จึงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติความเหนียวติดกันที่ดีเข้าช่วย (หรือใช้กาวจากยางธรรมชาติเข้าช่วยโดยการทาที่บริเวณพื้นผิวของยางเอสปีอาร์) หรืออาจทำการเติมสารที่ทำให้เหนียวติดกัน (tackifier) เช่น เรซินชนิดต่างๆ ตัวอย่างที่สำคัญที่ทำให้เหนียวติดกันที่นิยมใช้ ได้แก่ บีโตรเลียมเรซิน คูมาโรนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

### **ความยืดหยุ่น (elasticity)**

ยางเอสปีอาร์ มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ และค่าความยืดหยุ่นของยางจะลดลงหากยางมีปริมาณของสไตรีนสูงขึ้น

### **ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)**

เนื่องจาก ยางเอสปีอาร์ ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางชนิดนี้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ (ต่ำกว่ายางธรรมชาติประมาณ 7-10 เท่าในสภาพที่ไม่มีสารตัวเติมเสริมแรง) อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปสามารถทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางชนิดนี้มีค่าสูงใกล้เคียงหรืออาจต่ำกว่ายางธรรมชาติเพียงเล็กน้อย

### **ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength)**

ยางเอสปีอาร์ มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดของยางชนิดนี้

### ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance)

ยางเอสปีอาร์ ที่เสริมแรงด้วยสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ จะมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย (ประมาณ 10-20%)

### ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (aging properties)

เนื่องจากยางเอสปีอาร์ มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ดังนั้น จึงเสื่อมสภาพเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ แต่การเสื่อมสภาพของยางเอสปีอาร์ จะแตกต่างจากยางธรรมชาติ กล่าวคือ เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน โอโซน และแสงแดด ยางจะมีลักษณะแข็งมากขึ้นเพราะเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล (crosslinking) มากกว่าเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปจะช่วยยืดอายุการใช้งานของยางชนิดนี้ นอกจากนี้ การปรับระบบการคงรูปให้เป็นแบบประสิทธิภาพ (Efficiency Vulcanization, EV) หรือแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficiency Vulcanization, semi-EV) ก็จะช่วยทำให้ยางมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงขึ้นได้เช่นกัน

### ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance)

ยางเอสปีอาร์ จัดเป็นยางที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนต่ำ แต่จะทนต่อการกัดและต่างเจือจาง แอลกอฮอล์ น้ำ ไกลคอล เกลือ และน้ำมันซิลิโคนได้เป็นอย่างดี

### ความเป็นฉนวน (electrical insulator)

ยางเอสปีอาร์ จัดเป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงมีความเป็นฉนวนสูง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ในช่วง  $10^{14}$  -  $10^{15}$  ohm.cm

### การกระด้างกระดอน (rebound resilience)

ยางเอสปีอาร์ มีการกระด้างกระดอนต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนสูง (มี hysteresis สูง) ดังนั้นเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางเอสปีอาร์ จึงมีความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ ยางเอสปีอาร์ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานในการผลิตยางล้อรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ได้ เพราะความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นอาจสูงมากพอที่จะทำให้ยางเกิดระเบิดได้



### อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature)

โดยทั่วไป ยางเอสปีอาร์ สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $-50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  และเนื่องจากยางเอสปีอาร์ ไม่สามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดยางแข็งตัวเมื่อเก็บไว้หรือเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลาไม่นาน

#### 2.2.2.3 การผสมเคมียาง

โดยทั่วไปองค์ประกอบของการผสมเคมียางในยางเอสปีอาร์ ก็เหมือนกับยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางเอสปีอาร์ มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงกว่าหรืออาจจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น

#### 2.2.2.4 การผสมยางเอสปีอาร์ กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

ยางเอสปีอาร์ เป็นยางที่มีความเป็นขี้ดต่ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปผสมกับยางที่ไม่มีขี้ดชนิดต่างๆได้โดยง่าย ปกติ นิยมนำไปผสมกับยาง BR หรือยางธรรมชาติในการผลิตยางล้อรถยนต์ ในกรณีนี้ ยาง BR ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการขีดถูและช่วยลดความร้อนสะสมในระหว่างการใช้งานของยางล้อรถยนต์ ในขณะที่ยางธรรมชาติจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติเชิงพลวัตให้ดีขึ้น เป็นต้น ส่วนการนำยางเอสปีอาร์ ไปผสมกับยางที่มีขี้ด เช่น ยาง NBR จะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อใช้ยาง NBR เกรดที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ต่ำๆ เท่านั้น

#### 2.2.2.5 การใช้งาน

ยางชนิดนี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร และที่สำคัญคือยางชนิดนี้ส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อของยานพาหนะขนาดเล็กโดยผสมกับยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางบิวตาไดอีน (BR) และยางธรรมชาติ (NR)



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์วิจัย

#### 3.1.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อเมอริเซียม/เบริเลียม (Americium-241/Beryllium-9,  $^{241}\text{Am/Be}$ ) จำนวน 4 ตัว ปริมาณรังสีรวม 140 มิลลิวูรี มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอน  $2.2 \times 10^6$  n/s/Ci โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เลขอะตอม (Atomic Number)	: 95
เลขมวล (Mass Number)	: 241(146 neutrons)
รูปแบบทางเคมี (Chemical Form)	: Americium oxide with beryllium metal
รูปแบบทางกายภาพ (Physical Form)	: Compacted mixture of americium oxide with beryllium metal.
ค่าครึ่งชีวิต (Physical half-life)	: 432.2 ปี

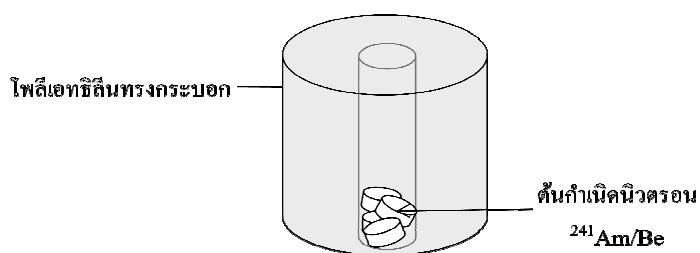
Principle Emissions	$E_{\text{Max}}$ (keV)	$E_{\text{eff}}$ (keV)	Dose Rate ( $\mu\text{Sv/h/GBq}$ at 1m)	Shielding Required
Beta* ( $\beta$ )	-	-	-	-
Gamma ( $\gamma$ ) / X-Rays	13.9 (42.7%) 59.5 (35.9%)	-	95 <sup>a</sup>	HVL Lead: 0.01 cm
Alpha ( $\alpha$ )	5,443 (12.8%) 5,486 (85.2%)	-	-	-
Neutron (n)	-	4,500	2 <sup>a</sup>	HVL Paraffin Wax: 6.6 cm

\* Where Beta radiation is present, Bremsstrahlung radiation will be produced. Shielding may be required.

Note: Only emissions with abundance greater than 10% are shown.

<sup>a</sup> The Health Physics and Radiological Health Handbook, Scintra, Inc., Revised Edition, 1992

ต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{241}\text{Am/Be}$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกบรรจุอยู่ในโพลิเอทิลีนทงกระบอกที่มีช่องบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนตรงกลาง



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์โพลีเอทิลีนทรงกระบอกบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน<sup>241</sup>Am/Be

### 3.1.2 ระบบวัดรังสีนิวตรอน

#### 3.1.2.1 หัววัดรังสีนิวตรอนชนิด <sup>6</sup>Li Glass scintillator

3.1.2.2 ระบบนับวัด ประกอบด้วย Pre Amplifier รุ่น PAD 814A, Amplifier, High Voltage power supply, Multi-channel analyzer (MCA) รุ่น DSA2000 และ Microcomputer

### 3.1.3 ระบบวัดรังสีแกมมา

3.1.3.1 หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) scintillation detector ประกอบด้วย tube base, preamplifier และ MCA tube base

3.1.3.2 ระบบนับวัด ประกอบด้วย Multichannel analyzer, Amplifier, High voltage power supply

3.1.4 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Neutron imaging plate) ยี่ห้อ FUJIFILM รหัส BAS-ND ขนาด 20 x 40 ตารางเซนติเมตร และเครื่องอ่านปริมาณรังสีจากแผ่นบันทึกภาพ ยี่ห้อ FUJI FILM รุ่น FLA-5100

### 3.1.5 น้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์

(Vulcanizable natural rubber latex)

ชนิดน้ำยางหล่อเบ้ายาง

จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร



### 3.1.6 น้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์

(Carboxylated Styrene/Butadiene latex

รุ่น DOW LATEX 832) จากบริษัท

DOW CHEMICAL THAILAND LTD.



### 3.1.7. วัสดุตุ้ดกลืนนิวตรอน

#### 3.1.7.1 กรดบอริกชนิดผง



#### 3.1.7.2 ผงโบรอน



#### 3.1.7.3 สารละลายแคดเมียมไนเตรท



#### 3.1.7.4 ผงแคดเมียม



- 3.1.8. เครื่องแก้ว ได้แก่ จานเพาะเชื้อแก้วรูปวงกลมสำหรับทำพิมพ์แผ่นยาง แท่งแก้วคนสาร กระบอกตวง และปิпетเตอร์



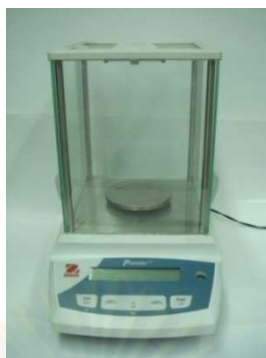
ภาพที่ 3.2 เครื่องแก้วที่ในงานวิจัย

- 3.1.9. แผ่นรองกระจกเพื่อปรับระนาบขณะขึ้นรูปชิ้นงานและอุปกรณ์วัดระดับความเป็นระนาบ (Spirit level)



ภาพที่ 3.3 แผ่นรองกระจกเพื่อปรับระนาบขณะขึ้นรูปชิ้นงานและอุปกรณ์วัดระดับความเป็นระนาบ (Spirit level) ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1.10. เครื่องชั่ง ยี่ห้อ OHAUS



ภาพที่ 3.4 เครื่องชั่งที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1.11. เครื่องผสมสารชนิด Laboratory Stirrer/Hotplate ยี่ห้อ CORNING 6798-420D (230 Volt AC, 50 Hz, 3.0 A, 698 W) ให้อุณหภูมิสูงสุด 550 °C และมีความเร็วในการหมุนสูงสุด 1,150 รอบต่อนาที



ภาพที่ 3.5 Laboratory Stirrer/Hotplate ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1.12. ตู้อบยี่ห้อ BINDER รุ่น R3-Controller Series



ภาพที่ 3.6 ตู้อบที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การหาสัดส่วนของยางที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน

##### 3.2.1.1 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

ทดลองขึ้นรูปแผ่นยางที่มีอัตราส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ที่มีอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

1. นำน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanizable natural rubber latex) และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ เทรวมกันในบีกเกอร์ โดยมีอัตราส่วนและปริมาตร ดังตารางที่ 3.1
2. คนส่วนผสมทั้งหมดในบีกเกอร์ให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer โดยใช้ความเร็ว 450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
3. เทส่วนผสมทั้งหมดลงบนพิมพ์แก้วรูปวงกลมแล้วทิ้งไว้จนส่วนผสมทั้งหมดแห้งและสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้
4. นำชิ้นงานที่ได้ไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนและปริมาตรของน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์

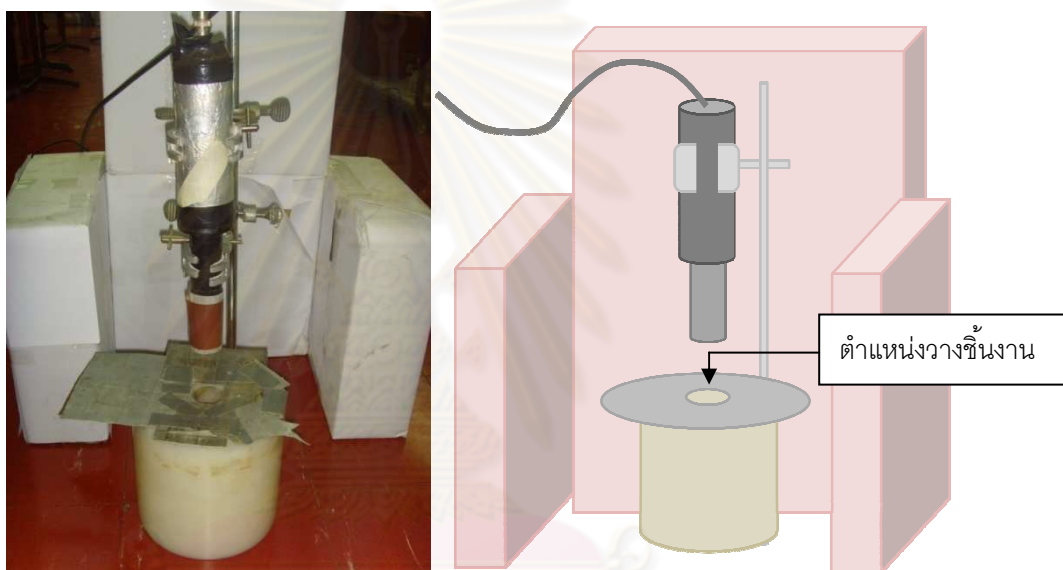
อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์	ปริมาตร (มล.)	
	น้ำยางพาราธรรมชาติ	ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์
0 : 100	0	25
10 : 90	2.5	22.5
20 : 80	5	20
30 : 70	7.5	17.5
40 : 60	10	15
50 : 50	12.5	12.5
60 : 40	15	10
70 : 30	17.5	7.5
80 : 20	20	5
90 : 10	22.5	2.5
100 : 0	25	0



### 3.2.1.2 การหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอน

ทำการหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของแผ่นยางที่มีอัตราส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ที่มีอัตราส่วนต่างๆ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. จัดระบบวัดรังสีนิวตรอนนิวตรอนโดยจัดวางอุปกรณ์และระบบวัดซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ถังพาราฟินสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{241}\text{Am/Be}$  และส่วนของหัววัด ดังรูปที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ระบบวัดรังสีนิวตรอนนิวตรอน

2. ทำการนับวัดรังสีนิวตรอนโดยนำแผ่นแคดเมียมวางไว้ที่ตำแหน่งระหว่างถังพาราฟินสำหรับบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดรังสี
3. บันทึกจำนวนนับ (Area) นิวตรอนได้จำนวนนับรังสีของนิวตรอนเร็ว
4. ทำการนับวัดการลดทอนรังสีนิวตรอนของชิ้นงานโดยนำชิ้นงานตัวอย่างวางไว้เหนือแผ่นแคดเมียม
5. ทำการนับวัดรังสีนิวตรอนช้า อิพิเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว โดยทำซ้ำดังข้อ 2 ถึง 4 แต่นำแผ่นแคดเมียมออกจากระบบวัด

### 3.2.2 การหาวัสดุคูดกกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม

#### 3.2.2.1 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

ทดลองขึ้นรูปแผ่นยางเพื่อหาวัสดุคูดกกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสมโดยผสมน้ำยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนที่เท่ากันร่วมกับวัสดุคูดกกลืนนิวตรอนโดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1 นำน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanizable natural rubber latex) ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตรและกรดบอริกชนิดผงมวล 1 กรัม เทรวมกันในบีกเกอร์
- 2 คนส่วนผสมทั้งหมดในบีกเกอร์ให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer โดยใช้ความเร็ว 450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 3 เทส่วนผสมทั้งหมดลงบนพิมพ์แก้วรูปวงกลมแล้วทิ้งไว้จนส่วนผสมทั้งหมดแห้งและสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้
- 4 นำชิ้นงานที่ได้ไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5 ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 แต่เปลี่ยนจากกรดบอริกชนิดผงในขั้นตอนที่ 1 เป็นวัสดุต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณและชนิดของวัสดุคูดกกลืนรังสีนิวตรอนที่ใช้ผสมกับน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์และยางสังเคราะห์เอสปีอาร์

ชิ้นงาน	ปริมาณวัสดุคูดกกลืนรังสีนิวตรอนที่ใช้			
	กรดบอริก (กรัม)	ผงโบรอน (กรัม)	สารละลายแคดเมียม ในเตรท (มล.)	ผงแคดเมียม (กรัม)
T1	-	-	-	-
T2	-	-	-	-
T3	1	-	-	-
T4	1	-	-	-
T5	-	0.175	-	-
T6	-	0.175	-	-
T7	-	-	175	-
T8	-	-	175	-

