

การใช้โบราณวัตถุเพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

นางสาวศิริกุล กาญจนปฐมพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

UTILIZATION OF BORON OXIDE FOR PRODUCTION OF
NEUTRON SHIELDING MATERIAL

Miss Sirakul Kanchanapatomporn

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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ไบรอนนอกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสี
นิวตรอน

โดย

นางสาวศิริกุล กาญจนปฐมพร

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

ศิริกุล กาญจนปฐมพร : การใช้โบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.
(UTILIZATION OF BORON OXIDE FOR PRODUCTION OF NEUTRON
SHIELDING MATERIAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง,
78 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมของโบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุ
กำบังรังสีนิวตรอน โดยการนำโบรอนออกไซด์ 1, 3 และ 5 phr โดยน้ำหนักของน้ำยางผสมระหว่าง
น้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40
และ 50:50 ร่วมกับสารเสริมแรง คือ ผงเขม่าดำ (N330) 0.5 และ 1 phr โดยน้ำหนักของน้ำยาง
ผสม ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด 15 ซม.x15 ซม.x0.2 ซม. นำไปวัดการลดทอนรังสีนิวตรอน
จากต้นกำเนิดคอเมอริเชียม 241/เบริลเลียม ที่บรรจุในโพลีเอทีลีนทรงกระบอกด้วยหัววัดรังสี
นิวตรอนชนิด ^6Li Glass scintillator

จากผลการวิจัยพบว่าชิ้นงานที่มีความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนมากที่สุดคือ
ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วน 70:30
ผสมกับโบรอนออกไซด์ 3 phr และผงเขม่าดำ 0.5 phr โดยความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสี
นิวตรอนคือ 1.2 เซนติเมตร เกิดจากการเรียงซ้อนชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้น สามารถลดทอนรังสี
นิวตรอนจากต้นกำเนิดได้ 81% มีค่า HVL เท่ากับ 0.6 ซม. และมีค่าภาคตัดขวางมหภาคเท่ากับ
 1.394 ซม.^{-1}

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5370346321 : MAJOR NUCLER TECHNOLOGY

KEYWORDS : BORON / BORON OXIDE / NEUTRON SHIELDING MATERIAL / RUBBER BLEND

SIRAKUL KANCHANAPATOMPORN : UTILIZATION OF BORON OXIDE FOR PRODUCTION OF NEUTRON SHIELDING MATERIAL. ADVISOR : ASST. PROF. DOONYAPONG WONGSAWAENG, Ph.D., 78 pp.

This research aimed to determine the most suitable concentration of boron oxide for production of neutron shielding material. 1, 3 and 5 phr of boron oxide were mixed with natural rubber-styrene butadiene rubber blends of the following ratios: 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50. 0.5 and 1 phr of carbon black (N330) as a strengthening additive was also added. Rectangular specimens were fabricated with dimensions of 15 cmx15 cm with 0.2 cm thickness. Neutron attenuation efficiency was measured using ^6Li glass scintillation neutron detector with Am-241/Be neutron source contained in polyethylene cylinder.

Results revealed that the specimen exhibiting the highest neutron shielding capability composed of rubber blend with 70:30 ratio loaded with 3 phr of boron oxide and 0.5 phr of carbon black. The most suitable thickness for neutron shielding was 1.2 cm, obtained from stacking 6 pieces of the shielding material together. Neutron radiation can be attenuated by 81% from its origins. The HVL of the shielding material was found to be 0.6 cm and the macroscopic cross-section was evaluated to be 1.394 cm^{-1} .

Department : Nuclear Engineer Student's Signature

Field of Study : Nuclear Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอบพระคุณ บุคลากรจากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับน้ำยาง และสมบัติของยางคงรูป

ขอบพระคุณ บริษัท DOW CHEMICAL THAILAND LTD ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยางสังเคราะห์สไตรีนบิวทาไดอีนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี คุณพงษ์ยุทธ ศรีพลอย และคุณชฎานิชฐ์ จำปี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือเกี่ยวกับการวัดรังสีนิวตรอน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนงานวิจัยในการศึกษาครั้งนี้

ขอบพระคุณ ภาควิชาธรณีวิทยาที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องบดตัวอย่างแร่

ขอบพระคุณ คุณอนิรุทธ์ ลดาวัต และคุณกวิน เกิดไพโรจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับรายงานและข้อมูลหลุมเจาะเกลือหินและโพแทชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาวที่เป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเสมอมาจนสามารถสำเร็จการศึกษาได้อย่างลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุกำบังรังสี.....	4
2.2 นิวตรอน	5
2.3 อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร	6
2.4 ภาคตัดขวางนิวตรอน.....	8
2.5 โบรอนออกไซด์.....	13
2.6 ยาง	14
2.7 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	24
2.8 บอราไซด์.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 วัสดุและอุปกรณ์วิจัย	29
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	31

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
4.1 การหาสัดส่วนของยางผสมที่เหมาะสมในการขึ้นรูป	38
4.2 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสม ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ขึ้นรูปได้	39
4.3 การหาปริมาณวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนและปริมาณสารเสริมแรง ที่เหมาะสม	41
4.4 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มี ส่วนประกอบของวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง	43
4.5 การหาความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้.....	46
4.6 การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป	50
4.7 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	52
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล.....	56
5.1 การหาสัดส่วนของยางผสมที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอน	56
5.2 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสม ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ขึ้นรูปได้	56
5.3 การหาปริมาณวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนและปริมาณสารเสริมแรงที่เหมาะสม	56
5.4 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงาน ที่มีส่วนประกอบของวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง.....	58
5.5 การหาความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้.....	58
5.6 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูป	59
5.7 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้	60
5.8 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	63
5.9 การหาปริมาณของแร่บอราไซด์ในเบื้องต้นที่มีในประเทศไทย	64
5.10 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัสดุกำบังรังสีแบ่งตามชนิดของรังสี	5
2.2 การจำแนกนิวตรอนตามพลังงานจลน์.....	6
2.3 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนของวัสดุต่างๆ.....	11
2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูป ระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์.....	21
2.5 ประเภทของผงเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง.....	23
2.6 ลำดับการตกผลึกของสารประกอบหรือแร่เกลือระเหย	26
3.1 อัตราส่วนและปริมาณของน้ำยางพาราธรรมชาติ และน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	31
3.2 ปริมาณของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ ที่ผสมในน้ำยางเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน.....	35
4.1 ผลการขึ้นรูปยางผสม	38
4.2 ผลการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ.....	39
4.3 ค่าภาคตัดขวางของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ.....	39
4.4 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ.....	41
4.5 ผลการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอน และสารเสริมแรง	43
4.6 ค่าภาคตัดขวางของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ.....	45
4.7 ผลการลดทอนรังสีนิวตรอนตามความหนาที่เพิ่มขึ้น	47
4.8 ค่าภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ความหนาต่างๆ.....	48
4.9 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูป เปรียบเทียบในสภาวะปกติกับปมเร่ง	50
4.10 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปเปรียบเทียบ ระหว่างใส่และไม่ใส่ผงเขม่าดำ.....	51
5.1 ปริมาณของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำในชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้	57

ตารางที่	หน้า
5.2 ส่วนประกอบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ดีที่สุด ในงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้.....	60
5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูป ระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้.....	61
5.4 หลุมเจาะที่มีการระบุเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ของแร่บอราไซด์.....	67

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สมบัติการทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ	4
2.2 โครงสร้างของอะตอม	5
2.3 ลำนิวตรอนกระทบเป้า	8
2.4 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกดโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน.....	12
2.5 สูตรโครงสร้างทางธรรมชาติ.....	15
2.6 สูตรโครงสร้างของยางสไตรีนบิวทาไดอีน	17
2.7 สูตรโครงสร้างของยางไนไตรล์.....	18
2.8 สูตรโครงสร้างของยางคลอโรพรีน.....	18
2.9 สูตรโครงสร้างของยางบิวไทล์.....	19
2.10 สูตรโครงสร้างของบิวทาไดอีน.....	19
2.11 สูตรโครงสร้างของยางอีพีดีเอ็ม	20
2.12 สูตรโครงสร้างของยางซิลิโคน.....	20
2.13 ส่วนประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	24
2.14 ส่วนประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	25
2.15 ตัวอย่างวัตถุที่ถูกถ่ายภาพด้วยรังสี.....	25
2.16 ลักษณะของแรบอราไซต์	28
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำการทดลอง	30
3.2 การจัดระบบวัดรังสีนิวตรอน	32
3.3 วิธีทำโบรอนออกไซด์.....	34
4.1 ตัวอย่างของชิ้นงานยางผสม	38
4.2 กราฟแท่งแสดงจำนวนนับรังสีนิวตรอนของยางผสม ในอัตราส่วนต่างๆ.....	40
4.3 กราฟแท่งแสดงค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ	40
4.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์ และผงเขม่าดำที่ขึ้นรูปได้.....	42

ภาพที่	หน้า
4.5	44
4.6	45
4.7	49
4.8	49
4.9	52
4.10	53
4.11	54
4.12	55
5.1	62
5.2	64
5.3	65
5.4	66
ก. 1	73
ก. 2	74
ก. 3	75
ก. 4	76
ก. 5	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โบรอนเป็นธาตุกึ่งโลหะซึ่งนอกจากจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับพืชแล้ว ในด้านอุตสาหกรรมก็ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นการใช้ทำโลหะเจือสำหรับการใช้งานพิเศษ, การใช้โดปสารกึ่งตัวนำ, การใช้ผสมในเชื้อเพลิงขบจรวด, การใช้ผสมในโลหะเจือที่ใช้งาน คุณณภูมิสูงมาก ๆ รวมถึงเส้นใยของโบรอนเมื่อใช้ผสมกับโลหะแล้วจะทำให้โลหะมีความเหนียวขึ้น ในด้านของนิวเคลียร์ โบรอนมีคุณสมบัติในการดูดจับนิวตรอนได้เป็นอย่างดี นักวิทยาศาสตร์จึงใช้โบรอนเป็นหนึ่งในตัวดูดจับนิวตรอนเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาฟิชชันในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือใช้โบรอนเป็นส่วนผสมของฉากรักษาบังรังสีนิวตรอนในกิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกด้วย โดยปกติแล้วจะไม่พบโบรอนในรูปของธาตุ แต่จะพบอยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ เช่น กรดบอริก (H_3BO_3) หรือแร่ในกลุ่มบอเรต เช่น Borax [$Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8(H_2O)$], Ulexite [$NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5(H_2O)$], Colemanite [$CaB_3O_4(OH)_3 \cdot (H_2O)$], Kernite [$Na_2B_4O_6(OH)_3 \cdot 3(H_2O)$] และ Boracite [$Mg_3B_7O_{13}Cl$] [1]

โบรอนออกไซด์ หรือโบรอนไตรออกไซด์ เป็นสารประกอบประเภทออกไซด์ของโบรอน มีสีขาวแข็งเหมือนแก้ว มีสูตรทางเคมีคือ B_2O_3 สามารถเตรียมขึ้นได้เองโดยการให้ความร้อนต่อกรดบอริก (H_3BO_3) มากกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลผลิตสุดท้ายออกมาเป็นโบรอนออกไซด์

ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะทดลองนำโบรอนออกไซด์มาเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยเปรียบเทียบกับรายงานเก่าที่ใช้เพียงกรดบอริก เนื่องจากโบรอนออกไซด์มีปริมาณของโบรอนมากกว่ากรดบอริกคิดเป็น 14% และยังสามารถเตรียมได้ง่าย เพียงให้ความร้อนกับกรดบอริกเท่านั้น

นอกจากนี้ในธรรมชาติเราสามารถพบโบรอนสะสมตัวอยู่ในแร่บอราไซด์ จึงมีแนวคิดที่จะประเมินปริมาณของแร่บอราไซด์ในเบื้องต้นที่มีในประเทศไทยด้วย เพราะจะเห็นได้ว่าในสูตรเคมีของแร่บอราไซด์นั้นมีส่วนประกอบของโบรอนและโบรอนออกไซด์คิดเป็น 19.30% และ 62.15% ตามลำดับ [2] ซึ่งแร่บอราไซด์เป็นแร่หนึ่งในกลุ่มแร่เกลือระเหย (Evaporite minerals) ที่สามารถพบได้ในประเทศไทย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในเบื้องต้นต่องานวิจัยในอนาคต หากมีการนำแร่นี้ออกมาใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อใช้โบรอนออกไซด์ผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. นำโบรอนออกไซด์มาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ที่มีส่วนผสมของน้ำยาฟารราธรรมชาติ น้ำยาสไตรีนบิวทาไดอีน และคาร์บอนแบล็ค
2. ประเมินคุณสมบัติในการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้
3. ศึกษาข้อมูลของแหล่งแร่โพแทชและแร่บอราไซต์ในประเทศไทย พร้อมทั้งประเมินปริมาณของแร่บอราไซต์ที่พบในเบื้องต้น

1.4 แผนการดำเนินงาน

1. ทำการให้ความร้อนกรดบอริก ให้ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นโบรอนออกไซด์
2. นำโบรอนออกไซด์ที่ได้ มาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนผสมของตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน เช่น น้ำยาฟารราธรรมชาติ และน้ำยาสไตรีนบิวทาไดอีน เป็นต้น
3. ประเมินความสามารถของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจาก Am-241/Be หรือต้นกำเนิดอื่นๆ ที่เหมาะสม
4. ศึกษาหาข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวกับแร่บอราไซต์จากรายงานเก่า
5. ประเมินหาปริมาณของแร่บอราไซต์จากข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
6. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่สามารถนำไปใช้งานได้
2. ทราบแหล่งที่มีศักยภาพและปริมาณของแร่บอราไซต์ในประเทศไทยเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 S.E. Gwaily, M.M. Badawy, H.H. Hassan, M. Madani (2002) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Natural rubber composites as thermal neutron radiation Shields I. B₄C/NR composites ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถของ B₄C ที่ผสมอยู่ในยางพาราธรรมชาติ (B₄C :40 HAF/NR) ในอัตราส่วนต่างๆ ในการลดทอนรังสีนิวตรอน พบว่าอัตราส่วนที่ประกอบด้วย B₄C 20 phr ทำให้ได้ค่า linear absorption coefficient ที่สูงที่สุด คือ 0.34 cm และทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส่วนประกอบที่ผลิตได้ร่วมด้วย [3]

1.6.2 S.E. Gwaily, M.M. Badawy, H.H. Hassan, M. Madani (2002) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields II — H₂BO₃/NR composites โดยศึกษา ส่วนผสมวัสดุที่มีส่วนผสมของกรดบอริก (H₂BO₃) กับยางพาราธรรมชาติ (40 phr of HAF carbon black) ในการกำบังเทอร์มินัลนิวตรอน พบว่าที่ส่วนผสมของกรดบอริก 30 phr จะมีค่า total macroscopic cross section สูงที่สุด เท่ากับ 0.29 cm⁻¹ และทำการศึกษากันเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุกำบังรังสีในอัตราส่วนต่างๆผลิตได้ร่วมด้วย ซึ่งพบว่า Thermal oxidative aging มีผลกระทบต่อวัสดุเหล่านี้มากกว่าผลจากค่าอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้า [4]

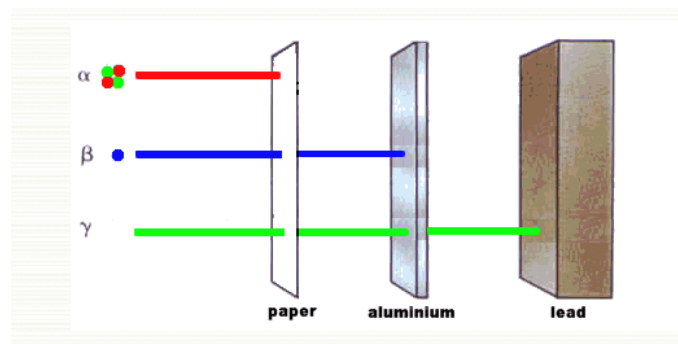
1.6.3 ชญานิชฐ์ จำปี (2553) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การขึ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสปีอาร์และสารดูดกลืนนิวตรอน โดยทำการขึ้นรูปน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมวัลคาไนซ์และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนต่างๆร่วมกับวัสดุดูดกลืนนิวตรอน ได้แก่ กรดบอริกชนิดผง ผงโบรอน สารละลายแคดเมียมไนเตรทและผงแคดเมียมในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมวัลคาไนซ์และน้ำยางสังเคราะห์เอสปีอาร์ ในอัตราส่วนในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับกรดบอริกชนิดผง 4 phr ผสมกับผงโบรอน 0.7 phr มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมมากที่สุด จากการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนพบมีการกระจายตัวของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและสามารถกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีได้ดีและไม่ทำให้เกิดรังสี Prompt gamma และความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนมากที่สุดคือ 16 มม.ซึ่งได้จากการเรียงซ้อนชิ้นงานจำนวน 8 ชิ้น ซึ่งวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้นี้มีค่า HVL ประมาณ 0.8 ซม. และมีค่าภาคตัดขวางมหภาคต่อรังสีนิวตรอน 0.8705 ซม.⁻¹ [5]

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุกำบังรังสี (Shielding)

เมื่อรังสีกระทบต่อสิ่งมีชีวิตจะก่อให้เกิดผลตามมาโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของรังสี พลังงานของรังสี ปริมาณรังสี และชนิดของอวัยวะที่รังสีตกกระทบ รังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing radiation) นั้นมีผลต่อสิ่งมีชีวิตโดยทำให้อะตอม โมเลกุลภายในเซลล์ และระบบการทำงานของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปและอาจก่อให้เกิดอาการผิดปกติในร่างกายขึ้นได้ ดังนั้นในการทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีผู้ปฏิบัติงานควรมีเครื่องกำบังรังสี (Shielding) เพื่อลดปริมาณรังสีที่จะเข้าสู่ร่างกาย โดยที่การเลือกใช้ชนิดเครื่องกำบังรังสี ต้องคำนึงถึง

1. ความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี
2. ชนิดของรังสี/พลังงานรังสี เช่น รังสีแกมมา รังสีบีตาพลังงานสูง รังสีบีตาพลังงานต่ำ รังสีแอลฟา
3. ค่าที่ยอมรับได้หลังจากผ่านเครื่องกำบังรังสี เช่น ค่าที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานรับได้ในระหว่างปฏิบัติงาน



ภาพที่ 2.1 สมบัติการทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ

ที่มา: บทเรียน e-Learning วิชาเคมี โดยครูบุญรอด วงษ์สวาท, <http://www.promma.ac.th>

ในการกำบังรังสีแกมมา ต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก คอนกรีตหนา ฯลฯ

ในการกำบังรังสีนิวตรอนต้องอาศัยวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูง เช่น น้ำ พาราฟิน

ในการกำบังรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ (thermal neutron) อาจจะใช้วัสดุที่มีการดูดกลืนนิวตรอนสูง (high neutron absorption) เช่น แคดเมียม เป็นต้น

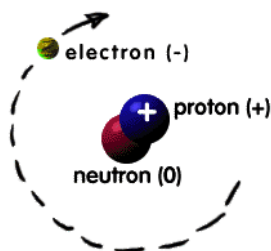
ตารางที่ 2.1 วัสดุกำบังรังสีแบ่งตามชนิดของรังสี

ชนิดของรังสี	ชนิดของเครื่องกำบังรังสี
แอลฟา	ไม่จำเป็น
บีตาพลังงานต่ำ	ไม่จำเป็น
บีตาพลังงานสูง	พลาสติก
รังสีเอกซ์และแกมมา	คอนกรีต/ตะกั่ว/เหล็ก
นิวตรอน	คอนกรีต/น้ำ/พาราฟิน

ที่มา: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

2.2 นิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐานที่ประจุเป็นกลาง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-15} เมตร และมีมวล 1.6749×10^{-27} กิโลกรัม ($939.573 \text{ MeV}/c^2$) ซึ่งมากกว่ามวลของโปรตอนเล็กน้อย (0.2 เปอร์เซ็นต์) และมากกว่ามวลของอิเล็กตรอน 1,838 เท่าตัว นิวตรอนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของนิวเคลียสของอะตอม โดยยึดรวมอยู่กับโปรตอน เป็นนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง และมีอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะตอม

ดัดแปลงจาก: <http://www.electron.rmutphysics.com>

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน เมื่อชนกับอะตอมจะไม่ได้รับผลจากอิเล็กตรอนหรือจากประจุบวกในนิวเคลียส นิวตรอนจึงสามารถผ่านกลุ่มอิเล็กตรอนเข้าไปทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียสได้ ทำให้นิวตรอนเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต เพราะนอกจากที่อนุภาคนิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวไคลด์บางชนิดแล้วได้อนุภาคมีประจุซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อเยื่อแล้ว อนุภาคนิวตรอนยังสามารถกระตุ้น

