



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นของยางพาราธรรมชาติและโบรอนและชั้นของยางพาราและเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )”

โดย อ.ดร. ชญานิษฐ์ จำปี และคณะ

พฤศจิกายน 2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นของยางพาราธรรมชาติและโบรอนและชั้นของยางพาราและเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )”

### คณะผู้วิจัย

### สังกัด

- |                              |                                                                                     |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. อ.ดร.ชญาธิษฐ์ จำปี        | ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                        |
| 2. รศ.ดร. สุชาติ โกทัญญ่     | ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                        |
| 3. ผศ.ดร. จิตินันท์ รัตนพรหม | สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์<br>คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |
| 4. อ.ดร. แสนคำ นุเสน         | ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                        |
| 5. นางสาว นัฐพร คำวัง        | สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)                                    |
| 6. นาย สหการ มณฑลวัฒนา       | สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)                                    |
| 7. นาย ธิติ เรืองสีสำราญ     | สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)                                    |

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

การรักษาโรคมะเร็งด้วยการฉายลำโฟตอน (Photon beam) จากเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ (Medical Linar Accelerator; LINAC) เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการรักษาผู้ป่วยที่เป็นมะเร็ง อย่างไรก็ตาม เมื่อโฟตอนพลังงานสูง (มากกว่า 8 MV) ทำอันตรกิริยากับวัสดุเลเซอร์สูงที่เป็นส่วนประกอบส่วนหัวของเครื่องเร่งอนุภาคอาจทำให้เกิดโฟโตนิวตรอนปนเปื้อนซึ่งทำให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีโดยไม่จำเป็น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตวัสดุกำบังนิวตรอนที่เหมาะสมในการกำบังโฟโตนิวตรอนในทุกช่วงพลังงานโดยใช้ยางพาราเป็นส่วนประกอบหลัก วัสดุกำบังถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมมอนติคาร์โลเอ็นพาร์ติเคิล Monte Carlo N-Particle (MCNP) พบว่า วัสดุ 4 ชั้นที่ความหนา 1 ซม. ที่ประกอบด้วยชั้นของยางพาราและชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน 10 PHR สามารถลดทอนโฟโตนิวตรอนจากเครื่อง Linac 10 MV ได้ดีที่สุด สามารถคำนวณค่าภาคตัดขวางมหภาคของนิวตรอน และ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของโฟตอนปฐมภูมิของวัสดุนี้ ได้เท่ากับ  $0.284 \text{ cm}^{-1}$  และ  $0.026 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ วัสดุกำบังนิวตรอนสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นได้โดยใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ และมีการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมโดยยืนยันจากภาพถ่าย SEM และภาพถ่ายนิวตรอน การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง (ความแข็ง ความต้านแรงดึง ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง) พบว่าคุณสมบัติของวัสดุกำบังนิวตรอนนี้อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น

คำสำคัญ : วัสดุกำบังรังสีนิวตรอน เครื่องเร่งอนุภาค ยางพารา โบรอน โฟโตนิวตรอน MCNP วัสดุหลายชั้น

## Abstract

The Medical Linear Accelerators (LINAC) is the device most commonly used for external beam radiation treatments for patients with cancer. However, when high-energy photon (Energy > 8 MV) interact with nuclei of high atomic number materials constituting the LINAC head, the photo-neutrons contamination might be occurred which is an undesirable radiation dose. The research objective is to produce neutron shielding material which is suitable for using shield against all energy of photo-neutron that using natural rubber (NR) as the main compositions. Optimized neutron shielding materials were designed using the Monte Carlo N-Particle (MCNP) code. Simulation results indicated that the 1 cm shielding material with four alternating layers of NR and of NR with 10 phr boron powder was the most performance to attenuate the photo-neutron that produced from 10 MV LINAC. The photo-neutron macroscopic cross section and the primary photon linear attenuation coefficient of the shielding material were  $0.284 \text{ cm}^{-1}$  and  $0.026 \text{ cm}^{-1}$ , respectively. The optimum neutron shielding material design was fabricated in slab shape with semi efficiency vulcanization method and the good homogeneity of material was verified by SEM and neutron radiography. The vulcanized rubber properties (hardness and tensile property both before and after aging at 70 °C, 72 hours) were tested. The mechanical properties of neutron shielding material is similar to that of rubber flooring following the criteria of Thailand industrial standard (พอก. 2377-2551)

Keyword: Neutron shielding, Linac, Natural rubber, Boron, Photo-neutron, MCNP, Multi layers

สัญญาเลขที่ RDG6T0126

โครงการ “วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่ง  
อนุภาคทางการแพทย์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นของยางพาราธรรมชาติและโบรอนและชั้นของยางพาราและเหล็ก  
ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )”

รายงานฉบับสมบูรณ์

---

## ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ

ชื่อผู้รับทุน : นางสาวชญาณีษฐ์ จำปี

โครงการเริ่มเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น 1 ปี

## ส่วนที่ 2 รายงานเนื้อหา

### สารบัญ

| บทที่   | หัวข้อ                                                                                                                                                                           | หน้า |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|         | บทคัดย่อ                                                                                                                                                                         | 1    |
|         | Abstract                                                                                                                                                                         | 2    |
| บทที่ 1 | บทนำ                                                                                                                                                                             | 6    |
|         | 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา                                                                                                                                                   | 7    |
|         | 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                                                                                                                                      | 7    |
|         | 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                                                                                                                                                            | 8    |
|         | 1.4 แผนการดำเนินการวิจัย                                                                                                                                                         | 9    |
| บทที่ 2 | วิธีดำเนินการวิจัย                                                                                                                                                               | 10   |
|         | 2.1 ศึกษาทฤษฎีการเกิดโฟโตนิวตรอนและอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร                                                                                                              | 11   |
|         | 2.2 จำลองการเกิดโฟโตนิวตรอนของเครื่อง LINAC ด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N-Particle (MCNP)                                                                                            | 13   |
|         | 2.3 จำลองการลดทอนรังสีนิวตรอน (neutron attenuation) จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP                                                      | 17   |
|         | 2.4 จำลองการลดทอนโฟโตนิวตรอน (photo-neutron attenuation) จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV เมื่อกำบังด้วยวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของวัสดุตัวเติมที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MCNP | 19   |
|         | 2.5 ผสมและขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน                                                                                                                                          | 19   |
|         | 2.6 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้                                                                                                              | 20   |
| บทที่ 3 | ผลการดำเนินการวิจัย                                                                                                                                                              | 21   |
|         | 3.1 โฟโตนิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV (Siemens Primus) เมื่อกำนวณด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N-Particle (MCNP5)                                                                      | 22   |

| บทที่   | หัวข้อ                                                                                                                                                                          | หน้า |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.2     | จำลองการลดทอนรังสีนิวตรอน (neutron attenuation) จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP                                                         | 22   |
| 3.3     | จำลองการลดทอนรังสีนิวตรอน (neutron attenuation) เมื่อใช้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP                                                    | 23   |
| 3.4     | การกำหนดปริมาณสารตัวเติมที่ทำหน้าที่ในการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7                                                                                       | 31   |
| 3.5     | การจำลองการลดทอนโฟโตนิวตรอน (photo-neutron attenuation) จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV เมื่อกำบังด้วยวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของวัสดุตัวเติมที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MCNP | 40   |
| 3.6     | ผสมและขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน                                                                                                                                             | 46   |
| 3.7     | ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน                                                                                                                                       | 48   |
| บทที่ 4 | สรุปผลการดำเนินการวิจัย                                                                                                                                                         | 58   |
| บทที่ 5 | ตารางเปรียบเทียบแผนงานและ ผลสัมฤทธิ์ (output) ของโครงการ                                                                                                                        | 61   |
|         | เอกสารอ้างอิง                                                                                                                                                                   | 67   |

บทที่ 1

บทนำ



## 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

การรักษาโรคมะเร็งด้วยการฉายลำโฟตอน (Photon beam) เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray) หรือลำอิเล็กตรอน (electron beam) จากเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ (Medical Linear Accelerator; LINAC) พลังงานสูง (มากกว่า 8 MeV) มักทำให้เกิดนิวตรอนทุติยภูมิ (secondary neutron) หรือเรียกอีกอย่างว่า โฟโตนิวตรอน (photo-neutron) อันเนื่องมาจากอันตรกิริยา ( $\gamma, n$ ) ระหว่างโฟตอน กับ MLC หรือวัสดุอื่นๆที่มี พลังงานขีดเริ่ม (Threshold energy) ที่จะเกิดนิวตรอนต่ำกว่าพลังงานของโฟตอนจากเครื่อง LINAC ซึ่งทำให้ผู้ป่วยได้รับรังสีที่ไม่จำเป็นในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียตามมา

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

ยางพารา (Natural rubber) เป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ ที่มีความยืดหยุ่น (Flexible) สามารถผสมและขึ้นรูปได้ง่ายนอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติในการหน่วงความเร็วนิวตรอนได้ดี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นของไฮโดรเจนอะตอมต่อมวลโมเลกุลสูง จึงทำให้สามารถถ่ายโอนพลังงานจากนิวตรอนได้ดี ส่งผลให้สามารถนำไปผลิตวัสดุกำบังนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยางพารายังสามารถผสมกับส่วนประกอบต่างๆได้หลากหลาย และสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย ดังนั้นการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนั้นนอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ป่วยและผู้ปฏิบัติงานทางรังสีแล้ว ยังเป็นการสนับสนุนให้มีการใช้วัตถุดิบหลักจากยางพาราที่ผลิตได้ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์และสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูง ด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นของ ยางพาราธรรมชาติและโบรอนและชั้นของยางพาราและเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- 1.2.2 เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยางพาราเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ประเมินปริมาณรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ ในหุ่นจำลองการรักษาบริเวณอุ้งเชิงกราน (Pelvic Phantom) และเตียงฉายรังสี โดยใช้โปรแกรม Monte Carlo N-Particle (MCNP) เปรียบเทียบกับการวัดปริมาณรังสีด้วยวิธีการใช้แผ่น CR-39 ตรวจจับรังสีแบบกัตรอย (CR-39 nuclear track etched detector) หรืออุปกรณ์วัดรังสีประจำบุคคลชนิด Optical Stimulated Luminescent Dosimeter (OSL)
- 1.3.2 ออกแบบวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ โดยใช้โปรแกรม Monte Carlo N-Particle (MCNP)
- 1.3.3 ขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของยางพารา ร่วมกับ ผงโบรอน (Boron powder ความบริสุทธิ์ > 95% ; CAS Number [7440-42-8](#)) ปริมาณไม่เกิน 50 phr และ ผงเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  powder) ปริมาณไม่เกิน 100 phr
- 1.3.4 วัดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ผลิตได้ ได้แก่ การต้านแรงดึง (Tensile strength) และความแข็ง (hardness)
- 1.3.5 วัดการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนด้วยแผ่น CR-39 ตรวจจับรังสีแบบกัตรอย (CR-39 nuclear track etched detector) หรืออุปกรณ์วัดรังสีประจำบุคคลชนิด Optical Stimulated Luminescent Dosimeter (OSL) จากรังสีนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการฉายโฟตอนพลังงานสูงด้วยเครื่องฉายรังสีชนิดเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ และ ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนอย่างน้อย 1 ตัว



## บทที่ 2

### วิธีดำเนินการวิจัย

## 2 วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 ศึกษาทฤษฎีการเกิดโฟโตนิวตรอนและอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

เมื่อรังสีทำอันตรกิริยากับสสาร หากรังสีนั้นมีพลังงานมากกว่า Threshold energy หรือพลังงานขีดเริ่มที่เอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสในวัสดุ จะทำให้อนุภาคนิวตรอนหลุดออกมา ซึ่งเรียกนิวตรอนจากอันตรกิริยานี้ว่า โฟโตนิวตรอน (Photo-neutron) โดยสมการการเกิด Photo-neutron คือ  $A(\gamma, n)B$  หมายความว่าหากรังสีเอกซ์หรือโฟตอนใดๆที่มีพลังงานเหมาะสม ชนและทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุ A จะเกิดนิวตรอนและธาตุ B การเกิด Photo-neutron

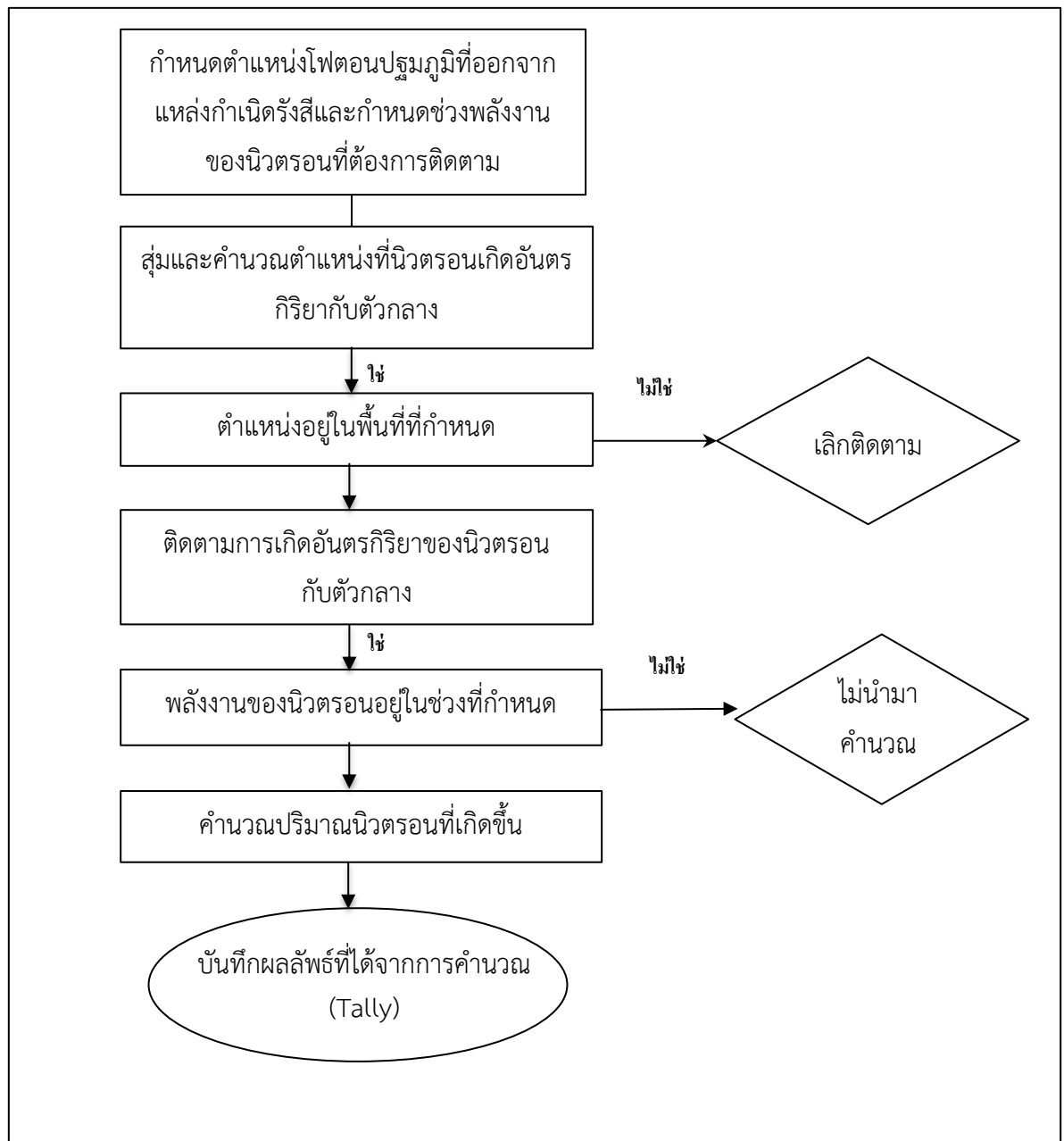
Photo-neutrons เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตนิวเคลียร์ (Photonuclear reaction) ที่เรียกว่า Photodisintegration เกิดเมื่อนิวเคลียสมีการดูดกลืน (Absorption) โฟตอนพลังงานสูง ทำให้มีการจัดเรียงและให้อนุภาคมูลฐานอันได้แก่ โปรตอน, นิวตรอน และแอลฟาออกมาหนึ่งหรือหลายอนุภาค กระบวนการนี้รู้จักในชื่อของ Evaporation ซึ่ง Photo-neutrons จำนวนร้อยละ 80 - 90 มาจากกระบวนการนี้ โดย Evaporation neutrons ที่ปล่อยออกมาจะเป็นไอโซโทปที่มีพลังงาน 1 - 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) นอกจาก Photodisintegration แล้ว Photo-neutrons ยังเกิดได้จากกระบวนการที่เรียกว่า Direct emission ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนพลังงานสูงประมาณ 15 ถึง 30 MeV ทำอันตรกิริยากับโดยตรงกับนิวตรอนในนิวเคลียสของธาตุหนัก จากนั้นปล่อยนิวตรอนออกมา เรียกว่า Direct emission neutrons ซึ่งจะมีพลังงานหลายเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยจะเกิด Direct emission neutrons ประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานโฟตอนดังกล่าว

การเกิด Photo-neutrons ขึ้นอยู่กับค่า Cross section และพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส (Binding energy) พลังงานต่ำสุดที่สามารถเอาชนะ Binding energy ได้ เรียกว่า Threshold energy ( $E_{th}$ ) ซึ่ง Threshold energy ในการเกิด Photo-neutrons มีหลายค่าตามชนิดของสสารและไอโซโทป ดังตารางที่ 1 แสดงสสารแต่ละชนิดและไอโซโทปในร่างกายมนุษย์ ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ), ในอากาศ ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) และวัสดุส่วนหัวของเครื่อง LINAC ( $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{180}\text{W}$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อโฟตอนชนวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ทังสเตน หรือตะกั่ว พลังงานต่ำสุดที่จะทำให้เกิด Photo-neutrons คือประมาณ 7 MeV ส่วนสสารอื่นๆ อันได้แก่ คาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน โฟตอนต้องมีพลังงานสูงประมาณ 19, 11, 16 MeV ตามลำดับ จึงจะเกิดอันตรกิริยาแล้วให้ Photo-neutrons

ตารางที่ 1 แสดงพลังงานจลน์ที่ต่ำที่สุดของโฟตอน (Threshold energy) ที่สามารถเอาชนะ Binding energy ของสารและไอโซโทปต่างๆ แล้วเกิด Photo-neutrons (1)

| Element           | Threshold Energy (MeV) |                  |                  |
|-------------------|------------------------|------------------|------------------|
|                   | ( $\gamma, n$ )        | ( $\gamma, 2n$ ) | ( $\gamma, 3n$ ) |
| $^{12}\text{C}$   | 18.72                  | 31.83            | -                |
| $^{14}\text{N}$   | 10.56                  | -                | -                |
| $^{16}\text{O}$   | 15.72                  | -                | -                |
| $^{206}\text{Pb}$ | 8.05                   | 14.79            | 23.02            |
| $^{207}\text{Pb}$ | 6.75                   | 14.79            | 21.62            |
| $^{208}\text{Pb}$ | 7.31                   | 22.24            | 22.24            |
| $^{186}\text{W}$  | 7.22                   | 12.94            | 20.41            |

## 2.2 จำลองการเกิดโฟโตนิวตรอนของเครื่อง LINAC ด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N- Particle (MCNP)



รูปที่ 1 : แผนผังขั้นตอนการคำนวณปริมาณนิวตรอนด้วยโปรแกรมมอนติ คาร์โล

## 2.2.1 กำหนดส่วนประกอบของเครื่อง LINAC

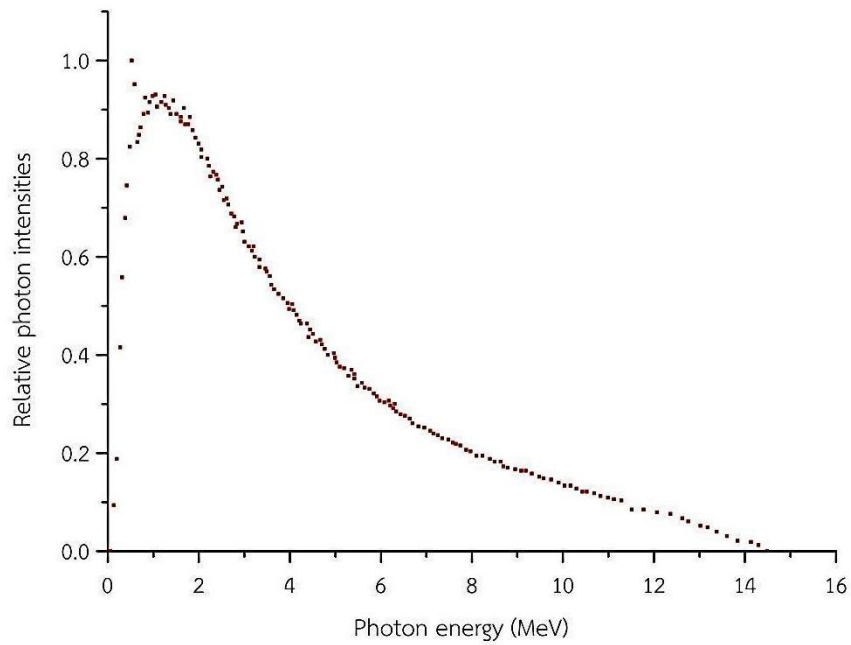
### 2.2.1.1 ส่วนประกอบส่วนหัวของเครื่อง LINAC Siemens PRIMUS 15 MV

#### ตารางที่ 2 ส่วนประกอบส่วนหัวของ LINAC

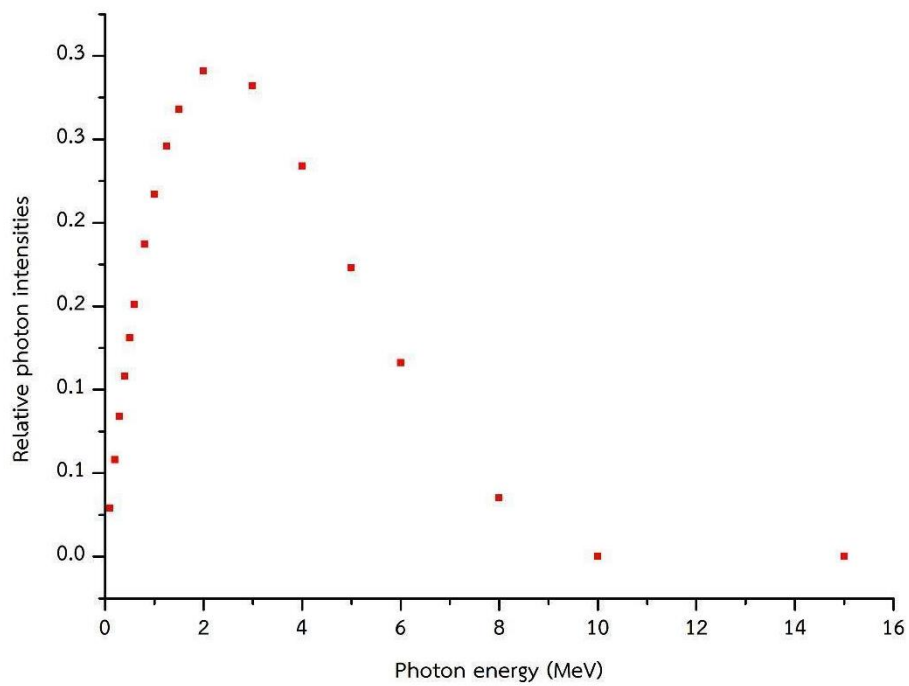
| LINAC head components    | Composition                | Percentage | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|----------------------------|------------|------------------------------|
| Siemens PRIMUS 15 MV (2) |                            |            |                              |
| Target                   | Tungsten (W)               | 100        | 19.3                         |
| Target cover             | Copper (Cu)                | 100        | 8.96                         |
| Primary collimator       | Tungsten (W)               | 100        | 19.3                         |
| Flattening filter        | Ta/Fe                      | NA         | 16.65/7.874                  |
| Secondary collimator     | Tungsten (W)               | 100        | 19.3                         |
| Elekta Precise 10 MV     |                            |            |                              |
| Target                   | W / Re                     | 90/10      | 19.4                         |
| Primary collimator       | W / Ni / Fe                | NA         | 18.0                         |
| Flattening filter        | C / Si / Ni / Cr / Mn / Fe | NA         | 7.8                          |
| Secondary collimator     | Pb / Sb / W                | NA         | 18                           |
| Multileaf collimator     | W                          | 100        | 19.3                         |