ชิ้นงาน	ปริมาณวัสดุชุดกลืนรังสีนิวตรอนที่ใช้			
	กรดบอริก (กรัม)	ผงโบรอน (กรัม)	สารละลายแคดเมียม ไนเตรท (มล.)	ผงแคดเมียม (กรัม)
T9	-	-	-	0.175
T10	-	-	-	0.175
T11	0.5	0.088	-	-
T12	0.5	0.088	-	-
T13	0.5	-	87.5	-
T14	0.5	-	87.5	-
T15	0.5	-	-	0.088
T16	0.5	-	-	0.088
T17	-	0.088	87.5	-
T18	-	0.088	87.5	-
T19	-	0.088	-	0.088
T20	-	0.088	-	0.088
T21	-	-	87.5	0.088
T22	-	-	87.5	0.088
T23	0.33	0.058	58.3	-
T24	0.33	0.058	58.3	-
T24	0.33	-	58.3	0.058
T25	0.33	-	58.3	0.058
T26	0.33	0.058	-	0.058
T28	0.33	0.058	-	0.058
T29	-	0.058	58.3	0.058
T30	-	0.058	58.3	0.058
T31	0.25	0.044	44	0.044
T32	0.25	0.044	44	0.044

### 3.2.2.2 การหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอน

ทำการทดลองหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงาน ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่ประกอบด้วยชนิดและปริมาณต่างๆใน หัวข้อ 3.2.2.1 โดยมีขั้นตอนดังข้อ 3.2.1.2

### 3.2.3 การหาการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังนิวตรอนที่ผลิตได้

#### 3.2.3.1 เตรียมชิ้นงาน

ขึ้นรูปแผ่นยางผสมตัวดูดกลืนนิวตรอนที่มีคุณสมบัติการดูดกลืน นิวตรอนและคุณสมบัติของชิ้นงานที่เหมาะสม จากการทดลองหาวัสดุดูดกลืนรังสี นิวตรอนที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.2 และ การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูปจากตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ที่ได้จากจากส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ เกษตร ได้สูตรของส่วนผสมต่างๆของวัสดุกำบังนิวตรอน คือ น้ำยางพาราธรรมชาติและ น้ำยางสังเคราะห์เอสบีอาร์ ที่มีอัตราส่วน 70:30 และผสมตัวดูดกลืนนิวตรอนชนิด กรดบอริกชนิดผงร่วมกับผงโบรอน เช่นเดียวกับ ชิ้นงาน T11 และ T12 ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป จากส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ เกษตร ของยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสบีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอน ชนิดกรดบอริกชนิดผงและผงโบรอน

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				วิธีทดสอบ
	10:90(A)	30:70(A)	50:50(A)	70:30(A)	
ความแข็ง (Shore A)	*	40	41	36	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	*	0.8	0.8	0.8	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	*	1.5	1.5	1.3	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	*	-	-	2.4	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	*	1.5	2.2	3.6	ISO 37 (Type 1)
ทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	*	324	448	583	ISO 37 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)	9.8	10.9	12.0	20.5	ISO 34

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				วิธีทดสอบ
	10:90(A)	30:70(A)	50:50(A)	70:30(A)	
การบ่มแรงที่ 100°C, 22 ชม.					(Angle test piece)
ความแข็ง (Shore A)	*	50	47	42	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	*	1.2	1.2	0.9	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	*	4.0	3.5	2.2	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	*	-	-	4.5	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	*	7.1	5.1	11.4	ISO 37 (Type 1)
ทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	*	423	426	688	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ : \* ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากแผ่นยางติดกัน

ตารางที่ 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป จากส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ  
เกษตร ของยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ไฮสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับวัสดุเติมดก  
นิวตรอนชนิดกรดบอริกชนิดผง (T3, T4)

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				วิธีทดสอบ
	10:90(B)	30:70(B)	50:50(B)	70:30(B)	
ความแข็ง (Shore A)	40	37	35	35	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.7	0.7	0.8	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	-	-	1.2	1.3	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	1.6	2.2	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	1.3	1.4	1.7	3.1	ISO 37 (Type 1)
ทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	384	287	568	555	ISO 37 (Type 1)

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				วิธีทดสอบ
	10:90(B)	30:70(B)	50:50(B)	70:30(B)	
การฉีกขาด (N/mm)	9.5	8.9	9.7	16.4	ISO 34  (Angle test piece)
การบ่มแรงที่ 100°C, 22 ชม.					
ความแข็ง (Shore A)					
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	55	48	43	40	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.7	1.4	1.1	1.0	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	3.8	3.0	2.4	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	-	-	-	5.9	ISO 37 (Type 1)
ทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	4.6	4.0	5.7	9.3	ISO 37 (Type 1)
	277	308	414	612	ISO 37 (Type 1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



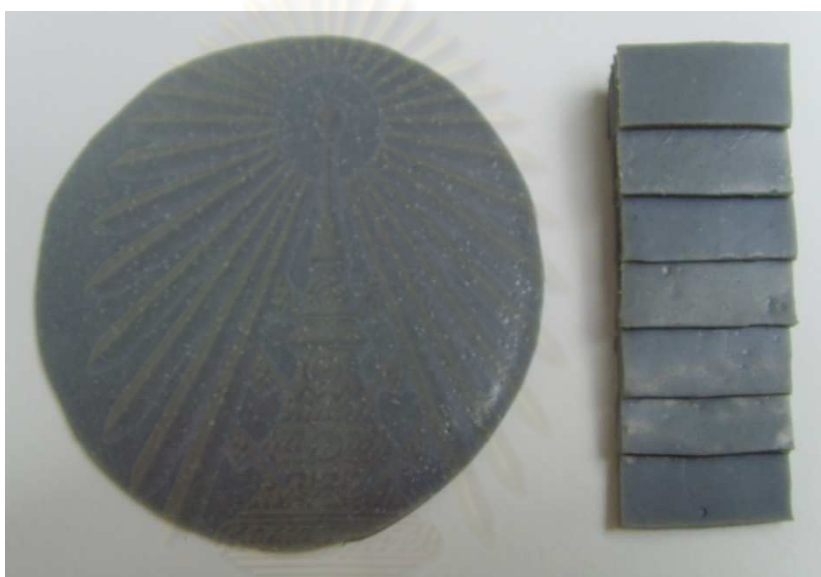
### 3.2.3.2 การหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอน

ทำการทดลองหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน โดยมีขั้นตอนดังข้อ 3.2.1.2 ซึ่งทำการบันทึกจำนวนนับรังสีเมื่อมีชิ้นงานจำนวนต่างๆ

### 3.2.4 การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน

#### 3.2.4.1 ถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน

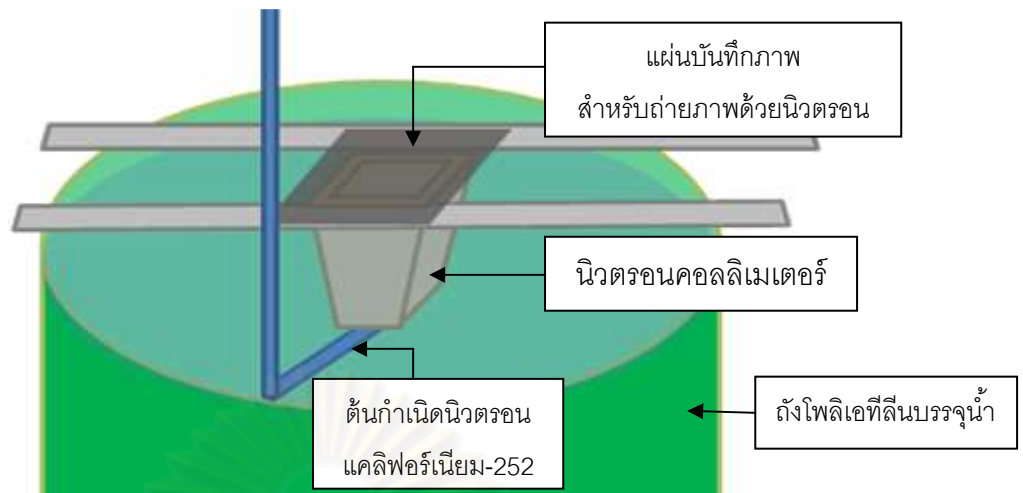
1. เตรียมชิ้นงานในรูปของ step wedge และชิ้นงานปกติ ดังรูปที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ชิ้นงานของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

2. นำชิ้นงานไปติดไว้ด้านหน้าของแผ่นบันทึกภาพสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (neutron image plate)
3. ทำการถ่ายภาพนิวตรอนเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง โดยจัดระบบการถ่ายภาพดังรูปที่ 3.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



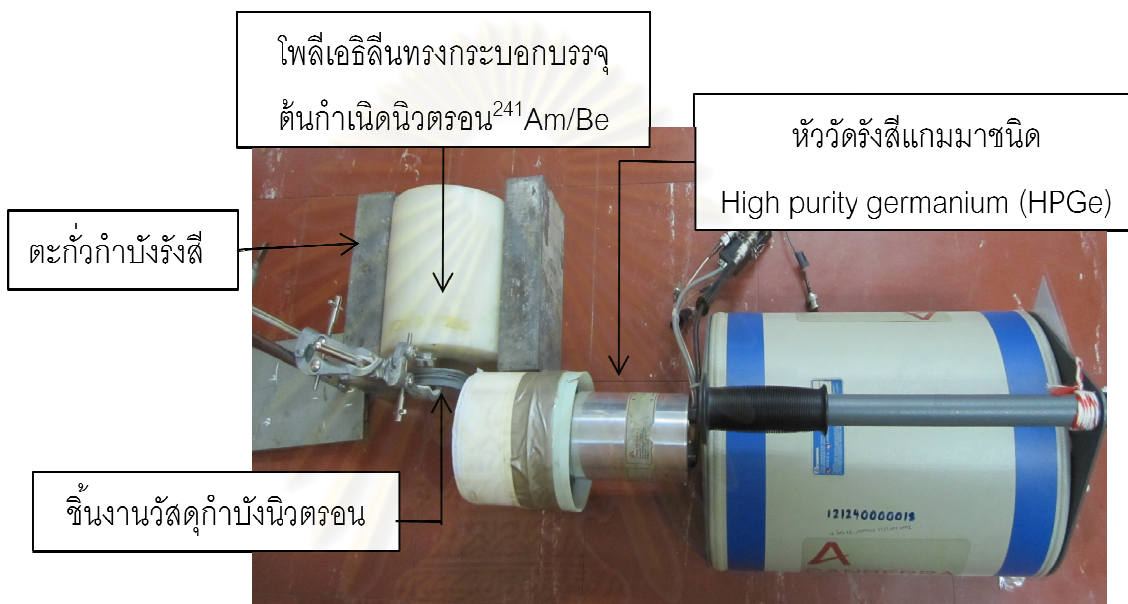
ภาพที่ 3.9 ระบบการถ่ายภาพนิวตรอนซึ่งงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

4. นำ image plate ไปอ่านภาพแล้วทำการวิเคราะห์ค่าความดำของภาพในแต่ละตำแหน่งด้วยเครื่องอ่านปริมาณรังสีจากแผ่นบันทึกภาพ ยี่ห้อ FUJI FILM รุ่น FLA-5100 โดยใช้พารามิเตอร์ Gradation 256 (8 bit), Resolution 50  $\mu\text{m}$ , Wavelength 635 nm.

### 3.2.5 การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

#### 3.2.5.1 นับวัดรังสี Prompt Gamma

1. จัดระบบวัดรังสีแกมมาโดยจัดวางอุปกรณ์และระบบวัดซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนและส่วนของหัววัด ดังรูปที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ระบบวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการการถูกกระตุ้นชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน

2. ทำการนับวัดรังสีแกมมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสังเกตกราฟสเปกตรัมของรังสีแกมมา
3. นับวัดรังสีแกมมาดังข้อ 1 และ 2 แต่นำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนออกจากระบบวัดรังสีแกมมา
4. เปรียบเทียบจำนวนนับรังสีและสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากข้อ 2 และ 3

### 3.2.6 การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

#### 3.2.6.1 วิธีดำเนินการวิจัยทดลองหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน(Neutron Activation Analysis, NAA)

1. นำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนไปอบนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่อยู่ในถังโพลิเอทิลีนบรรจุน้ำ
2. อบรังสีนิวตรอนทิ้งไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง
3. นำชิ้นงานที่ผ่านการอบรังสีนิวตรอนแล้วไปวัดสเปกตรัมรังสีด้วยหัววัดรังสีชนิด High purity germanium (HPGe)
4. บันทึกจำนวนนับรังสีและสังเกตสเปกตรัม

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การหาสัดส่วนของน้ำยางที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน

จากการหาสัดส่วนของน้ำยางของน้ำยางพาราธรรมชาติ : ยางสังเคราะห์เอสบีอาร์ ที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน พบว่าน้ำยางในแต่ละสัดส่วนไม่มีความแตกต่างในการกำบังรังสีนิวตรอน เนื่องจากพบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่มีอัตราของยางในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีความหนาเท่ากันไปกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีพบว่าสามารถนับวัดรังสีนิวตรอนได้จำนวนนับรังสีที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 ผลการหาสัดส่วนของน้ำยางที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน

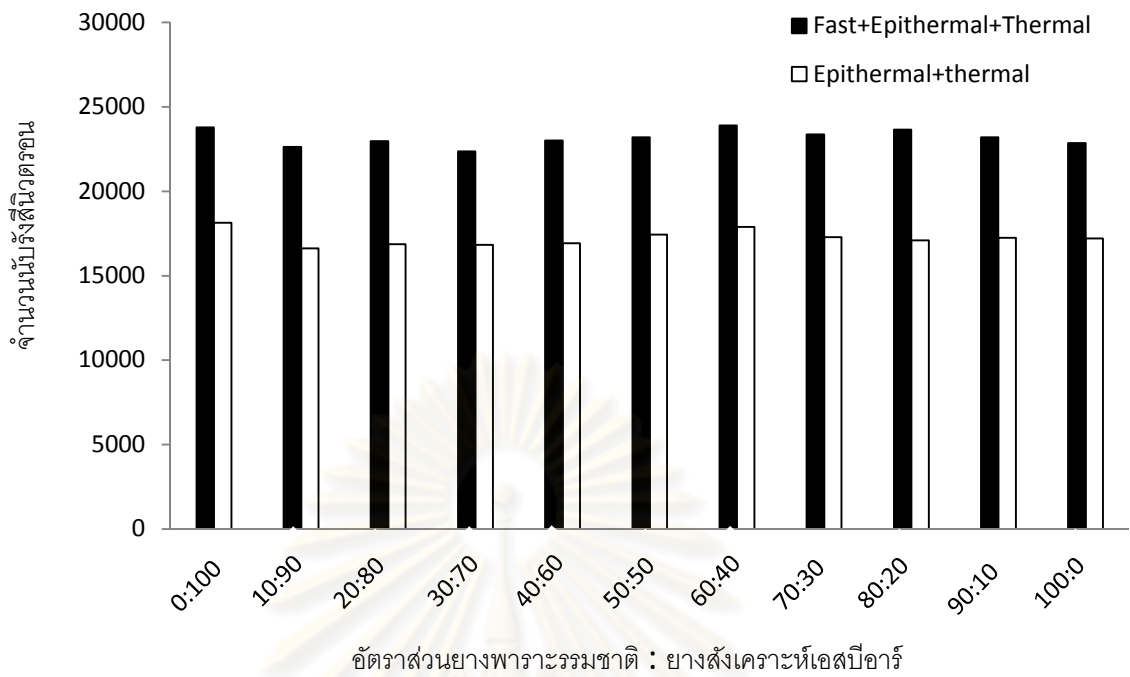
อัตราส่วน	จำนวนนับรังสี/500 วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน(%)		
	นิวตรอนเร็ว อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน
ไม่มีชิ้นงาน	28426	6267	22159	0	0	0
0:100	23781	5652	18129	16.341	9.813	18.187
10:90	22624	6003	16621	20.411	4.213	24.992
20:80	22970	6706	16864	19.194	2.569	23.895
30:70	22371	5550	16821	21.301	11.441	24.090
40:60	23016	6088	16928	19.032	2.856	23.607
50:50	23191	5755	17436	18.416	8.170	21.314
60:40	23890	5991	17899	15.957	4.404	19.225
70:30	23369	6086	17283	17.790	2.888	22.005
80:20	23653	6567	17086	16.791	-4.787	22.894
90:10	23205	5960	17245	18.367	4.899	22.176
100:0	22848	5639	17209	19.623	10.021	22.339

ตารางที่ 4.2 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการทดลองกำลังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีของ  
 ชีงงานที่มีอัตราส่วนของ น้ำยางพาราธรรมชาติ : ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ต่างๆ