ให้นิวไคลด์ที่เสถียรเปลี่ยนไปเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ และเนื่องจากอนุภาคนิวตรอนมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง จึงทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตระดับลึกลับ นิวตรอนสามารถจำแนกตามระดับพลังงานได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 การจำแนกนิวตรอนตามพลังงานจลน์

ประเภทนิวตรอน	ช่วงพลังงานและอุณหภูมิ		ความยาวคลื่น (Å)
	(eV)	(K)	
Fast neutrons	$>0.5 \times 10^6$	$>6 \times 10^9$	$<4 \times 10^{-4}$
Intermediate neutrons	$10^3 - 0.5 \times 10^6$	$10^7 - 6 \times 10^9$	$4 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-3}$
Slow neutrons	$0 - 10^3$	$0 - 10^7$	$9 \times 10^{-3} - \infty$
(a) Epithermal neutrons	$0.2 - 10^3$	$2.7 \times 10^3 - 10^7$	$9 \times 10^{-3} - 0.4$
(b) Thermal neutrons	$0 - 0.2$	$0 - 2.7 \times 10^3$	$0.4 - \infty$
(c) Ultra-cold neutrons	$<10^{-4}$	<1	>30

2.3 อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร (Neutron Interaction with matter)

2.3.1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยาคือ (n,n) การชนแบบนี้นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สถานะปกติ (Ground state) ด้วยความเร็วค่าหนึ่งแล้วทำให้นิวตรอนกระเจิง (Scatter) ออกมาโดยมีทิศทางและความเร็วที่เปลี่ยนไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สถานะพื้น การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนยังมีค่าคงที่ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า บางครั้งเรียกว่า Potential scattering

2.3.2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยาคือ (n,n') การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้มีลักษณะคล้ายการชนแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชน กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleuse) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสลดพลังงานกลับสู่สถานะปกติ จะปลด

ปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในภาพของรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยืดหยุ่นเป็น Threshold reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นลบ เป็นอันตรกิริยาที่มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน

2.3.3. อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ Radiative capture)

มีสัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ (n,γ) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) อันตรกิริยานี้ นิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (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) ของนิวเคลียสใหม่มากกว่าพลังงานนิวเคลียสเดิมรวมกับพลังงานของนิวตรอนเสมอ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA)

2.3.4. ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction)

นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวออกเป็นสองส่วน ได้นิวเคลียสที่มีมวลไม่เท่ากัน พร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)

2.3.5. ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge-particle emission)

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟาหรืออนุภาคโปรตอน ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุนี้มีทั้งแบบปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน และปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน แต่เกิดปฏิกิริยาชนิดคาย

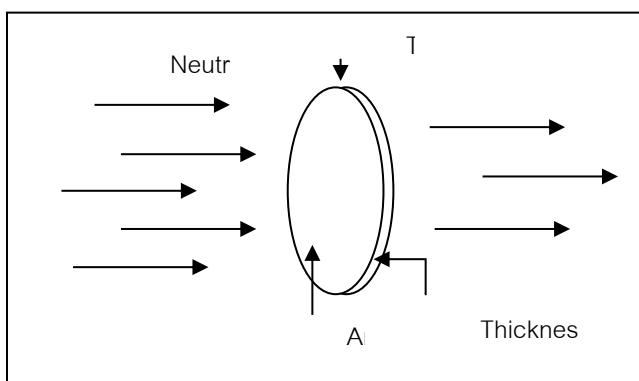
พลังงานน้อยกว่า ได้แก่ ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 (${}^6\text{Li}$) ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดและการกำบังนิวตรอน

2.3.6. ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction)

ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n,2n) ปฏิกิริยา (n,3n)

2.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง แสดงในเทอมของปริมาณที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (Cross section) อธิบายได้โดยพิจารณาแผ่นวัสดุบางชนิดหนึ่ง มีพื้นที่หน้าตัด A มีความหนา X โดยที่มีลำนิวตรอน (Neutron beam) ตกกระทบดังภาพ ถ้ามีนิวตรอนจำนวน n นิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร และมีความเร็ว v



ภาพที่ 2.3 ลำนิวตรอนกระทบเป้า

จะได้ความสัมพันธ์

$$I = nv$$

I = ความเข้มของลำนิวตรอน (Intensity of neutron beam); neutron/cm²-sec

n = จำนวนนิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร; neutron/cm³

v = ความเร็ว; cm/sec

จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านไปไม่ได้ทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนาของเป้า และค่าภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma AX$$

σ = ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน; บาร์น (barn), 1 บาร์น = 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบ ดังนั้นค่าภาคตัดขวางจึงมีหลายค่า เช่นเดียวกัน ถ้าให้ σ_t เป็นภาคตัดขวางรวม (Total cross section) ของนิวเคลียสต่อหนึ่งหน่วยนิวตรอนจะได้

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

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

สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma_t AX$$

ดังนั้น จำนวนอันตรกิริยาต่อปริมาตรต่อวินาที ซึ่งเรียกว่า ความหนาแน่นของอันตรกิริยา (collision density; F) เขียนได้ดังนี้

$$F = IN\sigma_t$$

ผลคูณ $N\sigma$ ใช้สัญลักษณ์เป็น Σ เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1} ผลคูณของ $N\sigma_t$ จึงใช้สัญลักษณ์เป็น Σ_t เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section) และสามารถเขียนสมการในเทอมของภาคตัดขวางมหภาครวมได้เป็น

$$F = I\Sigma_t$$

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\Sigma_{\text{mix}} &= \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \\ \Sigma_{\text{mix}} &= N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots\end{aligned}$$

Σ_{mix} คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 N_1, N_2, N_3, \dots คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ

ในทางปฏิบัติข้อมูลที่ทราบมักไม่ใช่ความหนาแน่นเชิงจำนวนของนิวเคลียส แต่เป็นสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume fraction, α) ของนิวเคลียสชนิดต่างๆภายในตัวกลาง ดังนั้นถ้ารู้ค่าความหนาแน่นเชิงมวล (ρ) ของนิวเคลียสนั้น ๆ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเชิงปริมาตรและความหนาแน่นเชิงจำนวนของนิวเคลียส i ได้เป็น

$$N_i = \frac{\alpha_i \rho_i}{m_i}$$

และ

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

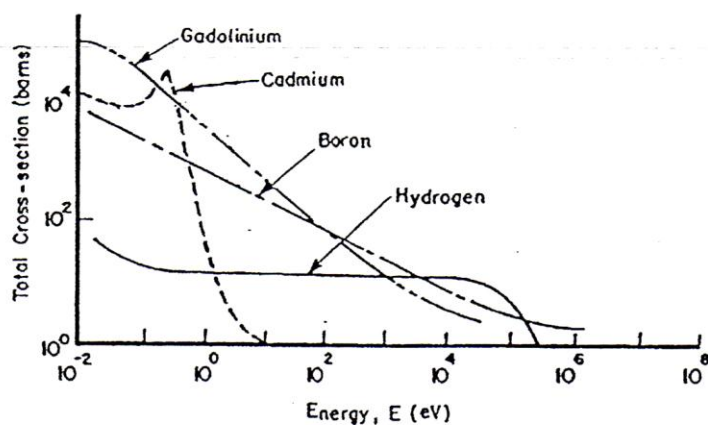
เมื่อ α , ρ , และ m_i คือ สัดส่วนเชิงปริมาตร ความหนาแน่นเชิงมวล และมวลโมเลกุลของโมเลกุล i ซึ่งมีนิวเคลียสตัวกลางที่สนใจเป็นองค์ประกอบตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ

Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm ³)	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)	σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_t (cm ⁻¹)	Σ_a (cm ⁻¹)
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
										0.000
Pb	204	11.34	11.40	0.18	0.381	0.006	4.39	0.003	0.147	0.0094
Pu	238.05	19.6	599.3	562.0	29.72	27.87	6.66	0.190	0.330	0.0013
Pu	239.05	19.6	1021	270	50.4	13.3	7.01	0.026	0.364	0.0053
Pu	240.05	19.6	294	293	14.5	14.4	7.15	0.108	0.352	0.0057
Pu	241.06	19.6	1390	362	68.1	17.7	7.98	0.117	0.391	0.0048
Pu	242.06	19.6	26.7	18.9	1.30	0.922	7.31	0.098	0.357	0.0001
Nat Si	28.09	2.42	2.24	0.161	0.116	0.0084	4.43	0.01	0.230	0.0040
Th	232	11.3	20.4	7.50	0.598	0.220	7.00	0.135	0.205	

ตารางที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่าง ๆ (ต่อ)

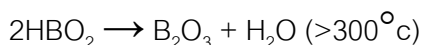
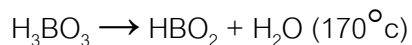
Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm ³)	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)	σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)
U	233.04	19.1	587	45.8	29.0	2.26	6.78	0.069	0.335	0.0034
U	234.04	19.1	116	103	5.70	5.07	8.02	0.363	0.394	0.0178
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 ₂	14	0.94			2.68	0.027			0.449	0.000
H ₂ O	18	1.0			2.18	0.022			0.560	0.000
D ₂ O	20	1.1			0.410	0.000			0.420	0.000
Average Fission Products of:										
²³⁵ U	117		4496	4486			7.43	0.0004		
²³⁹ Pu	119		2087	2086			7.48	0.0009		



ภาพที่ 2.4 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกดโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล่านี้มีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนที่พลังงานต่ำ

2.5 โบรอนออกไซด์ [6]

เป็นสารประกอบออกไซด์ของโบรอน สามารถเตรียมขึ้นได้โดยการให้ความร้อนต่อกรดบอริกที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลผลิตสุดท้ายออกมาเป็นโบรอนออกไซด์ ดังสมการ



เมื่อให้ความร้อนต่อกรดบอริกจนมีอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส จะได้กรดเมตาบอริก (HBO_2) กับไอน้ำ เมื่อให้ความร้อนไปเรื่อยๆจนอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตสุดท้ายคือ โบรอนออกไซด์และไอน้ำ

ลักษณะทั่วไปของโบรอนออกไซด์

ชื่ออื่นๆ	โบรอนไตรออกไซด์, ไดโบรอนไตรออกไซด์
สูตรเคมี	B_2O_3
มวลโมเลกุล	69.6182 g/mol
รูปแบบที่พบ	ขาว แข็งเหมือนแก้ว
ความหนาแน่น	ของเหลว : 2.460 g/cm^3 ไตรโกนอล : 2.55 g/cm^3 โมโนคลินิก : $3.11\text{-}3.146 \text{ g/cm}^3$
จุดหลอมเหลว	ไตรโกนอล : 450 องศาเซลเซียส เตตระฮีดรอล : 510 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	1860 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	22 g/L (และสามารถละลายในเมทานอลได้บางส่วน)
ความเป็นกรด (pK_a)	~ 4

ในการทดลองเกี่ยวกับวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) เพื่อเป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอน ให้วิ่งช้าลงและเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เพราะที่พลังงานต่ำ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนจะสูงกว่าที่พลังงานสูง ซึ่งวัสดุที่ใช้ลดความเร็วของนิวตรอน ควรเป็นวัสดุที่มีอะตอมของไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมาก

ในงานวิจัยนี้วัสดุหลักที่จะนำมาทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงความเร็วนิวตรอนเพื่อให้มีโอกาสในการทำอันตรกิริยากับตัวดูดกลืนนิวตรอนได้สูงขึ้น คือ ยาง เนื่องจากยางเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมของไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นโอกาสที่จะลดความเร็วของนิวตรอนและโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องก็จะเกิดขึ้นได้มาก ในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหล่านี้จึงควรเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำวัสดุเหล่านี้มาใช้งานให้ถูกวิธีและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.6 ยาง [7]

ยาง คือวัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ มาจากของเหลวของพืชบางชนิด มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำ

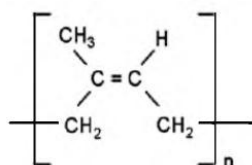
ชนิดของยางและการใช้งาน

ยางแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

1. ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรวดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวข้นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีซัลเฟอร์ ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีซัลเฟอร์ เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้าง

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์

อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ยางจะอ่อนแอกว่าและเหนียวเหนอะเมือร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้งานจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ มากมายเนื่องจาก

- ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ

- ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นใช้งานต่ำและมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น
- ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้วงไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (antidegradants) เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อสารละลายไม่มีขั้ว น้ำมัน และสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งต่าง ๆ ดังกล่าว

2. ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR)

ยางสังเคราะห์ไม่ได้หมายความถึงยางเทียมที่มีลักษณะทางเคมีและสมบัติคล้ายคลึงกับยางเท่านั้น แต่ยังรวมถึงยางชนิดต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี สาเหตุสำคัญที่ผลักดันให้เกิดการริเริ่มค้นคว้าการผลิตยางสังเคราะห์จนขยายมาเป็นการผลิตเชิงการค้าคือ

- ปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง
- ราคาที่ไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ
- ความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น มีความทนต่อน้ำมัน สารเคมี และความร้อนสูง ๆ

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของโมโนเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวจะเรียกว่า โฮโมโพลิเมอร์ (homopolymer) เช่น

ยางโพลีบิวทาไดอีน (BR) ถ้าประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคโพลิเมอร์ (copolymer) เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR)

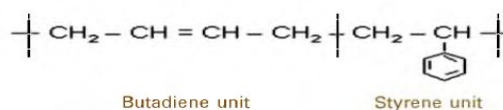
ชนิดของยางสังเคราะห์ [8]

1. ยางสังเคราะห์ IR หรือ cis-1,4-polyisoprene

ยาง IR เกิดจากความพยายามที่จะสังเคราะห์ยางที่มีสมบัติและโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ โดยในปี ค.ศ. 1954 Goodrich ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ยาง IR จากไอโซพรีนโมโนเมอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันชนิด Ziegler-Natta และได้ตั้งชื่อยางชนิดนี้ว่า “synthetic natural rubber” ยาง IR มีสมบัติความทนต่อแรงดึงต่ำกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย แต่มีข้อดีคือคุณภาพของยางสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อยทำให้ยางมีสีขาวสวย ในขณะที่ยางธรรมชาติจะมีสีเหลืองอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม เนื่องจากมีสารเบต้าแคโรทีน (P-carotene)

2. ยางสไตรีนบิวทาไดอีน หรือยาง SBR (styrene-butadiene rubber)

ยางสไตรีนบิวทาไดอีนประกอบด้วย สไตรีนโมโนเมอร์ (styrene monomer) ประมาณ 23.5% และบิวทาไดอีนโมโนเมอร์ (butadiene monomer) ประมาณ 76.5% โมโนเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน (random copolymer) นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลของยาง SBR ก็ไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึก (crystalline) ได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีความทนต่อแรงดึงต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย

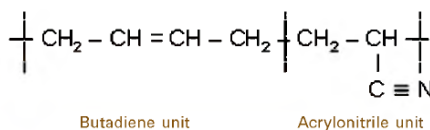


ภาพที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของยางสไตรีนบิวทาไดอีน

3. ยางไนไตรล์ หรือยาง NBR (nitrile rubber)

ยางไนไตรล์เป็นโคโพลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์โมโนเมอร์ (acrylonitrile monomer) และบิวทาไดอีนโมโนเมอร์ (butadiene monomer) ซึ่งจะประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ ตั้งแต่ 20-50% จากโครงสร้างของโมเลกุลจะเห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชัน CN- อยู่ ดังนั้นโมเลกุลจึงมีความเป็นขั้ว ทำให้ยางมี

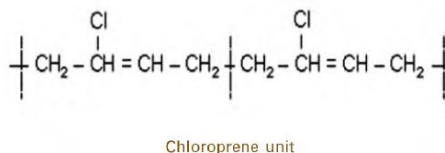
สมบัติเด่นคือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ ได้ดี ความทนน้ำมันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ที่มีในโมเลกุล



ภาพที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของยางไนไตรล์

4. ยางคลอโรพรีนหรือยาง CR (chloroprene rubber)

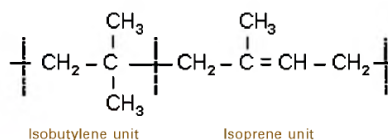
ยางคลอโรพรีนมีชื่อทางการค้าว่า ยางนีโอพรีน (neoprene) เป็นยางสังเคราะห์จากคลอโรพรีนโมโนเมอร์ (chloroprene monomer) โมเลกุลของยางคลอโรพรีนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางคลอโรพรีนจึงมีค่าความทนต่อแรงดึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเติม) นอกจากนั้นยังมีความทนต่อการฉีกขาดและการขีดถูสูงด้วย



ภาพที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของยางคลอโรพรีน

5. ยางบิวไทล์ (butyl rubber, HR)

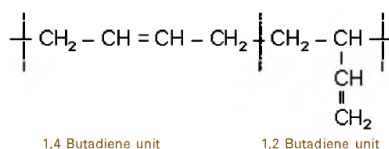
ยางบิวไทล์เป็นโคโพลิเมอร์ระหว่างโมโนเมอร์ของไอโซพรีน (isoprene) และไอโซบิวทีลีน (isobutylene) โดยมีไอโซพรีนน้อยมากประมาณ 0.5-3% โมล เพียงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยกัมมะถันในระหว่างปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้เท่านั้น ทั้งนี้เพราะในไอโซพรีนมีพันธะคู่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ยางบิวไทล์ประกอบด้วยส่วนที่อิ่มตัว (saturated) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน โอโซน และความชื้น อย่างไรก็ตามพันธะคู่ที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ยางคงรูปด้วยกัมมะถันได้ โดยที่การคงรูปจะเกิดได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปริมาณของพันธะคู่ ถ้าเพิ่มปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลการคงรูปก็จะเกิดได้เร็ว ยางจะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงขึ้นแต่ความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศจะด้อยลง



ภาพที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของยางบิวไทล์

6. ยางบิวทาไดอีน (butadiene rubber, BR)

ยางบิวทาไดอีนเป็นโพลิเมอร์ของบิวทาไดอีนที่มีการจัดเชื่อมต่อกันหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4 tran-1,4 หรือแบบ vinyl-1,2 ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ใช้ในปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน โดยปกติยางบิวทาไดอีนจะไม่ถูกใช้เดี่ยวๆ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการบดผสมยางเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะเมื่อทำการบดผสมโดยใช้ลูกกลิ้ง (two-roll mill) เพราะยางจะไม่ฟอร์มรอบลูกกลิ้ง (poor mill banding) ยางชนิดนี้จึงมักใช้บดผสม (blend) กับยางไม่มีขั้วชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน



ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของบิวทาไดอีน

7. ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนหรือยาง EPDM (ethylene-propylene diene rubber)

เกิดจากการทำปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของโมโนเมอร์ 3 โมโนเมอร์ คือ เอทิลีน(ethylene) โพรพิลีน (propylene) และไดอีน (diene) ยางชนิดนี้คือ ยาง EPDM โดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ 45-85% โมล และไดอีนอยู่ในช่วง 3-11% โมล ชนิดของไดอีนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมี 3 ชนิด คือ Dicyclopentadiene, Ethylidene Norbornene และ trans-1,4-hexadiene โดยชนิดที่ใช้มากที่สุดคือ ENB เพราะจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขวางรูปด้วยกัมมันต์

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

สมบัติ	ชนิดของยาง							
	NR	IR	SBR	BR	NBR	CR	IIR	EPDM
ความทนต่อแรงดึง (ไม่มีสารเสริมแรง)	1	2	5	6	5	3	4	5
ความทนต่อแรงดึง (มีสารเสริมแรง)	1	2	2	4	2	2	3	3
การยืดตัวสูงสุด	1	1	2	3	2	2	2	3
ความต้านทานต่อการขาด (มีสารเสริมแรง)	4	4	3	1	2	3	4	3
ความทนต่อการฉีกขาด	2	2	3	5	3	2	3	3
การกระเดิงตัว	2	2	3	1	3	3	6	3
ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ	2	2	3	2	3	3	2	2
ความทนต่อความร้อน	5	5	4	4	3	3	3	2
ความทนต่อการเกิดออกซิเดชัน	4	4	3	2	3	2	2	1
ความทนต่อแสง UV	4	4	3	3	3	2	2	1
ความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศ	4	4	4	3	3	2	2	1
ความทนต่อน้ำมัน	6	6	5	6	1	2	6	4
ความทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	6	6	6	6	2	3	6	5
ความทนต่อกรด	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อด่าง	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อการติดไฟ	6	6	6	6	6	2	6	6
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	1	2	2	5	4	2	2
การซึมผ่านของก๊าซ	5	5	4	4	2	3	1	4