### 2.2.1.2 สเปกตรัมของโฟตอน (photon) ของเครื่อง LINAC

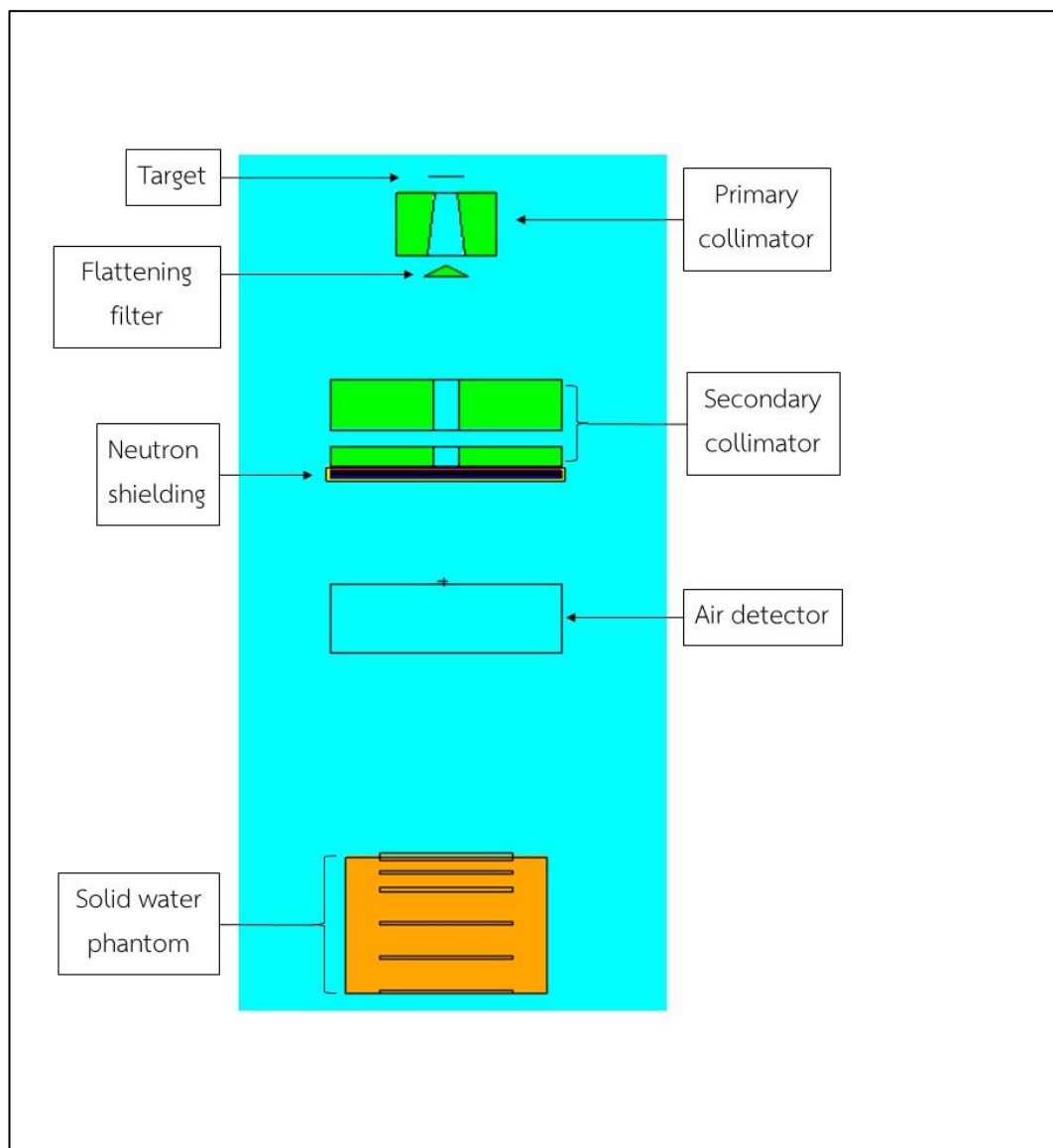


รูปที่ 2 สเปกตรัมของโฟตอนของ LINAC Siemens PRIMUS 15 MV



รูปที่ 3 สเปกตรัมของโฟตอนของ LINAC Elekta Precise 10 MV

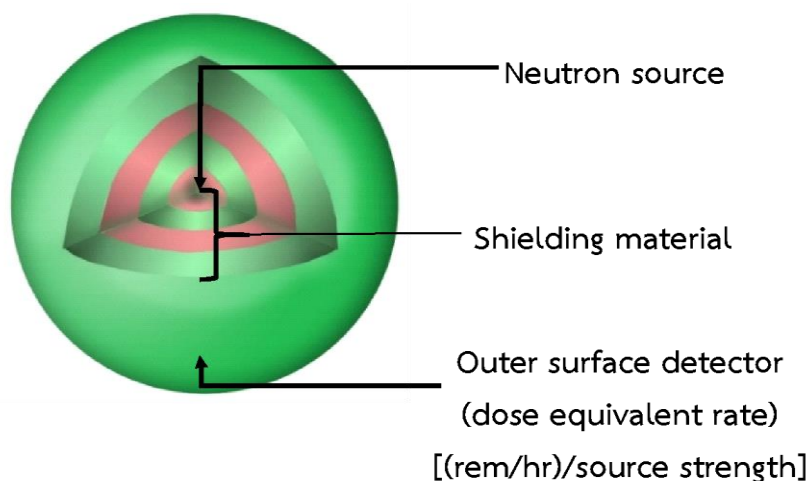
2.2.1.3 เขียน input file เพื่อสร้าง geometry ในการจำลองการเกิดรังสีด้วยโปรแกรม Monte Carlo N-Particle (MCNP5) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 : องค์ประกอบต่างๆ (geometry) ในการจำลองการเกิดรังสีด้วยโปรแกรม Monte Carlo N-Particle (MCNP5)

### 2.3 จำลองการลดทอนรังสีนิวตรอน (neutron attenuation) จากวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทรงกลมที่มี ยางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP

2.3.1 กำหนดรูปแบบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนให้อยู่ในรูปทรงกลมรัศมี 4 ซม. และ 8 ซม. โดยกำหนดให้  
ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากเครื่อง LINAC 15 MV (มีลักษณะสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 1 และ  
2) อยู่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวัสดุกำบังรังสีทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 : วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทรงกลมที่ใช้ในการจำลองการลดทอนรังสีนิวตรอนด้วยโปรแกรม MCNP

2.3.2 กำหนดส่วนประกอบและลักษณะของวัสดุกำบังนิวตรอน โดยกำหนดให้วัสดุตัวอย่างมีหมายเลข  
ตั้งแต่ 0-15 ซึ่งมีการเติมวัสดุตัวเติม คือ วัสดุดูดกลืนนิวตรอน (neutron absorber) ได้แก่ ผง  
โบรอน และวัสดุกระเจิงนิวตรอน (neutron scatter) ได้แก่ ผงเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ใน  
ส่วนประกอบของยางพารา ในปริมาณ 50 phr และวัสดุกำบังนิวตรอนที่มีขายตามท้องตลาด โดย  
มีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบหลักของวัสดุกำบังนิวตรอน( Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Boron 50 phr)

| Sample No.            |                                                                                     | No. of layers | Material composition                              | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Mass ratio of element content |        |                                          |                 |                       |         |  |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------|------------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------|--|
|                       |                                                                                     |               |                                                   |                              | H                             | C      | <sup>10</sup> B                          | <sup>11</sup> B | O                     | Fe      |  |
| 0                     |    | 0             | No material (Air)                                 | 0.00120                      | Air*                          |        |                                          |                 |                       |         |  |
| 1                     |    | 1             | NR                                                | 0.9200                       | 10.378                        | 89.622 | -                                        | -               | -                     | -       |  |
| 2                     |    | 1             | NR+Boron                                          | 1.1557                       | 10.378                        | 89.622 | 2.460                                    | 9.963           | 27.577                | -       |  |
| 3                     |    | 1             | NR+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | 1.2678                       | 0.789                         | 0.5878 | -                                        | -               | 0.1002                | 0.2331- |  |
| 4                     |    | 1             | NR+Boron+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 1.4346                       | 0.0592                        | 0.4408 | 0.04975                                  | 0.2002          | 0.0751-               | 0.1748- |  |
| Multi-layer samples   |                                                                                     |               |                                                   |                              |                               |        |                                          |                 |                       |         |  |
|                       |                                                                                     |               | Layer 1*                                          |                              | Layer 2                       |        | Layer 3                                  |                 | Layer 4               |         |  |
| 5                     |    | 2             | Sample 2                                          |                              | Sample 3                      |        | ---                                      |                 | -                     |         |  |
| 6                     |   | 2             | Sample 3                                          |                              | Sample 2                      |        | -                                        |                 | -                     |         |  |
| 7                     |  | 4             | Sample 1                                          |                              | Sample 2                      |        | Sample 1                                 |                 | Sample 2              |         |  |
| 8                     |  | 4             | Sample 1                                          |                              | Sample 3                      |        | Sample 1                                 |                 | Sample 3              |         |  |
| 9                     |  | 4             | Sample 2                                          |                              | Sample 3                      |        | Sample 2                                 |                 | Sample 3              |         |  |
| 10                    |  | 4             | Sample 3                                          |                              | Sample 2                      |        | Sample 3                                 |                 | Sample 2              |         |  |
| 11                    |  | 4             | Sample 2                                          |                              | Sample 1                      |        | Sample 2                                 |                 | Sample 1              |         |  |
| Comparative materials |                                                                                     |               |                                                   |                              |                               |        |                                          |                 |                       |         |  |
|                       |                                                                                     |               | Composition                                       |                              | Density (g/cm <sup>3</sup> )  |        | % isotope                                |                 |                       |         |  |
| 12                    |  | 1             | Boron (B)                                         |                              | 2.37                          |        | <sup>10</sup> B= 19.9                    |                 | <sup>11</sup> B= 80.1 |         |  |
| 13                    |  | 1             | Iron(III) Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |                              | 5.20                          |        | Natural Fe = 100                         |                 |                       |         |  |
| 14                    |  | 1             | FLEXIBORE**                                       |                              | 1.55                          |        | NR + 50% Boron Cabide (B <sub>4</sub> C) |                 |                       |         |  |
| 15                    |  | 1             | 5% Borated Polyethylene***                        |                              | 1.04                          |        | PE + 5% Boron                            |                 |                       |         |  |

\*หมายเหตุ : Layer 1 คือชั้นที่ติดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

\*\*ผลิตภัณฑ์จาก BORFLEX, Rubber solutions provider

\*\*\*ผลิตภัณฑ์จาก Ridout Plastics, Inc.

- 2.3.3 ประเมินความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีของวัสดุชนิดต่างๆ โดยประเมินจากร้อยละการส่งผ่านรังสีผ่านวัสดุตัวอย่าง (%radiation transmission) โดยทำการคัดเลือกวัสดุตัวอย่างที่มีร้อยละการส่งผ่านรังสีที่เหลือน้อยปริมาณรังสีน้อยที่สุด โดยรังสีที่นำมาคิดคำนวณได้แก่ นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี และ โฟตอนที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับวัสดุตัวอย่าง
- 2.3.4 และกำหนดปริมาณสารตัวเติมที่ทำหน้าที่ในการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอน โดยกำหนดให้มีปริมาณแตกต่างกันตัวอย่างละ 10 phr

## 2.4 จำลองการลดทอนโฟโตนิวตรอน (photo-neutron attenuation) จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV เมื่อกำบังด้วยวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของวัสดุตัวเติมที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MCNP

- 2.4.1 กำหนดรูปแบบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของสารตัวเติมที่เหมาะสมให้อยู่ในรูปทรงสี่เหลี่ยมในลักษณะแผ่น (slab) โดยกำหนดให้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากเครื่อง LINAC 10 MV อยู่ที่ตำแหน่งเหนือวัสดุกำบังรังสีบริเวณใต้ secondary collimator ดังแสดงในตำแหน่ง photo-neutron source ในรูปที่ 4
- 2.4.2 ประเมินความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีของวัสดุกำบังนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของสารตัวเติมที่เหมาะสม ทั้งที่มีและไม่มีพอลิเอทธิลีนหุ้ม (polyethylene encapsulate) โดยประเมินจากร้อยละการส่งผ่านรังสีผ่านวัสดุตัวอย่าง (%radiation transmission) และปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆใน solid water phantom
- 2.4.3 ประเมินการลดทอนปริมาณโฟตอนของวัสดุกำบังนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของสารตัวเติมที่เหมาะสม จากต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (primary photon) จากค่าร้อยละการส่งผ่านรังสี และปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆใน solid water phantom

## 2.5 ผสมและขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

- 2.5.1 นำยาง STR5L ผสมกับสารตัวเติมในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง(two roll mill mixer) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4 โดยแบ่งการคงรูปออกเป็นสองชุด ได้แก่ ชุด 1 เป็นการคงรูปแบบดั้งเดิม (conventional vulcanization) และ ชุด 2 เป็นการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization)
- 2.5.2 ทำการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ (Cure characteristics) โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Moving die rheometer) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 45 นาที จำนวน 2 ครั้ง
- 2.5.3 ขึ้นรูปยางโดยการอัดด้วยความร้อน (Compression molding)

**ตารางที่ 4 ส่วนประกอบของสารเคมียาง**

| สารเคมี                        | conventional vulcanization (CV) |          |        | semi-efficient vulcanization (semi-EV) |          |        |
|--------------------------------|---------------------------------|----------|--------|----------------------------------------|----------|--------|
|                                | Control1                        | Ferrous1 | Boron1 | Control2                               | Ferrous2 | Boron2 |
| NR                             | 100                             | 100      | 100    | 100                                    | 100      | 100    |
| Stearic acid                   | 2                               | 2        | 2      | 2                                      | 2        | 2      |
| ZnO                            | 4                               | 4        | 4      | 4                                      | 4        | 4      |
| MBTS                           | 1                               | 1        | 1      | 1                                      | 1        | 1      |
| TMTD                           | 0.5                             | 0.5      | 0.5    | 0.5                                    | 0.5      | 0.5    |
| CPL                            | 1                               | 1        | 1      | 1                                      | 1        | 1      |
| S                              | 2.5                             | 2.5      | 2.5    | 1.5                                    | 1.5      | 1.5    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                               | 10       | -      | -                                      | 10       | -      |
| Boron                          | -                               | ---      | 10     | -                                      | ---      | 10     |

## 2.6 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- 2.6.1 ความแข็งทดสอบวิธี Durometer type A: ASTM D2240
- 2.6.2 ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ISO37
- 2.6.3 การบ่มเร่งทำตามมาตรฐาน ISO188 air-oven method 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยสมบัติที่ทดสอบการบ่มเร่งคือความแข็ง และความต้านทานแรงดึง
- 2.6.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคงรูปโดยใช้เทคนิคการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS)
- 2.6.5 ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยาง โดยการถ่ายภาพรังสีนิวตรอน
- 2.6.6 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน stdUL-94 แบบ Vertical burning ขึ้นทดสอบ ขนาด 12.5 มม.x125 มม. สภาวะการทดสอบ อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 52% มีทั้งการทดสอบแนวตั้ง (20 มม. Vertical burning test, v-0, v-1 or v-2) และการทดสอบแนวนอน (Horizontal burning test) ความหนาชิ้นงานเฉลี่ย 2 มม.

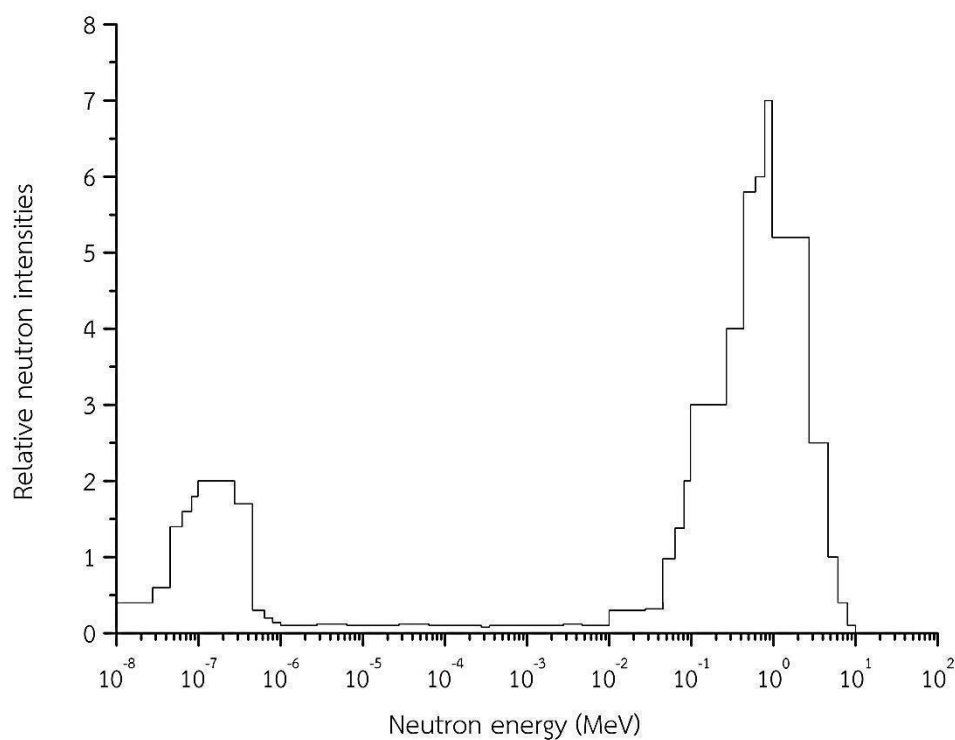
## บทที่ 3

### ผลการดำเนินการวิจัย

### 3 ผลการดำเนินการวิจัย

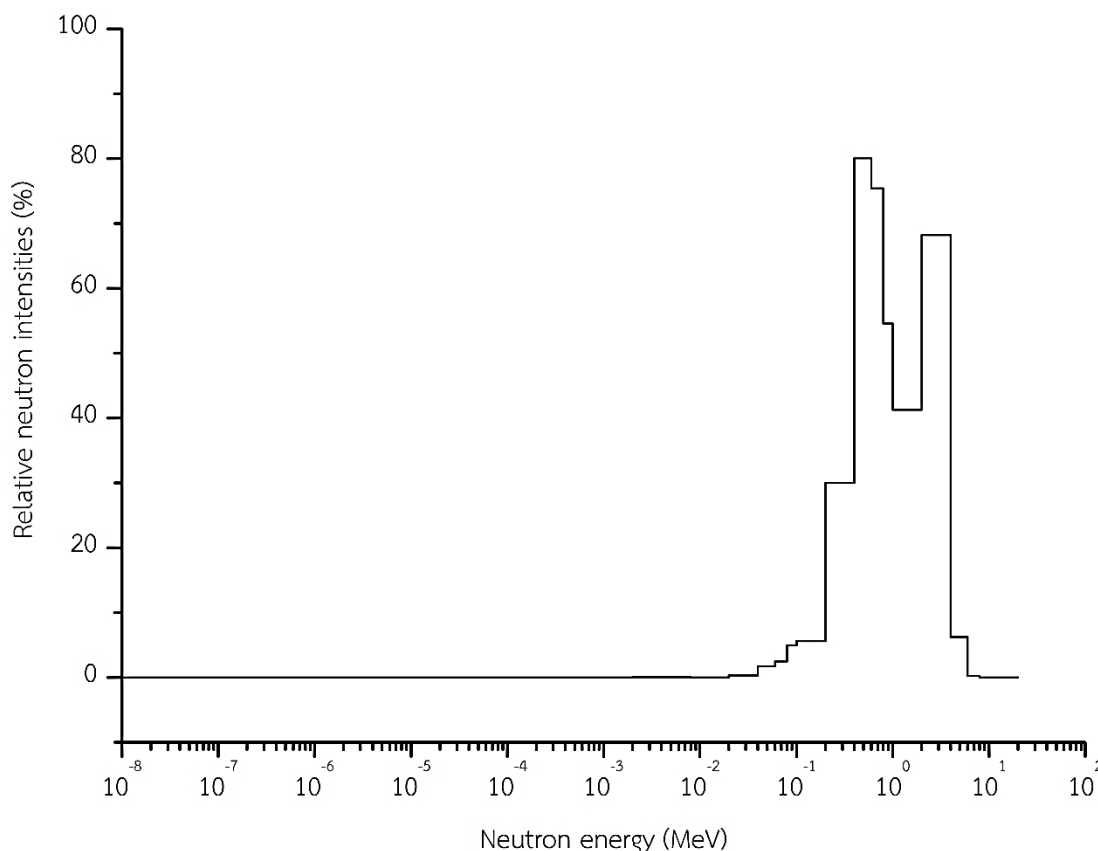
3.1 ทฤษฎีการเกิดโฟโตนิวตรอนและอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร (ดังอธิบายในข้อ 2.1)

3.2 โฟโตนิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV (Siemens Primus) และ 10 MV (Elekta Precise) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N- Particle (MCNP) แสดงสเปกตรัมของโฟโตนิวตรอนได้ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยมีพลังงานเฉลี่ยที่ 0.6 MeV และ 0.9 MeV ตามลำดับ



รูปที่ 5 : สเปกตรัมของโฟโตนิวตรอนที่ได้จาก การจำลองการเกิดรังสีนิวตรอนของเครื่อง LINAC 15 MV ด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N- Particle (MCNP)





รูปที่ 6 : สเปกตรัมของโฟโตนิวตรอนที่ได้จาก การจำลองการเกิดรังสีนิวตรอนของเครื่อง LINAC 10 MV ด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N- Particle (MCNP)

### 3.3 จำลองการลดทอนรังสีนิวตรอน (neutron attenuation) เมื่อใช้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP

#### 3.3.1 ปริมาณรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุตัวอย่างหนา 4 ซม.

จากผลการจำลองร้อยละปริมาณรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุตัวอย่าง ( % Radiation transmission) หนา 4 ซม. พบว่าวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 มี % Radiation transmission ต่ำที่สุด (ไม่รวมวัสดุเปรียบเทียบ ; comparative material) มีค่าเท่ากับ 61.75% ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 7

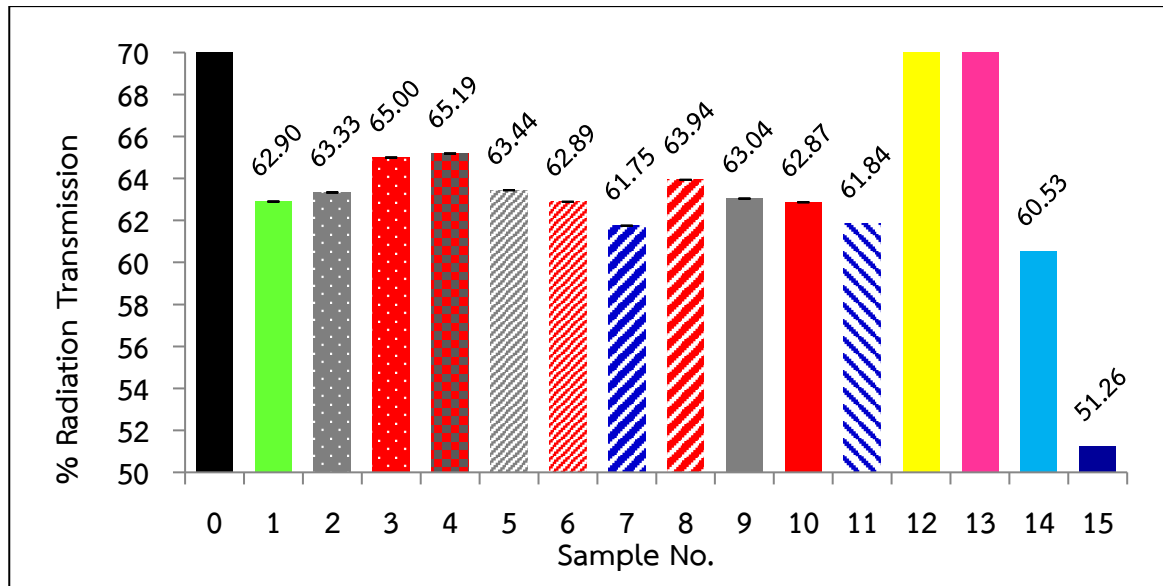
เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนดังรูปที่ 8 พบว่าวัสดุที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบในปริมาณที่มากที่สุด ได้แก่วัสดุตัวอย่างหมายเลข 1 (สเปกตรัมเส้นสีเขียว) สามารถลดทอนนิวตรอนในย่านพลังงานสูงหรือ นิวตรอนเร็ว (fast neutron) เนื่องจากมีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของยางพารา ( $C_5H_8$ ) ในปริมาณมาก ซึ่งนิวตรอนสามารถถ่ายโอนพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนได้ดีหรือกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนมีโอกาสดังกล่าวเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนสูง (high neutron cross-section) จากนั้นจึงเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอนในย่านพลังงานต่ำหรือ ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนถึงอีพิเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron – epithermal neutron) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในย่านของ thermal neutron (พลังงาน  $1E-8 - 1E-6$  MeV) พบว่าวัสดุที่