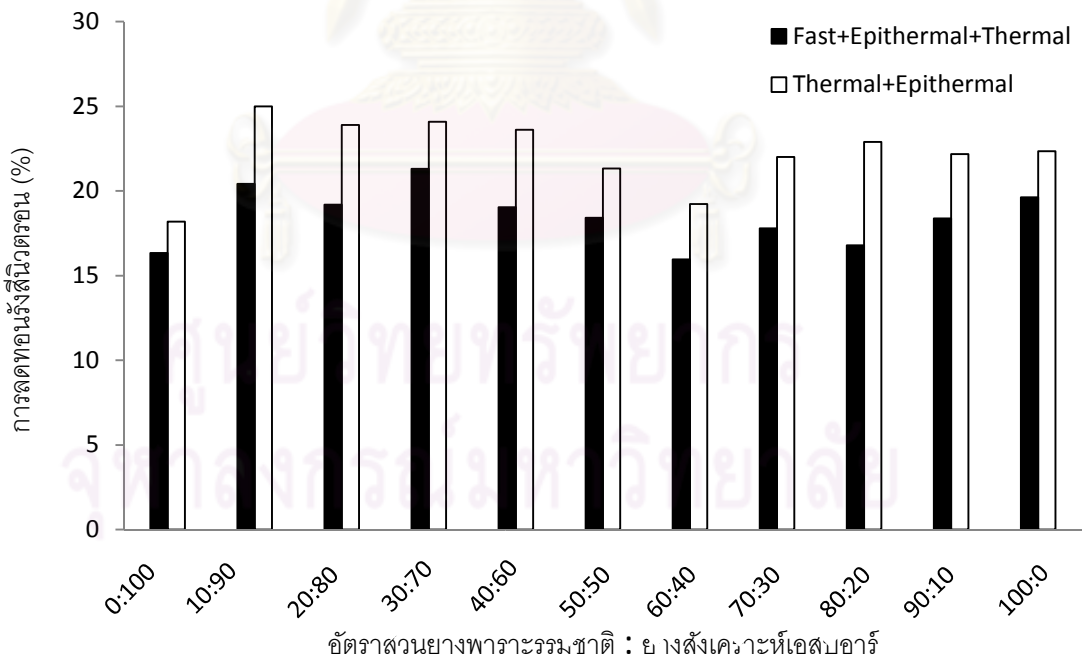
อัตราส่วน	ค่าภาคตัดขวางมหภาค ( $\text{cm}^{-1}$ )
ไม่มีชีงงาน	-
0:100	0.892
10:90	1.141
20:80	1.066
30:70	1.198
40:60	1.056
50:50	1.018
60:40	0.869
70:30	0.979
80:20	0.919
90:10	1.015
100:0	1.092

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 4.1 กราฟจำนวนนับรังสีนิวตรอนของของยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.2 กราฟค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของของยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ

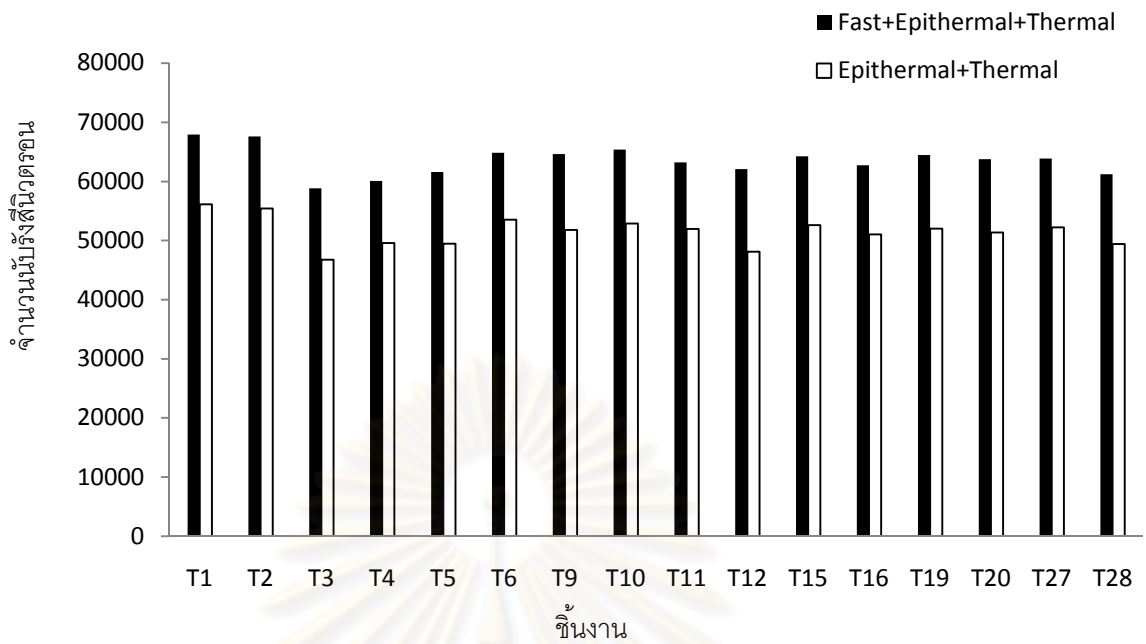
#### 4.2 การหาวัสดุคอกกลิ้งรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม

จากผลการนับวัดรังสีนิวตรอนเมื่อมีชิ้นงานมากำบังรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอนพบว่าชิ้นงาน T3, T4 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปร่างอย่างพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนที่เท่ากันร่วมกับกรดบอริกชนิดผงปริมาณ 1 กรัม เป็นชิ้นงานที่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ ชิ้นงาน T11, T12 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปร่างร่วมกับกรดบอริกชนิดผงและผงโบรอนปริมาณ 0.5 กรัม และ 0.088 กรัม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองการหาวัสดุคอกกลิ้งรังสีนิวตรอนของแต่ละชิ้นงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

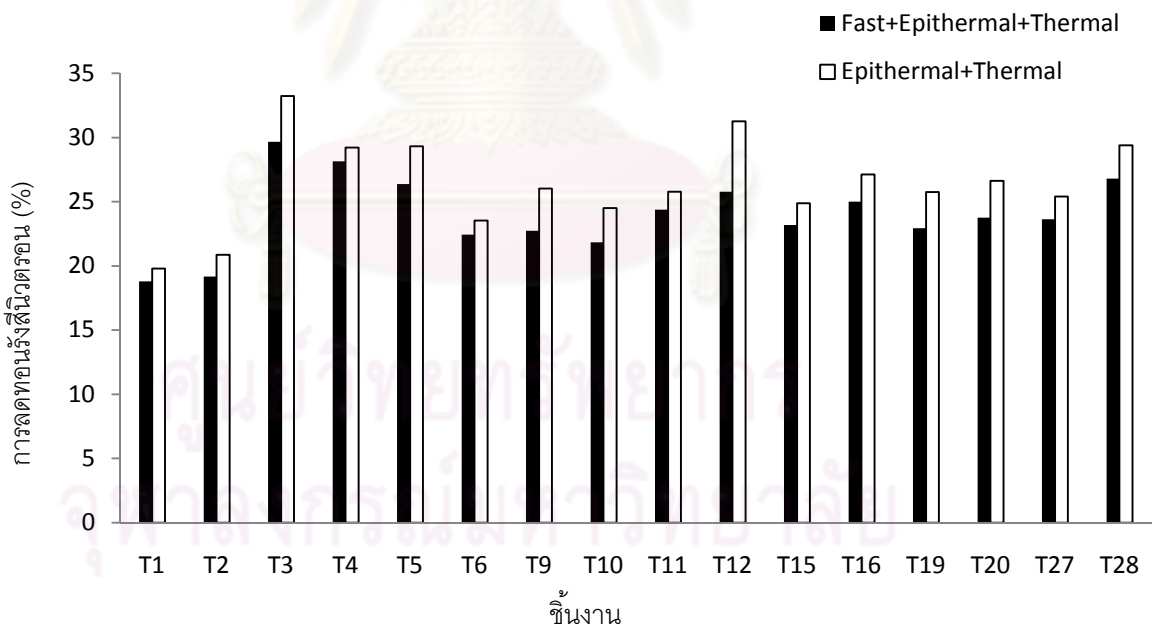
ตารางที่ 4.3 ผลการหาวัสดุคอกกลิ้งรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม

ชิ้นงาน	จำนวนนับรังสีนิวตรอน/300 วินาที			การลดทอนรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอน(%)			หมายเหตุ
	นิวตรอนเร็ว อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพีเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	
ไม่มีชิ้นงาน	83628	13611	70017	0	0	0	
T1	67915	11765	56150	18.789	13.56	19.805	
T2	67600	12187	55413	19.166	10.46	20.858	
T3	58828	12086	46742	29.655	11.2	33.242	
T4	60095	10529	49566	28.14	22.64	29.209	
T5	61574	12087	49487	26.372	11.2	29.321	
T6	64867	11320	53547	22.434	16.83	23.523	
T7	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T8	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T9	64615	12822	51793	22.735	5.797	26.028	
T10	65375	12512	52863	21.826	8.074	24.5	
T11	63229	11255	51974	24.393	17.31	25.769	
T12	62064	13943	48121	25.786	-2.44	31.272	

ชิ้นงาน	จำนวนนับรังสีนิวตรอน/300 วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน(%)			หมายเหตุ
	นิวตรอนเร็ว อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	
T13	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T14	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T15	64233	11629	52604	23.192	14.562	24.872	
T16	62711	11683	51028	25.012	14.173	27.121	
T17	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T18	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T19	64445	12453	51992	22.938	8.508	25.744	
T20	63764	12396	51368	23.753	8.927	26.635	
T21	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T22	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T23	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T24	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T25	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T26	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T27	63871	11635	52236	23.625	14.52	25.395	
T28	61216	11772	49444	26.8	13.51	29.383	
T29	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T30	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T31	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป
T32	-	-	-	-	-	-	ไม่สามารถขึ้นรูป



ภาพที่ 4.3 กราฟจำนวนแบคทีเรียของชั้นงานแต่ละชนิด



ภาพที่ 4.4 กราฟค่าการลดทอนแบคทีเรีย (%) ของชั้นงานแต่ละชนิด

#### 4.3 การลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้

จากการขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ได้จากการนำวัสดุคูดกลืนนิวตรอน เช่นเดียวกับชิ้นงานชนิด T3, T4 และ T11, T12 ซึ่งเป็นวัสดุคูดกลืนนิวตรอนที่ดีที่สุดสองอันดับแรกมาขึ้นรูปร่วมกับน้ำยาทางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆและนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆของยางคูดรูปได้ส่วนผสมของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ดีที่สุดคือ น้ำยาพาราธรรมชาติกับน้ำยาสังเคราะห์เอสปีอาร์ ร่วมกับวัสดุคูดกลืนนิวตรอนได้แก่ กรดบอริกชนิดผงและผงโบรอน ซึ่งพบว่าความหนาของชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีโดยเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 ผลการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้

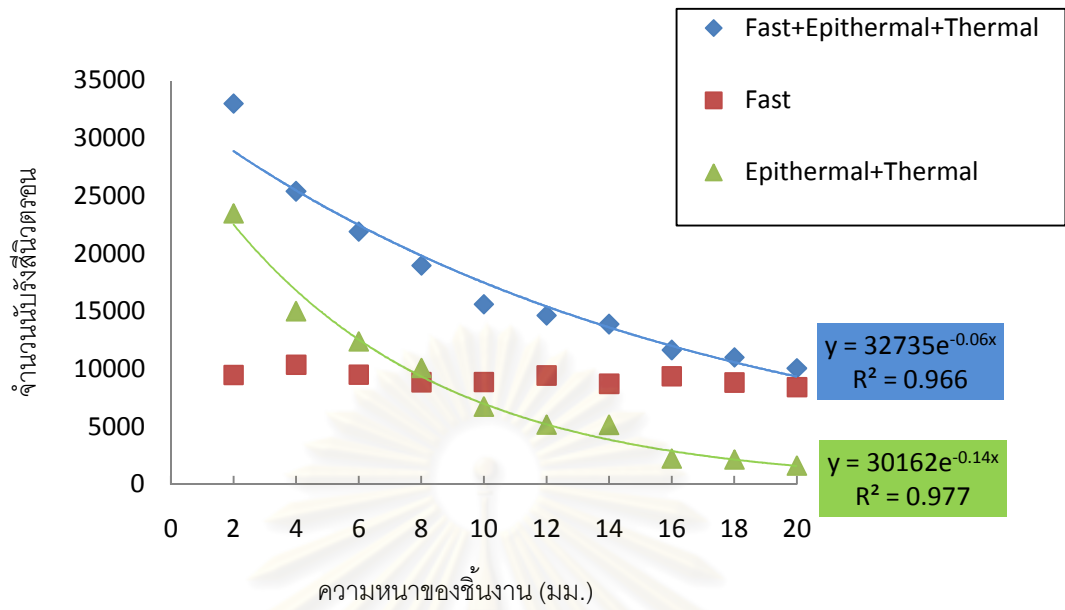
จำนวน ชิ้นงาน	ความหนาของชิ้นงาน(มม.)	จำนวนนับรังสีนิวตรอน/500 วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน(%)		
		นิวตรอนเร็ว อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	นิวตรอนเร็ว	อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน
0	0	46862	10716	36146	0	0	0
1	2	32997	9499	23498	29.587	11.357	34.991
2	4	25389	10389	15000	45.822	3.052	58.502
3	6	21916	9516	12400	53.233	11.198	65.695
4	8	18979	8867	10112	59.500	17.255	72.025
5	10	15625	8891	6734	66.657	17.031	81.370
6	12	14647	9457	5190	68.744	11.749	85.642
7	14	13889	8736	5153	70.362	18.477	85.744
8	16	11639	9381	2258	75.163	12.458	93.753
9	18	11013	8840	2173	76.499	17.507	93.988
10	20	10080	8437	1643	78.490	21.267	95.455

ตารางที่ 4.5 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการทดลองกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีของ  
ชิ้นงานที่มีความหนาต่างๆ

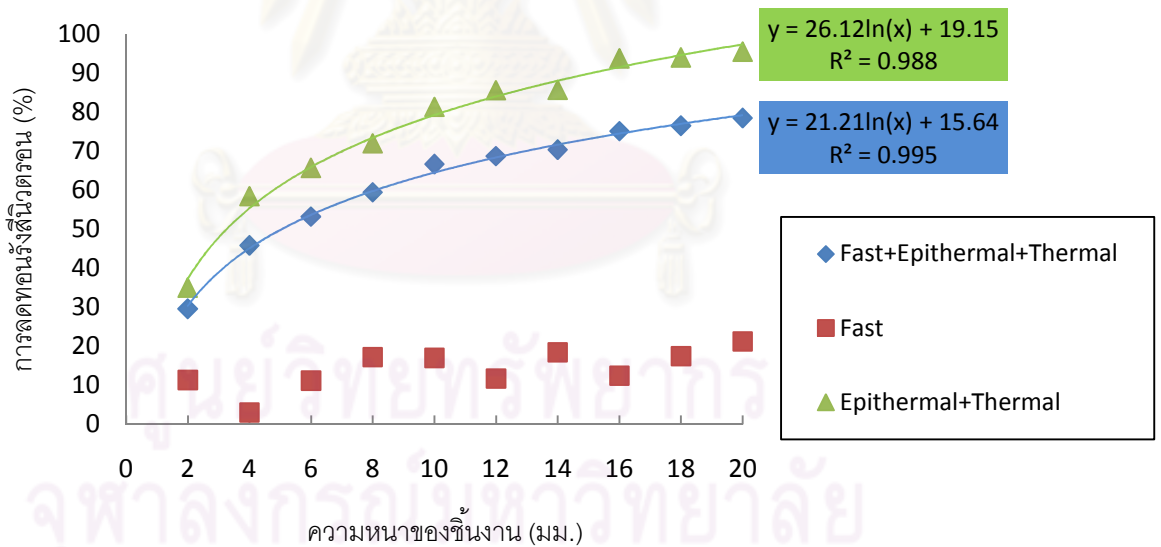
จำนวน ชิ้นงาน	ความหนาของ ชิ้นงาน(มม.)	นิวตรอนเร็ว อีพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	ค่าภาคตัดขวางมหภาค ( $\text{cm}^{-1}$ )
0	0	46862	-
1	2	32997	1.754
2	4	25389	1.532
3	6	21916	1.267
4	8	18979	1.130
5	10	15625	1.098
6	12	14647	0.969
7	14	13889	0.869
8	16	11639	0.871
9	18	11013	0.805
10	20	10080	0.768

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีผลต่อจำนวนขดรังสีนิวตรอน



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีผลต่อค่าร้อยละของการลดทอนรังสีนิวตรอน

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนแคดเมียม} &= \frac{\text{จำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อไม่มีแผ่นแคดเมียมปิด}}{\text{จำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อมีแผ่นแคดเมียมปิด}} \\ &= \frac{46862}{10716} \\ &= 4.37 \end{aligned}$$