* 1 = ดีมากที่สุด 6 = ด้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้จะเลือกผสมยางระหว่างยางพาราธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตาไดอีน สาเหตุที่เลือกผสมยางทั้งสองชนิดนี้ เพราะต้องการให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น แม้ว่ายางธรรมชาติจะเป็นยางที่มีสมบัติเด่นในหลายด้าน แต่ก็มีสมบัติบางประการที่เป็นข้อด้อย ดังนั้นในการแก้ไขข้อด้อยนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกเอาสมบัติที่ดีจากยางสังเคราะห์ชนิดอื่นมาทดแทน โดยการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เหล่านั้นเข้าด้วยกัน

ยางสไตรีนบิวตาไดอีนถือว่าเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากมีคุณภาพสม่ำเสมอ การนำไปใช้งานและสมบัติของยางคงรูปจึงสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อย ยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์ให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก มีความเหนียวเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้อย่างดีและยางก็ไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูปแบบต่างๆ ยางชนิดนี้มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ผลิตในปริมาณมากและราคาไม่แพง อีกทั้งสามารถแปรรูปได้ง่าย จึงทำให้ประหยัดทั้งต้นทุน วัสดุุดิบ และแรงงานการผลิต แต่ในขณะเดียวกันยางสไตรีนบิวตาไดอีนก็มีความยืดหยุ่นและทนต่อการฉีกขาดต่ำ จึงต้องอาศัยสมบัตินี้จากยางพาราธรรมชาติ

นอกจากนี้ยังใส่สารตัวเติม (Filler) เพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้สมบัติของยางดีขึ้น สารตัวเติมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. สารตัวเติมที่มีสีดำ (Black Filler)

เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำ จัดเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพช่วยให้ยางมีสมบัติทางกลดีขึ้น เช่น สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึง มีความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น

2. สารตัวเติมที่ไม่เป็นสีดำ (Non-black Filler)

เป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ที่มีขี้ เช่น ซิลิกา มีหลายชนิดทั้งเสริมประสิทธิภาพ กึ่งเสริมประสิทธิภาพ และไม่เสริมประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเท่า ๆ กัน ระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ พบว่าเขม่าดำจะทำให้ค่าโมดูลัสและความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่ายางที่ใช้ซิลิกาในปริมาณเท่ากัน เนื่องจากผิวของเขม่าดำสามารถเข้ากับยางได้ดี ทำให้โมเลกุลของยางยึดแน่นกับอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ทำให้เกิดลักษณะที่เข้ากับยางได้ไม่ดีเท่าเขม่าดำ ทำให้การยึดระหว่างผิวซิลิกากับยางไม่แน่นเท่าเขม่าดำ

สารตัวเติมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เขม่าดำ (Carbon black) ชนิด High Abrasion Furnace
 ตารางที่ 2.5 ประเภทของผงเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

Name	Abbrev.	ASTM Desig.	Particle Size (nm)	Tensile Strength (MPa)	Relative Laboratory Abrasion	Relative Roadwear Abrasion
Super Abrasion Furnace	SAF	N110	20–25	25.2	1.35	1.25
Intermediate SAF	ISAF	N220	24–33	23.1	1.25	1.15
High Abrasion Furnace	HAF	N330	28–36	22.4	1.00	1.00
Easy Processing Channel	EPC	N300	30–35	21.7	0.80	0.90
Fast Extruding Furnace	FEF	N550	39–55	18.2	0.64	0.72
High Modulus Furnace	HMF	N683	49–73	16.1	0.56	0.66
Semi-Reinforcing Furnace	SRF	N770	70–96	14.7	0.48	0.60
Fine Thermal	FT	N880	180–200	12.6	0.22	--
Medium Thermal	MT	N990	250–350	9.8	0.18	--

2.7 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron radiography)

การถ่ายภาพด้วยรังสี เป็นวิธีในการตรวจสอบคุณภาพโดยไม่ทำลาย (nondestructive testing, NDT) เพื่อหาข้อบกพร่องหรือตำหนิของวัตถุหรือวัสดุ ซึ่งจะให้ได้ภาพโครงสร้างภายในของวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปใช้รังสีเอกซ์ที่ผลิตขึ้นจากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) หรือรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสี (Radioisotope) ฉายลำรังสีผ่านวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อรังสีผ่านวัตถุ ความเข้มของรังสีจะลดลงตามลักษณะโครงสร้างของวัตถุ โดยแปรผันตามชนิด ขนาด และความหนาแน่น ตามสมการการดูดกลืนรังสี

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

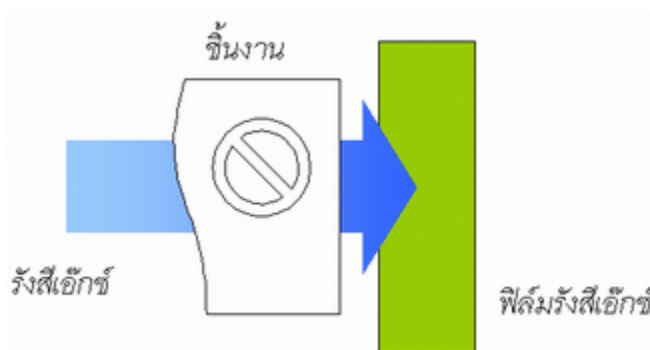
I_0 = ความเข้มของรังสีก่อนผ่านวัตถุ

I = ความเข้มของรังสีหลังผ่านวัตถุ

μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุ

x = ความหนาของวัตถุ

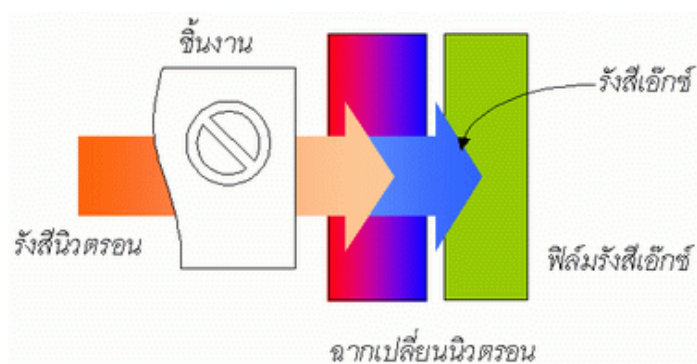
การบันทึกภาพจะใช้ฟิล์ม หรือ CCD ซึ่งจะให้ภาพตามความเข้มของรังสีที่ได้รับ เมื่อผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม ภาพของชิ้นงานจะปรากฏขึ้นมาในลักษณะของฟิล์มเนกาทีฟ (Negative film) โดยส่วนของชิ้นงานที่ดูดกลืนรังสีมากฟิล์มจะมีสีขาว และส่วนที่ดูดกลืนรังสีน้อยฟิล์มจะมีสีดำ



ภาพที่ 2.13 ส่วนประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

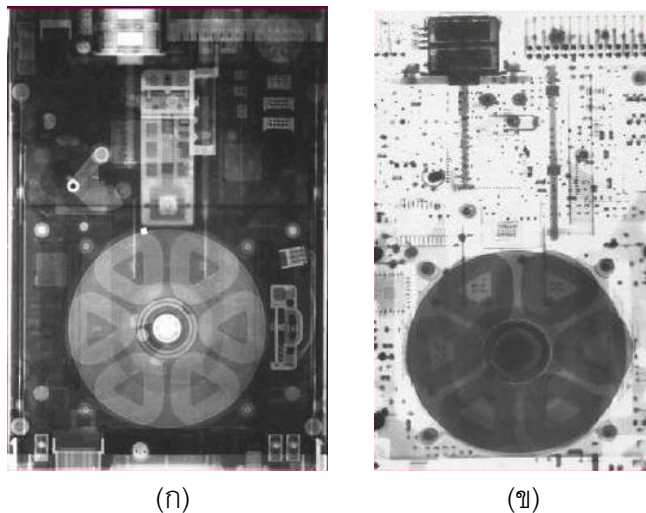
ที่มา: <http://www.nst.or.th>

การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน ใช้วิธีการฉายลำรังสีนิวตรอนผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โดยมีฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ทำหน้าที่แปลงรังสีนิวตรอนเป็นรังสีอัลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ ช่วยให้เกิดภาพขึ้นบนฟิล์ม เนื่องจากฟิล์มรังสีเอกซ์ไม่วางต่อรังสีนิวตรอน



ภาพที่ 2.14 ส่วนประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน

ที่มา: <http://www.nst.or.th>



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างแผ่น Floppy Disk Drive ที่ถูกถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (ก)

และรังสีเอกซ์ (ข) ที่มา: <http://www.nst.or.th>

2.8 บอราไซต์

บอราไซต์ (Boracite) เป็นแร่หนึ่งในกลุ่มหินเกลือระเหย (Evaporite minerals) ที่พบในประเทศไทย โดยจะพบในสภาวะแวดล้อมที่เกิดจากการระเหยของน้ำทะเล โดยมักจะเกิดร่วมกับเกลือหินและแร่โพแทช แหล่งหินเกลือระเหยของประเทศไทยปรากฏอยู่เพียงที่เดียว คือบริเวณที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือหรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อที่ราบสูงโคราชในแอ่งย่อย 2 แอ่ง ได้แก่ แอ่งสกลนครกับแอ่งโคราช

การเกิดเกลือหินและแร่โพแทชในโลกนี้มักจะมีสภาพเกิดคล้ายคลึงกันคือ น้ำทะเลจะไหลเข้ามาในแอ่งบนทวีปไกล์ชายฝั่งที่ค่อนข้างราบ เมื่อน้ำทะเลขึ้นก็ไหลล้นเข้ามาจากทะเล ผ่านแนวกันที่เรียกว่า Bar หรือ Barrier ซึ่งทำหน้าที่ปิดกั้นไม่ยอมให้น้ำไหลกลับช่วงน้ำลง ทะเลจะถูกแสงแดดแผดเผาตลอดเวลา [9] จนมีความเข้มข้นมากขึ้นตามลำดับและตกผลึกเป็นหินเกลือระเหยชนิดต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.6 สารประกอบหรือแร่เกลือระเหยที่ตกผลึกเป็นชั้นๆ ตามลำดับที่เรียงจากล่างขึ้นบนที่ได้จากการทดลองของ Usiglio (1849) (Krauskopf 1967)

สารประกอบ	เกิดเป็นตะกอนหรือแร่
6. Other Potassium and Magnesium	Potassium-Magnesium Minerals
5. Potassium Chloride	Potash (Potassium Minerals)
4. Sodium Chloride	Halite
3. Calcium Sulfate	Anhydrite, Gypsum
2. Calcium Carbonate	Limestone, Calcareous, Calcite, Dolomite
1. Iron Oxide	Hematite

ข้อมูลทั่วไปของแร่บอราไซด์

สูตรเคมี:	$Mg_3B_7O_{13}Cl$ (Magnesium Borate Chloride)		
Class:	Carbonates		
Subclass:	Borates		
ส่วนประกอบ:	มวลโมเลกุล = 392.03 g.		
	Magnesium	18.60 %	Mg 30.84 % MgO
	Boron	19.30 %	B 62.15 % B_2O_3
	Chlorine	9.04 %	Cl 9.04 % Cl
		- %	Cl -2.04 % $-O=Cl_2$
	Oxygen	53.06 %	O
		100.00 %	100.00 % = TOTAL OXIDE

สภาพแวดล้อม: เกิดจากการระเหยของน้ำทะเล

การนำไปใช้: ผลิตเป็นกรดบอริกและบอแรกซ์ และใช้เป็นตัวอย่างแร่

ลักษณะทางกายภาพ

สี:	ขาวถึงไม่มีสี บางครั้งมีสีเหลืองอ่อนๆ, เขียว และฟ้า
ความเงา:	คล้ายแก้ว
ความโปร่งใส:	โปร่งใสถึงโปร่งแสง
ระบบผลึก:	orthorhombic; 2/m 2/m 2/m isometric; 4/m bar 3 2/m ที่อุณหภูมิสูง
รอยแตกเล็กๆ:	ไม่มี
รอยแตกใหญ่ๆ:	ไม่สม่ำเสมอ หรือ เป็นรูปก้นหอย
ความแข็ง:	7 - 7.5
ความถ่วงจำเพาะ:	ประมาณ 2.9 - 3.0 (ค่าเฉลี่ยสำหรับแร่โปร่งแสง)
สีที่ปรากฏเมื่อขูด:	ขาว
ลักษณะอื่นๆ:	ละลายน้ำได้เล็กน้อย
แร่ที่เกี่ยวข้อง:	แอนไฮไดรต์, ยิปซัม, เฮไลต์ และแร่ระเหยอื่น ๆ

สถานที่เกิดที่โดดเด่น: Yorkshire, England; Strassfurt, Germany; Bolivia; Chactaw Salt Dome, Louisiana and Otis, California, USA และ France

ตัวชี้วัดในภาคสนาม: ลักษณะของผลึก, สี, ความเกี่ยวข้องกัน, สถานที่, รอยแตก และ ความแข็งที่สูง



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของแร่บอราไซต์ (ตัวอย่างจากเหมืองโพแทช ประเทศอังกฤษ)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์วิจัย

วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

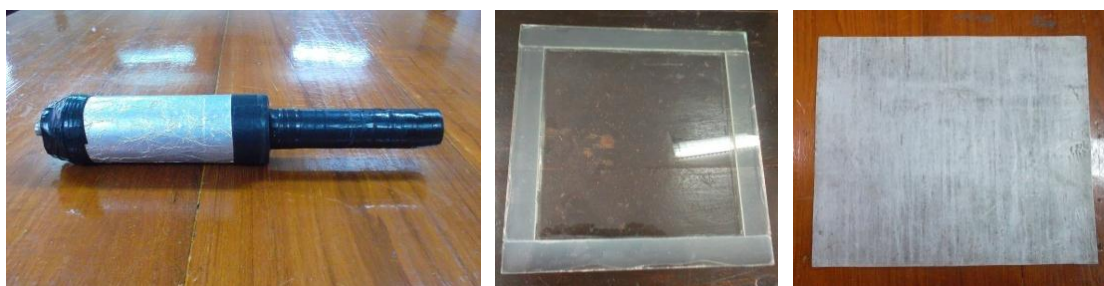
- 3.1.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน อเมอริเซียม/เบริลเลียม (Am-241/Be) จำนวน 1 ตัว ปริมาณรังสี 30 มิลลิวูรี่ (ให้นิวตรอน 2.2×10^6 นิวตรอนต่อหนึ่งหน่วยวินาทีต่อ Ci)
- 3.1.2 หัววัดรังสีนิวตรอนชนิด ^6Li Glass scintillator
- 3.1.3 ระบบวัดรังสีนิวตรอน ได้แก่ Amplifier, High voltage power supply, RC coupling, Computer
- 3.1.4 โพลีเอทิลีนทรงกระบอกที่มีช่องบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน
- 3.1.5 แผ่นแคดเมียม หนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับกำบังรังสีอีพิแคดเมียมนิวตรอน (Fast neutron) ในขณะวัดการลดทอนรังสีนิวตรอน
- 3.1.6 น้ำยางพาราธรรมชาติพร้อมพรีวัลคาไนซ์ (Vulcanizable natural rubber latex) ชนิดน้ำ ยางหล่อเบา ยาง จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร มี solid content 36%
- 3.1.7 น้ำยางสังเคราะห์สไตรีนบิวทาไดอีน (Carboxylated Styrene/Butadiene latex รุ่น DOW LATEX 832) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท DOW CHEMICAL THAILAND LTD. มี solid content 52%
- 3.1.8 กรดบอริกชนิดผง (Boric Acid) สำหรับทำเป็นโบรอนออกไซด์
- 3.1.9 สารเสริมแรงคือ ผงเขม่าดำ (Carbon black) ชนิด High Abrasion Furnace (HAF; N330)
- 3.1.10 เครื่องแก้ว ได้แก่ แท่งแก้วคนสาร กระบอกตวง และปิ๊กเกอร์
- 3.1.11 แท่งแม่เหล็กคนสาร (Magnetic stirrer)
- 3.1.12 เครื่องผสมสารชนิด Laboratory Stirrer/Hotplate ยี่ห้อ CORNING ให้อุณหภูมิสูงสุด $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความเร็วในการหมุนสูงสุด 1,150 รอบต่อนาที
- 3.1.13 พิมพ์กระจกรูปสี่เหลี่ยมสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานขนาด $15 \times 15 \times 0.2$ เซนติเมตร
- 3.1.14 ตู้อบยี่ห้อ BINDER รุ่น R3-Controller Series

3.1.15 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ OHAUS

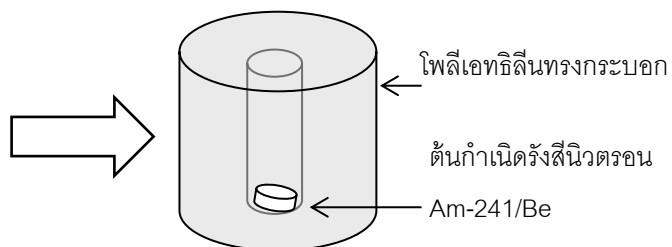
3.1.16 อุปกรณ์วัดระดับความเป็นระนาบ (Spirit level) เพื่อปรับระนาบขณะขึ้นรูปชิ้นงาน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

(ก) น้ำยาล้างจาน, น้ำยาสไตรีนบิวทาไดอีน, กรดบอริกชนิดผง, ผงเขม่าดำ

(ข) หัววัดรังสีนิวตรอนชนิด ${}^6\text{Li}$ Glass scintillator, พิมพ์กระจุกรูปสี่เหลี่ยม, แผ่นแคดเมียม

(ค) ต้นกำเนิดนิวตรอน (บรรจุอยู่ในโพลีเอทิลีนทรงกระบอกที่มีช่องบรรจุตรงกลาง)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การหาสัดส่วนของยางผสมที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอน

- ออกแบบให้น้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีอัตราส่วนรวมเท่ากับ 100 ซึ่งจะใช้น้ำหนักจริงของน้ำยาง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนและปริมาณของน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน

อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	น้ำหนัก (กรัม)	
	น้ำยางพารา ธรรมชาติ	น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน
90 : 10	90	10
80 : 20	80	20
70 : 30	70	30
60 : 40	60	40
50 : 50	50	50
40 : 60	40	60
30 : 70	30	70
20 : 80	20	80
10 : 90	10	90

- นำน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนเทรวมกันในบีกเกอร์

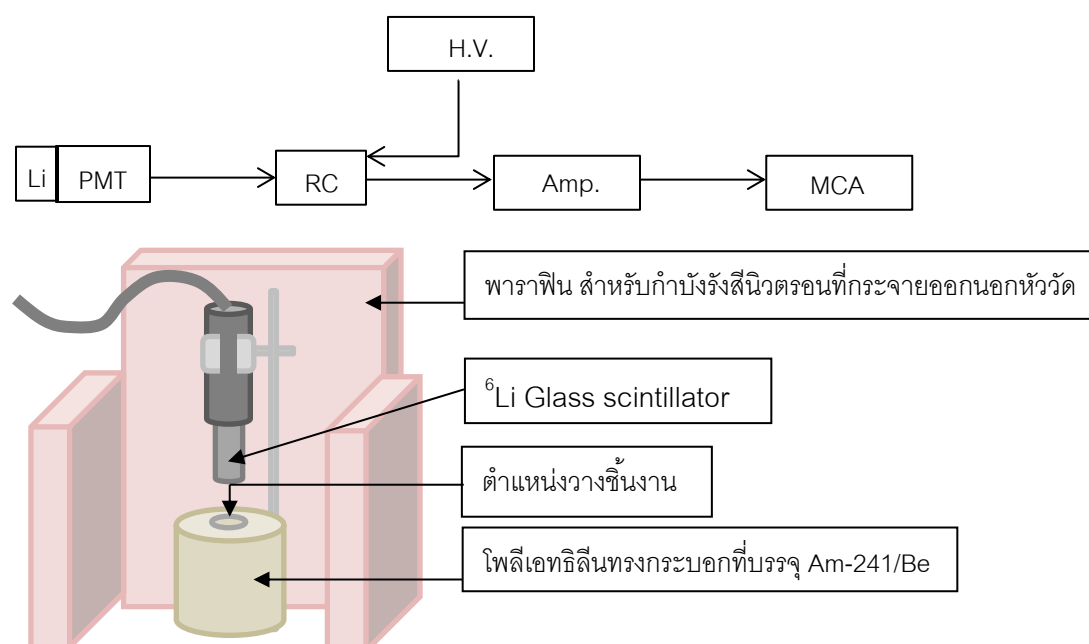
- ผสมน้ำยางทั้งสองชนิดให้เข้ากันโดยใช้แท่งแม่เหล็กคนสารบนเครื่องผสมสาร ใช้ความเร็วในการผสม 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