มีส่วนประกอบของโบรอนได้แก่ วัสดุหมายเลข 7 และ 10 (สเปกตรัมสีเทาและสีแดง ตามลำดับ) สามารถลดทอนนิวตรอนในย่านดังกล่าวได้ดี เนื่องจาก โบรอน-10 (boron-10) มีโอกาสการเกิดอันตรกิริยาแบบดูดกลืนกับเทอร์มัลนิวตรอนสูง (high thermal neutron absorption cross-section)

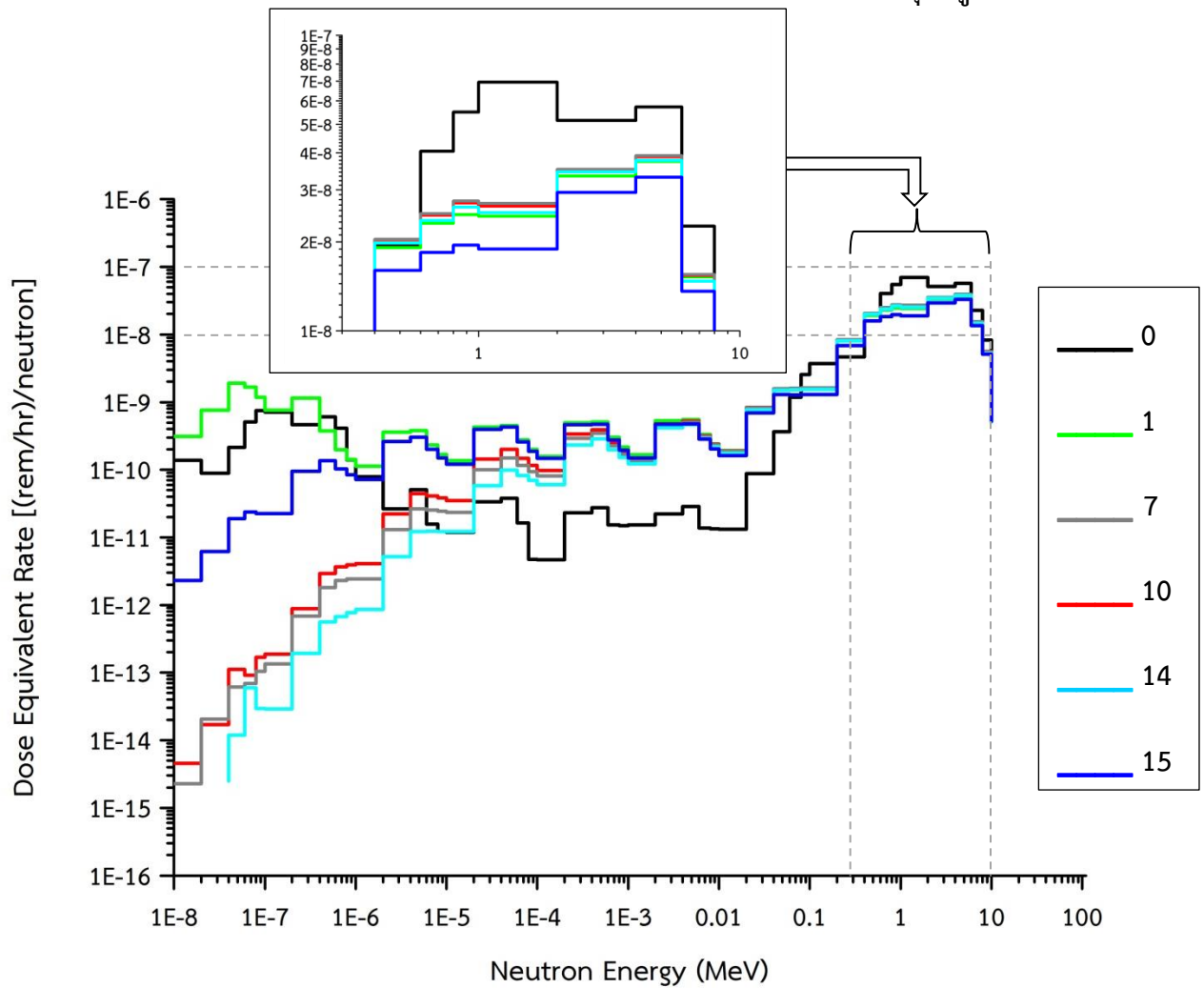
เมื่อพิจารณาวัสดุกำบังนิวตรอนที่มีขายเชิงพาณิชย์ ได้แก่ วัสดุหมายเลข 14 Flexibore(3) ที่มีส่วนประกอบของยางพารา ร้อยละ 50 ผสมกับโบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide;  $B_4C$ ) ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (100 PHR) และวัสดุหมายเลข 15 Borated PE(4) ที่มีส่วนประกอบของพอลิเอทิลีน (polyethylene) และโบรอน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการกำบังรังสีนิวตรอนที่สูงกว่าวัสดุตัวอย่างอื่นๆ โดยวัสดุหมายเลข 14 (สเปกตรัมสีฟ้า) จะมีความสามารถในการลดทอนนิวตรอนได้ดีที่สุดในย่านของเทอร์มัลนิวตรอนอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวเติมสำหรับดูดกลืนนิวตรอน (Boron และ Boron Carbide) พบว่าวัสดุเชิงพาณิชย์หมายเลข 14 (Flexibore) ใช้ปริมาณวัสดุดูดกลืนนิวตรอนเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับวัสดุกำบังนิวตรอนหมายเลข 7 จากการวิจัย ในขณะที่วัสดุหมายเลข 15 (สเปกตรัมสีน้ำเงิน) จะมีความสามารถในการลดทอนนิวตรอนได้ดีที่สุดในย่านของนิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง ( $>0.1$  MeV) เนื่องจากส่วนประกอบหลักของวัสดุชนิดนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยางพารา ( $C_5H_8$ ) จะสังเกตได้ว่าพอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นของอะตอมไฮโดรเจนต่อโมเลกุลสูงกว่า ซึ่งไฮโดรเจนสามารถเกิดอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) กับนิวตรอนพลังงานสูงได้ดี แล้วลดทอนพลังงานให้เปลี่ยนเปลี่ยนนิวตรอนในย่านพลังงานต่ำลงแล้วถูกดูดกลืนโดยโบรอนต่อไป ทำให้มีความสามารถในการกำบังนิวตรอนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวอย่างชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุที่ทำจากพอลิเอทิลีนยังมีข้อจำกัดเรื่องความยืดหยุ่น และสามารถโค้งงอตามพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ทำมาจากยางพารา

**ตารางที่ 5 อัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent Rate; Rate [(rem/hr).neutron]) ที่ผ่านออกจากวัสดุ**  
**ตัวอย่าง หน้า 4 ซม.**

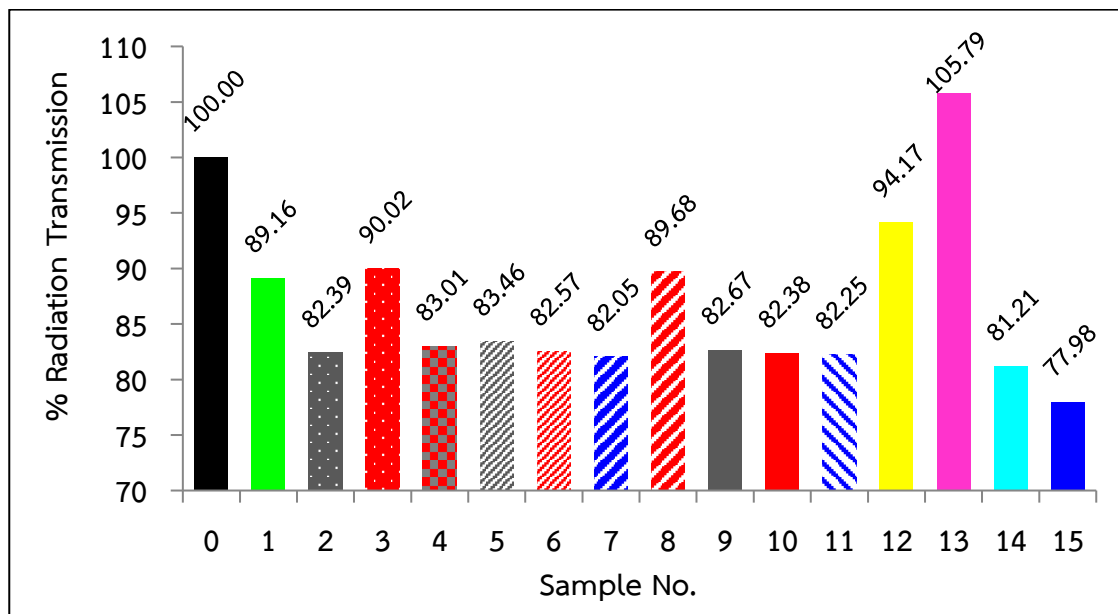
| Sample No. | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).neutron] |            |            |            |            |            | % Transmission |
|------------|------------------------------|-----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|
|            |                              | Neutron                                 | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                |
| 0          | 0.0012                       | 3.4186E-07                              | 6.8372E-11 | 2.2044E-13 | 4.5300E-14 | 3.4186E-07 | 2.3374E-17 | 100.0          |
| 1          | 0.9200                       | 2.1400E-07                              | 8.5600E-11 | 1.0300E-09 | 1.6480E-12 | 2.1503E-07 | 1.8410E-17 | 62.90          |
| 2          | 1.1557                       | 2.1487E-07                              | 8.5947E-11 | 1.6451E-09 | 8.2257E-13 | 2.1651E-07 | 1.8609E-17 | 63.33          |
| 3          | 1.2678                       | 2.2045E-07                              | 8.8180E-11 | 1.7513E-09 | 2.6270E-12 | 2.2220E-07 | 1.9603E-17 | 65.00          |
| 4          | 1.4346                       | 2.2128E-07                              | 8.8512E-11 | 1.5706E-09 | 9.4233E-13 | 2.2285E-07 | 1.9726E-17 | 65.19          |
| 5          | 1.1557/1.2678                | 2.1568E-07                              | 8.6274E-11 | 1.1977E-09 | 9.5819E-13 | 2.1688E-07 | 1.8712E-17 | 63.44          |
| 6          | 1.2678/1.1557                | 2.1293E-07                              | 8.5171E-11 | 2.0755E-09 | 1.4528E-12 | 2.1500E-07 | 1.8315E-17 | 62.89          |
| 7          | 0.9200/1.1557                | 2.0933E-07                              | 8.3733E-11 | 1.7705E-09 | 1.0623E-12 | 2.1110E-07 | 1.7678E-17 | 61.75          |
| 8          | 0.9200/1.2678                | 2.1710E-07                              | 8.6841E-11 | 1.4733E-09 | 2.3573E-12 | 2.1858E-07 | 1.8988E-17 | 63.94          |
| 9          | 1.1557/1.2678                | 2.1417E-07                              | 8.5668E-11 | 1.3466E-09 | 8.0798E-13 | 2.1552E-07 | 1.8464E-17 | 63.04          |
| 10         | 1.2678/1.1557                | 2.1313E-07                              | 8.5251E-11 | 1.7856E-09 | 1.0714E-12 | 2.1491E-07 | 1.8323E-17 | 62.87          |
| 11         | 1.1557/0.9200                | 2.1005E-07                              | 8.4022E-11 | 1.3564E-09 | 8.1382E-13 | 2.1141E-07 | 1.7764E-17 | 61.84          |
| 12         | 2.3700                       | 3.0997E-07                              | 9.2990E-11 | 1.3146E-09 | 9.2023E-13 | 3.1128E-07 | 2.8948E-17 | 91.06          |
| 13         | 5.2000                       | 3.6433E-07                              | 1.0930E-10 | 3.0845E-09 | 4.0098E-12 | 3.6742E-07 | 4.0186E-17 | 107.48         |
| 14         | 1.5500                       | 2.0510E-07                              | 1.0255E-10 | 1.8164E-09 | 9.0818E-13 | 2.0691E-07 | 2.1220E-17 | 60.53          |
| 15         | 1.0400                       | 1.7334E-07                              | 8.667E-11  | 1.8813E-09 | 9.4063E-13 | 1.7522E-07 | 1.5188E-17 | 51.26          |



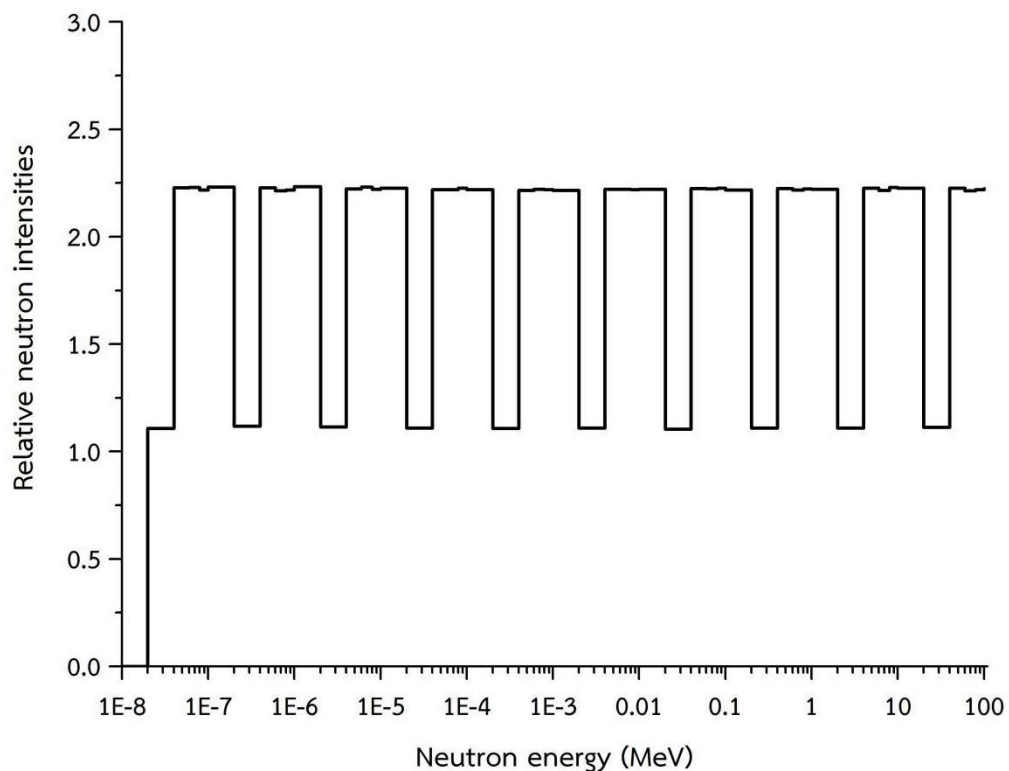
รูปที่ 7 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของวัสดุกำบังชนิดต่างๆ ที่ความหนา 4 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV และโฟตอนทุติยภูมิ)



รูปที่ 8 : สเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ความหนา 4 ซม.



รูปที่ 9 : กราฟแท่งความสัมพัทธ์ระหว่างชนิดของวัสดุกำบังชนิดต่างๆ ที่ความหนา 4 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีจำลองพลังงาน 1E-8 – 100 MeV ดังแสดงในรูปที่ 9 และโฟตอนทุติยภูมิ)



รูปที่ 10 : สเปกตรัมของโฟตอนิวตรอนที่ได้จาก ต้นกำเนิดรังสีจำลองพลังงาน 1E-8 – 100 MeV ด้วยโปรแกรม Monte Carlo-N- Particle (MCNP5)

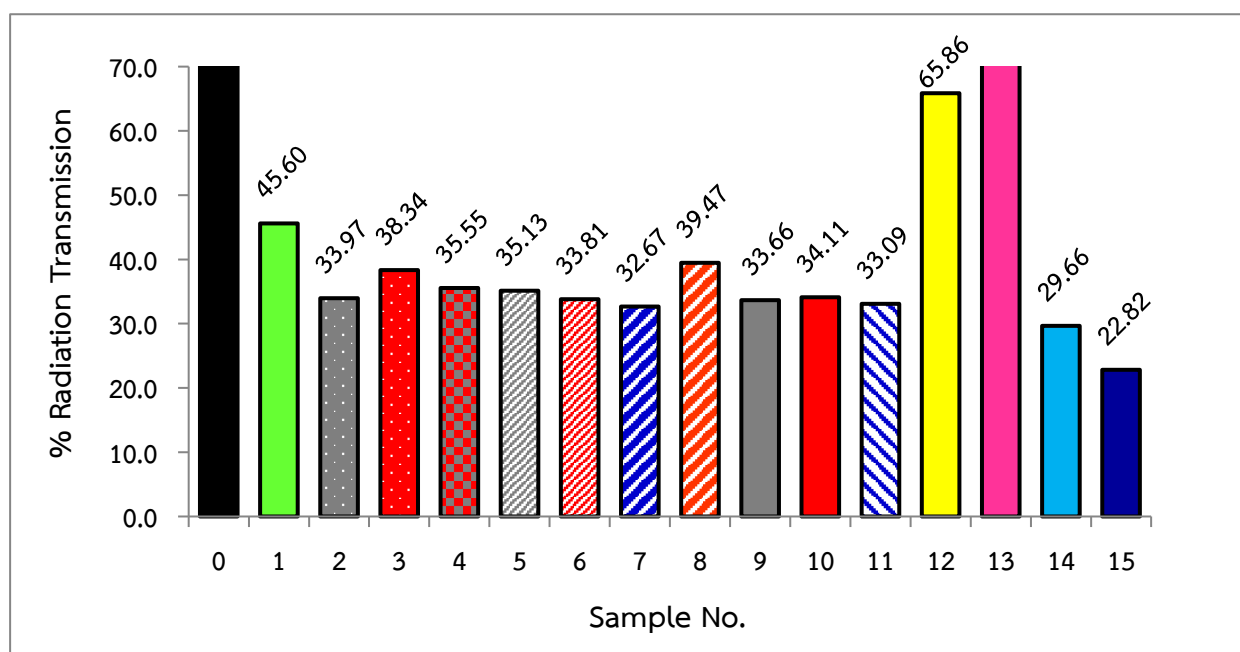
### 3.3.2 ปริมาณรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุตัวอย่างหนา 8 ซม.

จากผลการจำลองร้อยละปริมาณรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุตัวอย่าง (% Radiation transmission) หนา 4 ซม. พบว่าวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 มี % Radiation transmission ต่ำที่สุด (ไม่รวมวัสดุเปรียบเทียบกับ; comparative material) มีค่าเท่ากับ 32.67% ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน ซึ่งโดยภาพรวมให้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังนิวตรอนที่มีความหนา 4 ซม. แต่วัสดุที่มีปริมาณของยางพาราสูงสุดหรือมีจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนสูงสุดได้แก่ วัสดุหมายเลข 1 มีความสามารถในการลดทอนพลังงานนิวตรอนในย่านนิวตรอนเร็วมากที่สุดแล้วเปลี่ยนไปเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ดังแสดงให้เห็นในสเปกตรัมสีเขียวจากรูปที่ 11 ซึ่งความสามารถในการลดทอนพลังงานของนิวตรอนของวัสดุมีความสัมพันธ์กับความหนาของวัสดุ เนื่องจาก สเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จากเครื่อง LINAC 15 MV ส่วนใหญ่เป็นนิวตรอนเร็วที่มี Mean free path หรือระยะที่นิวตรอนสามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นยางพาราก่อนเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางซึ่งมีค่าประมาณ 7.2 ซม. (คำนวณจาก Macroscopic cross section ที่ได้จากราฟรูปที่ 13) ทำให้ระยะความหนาของวัสดุที่ต่ำกว่าค่า Mean free path อาจมีผลทำให้มีโอกาสการทำอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับไฮโดรเจนในยางพาราลดต่ำลง

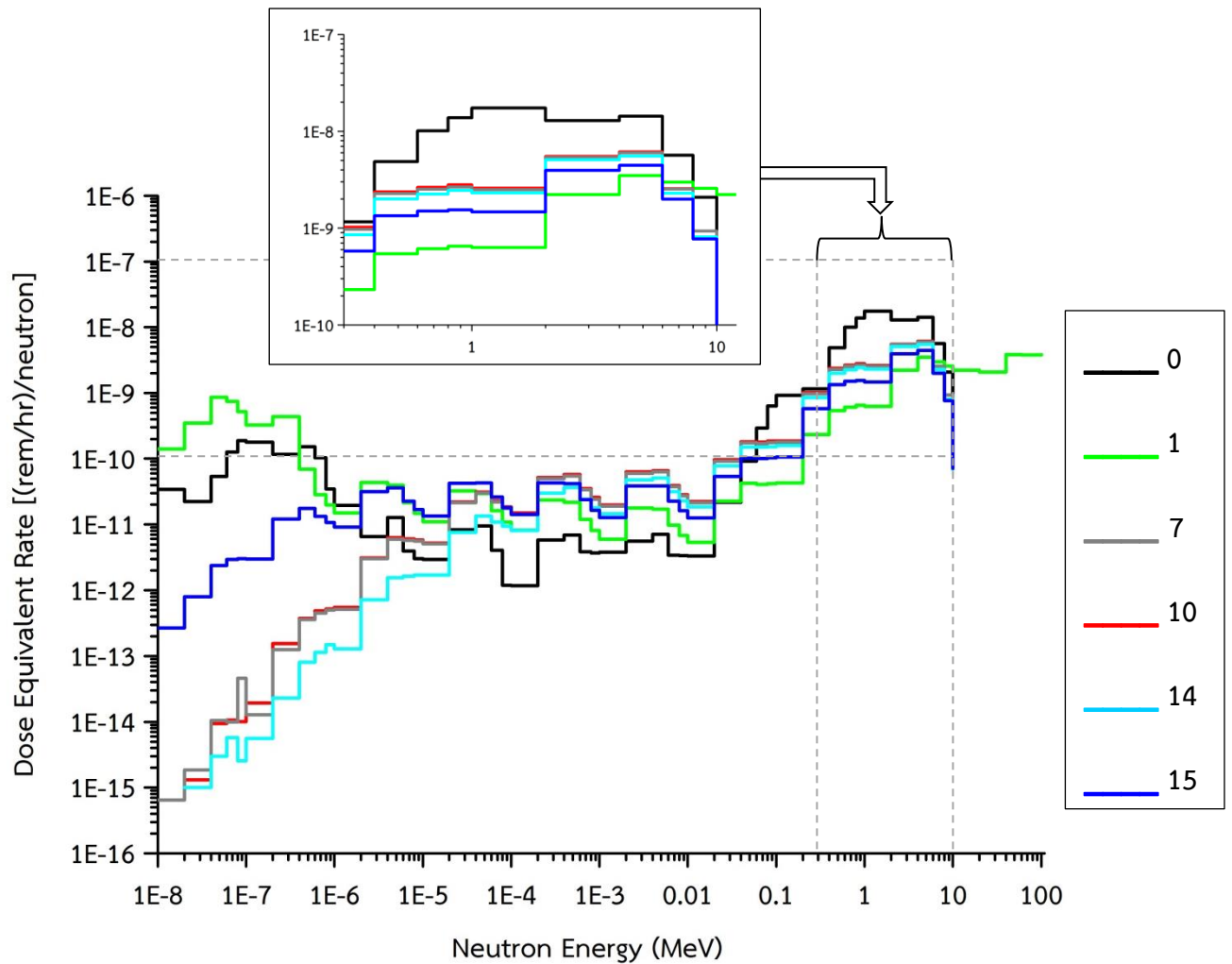
**ตารางที่ 6 อัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent Rate; Rate [(rem/hr).neutron]) ที่ผ่านออกจากวัสดุตัวอย่าง หนา 8 ซม.**

| Sample No. | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).source] |            |            |            |            |            | % Transmission |
|------------|------------------------------|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|
|            |                              | Neutron                                | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                |
| 0          | 0.0012                       | 8.5508E-08                             | 1.7102E-11 | 1.1843E-13 | 1.4981E-14 | 8.5508E-08 | 1.7102E-11 | 100.00         |
| 1          | 0.9200                       | 3.7480E-08                             | 2.2488E-11 | 1.5120E-09 | 9.0722E-13 | 3.8992E-08 | 2.2506E-11 | 45.60          |
| 2          | 1.1557                       | 2.8362E-08                             | 1.9853E-11 | 6.8106E-10 | 2.7242E-13 | 2.9043E-08 | 1.9855E-11 | 33.97          |
| 3          | 1.2678                       | 3.0949E-08                             | 1.8570E-11 | 1.8346E-09 | 1.2842E-12 | 3.2784E-08 | 1.8614E-11 | 38.34          |
| 4          | 1.4346                       | 2.9769E-08                             | 2.0838E-11 | 6.3293E-10 | 2.5317E-13 | 3.0402E-08 | 2.0840E-11 | 35.55          |
| 5          | 1.1557/1.2678                | 2.9374E-08                             | 2.0562E-11 | 6.6559E-10 | 5.3247E-13 | 3.0040E-08 | 2.0569E-11 | 35.13          |
| 6          | 1.2678/1.1557                | 2.7902E-08                             | 1.9531E-11 | 1.0074E-09 | 5.0372E-13 | 2.8909E-08 | 1.9538E-11 | 33.81          |
| 7          | 0.9200/1.1557                | 2.7161E-08                             | 2.1728E-11 | 7.7374E-10 | 3.0950E-13 | 2.7934E-08 | 2.1731E-11 | 32.67          |
| 8          | 0.9200/1.2678                | 3.0309E-08                             | 2.1216E-11 | 3.4435E-09 | 1.3774E-12 | 3.3752E-08 | 2.1261E-11 | 39.47          |
| 9          | 1.1557/1.2678                | 2.7983E-08                             | 1.9588E-11 | 7.9928E-10 | 3.9964E-13 | 2.8782E-08 | 1.9592E-11 | 33.66          |