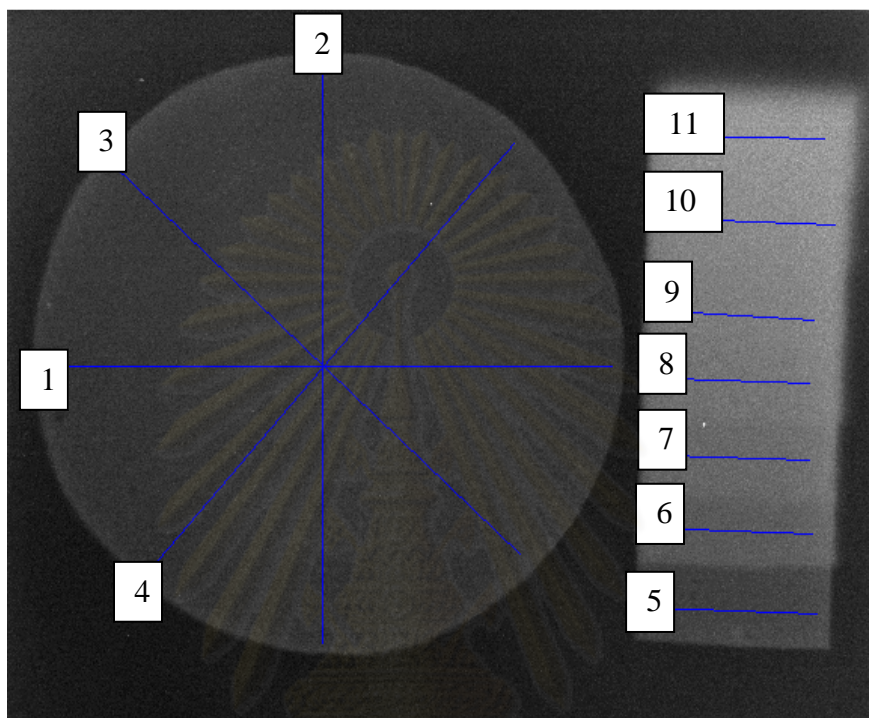
#### 4.4 การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน

จากการนำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีทั้งลักษณะเป็นแผ่นชิ้นงานปกติที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่นำมาทำเป็นขั้นบันได (Step wedge) ที่มีความหนาต่างๆ ได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 มิลลิเมตร มาทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนได้ภาพดังแสดงใน รูปที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายนิวตรอนของชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

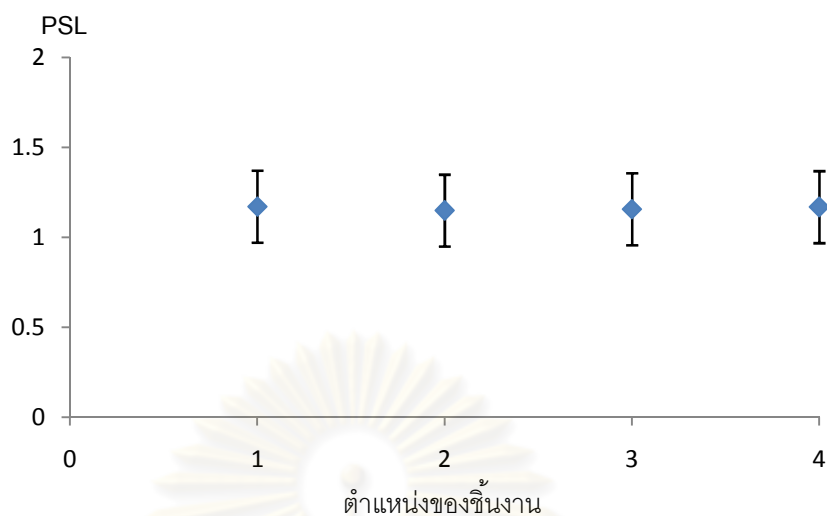
เมื่อนำภาพถ่ายด้วยรังสีนิวตรอนที่ได้ไปวัดค่า PhotoStimulated Luminescence (PSL) ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานดังรูปที่ 4.8 จะได้กราฟโปรไฟล์ของค่า PSL ในแต่ละตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.21



ภาพที่ 4.8 ตำแหน่งการสแกนค่า PhotoStimulated Luminescence (PSL) ของภาพถ่ายนิวตรอน ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูปวงกลม

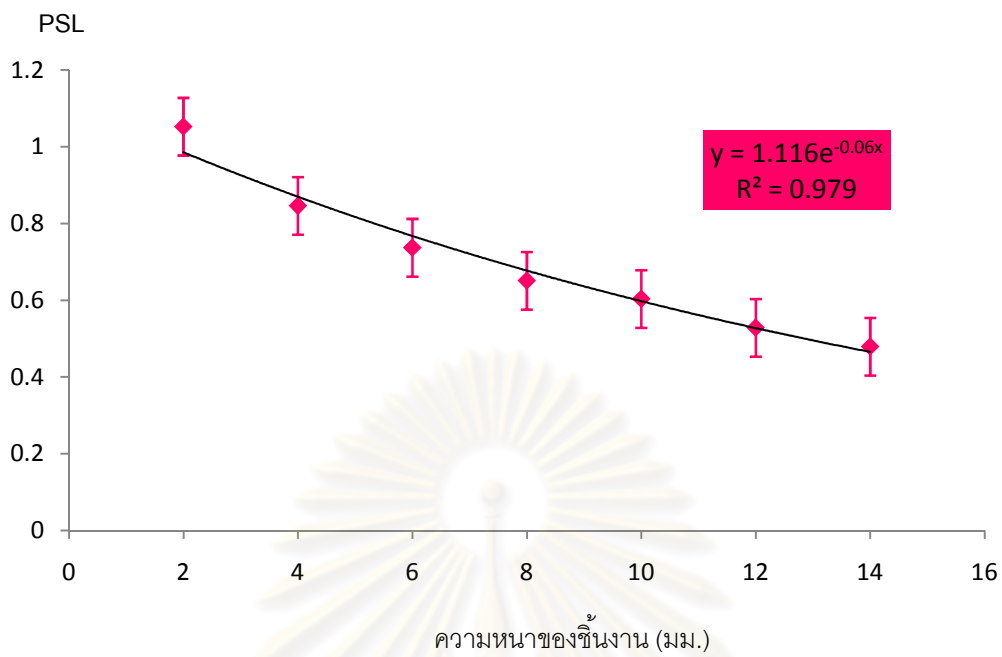
ตำแหน่งที่	ค่าเฉลี่ย PSL	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	1.171	0.074
2	1.149	0.083
3	1.156	0.080
4	1.168	0.076



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูปวงกลม

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ย PSL ของชิ้นงานในตำแหน่งหรือความหนาต่างๆของชิ้นงานรูปชิ้นบันได

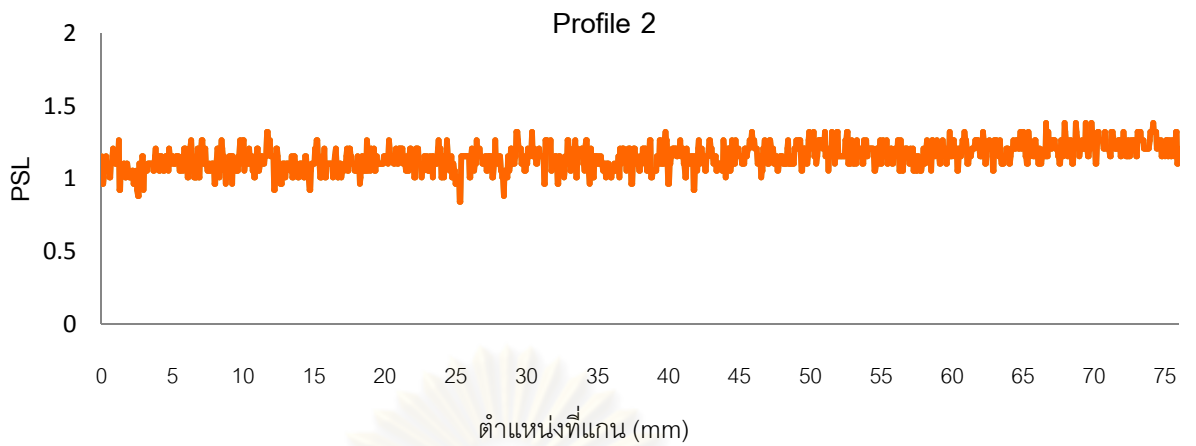
ตำแหน่งที่	ความหนา (มม.)	ค่าเฉลี่ย PSL	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	2	1.053	0.064
6	4	0.846	0.062
7	6	0.737	0.051
8	8	0.651	0.052
9	10	0.604	0.051
10	12	0.528	0.051
11	14	0.479	0.043



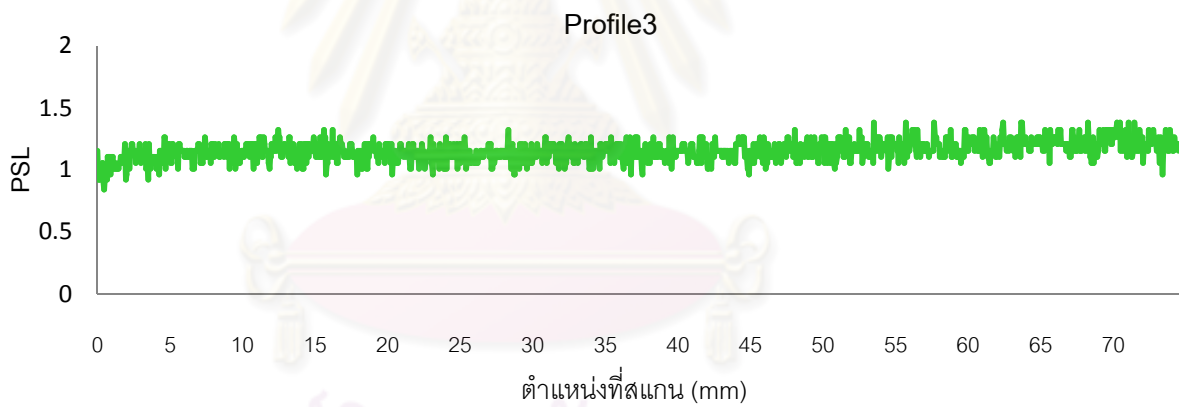
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL ตามความหนาต่างๆของชิ้นงานรูปชิ้นบันได



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 1

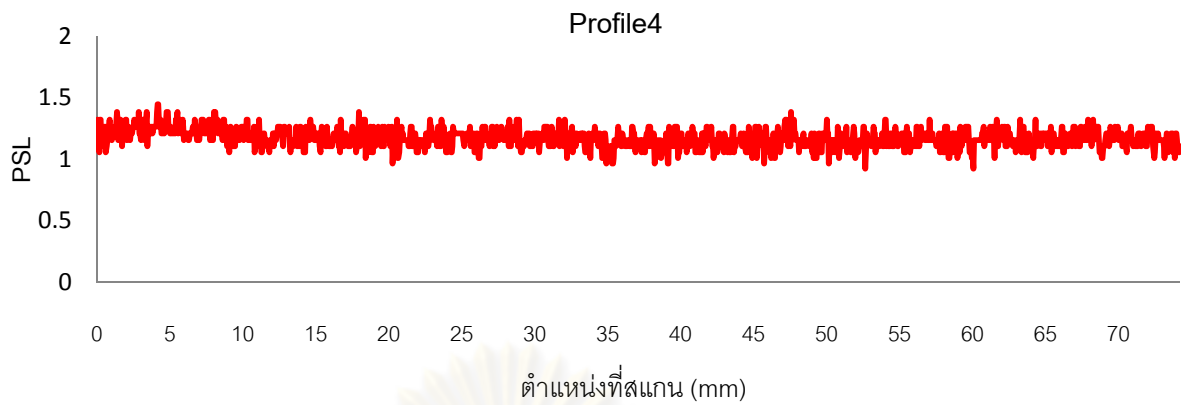


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 2

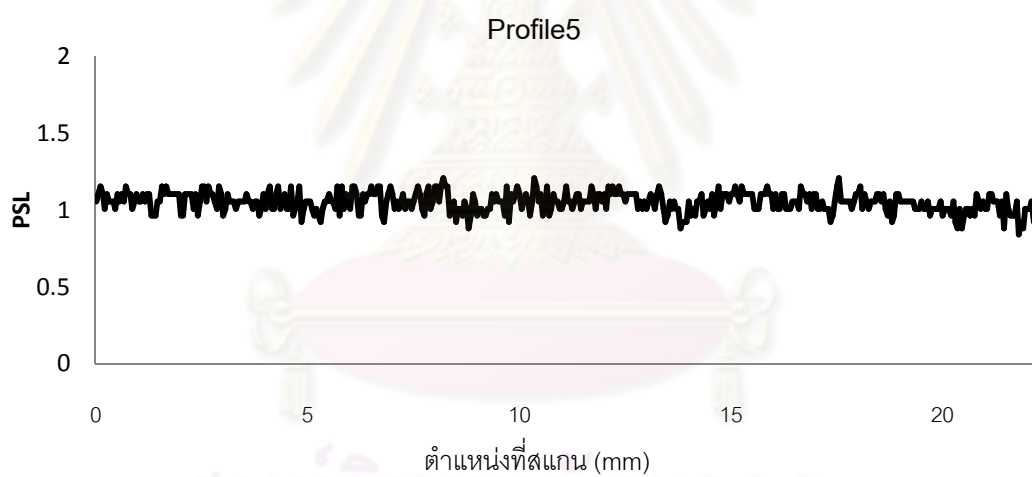


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 3

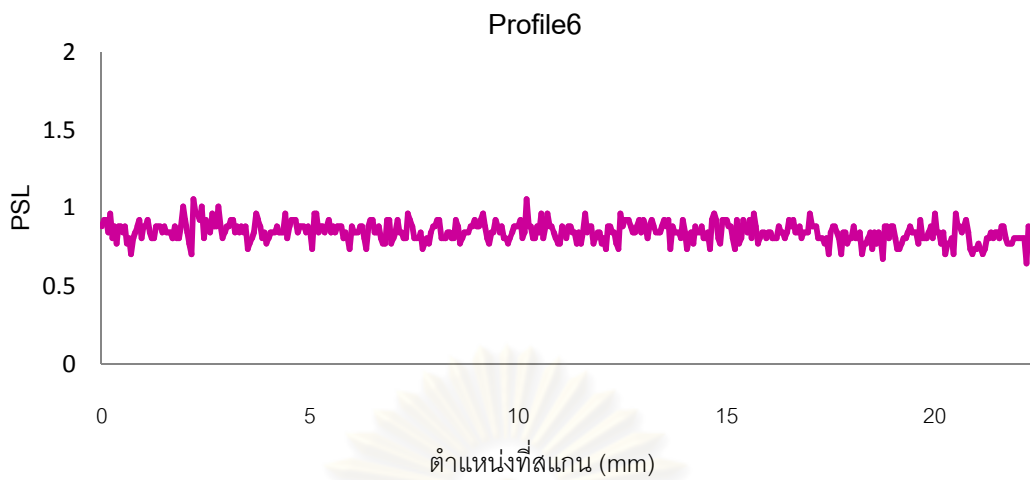




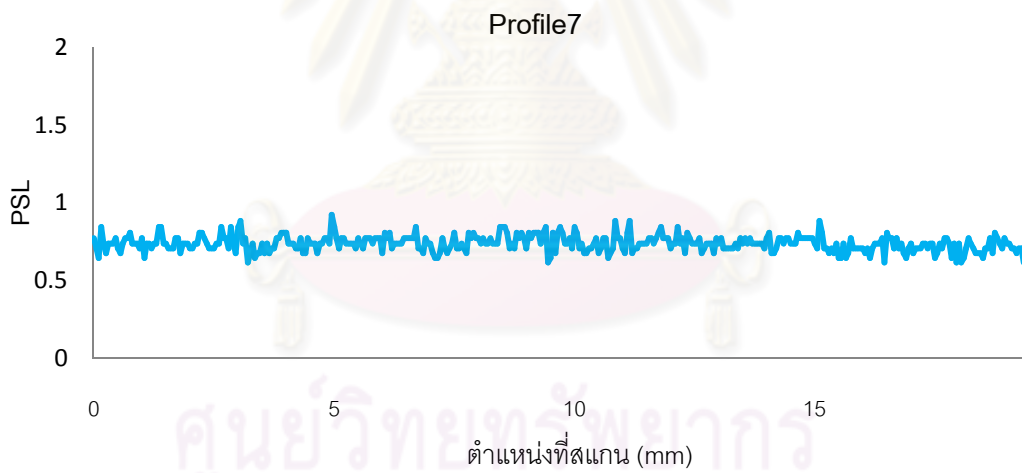
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนหนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 4



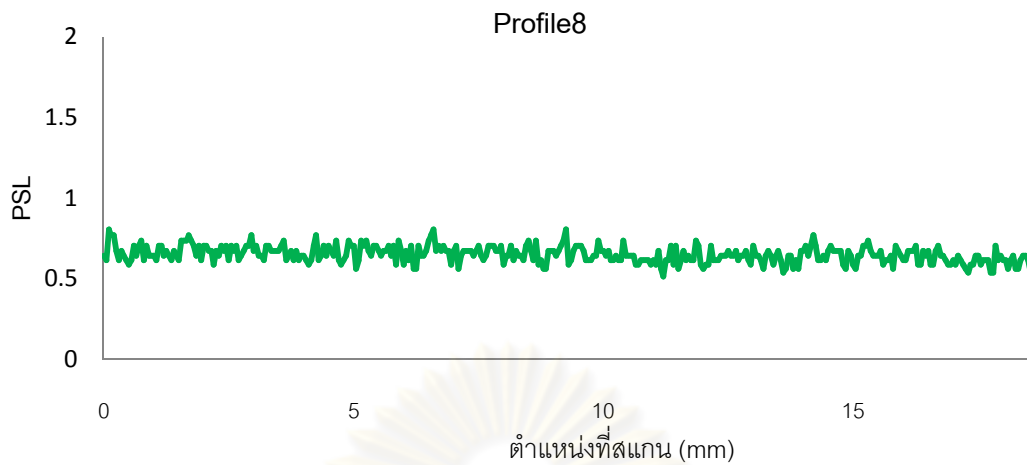
ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หนา 2 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 5