- เทยางผสมที่ได้ลงบนพิมพ์กระจกรูปสี่เหลี่ยม ทิ้งไว้จนแห้งในอุณหภูมิห้องจนสามารถถอดออกจากพิมพ์ได้ จะได้ชิ้นงานในอัตราส่วนต่าง ๆ

- นำชิ้นงานที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (www.rubbercenter.org) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.2 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆที่ขึ้นรูปได้

- จัดระบบวัดรังสีนิวตรอนนิวตรอน ซึ่งประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน Am-241/Be ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในช่องว่างของโพลีเอทิลีนทรงกระบอก , หัววัดรังสีนิวตรอน คือ ^6Li Glass scintillator และระบบวัดรังสีนิวตรอน ได้แก่ Amplifier, High voltage power supply, RC coupling, Computer ดังภาพ



ภาพที่ 3.2 การจัดระบบวัดรังสีนิวตรอน

- ทำการวัดรังสีนิวตรอนทั้งหมดที่ออกมาพร้อมทั้งบันทึกจำนวนนับ (Area) ที่ได้ ซึ่งประกอบไปด้วย อิพิแคดเมียมนิวตรอน อิพิเทอร์มัลนิวตรอนและเทอร์มัลนิวตรอน
- นำยางผสมในอัตราส่วนต่างๆวางไว้บนถังโพลีเอทิลีน บันทึกจำนวนนับ (Area) ที่ได้ของยางผสมในแต่ละอัตราส่วน
- วางแผ่นแคดเมียมลงบนถังโพลีเอทิลีน เพื่อกำบังรังสีนิวตรอนพลังงานต่ำ บันทึกจำนวนนับ (Area) ที่ได้ของอิพิแคดเมียมนิวตรอนที่ลดลง
- นำยางผสมในอัตราส่วนต่างๆวางไว้บนแผ่นแคดเมียม บันทึกจำนวนนับ (Area) ที่ได้ของอิพิแคดเมียมนิวตรอนที่ลดลง

3.2.3 การหาปริมาณวัสดุคูดกสีนวัตกรรอนและปริมาณสารเสริมแรงที่เหมาะสม

- ออกแบบให้ใช้วัสดุคูดกสีนวัตกรรอน คือ โบรอนออกไซด์ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น คือ 1, 3, และ 5 กรัม และสารเสริมแรง คือ ผงเขม่าดำ (Carbon black) ในปริมาณเพียง 0.5 และ 1 กรัม เนื่องจากว่าแม้ว่าผงเขม่าดำมีผลดีต่อการเสริมแรงในชิ้นงานและไม่มีผลกระทบต่อกรำบั้งรังสีนวัตกรรอน แต่สามารถละลายได้น้อย โดยปริมาณต่างๆแสดงในตารางที่ 3.2

- นำน้ำยารวมพารากรรอนชาติ น้ำยารวมสไตรีนบิวทาไดอีน โบรอนออกไซด์ และผงเขม่าดำ เทรวมกันในปีกเกอร์

- ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันโดยใช้แท่งแม่เหล็กคนสารบนเครื่องผสมสาร ใช้ความเร็วในการผสม 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

- เทส่วนผสมที่ได้ลงบนพิมพ์กระจกรูปสี่เหลี่ยม ทิ้งไว้จนแห้งในอุณหภูมิห้องจนสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ จะได้ชิ้นงานที่มีสีดำ

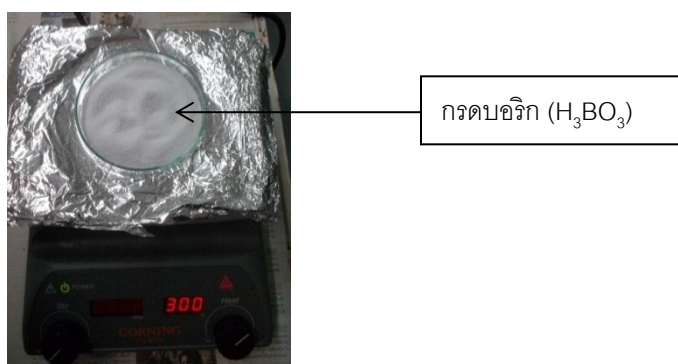
- นำชิ้นงานที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

- ทำซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนของยางผสมและผงเขม่าดำ

วิธีการทำโบรอนออกไซด์ (B_2O_3)

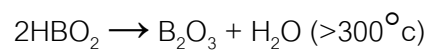
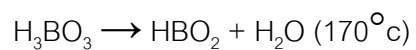
- นำกรดบอริกชนิดผงใส่ในภาชนะที่สามารถทนความร้อนได้สูง

- ทำให้ร้อนด้วยเครื่องผสมสารที่สามารถให้ความร้อนได้ โดยปรับอุณหภูมิให้เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส

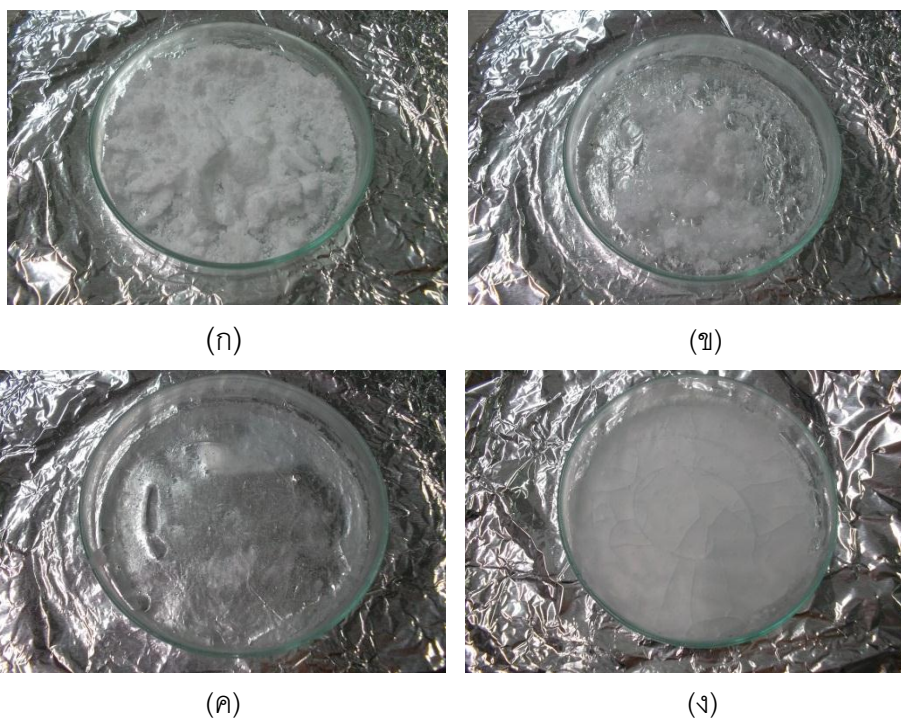


- ใช้แท่งแก้วคนกรดบอริกไปเรื่อยๆ เพื่อให้ความร้อนกระจายไปทั่วภาชนะ

- น้ำในกรดบอริกจะค่อยๆระเหยออกไป จนได้ผลผลิตสุดท้ายคือ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3)



- โบรอนออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นใส ๆ จึงต้องนำไปอบดีให้เป็นผงเพื่อง่ายต่อการผสมต่อไป



ภาพที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของกรดบอริกเมื่อถูกให้ความร้อนจนได้เป็นโบรอนออกไซด์
 (ก) กรดบอริกจะจับตัวเป็นก้อนและเริ่มมีไอน้ำระเหยออกมา
 (ข) กรดบอริกเริ่มเปลี่ยนจากผงสีขาวเป็นของเหลวใส
 (ค), (ง) ได้โบรอนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส รอจนแห้งและนำมาอบเป็นผง

ตารางที่ 3.2 ปริมาณของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำที่ผสมในน้ำยางเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน

อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	น้ำหนัก (กรัม)		หมายเลข ชิ้นงาน
	ผงเขม่าดำ (กรัม)	โบรอนออกไซด์ (กรัม)	
90:10	0.5	1	S1
		3	S2
		5	S3
	1	1	S4
		3	S5
		5	S6
80:20	0.5	1	S7
		3	S8
		5	S9
	1	1	S10
		3	S11
		5	S12
70:30	0.5	1	S13
		3	S14
		5	S15
	1	1	S16
		3	S17
		5	S18

ตารางที่ 3.2 ปริมาณของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำที่ผสมในน้ำยางเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน (ต่อ)

อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	น้ำหนัก (กรัม)		หมายเลข ชิ้นงาน
	ผงเขม่าดำ (กรัม)	โบรอนออกไซด์ (กรัม)	
60:40	0.5	1	S19
		3	S20
		5	S21
	1	1	S22
		3	S23
		5	S24
50:50	0.5	1	S25
		3	S26
		5	S27
	1	1	S28
		3	S29
		5	S30

3.2.4 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของวัสดุอุดกลืน รังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง

- จัดระบบวัดรังสีนิวตรอน
- นำชิ้นงานในอัตราส่วนต่างๆวางไว้บนถังโพลิเอทิลีน บันทึกจำนวนนับ (Area) ของอิพิแคดเมียมนิวตรอน อิพิเทอร์มัลนิวตรอนและเทอร์มัลนิวตรอน ที่ลดลง
- วางแผ่นแคดเมียมลงบนถังโพลิเอทิลีน และนำชิ้นงานในอัตราส่วนต่างๆวางไว้บนแผ่นแคดเมียม บันทึกจำนวนนับ (Area) ของอิพิแคดเมียมนิวตรอนที่ลดลง

3.2.5 การหาความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้

- จัดระบบวัดรังสีนิวตรอน
- นำชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ น้ำยาฆ่าเชื้อราธรรมชาติ : น้ำยาฆ่าเชื้อราไดออกไซด์ : ผงเขม่าดำ : โบรอนออกไซด์ที่มีความสามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด วางซ้อนกันบนถังโพลิเอทิลีน บันทึกลับจำนวนนับ (Area) ของอีพิกัดเมียมนิวตรอน อีพิกัดเทอร์มัลนิวตรอนและเทอร์มัลนิวตรอนที่ลดลงตามความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
- วางแผ่นแคดเมียมลงบนถังโพลิเอทิลีน และนำชิ้นงานดังกล่าว วางซ้อนกันบนแผ่นแคดเมียม บันทึกลับจำนวนนับ (Area) ของอีพิกัดเมียมนิวตรอนที่ลดลงตามความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
- นำชิ้นงานที่ผลิตได้ไปทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป ที่ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

3.2.6 นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองเก่า

- นำผลการทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูปของชิ้นงานที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดสอบในรายงานเก่า
- นำผลการทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนของชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดสอบในรายงานเก่า

3.2.7 นำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ไปถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron Radiography)

- นำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ ไปถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน เพื่อดูการกระจายตัวของโบรอนออกไซด์ และผงเขม่าดำในชิ้นงาน
- โดยชิ้นงานที่เลือกมาถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน เป็นชิ้นงานที่มีปริมาณโบรอนออกไซด์ และผงเขม่าดำรวมกันมากที่สุด, น้อยที่สุด และกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด

3.2.8 การหาปริมาณของแร่บอราไซด์เบื้องต้นที่มีในประเทศไทย

- ศึกษาข้อมูลหลุมเจาะแร่โพแทชและเกลือหินในรายงานของกรมทรัพยากรธรณี
- สรุปลักษณะหลุมเจาะและปริมาณคร่าวๆที่พบการสะสมตัวของแร่บอราไซด์
- ทำแผนที่แสดงการกระจายตัวของหลุมเจาะที่พบการสะสมตัวของแร่บอราไซด์

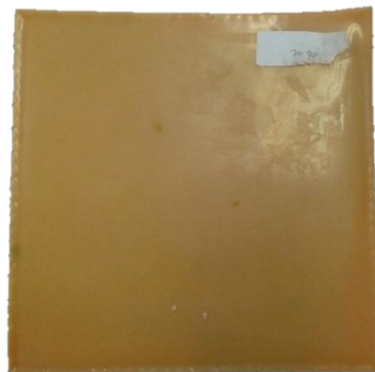
บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การหาสัดส่วนของยางผสมที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

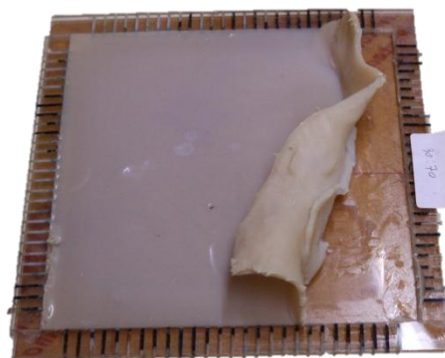
เนื่องจากยางสไตรีนบิวทาไดอีนเป็นยางที่ทนต่อแรงดึงต่ำ เมื่อใส่ในปริมาณที่มากกว่ายางพาราธรรมชาติส่งผลให้ยางผสมไม่มีความยืดหยุ่นและเกิดการฉีกขาดเมื่อลอกออกจากพิมพ์กระจก ดังนั้นยางผสมที่มีอัตราส่วนของน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนมากกว่าน้ำยางพาราธรรมชาติ จึงไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ อัตราส่วนของยางผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ คือ น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน เท่ากับ 90:10 , 80:20 , 70:30 , 60:40 และ 50:50 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการขึ้นรูปยางผสมระหว่างน้ำยางพาราธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน

อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	
ที่สามารถขึ้นรูปได้	ที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้
90 : 10	40 : 60
80 : 20	30 : 70
70 : 30	20 : 80
60 : 40	10 : 90
50 : 50	



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างของชิ้นงานยางผสมที่ (ก) สามารถขึ้นรูปได้ (ข) ไม่สามารถขึ้นรูปได้

4.2 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆที่ขึ้นรูปได้

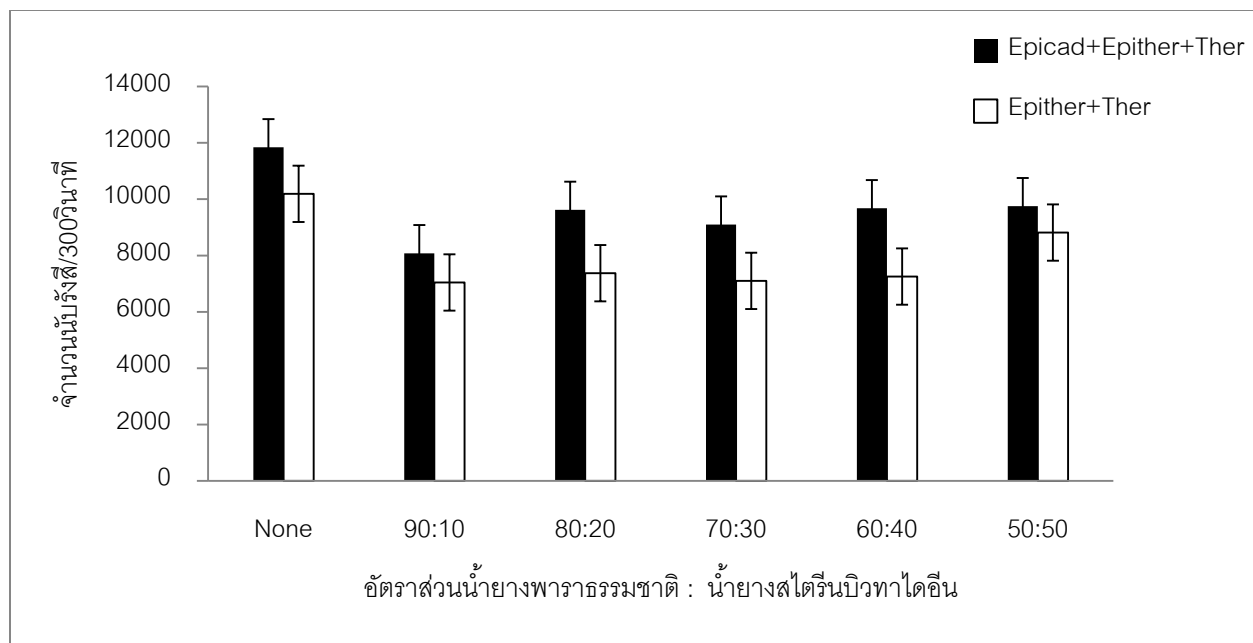
เมื่อนำยางผสมที่ขึ้นรูปได้ดังกล่าวมาทำการวัดการกำบังรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่บรรจุอยู่ในโพสิเอทิลีนทรงกระบอกพบว่ายางผสมในอัตราส่วนต่างๆสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ใกล้เคียงกันเนื่องจนวนับรังสีใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 ผลการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ (เวลาในการวัด 300 วินาที)

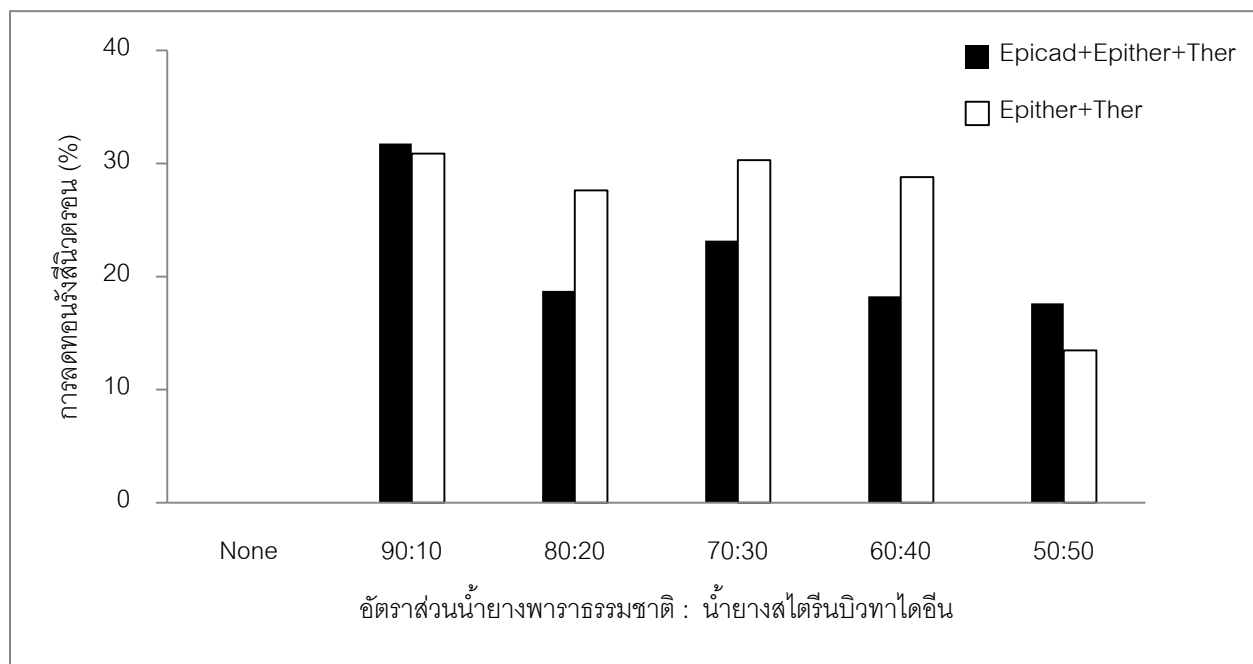
อัตราส่วน ยางผสม	จำนวนนับรังสี/300 วินาที			การลดทอนรังสีจาก ต้นกำเนิดนิวตรอน (%)		
	อีพีแคดเมียม			อีพีแคดเมียม		
	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีแคดเมียม	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีแคดเมียม	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล
ไม่มีชิ้นงาน	11,842	1,654	10,188	0	0	0
90:10	8,080	1,037	7,043	31.77	37.30	30.87
80:20	9,624	2,250	7,374	18.73	-36.03	27.62
70:30	9,097	1,996	7,101	23.18	-20.68	30.30
60:40	9,680	2,425	7,255	18.26	-46.61	28.79
50:50	9,754	938	8,816	17.63	43.29	13.47

ตารางที่ 4.3 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนยางผสม	ค่าภาคตัดขวางมหภาค (cm ⁻¹)
ไม่มีชิ้นงาน	-
90:10	1.802
80:20	0.978
70:30	1.243
60:40	0.950
50:50	0.915



ภาพที่ 4.2 กราฟแท่งแสดงจำนวนนับรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆ

4.3 การหาปริมาณวัสดุคอกลิ้งรังสีนิวตรอนและปริมาณสารเสริมแรงที่เหมาะสม

เมื่อออกแบบชิ้นงานให้มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ พบว่าชิ้นงานบางสัดส่วนไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเมื่อปริมาณรวมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำมากขึ้น ความสามารถในการละลายในน้ำยางจะน้อยลง และเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน

ตารางที่ 4.4 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ

ชิ้นงาน	ลักษณะชิ้นงาน
S1	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S2	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S3	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S4	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S5	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S6	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S7	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S8	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S9	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S10	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S11	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S12	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S13	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S14	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S15	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S16	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S17	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S18	ส่วนผสมมีความหนืด เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ

ตารางที่ 4.4 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ (ต่อ)

ชิ้นงาน	ลักษณะชิ้นงาน
S19	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S20	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S21	ส่วนผสมมีความเหนียว เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S22	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S23	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S24	ส่วนผสมมีความเหนียว เมื่อเทลงพิมพ์แล้วไม่เป็นระนาบ
S25	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S26	} ชิ้นงานไม่มีความยืดหยุ่น ไม่สามารถลอกออกจากพิมพ์ได้
S27	
S28	สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
S29	} ชิ้นงานไม่มีความยืดหยุ่น ไม่สามารถลอกออกจากพิมพ์ได้
S30	



ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำที่ขึ้นรูปได้
(อัตราส่วนน้ำยาทางพาราธรรมชาติ : น้ำยาสไตรีนบิวทาไดอิน 60 : 40
ผสมผงเขม่าดำ 1 กรัม และโบรอนออกไซด์ 1 กรัม)

4.4 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของวัสดุ ดुकกลืนรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง

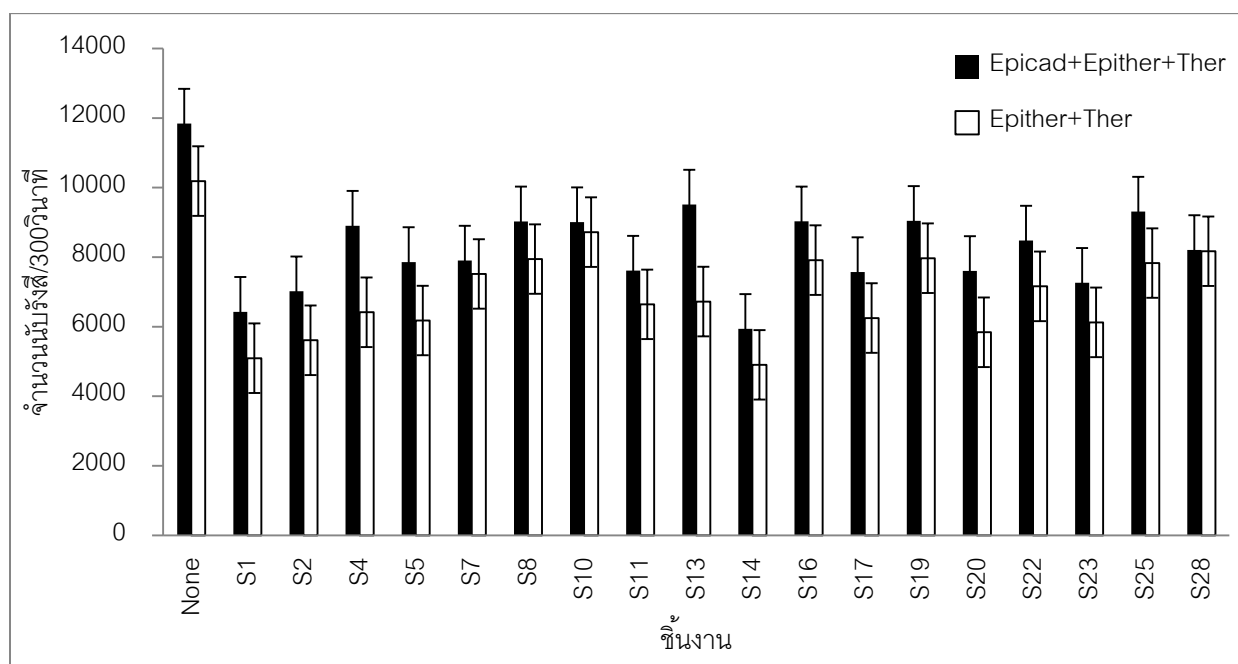
จากการทดสอบความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานทั้งหมดที่ขึ้นรูปได้ พบว่าชิ้นงานที่สามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดคือชิ้นงานหมายเลข S14 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน 70 : 30 ผสมผงเขม่าดำ 0.5 กรัม และโบรอนออกไซด์ 3 กรัม

ตารางที่ 4.5 ผลการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีวัสดุดุกกลืนรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง
(เวลาในการวัด 300 วินาที)

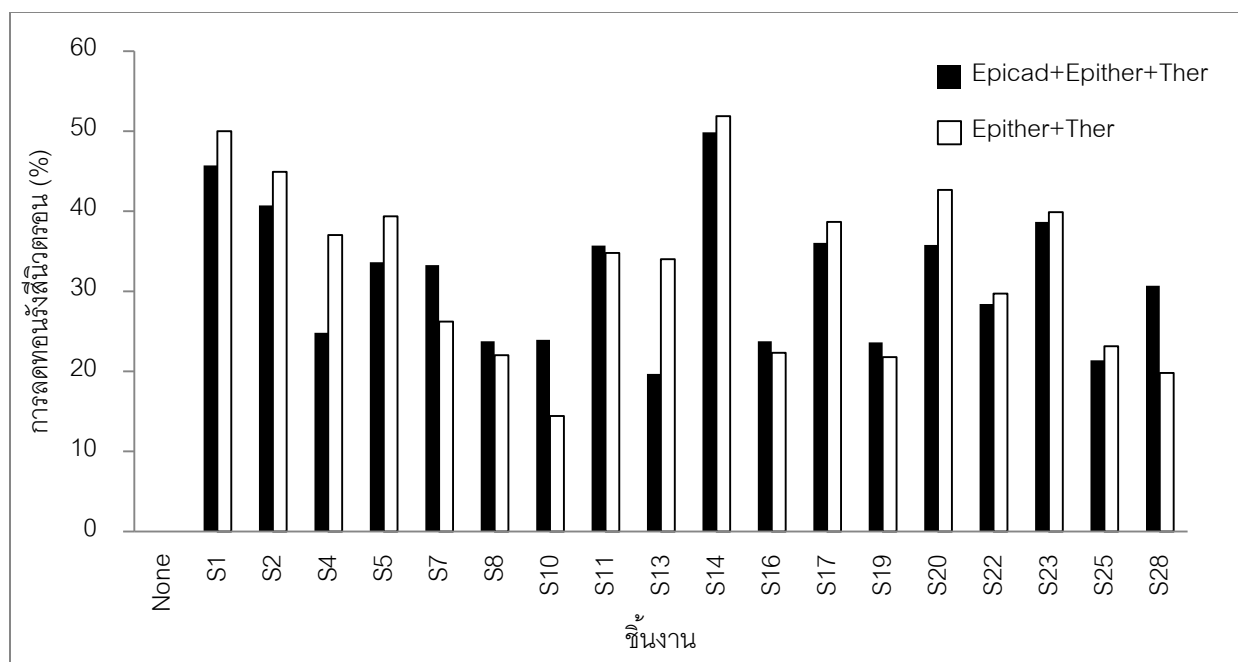
ชิ้นงาน	จำนวนนับรังสี/300 วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน (%)		
	อิพิแคดเมียม	อิพิแคดเมียม	อิพิเทอร์มัล	อิพิแคดเมียม	อิพิแคดเมียม	อิพิเทอร์มัล
	อิพิเทอร์มัล			อิพิเทอร์มัล		
ไม่มีชิ้นงาน	11,842	1,654	10,188	0	0	0
S1	6,428	1,334	5,094	45.72	19.35	50.00
S2	7,019	1,409	5,610	40.73	14.81	44.94
S4	8,903	2,488	6,415	24.82	-50.42	37.03
S5	7,859	1,681	6,178	33.64	-1.63	39.36
S7	7,903	386	7,517	33.26	76.66	26.22
S8	9,028	1,083	7,945	23.76	34.52	22.02
S10	9,008	289	8,719	23.93	82.53	14.42
S11	7,613	970	6,643	35.71	41.35	34.80
S13	9,512	2,790	6,722	19.68	-68.68	34.02
S14	5,937	1,034	4,903	49.87	37.49	51.88
S16	9,029	1,115	7,914	23.75	32.59	22.32
S17	7,572	1,323	6,249	36.06	20.01	38.66
S19	9,045	1,076	7,969	23.62	34.95	21.78

ตารางที่ 4.5 ผลการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีวัสดุคูคกีสันรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง
(เวลาในการวัด 300 วินาที) (ต่อ)

ชิ้นงาน	จำนวนนับรังสี/300 วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน (%)		
	อีพิกัดเมียม	อีพิกัดเมียม	อีพิกัดเทอร์มัล	อีพิกัดเมียม	อีพิกัดเมียม	อีพิกัดเทอร์มัล
	อีพิกัดเทอร์มัล			อีพิกัดเทอร์มัล		
S20	7,604	1,763	5,841	35.79	-6.59	42.67
S22	8,478	1,317	7,161	28.41	20.38	29.71
S23	7,262	1,137	6,125	38.68	31.26	39.88
S25	9,310	1,480	7,830	21.38	10.52	23.15
S28	8,208	38	8,170	30.69	97.70	19.81



ภาพที่ 4.5 กราฟแท่งแสดงจำนวนนับรังสีนิวตรอนของชิ้นงานในอัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.6 กราฟแท่งแสดงค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) ของชิ้นงานในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

ชิ้นงาน	ค่าภาคตัดขวางมหภาค (cm^{-1})
ไม่มีชิ้นงาน	-
S1	2.881
S2	2.466
S4	1.345
S5	1.933
S7	1.907
S8	1.279
S10	1.290
S11	2.083
S13	1.033
S14	3.255
S16	1.279

ตารางที่ 4.6 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

(ต่อ)

ชิ้นงาน	ค่าภาคตัดขวางมหภาค (cm ⁻¹)
S17	2.108
S19	1.270
S20	2.089
S22	1.576
S23	2.306
S25	1.134
S28	1.728

4.5 การหาความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้

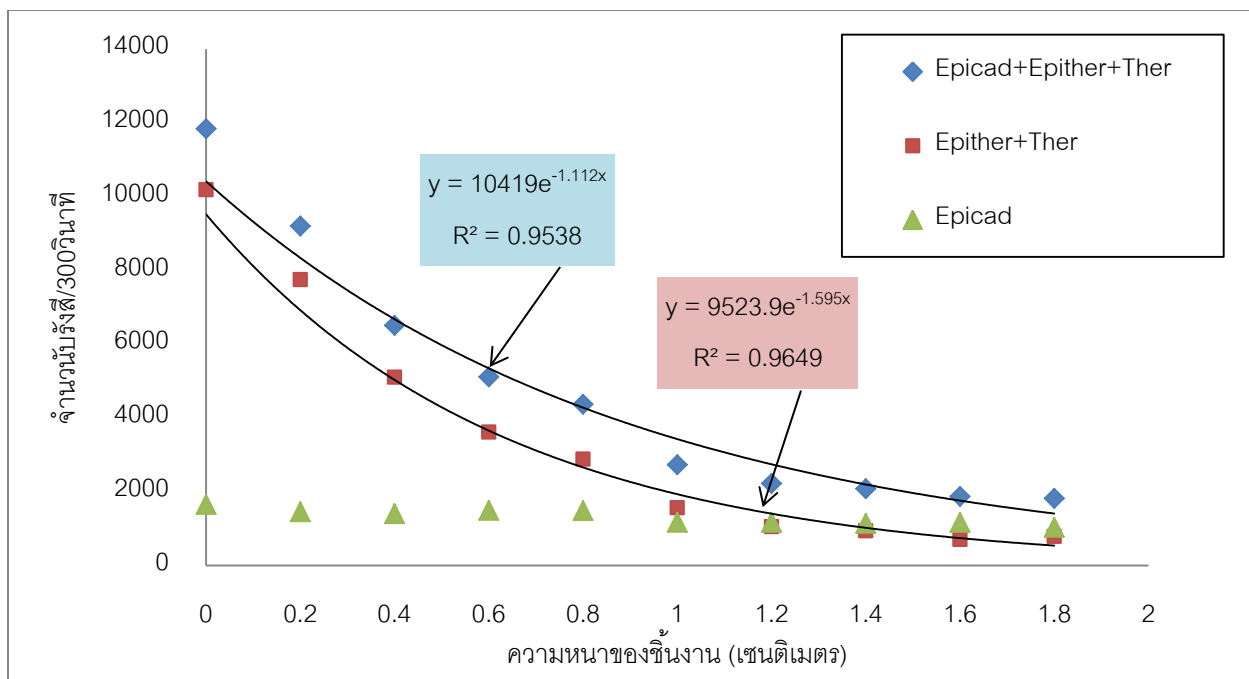
ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีจะแปรผันตรงกับความหนาของชิ้นงาน กล่าวคือ เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จำนวนนับรังสีนิวตรอนจะวัดได้น้อยลงตามไปด้วย นั่นคือการลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดก็จะเพิ่มขึ้น จึงนำชิ้นงานที่ผลิตได้มาหาความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนโดยการเพิ่มความหนาของชิ้นงาน จนได้ค่าการลดทอนที่คงที่ ชิ้นงานที่ผลิตได้นั้น มีความหนาเฉลี่ยทั้งสี่ด้าน เท่ากับ 2 มิลลิเมตร หรือ 0.2 เซนติเมตร (วัดโดย Vernier caliper) เมื่อวางชิ้นงานจนมีความหนา 1.2 เซนติเมตร (จำนวน 6 ชิ้น) จะเห็นว่าจำนวนนับรังสีนิวตรอนเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังสังเกตได้จากร้อยละการลดทอนรังสีจากต้นกำเนิดที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1% เท่านั้น

ตารางที่ 4.7 ผลการลดทอนรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น

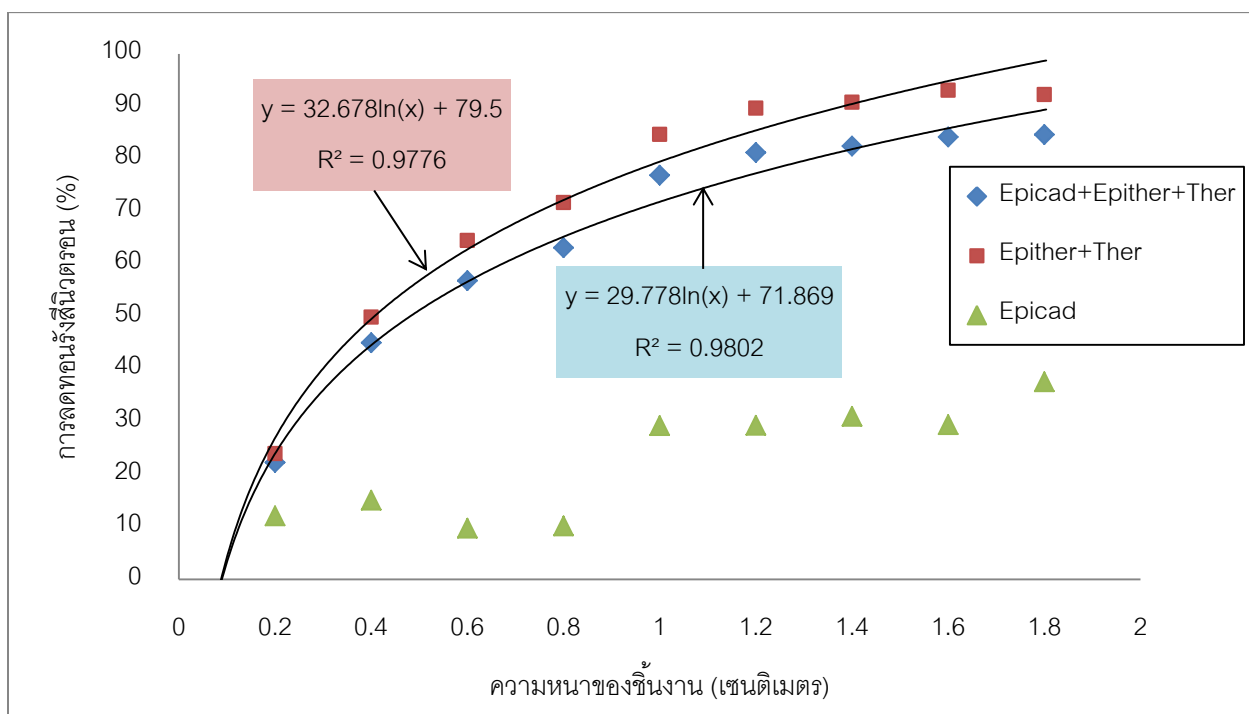
จำนวนชิ้นงาน (แผ่น)	ความหนาของชิ้นงาน(ซม.)	จำนวนนับรังสี/300วินาที			การลดทอนรังสี จากต้นกำเนิดนิวตรอน(%)		
		อีพีแคดเมียม อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีแคดเมียม	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีแคดเมียม อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล	อีพีแคดเมียม	อีพีเทอร์มัล เทอร์มัล
0	0	11,842	1,654	10,188	0	0	0
1	0.2	9,205	1,454	7,751	22.27	12.09	23.92
2	0.4	6,509	1,405	5,104	45.03	15.05	49.90
3	0.6	5,111	1,493	3,618	56.84	9.73	64.49
4	0.8	4,369	1,486	2,883	63.11	10.16	71.70
5	1	2,732	1,170	1,562	76.93	29.26	84.67
6	1.2	2,222	1,169	1,053	81.24	29.32	89.66
7	1.4	2,078	1,141	937	82.45	31.02	90.80
8	1.6	1,872	1,167	705	84.19	29.44	93.08
9	1.8	1,819	1,032	787	84.64	37.61	92.28

ตารางที่ 4.8 ค่าภาคตัดขวางที่คำนวณได้จากการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ความหนาต่างๆ

จำนวน ชิ้นงาน	ความหนาของชิ้นงาน (ซม.)	อิพิแคดเมียมนิวตรอน อิพิเทอร์มัลนิวตรอน เทอร์มัลนิวตรอน	ค่าภาคตัดขวางมหภาค (cm^{-1})
0	0	11842	-
1	0.2	9205	1.188
2	0.4	6509	1.411
3	0.6	5111	1.321
4	0.8	4369	1.175
5	1	2732	1.383
6	1.2	2222	1.315
7	1.4	2078	1.172
8	1.6	1872	1.087
9	1.8	1819	0.981



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีนิวตรอนกับความหนาของชิ้นงาน



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) กับความหนาของชิ้นงาน

4.6 การทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูป

ได้นำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ไปทดสอบสมบัติของยางคงรูปที่ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยสมบัติที่ทดสอบได้แก่

1. ความแข็ง (Shore A)
2. ความเค้นดึงเมื่อยืด 100 % (MPa)
3. ความเค้นดึงเมื่อยืด 300 % (MPa)
4. ความเค้นดึงเมื่อยืด 500 % (MPa)
5. การต้านแรงดึง (MPa)
6. ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)
7. การฉีกขาด (N/mm)

ในแต่ละสมบัติที่ทดสอบนั้นจะทดสอบทั้งสภาวะปกติและสภาวะบ่มเร่ง เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ เนื่องจากสภาวะบ่มเร่งเป็นสภาวะเสมือนว่าวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนั้นได้ถูกใช้งานมาแล้วระยะหนึ่ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับระหว่างในสภาวะปกติกับบ่มเร่ง

สมบัติ	70:30+B ₂ O ₃ +ผงเขม่าดำ		วิธีทดสอบ
	สภาวะปกติ	เมื่อบ่มเร่งที่ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง	
ความแข็ง (Shore A)	38	42	ASTM D2240-05 (2010)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 100 % (MPa)	0.9	1.2	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 300 % (MPa)	1.6	2.7	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 500 % (MPa)	3.1	6.4	ISO 37:2011 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	3.4	11.1	ISO 37:2011 (Type 1)
ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	509	599	ISO 37:2011 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)	16.6	38.6	ISO 34-1:2010