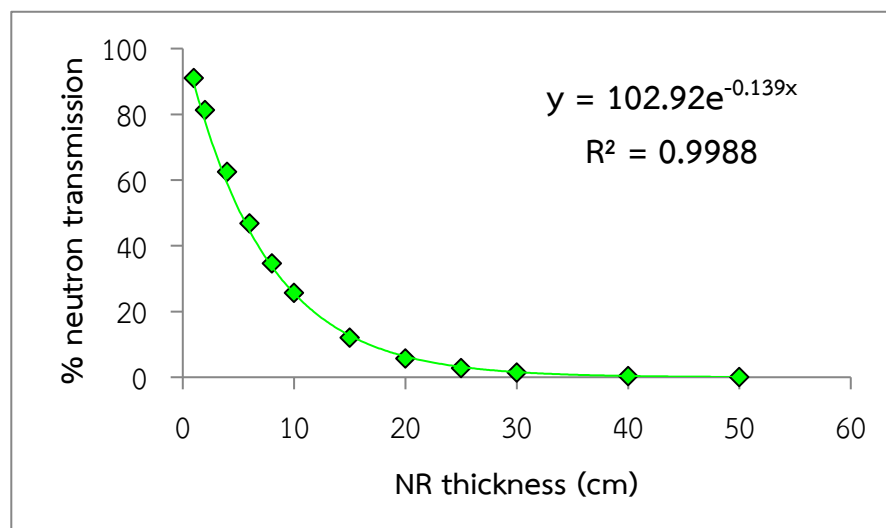
| Sample No. | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).source] |            |            |            |            |            | % Transmission |
|------------|------------------------------|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|
|            |                              | Neutron                                | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                |
| 10         | 1.2678/1.1557                | 2.8553E-08                             | 1.9987E-11 | 6.1504E-10 | 3.0752E-13 | 2.9168E-08 | 1.9989E-11 | 34.11          |
| 11         | 1.1557/0.9200                | 2.7676E-08                             | 1.9373E-11 | 6.1903E-10 | 2.4761E-13 | 2.8295E-08 | 1.9375E-11 | 33.09          |
| 12         | 2.3700                       | 5.5888E-08                             | 2.7944E-11 | 4.3103E-10 | 2.5862E-13 | 5.6319E-08 | 2.7945E-11 | 65.86          |
| 13         | 5.2000                       | 8.5734E-08                             | 2.5720E-11 | 1.0211E-09 | 1.1233E-12 | 8.6755E-08 | 2.5745E-11 | 101.50         |
| 14         | 1.5500                       | 2.4688E-08                             | 1.9751E-11 | 6.7704E-10 | 2.7082E-13 | 2.5365E-08 | 1.9752E-11 | 29.66          |
| 15         | 1.0400                       | 1.8731E-08                             | 1.6858E-11 | 7.8581E-10 | 2.3574E-13 | 1.9517E-08 | 1.6860E-11 | 22.82          |



รูปที่ 11 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของวัสดุกำบังชนิดต่างๆ ที่ความหนา 8 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV และโฟตอนทุติยภูมิ)



รูปที่ 12 : สเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ความหนา 8 ซม.



รูปที่ 13 : ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของยางพารา(NR) และร้อยละการส่งผ่านปริมาณรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี (% Neutron transmission)

ซึ่งคำนวณหาค่า Macroscopic cross section ( $\Sigma$ ) ได้เท่ากับ  $0.139 \text{ ซม.}^{-1}$  [ Mean free path ( $\lambda$ )=  $1/\Sigma$  ]



### 3.4 การกำหนดปริมาณสารตัวเติมที่ทำหน้าที่ในการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่าง

#### หมายเลข 7

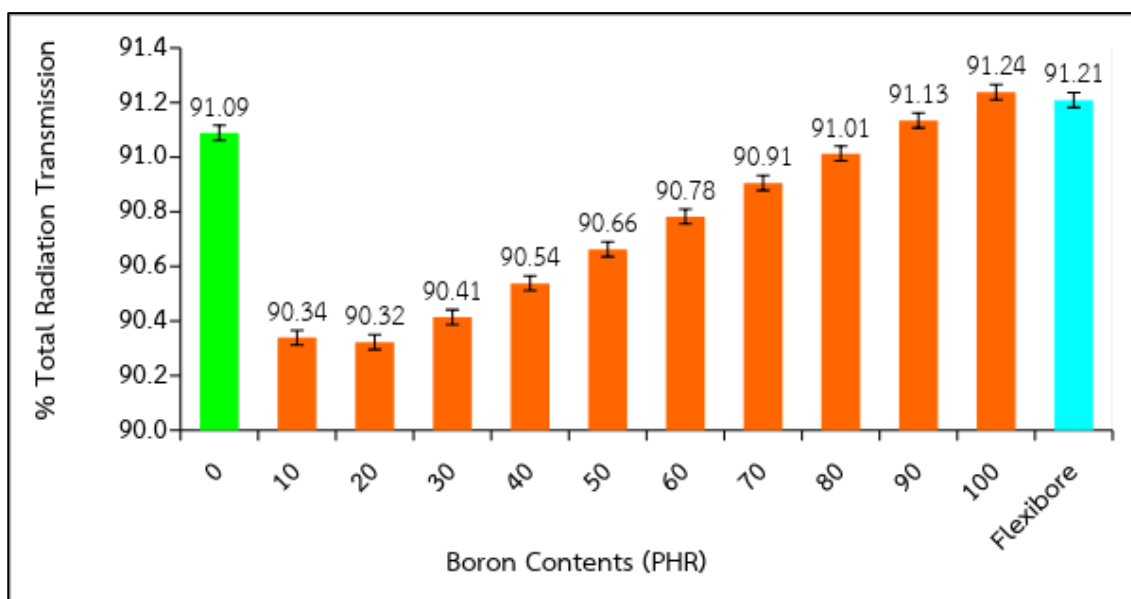
ผลจากการจำลองการลดทอนรังสีของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ดังข้อ 3.2.1 -3.2.2 พบว่าวัสดุหมายเลข 7 ที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน มีความสามารถในการลดทอนนิวตรอนสูงสุด เนื่องจากรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีส่วนใหญ่เป็นนิวตรอนพลังงานสูงหรือนิวตรอนเร็ว ที่มีโอกาสในการทำอันตรกิริยาดำกับกับโบรอนซึ่งเป็นวัสดุดูดกลืนนิวตรอน จึงต้องทำการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้มีพลังงานลดลงหรือเปลี่ยนเป็นเทอร์มัลนิวตรอนก่อนจึงจะทำให้ เทอร์มัลนิวตรอนสามารถถูกดูดกลืนได้ดีด้วย โบรอน-10 (thermal neutron (energy  $\sim 0.0253\text{eV}$ ) absorption cross section = 3840 barn(5)) จึงดำเนินการขั้นตอนต่อไปในการกำหนดปริมาณผงโบรอนในหน่วย PHR ที่จะทำการเติมเข้าไปในชั้นของวัสดุยางพาราผสมโบรอนโดยออกแบบวัสดุที่มีความหนา รวม 1 ซม.(0.25 ซม./ชั้น) 4 ซม.(1 ซม./ชั้น) และ 8 ซม.(2 ซม./ชั้น)

#### 3.4.1 ความหนา 1 ซม.

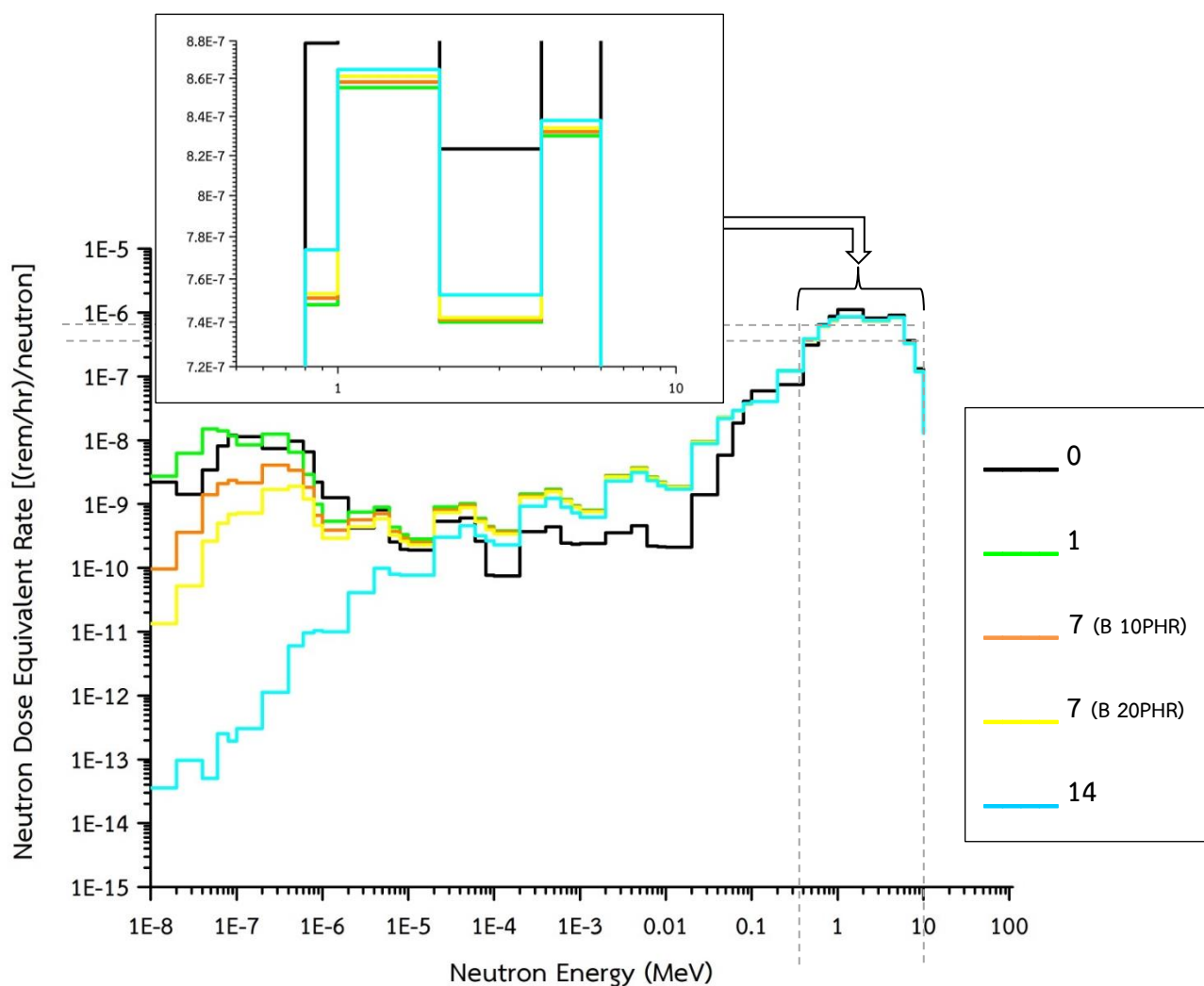
ชั้นของยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมกับผงโบรอน( natural boron) ที่มีอัตราส่วนตั้งแต่ 0 – 100 PHR พบว่าวัสดุที่มีส่วนประกอบของโบรอน 20 PHR สามารถลดทอนปริมาณนิวตรอนรวมทั้งโฟตอนทุติยภูมิ (secondary photon) ได้ดีที่สุด โดยลดปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีได้ 9.68% (เหลือ 90.32%) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟแท่งดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าส่วนประกอบของโบรอนที่ 10 PHR และ 20 PHR มีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยยังอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อมูล โดยมีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่า Flexibore ที่ความหนาที่เท่ากัน เนื่องจากที่ความหนา 1 cm ความสามารถของ โบรอน-10 ในการดูดกลืนรังสีนิวตรอนเป็นไปอย่างไม่มีเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากรังสีส่วนใหญ่อยู่ในย่านของนิวตรอนเร็วซึ่ง โบรอน-10 มีโอกาสหรือค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนต่ำ (fast neutron (energy  $\sim 1\text{ MeV}$ ) absorption cross section = 0.189 barn(5)) ดังนั้นเมื่อสังเกตสเปกตรัมการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุต่างๆในแต่ละช่วงพลังงานจะเห็นว่าวัสดุที่มีส่วนประกอบของโบรอนในปริมาณมาก เช่น Flexibore ดังแสดงในสเปกตรัมสีฟ้า รูปที่ 15 สามารถลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนได้ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนหรือพลังงานต่ำกว่า  $1\text{E-5 MeV}$  เท่านั้น ส่วนในช่วงนิวตรอนเร็ว วัสดุที่มีปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนสูงจะช่วยลดทอนพลังงานในช่วงนี้ได้ดี ดังสเปกตรัมสีเขียวของยางพารา รองลงมาได้แก่ สเปกตรัมสีส้มและสีเหลืองของ วัสดุหมายเลข 7 ที่มีโบรอน 10 PHR และ 20 PHR ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นวัสดุกำบังนิวตรอนที่สามารถลดปริมาณรังสีนิวตรอนได้ในทุกช่วงพลังงานจึงต้องมีปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนและปริมาณของโบรอนที่เหมาะสมรวมทั้งมีการจัดวางตำแหน่งของวัสดุกำบังรังสีในแต่ละชั้นให้เหมาะสมเช่นเดียวกันด้วย

**ตารางที่ 7 อัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent Rate; Rate [(rem/hr).neutron]) ที่ผ่านออกจาก  
วัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 1 ซม.**

| Boron<br>content<br>(PHR) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).source] |            |            |            |            |            | %<br>Transmission | SD   |
|---------------------------|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|------|
|                           | Neutron                                | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                   |      |
| no                        | 5.4678E-06                             | 1.0936E-09 | 1.4332E-12 | 8.4187E-13 | 5.4678E-06 | 1.0936E-09 | 100.00            | 0.02 |
| 0                         | 4.9790E-06                             | 1.4937E-09 | 1.5075E-09 | 7.8389E-12 | 4.9805E-06 | 1.4937E-09 | 91.09             | 0.03 |
| 10                        | 4.9266E-06                             | 1.4780E-09 | 1.2935E-08 | 1.1642E-11 | 4.9395E-06 | 1.4780E-09 | 90.34             | 0.03 |
| 20                        | 4.9242E-06                             | 1.4773E-09 | 1.4397E-08 | 1.1517E-11 | 4.9386E-06 | 1.4773E-09 | 90.32             | 0.03 |
| 30                        | 4.9289E-06                             | 1.4787E-09 | 1.4739E-08 | 1.1791E-11 | 4.9436E-06 | 1.4787E-09 | 90.41             | 0.03 |
| 40                        | 4.9356E-06                             | 1.4807E-09 | 1.4829E-08 | 1.0380E-11 | 4.9504E-06 | 1.4807E-09 | 90.54             | 0.03 |
| 50                        | 4.9424E-06                             | 1.4827E-09 | 1.4865E-08 | 1.0405E-11 | 4.9572E-06 | 1.4827E-09 | 90.66             | 0.03 |
| 60                        | 4.9489E-06                             | 1.4847E-09 | 1.4883E-08 | 1.0418E-11 | 4.9638E-06 | 1.4847E-09 | 90.78             | 0.03 |
| 70                        | 4.9556E-06                             | 1.4867E-09 | 1.4900E-08 | 1.0430E-11 | 4.9705E-06 | 1.4867E-09 | 90.91             | 0.03 |
| 80                        | 4.9615E-06                             | 1.4885E-09 | 1.4914E-08 | 1.0439E-11 | 4.9764E-06 | 1.4885E-09 | 91.01             | 0.03 |
| 90                        | 4.9681E-06                             | 1.4904E-09 | 1.4932E-08 | 1.0452E-11 | 4.9830E-06 | 1.4905E-09 | 91.13             | 0.03 |
| 100                       | 4.9738E-06                             | 1.4921E-09 | 1.4949E-08 | 1.0464E-11 | 4.9887E-06 | 1.4922E-09 | 91.24             | 0.03 |
| Flexibore                 | 4.9726E-06                             | 1.4918E-09 | 1.4571E-08 | 1.0200E-11 | 4.9871E-06 | 1.4918E-09 | 91.21             | 0.03 |



รูปที่ 14 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 ที่มีส่วนประกอบของโบรอนในปริมาณต่างๆ (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 1 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV และโฟตอนทุติยภูมิ)



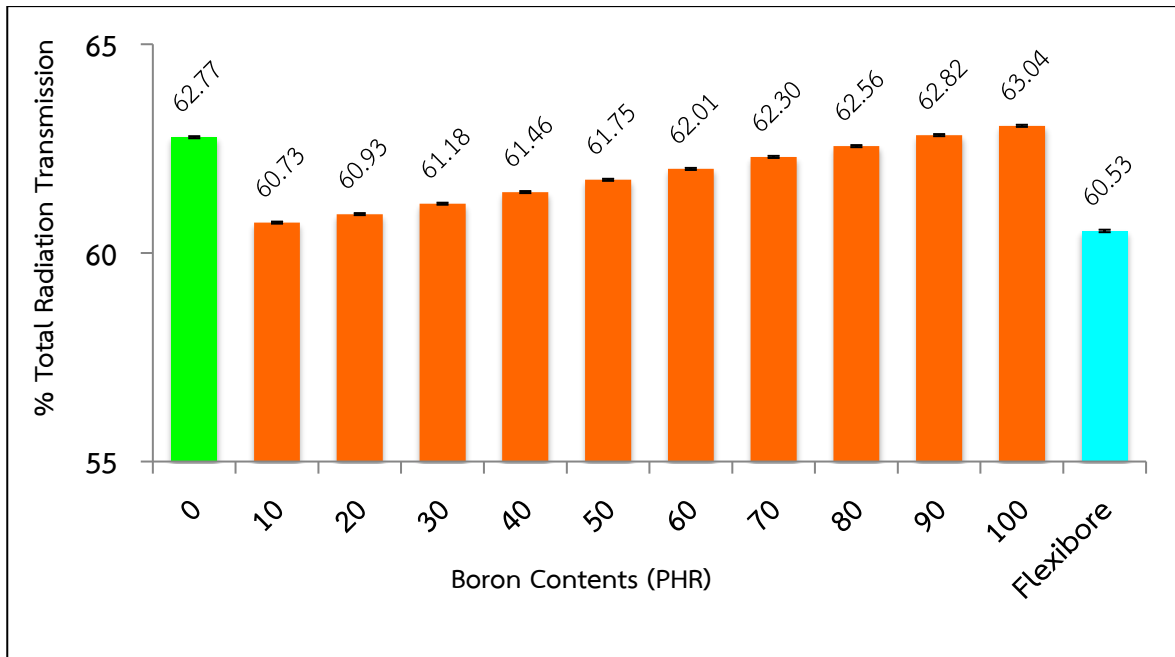
รูปที่ 15 : สเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ความหนา 1 ซม.

### 3.4.2 ความหนา 4 ซม.

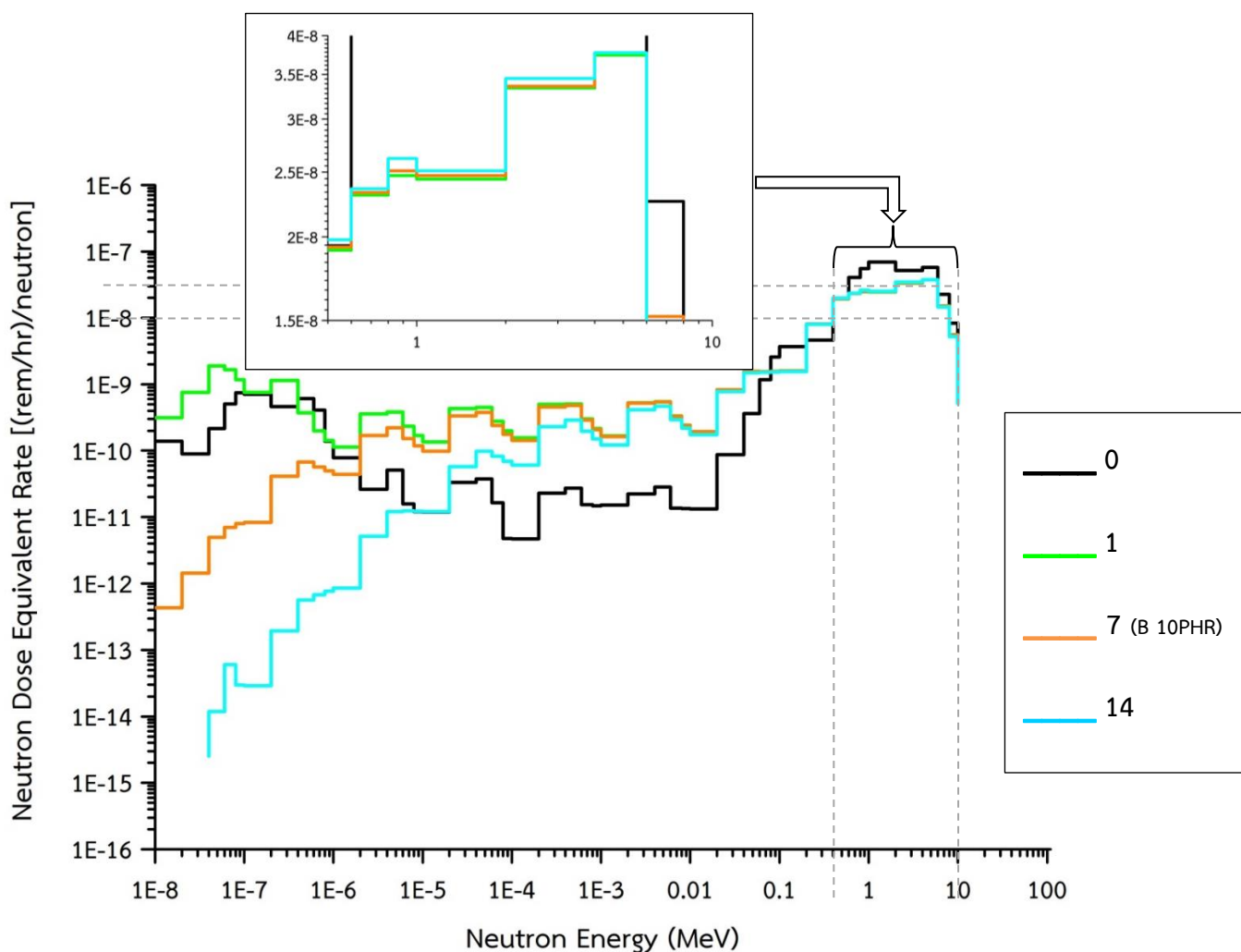
วัสดุที่มีส่วนประกอบของโบรอน 10 PHR สามารถลดทอนปริมาณนิวตรอนรวมทั้ง โฟตอนทุติยภูมิ ได้ดีที่สุด โดยลดปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีได้ 39.27% (เหลือ 60.73%) ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าวัสดุที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะสามารถลดทอนปริมาณรังสีมากขึ้นตามแม้จะมีปริมาณของ โบรอนในอัตราส่วนเดิม เนื่องจากการเพิ่มความหนาของวัสดุลดทอนพลังงานนิวตรอนหรือ moderator จะทำให้นิวตรอนมีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางแล้วถูกลดทอนพลังงานเป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้มากขึ้น ก่อนถูกดูดกลืนด้วย โบรอน-10 ต่อไป

**ตารางที่ 8 อัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent Rate; Rate [(rem/hr).neutron]) ที่ผ่านออกจาก  
วัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 4 ซม.**

| Boron<br>content<br>(PHR) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).source] |            |            |            |            |            | %<br>Transmission | SD   |
|---------------------------|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|------|
|                           | Neutron                                | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                   |      |
| no                        | 3.4186E-07                             | 6.8372E-11 | 2.2044E-13 | 4.5300E-14 | 3.4186E-07 | 6.8372E-11 | 100.00            | 0.02 |
| 0                         | 2.1356E-07                             | 8.5423E-11 | 1.0336E-09 | 1.6537E-12 | 2.1459E-07 | 8.5439E-11 | 62.77             | 0.02 |
| 10                        | 2.0598E-07                             | 8.2393E-11 | 1.6133E-09 | 9.6800E-13 | 2.0760E-07 | 8.2399E-11 | 60.73             | 0.02 |
| 20                        | 2.0662E-07                             | 8.2646E-11 | 1.6785E-09 | 1.0071E-12 | 2.0829E-07 | 8.2652E-11 | 60.93             | 0.02 |
| 30                        | 2.0743E-07                             | 8.2970E-11 | 1.7208E-09 | 1.0325E-12 | 2.0915E-07 | 8.2976E-11 | 61.18             | 0.02 |
| 40                        | 2.0835E-07                             | 8.3339E-11 | 1.7510E-09 | 1.0506E-12 | 2.1010E-07 | 8.3346E-11 | 61.46             | 0.02 |
| 50                        | 2.0933E-07                             | 8.3733E-11 | 1.7705E-09 | 1.0623E-12 | 2.1110E-07 | 8.3740E-11 | 61.75             | 0.02 |
| 60                        | 2.1021E-07                             | 8.4083E-11 | 1.7871E-09 | 1.0723E-12 | 2.1200E-07 | 8.4090E-11 | 62.01             | 0.02 |
| 70                        | 2.1118E-07                             | 8.4472E-11 | 1.7993E-09 | 1.0796E-12 | 2.1298E-07 | 8.4479E-11 | 62.30             | 0.02 |
| 80                        | 2.1205E-07                             | 8.4821E-11 | 1.8091E-09 | 1.0855E-12 | 2.1386E-07 | 8.4828E-11 | 62.56             | 0.02 |
| 90                        | 2.1295E-07                             | 8.5179E-11 | 1.8165E-09 | 1.0899E-12 | 2.1476E-07 | 8.5186E-11 | 62.82             | 0.02 |
| 100                       | 2.1370E-07                             | 8.5482E-11 | 1.8223E-09 | 1.0934E-12 | 2.1553E-07 | 8.5489E-11 | 63.04             | 0.03 |
| Flexibore                 | 2.0510E-07                             | 1.0255E-10 | 1.8164E-09 | 9.0818E-13 | 2.0691E-07 | 1.0255E-10 | 60.53             | 0.03 |



รูปที่ 16 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 ที่มีส่วนประกอบของโบรอนในปริมาณต่างๆ (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 4 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV และโฟตอนทุติยภูมิ)



รูปที่ 17 : สเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ความหนา 4 ซม.