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 4 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 6



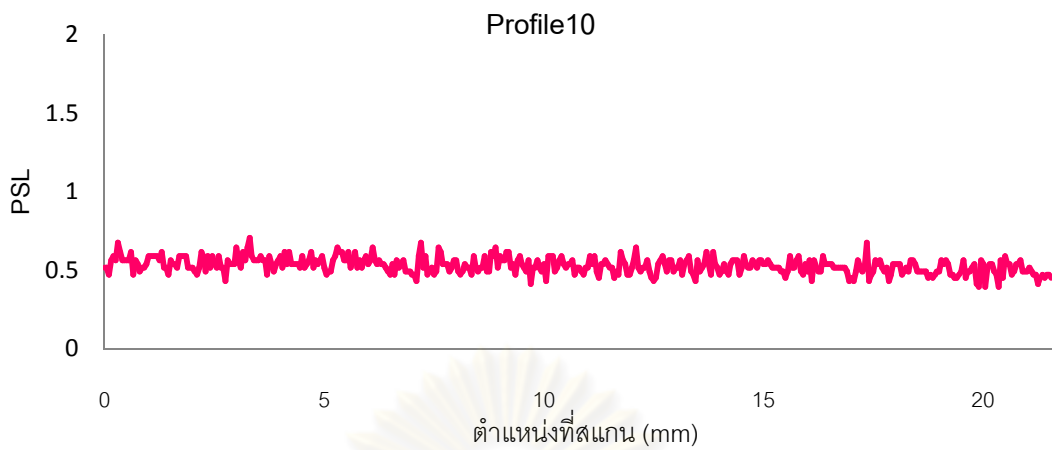
ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 6 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 7



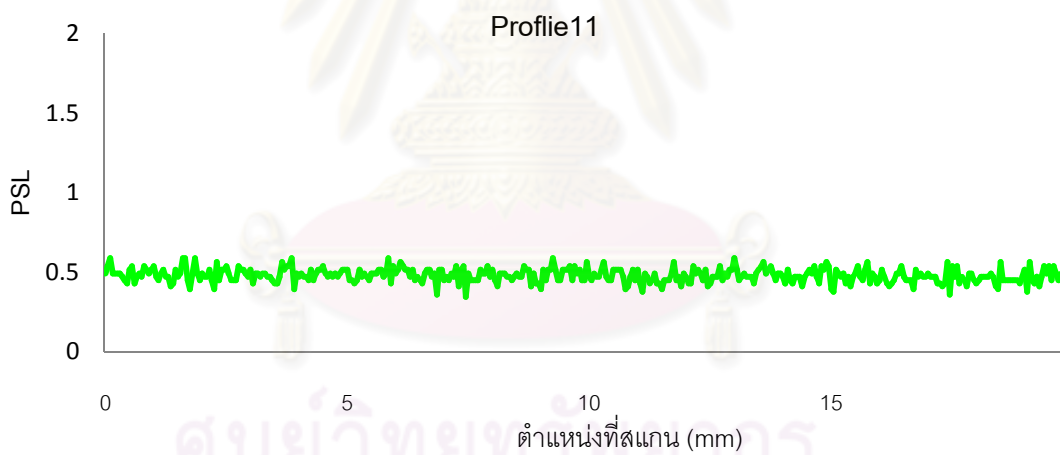
ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 8 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 8



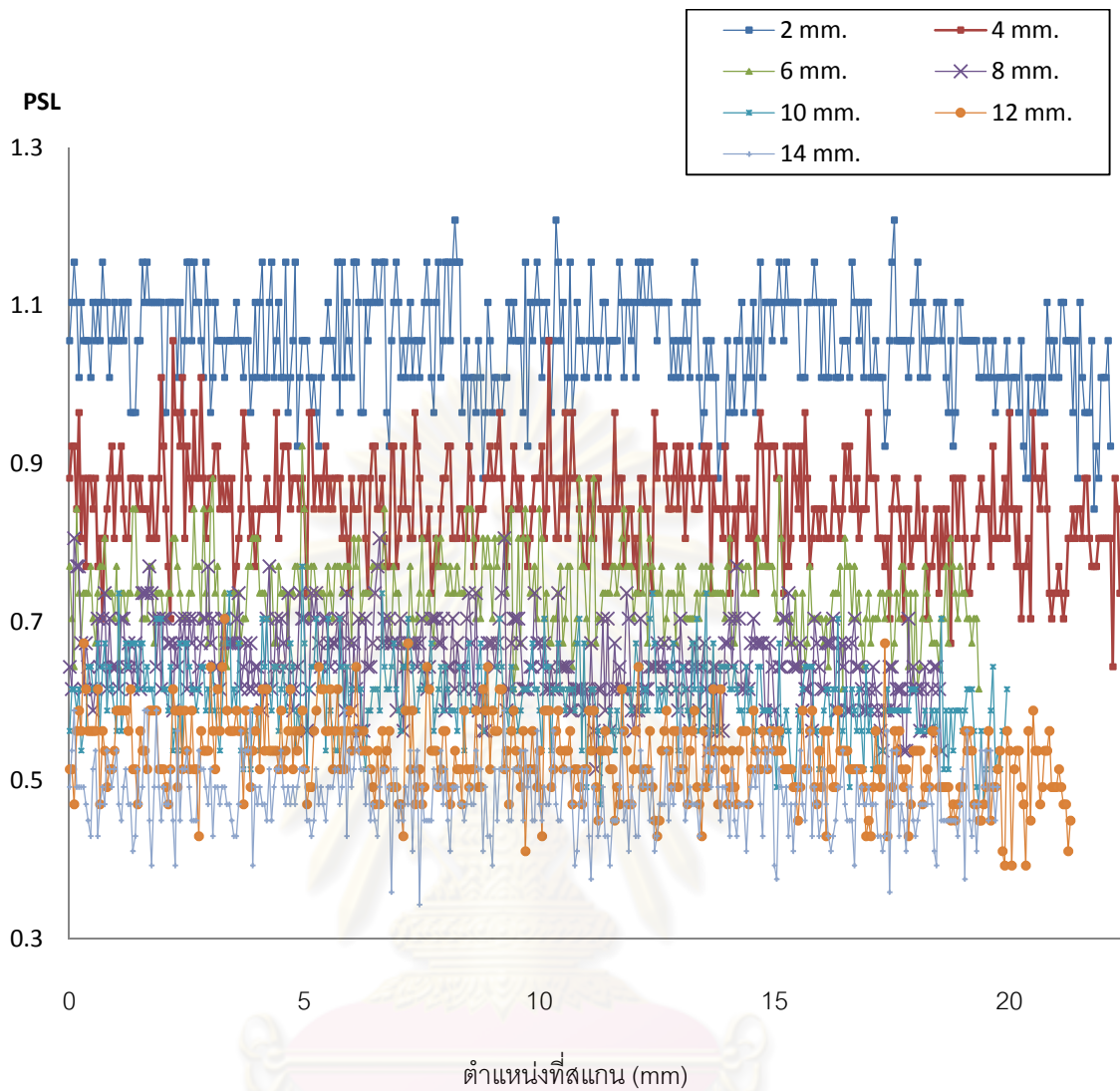
ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 10 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 9



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 12 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 10



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันได หน้า 14 มิลลิเมตร ในตำแหน่งที่ 11

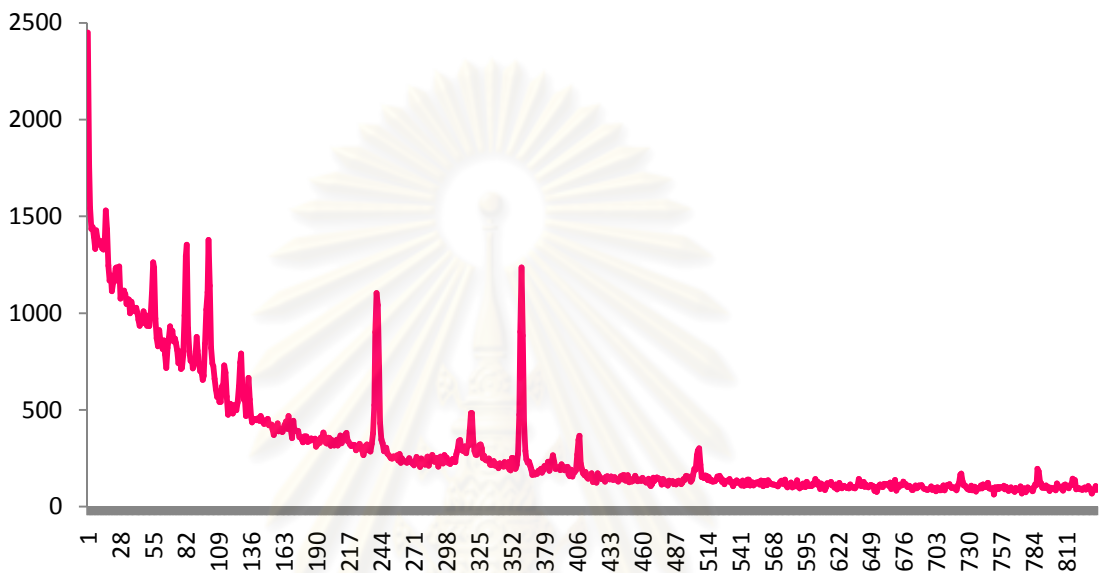


ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่า PSL ของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแบบชั้นบันไดในแต่ละตำแหน่งของความหนาตั้งแต่ 2-14 มิลลิเมตร

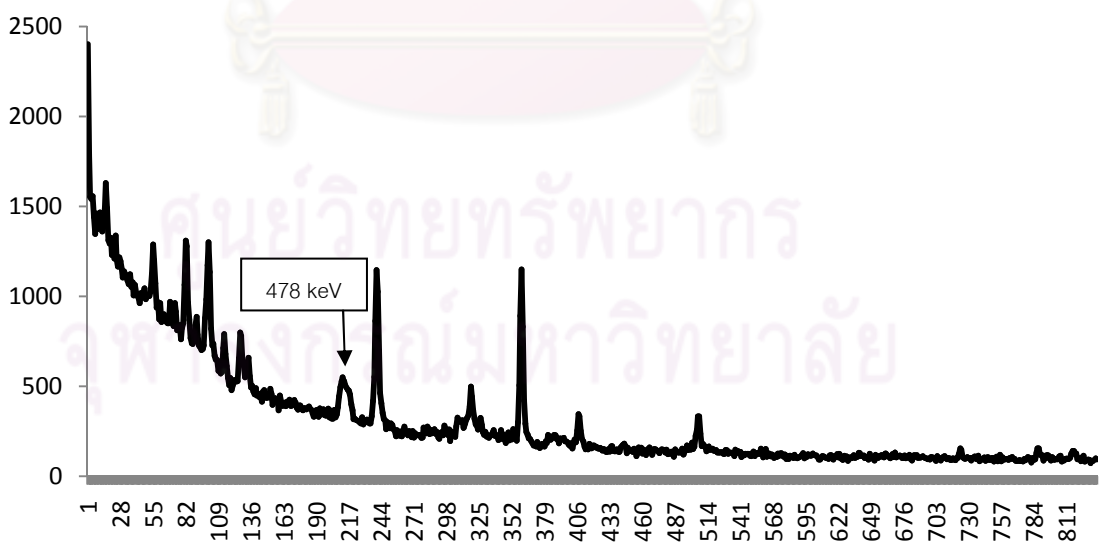
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5 การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

จากการทดลองนับวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเมื่อไม่มีชิ้นงานและมีชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) scintillation สามารถบันทึกสเปกตรัมของรังสีแกมมาได้ตามรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่เหมือนกัน



ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน<sup>241</sup>Am/Be

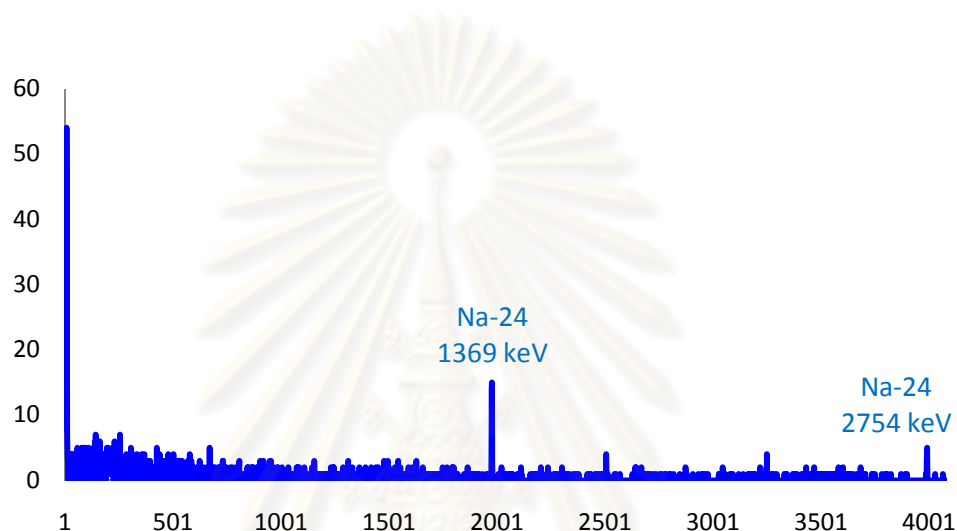


ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการใช้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้กำบังรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอน<sup>241</sup>Am/Be



#### 4.6 การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

จากการวิเคราะห์รังสีแกมมาของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผ่านการอบนิวตรอน หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงก่อกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activated Analysis, NAA) สามารถบันทึกสเปกตรัมของรังสีแกมมาได้ตามรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ซึ่งพบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่มีพีครังสีแกมมาขนาดเล็กเกิดขึ้นที่พลังงาน 1369 keV และ 2754 keV ซึ่งเป็นพลังงานของรังสีแกมมาของโซเดียม-24 ( $\text{Na-24}$ )



ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน  
ทันทีด้วยวิธี NAA



ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน  
หลังจากทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี NAA

## บทที่ 5

### อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 อภิปรายผลการวิจัย

##### 5.1.1 การหาสัดส่วนของยางที่เหมาะสมในการกำบังนิวตรอน

จากผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนของยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ในอัตราส่วนต่างๆมีความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนใกล้เคียงกัน แม้ว่าโครงสร้างทางเคมีของยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ จะมีความแตกต่างกัน คือ ยางพาราธรรมชาติประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว และยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ประกอบด้วย Butadiene ( $CH_2=CH-CH=CH_2$ ) 75 % และ styrene ( $CH_2=CHC_6H_5$ ) 25% แต่ก็มีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยอะตอมของ คาร์บอน และไฮโดรเจน เช่นเดียวกัน แม้ว่ายางสังเคราะห์เอสปีอาร์จะมีจำนวนอะตอมของ คาร์บอน และไฮโดรเจนที่มากกว่ายางพาราธรรมชาติ ดังนั้นในการเลือกสัดส่วนของยางของน้ำยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ที่จะนำไปใช้ในการกำบังรังสีนิวตรอนจึงสามารถนำไปใช้ได้ในทุกๆสัดส่วน

##### 5.1.2 การหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม

เมื่อสามารถเลือกใช้สัดส่วนของยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ในการกำบังนิวตรอนในอัตราส่วนใดก็ได้ ดังนั้นในการหาวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่เหมาะสมจึงเลือก อัตราส่วนของยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วน 50:50 ให้เป็นตัวแปรคงที่ในการนำมาขึ้นรูปร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนชนิดต่างๆ ได้แก่ กรดบอริกชนิดผง ผงโบรอน ผงแคดเมียม และ สารละลายแคดเมียมในเตรท เพื่อนำมาหาวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน จากผลการวิจัยได้กำหนดให้ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปร่วมกับวัสดุแต่ละชนิดเป็นชิ้นงาน T1, T2, T3 ถึง T32 โดยชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปยางร่วมกับกรดบอริกชนิดผงจะใช้กรดบอริกปริมาณ 1 กรัมต่ออย่างผสมระหว่างยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ 25 มิลลิลิตร เนื่องจากเป็นปริมาณกรดบอริกที่มากที่สุดที่ทำให้ไม่ทำให้น้ำยางจับตัวกันเป็นก้อนและมีความหนืดสูงจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ และเมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณของโบรอนซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าภาคตัดขวางภาครวม (Total cross section) สูง ที่มีอยู่ในกรดบอริกสามารถคำนวณได้ว่า กรดบอริก( $H_3BO_3$ ) 1 กรัม ประกอบด้วย โบรอนปริมาณ 0.175 กรัม (ภาคผนวก ข) ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนตัวอื่นๆที่มีปริมาณเท่ากัน