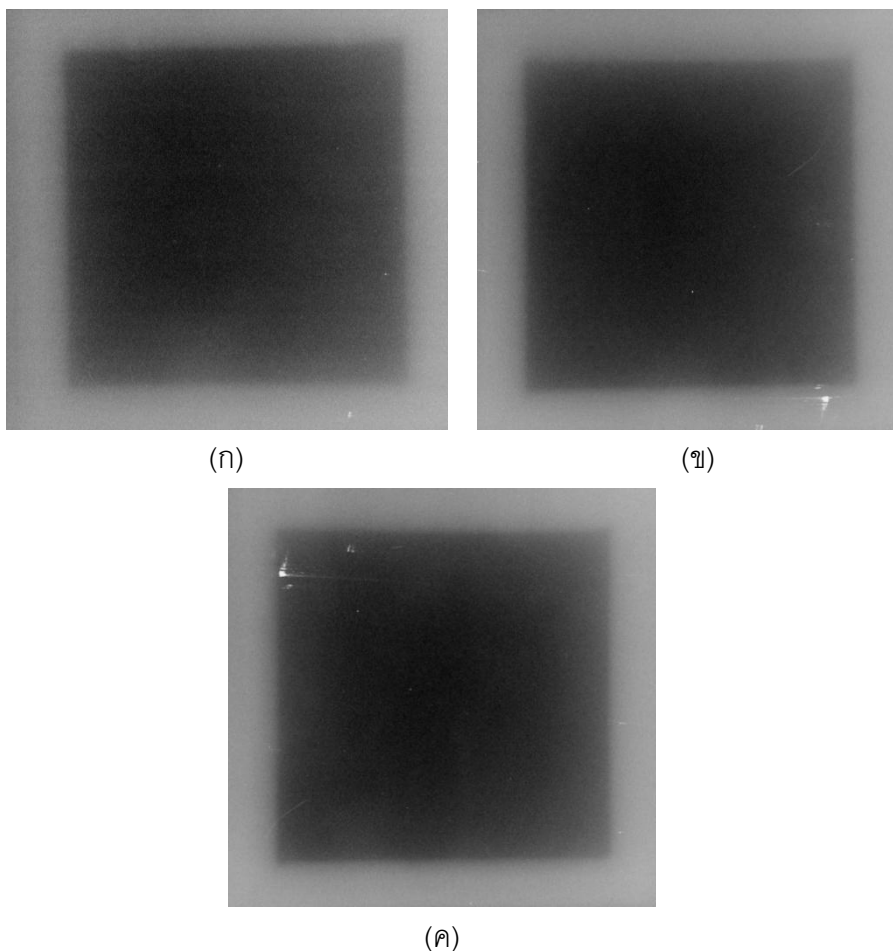
นอกจากนี้ได้นำชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของผงเขม่าดำมาทดสอบสมบัติของยางคงรูปด้วย เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชิ้นงานที่ใส่และไม่ใส่ผงเขม่าดำ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้เปรียบเทียบระหว่างใส่และไม่ใส่ผงเขม่าดำ

สมบัติ	70:30+B ₂ O ₃	70:30+B ₂ O ₃ +ผงเขม่าดำ	วิธีทดสอบ
	สภาวะปกติ		
ความแข็ง (Shore A)	39	38	ASTM D2240-05 (2010)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 100 % (MPa)	0.9	0.9	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 300 % (MPa)	1.7	1.6	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 500 % (MPa)	3.4	3.1	ISO 37:2011 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	4	3.4	ISO 37:2011 (Type 1)
ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	534	509	ISO 37:2011 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)	15.6	16.6	ISO 34-1:2010
สมบัติ	เมื่อบ่มแรงที่ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง		วิธีทดสอบ
ความแข็ง (Shore A)	41	42	ASTM D2240-05 (2010)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 100 % (MPa)	1	1.2	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 300 % (MPa)	2.4	2.7	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด 500 % (MPa)	5.5	6.4	ISO 37:2011 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	10.2	11.1	ISO 37:2011 (Type 1)
ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	622	599	ISO 37:2011 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)	40.4	38.6	ISO 34-1:2010

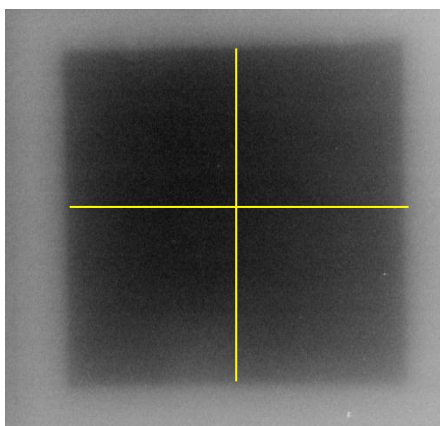
4.7 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron Radiography)

จากการเลือกชิ้นงานทั้ง 3 อัตราส่วนไปถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน เพื่อนำมาตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในชิ้นงาน โดยใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพ หนึ่งชั่วโมงสามสิบนาที ภาพถ่ายที่ได้มีดังนี้

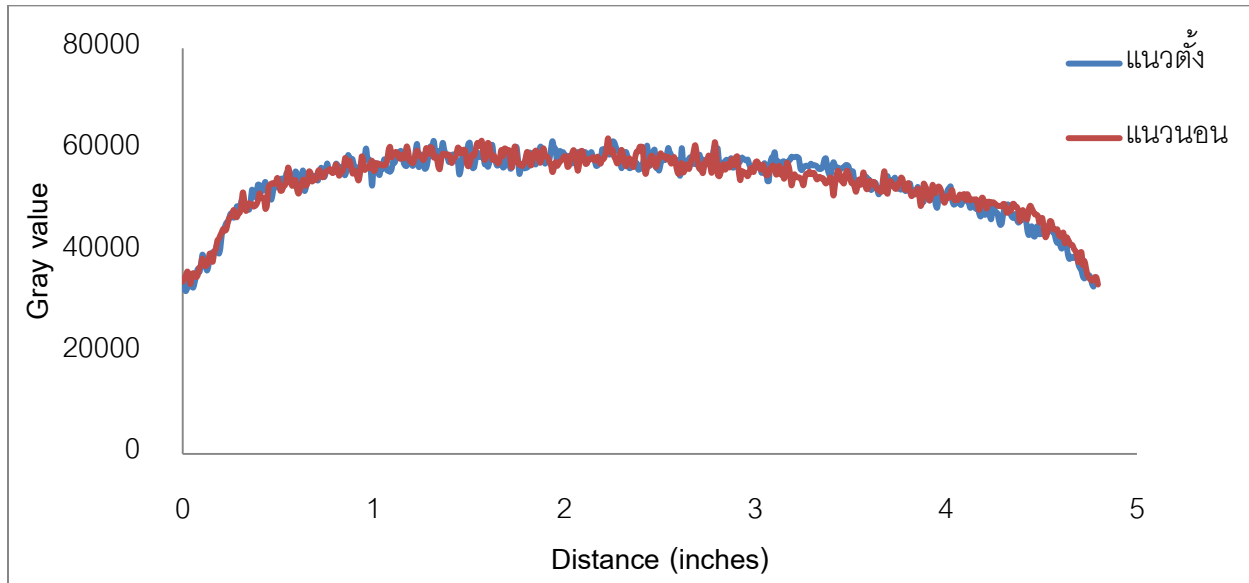


ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายของชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอนโดยแต่ละชิ้นงานมีส่วนประกอบดังนี้
 (ก) อัตราส่วนยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 0.5 phr และโบรอนออกไซด์ 1 phr
 (ข) อัตราส่วนยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 0.5 phr และโบรอนออกไซด์ 3 phr
 (ค) อัตราส่วนยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 1 phr และโบรอนออกไซด์ 3 phr

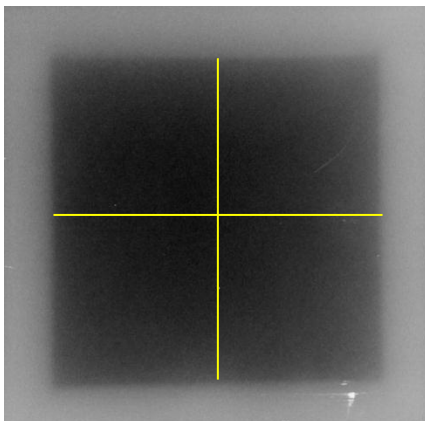
เมื่อนำภาพถ่ายที่ได้มาสร้างกราฟในโปรแกรม Image J เพื่อดูค่าความเข้มของรังสี (Gray value) ที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์ม โดยสร้างโปรไฟล์บนภาพถ่ายด้วยกัน 2 แนว คือ แนวตั้ง และ แนวนอน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ มีดังนี้



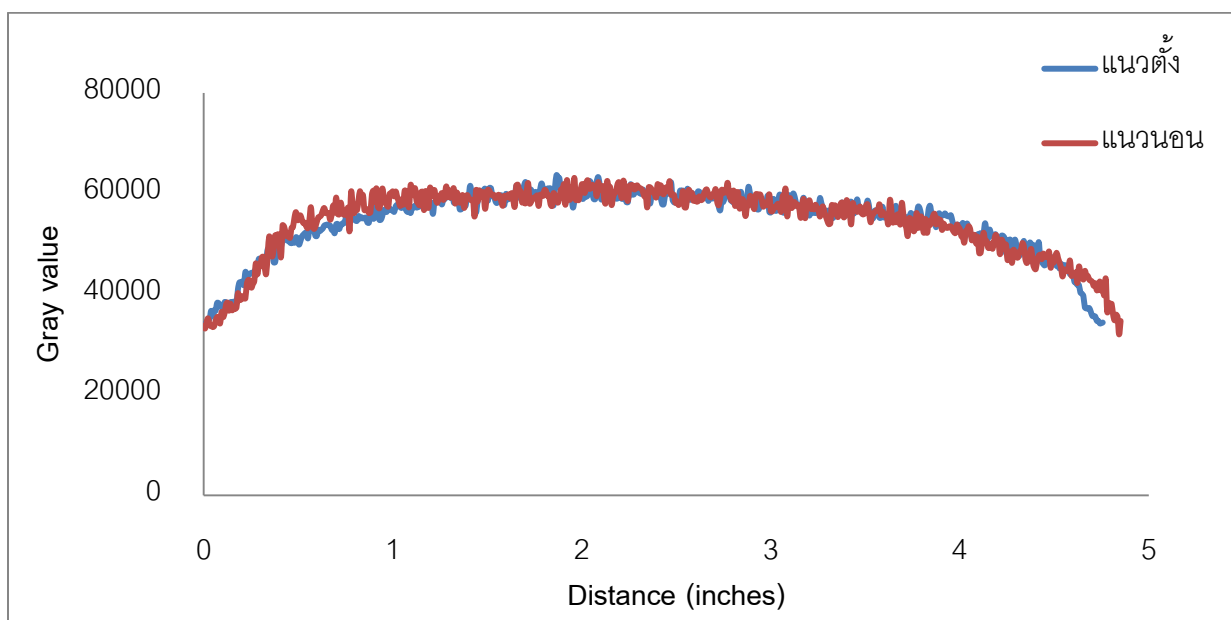
(ก)



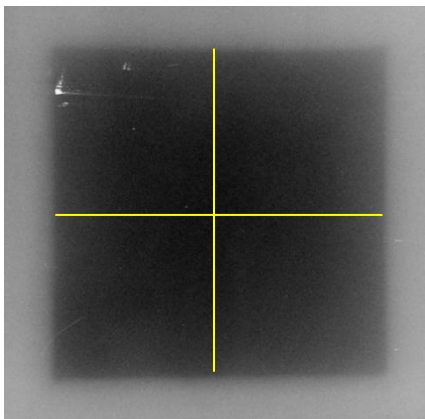
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความเข้มรังสีของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีอัตราส่วน
ยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 0.5 phr และโบรอนออกไซด์ 1 phr



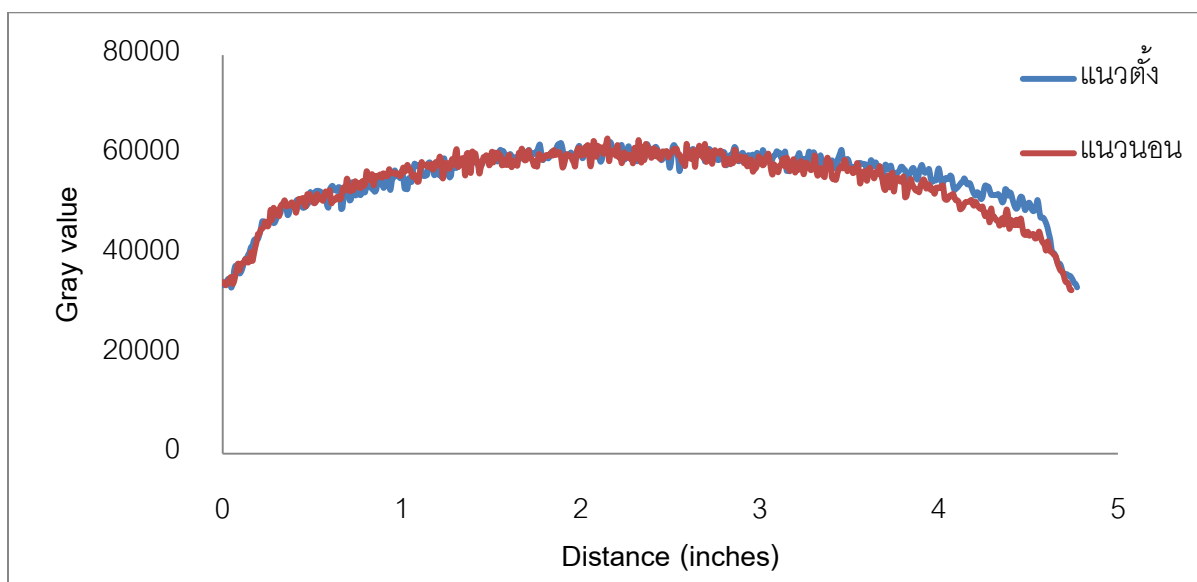
(๑)



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความเข้มรังสีของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีอัตราส่วน
 ยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 0.5 phr และโบรอนออกไซด์ 3 phr



(ค)



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความเข้มรังสีของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีอัตราส่วน
ยางผสม 70:30 ผสมผงเขม่าดำ 1 phr และโบรอนออกไซด์ 3 phr

บทที่ 5

อภิปรายผลและสรุปผล

5.1 การหาสัดส่วนของยางผสมที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอน

เนื่องจากยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางพาราธรรมชาติ อีกทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลไม่เป็นระเบียบทำให้ยางคงรูปไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืดและค่อนข้างแข็งเมื่อใส่ในปริมาณที่มากกว่ายางพาราธรรมชาติจะส่งผลให้ยางผสมไม่มีความยืดหยุ่นและเกิดการฉีกขาดเมื่อลอกออกจากพิมพ์กระจก ดังนั้นยางผสมที่มีอัตราส่วนของยางสไตรีนบิวทาไดอีนมากกว่ายางพาราธรรมชาติ จึงไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ อัตราส่วนของยางผสมที่สามารถขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์คือยางผสมที่มีอัตราส่วนของยางพาราธรรมชาติ : ยางสไตรีนบิวทาไดอีน เท่ากับ 90:10 , 80:20 , 70:30 , 60:40 , 50:50 ตามลำดับ

5.2 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมในอัตราส่วนต่างๆที่ขึ้นรูปได้

จากผลการทดสอบการกำบังรังสีนิวตรอนของยางผสมระหว่างยางพาราธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วนต่างๆ พบว่ามีความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนเท่าๆกัน เนื่องจากจำนวนนับรังสีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตจากค่าภาคตัดขวางมหภาคพบว่ามีค่าต่างกันไม่มากนัก แสดงว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับยางผสมมีเท่าๆกัน ดังนั้นสัดส่วนของยางผสมที่ต่างกันไม่มีผลต่อการกำบังรังสีนิวตรอน

5.3 การหาปริมาณวัสดุตกสีรังสีนิวตรอนและปริมาณสารเสริมแรงที่เหมาะสม

ออกแบบให้ยางผสมทุกๆสัดส่วนผสมกับโบรอนออกไซด์ในปริมาณ 1 , 3 และ 5 phr และผงเขม่าดำ 0.5 และ 1 phr ตามลำดับเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสม และกำหนดให้ชิ้นงานแต่ละสัดส่วนมีหมายเลขเป็น S1, S2, S3 จนถึง S30 พบว่าชิ้นงานบางสัดส่วนไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเมื่อผลรวมของโบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำมีมากขึ้น ความสามารถในการละลายของวัสดุดังกล่าวจะน้อยลง และเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้มีทั้งหมด 18 ชิ้นงาน ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ปริมาณของไบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำในชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้

หมายเลข ชิ้นงาน	อัตราส่วน น้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	น้ำหนัก (กรัม)	
		ผงเขม่าดำ (phr)	ไบรอนออกไซด์ (phr)
S1	90:10	0.5	1
S2			3
S4		1	1
S5			3
S7		80:20	0.5
S8	3		
S10	1		1
S11			3
S13	70:30		0.5
S14		3	
S16		1	1
S17			3
S19		60:40	0.5
S20	3		
S22	1		1
S23			3
S25	50:50		0.5
S28		1	1

5.4 การหาความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของวัสดุ ดูดกลืนรังสีนิวตรอนและสารเสริมแรง

จากผลการทดสอบความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานทั้งหมดที่ขึ้นรูปได้ พบว่าชิ้นงานที่ทำให้จำนวนนับรังสีมีค่าน้อยที่สุดคือชิ้นงานหมายเลข S14 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของน้ำยาพาราพาราธาติ : น้ำยาอสไตรีนบิวทาไดอีน ในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับผงเขม่าดำ 0.5 phr และไบรอนออกไซด์ 3 phr เมื่อดูจากค่าภาคตัดขวางมหภาคแล้วจะเห็นว่าค่าภาคตัดขวางมหภาคของชิ้นงานหมายเลข S14 มีค่ามากที่สุด ซึ่งแสดงว่ารังสีนิวตรอนและชิ้นงานดังกล่าวมีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากันมากที่สุด ไบรอนออกไซด์ที่อยู่ในชิ้นงานสามารถดูดกลืนรังสีนิวตรอนได้มากที่สุดทำให้จำนวนนับรังสีมีค่าน้อยลง และส่งผลให้การลดทอนมีค่าสูงที่สุด

5.5 การหาความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนของชิ้นงานที่ผลิตได้

เมื่อนำชิ้นงานหมายเลข S14 มากำบังรังสีนิวตรอนทั้งหมด (อีพิกัดเมียมนิวตรอน+อีพิเทอร์มัลนิวตรอน+เทอร์มัลนิวตรอน) จะเห็นว่าเมื่อชิ้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้น จำนวนนับรังสีที่วัดได้จะมีค่าลดลงในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจะมีปริมาณของตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน คืออย่างผสม และวัสดุดูดกลืนนิวตรอน คือ ไบรอนออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้รังสีนิวตรอนถูกดูดกลืนได้มากขึ้นตามลำดับ

ความหนาที่เหมาะสมในการกำบังรังสีนิวตรอนที่ทำให้จำนวนนับรังสีนิวตรอนมีค่าลดลงจนคงที่พบว่าเมื่อวางชิ้นงานจำนวนตั้งแต่ 6 ชิ้น จนมีความหนารวมตั้งแต่ 1.2 เซนติเมตรเป็นต้นไป จำนวนนับรังสีนิวตรอนมีค่าลดลงและเริ่มคงที่ แม้ว่า会增加ความหนาของชิ้นงานมากขึ้นเป็น 1.4, 1.6 หรือ 1.8 เซนติเมตร จำนวนนับรังสีนิวตรอนและร้อยละของการลดทอนรังสีก็ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าเดิม เนื่องจากที่ความหนา 1.2 เซนติเมตร รังสีนิวตรอนได้ถูกกำบังไว้จนเกือบหมดแล้ว ที่ความหนาดังกล่าวพบว่าค่าภาคตัดขวางมหภาคเท่ากับ 1.315 ซม.^{-1} และมีค่า HVL เท่ากับ 0.6 ซม.

5.6 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูป

5.6.1 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับระหว่างในสภาวะปกติกับบ่มเร่ง

เมื่อนำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ คือ ยางผสมที่มีอัตราส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติ : น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วน 70:30 ร่วมกับผงเขม่าดำ 0.5 phr และโบรอนออกไซด์ 3 phr ไปทดสอบสมบัติของยางคงรูป ผลที่ได้เปรียบเทียบกับระหว่างสภาวะธรรมดาและสภาวะบ่มเร่ง ตามทฤษฎีแล้วสภาวะบ่มเร่งคือสภาวะที่วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนถูกใช้งานมาได้ระยะหนึ่ง สมบัติต่างๆควรจะมีค่าลดลง แต่จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าในสภาวะบ่มเร่งกลับมีค่าสูงขึ้น

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขั้นตอนที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานดังกล่าวเพื่อที่จะให้ชิ้นงานเกิดการวัลคาไนซ์นั้น ณ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนอาจจะยังไม่ถึงจุดที่วัลคาไนซ์จริงๆกระบวนการเชื่อมโมเลกุลของยางจึงไม่สมบูรณ์ เมื่อนำชิ้นงานดังกล่าวไปบ่มเร่งจึงเสมือนไปทำการวัลคาไนซ์ต่อค่าที่ได้จึงเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส แต่ชิ้นงานที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นชิ้นงานที่มีส่วนผสมหลายอย่าง ได้แก่ น้ำยางพาราธรรมชาติ น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน โบรอนออกไซด์ และผงเขม่าดำ ดังนั้นอุณหภูมิดังกล่าวอาจจะยังไม่เหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อมโมเลกุลของชิ้นงานที่ผลิตก็เป็นได้

5.6.2 ผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับระหว่างใส่และไม่ใส่ผงเขม่าดำ

เมื่อนำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ไม่มีส่วนผสมของผงเขม่าดำไปทดสอบสมบัติของยางคงรูปเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตได้ ตามทฤษฎีแล้วสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่ไม่มีผงเขม่าดำควรจะมีค่าต่ำกว่าเนื่องจากผงเขม่าดำจะเสริมประสิทธิภาพของยางคงรูปให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยเข้าไปทำหน้าที่ยึดพันธะภายในยาง แต่ผลที่ได้คือชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของผงเขม่าดำในสภาวะธรรมดามีค่าสูงกว่าเล็กน้อย และในสภาวะบ่มเร่งมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำยางที่มีสถานะเป็นของเหลว จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ผงเขม่าดำไม่ได้เข้าไปยึดกับพันธะของน้ำยางทั้งหมด และอาจมีบางส่วนที่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของน้ำยางทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการยึดเกาะน้อยลง

ส่วนในสภาวะบ่มแรงจะเห็นว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของผงเขม่าดำยังมีค่าต่างๆ สูงกว่า แสดงให้เห็นว่าแม้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้นี้จะถูกใช้งานมาไ้ระยะเวลาหนึ่งก็ตามแต่สมบัติต่างๆ ก็ยังดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของผงเขม่าดำ

5.7 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้

ตารางที่ 5.2 ส่วนประกอบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ในงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้

โดยเป็นส่วนประกอบที่กำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด

ส่วนประกอบของชิ้นงาน	ชฎานิษฐ์ จำปี (2553)	งานวิจัยครั้งนี้
ประเภทของยางผสม	น้ำยางพาราธรรมชาติ น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอิน	น้ำยางพาราธรรมชาติ น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอิน
อัตราส่วน	70:30	70:30
น้ำหนักยางผสม	25 กรัม	100 กรัม
วัสดุดูดกลืนนิวตรอน	กรดบอริกชนิดผง (H_3BO_3) 4 phr ผงโบรอน (B) 0.7 phr	โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) 3 phr
สารเสริมแรง	-	ผงเขม่าดำ (Carbon Black) 0.5 phr
ปริมาณของโบรอน	0.35 กรัม	0.93 กรัม
% ของโบรอนในชิ้นงาน	1.4 %	0.93 %
จำนวนชิ้นงานที่การกำบังรังสีนิวตรอนเริ่มคงที่	8 แผ่น	6 แผ่น
ความหนาที่การกำบังรังสีนิวตรอนเริ่มคงที่	1.6 cm	1.2 cm
ร้อยละการลดทอนรังสีนิวตรอน	75	81
HVL	0.8 ซม.	0.6 ซม.
ค่าภาคตัดขวางมหภาค	0.871 ซม.^{-1}	1.315 ซม.^{-1}

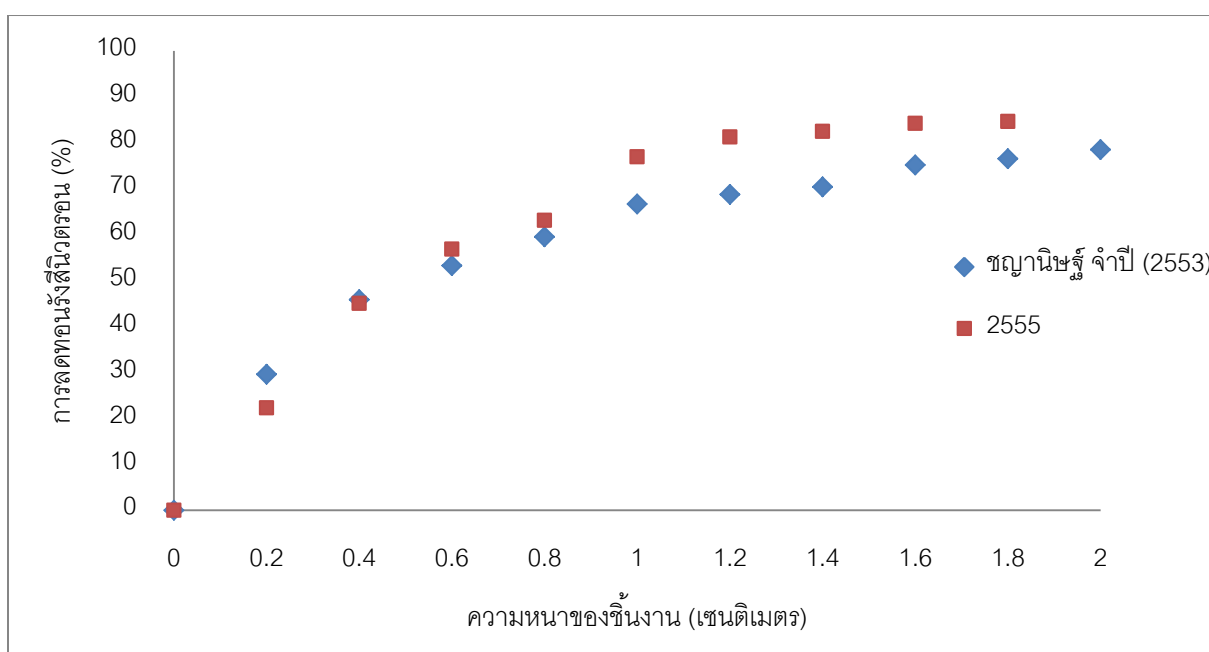
5.7.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้

สมบัติ	ชฎานิษฐ์ จำปี (2553)	งานวิจัยครั้งนี้	วิธีทดสอบ
	70:30+H ₃ BO ₃ +B	70:30+B ₂ O ₃ +ผงเขม่าดำ	
สภาวะปกติ			
ความแข็ง (Shore A)	36	38	ASTM D2240-05 (2010)
ความเค้นดึงเมื่อยืด100% (MPa)	0.8	0.9	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด300% (MPa)	1.3	1.6	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด500% (MPa)	2.4	3.1	ISO 37:2011 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	3.6	3.4	ISO 37:2011 (Type 1)
ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	583	509	ISO 37:2011 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)	20.5	16.6	ISO 34-1:2010
สมบัติ	เมื่อบ่มแรงที่ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง		วิธีทดสอบ
ความแข็ง (Shore A)	42	42	ASTM D2240-05 (2010)
ความเค้นดึงเมื่อยืด100% (MPa)	0.9	1.2	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด300% (MPa)	2.2	2.7	ISO 37:2011 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อยืด500% (MPa)	4.5	6.4	ISO 37:2011 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	11.4	11.1	ISO 37:2011 (Type 1)
ความทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	688	599	ISO 37:2011 (Type 1)
การฉีกขาด (N/mm)		38.6	ISO 34-1:2010

เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติของยางคงรูปที่ได้มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าค่าต่าง ๆ ทั้งในสภาวะธรรมดาและสภาวะบ่มแรงของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าในงานวิจัยเก่า แต่สมบัติการต้านแรงดึง ความทนต่อแรงยืดจนขาดและการฉีกขาดมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะผลรวมของวัสดุดูดกลืนรังสีนิวตรอนและผงเขม่าดำที่ใส่ลงไปผสมกับน้ำยางมีมากกว่าทำให้เกิดการแทรกหวางช่องว่างมากกว่าจึงเป็นผลให้สมบัติดังกล่าวน้อยลงตามไปด้วย

5.7.2 เปรียบเทียบผลการลดทอนรังสีนิวตรอนระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้



ภาพที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีนิวตรอน (%) กับความหนาของชิ้นงานระหว่างงานวิจัยเก่าและงานวิจัยครั้งนี้

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่างๆตามตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ของโบรอนในชิ้นงานของชฎานิษฐ์ จำปี (2553) มีมากกว่า แต่เมื่อนำผลการลดทอนรังสีนิวตรอนที่ได้มาเปรียบเทียบกันแล้ว จากกราฟการลดทอนรังสีนิวตรอนในภาพที่ 5.1 จะเห็นว่าวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีร้อยละของการลดทอนเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 0.6 เซนติเมตร ร้อยละของการลดทอนรังสีนิวตรอนก็เพิ่มขึ้นจนมากกว่าของชฎานิษฐ์ จำปี และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีร้อยละการลดทอนรังสีคงที่ โดยความหนาที่เหมาะสมที่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจน

คงที่คือ 1.2 เซนติเมตร (เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นงาน 6 ชั้น) ซึ่งสามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดได้ประมาณ 81% ในขณะที่ของชฎานิษฐ์ จำปี ความหนาที่เหมาะสมที่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจนคงที่คือ 1.6 เซนติเมตร (เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นงาน 8 ชั้น) สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดได้ 75%

จะเห็นได้ว่าในงานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณโบรอนน้อยกว่าและความหนาของชั้นงานน้อยกว่า แต่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดได้มากกว่า ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในด้านการลดค่าใช้จ่ายและวัสดุขีปนาวุธได้

ในธรรมชาติพบว่าธาตุโบรอนเป็นส่วนประกอบหนึ่งของแร่บอราไซต์ (Boracite; $Mg_3B_7O_{13}Cl$) ที่สามารถพบได้ในประเทศไทย การทำความเข้าใจต่อลักษณะและการเกิด จึงเป็นประโยชน์ในเบื้องต้นต่องานวิจัยในอนาคต หากมีการนำแร่นี้มาใช้งาน

5.8 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron Radiography)

ผลการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนของชิ้นงานทั้ง 3 อัตราส่วน โดยทุก ๆ ชิ้นงานมีส่วนผสมของน้ำยางพาราธรรมชาติ และน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน ในอัตราส่วน 70:30 เหมือนกัน แต่มีปริมาณรวมของผงเขม่าดำ และโบรอนออกไซด์ต่างกัน คือ มากที่สุด น้อยที่สุด และกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด เพื่อที่จะดูการกระจายตัวของอนุภาคในชิ้นงาน โดยการนำภาพถ่ายที่ได้มาสร้างโปรไฟล์ในแนวตั้งและแนวนอน ผลที่ได้คือ ชิ้นงานแต่ละอัตราส่วนมีค่าความเข้มรังสีใกล้เคียงกัน ทั้งแนวตั้ง และแนวนอน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีการกระจายตัวของผงเขม่าดำ และโบรอนออกไซด์สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานเช่นกัน

5.9 การหาปริมาณของแร่บอราไซต์ในเบื้องต้นที่มีในประเทศไทย

แร่บอราไซต์ (Boracite; $Mg_3B_7O_{13}Cl$) เป็นแร่หนึ่งในกลุ่มหินเกลือระเหย (Evaporite minerals) ที่พบในประเทศไทย โดยพบในสภาวะแวดล้อมที่เกิดจากการระเหยของน้ำทะเล มักจะเกิดร่วมกับเกลือหินและโพแทช การสะสมตัวของเกลือหินและโพแทชในประเทศไทยพบเฉพาะบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทย บริเวณที่ราบสูงเรียกว่าที่ราบสูงโคราช แบ่งเป็นแอ่งย่อย 2 แอ่ง คือแอ่งสกลนคร (ด้านเหนือ) และแอ่งโคราช (ด้านใต้) ซึ่งน้ำทะเลจะไหลเข้ามารวมอยู่ในแอ่งหลายครั้ง เกิดการสะสมตัวหลายครั้ง เกิดเป็นเกลือหินและแร่โพแทชจนถึงปัจจุบัน

ชั้นของเกลือหินและแร่โพแทชจะพบอยู่ในหมวดหินมหาสารคาม (Mahasarakham Formation) ในกลุ่มหินโคราช ซึ่งอยู่ในยุค Late Cretaceous (ประมาณ 70 ล้านปีมาแล้ว)



ภาพที่ 5.2 บริเวณของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครบนที่ราบสูงโคราช

ที่มา: GEOTHAI'07 International Conference on Geology of Thailand



(ก)

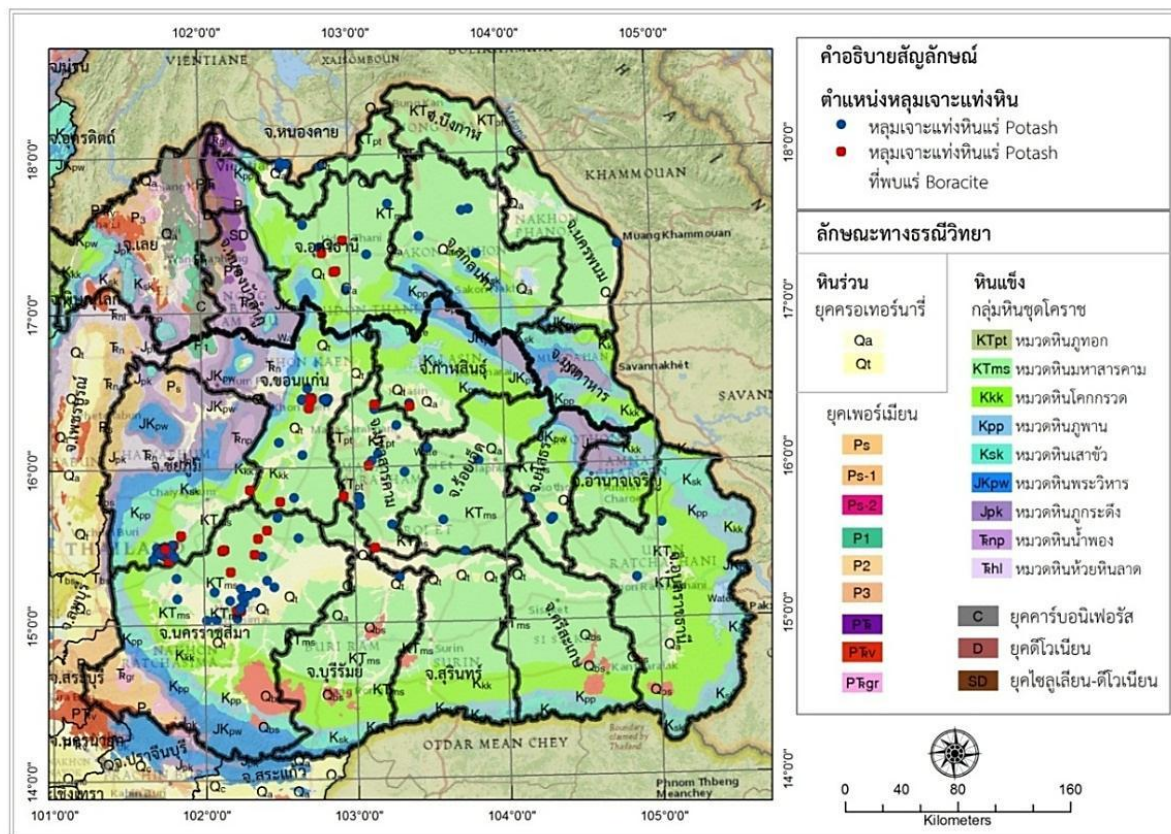
(ข)

ภาพที่ 5.3 ลักษณะของแท่งหินที่พบการสะสมตัวของแร่บอราไซด์

(ก) แร่ซิลิไนต์ (ข) คาร์เนลไลต์ และแทชซีไฮโดรท์

ที่มา: GEOTHAI'07 International Conference on Geology of Thailand

จากข้อมูลการเจาะสำรวจหาการกระจายของแร่โพแทชและเกลือหินของกรมทรัพยากรธรณี จำนวน 194 หลุม แบ่งเป็นในแอ่งสกลนคร 19 หลุม และแอ่งโคราช 175 หลุม หลุมเจาะที่มีรายงานว่าพบการสะสมตัวของแร่บอราไซด์เป็นหลุมเจาะในจังหวัดชัยภูมิ กาฬสินธุ์ ขอนแก่น มหาสารคาม นครราชสีมา และอุดรธานี ทั้งที่สามารถระบุความสมบูรณ์เป็นเปอร์เซ็นต์ได้และไม่สามารถระบุได้รวม 60 หลุม ที่ระดับช่วงความลึกตั้งแต่ 60 ถึง 1,166 เมตร [10]



ภาพที่ 5.4 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะแท่งหินแร่โพแทชและเกลือหิน (สีน้ำเงิน)

และตำแหน่งหลุมเจาะแท่งหินแร่โพแทชและเกลือหินที่พบแร่บอราไซต์ (สีแดง)

ดัดแปลงจาก: www.dmr.go.th

ตารางที่ 5.4 หลุมเจาะที่มีการระบุเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ของแร่บอราไซต์ [11],[12]

หมายเลข หลุมเจาะ	จังหวัด	ความลึกของหลุม (เมตร)	ความลึกที่พบ (เมตร)	หน่วยหิน/แร่	%ความสมบูรณ์ แร่บอราไซต์
K053	ขอนแก่น	498	283.54-324.31	คาร์บอเนต	2%
K072	ขอนแก่น	454	165.63-166.94	แทชชีไฮโดรต์ คาร์บอเนต	1%
K080	นครราชสีมา	521.82	80.44-104.93	เกลือหิน	10%
K084	นครราชสีมา	378	301.78-347.30	เกลือหิน	1%
K102	นครราชสีมา	224	146.23-160.17	แทชชีไฮโดรต์ คาร์บอเนต	6%
K107	ขอนแก่น	220	149.05-154.16	ซิลิเกต	2%
K118	ขอนแก่น	325	271.30-282.03	ซิลิเกต เฮไลต์	5%
KB002	ชัยภูมิ	356.4	144.84-163.92	แทชชีไฮโดรต์	5%
KB003	ชัยภูมิ	176	129.64-148.90	คาร์บอเนต เฮไลต์	2%
KB009	ชัยภูมิ	319	271.63-284.00	แทชชีไฮโดรต์ คาร์บอเนต	น้อยกว่า 1%
KB011	ชัยภูมิ	233	166.86-185.96	แทชชีไฮโดรต์	1%
KB016	ชัยภูมิ	355.5	335.65-340.00	คาร์บอเนต แทชชีไฮโดรต์ เฮไลต์	3%

ผลจากการสำรวจดังกล่าวทำให้ทราบว่าในแง่สกลนครและแง่โคราชของประเทศไทยมีปริมาณสำรองของเกลือหิน 18,000,000 ล้านตัน คาร์บอเนต 400,000 ล้านตัน ซิลิเกต 7,000 ล้านตัน และแทชชีไฮโดรท์ 200,000 ล้านตัน [13]

วิธีคำนวณปริมาณแร่บอราไซด์คร่าว ๆ สามารถทำได้โดยการนำเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ไปคูณกับปริมาณสำรองของหน่วยหิน/แร่ที่พบ แต่เนื่องจากหลุมเจาะที่พบการสะสมตัวของแร่บอราไซด์มีทั้งที่สามารถและไม่สามารถระบุเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ได้ หากคิดในกรณีเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ที่น้อยที่สุดจากหลุมเจาะที่สามารถระบุเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ได้ โดยใช้สมมุติฐานว่าหน่วยหิน/แร่ที่มีในประเทศไทยทั้งหมดจะมีเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ค่านี้น้อยที่สุดตามตารางที่ 5.4 จะได้

- พบแร่บอราไซด์ที่สะสมตัวอยู่ในเกลือหินมีความสมบูรณ์อย่างน้อย 1% ดังนั้นปริมาณของแร่บอราไซด์ในเกลือหินคิดเป็น $1\% \times 18,000,000$ ล้านตัน = 180,000 ล้านตัน

- พบแร่บอราไซด์ที่สะสมตัวอยู่ในแทชชีไฮโดรท์มีความสมบูรณ์อย่างน้อย 1% ดังนั้นปริมาณของแร่บอราไซด์ในแทชชีไฮโดรท์คิดเป็น $1\% \times 200,000$ ล้านตัน = 2,000 ล้านตัน

- พบแร่บอราไซด์ที่สะสมตัวอยู่ในคาร์บอเนตมีความสมบูรณ์อย่างน้อย 2% ดังนั้นปริมาณของแร่บอราไซด์ในคาร์บอเนตคิดเป็น $2\% \times 400,000$ ล้านตัน = 8,000 ล้านตัน

- พบแร่บอราไซด์ที่สะสมตัวอยู่ในซิลิเกตมีความสมบูรณ์อย่างน้อย 2% ดังนั้นปริมาณของแร่บอราไซด์ในซิลิเกตคิดเป็น $2\% \times 7,000$ ล้านตัน = 140 ล้านตัน

ดังนั้นปริมาณของแร่บอราไซด์ในประเทศไทย จากข้อมูลการขุดเจาะที่มีอยู่ทั้งหมดนี้ มีปริมาณอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ $180,000 + 2,000 + 8,000 + 140 = 190,140$ ล้านตัน