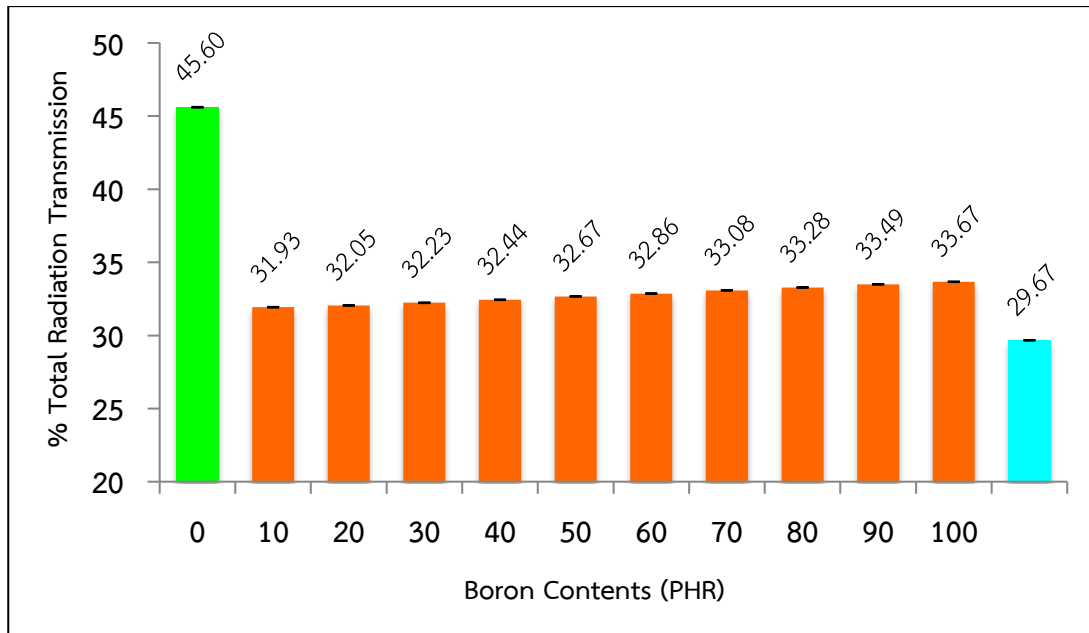
### 3.4.3 การกำหนดปริมาณสารตัวเติมที่ทำหน้าที่ในการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่าง หมายเลข 7 ความหนา 8 ซม.

วัสดุที่มีส่วนประกอบของโบรอน 10 PHR สามารถลดทอนปริมาณนิวตรอนรวมทั้งโฟตอนทุติยภูมิได้ดีที่สุด โดยลดปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีได้ 68.07% (เหลือ 31.93%) โดยสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโบรอนในวัสดุกำบังจนถึง 100 PHR ก็ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีได้ เนื่องจากรังสีจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนส่วนใหญ่อยู่ในย่านของนิวตรอนเร็วซึ่งมีโอกาสการถูกดูดกลืนด้วยโบรอนต่ำ

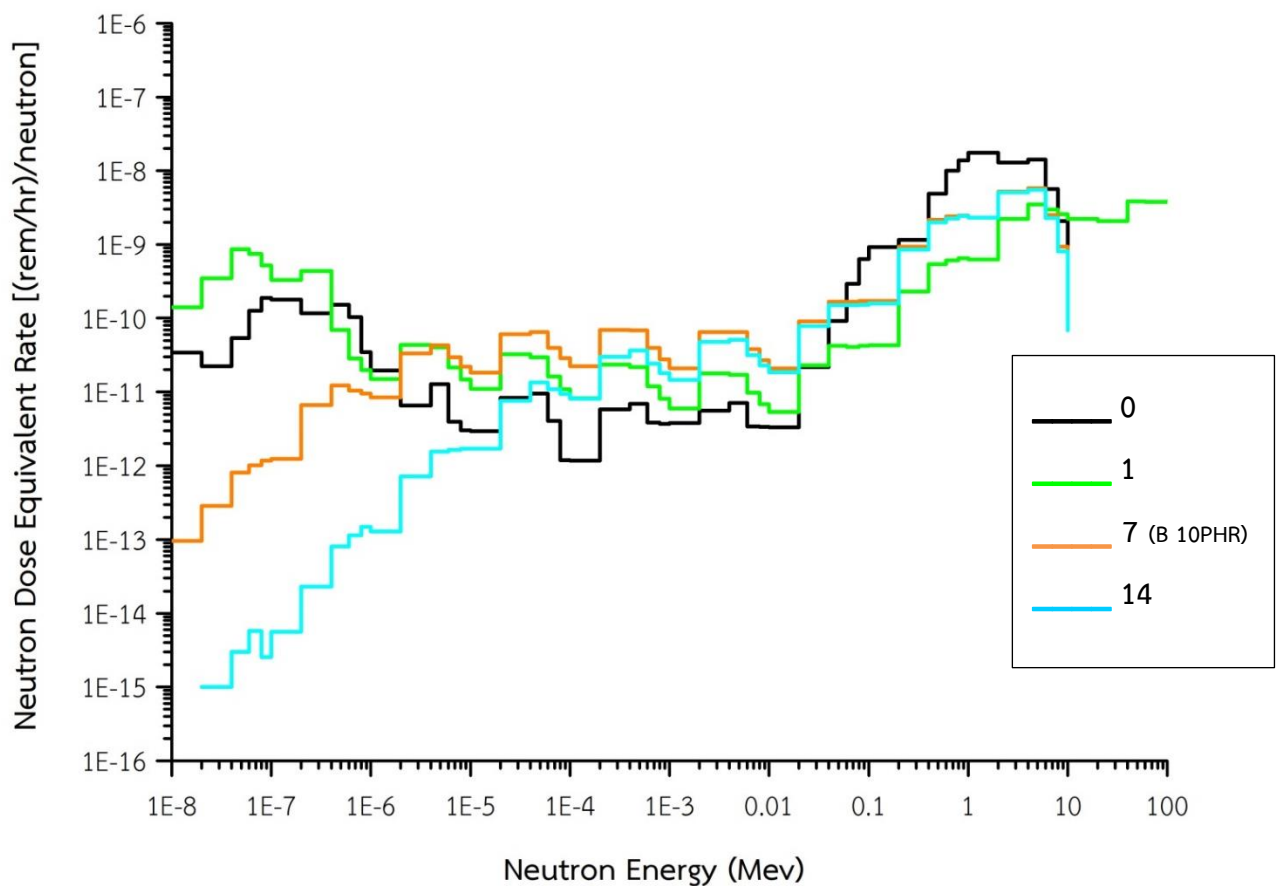
**ตารางที่ 9 อัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent Rate; Rate [(rem/hr).neutron]) ที่ผ่านออกจาก  
วัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 8 ซม.**

| Boron<br>content<br>(PHR) | Dose Equivalent Rate [(rem/hr).source] |            |            |            |            |            | %<br>Transmission | SD   |
|---------------------------|----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|------|
|                           | Neutron                                | SD         | Photon     | SD         | Total      | SD         |                   |      |
| no                        | 8.5505E-08                             | 1.7101E-11 | 1.0791E-13 | 2.2099E-14 | 8.5505E-08 | 1.7101E-11 | 100.00            | 0.02 |
| 0                         | 3.7480E-08                             | 2.2488E-11 | 1.5120E-09 | 9.0722E-13 | 3.8992E-08 | 2.2506E-11 | 45.60             | 0.03 |
| 10                        | 2.6515E-08                             | 2.1212E-11 | 7.8530E-10 | 3.1412E-13 | 2.7300E-08 | 2.1214E-11 | 31.93             | 0.02 |
| 20                        | 2.6623E-08                             | 2.1298E-11 | 7.8154E-10 | 3.1261E-13 | 2.7404E-08 | 2.1301E-11 | 32.05             | 0.02 |
| 30                        | 2.6784E-08                             | 2.1427E-11 | 7.7861E-10 | 3.1144E-13 | 2.7563E-08 | 2.1429E-11 | 32.23             | 0.03 |
| 40                        | 2.6964E-08                             | 2.1571E-11 | 7.7640E-10 | 3.1056E-13 | 2.7740E-08 | 2.1573E-11 | 32.44             | 0.03 |
| 50                        | 2.7161E-08                             | 2.1728E-11 | 7.7374E-10 | 3.0950E-13 | 2.7934E-08 | 2.1731E-11 | 32.67             | 0.03 |
| 60                        | 2.7329E-08                             | 2.1864E-11 | 7.7121E-10 | 3.0849E-13 | 2.8101E-08 | 2.1866E-11 | 32.86             | 0.03 |
| 70                        | 2.7516E-08                             | 2.2013E-11 | 7.6841E-10 | 3.0736E-13 | 2.8284E-08 | 2.2015E-11 | 33.08             | 0.03 |
| 80                        | 2.7690E-08                             | 2.2152E-11 | 7.6589E-10 | 3.0635E-13 | 2.8456E-08 | 2.2154E-11 | 33.28             | 0.03 |
| 90                        | 2.7874E-08                             | 2.2299E-11 | 7.6321E-10 | 3.0528E-13 | 2.8637E-08 | 2.2301E-11 | 33.49             | 0.03 |
| 100                       | 2.8030E-08                             | 1.9621E-11 | 7.6090E-10 | 3.0436E-13 | 2.8790E-08 | 1.9623E-11 | 33.67             | 0.02 |
| Flexibore                 | 2.4688E-08                             | 1.9751E-11 | 6.7704E-10 | 2.7082E-13 | 2.5365E-08 | 1.9752E-11 | 29.67             | 0.02 |





รูปที่ 18 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 ที่มีส่วนประกอบของโบรอนในปริมาณต่าง ๆ (Boron 0-10 PHR) ที่ความหนา 8 ซม. และร้อยละการลดทอนปริมาณรังสี (นิวตรอนจากเครื่อง LINAC 15 MV และโฟตอนทุติยภูมิ)



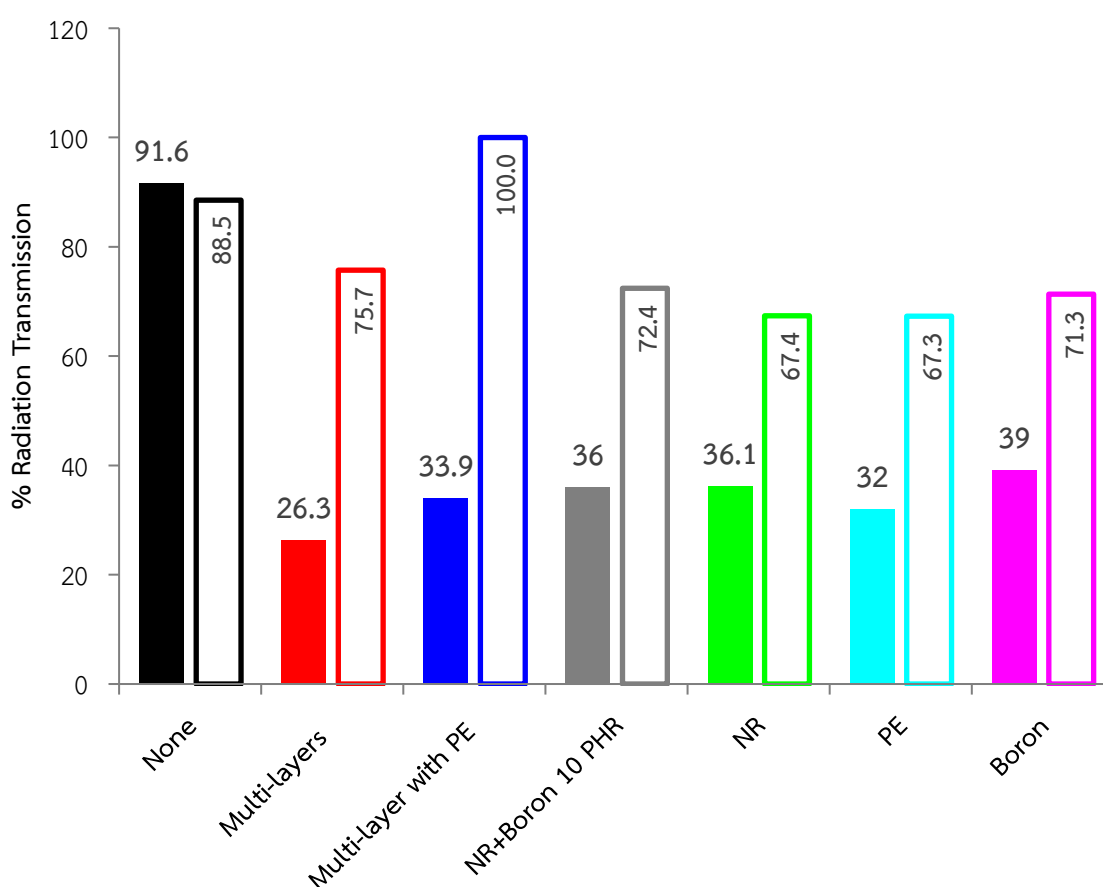
รูปที่ 19 : สเปกตรัมการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ความหนา 8 ซม.

### 3.5 การจำลองการลดทอนโฟโตนิวตรอน (photo-neutron attenuation) จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV เมื่อกำบังด้วยวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีส่วนประกอบของวัสดุตัวเติมที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MCNP

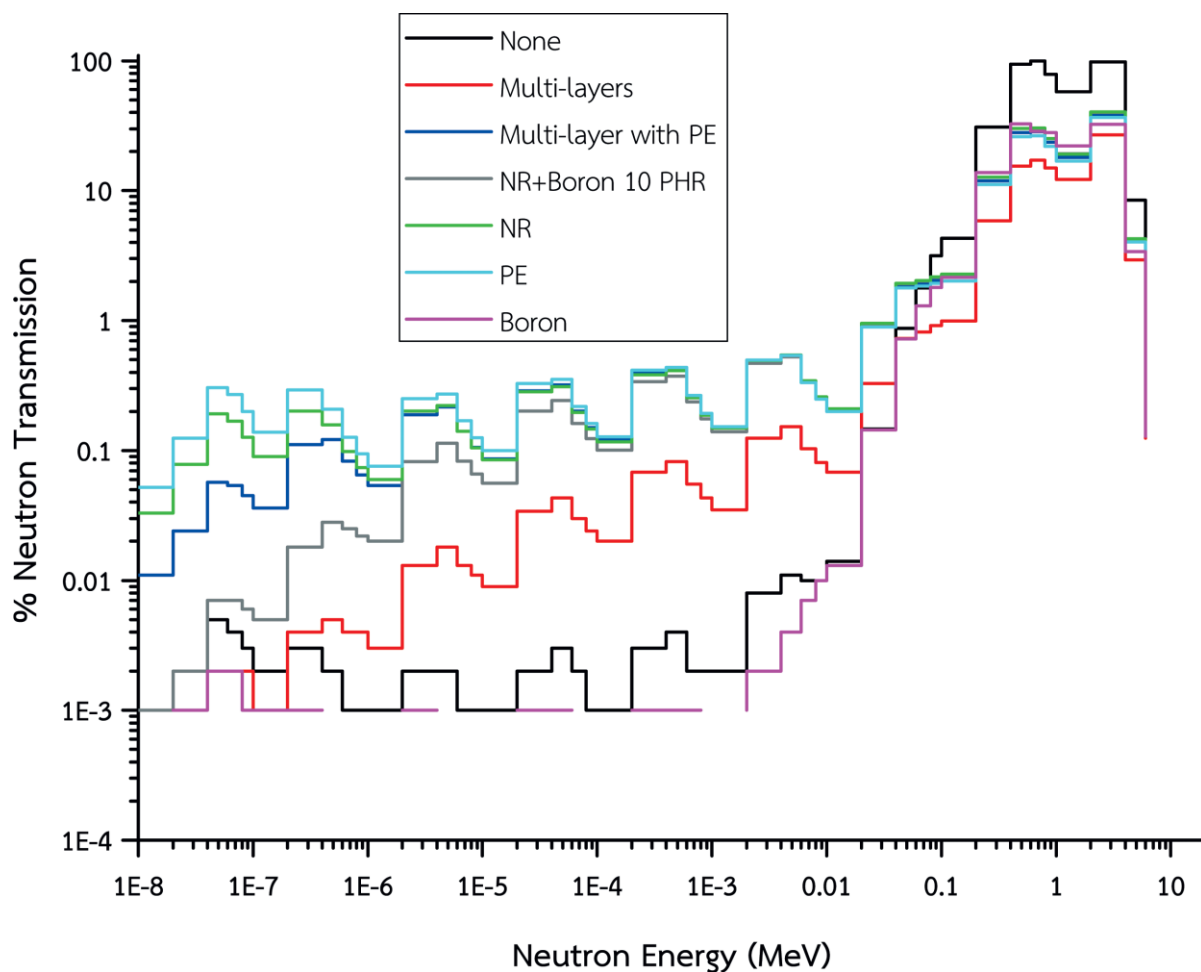
วัสดุที่เลือกใช้เพื่อเป็นวัสดุกำบังนิวตรอน ได้แก่ วัสดุหมายเลข 7 ที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน 10 PHR โดยให้ชั้นของวัสดุที่อยู่ใกล้กับต้นกำเนิดรังสีเป็นชั้นของยางพาราถัดไปคือ ยางพาราผสมโบรอน ยางพารา และยางพาราผสมโบรอนตามลำดับ (อ้างอิงจากผลการดำเนินการขั้นตอนที่ 3.4) ต่อไปจะเรียกว่า “*Multi - layers neutron shield*”

#### 3.5.1 การเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนนิวตรอนของวัสดุกำบังนิวตรอนชนิดต่างๆ

วัสดุกำบังความหนา 1 ซม.



รูปที่ 20 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสี (%Radiation Transmission) และชนิดของวัสดุกำบังนิวตรอน ที่ความหนา 1 ซม. [ แท่งทึบ; Neutron แท่งโปร่ง; Secondary photon ]

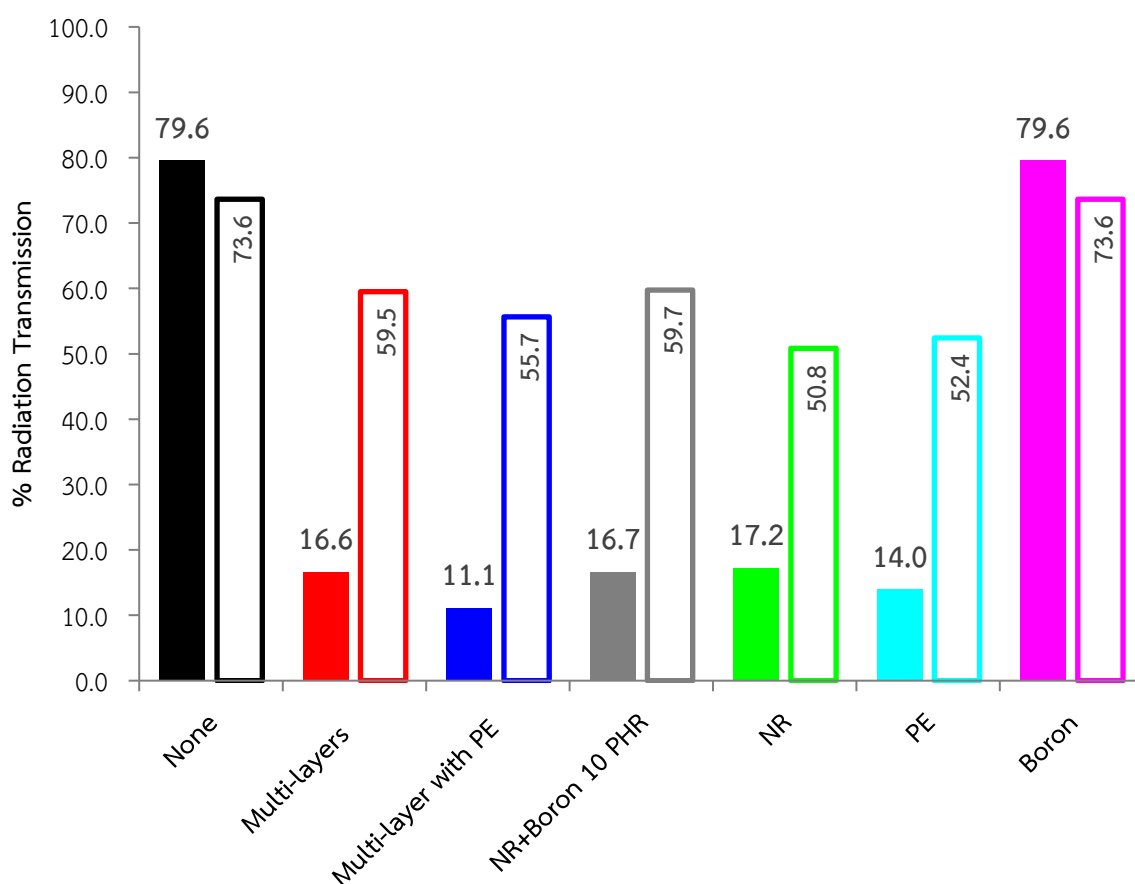


รูปที่ 21 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสีนิวตรอน (%Neutron Transmission) และ พลังงานของนิวตรอน (Neutron Energy (MeV)) ของวัสดุกำบังนิวตรอนชนิดต่างๆ ที่ความหนา 1 ซม.

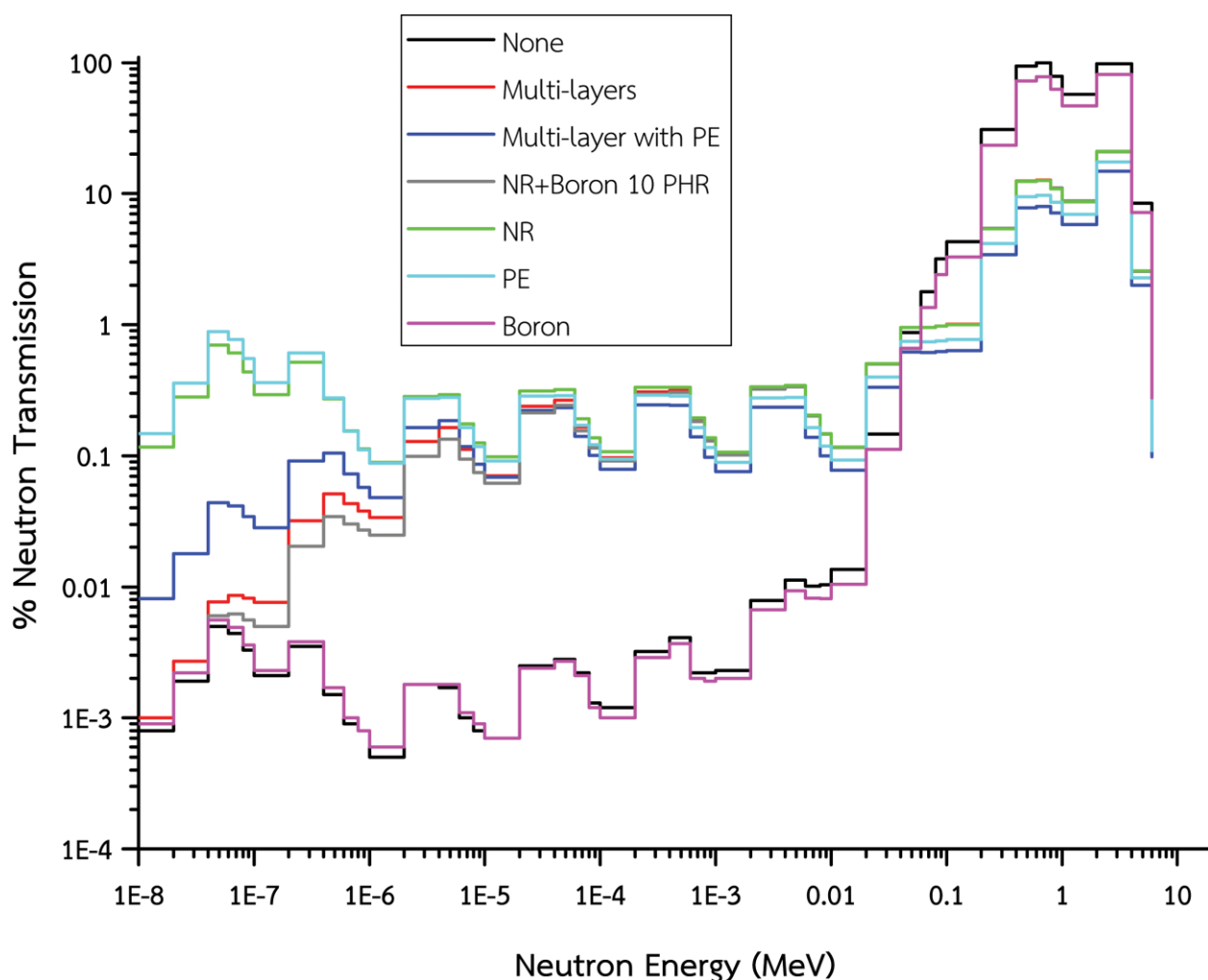
จากกราฟแท่ง รูปที่ 20 กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสี (%Radiation Transmission) และชนิดของวัสดุกำบังนิวตรอน ที่ความหนา 1 ซม. สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า วัสดุกำบังนิวตรอนในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ **Multi-layers** ดังแสดงใน**กราฟแท่งสีแดง** สามารถลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนได้มากที่สุด หรือกล่าวอีกนัยคือ มีปริมาณรังสีนิวตรอนที่ส่งผ่านออกมาหลังจากกำบังด้วยวัสดุกำบังน้อยที่สุด (26.3%) เนื่องจาก Multi-Layers neutron shield ประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่ประกอบด้วยยางพาราซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมไฮโดรเจนในปริมาณสูง ซึ่งสามารถลดทอนพลังงานจากนิวตรอนพลังงานสูง (0.1 – 10 MeV) ได้ดี ส่งผลให้ %Neutron Transmission มีค่าน้อย ดังแสดงได้ใน**กราฟเส้นสีแดง** รูปที่ 21 ในขณะเดียวกันในช่วงนิวตรอนพลังงานต่ำก็สามารถถูกลดทอนได้ดีเช่นเดียวกันเนื่องจากมีส่วนประกอบของชั้นที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ เพราะโบรอน-10 มีค่าภาคตัดขวางกับนิวตรอนสูง (high neutron cross-section) ในย่านของนิวตรอนพลังงานต่ำ นอกจากนั้น ยังสามารถลดทอนปริมาณ secondary photon ได้บ้าง ดังแสดงให้เห็นในกราฟแท่งโปร่ง แม้วัสดุ Multi-Layers รวมทั้งวัสดุอื่นๆ จะสามารถลดทอน secondary photon ได้เพียงเล็กน้อย แต่เนื่องจากปริมาณ secondary photon นี้เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เพียงประมาณ 1/1000 ของปริมาณรังสีนิวตรอน นอกจากนั้น photon ยังเป็นรังสีที่มี Linear Energy Transfer (LET) ต่ำเมื่อเทียบกับนิวตรอน จึงเป็นปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการประเมินความสามารถในการกำบังนิวตรอนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณา วัสดุ **Boron** ที่มีเพียงโบรอนเป็นส่วนประกอบเพียงชนิดเดียว ซึ่งมีปริมาณโบรอนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ จึงทำให้สามารถลดทอนนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีที่สุด ดังแสดงให้เห็นใน **กราฟเส้นสีชมพู** ของรูปที่ 21 แต่ไม่สามารถลดทอนนิวตรอนในย่านพลังงานสูงได้ดีเท่าที่ควร ส่วนวัสดุอื่นๆ เช่น ยางพารา (NR) และพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจนอยู่ในปริมาณสูงแม้จะสามารถลดทอนนิวตรอนพลังงานสูงได้ดีตามทฤษฎี แต่เนื่องจากวัสดุมีความหนาไม่เพียงพอที่จะทำให้นิวตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่ไปในตัวกลางก่อนเกิดทำอันตรกิริยากับวัสดุได้ ซึ่งต้องใช้ความหนาประมาณ 3 - 7 ซม. จึงทำให้การลดทอนรังสีนิวตรอนเกิดขึ้นน้อยกว่าวัสดุที่มีทั้งตัวลดทอนนิวตรอนพลังงานต่ำ (boron-10) และนิวตรอนพลังงานสูง (hydrogen) ดังเช่น Multi-layers neutron shield

**วัสดุกำบังความหนา 4 ซม.**



รูปที่ 22 : กราฟแท่งความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสี (%Radiation Transmission) และชนิดของวัสดุกำบังนิวตรอน ที่ความหนา 4 ซม. [ แท่งทึบ; Neutron แท่งโปร่ง; Secondary photon ]



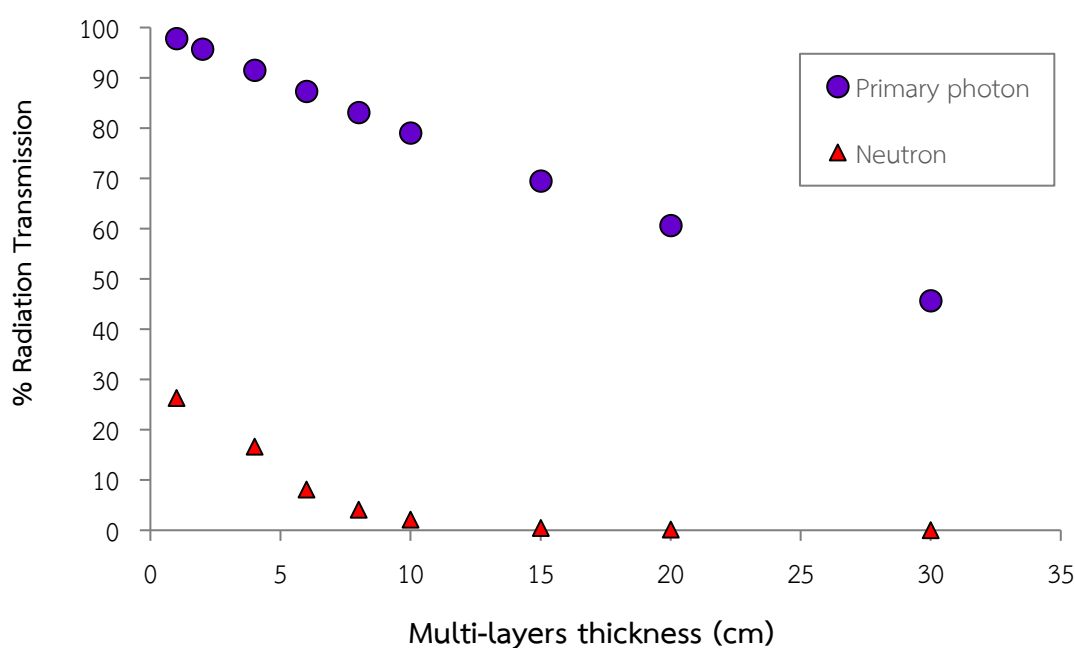
รูปที่ 23 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสีนิวตรอน (%Neutron Transmission) และ พลังงานของนิวตรอน (Neutron Energy (MeV)) ของวัสดุกำบังนิวตรอนชนิดต่างๆ ที่ความหนา 4 ซม.

จากกราฟแท่ง รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสี (%Radiation Transmission) และ ชนิดของวัสดุกำบังนิวตรอน ที่ความหนา 4 ซม. วัสดุกำบังนิวตรอนในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ **Multi-layers** ที่ถูกห่อหุ้มด้วยพอลิเอทิลีน หนา 0.5 ซม. ที่เรียกชื่อว่า **Multi-layers with PE** ดังแสดงใน กราฟแท่งสีน้ำเงิน สามารถลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนได้มากที่สุด เนื่องจากวัสดุกำบังนิวตรอนมีความหนามากถึง 4 ซม. ทำให้มีระยะทางเพียงพอที่นิวตรอนพลังงานสูงจะถูกลดทอนด้วยยางพาราที่เป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุกำบังนิวตรอน และยังมีโบรอนที่ช่วยลดทอนนิวตรอนพลังงานต่ำได้อีกด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟเส้นสีน้ำเงิน ในรูปที่ 23 นอกจากนั้นพอลิเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) ที่มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนต่อโมเลกุลสูง ก็เป็นวัสดุอีกชั้นที่ช่วยลดทอนนิวตรอนพลังงานสูงได้อีกทาง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุ **Multi-layers with PE** ก็ถือว่าเป็นวัสดุที่มีความหนามากกว่าวัสดุอื่นๆ 1 ซม. จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนของวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีความหนา 4 ซม. พบว่า หากวัสดุที่มีส่วนประกอบอะตอมไฮโดรเจนในปริมาณสูงจะสามารถลดทอนนิวตรอนได้ดีเนื่องจากเกิด

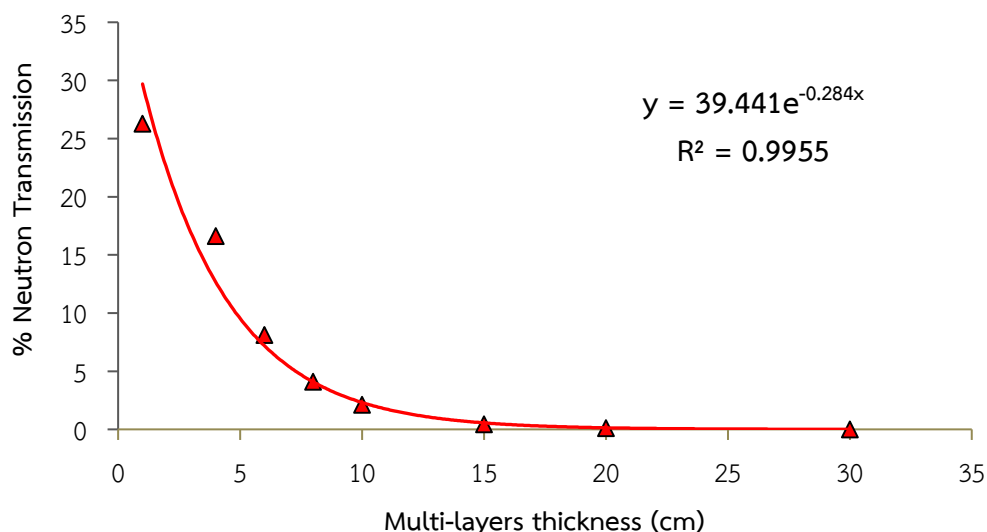
อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสารแบบ Elastic scattering ดังนั้นวัสดุต่างๆที่นำมาประเมินความสามารถในการลดทอนนิวตรอนเหล่านี้ที่มีความหนา 4 ซม. จึงมีความสามารถที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามวัสดุที่ผลิตมาจากยางพาราก็มีข้อดีในแง่ของความยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ตามพื้นผิววัสดุได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน ในขณะที่การใช้โบรอนซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการกำบังรังสีนิวตรอนโดยทั่วไป ไม่สามารถลดทอน Photo-neutron จากเครื่องเร่งอนุภาคได้ เนื่องจากเป็นนิวตรอนในย่านพลังงานสูง สังเกตได้จากกราฟแท่งสีชมพู ในรูปที่ 22

### 3.5.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนรังสีของวัสดุกำบังนิวตรอนเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา



รูปที่ 24 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสี (%Radiation Transmission) ทั้งนิวตรอนและโฟตอนปฐมภูมิของวัสดุ Multi-layers neutron shield และความหนาของวัสดุ (cm)

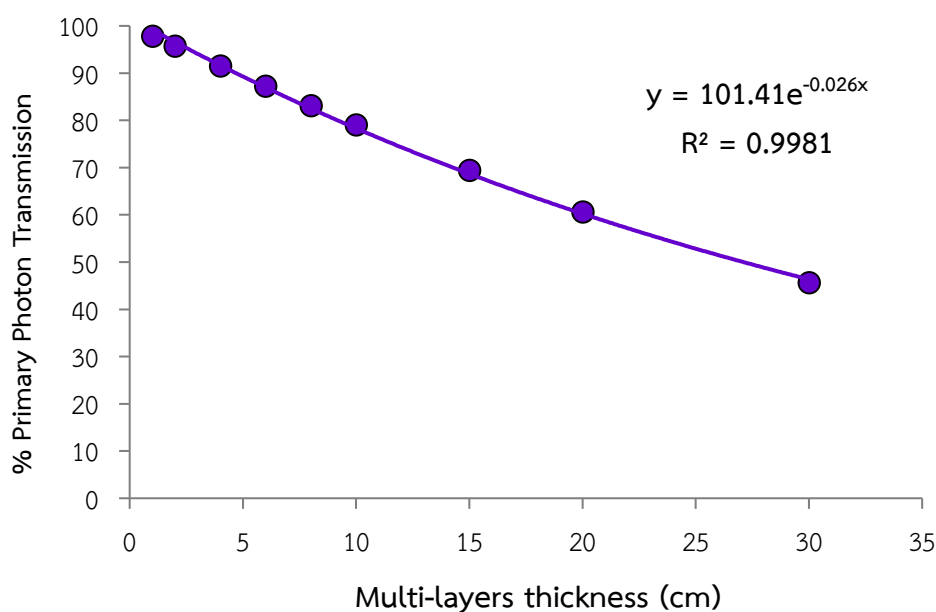
### 3.5.2.1 การลดทอนนิวตรอน



รูปที่ 25 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านรังสีนิวตรอน (%Neutron Transmission) ของวัสดุ Multi-layers neutron shield และความหนาของวัสดุ (cm)

จากรูปที่ 25 เมื่อพิจารณาสมการจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %Neutron Transmission ของวัสดุ Multi-layers neutron shield และความหนาของวัสดุ ทำให้สามารถคำนวณค่า Macroscopic cross-section ( $\Sigma$ ) ได้เท่ากับ  $0.248 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อใช้ในการกำบัง Photo-neutron ที่มีค่าพลังงานดังแสดงในสเปกตรัมรูปที่ 6

### 3.5.2.2 การลดทอนโฟตอนปฐมภูมิ



รูปที่ 26 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่งผ่านโฟตอนปฐมภูมิ (%Primary Photon Transmission) ของวัสดุ Multi-layers neutron shield และความหนาของวัสดุ (cm)

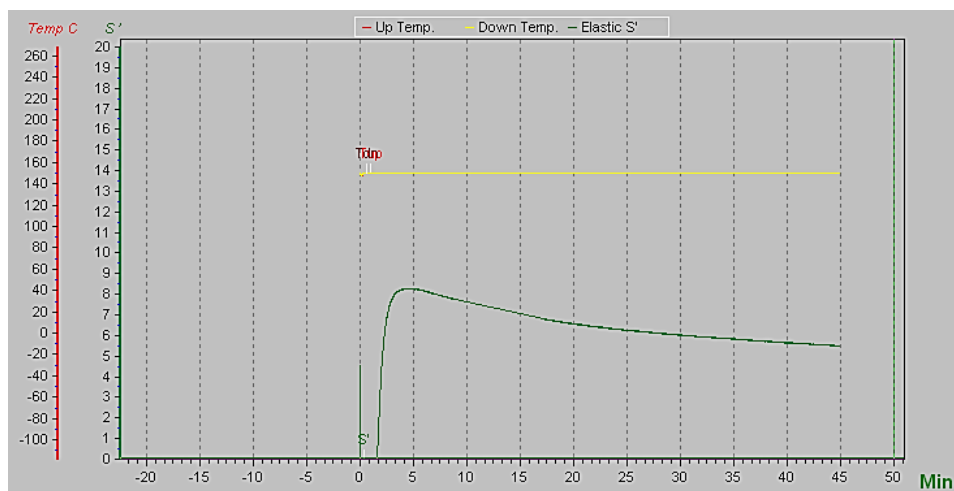
จากรูปที่ 26 สังเกตเห็นได้ว่าวัสดุ Multi-layers สามารถลดทอนโพตอนปฐมภูมิได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการลดทอนนิวตรอนที่ความหนาเดียวกัน ซึ่งโพตอนปฐมภูมินี้เป็นโพตอนที่ต้องการใช้ในการรักษาผู้ป่วย ดังนั้นเมื่อวัสดุ Multi-layers สามารถลดทอนนิวตรอนได้น้อยจึงส่งผลดีให้รังสีที่ผลิตออกมาจากต้นกำเนิดสามารถส่งผ่านไปยังผู้ป่วยเพื่อทำการรักษาได้ดี โดยถูกลดทอนไว้โดยวัสดุกำบังเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 3.6 ผสมและขึ้นรูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

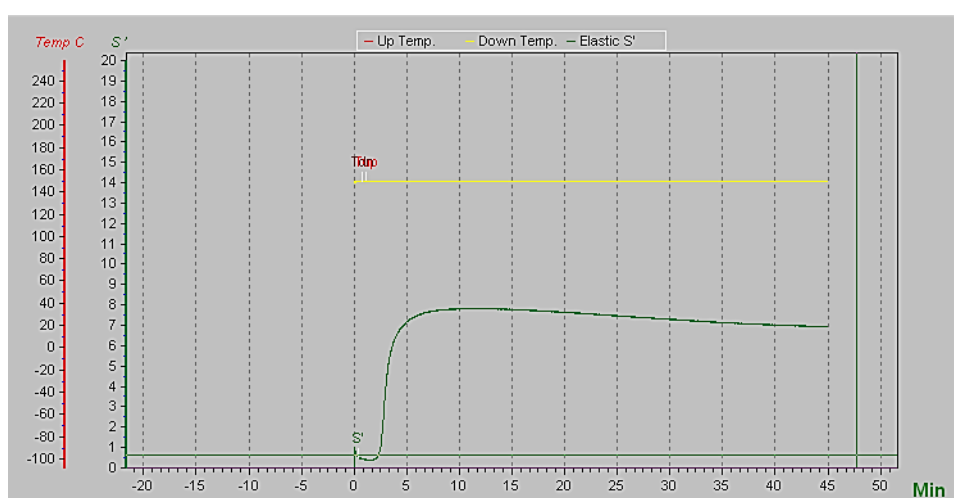
**ตารางที่ 10** พารามิเตอร์ต่างๆของชิ้นงานในระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) และ ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C

| Parameter        | conventional vulcanization (CV) |          |        | semi-efficient vulcanization (semi-EV) |          |        |
|------------------|---------------------------------|----------|--------|----------------------------------------|----------|--------|
|                  | Control1                        | Ferrous1 | Boron1 | Control2                               | Ferrous2 | Boron2 |
| Scorch Time      | 2.85                            | 4.20     | 3.40   | 5.06                                   | 4.43     | 4.31   |
| Cure Time        | 8.28                            | 7.87     | 5.44   | 9.96                                   | 8.40     | 7.27   |
| Torque Different | 14.56                           | 24.18    | 9.04   | 7.53                                   | 7.27     | 6.23   |





(ก)



(ข)

รูปที่ 27 : (ก) กราฟ MDR ของยางพาราผสมผงโบรอน [boron1] ในระบบ conventional vulcanization (CV) และ (ข) กราฟ MDR ของยางพาราผสมผงโบรอน [boron2] ใน semi-efficient vulcanization (semi-EV)

จากการพิจารณาพารามิเตอร์ของการคงรูปในระบบ conventional vulcanization (CV) และ semi-efficient vulcanization (semi-EV) พบว่า การคงรูประบบ semi-EV ให้ค่าระยะเวลาปลอดภัยในการคงรูป (scorch time) ที่ยาวขึ้น และเมื่อพิจารณากราฟ MDR ดังแสดงในรูปที่ 27(ก) จะเห็นว่าระบบ CV ทำให้เกิด reversion จึงเลือกกระบวนการคงรูปแบบ semi-EV ในการผลิตชิ้นงานในขั้นต่อไป

การเติมสารตัวเติมเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และ โบรอน ทำให้ scorch time เวลาในการคงรูปลดลง หรือ อัตราการคงรูปเร็วขึ้นนั่นเอง อาจเป็นเพราะองค์ประกอบออกไซด์ของโลหะ (metal oxide) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ A. Attharangsarn et. al. (6)

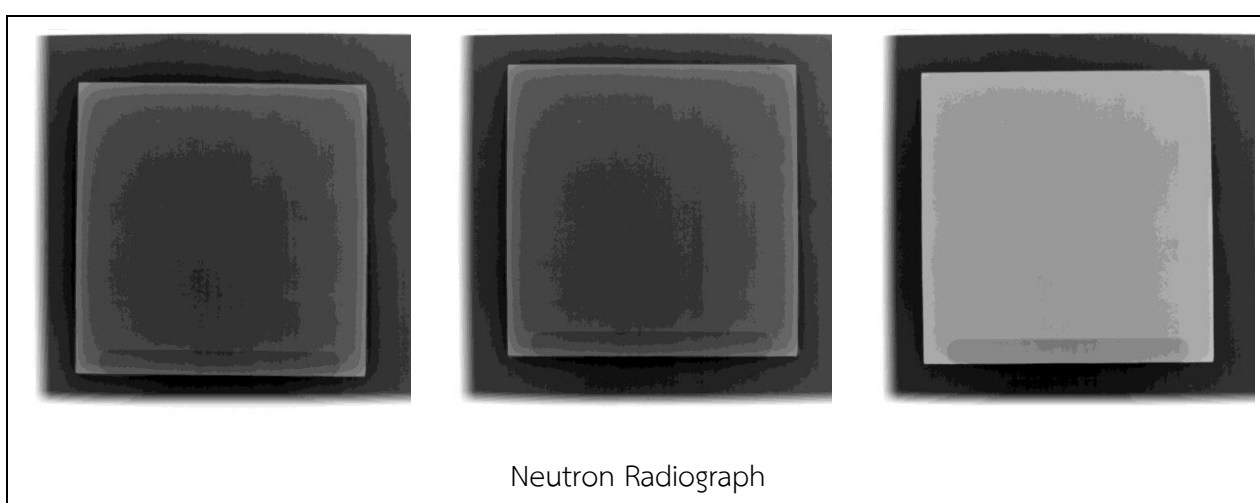
จากตารางที่ 10 พบว่าผลต่างของค่าแรงบิด (torque difference) เพิ่มขึ้นเมื่อเติมเหล็กออกไซด์ แต่ผลต่างของค่าแรงบิดลดลงเมื่อเติมโบรอน N. Rattanasom et. al. (7) ได้อธิบายไว้ว่าค่าผลต่างของแรงบิดแสดงถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล เมื่อค่าผลต่างของแรงบิดเพิ่มขึ้นน่าจะหมายถึงระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าผลต่างของแรงบิดลดลงน่าจะหมายถึงระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลลดลง



(ก)

(ข)

(ค)



Neutron Radiograph

รูปที่ 28 : ลักษณะของยางคงรูป (ก), (ข) และ (ค) คือ ยางคงรูปที่ไม่มีตัวเติม; *Control2* มีส่วนประกอบของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  80 PHR; *Ferrous2* และ มีส่วนประกอบของโบรอน 10 PHR; *Boron2* ตามลำดับ และภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของยางคงรูปแต่ละชนิด

### 3.7 ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.7.1 ความแข็งทดสอบวิธี Durometer type A: ASTM D2240

**ตารางที่ 11** ผลการทดสอบความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

| ชนิดยางคงรูป | ค่าความแข็งก่อนบ่มแรง | ค่าความแข็งหลังบ่มแรง | ค่าความแตกต่าง |
|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| Control2     | 36.8±0.5              | 39.4±0.3              | +2.6           |
| Ferrous2     | 37.8±0.8              | 40.6±0.5              | +2.8           |
| Boron2       | 33.3±1.3              | 35.79±0.5             | +2.5           |

จากตารางที่ 11 พบว่าการเติมเหล็กออกไซด์ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าผลต่างของแรงบิดเพิ่มขึ้น และเมื่อนำเอายางคงรูป แต่การเติมโบรอนทำให้ค่าความแข็งลดลงสอดคล้องกับผลต่างของแรงบิดลดลง และเมื่อยางคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตแผ่นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่อาจอยู่ตามผนังห้อง และเป็นเพียงวัสดุกำบังที่ไม่ได้รับแรงกดหรือแรงยึดต่างๆ ดังนั้นจึงได้พิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น(8) ที่มีลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกันพบว่า มอก . 2377-2551 ระบุไว้ว่าค่าความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงต้องต่างกันไม่เกิน 5 ซึ่งค่าความแตกต่างของความแข็งที่แสดงในตารางที่ 11 ต่างกันไม่เกิน 5 จึงสามารถสรุปได้ว่าผ่านเกณฑ์ มอก 2377-2551

#### 3.7.2 ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ISO37

**ตารางที่ 12** ผลการทดสอบ 100%modulus ก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิที่ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

| ชนิดยางคงรูป | 100% modulus ก่อนบ่มแรง (MPa) | 100% modulus หลังบ่มแรง (MPa) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Control2     | 0.92±0.01                     | 0.95±0.03                     |
| Ferrous2     | 0.96±0.01                     | 1.05±0.02                     |
| Boron2       | 0.90±0.04                     | 0.91±0.02                     |

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่า 100% modulus (หรือค่าความเค้นที่ยางคงรูปมีระยะยืด 100%) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมสารตัวเติมเหล็กออกไซด์ แต่การเติมโบรอนทำให้ค่า 100%modulus ลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับค่าความแตกต่างความทนแรงบิดและค่าความแข็ง เมื่อยางคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่า100%modulus เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความแข็งที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมาก

ขึ้น ดังที่ N. Rattanasom และ S. Prasertsri (2009) ได้อธิบายไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของความแข็งและ 100%modulus อาจเกิดจากการเชื่อมขวาง (cross linking) เพิ่มมากขึ้น

**ตารางที่ 13** ผลการทดสอบความทนแรงดึง

| ชนิดยางคงรูป | ความทนแรงดึง<br>ก่อนบ่มแรง | ความทนแรงดึง<br>หลังบ่มแรง | ค่าความแตกต่าง |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Control2     | 22.9±1.6                   | 25.3±1.1                   | 10.5           |
| Ferrous2     | 23.6±0.5                   | 22.6±0.6                   | 4.2            |
| Boron2       | 24.5±2.6                   | 25.2±1.4                   | 2.9            |

จากตารางที่ 13 การเติมสารตัวเติมเหล็กออกไซด์และโบรอน ทำให้ความทนแรงดึงของยางคงรูปเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเติมสารตัวเติมมีขนาดเล็กและมีปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงเข้ากับยางได้ดี และช่วยรับแรงจึงทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อยางคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นอีก แต่ในกรณีของยางคงรูปที่ผสมเหล็กออกไซด์ค่าความทนแรงดึงหลังบ่มแรงลดลงอาจเป็นเพราะปริมาณการเชื่อมขวางแน่นเกินไป เกินจุดเหมาะสมทำให้ความทนแรงดึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattanasom และ S. Prasertsri (9) รวมถึงงานวิจัยของ S. Moonchai และ D. Moonchai (10)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น ความต้านทานแรงดึงต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4MPa และความต้านทานแรงดึงลดลงไม่เกินร้อยละ 25 จากค่าก่อนบ่มแรง จากผลการทดลองตารางที่ 13 ยางคงรูปทุกชนิดผ่าน มอก. 2377-2551

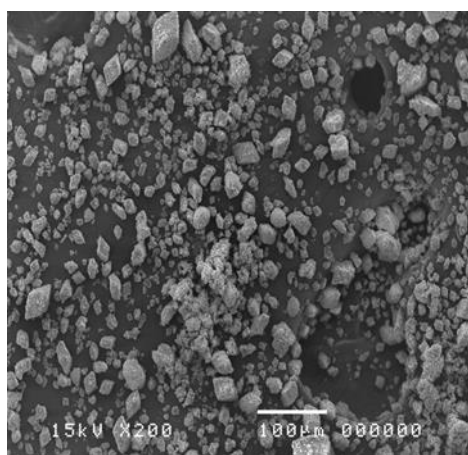
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบร้อยละของการยึดเมื่อขาดก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 72 ชั่วโมง

| ชนิดยางคงรูป | ร้อยละของการยึดเมื่อขาดก่อนบ่มแรง | ร้อยละของการยึดเมื่อขาดหลังบ่มแรง |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Control2     | 645±14                            | 641.0±12                          |
| Ferrous2     | 653±6                             | 600.0±10                          |
| Boron2       | 727±11                            | 712.0±16                          |

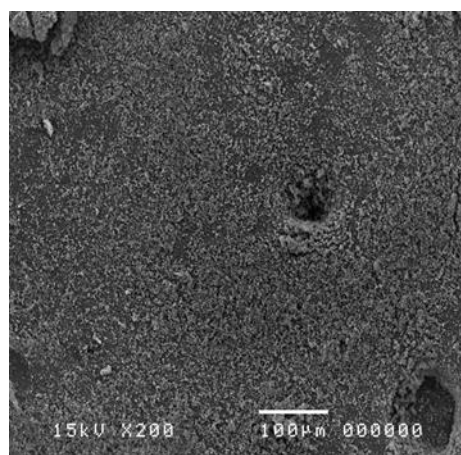
จากตารางที่ 14 พบว่า ยางคงรูปที่มีสารตัวเติมมีร้อยละของการยึดเมื่อขาดก่อนการบ่มแรงเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราปฏิกิริยาที่ดีระหว่างสารตัวเติมและเนื้อยาง เมื่อยางคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของการยึดเมื่อขาดลดลง อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นอีกทำให้โมเลกุลเลื่อนผ่านกันได้ยาก ความยืดหยุ่นของโมเลกุลยางลดลง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น ความยึดเมื่อขาดของยางคงรูปทุกชนิดไม่น้อยกว่าร้อยละ 150 ซึ่งผ่าน มอก 2377-2551(6)

### 3.7.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคงรูปโดยใช้เทคนิคการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS)



(ก)

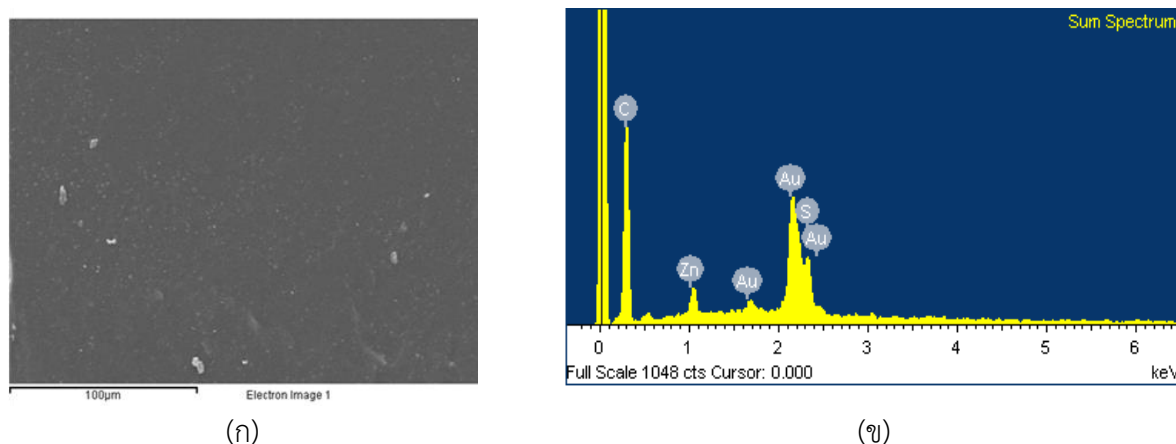


(ข)

รูปที่ 29 : ภาพถ่ายจากกล้อง SEM (ก) ผงเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และ (ข) โบรอน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

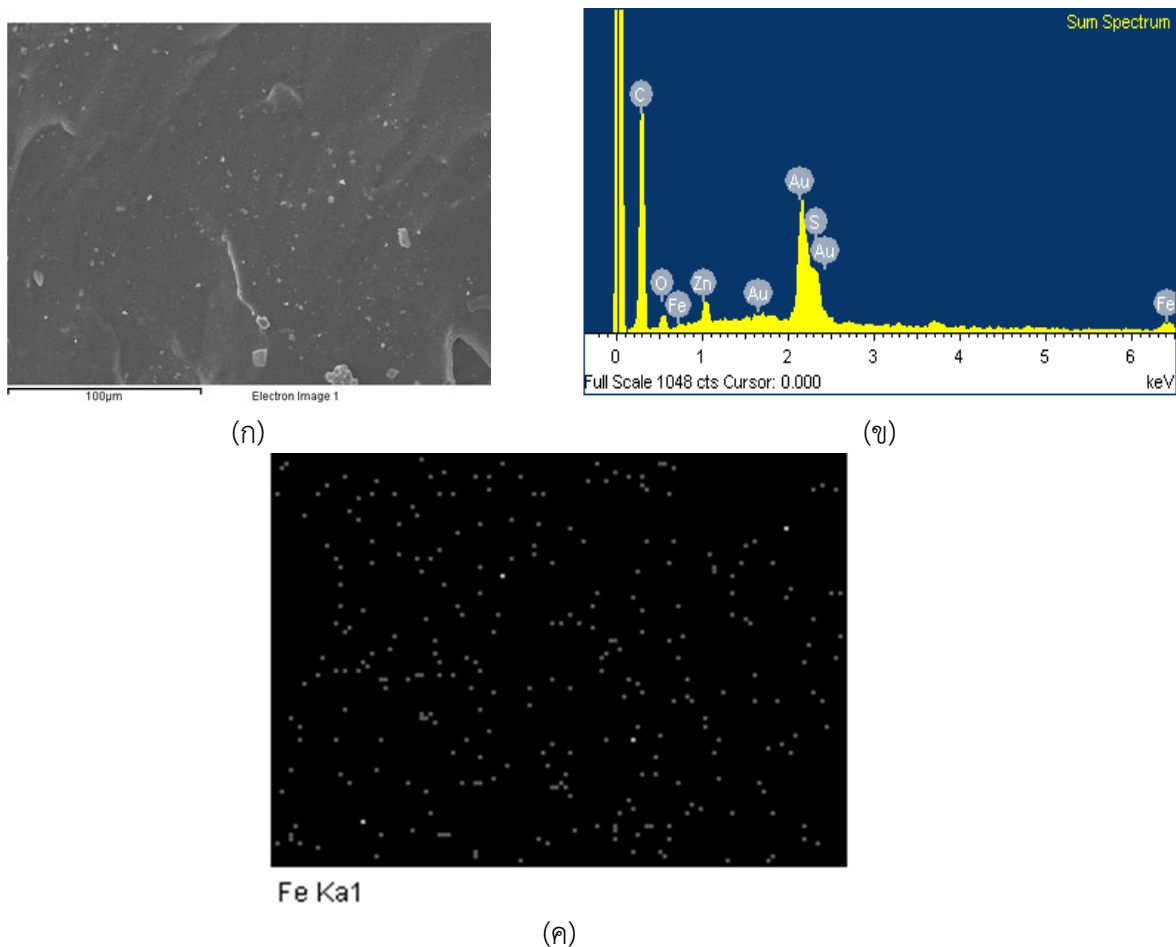
จากรูปที่ 29 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM (ก) ผงเหล็กออกไซด์ และ (ข) โบรอน ที่กำลังขยาย 200 เท่า จะเห็นว่าขนาดของผงเหล็กออกไซด์มีขนาดใหญ่กว่าโบรอนมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องมือ Particle size Analyzer Laser , diffi รุ่น Mastersizer S [Range lens: 300 RF mm, He-Ne laser source,  $\lambda$ : 633 nm, Beam length: 2.40 mm] ที่รายงานผลว่า โบรอนและเหล็กออกไซด์มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าน

ศูนย์กลางอนุภาคเชิงปริมาตร (Volume mean diameter) หรือขนาดอนุภาคเฉลี่ย เท่ากับ  $1.86 \pm 0.04 \mu m$  และ  $11.34 \pm 0.15 \mu m$  ตามลำดับ ส่งผลให้เมื่อทำการทดสอบแรงดึงค่าความทนแรงดึงของยางครูปผสมเหล็กออกไซด์ต่ำกว่ายางครูปผสมโบรอน เนื่องจากเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมมีขนาดเล็ก ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง สารตัวเติมจึงเข้ากับเนื้อยางได้ดี ทำให้เสริมแรงได้ดีเป็นผลให้มีสมบัติเชิงกลดี สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sae-Oui et al.(11)



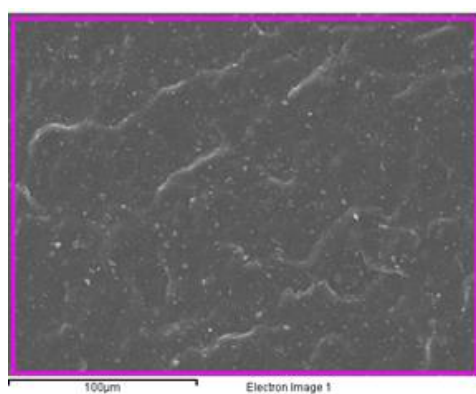
รูปที่ 30 : (ก) ภาพ SEM ของยางครูปสูตร control2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS

รูปที่ 30 แสดงภาพ SEM ของยางครูปสูตร control2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS พบว่าสูตร control มีส่วนผสมของธาตุ Carbon, Zinc และ Sulphur ส่วนธาตุทอง (Au) ที่ปรากฏในรูปเป็นตัวเคลือบในการถ่ายภาพ SEM

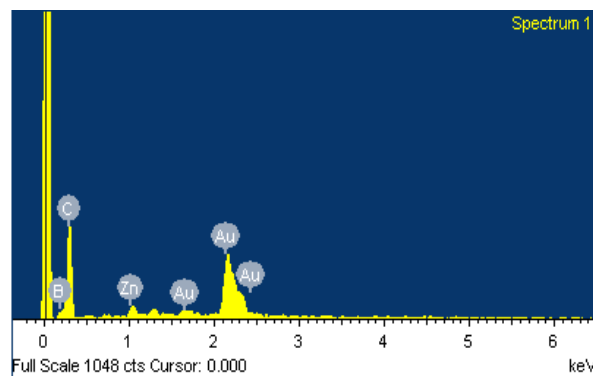


รูปที่ 31 : (ก) ภาพ SEM ของยางคงรูปสูตร Ferrous2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS และ (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็กในยางคงรูป

รูปที่ 31 แสดงภาพ SEM ของยางคงรูปสูตร ferrous2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า และผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS พบว่าสูตร ferrous มีส่วนผสมของธาตุ Carbon, Zinc, Sulphur, Oxygen, และ Iron ส่วนธาตุทอง (Au) ที่ปรากฏในรูปเป็นตัวเคลือบในการถ่ายภาพ SEM ส่วนภาพ (ค) แสดงการกระจายตัวที่ดี (good dispersion) ของธาตุเหล็กในยางคงรูป ซึ่งเป็นเหตุผลที่ช่วยยืนยันการเพิ่มขึ้นของความทนแรงดึงและร้อยละของการยืดเมื่อขาด ในตารางที่ 13 และ 14



(ก)



(ข)



B Ka1\_2

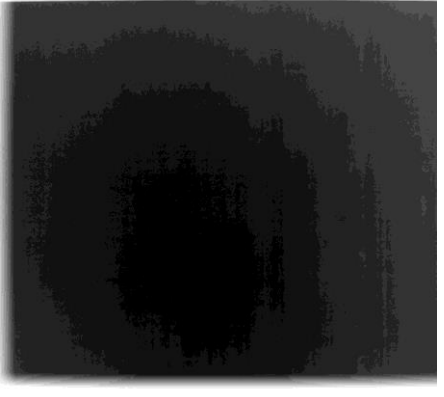
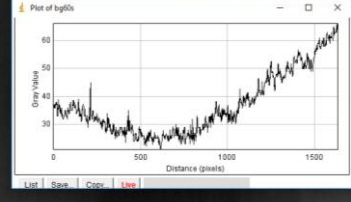
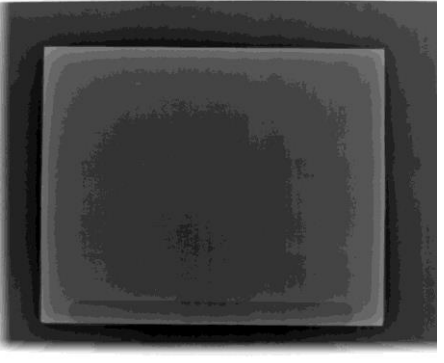
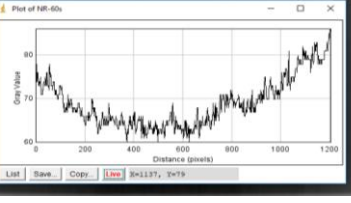
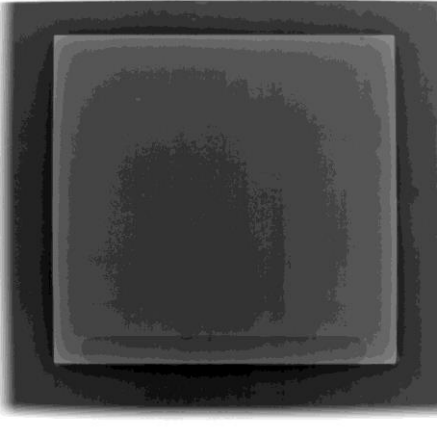
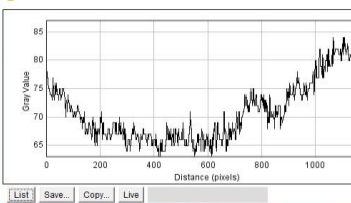
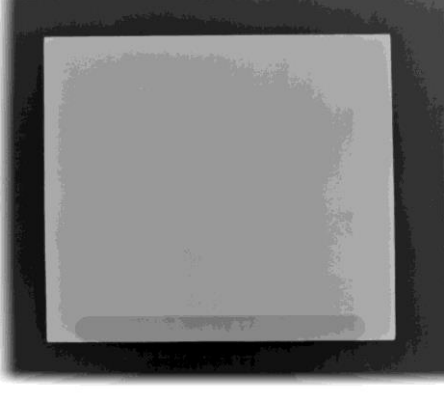
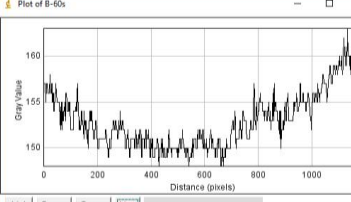
(ค)

รูปที่ 32 : (ก) ภาพ SEM ของยางคงรูปสูตร Boron2 ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS และ (ค) การกระจายตัวของธาตุโบรอนในยางคงรูป

รูปที่ 32 แสดงภาพ SEM ของยางคงรูปสูตร boron ที่กำลังขยาย 500 เท่า และผลวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS พบว่าสูตร boron มีส่วนผสมของธาตุ Carbon, Zinc, และ Boron ส่วนธาตุทอง (Au) ที่ปรากฏในรูปเป็นตัวเคลือบในการถ่ายภาพ SEM ส่วนภาพ (ค) แสดงการกระจายตัวที่ดี (good dispersion) ของธาตุโบรอนในยางคงรูป ซึ่งเป็นเหตุผลที่ช่วยยืนยันการเพิ่มขึ้นของความทนแรงดึงและร้อยละของการยืดเมื่อขาดในตารางที่ 13 และ 14



### 3.6.4 ภาพถ่ายรังสีนิวตรอน

|                                                                                     |                                                                                      |                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|    |    | (ก)<br>ไม่มีชิ้นงาน<br>(background) |
|   |   | (ข)<br>ชิ้นงานสูตร<br>Control2      |
|  |  | (ค)<br>ชิ้นงานสูตร<br>Ferrous2      |
|  |  | (ง)<br>ชิ้นงานสูตร<br>Boron2        |

รูปที่ 33 : ค่า Gray Value จากภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของชิ้นงานแต่ละชนิด

จากรูปที่ 33 เมื่อพิจารณาภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของชิ้นงานแต่ละชนิด จากค่าโปรไฟล์ที่แสดงให้เห็นค่า Gray value ที่เป็นค่าที่แสดงให้เห็นเฉดสีของแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงานพบว่า ทุกชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของเฉดสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอ การที่โปรไฟล์จะไม่ได้แสดงให้เห็นในลักษณะเส้นตรงนั้นเนื่องมาจากลำรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีนิวตรอนของชิ้นงานเหล่านี้มีความไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 33(ก) ที่มีความดำสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่รังสี ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายรังสีนิวตรอนในทุกชิ้นงานที่มีค่า Gray value ต่ำ ที่บริเวณกึ่งกลางพื้นที่รังสี

หากมีฟองอากาศในชิ้นงานจะเห็นภาพที่มีความดำมากในส่วนที่เป็นฟองอากาศ เพราะสามารถลดทอนนิวตรอนได้น้อยทำให้รังสีนิวตรอนผ่านไปถึงแผ่นรับภาพมากภาพจึงมีความดำมาก แต่หากมีวัสดุตัวเติมที่เป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนจับตัวกันเป็นก้อนจะแสดงให้เห็นเป็นบริเวณสีขาวหรือมีความดำน้อยกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากตัวดูดกลืนนิวตรอนได้ดีจึงมีรังสีนิวตรอนส่งผ่านมาถึงแผ่นรับภาพน้อย

### 3.7.4 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน stdUL-94

การทดสอบการลามไฟแบบ Vertical burning ชิ้นทดสอบ ขนาด 12.5 มม.x125 มม. สภาวะการทดสอบ อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 52% มีทั้งการทดสอบแนวตั้ง (20mm. Vertical burning test, v-0, v-1 or v-2) และการทดสอบแนวนอน (Horizontal burning test) ความหนาชิ้นงานเฉลี่ย 2 มม.

**ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน stdUL-94**

| ลักษณะการทดสอบ                                                                                   | ชนิดยางคงรูป         |                      |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                                                  | Control2             | Ferrous2             | Boron2               |
| การทดสอบตามแนวตั้งในระยะ 20mm.<br>-ตัวอย่างเผาไหม้ถึงที่จับชิ้นงาน<br>-การหยุดติดไฟ/การหล่นติดไฟ | ใช่<br><br>หล่นติดไฟ | ใช่<br><br>หล่นติดไฟ | ใช่<br><br>หล่นติดไฟ |
| การทดสอบตามแนวนอน<br>-อัตราการลามไฟ (mm./min.)<br>-ไฟดับก่อนถึงตำแหน่งอ้างอิง (100mm.)           | 39.6±1.1<br><br>ไม่  | 36.7±2.1<br><br>ไม่  | 37.1±1.7<br><br>ไม่  |

จากตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ชั้นคุณภาพของชิ้นงานยางคงรูปอยู่ในระดับ HB และเมื่อมีโลหะผสมอยู่ อัตราการลามไฟช้ากว่าที่ไม่มีโลหะเล็กน้อย อาจเป็นเพราะโลหะมีความทนการติดไฟสูงจึงช่วยหน่วงไฟได้ แต่งานวิจัยนี้ใส่โลหะเพียง 10 phr จึงหน่วงไฟได้เล็กน้อยและยังอยู่ในระดับคุณภาพการทนไฟระดับ HB ซึ่งเป็นระดับต่ำที่สุด

พิชชา (10) ได้อธิบายชั้นคุณภาพระดับ HB ไว้ว่า การทดสอบระดับชั้นคุณภาพ HB (horizontal burning test) นั้นเป็นการทดสอบการติดไฟโดยการจุดไฟเป็นเวลา 30 วินาที หรือจนกว่าเปลวไฟจะไปถึงเส้นระยะ 25 mm. จากนั้นจึงทำการจับเวลา วัสดุที่จะผ่านการทดสอบระดับ HB ได้จะต้องมีอัตราการไหม้ไฟไม่เกิน 75mm./min. ในช่วงความยาว 75 mm. ของชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาน้อยกว่า 3.0mm. และอาจไม่ดับเอง หากการใช้งานของยางคงรูปสูตรนี้เป็นการใช้งานทั่วไปก็พอจะใช้ได้ อย่างไรก็ตามพิชชา (10) ยังได้อธิบายไว้ว่าระดับชั้นคุณภาพ HB เป็นระดับต่ำสุดมีสารหน่วงไฟน้อยไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานในส่วนของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า เช่นรางสายไฟภายในบ้านหรือตัวเสื่อของอุปกรณ์ต้มน้ำร้อนควรจะผ่านชั้นคุณภาพระดับ V-0

## บทที่ 4

# สรุปผลการดำเนินการวิจัย

#### 4. สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการจำลองการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนที่ผลิตจากเครื่อง LINAC ทางกายภาพของวัสดุชนิดต่างๆ ด้วยโปรแกรม Monte Carlo N Particle (MCNP5) พบว่าทั้งที่ความหนา 4 ซม. และ 8 ซม. วัสดุที่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ วัสดุตัวอย่างหมายเลข 7 ที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน โดยให้ชั้นของวัสดุที่อยู่ใกล้กับต้นกำเนิดรังสีเป็นชั้นของยางพารา ถัดไปคือ ยางพาราผสมโบรอน ยางพารา และยางพาราผสมโบรอน ตามลำดับ เมื่อทำการประเมินความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนเมื่อใช้สัดส่วนของโบรอนในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่า วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีปริมาณโบรอน 10 PHR มีความสามารถในการลดทอนมากที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนของโบรอนในปริมาณอื่นๆ โดยให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งวัสดุที่มีความหนา 1 ซม. 4 ซม. และ 8 ซม. ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีเป็นสเปกตรัมที่มีความเข้มของรังสีเท่ากันในทุกช่วงพลังงาน ( $1\text{E}-8 - 100\text{ MeV}$ ) พบว่า **วัสดุกำบังที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน 10 PHR หรือที่เรียกว่า Multi-Layers Neutron Shield** มีความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดเช่นกัน

เมื่อจำลองการลดทอนโฟโตนิวตรอน (photo-neutron attenuation) จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV เมื่อกำบังด้วย **Multi-Layers Neutron Shield** ด้วยโปรแกรม MCNP โดยเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น พบว่าเมื่อออกแบบให้วัสดุมีความหนาเพียง 1 ซม. เพื่อให้ใช้งานได้ง่าย และคงความสามารถของยางพาราซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุกำบังนิวตรอนในงานวิจัยนี้ ที่สามารถยืดหยุ่นและโค้งงอได้ตามพื้นผิวของวัสดุของวัสดุที่มีรูปทรงต่างๆ พบว่า **Multi-Layers Neutron Shield** สามารถลดทอนโฟโตนิวตรอน พลังงานเฉลี่ย 0.9 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV ได้ดีที่สุดในความสามารถลดทอนนิวตรอนได้ทั้งในย่านพลังงานต่ำ (thermal neutron) ไปจนถึงนิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) อย่างไรก็ตามการลดทอนหรือกำบังนิวตรอนที่มีโบรอนเป็นส่วนประกอบก็สามารถก่อให้เกิด โฟตอนทุติยภูมิ (Secondary photon) ขึ้นมาด้วย แต่เนื่องด้วยโฟตอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาณเพียง  $1/1000$  ของโฟโตนิวตรอน จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในการประเมินความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนเหล่านี้ เมื่อเพิ่มความหนาของ **Multi-Layers Neutron Shield** เป็น 4 ซม. พบว่าวัสดุกำบังต่างๆ ที่มีจำนวนไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณมากจะมีความสามารถในการลดทอนโฟโตนิวตรอนได้ไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มความหนาของ **Multi-Layers Neutron Shield** แล้วพิจารณาความสามารถในการลดทอนโฟโตนิวตรอน พบว่า ปริมาณนิวตรอนลดลงเมื่อความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้นแบบ Exponential ตามสมการ  $y = 39.441e^{-0.284x}$  ซึ่งสามารถหาค่า Total macroscopic cross-section ( $\Sigma_t$ ) ได้เท่ากับ  $0.284\text{ cm}^{-1}$  และสามารถหาค่า Linear attenuation coefficient ( $\mu$ ) สำหรับโฟตอนปฐมภูมิจากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV ได้เท่ากับ  $0.026\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีค่าน้อยมากแสดงให้เห็นว่าวัสดุ **Multi-Layers Neutron Shield** สามารถกำบังนิวตรอนได้ดีโดยลดทอนรังสีจากโฟตอนปฐมภูมิที่ต้องการใช้ในการรักษาผู้ป่วยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การวัดการลดทอนปริมาณนิวตรอนของวัสดุกำบังด้วยเครื่องวัดรังสีมาตรฐาน จะทำให้งานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

แม้ว่าชั้นของวัสดุที่มียางพาราร่วมกับผงเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ไม่ได้เป็นวัสดุที่ดีในการกำบังโฟตอนิวตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV แต่วัสดุนี้ก็จัดว่าเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ จึงมีผลดีในแง่ของการกำบังโฟตอนิวตรอนทุกชนิด นอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนอื่นๆ เมื่อไม่คำนึงถึงความหนาหรือความยืดหยุ่นของชิ้นงาน เนื่องจากสามารถกำบังนิวตรอนพลังงานสูงได้ดี(15)

เมื่อนำวัสดุ Multi-Layers Neutron Shield มาทำการผสมและขึ้นรูปเพื่อให้สามารถใช้งานจริงได้ในเชิงปฏิบัติอย่างมีมาตรฐาน โดยใช้การคงรูปด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization) ที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เมื่อนำวัสดุมาทดสอบความแข็งแรงด้วย วิธี Durometer type A: ASTM D2240 ก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมงพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ทำแผ่นวัสดุกำบังนิวตรอนที่ไม่ได้รับแรงกดหรือแรงยืดใด ดังนั้นจึงได้พิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้นที่มีลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกันพบว่า มอก . 2377-2551 ระบุไว้ว่าค่าความแข็งแรงก่อนและหลังบ่มแรงต้องต่างกันไม่เกิน 5 ซึ่งค่าความแตกต่างของความแข็งแรงที่ทดสอบได้ มีค่าต่างกันไม่เกิน 5 จึงถือว่าผ่านเกณฑ์ มอก 2377-2551 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ISO37 พบว่า เมื่อเติมโบรอนทำให้ค่า 100% modulus ลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับค่าความแตกต่างความทนแรงบิดและค่าความแข็งแรง เมื่ออย่างคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่า 100% modulus เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น เมื่อนำ Multi-Layers Neutron Shield ทดสอบความทนแรงดึง พบว่าการเติมสารตัวเติมโบรอน ทำให้ความทนแรงดึงของยางคงรูปเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากสารตัวเติมมีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยเพียง 10 phr จึงเข้ากับยางได้ดี และช่วยรับแรงจึงทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่ออย่างคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่าความทนแรงดึง เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นอีก ซึ่งเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น ความต้านทานแรงดึงต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4MPa และความต้านทานแรงดึงลดลงไม่เกินร้อยละ 25 จากค่าก่อนบ่มแรง จึงสามารถสรุปได้ว่ายางคงรูปทุกชนิดผ่าน มอก. 2377-2551 และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบร้อยละของการยืดเมื่อขาดก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของการยืดเมื่อขาดลดลง อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นอีกทำให้โมเลกุลเลื่อนผ่านกันได้ยาก ความยืดหยุ่นของโมเลกุลลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น ความยืดเมื่อขาดของยางคงรูปทุกชนิดไม่น้อยกว่าร้อยละ 150 ดังนั้นจึงผ่าน มอก 2377-2551 เช่นเดียวกัน

ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคงรูปโดยใช้เทคนิคการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) พบการกระจายตัวที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของยางคงรูปที่แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของสารตัวเติมสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

เมื่อนำส่วนประกอบของชิ้นงาน Multi-Layers Neutron Shield ไปทำการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน stdUL-94 แบบ Vertical burning พบว่าสามารถหน่วงไฟได้เล็กน้อยและยังอยู่ในระดับคุณภาพการทนไฟระดับ HB ซึ่งเป็นระดับต่ำที่สุด

งานวิจัยนี้มีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งในการนำยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ซึ่งผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า วัสดุกำบังที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน 10 PHR หรือที่เรียกว่า Multi-Layers Neutron Shield มีความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนที่ปนเปื้อนในลำรังสีโฟตอนจากเครื่องเครื่อง LINAC ได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติหากมีการนำวัสดุกำบังนี้ไปใช้งานจริง ควรมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติม เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของยางพาราแม้จะมีความยืดหยุ่นสูง มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง แต่ค่อนข้างไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และไม่ทนต่อโอโซน ดังนั้น การนำยางชนิดอื่นมาผสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากออกซิเจน และโอโซนได้ เช่น การนำยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene Propylene Diene Rubber, EPDM) เป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมในยางพารา เนื่องจาก EPDM มีความทนต่อการเสื่อมสภาพอากาศได้เป็นอย่างดีทั้ง ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อน นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมี กรดและด่าง ได้ดีเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นการใช้วัสดุเคลือบผิวเพื่อลดโอกาสในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนของวัสดุกำบังนิวตรอนก็ถือเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่น่าจะสามารถยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้เป็นอย่างดี

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....

## บทที่ 5

---

เปรียบเทียบแผนงานและ  
ผลสัมฤทธิ์ (output)  
ของโครงการ



ตารางที่ 16 : เปรียบเทียบแผนงานและผลสัมฤทธิ์ (output) ของโครงการ

| ระยะเวลา     | กิจกรรม                                                                                | ผลที่คาดว่าจะได้                                                                                    | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 เดือนที่ 1 | 1.1 ศึกษาการเกิดโฟโตนิวตรอนจากเครื่อง LINAC พลังงานสูง                                 | ทราบชนิดและวัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดโฟโตนิวตรอน                                                       | 100%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|              |                                                                                        |                                                                                                     | วัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดโฟโตนิวตรอน ดังแสดงในตารางที่ 1 ได้แก่ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทังสเทน (W) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ X-ray target, Collimator</li> <li>- ตะกั่ว (Pb) ส่วนประกอบของวัสดุกำบัง X-ray ส่วนหัวของเครื่อง LINAC</li> </ul> ไอโซโทปในร่างกายมนุษย์ ( $^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{N}$ , $^{16}\text{O}$ ) และ ในอากาศ ( $^{14}\text{N}$ , $^{16}\text{O}$ )                                                                                                                                                                                                                                                        |
|              | 1.2 จำลองการเกิดโฟโตนิวตรอนของเครื่อง LINAC ด้วยโปรแกรม Monte Carlo N- Particle (MCNP) | ทราบลักษณะและพฤติกรรมการเกิดนิวตรอนในวัสดุที่บริเวณต่างๆของห้องฉายรังสีด้วยเครื่อง LINAC พลังงานสูง | 100%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|              |                                                                                        |                                                                                                     | ทราบลักษณะและพฤติกรรมการเกิดนิวตรอนในวัสดุที่บริเวณต่างๆของห้องฉายรังสีด้วยเครื่อง LINAC พลังงานสูง ดังแสดงในสเปกตรัม รูปที่ 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|              | 1.3 วัดปริมาณรังสีนิวตรอนจากเครื่อง LINAC ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐาน             | เปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างปริมาณรังสีนิวตรอนที่ได้จากการวัดและการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP           | 50%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|              |                                                                                        |                                                                                                     | ยังไม่แล้วเสร็จเนื่องจาก ค่าปริมาณรังสีนิวตรอนที่อ่านได้จากเครื่องวัดรังสี OSLN ที่ทำการประเมินโดย สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สทน.) มีค่าที่มากกว่าค่าที่พบได้จากปริมาณรังสีทั่วไปในงานวิจัยอื่นๆ เป็นสัดส่วนที่มากกว่าประมาณ 100 เท่า <p>จึงทำการแจ้งข้อมูลไปที่ สทน. ซึ่งขณะนี้กำลังดำเนินการปรับปรุงข้อมูล และหาค่าแก้ที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม สทน. แจ้งกลับว่าไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลให้แล้วเสร็จได้ตามเวลาที่กำหนด จึงไม่สามารถนำค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ไปใช้อย่างถูกต้องได้ นอกจากนั้นอุปกรณ์วัดรังสีนิวตรอน CR-39 ยังไม่สามารถอ่านค่าได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกัน เนื่องจากยังไม่ได้สอบเทียบอุปกรณ์วัดรังสี</p> |

| ระยะเวลา | กิจกรรม                                                                                            | ผลที่คาดว่าจะได้                                                                                             | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                                                                                                    |                                                                                                              | <p>อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการประเมินด้วยการจำลองโดยโปรแกรม MCNP ก็เป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือในระดับสากลอีกวิธีการหนึ่ง</p> <p><b>ขั้นตอนดำเนินการที่แล้วเสร็จ</b> ได้แก่ การดำเนินการวัดปริมาณรังสีนิวตรอนในห้องฉายรังสี LINAC ของโรงพยาบาลมะเร็งลำปาง จ. ลำปาง</p> <div data-bbox="1496 485 1977 1083">  <p>รูปแสดงการฉายรังสีด้วยเทคนิค SSD</p> </div> |
|          | <p>1.4 ออกแบบส่วนประกอบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มียางพาราเป็นส่วนประกอบหลักด้วยโปรแกรม MCNP</p> | <p>ได้ข้อมูลส่วนประกอบหลักที่จะผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน ทั้งในส่วนของปริมาณ และรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน</p> | <p>100%</p> <p>แสดงข้อมูลไว้ดังขั้นตอน “สรุปผลการดำเนินการ” โดยพบว่าที่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้นที่มีส่วนประกอบของชั้นยางพาราสลับกับชั้นของยางพาราผสมผงโบรอน 10 PHR มีความสามารถในการลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด</p>                                                                                                                                                                                                                         |

| ระยะเวลา     | กิจกรรม                                        | ผลที่คาดว่าจะได้                                                                     | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 เดือนที่ 2 | 2.1 ผสมและขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน | ได้ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนเพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ และวิจัยในขั้นตอนต่อไป | <p>100%</p> <p>ชิ้นรูปวัสดุกำบังนิวตรอนได้โดยมีส่วนประกอบหลักตามที่ออกแบบไว้จากโปรแกรม MCNP</p> <div data-bbox="1429 367 2056 1343">  <p>รูปวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน</p> </div> |

| ระยะเวลา | กิจกรรม                                                         | ผลที่คาดว่าจะได้                                                                                                                                                             | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | 2.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ<br>ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน | ทราบคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อปรับปรุงสูตรยาให้<br>เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป (เช่น กำบังรังสี<br>นิวตรอนสำหรับผู้ป่วย, กำบังรังสีบริเวณรอบ<br>โครงสร้างของห้องฉายรังสี เป็นต้น) | 100%<br><br>1. ทดสอบความแข็งแรงด้วย วิธี Durometer type A: ASTM D2240 ก่อน<br>และหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงพบว่าค่าความ<br>แข็งเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ทำแผ่นวัสดุกำบัง<br>นิวตรอนที่ไม่ได้รับแรงกดหรือแรงยึดใด ดังนั้นจึงได้พิจารณาตาม<br>มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้นที่มี<br>ลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกันพบว่า มอก . 2377-2551 ระบุไว้ว่าค่า<br>ความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงต้องต่างกันไม่เกิน 5 ซึ่งค่าความแตกต่าง<br>ของความแข็งที่ทดสอบได้ มีค่าต่างกันไม่เกิน 5 จึงถือว่าผ่านเกณฑ์<br>มอก 2377-2551<br><br>2. การทดสอบ ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ISO37 พบว่า เมื่อเติม<br>โบรอนทำให้ค่า 100% modulus ลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับค่า<br>ความแตกต่างความทนแรงบิดและค่าความแข็ง เมื่อยางคงรูปผ่านการ<br>บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่า 100% modulus<br>เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวาง<br>มากขึ้น<br><br>3. การทดสอบความทนแรงดึง พบว่าการเติมสารตัวเติมโบรอน ทำให้<br>ความทนแรงดึงของยางคงรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมมีขนาดเล็ก<br>และมีปริมาณน้อยเพียง 10 phr จึงเข้ากับยางได้ดี และช่วยรับแรงจึง<br>ทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อยางคงรูปผ่านการบ่มแรงที่อุณหภูมิ<br>70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าค่าความทนแรงดึง ซึ่งเมื่อพิจารณา<br>ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น<br>ความต้านทานแรงดึงต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4MPa และความต้านทาน |

| ระยะเวลา | กิจกรรม                                                               | ผลที่คาดว่าจะได้                                                | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                                                                       |                                                                 | <p>แรงดึงลดลงไม่เกินร้อยละ 25 จากค่าก่อนบ่มแรง จึงสามารถสรุปได้ว่า ยางคงรูปทุกชนิดผ่าน มอก. 2377-2551</p> <p>4. การทดสอบร้อยละของการยืดเมื่อขาดก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิที่ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของการยืดเมื่อขาดลดลง อาจเป็นเพราะการเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นอีกทำให้โมเลกุลเลื่อนผ่านกัน ได้ยาก ความยืดหยุ่นของโมเลกุลยางลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก 2377-2551) ของแผ่นยางปูพื้น ความยืดเมื่อขาดของยางคงรูปทุกชนิดไม่น้อยกว่าร้อยละ 150 ดังนั้นจึงผ่าน มอก 2377-2551</p> <p>5. ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคงรูปโดยใช้เทคนิคการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) พบการกระจายตัวที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของยางคงรูปที่แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของสารตัวเติมสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน</p> <p>6. การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน stdUL-94 แบบ Vertical burning พบว่าสามารถหน่วงไฟได้เล็กน้อยและยังอยู่ในระดับคุณภาพการทนไฟระดับ HB ซึ่งเป็นระดับต่ำที่สุด</p> |
|          | 2.3 ประเมินการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอนของชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน | ทราบประสิทธิภาพและความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบัง | <p>100%</p> <p>ปริมาณนิวตรอนลดลงเมื่อความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้นแบบ Exponential ตามสมการ <math>y = 39.441e^{-0.284x}</math> ซึ่งสามารถหาค่า Total macroscopic cross-section (<math>\Sigma_t</math>) ได้เท่ากับ <math>0.284 \text{ cm}^{-1}</math> และสามารถหาค่า Linear attenuation coefficient (<math>\mu</math>) สำหรับโฟตอนปฐมภูมิจากเครื่องเร่งอนุภาค 10 MV ได้เท่ากับ <math>0.026 \text{ cm}^{-1}</math> ซึ่งมีค่าน้อย</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

| ระยะเวลา | กิจกรรม                                                                                                         | ผลที่คาดว่าจะได้                                                                                                           | ผลสัมฤทธิ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                                                                                                                 |                                                                                                                            | มากแสดงให้เห็นว่าวัสดุ Multi-Layers Neutron Shield สามารถกำบังนิวตรอนได้ดีโดยลดทอนรังสีจากโฟตอนปฐมภูมิที่ต้องการใช้ในการรักษาผู้ป่วยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|          | 2.4 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังอาบด้วยรังสีนิวตรอนเพื่อทดสอบความเสื่อมของวัสดุเมื่อใช้งานกับรังสีนิวตรอน | ทราบความเสื่อมและอายุการใช้งานของวัสดุกำบังเมื่อใช้งานกับนิวตรอนที่มีพลังงานและความเข้มต่างๆ                               | ไม่ได้ดำเนินการ<br><br>เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กำลังปรับปรุงความสม่ำเสมอของลำรังสี ทำให้มีรังสีนิวตรอนในระดับสูงมาก จึงไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติในบริเวณรังสีได้อย่างปลอดภัย ผู้วิจัยจึงไม่สามารถรายงานผลในส่วนนี้ได้<br>อย่างไรก็ตาม ได้ดำเนินการเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุก่อนและหลังอาบด้วยโฟตอนพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาค เพื่อทดสอบลักษณะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับการใช้งานวัสดุกำบังนิวตรอนจริงในทางปฏิบัติ |
|          | 2.5 นำชิ้นงานไปทดลองใช้งานร่วมกับการวางแผนการรักษาผู้ป่วยด้วยรังสีรักษาในหุ่นจำลอง                              | สามารถประยุกต์ใช้วัสดุกำบังรังสีร่วมกับแผนการรักษาในรังสีรักษาเพื่อลดปริมาณรังสีนิวตรอนที่ผู้ป่วยไม่มีความจำเป็นต้องได้รับ | กำลังดำเนินการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|          | 2.7 ส่งบทความแพร่ผลงานวิจัยในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ                                                        | ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ                                                                | กำลังดำเนินการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....

## เอกสารอ้างอิง

1. Berman BL. Atlas of photoneutron cross sections obtained with monoenergetic photons. At Data Nucl Data Tables, v 15, no 4, pp 319-390. 1975:Medium: X.
2. Naseri A, Mesbahi A. A review on photoneutrons characteristics in radiation therapy with high-energy photon beams. Reports of practical oncology and radiotherapy : journal of Great Poland Cancer Center in Poznan and Polish Society of Radiation Oncology. 2010;15(5):138-44.
3. <BORFLEX-Flexibore-doc.pdf>.
4. plastics eR. Borated Polyethylene Sheet - Neutron Shielding. 2016.
5. Doug Reilly NE, Hastings Smith Jr. Neutron cross sections of common materials. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. Washington, DC: U.S.Government Printing Office; 1991. p. 368.
6. A. Attharangsarn, H. Ismil, M.A. Baker, "The Effect of Rice Husk Powder on Standard Malaysian Natural Rubber Grade L (SMR L) and Epoxidized Natural Rubber (ENR 50) Composites" J. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 51, 231-237, 2012
7. N. Rattanasom and S. Prasertsri, "Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behaviour and morphology in natural rubber: Partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level", Polymer Testing, 28, 270-276, 2009
8. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นยางปูพื้นมอก.2377-2551. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
9. N. Rattanasom and S. Prasertsri, "Mechanical properties, gas permeability and cut growth behavior of natural rubber vulcanizates: Influence of clay types and clay/carbon black ratios", Polymer Testing, 31, 645-653, 2012
10. S. Moonchai, and D. Moonchai, "Modelling and optimization of rebound resilience and hardness of defatted rice bran/calcium carbonate-filled NR vulcanisates", Polymer Testing, 32, 1472-1478, 2013
11. P. Sai-Oui, C. Rakdee, and P. Thanmathorn, "Use of rice husk ash as filler in natural rubber vulcanisates: In comparison with other chemical fillers" Journal of Apply Polymer Science. 83, 2485-2493, 2002
12. พิชชา ลีวัชรารักษ์ "การทดสอบติดไฟและลามไฟของพลาสติก" วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 57-60, 2549
13. S. Pongdhorn, U. Thepsuwan, K. Hatthapanit "Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent", Polymer Testing , 23, 397-403, 2004
14. T. Rattanaplome, N. Chantaramee, and P. Pornprasit, "The potential of perlite as an odour-adsorbing fillers in natural vulcanizates" Macromolecular Symposium, 354, 197-206, 2015
15. Jumpee C. and Wongsawaeng D. Innovative neutron shielding materials composed of natural rubber-styrene butadiene rubber blends, boron oxide and iron (III) oxide. J Phys Conf Ser. 611. 2015