ได้แก่ ผงโบรอน และแคดเมียม ในรูปของ ผงแคดเมียม และสารละลายแคดเมียมไนเตรท และทำการแบ่งอัตราส่วนของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนทั้ง 4 ชนิดนี้ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ส่วนวัสดุดูดกลืนนิวตรอนตัวอื่นๆที่มีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนสูง เช่น แกโดลิเนียม และ ลิเทียม ไม่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้แม้ว่าจะมีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนสูงกว่า โบรอน และ แคดเมียม แต่เนื่องจากมีราคาที่สูงมากหากนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนอาจทำให้มีความไม่คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการขึ้นรูปชิ้นงานทั้งหมดพบว่าชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนชนิด สารละลายแคดเมียมไนเตรทไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเป็นสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงจึงทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนและเสียสภาพจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ ส่วนชิ้นงานอื่นๆยังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ตามปกติ

จากผลการวิจัยการนำชิ้นงานมากำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิด พบว่าชิ้นงานที่ T3 และ T4 เป็นชิ้นงานที่สามารถลดจำนวนนับรังสีนิวตรอนให้เหลือน้อยที่สุด และมีค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ชิ้นงานที่ T11, T12 ส่วนชิ้นงานอื่นๆ มีค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าที่น้อยกว่าชิ้นงานดังกล่าวข้างต้น ซึ่งการที่ชิ้นงาน T3, T4 ที่ได้จากการขึ้นรูปของยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ร่วมกับกรดบอริกชนิดผง มีค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนได้มากที่สุดเนื่องจากมีองค์ประกอบของโบรอนอยู่ซึ่งโบรอนเป็นวัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่มีค่าภาคตัดขวางจุลภาครวมอยู่ในช่วงกว้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือสามารถดูดกลืนรังสีนิวตรอนได้ตั้งแต่ช่วงของเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) จนถึงช่วงของนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) แม้ว่าจะมีค่าสูงเพียงในช่วงของเทอร์มัลนิวตรอนก็ตามแต่ก็ยังสามารถดูดกลืนนิวตรอนเร็วได้บ้างแม้จะมีค่าไม่สูงนัก นอกจากนั้นในกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) ยังมีองค์ประกอบของอะตอม ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนร่วมด้วย ซึ่งเป็นอะตอมที่มีค่าภาคตัดขวางการกระเจิง (Scattering cross section;  $\sigma_s$ ) สูง ทำให้สามารถลดพลังงานของนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดนิวตรอนให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนที่สามารถถูกดูดกลืนได้ดีด้วยโบรอนที่เป็นองค์ประกอบของกรดบอริกอีกทางหนึ่ง จึงเป็นเหตุผลที่ว่าเมื่อเปรียบเทียบวัสดุดูดกลืนนิวตรอนชนิด กรดบอริก และ ผงโบรอน ที่มีจำนวนอะตอมของโบรอนที่เท่ากันแล้ว ทำให้กรดบอริกมีความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีกว่า และทำให้ชิ้นงาน T11, T12 ที่ประกอบด้วยตัวดูดนิวตรอนชนิด กรดบอริกร่วมกับผงโบรอน สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีกว่าชิ้นงาน T5, T6 ที่มีผงโบรอนเป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนเพียงชนิดเดียว สำหรับชิ้นงานที่มีผงแคดเมียมเป็นส่วนประกอบที่ใช้เป็นตัว

ดูดกลืนนิวตรอนจากผลการวิจัยพบว่ามีความการลดทอนรังสีนิวตรอนที่ต่ำกว่าซึ่งงานที่มีส่วนประกอบของโบรอนแม้ว่าแคดเมียมจะมีค่าภาคตัดขวางต่อรังสีนิวตรอนสูงกว่าโบรอนแต่เนื่องจากแคดเมียมเป็นโลหะหนักจึงไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงทำให้การกระจายตัวของแคดเมียมได้ไม่ดีนักในน้ำยางผสมเหล่านี้จึงไม่สามารถดูดกลืนนิวตรอนจากต้นกำเนิดทั่วบริเวณซึ่งงานอย่างสม่ำเสมอได้นอกจากนั้นแคดเมียมยังสามารถดูดกลืนนิวตรอนในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนและอีพิเทอร์มัลนิวตรอนเท่านั้นแต่รังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{241}\text{Am/Be}$  มีนิวตรอนในช่วงของนิวตรอนเร็วรวมอยู่ด้วยทำให้การลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดของซึ่งงานนี้มีค่าต่ำกว่าซึ่งงานที่มีโบรอนเป็นส่วนประกอบเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงเลือกตัวดูดกลืนนิวตรอนเช่นเดียวกับซึ่งงาน T3, T4 และ T11, T12 ได้แก่ กรดบอริกชนิดผง และ กรดบอริกผสมกับผงโบรอน ตามลำดับ

เมื่อทำการขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนผสมของวัสดุดูดกลืนนิวตรอน ได้แก่ กรดบอริกชนิดผงและกรดบอริกผสมกับผงโบรอนร่วมกับน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ เป็นยางคงรูปและนำไปทดสอบคุณสมบัติของซึ่งงานเหล่านี้ โดยทำการส่งซึ่งงานตัวอย่างไปทดสอบที่ส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของซึ่งงานเกี่ยวกับ ความแข็ง (Shore A), ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa), ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa), ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa), การต้านแรงดึง (MPa), ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%), การฉีกขาด (N/mm) ทั้งในสภาวะที่บ่มเร่งและไม่ได้บ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งการบ่มเร่งด้วยความร้อนนี้เพื่อแทนสภาวะที่เสมือนว่าซึ่งงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากผลการทดสอบคุณสมบัติของซึ่งงานเหล่านี้ พบว่าซึ่งงานที่มีความแข็งมากที่สุดได้แก่ซึ่งงานที่มีสัดส่วนของยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ (SBR) มากที่สุดเนื่องจากสายโมเลกุลของยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ไม่สามารถเกิดการตกลึกได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีความยืดหยุ่นต่ำและมีความแข็งค่อนข้างสูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบซึ่งงานระหว่างซึ่งงานที่มีกรดบอริก และกรดบอริกผสมกับผงโบรอนเป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนพบว่าซึ่งงานที่ประกอบด้วยกรดบอริกผสมกับผงโบรอนมีความแข็งมากกว่าซึ่งงานที่ประกอบด้วยตัวดูดกลืนนิวตรอนชนิดกรดบอริกเพียงอย่างเดียวเนื่องจากความเป็นกรดในกรดบอริกทำให้น้ำยางพาราธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพและมีคุณสมบัติของความแข็งแรงที่ด้อยลง

ดังนั้นเมื่อทำการขึ้นรูปของยางผสมทั้งสองประเภทร่วมกับตัวดักคลื่นนิวตรอนที่มีกรดบอริกเป็นส่วนประกอบอยู่มากจะทำให้ยางเกิดความเสื่อมได้มากกว่าชิ้นงานที่มีกรดบอริกเป็นส่วนประกอบในปริมาณที่น้อย เมื่อพิจารณาค่าการต้านแรงดึง (MPa), การทนต่อแรงความทนต่อแรงยืดจนขาด (%), การฉีกขาด (N/mm) พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริกชนิดผงผสมกับผงโบรอน มีค่าเหล่านี้สูงที่สุด เนื่องจากมีองค์ประกอบของยางพาราธรรมชาติที่สูงที่สุดซึ่งโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากและยังทำให้มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

เหตุผลที่ต้องใช้ยางคงรูปที่มีการผสมระหว่างน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ เนื่องจากยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ สามารถทนต่อความเป็นกรดของกรดบอริกได้ดีกว่ายางพาราธรรมชาตินอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติที่อ่อนกว่าแต่ไม่มีความยืดหยุ่น ซึ่งการผสมยางพาราธรรมชาติเข้าเพิ่มเข้าไปจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานให้มีความยืดหยุ่นและต้านต่อแรงดึง ทนทานต่อแรงยืด รวมทั้งทนต่อการฉีกขาด เพิ่มขึ้น ดังนั้นหากใช้ยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในการขึ้นรูปชิ้นงานเพียงอย่างเดียวก็จะทำให้ชิ้นงานมีแต่ความแข็งไม่มีความยืดหยุ่นเท่าที่ควร และถ้าใช้ยางพาราธรรมชาติเพียงอย่างเดียวจะทำให้การทนต่อสารเคมีและกรดได้น้อย นอกจากนั้นยังมีเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วยเนื่องจาก แม้วางสังเคราะห์เอสปีอาร์จะมีราคาสูงแต่ก็มีราคาค่อนข้างคงที่และมีความผันผวนน้อย และการนำยางพาราธรรมชาติมาใช้ก็เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางพาราที่สามารถผลิตได้มากในหลายพื้นที่ของประเทศไทย

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วชิ้นงานที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่อาจนำมาดัดแปลงเป็นเสื้อกำบังรังสีนิวตรอนสำหรับสวมใส่เพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานที่ต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ได้แก่ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริกชนิดผง 4 phr ผสมกับผงโบรอน 0.7 phr ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงานในสูตรนี้ไปทำการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการกำบังและลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี



### 5.1.3 การลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้

จากผลการวิจัยเมื่อนำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้มาทำการทดลองกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี  $^{241}\text{Am/Be}$  ที่มีอัตราการการปลดปล่อยรังสี  $3.08 \times 10^5$  นิวตรอนต่อวินาที โดยทำการเพิ่มจำนวนชิ้นงานหรือความหนาของชิ้นงานในการกำบังรังสีเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี ซึ่งต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนนี้ประกอบด้วย เทอร์มัลนิวตรอน อีพิเทอร์มัลนิวตรอน และนิวตรอนเร็ว เมื่อพิจารณารังสีนิวตรอนโดยรวมทั้ง 3 ชนิดนี้ พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนนับรังสีนิวตรอนมีค่าลดลงในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล(Exponential) เนื่องจากเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้มีทั้งตัวหน่วงความเร็วนิวตรอนอันได้แก่ ยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์และมีปริมาณของวัสดุดูดกลืนนิวตรอน ได้แก่ กรดบอริกและผงโบรอนเพิ่มมากขึ้นตามส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนสูงขึ้น วัสดุเหล่านี้จึงทำอันตรกิริยาต่อนิวตรอนเพื่อดูดกลืนนิวตรอนได้มากขึ้น ซึ่งผลการลดลงของจำนวนนับรังสีนิวตรอนนี้สอดคล้องกับการลดลงของรังสีนิวตรอนตามทฤษฎี[8] และสามารถเขียนเป็นสมการคือ  $y = 32735e^{-0.06x}$  และมีค่า  $R^2 = 0.966$  ดังกราฟในรูปที่ 4.5 รวมทั้งเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นในลักษณะ ลอการิทึมดังแสดงในกราฟของรูปที่ 4.6 โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์คือ  $y = 21.21\ln(x) + 15.64$  และมีค่า  $R^2 = 0.995$  เมื่อ ค่า  $y$  และ  $x$  หมายถึง ร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดและความหนาของชิ้นงาน ตามลำดับ จากกราฟสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานจนถึงที่ระดับความหนา 16 มม. เป็นต้นไป จนถึงที่ระดับความหนา 20 มม. จำนวนนับรังสีมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบมีค่าคงที่เนื่องจากที่ความหนา 16 มม.(มีการลดทอนรังสีนิวตรอนร้อยละ 75.16) รังสีนิวตรอนถูกกำบังไว้ได้เกือบหมดแล้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานมากกว่า 16 มม. ก็อาจไม่ได้ทำให้มีความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีหรือการกำบังรังสีนิวตรอนเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มความหนาของชิ้นงานในการนำไปทำเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมากไปกว่านี้อาจทำให้เกิดความสิ้นเปลืองโดยไม่คุ้มค่า เช่นเดียวกันกับเมื่อพิจารณาเพียงเทอร์มัลนิวตรอนและอีพิเทอร์มัลนิวตรอน ก็ให้ผลที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนนับรังสีมีค่าลดลงแบบเอกโปเนนเชียล ที่มีสมการคือ



$y = 30162e^{-0.14x}$  และ  $R^2 = 0.977$  ดังกราฟรูปที่ 4.5 และทำให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นตามและเริ่มมีค่าคงที่เมื่อมีความหนาของชิ้นงาน 16 มม. โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนดังแสดงในกราฟของรูปที่ 4.6 คือ  $y = 26.12\ln(x) + 19.15$  และมีค่า  $R^2 = 0.988$  ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนเฉพาะในย่านของ เทอร์มัลนิวตรอนและอิพิเทอร์มัลนิวตรอนที่มีค่าร้อยละ 93.75 เปรียบเทียบกับค่าร้อยละการลดรังสีนิวตรอนทั้งหมดจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ประกอบด้วย เทอร์มัลนิวตรอน อิพิเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนเร็วซึ่งมีค่าร้อยละ 75.16 พบว่า เฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนและอิพิเทอร์มัลนิวตรอนถูกลดทอนในวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีความหนา 16 มม. ได้ดีกว่าค่าการลดทอนจากต้นกำเนิดรังสีทั้งหมดเนื่องจากวัสดุดูดกลืนนิวตรอนของชิ้นงานที่ประกอบด้วยโบรอน (B-10, B-11) ในกรดบอริกและผงโบรอนมีค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนนิวตรอนในย่านของเทอร์มัลนิวตรอนและอิพิเทอร์มัลนิวตรอน ( $B-10 = 532 \text{ cm}^{-1}$ ,  $B-11 = 0.0006 \text{ cm}^{-1}$ ) สูงกว่าในย่านของนิวตรอนเร็ว ( $B-10 = 0.026 \text{ cm}^{-1}$ ,  $B-11 = 0.00 \text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนต้องถูกหน่วงความเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนด้วยวัสดุของยางในชิ้นงานก่อนจึงจะสามารถทำอันตรกิริยากับตัวดูดกลืนนิวตรอนได้ดีจึงทำให้เทอร์มัลนิวตรอนที่ได้จากการหน่วงนิวตรอนเร็วบางส่วนทะลุออกจากชิ้นงานโดยไม่ได้ถูกดูดกลืนไว้ในวัสดุดูดกลืนหรือโบรอนทำให้ค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนของเทอร์มัลนิวตรอนและอิพิเทอร์มัลนิวตรอนมีค่าสูงกว่ารังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดที่มีนิวตรอนเร็วรวมอยู่ด้วย

จำนวนนับรังสีจากต้นกำเนิดที่ผ่านออกมาจากแผ่นแคดเมียมจะมีเพียงรังสีนิวตรอนเร็วเพียงเท่านั้นเนื่องจาก ทั้งเทอร์มัลนิวตรอนและอิพิเทอร์มัลนิวตรอนจะถูกดูดกลืนไว้ในแผ่นแคดเมียมจนหมดและไม่สามารถผ่านออกมาได้ ซึ่งจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน<sup>241</sup>Am/Be ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนแคดเมียมได้เท่ากับ 4.37 ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนออกมาจากต้นกำเนิดรังสีว่ามีมากน้อยเพียงใด เมื่อพิจารณาจำนวนนับรังสีนิวตรอนเร็วที่ผ่านออกมาจากชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานจำนวนนับรังสีไม่ได้มีค่าที่ลดลงเลย โดยมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ในทุกๆ ความหนาของชิ้นงานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.5 ซึ่งการที่จำนวนนับรังสีที่ได้ไม่ได้มีค่าลดลงแม้ความหนาของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นก็

ตาม เนื่องจากเมื่อทำการตรวจวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีนิวตรอนชนิด<sup>6</sup>Li Loaded Glass scintillator ซึ่งจะไวต่ออนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟา อิเล็กตรอน หรือ อนุภาคเบต้า โปรตอน เป็นต้น โดยที่ <sup>6</sup>Li จะถูกใช้ในการเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอนุภาคแอลฟา ดังอันตรกิริยา  ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$  แต่เนื่องจากหัววัดรังสีชนิดนี้มีค่าภาคตัดขวางมหภาคกับเทอร์มัลนิวตรอน เท่ากับ  $50.2 \text{ cm}^{-1}$  ในขณะที่ ภาคตัดขวางมหภาคของนิวตรอนเร็วมีค่าเพียง  $0.012 \text{ cm}^{-1}$  เท่านั้นดังนั้นจึงสามารถนับวัดรังสีนิวตรอนในย่านเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีกว่านิวตรอนเร็ว ซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานจะทำให้เนื้อเยื่อพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นและเนื้อเยื่อเหล่านี้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะต่อมของไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำและมีค่าภาคตัดขวางการกระเจิงของนิวตรอนสูง จึงสามารถหน่วงความเร็วของนิวตรอนให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้มากขึ้นและทำให้เกิดอันตรกิริยากับหัววัดรังสีที่มีองค์ประกอบของ<sup>6</sup>Li ได้มากขึ้นจึงมีจำนวนนับรังสีมากขึ้นเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลการวิจัยจำนวนนับรังสีของนิวตรอนเร็วมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามเหตุผลดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เนื่องจากชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมีองค์ประกอบของกรดบอริกและผงโบรอนซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีจึงทำให้เทอร์มัลนิวตรอนบางส่วนที่ได้จากการหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วข้างต้นถูกดูดกลืนไว้ในชิ้นงานวัสดุกำบังนิวตรอนนี้จึงทำให้จำนวนนับรังสีที่ได้ไม่ได้มีค่าที่สูงขึ้น