5.10 ข้อเสนอแนะ

1. แม้ว่าอุณหภูมิโดยทั่วไปของการวัดคาโนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส แต่ก็ต้องพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ มีส่วนผสมของอะไรบ้าง หากส่วนผสมมีหลายชนิด อุณหภูมิดังกล่าวอาจจะไม่เพียงพอหรือไม่เหมาะสมต่อการวัดคาโนซ์ ส่งผลให้กระบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลยางเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จึงควรนำชิ้นงานที่ผลิตได้ไปทำการวัดคาโนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ หรือที่ระยะเวลาต่างๆกัน ที่จะทำให้ได้ค่าของสมบัติของยางคงรูปสูงที่สุด เพื่อหาเวลาหรืออุณหภูมิที่แท้จริงของการวัดคาโนซ์ชิ้นงานในงานวิจัยนี้

2. ในการทดสอบสมบัติยางคงรูปให้ได้ค่าที่เชื่อถือได้ ควรจะส่งชิ้นงานตรวจประมาณ 5 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้แนวโน้มในแต่ละค่า

3. ควรศึกษาอายุการใช้งานของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ ในหน่วยของ Neutron fluence ด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานจริง

4. B_2O_3 เมื่อสัมผัสกับน้ำสามารถกลับไปเป็นกรดบอริกได้ ดังนั้นควรลดเวลาของการขึ้นรูปชิ้นงานให้ไวขึ้น ทำให้ชิ้นงานแห้งไวกว่าเดิม เช่น สองชั่วโมง

5. ปัจจุบันแท่งหินแร่โพแทชและเกลือหินถูกเก็บอยู่ที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาล จ.ขอนแก่น แต่การขออนุญาตเพื่อนำออกมาใช้งานนั้นค่อนข้างลำบาก เนื่องจากแร่โพแทชและเกลือหินเมื่อสัมผัสกับอากาศจะทำให้เกิดความชื้นและอาจจะสร้างความเสียหายแก่ตัวอย่างดังกล่าวได้ หากในอนาคตสามารถนำแท่งหินแร่โพแทชและเกลือหินออกมาขายได้ ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์ในแง่ของการนำบอราไซต์มาสกัด เพื่อนำธาตุโบรอนมาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนนิวตรอนได้ และจะสามารถลดการนำเข้าโบรอนจากต่างประเทศได้

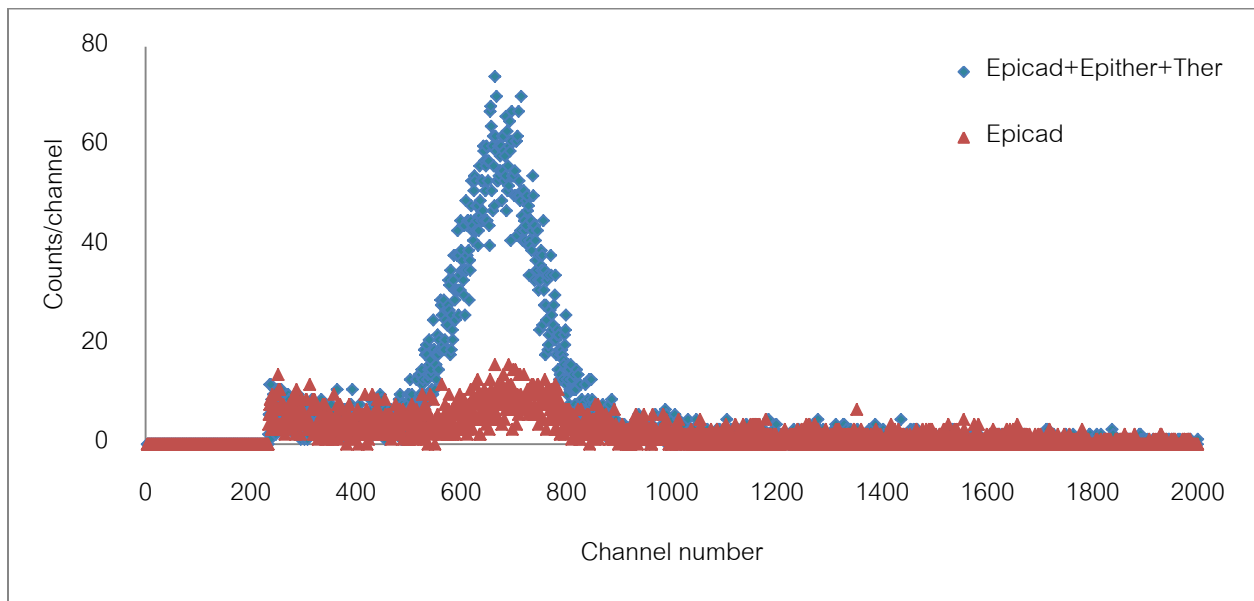
รายการอ้างอิง

- [1] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. โบรอน. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/โบรอน> [21 กุมภาพันธ์ 2555]
- [2] Excalibur Mineral Company. Boracite Mineral Data. [ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: <http://webmineral.com/data/Boracite.shtml> [9 เมษายน 2555]
- [3] Gwaily, S.E., Badawy, M.M., Hassan, H.H., and Madani, M. Natural rubber composites as thermal neutron radiation Shields I. B₄C/NR composites. Polymer Testing 21 (2002): 129-133.
- [4] Gwaily, S.E., Badawy, M.M., Hassan, H.H., and Madani, M. Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields II - H₃BO₃/NR composites. Polymer Testing 21 (2002): 513-517.
- [5] ชญาณิชฐ์ จำปี. การขึ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนที่ประกอบด้วยยางพาราธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เอสบีอาร์และสารดูดกลืนนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [6] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. โบรอนไตรออกไซด์. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Boron_trioxide [21 กุมภาพันธ์ 2555]
- [7] สถาบันวิจัยยาง. ข้อมูลวิชาการยางพารา. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, 2553.
- [8] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ยางสังเคราะห์. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ยางสังเคราะห์> [9 เมษายน 2555]
- [9] กรมทรัพยากรธรณี. โครงการจัดทำแนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรแร่โพแทช. กรุงเทพมหานคร: 2552.
- [10] ธวัช จาปะเกษตรร์ และ ปกรณ์ สุวานิช. POTASH AND ROCK SALT IN THAILAND. กรุงเทพมหานคร: 2529.

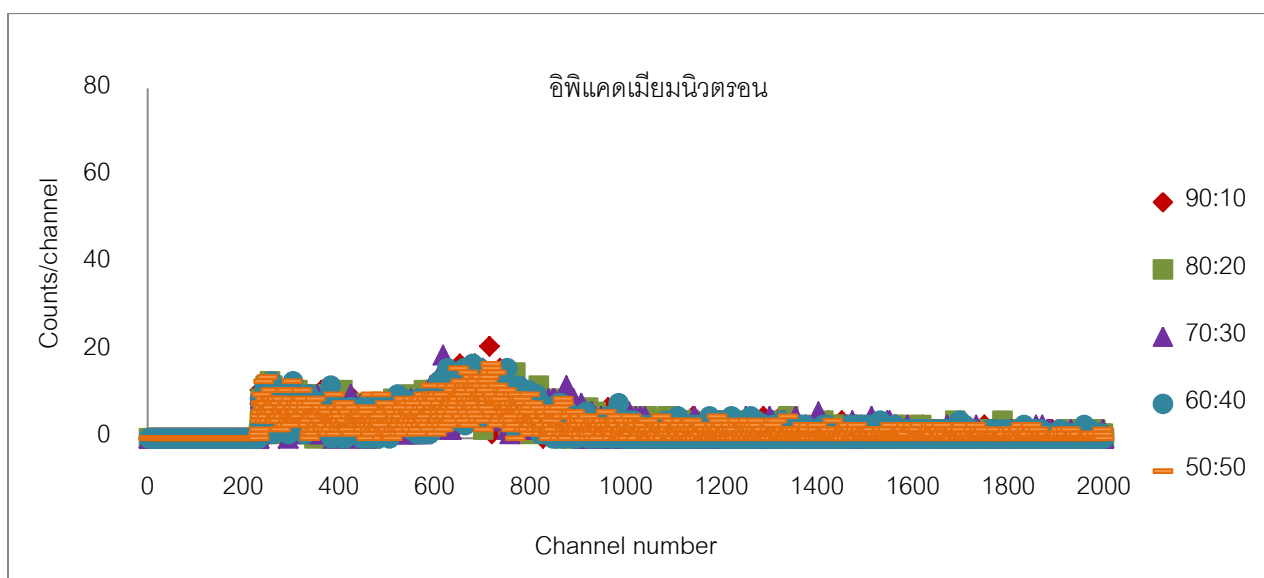
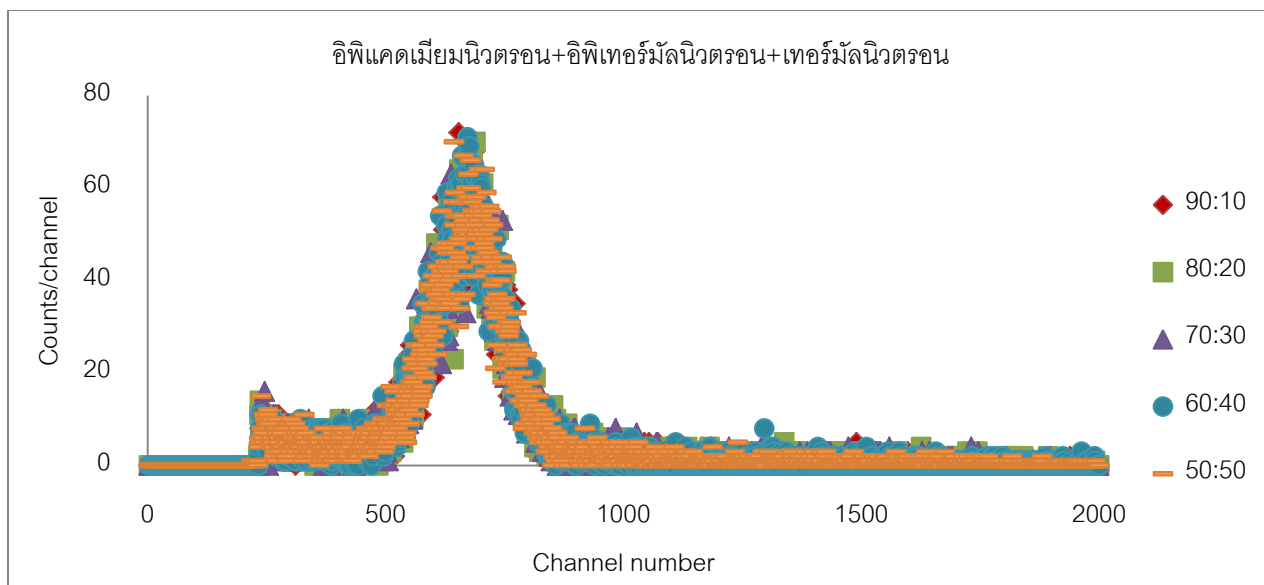
- [11] ธวัช จาปะเกษตรร์ และ ปกรณ์ สุวานิช. POTASH AND ROCK SALT IN THAILAND APPENDIX A. กรุงเทพมหานคร: 2525.
- [12] ธวัช จาปะเกษตรร์ และ ปกรณ์ สุวานิช. POTASH AND ROCK SALT IN THAILAND APPENDIX C. กรุงเทพมหานคร: 2526.
- [13] ปกรณ์ สุวานิช. POTASH-EVAPORITE DEPOSITS IN THAILAND. ใน รายงานการประชุม
นานาชาติธรณีวิทยาประเทศไทย, หน้า 252-262.

ภาคผนวก

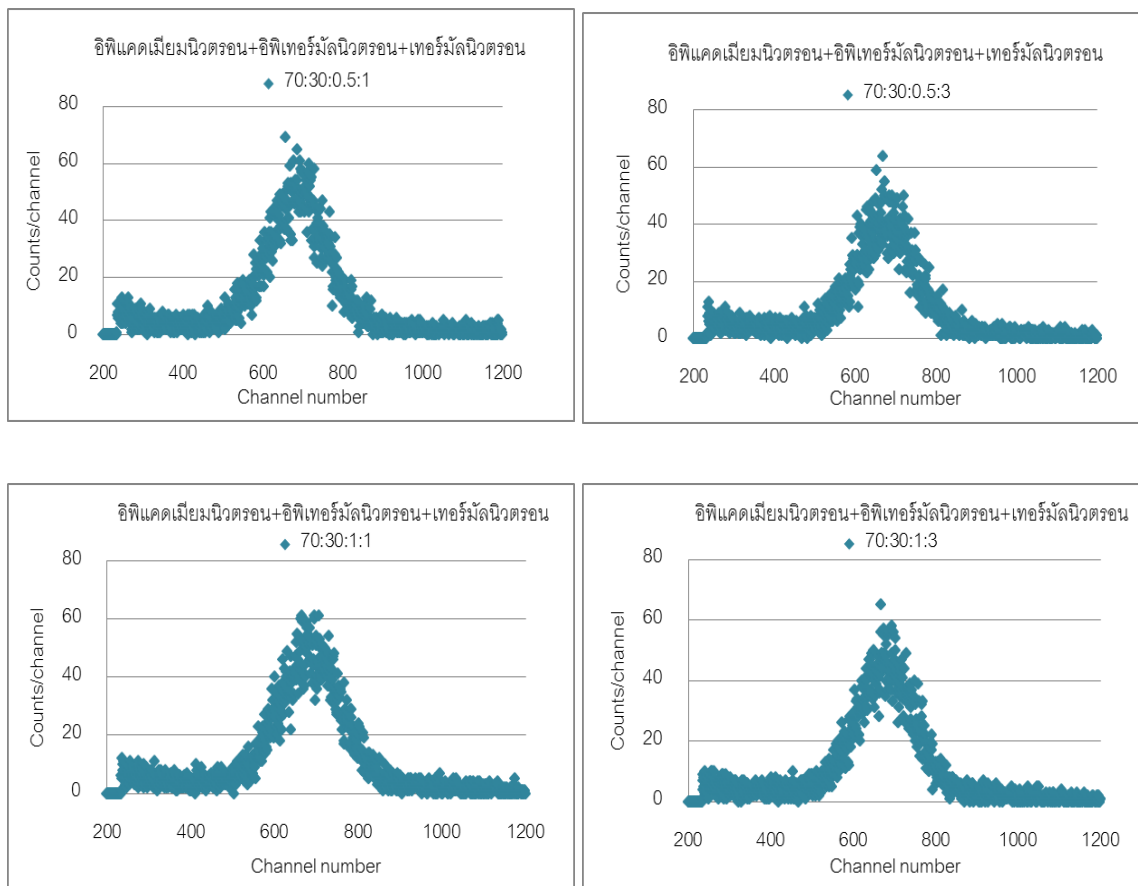
ลักษณะสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนที่วัดได้จากการทดลอง



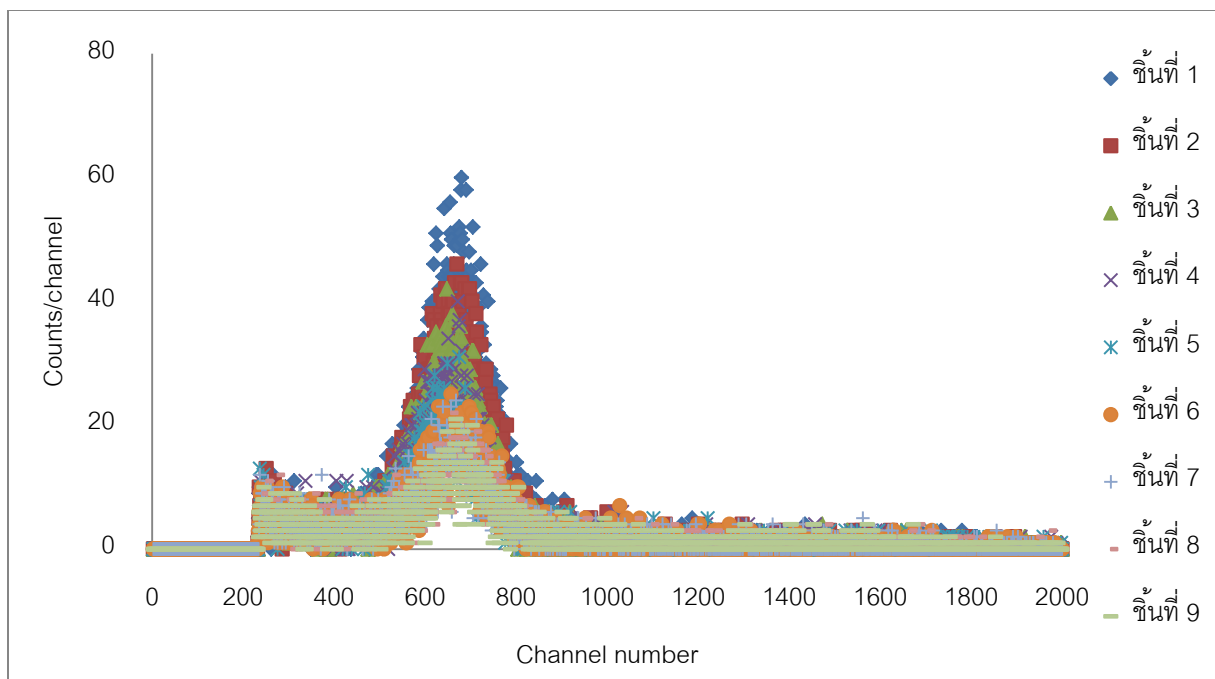
ภาพที่ ก. 1 ลักษณะสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนที่วัดได้ เมื่อไม่มีวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน
 Epicad+Epither+Ther คือรังสีนิวตรอนทั้งหมดจากต้นกำเนิด
 Epicad คือ รังสีนิวตรอนที่สามารถทะลุผ่านแผ่นแคดเมียมได้



ภาพที่ ก. 2 ลักษณะสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนที่วัดได้ เมื่อถูกกำบังด้วยแผ่นยางผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าทุก ๆ อัตราส่วนสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีใกล้เคียงกัน โดยสังเกตจากสเปกตรัมที่มีความสูงใกล้เคียงกัน



ภาพที่ ก. 3 ลักษณะสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนที่วัดได้เมื่อถูกกำบังด้วยชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ โบรอนออกไซด์และผงเขม่าดำ



ภาพที่ ก. 4 ลักษณะสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนที่วัดได้ เมื่อชั้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น

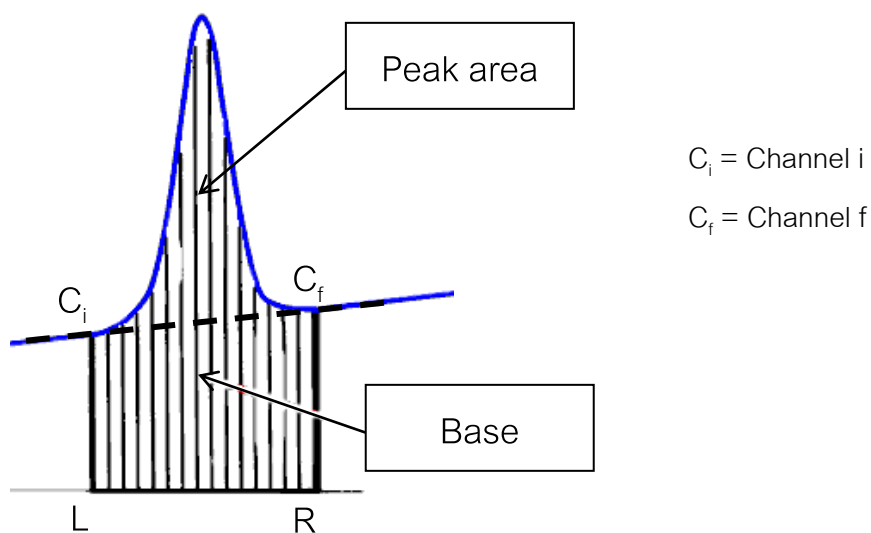
การคำนวณพื้นที่ใต้พีคของจำนวนนับรังสี

วิธีคำนวณพื้นที่ใต้พีคของจำนวนนับรังสี ใช้วิธี Covell Method

$$\text{Peak area} = \text{Integral} - \text{Base} \text{ -----*}$$

$$\text{Integral} = \text{Sum of Height}$$

$$\text{Base} = \frac{1}{2} \times (C_i + C_f) \times \text{No. of channel}$$



ภาพที่ ก. 5 แสดงการคำนวณพื้นที่ใต้พีคของจำนวนนับรังสีด้วยวิธี Covell Method

ดัดแปลงจาก: <http://www.lcresources.com>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริกุล กาญจนปฐมพร เกิดเมื่อวันที่ 3 เดือนกันยายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 ทำงานที่บริษัทพีสาม โกลบอล เอนเนอร์ยี จำกัด (P3GE) เป็นเวลา 1 ปี จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2553