ดังนั้นชิ้นงานที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมากที่สุดได้แก่ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของน้ำยาพาราธรรมชาติและน้ำยาสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริกชนิดผง 4 phr ผสมกับผงโบรอน 0.7 phr ที่มีความหนา 16 มม.ที่ได้จากการนำชิ้นงานที่มีความหนา 2 มม.มาเรียงซ้อนกัน 8 ชิ้น เพื่อลดปัญหาการตกตะกอนของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนหากมีขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีความหนาต่างๆ

เนื่องจากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตขึ้นมานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปทำเป็นเสื้อกำบังรังสีนิวตรอนเพื่อให้ผู้สวมใส่มีความสะดวกในการปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสี หากมีความหนาที่มากเกินไปอาจทำให้ผู้สวมใส่ขาดความคล่องตัวและต้องแบกรับน้ำหนักของเสื้อกำบังรังสีนิวตรอนนี้มากเกินไปจนความจำเป็น จึงเลือกชิ้นงานที่มีเงื่อนไขเหล่านี้ไปตรวจหา Prompt Gamma Ray และDelayed Gamma Ray จากการนำไปใช้กำบังรังสีนิวตรอน

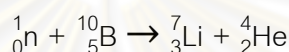
#### 5.1.4 การถ่ายภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยรังสีนิวตรอน

เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน จึงนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน Cf-252 โดยทำการประยุกต์ชิ้นงานให้มีความหนาที่แตกต่างกันโดยออกแบบชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได (Step wedge) โดยนำชิ้นงานมาเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ เพื่อให้สามารถถ่ายภาพชิ้นงานที่มีความหนาต่างๆโดยมีเงื่อนไขเดียวกันทั้งด้าน geometry และ ปริมาณรังสีที่ชิ้นงานได้รับ รวมทั้งทำการถ่ายภาพด้วยรังสีของชิ้นงานปกติรูปวงกลมที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลงใดๆไปพร้อมกับชิ้นงานรูปขั้นบันได จากนั้นจึงนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่า PhotoStimulated Luminescence (PSL) ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์พบว่าในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูปวงกลมที่มีความหนา 2 มม. (ตำแหน่งที่ 1-4) มีค่า PSL ที่ใกล้เคียงกันรวมทั้งตำแหน่งที่ 5 บนชิ้นงานรูปขั้นบันไดที่มีความหนา 2 มม. เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีการกระจายตัวของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนทั้งกรดบอริกและผงโบรอนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน มีเพียงบางจุดเท่านั้นที่นั่นที่นั่นที่มีลักษณะเป็นจุดสีดำอาจเนื่องมาจากฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปชิ้นงานทำให้ในตำแหน่งนั้นมีความหนาของเนื้อยางและวัสดุดูดกลืนนิวตรอนในปริมาณที่น้อยกว่าบริเวณอื่นๆของชิ้นงาน จึงส่งผลให้มีรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีตกลงบนตัวรับภาพมากกว่าจุดอื่นที่มีวัสดุดูดกลืนรังสีที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาค่า PSL ของชิ้นงานรูปขั้นบันไดในตำแหน่งที่ 5-11 พบว่าในแต่ละตำแหน่งมีค่า PSL ที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำชิ้นงานมาเรียงซ้อนกันเพื่อเพิ่มความหนาจะทำให้ชิ้นงานยังมีความสม่ำเสมอในการกำบังรังสีนิวตรอนเช่นเดียวกับที่ใช้เพียงชิ้นเดียว เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของค่า PSL ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานรูปขั้นบันได แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและค่า PSL เฉลี่ย พบว่าได้กราฟความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเอกโปเนนเชียลในกราฟของรูปที่ 4.10 ที่มีสมการ  $y = 1.116e^{-0.06x}$  และ  $R^2 = 0.979$

แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานในช่วงแรกจะทำให้สามารถกำบังรังสีได้เพิ่มขึ้นตามจนถึงช่วงที่มีความหนาเท่ากับ 12 มม. จะทำให้ค่า PSL มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจนเกือบจะคงที่ จึงอาจสรุปได้ว่าถ้าเพิ่มความหนาของชิ้นงานมากขึ้นมากกว่าความหนาเท่ากับ 12 มม. จะไม่ทำให้การกำบังรังสีนิวตรอนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่าใดนัก

### 5.1.5 การตรวจสอบ Prompt Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

การใช้งานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนสิ่ง que ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรก คือ สามารถกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกประการก็คือต้องไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้งานอื่นเนื่องมาจากรังสีชนิดอื่น ๆ เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงนำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมาทำการตรวจหา Prompt Gamma Ray เนื่องจากวัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่ใช้มี โบรอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งตามทฤษฎีเมื่อนิวตรอน ทำอันตรกิริยากับโบรอน-10 ( $^{10}_5\text{B}$ ) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge-particle emission) โดยโบรอนจะเปลี่ยนเป็นลิเทียม ( $^7_3\text{Li}$ ) และปลดปล่อยอนุภาค ( $^4_2\text{He}$ ) ออกมาดังสมการ



ซึ่ง  $^7_3\text{Li}$  จะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited stage) จึงมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 478 keV ออกมาเพื่อให้กลับไปยังในสภาวะพื้น (Ground stage) จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรังสีแกมมาขึ้นเมื่อนำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนไปใช้งาน จากผลการวิจัยเมื่อเปรียบเทียบทั้งจำนวนนับรังสีและสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นเมื่อมีและไม่มีวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้พบว่าเมื่อมีวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนจะทำให้เกิดพีคของสเปกตรัมที่มีพลังงาน 478 keV เกิดเพิ่มขึ้นมาในขณะที่สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ไม่มีส่วนของชิ้นงานวัสดุกำบังนิวตรอนมากำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีจะไม่พบพีคนี้ ซึ่งพีคที่พบเพิ่มขึ้นมานี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างโบรอน-10 และนิวตรอนดังสมการที่แสดงไว้ข้างต้น แต่มีค่านับวัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากโบรอนที่ใช้ในงานวิจัยที่เป็นองค์ประกอบของกรดบอริกและผงโบรอนไม่ใช่ โบรอน-10 ทั้งหมดเพราะในธรรมชาติมี โบรอน-10 เพียงร้อยละ 19.8 [9] เท่านั้นซึ่งมีค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนนิวตรอนในย่านของเทอร์มัลนิวตรอนสูงถึง 3843 barn และ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน ( $\sigma_{n,\gamma}$ ) ที่ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีแกมมา 500 mbarn ในขณะที่ โบรอน-11 ที่ถึงแม้จะมีปริมาณในธรรมชาติมากถึงร้อยละ 80.2 แต่ก็มีค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนนิวตรอนและภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน เพียง 5 mbarn และ 6 mbarn ตามลำดับเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้โอกาสที่จะเกิดรังสีแกมมาจากปฏิกิริยาเหล่านี้มีน้อยมากนอกจากนั้นแล้วทั้ง โบรอน-10 และ โบรอน-11 มีค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน

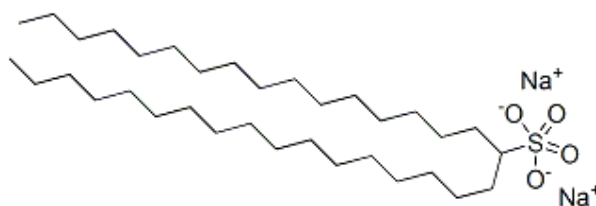
นิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีที่น้อยมากจึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้กัมมันตรังสีแกมมาจากการใช้งานของวัสดุกำบังนี้ในการกำบังรังสีนิวตรอนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

แม้ว่า โบรอน-10 ที่มีอยู่ในธรรมชาติจะมีอยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อยซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดกลืนนิวตรอนที่ไม่สูงนักแต่เนื่องจากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมีองค์ประกอบของ ไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนที่ได้จากเนื้อเยื่ออยู่ด้วยจึงทำให้ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนทั้งหมดมีค่าที่สูงขึ้นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้นี้จึงสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 5.1.6 การตรวจสอบหา Delayed Gamma Ray จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

วัสดุต่างๆเมื่อทำอันตรกิริยากับรังสีนิวตรอนนอกจากจะมีโอกาสเกิด Prompt Gamma Ray แล้วก็อาจทำให้อะตอมหรือธาตุต่างๆเหล่านั้นเปลี่ยนไปเป็นธาตุใหม่ที่ไม่เสถียรและมีการสลายตัวตามค่าครึ่งชีวิตซึ่งมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาที่เรียกว่า Delayed Gamma Ray ออกมาเนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีที่ไม่มีมวลและประจุไฟฟ้าจึงทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงในวัสดุต่างๆที่สูงกว่ารังสีที่เป็นอนุภาค เช่น แอลฟาและโปรตอนดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการตรวจวัดรังสีที่อาจเกิดขึ้นใหม่จากการใช้งานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้จากงานวิจัย แต่เนื่องจากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนี้มีความหนา 16 มม. ซึ่งเป็นความหนาของวัสดุที่สามารถกำบังและดูดกลืนรังสีที่เป็นอนุภาคไว้ได้ทั้งหมด จึงทำการตรวจวัดรังสีแกมมาเท่านั้นซึ่งในส่วนนี้ได้ทำการตรวจวัด Delayed Gamma Ray ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ( $^{252}\text{Cf}$ ) ที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอน  $5.65 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาที พบว่ารังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้เป็นรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1369 keV และ 2754 keV ซึ่งพบว่าเป็นพลังงานของ โซเดียม-24 ( $\text{Na-24}$ ) ซึ่งอาจเป็นองค์ประกอบของสารเคมี Teric A16 A ที่ผสมในสูตรของน้ำยาฆ่าเชื้อสำหรับหล่อเบ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสารเคมีชนิดนี้มีส่วนประกอบของ Cetearyl Alcohol (and) Sodium Cetearyl Sulfate ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีโซเดียมอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลโดยที่สารเคมีชนิดนี้ใช้เพื่อทำให้อิมัลชันในน้ำยาฆ่าเชื้อมีความคงตัวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำยาฆ่าเชื้อธรรมชาติ แต่เนื่องจากในน้ำยาฆ่าเชื้อธรรมชาติสำหรับหล่อเบ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณของ Teric A16 A อยู่เพียง 10% เท่านั้นจึงทำให้มีจำนวนนับของรังสีแกมมานี้ไม่สูงมากนักเพียง 15 และ 5 จำนวนนับรังสีในระยะเวลา 10 นาที เท่านั้น และมีค่าครึ่งชีวิตที่ค่อนข้างสั้นคือ 15 ชั่วโมง





ภาพที่ 5.1 โครงสร้างทางเคมีของ Cetearyl Alcohol (and) Sodium Cetearyl Sulfate

## 5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ได้จากขึ้นรูปด้วยน้ำยาพาราธรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์และน้ำยาสังเคราะห์ไฮสปีอาร์ ในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริก ชนิดผง 4 phr ผสมกับผงโบรอน 0.7 phr โดยใช้วิธีการผสมส่วนประกอบทั้งหมดด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer ที่ความเร็ว 450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และเทลงบนแบบพิมพ์แก้วที่มีความหนา 2 มม. จากการวิจัยพบว่าความหนาของชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนมีความสัมพันธ์ต่อจำนวนนับรังสีที่ได้จากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน โดยเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนนับรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีมีค่าลดลงแบบเอกโปเนนเชียลดังสมการ  $y = 32735e^{-0.06x}$  และมีค่า  $R^2 = 0.966$  และเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าร้อยละของการลดทอนรังสีนิวตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะลอการิทึม ดังสมการ  $y = 21.21\ln(x) + 15.64$  และมีค่า  $R^2 = 0.995$  โดยความหนาที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุสำหรับทำเสื้อกำบังรังสีนิวตรอนคือที่ความหนา 16 มม.ที่ได้จากการนำชิ้นงานที่มีความหนา 2 มม.มาเรียงซ้อนกัน 8 ชิ้น ซึ่งมีค่าของการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี ร้อยละ 75.16 และสามารถคำนวณหาค่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic Cross Section;) จากการทดลองได้เท่ากับ  $0.8705 \text{ cm}^{-1}$  และมีค่า HVL ประมาณ 0.8 ซม. เมื่อพิจารณาเฉพาะรังสีนิวตรอนในย่าน เทอร์มัลนิวตรอนและอีพิเทอร์มัลนิวตรอน เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนนับรังสีนิวตรอนเหล่านี้มีค่าลดลงแบบเอกโปเนนเชียลดังสมการ  $y = 30162e^{-0.14x}$  และ  $R^2 = 0.977$  นอกจากนั้นยังทำให้มีค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนมีค่าที่เพิ่มขึ้นในลักษณะลอการิทึม ดังสมการ  $y = 26.12\ln(x) + 19.15$  และมีค่า  $R^2 = 0.988$  และที่ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มม.มีค่าร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอนเท่ากับ 93.75 ค่าภาคตัดขวางมหภาคคือ  $1.7332 \text{ cm}^{-1}$  และมีค่า HVL 0.4 ซม. ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้นี้สามารถกำบังรังสีนิวตรอนในย่านพลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนและอีพิเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีกว่ารังสีนิวตรอนทั้งหมดจากต้นกำเนิดรังสีที่มีนิวตรอนเร็วเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย



สำหรับภาพที่ถ่ายขึ้นงานด้วยรังสีนิวตรอนมีค่า PhotoStimulated Luminescence (PSL) ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนี้มากำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าทำให้เกิดรังสีแกมมาพลังงาน 478 keV ขึ้นเพียงเล็กน้อย จากการใช้งานชิ้นงานนี้เนื่องจากอันตรกิริยาของโบรอน-10 กับนิวตรอน นอกจากนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) พบว่ามีรังสีแกมมาของ โซเดียม-24 (Na-24) จากส่วนประกอบของสารเคมี Teric A 16 A เกิดขึ้นเล็กน้อยซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากรังสีพื้นหลัง (Background) ที่มีตามธรรมชาติ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุดูดกลืนนิวตรอนที่เลือกใช้ในการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนคือ กรดบอริก และผงโบรอน ซึ่งมีองค์ประกอบของโบรอนอยู่แต่เนื่องจาก โบรอน-10 (Boron-10) ที่สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีมีอยู่ในธรรมชาติเพียงเล็กน้อย จึงอาจใช้โบรอนที่เป็น Enriched Boron-10 เพื่อให้วัสดุดูดกลืนนิวตรอนมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
2. ควรทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอนตัวอื่นที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนนิวตรอนที่ดีร่วมด้วย เช่น โบรอนคาร์ไบด์ ( $B_4C$ )
3. ควรทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของกรดบอริกและผงโบรอนที่สามารถเติมเข้าไปในน้ำยางผสมระหว่าง ยางพาราธรรมชาติและยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ว่าสามารถใช้ปริมาณที่มากที่สุดได้เท่าใดที่ยังทำให้สามารถขึ้นรูปยางให้เป็นแผ่นได้และมีสารชนิดใดบ้างที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของยางที่มีองค์ประกอบของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนให้มีความแข็งแรงและคงทนในการใช้งานมากยิ่งขึ้น
4. ควรศึกษาวิธีการขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนให้มีการกระจายตัวของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนอย่างสม่ำเสมอในชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ

## รายการอ้างอิง

- [1] Gwaily, S.E, Badawy,M.M, Hassan, H.H, Madani,M. Natural rubber composites as thermal neutron radiation Shields I. B4C/NR composites. Polymer Testing 21 (2002) :129-133
- [2] Gwaily, S.E, Badawy,M.M, Hassan, H.H, Madani,M. Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields II — H3BO3/NR composites. Polymer Testing 21 (2002) :513-517
- [3] สรวาภูมิ พรหมเมศร. วัสดุกำบังนิวตรอนซ้ำที่สามารถปั้นขึ้นรูปได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [4] สรวาภูมิ ใจเย็น. การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [5] Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-V (available from and maintained by the National Nuclear Data Center of Brookhaven National Laboratory).
- [6] Knoll,G. Radiation Detection and Measurement. Toronto : John Wiley & Sons, Inc, 1979
- [7] พงษ์ธร แซ่อูย. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548.
- [8] Kenneth Shultis,J and Faw,R. Radiation Shielding. Illinois: American Nuclear Society.Inc, 2000 .
- [9] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,2545.
- [10] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ลิเทียม โบรอน แคดเมียม แกดโดลิเนียม .[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org>. (26 กันยายน 2552).



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คุณสมบัติทั่วไปของธาตุที่มีค่าการดูดกลืนนิวตรอนสูง

(High neutron absorption cross section)

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทั่วไปของ ลิเทียม[10]

ทั่วไป						
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ลิเทียม, Li, 3					
อนุกรมเคมี	โลหะอัลคาไล					
หมู่, คาบ, บล็อก	1, 2, s					
ลักษณะ	สีขาวเงินเทา 					
มวลอะตอม	6.941 (2) กรัม/โมล					
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	$1s^2 2s^1$					
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 1					
คุณสมบัติทางกายภาพ						
สถานะ	ของแข็ง					
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	0.534 ก./ซม. <sup>3</sup>					
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	0.512 ก./ซม. <sup>3</sup>					
จุดหลอมเหลว	453.69 K					
จุดเดือด	1615 K(1342 °C)					
ความร้อนของการหลอมเหลว	3.00 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	147.1 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.860 J/(mol·K)					
ความดันไอ						
<i>P</i> /Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
ที่ <i>T</i> K	797	885	995	1144	1337	1610
โครงสร้างผลึก	ร่างลูกบาศก์รวมศูนย์					
สถานะออกซิเดชัน	1					

อิเล็กโตรเนกาติวิตี	0.98 (พอลิงสเกล)				
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 520.2 กิโลจูล/โมล				
	ระดับที่ 2: 7298.1 กิโลจูล/โมล				
	ระดับที่ 3: 11815.0 กิโลจูล/โมล				
รัศมีอะตอม	145 pm				
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	167 pm				
รัศมีโควาเลนต์	134 pm				
รัศมีวานเดอร์วาลส์	182 pm				
<b>อื่น ๆ</b>					
การจัดเรียงทางแม่เหล็ก	ไม่เป็นแม่เหล็ก				
ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 92.8 nΩ·m				
การนำความร้อน	(300 K) 84.8 W/(m·K)				
การขยายตัวจากความร้อน	(25 °C) 46 μm/(m·K)				
ความเร็วเสียง (ท่อนาง)	(20 °C) 6000 m/s				
โมดูลัสของยังก์	4.9 GPa				
โมดูลัสของแรงเฉือน	4.2 GPa				
โมดูลัสของแรงบีบอัด	11 GPa				
ความแข็งโมห์ส	0.6				
เลขทะเบียน CAS	7439-93-2				
<b>ไอโซโทปที่น่าสนใจ</b>					
iso	NA	ครึ่งชีวิต	DM	DE (MeV)	DP
<sup>6</sup> Li	7.5%				Li เสถียร โดยมี 3 นิวตรอน
<sup>7</sup> Li	7.5%				Li เสถียร โดยมี 3 นิวตรอน

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทั่วไปของ โบรอน[10]

ทั่วไป						
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข			โบรอน, B, 5			
อนุกรมเคมี			ธาตุกึ่งโลหะ			
หมู่, คาบ, บล็อก			13, 2, p			
ลักษณะ			ดำน้ำตาล 			
มวลอะตอม			10.811(7) กรัม/โมล			
การจัดเรียงอิเล็กตรอน			$1s^2 2s^2 2p^1$			
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน			2, 3			
คุณสมบัติทางกายภาพ						
สถานะ			ของแข็ง			
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)			2.34 ก./ซม. <sup>3</sup>			
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.			2.08 ก./ซม. <sup>3</sup>			
จุดหลอมเหลว			2349 K(2076 °C)			
จุดเดือด			4200 K(3927 °C)			
ความร้อนของการหลอมเหลว			50.2 กิโลจูล/โมล			
ความร้อนของการกลายเป็นไอ			480 กิโลจูล/โมล			
ความร้อนจำเพาะ			(25 °C) 11.087 J/(mol·K)			
ความดันไอ						
P/Pa	1	10	100	1 k	10 k	100
ที่ TK	2348	2562	2822	3141	3545	4072

คุณสมบัติของอะตอม					
โครงสร้างผลึก			rhombohedral		
สถานะออกซิเดชัน			3		
อิเล็กโตรเนกาติวิตี			2.04 (พอลิงสเกล)		
พลังงานไอออไนเซชัน (เพิ่มเติม)			ระดับที่ 1: 800.6 กิโลจูล/โมล		
			ระดับที่ 2: 2427.1 กิโลจูล/โมล		
			ระดับที่ 3: 3659.7 กิโลจูล/โมล		
รัศมีอะตอม			85 pm		
รัศมีอะตอม (คำนวณ)			87 pm		
รัศมีโควาเลนต์			82 pm		
อื่น ๆ					
การจัดเรียงทางแม่เหล็ก			nonmagnetic		
ความต้านทานไฟฟ้า			(20 °C) 150		
การนำความร้อน			(300 K) 27.4		
การขยายตัวจากความร้อน			(25 °C) 5-7		
ความเร็วเสียง (ท่อนบาง)			(20 °C) 16200		
โมดูลัสของแรงบีบอัด			320 GPa		
ความแข็งโมห์ส			9.3		
ความแข็งวิกเกอร์ส			49000 MPa		
เลขทะเบียน CAS			7440-42-8		
ไอโซโทปที่น่าสนใจ					
iso	NA	ครึ่งชีวิต	DM	DE	DP
<sup>10</sup> B	19.9%*	B เสถียร โดยมี 5 นิวตรอน			
<sup>11</sup> B	80.1%*	B เสถียร โดยมี 6 นิวตรอน			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติทั่วไปของ แคดเมียม[10]

<b>ทั่วไป</b>						
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	แคดเมียม, Cd, 48					
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน					
หมู่, คาบ, บล็อก	12, 5, d					
ลักษณะ	silvery gray metallic 					
มวลอะตอม	112.411(8) กรัม/โมล					
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>					
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 18, 2					
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>						
สถานะ	ของแข็ง					
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	8.65 ก./ซม. <sup>3</sup>					
ความหนาแน่นของของเหลวที่m.p.	7.996 ก./ซม. <sup>3</sup>					
จุดหลอมเหลว	594.22 K					
จุดเดือด	1040 K(767 °C)					
ความร้อนของการหลอมเหลว	6.21 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	99.87 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.020 J/(mol·K)					
<b>ความดันไอ</b>						
<i>P</i> /Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
ที่ <i>T</i> K	530	583	654	745	867	1040
<b>คุณสมบัติของอะตอม</b>						
โครงสร้างผลึก	hexagonal					
สถานะออกซิเดชัน	2					
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.69 (พอลิงสเกล)					

พลังงานไอออนไนเซชัน	ระดับที่ 1: 867.8 กิโลจูล/โมล				
	ระดับที่ 2: 1631.4 กิโลจูล/				
	ระดับที่ 3: 3616 กิโลจูล/โมล				
รัศมีอะตอม	155 pm				
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	161 pm				
รัศมีโควาเลนต์	148 pm				
รัศมีวานเดอร์วาลส์	158 pm				
<b>อื่น ๆ</b>					
การจัดเรียงทางแม่เหล็ก	no data				
ความต้านทานไฟฟ้า	(22 °C) 72.7 nΩ·m				
การนำความร้อน	(300 K) 96.6 W/(m·K)				
การขยายตัวจากความร้อน	(25 °C) 30.8 μm/(m·K)				
ความเร็วเสียง (ที่อนบาง)	(20 °C) 2310 m/s				
โมดูลัสของยังก์	50 GPa				
โมดูลัสของแรงเฉือน	19 GPa				
โมดูลัสของแรงบีบอัด	42 GPa				
อัตราส่วนปัวซอง	0.30				
ความแข็งโมห์ส	2.0				
ความแข็งบริเนล	203 MPa				
เลขทะเบียน CAS	7440-43-9				
<b>ไอโซโทปที่น่าสนใจ</b>					
iso	NA	ครึ่งชีวิต	DM	DE (MeV)	DP
<sup>106</sup> Cd	1.25%	>2.6×10 <sup>17</sup> y	εε	-	<sup>106</sup> Pd
<sup>108</sup> Cd	0.89%	Cd เสถียร โดยมี 60 นิวตรอน			
<sup>109</sup> Cd	syn	462.6 d	ε	0.214	<sup>109</sup> Ag
<sup>110</sup> Cd	12.49%	Cd เสถียร โดยมี 62 นิวตรอน			
<sup>111</sup> Cd	12.8%	Cd เสถียร โดยมี 63 นิวตรอน			
<sup>112</sup> Cd	24.13%	Cd เสถียร โดยมี 64 นิวตรอน			
<sup>113</sup> Cd	12.22%	7.7 E15 y	β <sup>-</sup>	0.316	<sup>113</sup> In
<sup>113m</sup> Cd	syn	14.1 y	β <sup>-</sup>	0.580	<sup>113</sup> In
			IT	0.264	
<sup>114</sup> Cd	28.73%	Cd เสถียร โดยมี 66 นิวตรอน			
<sup>116</sup> Cd	7.49%	Cd เสถียร โดยมี 68 นิวตรอน			

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติทั่วไปของ แกโดลิเนียม[10]

<b>ทั่วไป</b>						
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	แกโดลิเนียม, Gd, 64					
อนุกรมเคมี	แลนทาไนด์					
หมู่, คาบ, บล็อก	?, 6, f					
ลักษณะ	silvery white 					
มวลอะตอม	157.25 (3) กรัม/โมล					
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Xe] 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>					
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 25, 9, 2					
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>						
สถานะ	ของแข็ง					
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	7.90 ก./ซม. <sup>3</sup>					
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	7.4 ก./ซม. <sup>3</sup>					
จุดหลอมเหลว	1585 K					
จุดเดือด	3546 K(3273 °C)					
ความร้อนของการหลอมเหลว	10.05 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	301.3 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 37.03 J/(mol·K)					
<b>ความดันไอ (calculated)</b>						
<i>P</i> /Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
ที่ <i>T</i> K	1836	2028	2267	2573	2976	3535
<b>คุณสมบัติของอะตอม</b>						
โครงสร้างผลึก	hexagonal					
สถานะออกซิเดชัน	3					

อิเล็กทรอนิกส์	1.20 (พอลิงสเกล)				
พลังงานไอออไนเซชัน (เพิ่มเติม)	ระดับที่ 1: 593.4 กิโลจูล/ ระดับที่ 2: 1170 กิโลจูล/โมล ระดับที่ 3: 1990 กิโลจูล/โมล				
รัศมีอะตอม	180 pm				
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	233 pm				
<b>อื่น ๆ</b>					
การจัดเรียงทางแม่เหล็ก	ferromagnetic				
ความต้านทานไฟฟ้า	(r.t.) ( $\alpha$ , poly)				
การนำความร้อน	(300 K) 10.6 W/(m·K)				
การขยายตัวจากความร้อน	(100 °C) ( $\alpha$ , poly)				
ความเร็วเสียง (ที่อนบาง)	(20 °C) 2680 m/s				
โมดูลัสของยังก์	( $\alpha$ form) 54.8 GPa				
โมดูลัสของแรงเฉือน	( $\alpha$ form) 21.8 GPa				
โมดูลัสของแรงบีบอัด	( $\alpha$ form) 37.9 GPa				
อัตราส่วนนิวตรอน	( $\alpha$ form) 0.259				
ความแข็งวิกเกอร์ส	570 MPa				
เลขทะเบียน CAS	7440-54-2				
<b>ไอโซโทปที่น่าสนใจ</b>					
iso	NA	ครึ่งชีวิต	DM	DE (MeV)	DP
<sup>152</sup> Gd	0.20%	1.08E+14 a	$\alpha$	2.205	<sup>148</sup> Sm
<sup>154</sup> Gd	2.18%	Gd เสถียร โดยมี 90 นิวตรอน			
<sup>155</sup> Gd	14.80%	Gd เสถียร โดยมี 91 นิวตรอน			
<sup>156</sup> Gd	20.47%	Gd เสถียร โดยมี 92 นิวตรอน			
<sup>157</sup> Gd	15.65%	Gd เสถียร โดยมี 93 นิวตรอน			
<sup>158</sup> Gd	24.84%	Gd เสถียร โดยมี 94 นิวตรอน			
<sup>160</sup> Gd	21.86%	1.3E+21 a	$\beta\beta$	no data	<sup>160</sup> Dy





ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การคำนวณปริมาณโบรอนในกรดบอริก

$$\begin{aligned}
 &\text{กรดบอริก (H}_3\text{BO}_3\text{) 1 กรัม} \\
 &\text{มวลโมเลกุล} = 3(1.008)+10.811+3(15.999) \\
 &= 61.81 \\
 &\text{จำนวนโมล} = \frac{1}{61.81} \text{ โมล} \\
 &= 0.162 \text{ โมล} \\
 &\text{จำนวนอะตอมของโบรอน} = \text{โมล} \times \text{เลขอะโวกาโด} \\
 &= 0.162 \times 6.02 \times 10^{23} \\
 &= 9.74 \times 10^{21} \text{ อะตอม} \\
 &\text{มวลโบรอน} = \frac{\text{จำนวนอะตอม} \times \text{เลขอะตอม}}{\text{เลขอะโวกาโด}} \\
 &= \frac{9.74 \times 10^{21} \times 10.811}{6.02 \times 10^{23}} \\
 &= 0.175 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

### การคำนวณปริมาณแคดเมียมในสารละลายแคดเมียมไนเตรท

สารละลายแคดเมียมไนเตรท(CdN<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) 1 มิลลิลิตร มีแคดเมียม 1 มิลลิกรัม  
 ถ้าต้องการแคดเมียม 0.175 กรัม ต้องใช้สารละลายแคดเมียมไนเตรท = 175 มิลลิลิตร

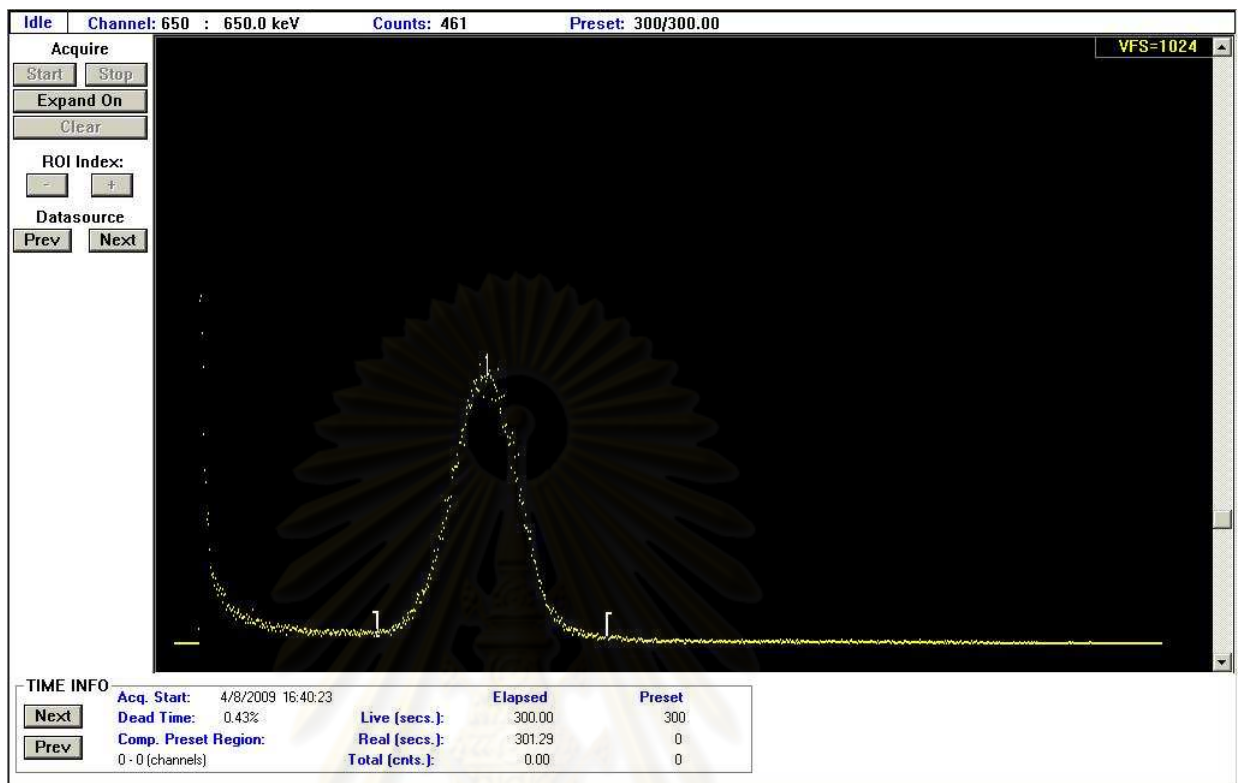
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สเปกตรัมรังสีนิวตรอนที่ได้จากหัววัดรังสีนิวตรอนชนิด  $^6\text{Li}$  Glass scintillator



ภาพที่ ค.1 สเปกตรัมรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี  $^{241}\text{Am/Be}$  ที่ได้จากหัววัดรังสีนิวตรอนชนิด  $^6\text{Li}$  Glass scintillator

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชฎานิชฐ์ จำปี เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือนมกราคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสีเทคนิค) จากภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย