

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of a Computer Program to Calculate Concrete Thickness for Gamma-ray Shielding

Mr. Muhammadsu Sulong



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนา<br>ของคอนกรีตสำหรับกำแพงรับน้ำหนัก |
| โดย                             | นายภู่อำหมัดชู สุขหลง  |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมเทคโนโลยี  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร. สมบูรณ์ รัชมี  |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. สมบูรณ์ รัชมี)

.....กรรมการ  
(ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

มูฮำหมัดซู สุหลง : การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา (Development of a Computer Program to Calculate Concrete Thickness for Gamma-ray Shielding) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. สมยศ ศรีสถิตย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. สมบูรณ์ รัชมี, 99 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาผนังคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยการทดลองวัดหาค่า Build-up factor และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแผ่นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่  $2.13 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และ  $2.47 \text{ g/cm}^3$  ใช้ความหนาในช่วง 0-60 เซนติเมตร ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV และได้คำนวณค่า Build-up factor จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 โดยใช้คอนกรีตความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  และต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV, 1.25 MeV, 5 MeV และ 10 MeV ทั้งนี้พบว่า ค่า Build-up factor จากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 นั้น ให้ผลที่สอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาใช้ในการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นพบว่าสะดวกรวดเร็วและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เหมาะสำหรับการใช้ในการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5670346621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: GAMMA RAY SHIELDING / BUILD UP FACTOR / CONCRETE

MUHAMMADSU SULONG: Development of a Computer Program to Calculate Concrete Thickness for Gamma-ray Shielding. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMYOT SRISATIT, CO-ADVISOR: SOMBOON RASSAME, 99 pp.

This research a computer program was developed to calculate concrete wall thickness for gamma-ray shielding. The input data was obtained from measurement of the Build-up factors and linear attenuation coefficients of the three types of concrete slabs at density of  $2.13 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.44 \text{ g/cm}^3$  and  $2.47 \text{ g/cm}^3$ , the thicknesses between 0-60 cm. The gamma-ray sources used were Cs-137, 0.662 MeV of energy and Co-60, 1.25 MeV of average energy. The other method to calculate the Build-up factors was simulation by using the MCNP5 program. This technique used the concrete slabs with density of  $2.35 \text{ g/cm}^3$  and gamma-ray energy of 0.662 MeV, 1.25 MeV, 5 MeV and 10 MeV. We found that the Build-up factors of both techniques were corresponding with the standard values. The results of calculation by using the developed program and the obtained data set were satisfactory and convenient for calculation of the concrete wall thickness.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Nuclear Engineering

Field of Study: Nuclear Technology

Academic Year: 2016

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัตมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทร สุมันต์ และ อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำ วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ อีกทั้งสละเวลาในการเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์อีกด้วย ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุน ขอขอบคุณนายจุมพฏ จำเนียร นักฟิสิกส์รังสี และเจ้าหน้าที่ประจำ ฌ สำนักงาน ปริมาณเพื่อสันติทุกท่าน ที่ช่วยแนะนำและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา และที่สำคัญ ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจมาโดยตลอด

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ .....   | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | 10   |
| สารบัญรูปภาพ.....   | 13   |
| บทที่ 1.....  | 17   |
| บทนำ .....  | 17   |
| 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....                                     | 17   |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....   | 17   |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....   | 17   |
| 1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัย .....                                  | 18   |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....   | 18   |
| 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 18   |
| บทที่ 2.....  | 20   |
| ทฤษฎี.....  | 20   |
| 2.1 รังสีแกมมา (Gamma ray) [7].....   | 20   |
| 2.1.1. ปฏิกิริยาการแผ่รังสีโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effects) [7] ..... | 20   |
| 2.1.2. การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) [7] .....                 | 21   |
| 2.1.3. การเกิดคู่อินทรีย์ (Pair Production) [7] .....                       | 21   |
| 2.2 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient).....                     | 22   |
| 2.3 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี .....                                     | 22   |

|  |    |
|--|----|
| 2.4 วัสดุกำบังรังสีแกมมา (Gamma-ray Shielding) [8].....  | 23 |
| 2.5 การลดทอนรังสีแกมมา (Gamma-ray Attenuation) [7].....  | 23 |
| 2.6 Build-up factor (B) [8].....   | 24 |
| 2.7 Source Strength (Specific Gamma-ray Emission).....   | 26 |
| 2.8 คอนกรีต (Concrete) [9] .....   | 28 |
| 2.9 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์ .....   | 29 |
| 2.9.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP) [10].....   | 29 |
| 2.9.2 Visual Basic 6.0 [11].....   | 29 |
| 2.10 วิธีการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีต.....  | 30 |
| บทที่ 3.....   | 32 |
| วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย .....   | 32 |
| 3.1 วัสดุ 32   |    |
| 3.2 อุปกรณ์.....   | 32 |
| 3.3 เครื่องมือ.....  | 32 |
| 3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....  | 32 |
| 3.5 การดำเนินการวิจัย.....   | 33 |
| 3.5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient)<br>และเทคนิคการหาค่า Build-up factor ..... | 33 |
| 3.5.2 การจำลองการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต ด้วยโปรแกรม MCNP5.....   | 37 |
| 3.5.3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบัง<br>รังสีแกมมา.....                              | 41 |
| บทที่ 4.....   | 48 |
| ผลการวิจัย .....   | 48 |



|   |    |
|---|----|
| 4.1 การหาค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน ..... | 48 |
| 4.2 การหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5.....  | 63 |
| 4.2.1 ค่า Build-up factor ของคอนกรีตจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 .....  | 63 |
| 4.2.2 การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP567  |    |
| 4.3 การคำนวณค่าความหนาของผนังคอนกรีตในการกำบังรังสีแกมมาด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม Visual basic 6 .....           | 73 |
| บทที่ 5.....  | 77 |
| สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....   | 77 |
| 5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย .....  | 77 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 80 |
| รายการอ้างอิง .....   | 82 |
| ภาคผนวก.....  | 83 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 99 |

## สารบัญตาราง

|  |    |
|--|----|
| ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 .....   | 49 |
| ตารางที่ 2 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1602 \text{ cm}^{-1}$ .....  | 50 |
| ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Co-60.....   | 51 |
| ตารางที่ 4 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1173 \text{ cm}^{-1}$ .....   | 52 |
| ตารางที่ 5 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 .....   | 53 |
| ตารางที่ 6 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1826 \text{ cm}^{-1}$ .....  | 54 |
| ตารางที่ 7 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Co-60.....   | 55 |
| ตารางที่ 8 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1419 \text{ cm}^{-1}$ .....   | 56 |
| ตารางที่ 9 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137.....  | 58 |
| ตารางที่ 10 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1904 \text{ cm}^{-1}$ ..... | 59 |
| ตารางที่ 11 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ จากต้นกำเนิดรังสี Co-60.....  | 60 |
| ตารางที่ 12 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ B จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ และค่า $\mu = 0.1412 \text{ cm}^{-1}$ .....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| <b>ตารางที่ 13</b> ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมา พลังงาน 0.662 MeV .....   | 64 |
| <b>ตารางที่ 14</b> ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมา พลังงาน 1.25 MeV .....  | 65 |
| <b>ตารางที่ 15</b> ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมา พลังงาน 5 MeV.....  | 66 |
| <b>ตารางที่ 16</b> ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), $I$ , $I_s$ และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมา พลังงาน 10 MeV.....   | 67 |
| <b>ตารางที่ 17</b> การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น 2.13 g/cm <sup>3</sup> และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5.....   | 67 |
| <b>ตารางที่ 18</b> การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น 2.44 g/cm <sup>3</sup> และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5.....   | 69 |
| <b>ตารางที่ 19</b> การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น 2.47 g/cm <sup>3</sup> และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5.....   | 70 |
| <b>ตารางที่ 20</b> สรุปสมการของค่า Build-up factor (B) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น ( $\mu$ ) ของคอนกรีต ที่พลังงานต่าง ๆ และคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน สำหรับใช้คำนวณใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น..... | 72 |
| <b>ตารางที่ 21</b> ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีใน เจ็อนไซท์ที่ 1 โดยใช้ค่า Build-up factor จากการทดลองกับข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.).....   | 74 |
| <b>ตารางที่ 22</b> ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีใน เจ็อนไซท์ที่ 2 โดยใช้ค่า Build-up factor จากการทดลองกับข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.).....   | 75 |
| <b>ตารางที่ 23</b> ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีใน เจ็อนไซท์ที่ 1 โดยใช้ค่า Build-up factor จากข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) และจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MCNP5.....                       | 75 |
| <b>ตารางที่ 24</b> ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีใน เจ็อนไซท์ที่ 2 โดยใช้ค่า Build-up factor จากข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) และจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MCNP5.....                       | 76 |

|  |    |
|--|----|
| ตารางที่ 25 ค่าสัดส่วนของธาตุของคอนกรีตแบบ Ordinary Concrete (NBS 04).....   | 84 |
| ตารางที่ 26 ค่าสัดส่วนของธาตุของคอนกรีตแบบ Ordinary Concrete (NBS 04) ที่ใช้สำหรับ<br>การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5..... | 85 |



## สารบัญรูปภาพ

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| รูปที่ 1  | ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effects).....  | 20 |
| รูปที่ 2  | ลักษณะการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) .....   | 21 |
| รูปที่ 3  | ลักษณะการเกิดคู่อนุภาค (Pair Production).....   | 21 |
| รูปที่ 4  | ลำรังสีแกมมาตกกระทบวัสดุกำบังรังสี เกิดรังสีที่ทะลุผ่านโดยไม่เกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (Attenuation Photon) และรังสีกระเจิง (Scattered Photon)..... | 23 |
| รูปที่ 5  | การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบบังคับลำรังสี (Narrow Beam - Good Geometry) .....   | 24 |
| รูปที่ 6  | การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบไม่บังคับลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry) .....   | 25 |
| รูปที่ 7  | ค่า Source Strength (Specific Gamma-ray Emission) ที่ระยะ 1 เมตร ในหน่วย MBq.....   | 26 |
| รูปที่ 8  | ค่า Source Strength (Specific Gamma-ray Emission) ที่ระยะ 1 เมตร ในหน่วย Ci....   | 27 |
| รูปที่ 9  | ขั้นตอนในการผสมวัสดุต่าง ๆ เพื่อเป็นคอนกรีต.....  | 28 |
| รูปที่ 10 | แผนภาพการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีต.....  | 31 |
| รูปที่ 11 | การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบบังคับลำรังสี (Narrow Beam - Good Geometry) สำหรับการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น.....                        | 34 |
| รูปที่ 12 | การจัดระบบวัดที่ใช้ในการวิจัย.....  | 35 |
| รูปที่ 13 | การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบไม่บังคับลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry).....  | 36 |
| รูปที่ 14 | กราฟสเปกตรัมแสดงส่วนของ R, I และ I <sub>s</sub> .....   | 37 |
| รูปที่ 15 | ตัวอย่างการเขียนโค้ดในสกุลไฟล์ .txt เพื่อการจำลองด้วย MCNP.....   | 38 |
| รูปที่ 16 | การจัดระบบวัดในการจำลองด้วย MCNP5.....  | 39 |
| รูปที่ 17 | รายละเอียดของ output ที่ได้จากการรันโปรแกรมด้วย Command Prompt .....  | 40 |
| รูปที่ 18 | แผนภาพการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา .....                                    | 42 |
| รูปที่ 19 | หน้าต่างของโปรแกรมคำนวณความหนาของคอนกรีต .....  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 20 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขณะเลือกต้นกำเนิดรังสีและความหนาแน่นของคอนกรีต.....  | 45 |
| รูปที่ 21 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อกรอกข้อมูลที่ต้องการ.....   | 46 |
| รูปที่ 22 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงข้อมูลที่ได้.....  | 47 |
| รูปที่ 23 หน้าต่างแจ้งเตือน เมื่อค่า Exposure dose rate จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่าเกินกว่าค่า Exposure dose rate ที่ตั้งไว้.....                           | 47 |
| รูปที่ 24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.13 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....  | 49 |
| รูปที่ 25 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.13 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....              | 50 |
| รูปที่ 26 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น 2.13 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV..... | 51 |
| รูปที่ 27 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น 2.13 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV.....             | 52 |
| รูปที่ 28 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.44 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....  | 54 |
| รูปที่ 29 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.44 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....              | 55 |
| รูปที่ 30 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น 2.44 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV..... | 56 |
| รูปที่ 31 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.44 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV.....          | 57 |
| รูปที่ 32 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.47 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....  | 59 |
| รูปที่ 33 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.47 g/cm <sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV.....              | 60 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| รูปที่ 34 | กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV .....     | 61 |
| รูปที่ 35 | กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV .....              | 62 |
| รูปที่ 36 | ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient : $\mu$ ) ของคอนกรีตความหนาแน่น $2.35 \text{ g/cm}^3$ เท่ากับ $0.1882 \text{ cm}^{-1}$ .....      | 63 |
| รูปที่ 37 | ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient : $\mu$ ) ของคอนกรีตความหนาแน่น $2.35 \text{ g/cm}^3$ เท่ากับ $0.1302 \text{ cm}^{-1}$ .....      | 64 |
| รูปที่ 38 | ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient : $\mu$ ) ของคอนกรีตความหนาแน่น $2.35 \text{ g/cm}^3$ เท่ากับ $0.0652 \text{ cm}^{-1}$ .....      | 65 |
| รูปที่ 39 | ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient : $\mu$ ) ของคอนกรีตความหนาแน่น $2.35 \text{ g/cm}^3$ เท่ากับ $0.056 \text{ cm}^{-1}$ .....       | 66 |
| รูปที่ 40 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 0.662 MeV ..... | 68 |
| รูปที่ 41 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 1.25 MeV .....  | 68 |
| รูปที่ 42 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 0.662 MeV ..... | 69 |
| รูปที่ 43 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 1.25 MeV .....  | 70 |
| รูปที่ 44 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 0.662 MeV ..... | 71 |
| รูปที่ 45 | กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$ และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 1.25 MeV .....  | 71 |
| รูปที่ 46 | แผนภาพห้องฉายรังสีแกมมา (Top view).....   | 73 |
| รูปที่ 47 | ตารางค่า Build-up factor ของคอนกรีตความหนาแน่น $2.35 \text{ g/cm}^3$ ที่พลังงาน 0.5 - 15 MeV.....   | 86 |





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากรังสีต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ และด้านเกษตรกรรม โดยรังสีที่นำมาใช้ประโยชน์มีหลายชนิด เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน และนิวตรอน เป็นต้น ซึ่งการนำไปใช้นั้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์

รังสีแกมมาเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากรังสีแกมมา มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านวัสดุที่หนามาก ๆ ได้ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อมีการใช้รังสีแกมมา คือ วัสดุกำบังรังสี เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและบุคคลทั่วไป การเลือกวัสดุกำบังรังสีแกมมาควรเป็นวัสดุที่มีค่าเลขอะตอมสูง ๆ เช่น ตะกั่ว เหล็ก เป็นต้น ในการใช้ประโยชน์จากรังสีแกมมาของโรงงานอุตสาหกรรมหรือศูนย์ฉายรังสีนั้น ผนังห้องหรืออาคารจะต้องมีความหนาและเป็นวัสดุที่สามารถป้องกันรังสีแกมมาได้ดี ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างผนังกำบังรังสีคือคอนกรีต โดยจะต้องมีความหนาและความหนาแน่นเหมาะสมกับพลังงานและความแรงของรังสีที่สามารถป้องกันรังสีแกมมาได้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยสูงสุดของผู้ปฏิบัติงานขณะทำการฉายรังสี โดยการกำบังรังสีจะต้องมีการพิจารณาอัตราการได้รับปริมาณรังสีที่เป็นไปตามมาตรฐานที่ ICRP (International Commission on Radiological Protection) ซึ่งได้กำหนดว่า การสร้างกำบังรังสีแกมมาจะต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนาของวัสดุ ชนิดของวัสดุ ความเข้มและพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้คอนกรีตเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาโดยศึกษาความสามารถของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ

ปัจจุบันเป็นยุคที่เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทอย่างสูงในการใช้ชีวิตประจำวัน ทำให้การเข้าถึงสิ่งต่าง ๆ เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาเทคโนโลยีโดยการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณความหนาของคอนกรีตเพื่อความสะดวก รวดเร็ว แม่นยำ และสามารถตอบสนองกับชีวิตในยุคปัจจุบันของผู้ปฏิบัติงาน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา ช่วงพลังงาน 0.5-10 MeV

- 1.3.2 จำลองการกัมมันตรังสีแกมมาด้วยแผ่นคอนกรีตโดยใช้โปรแกรม Monte Carlo N-Particle 5 (MCNP5) เพื่อคำนวณหาค่า Build-up factor ที่ความหนาของคอนกรีตต่าง ๆ กัน
- 1.3.3 ทดสอบความถูกต้องค่า Build-up factor ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5

#### 1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมแผ่นคอนกรีตและหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต
- 1.4.3 จัดระบบวัดรังสีแกมมา เพื่อการทดลองหาค่า Build up factor (B) ของคอนกรีตที่ความหนาแน่นต่าง ๆ โดยใช้รังสีแกมมาจากซีเซียม-137 (Cs-137) และโคบอลต์-60 (Co-60)
- 1.4.4 ทำการจำลองการจัดระบบวัดรังสีแกมมาและจำลองการฉายด้วยรังสีแกมมาผ่านวัสดุตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม MCNP5 เพื่อหาค่า Build up factor (B) และนำค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
- 1.4.5 พัฒนาโปรแกรมคำนวณการกัมมันตรังสีแกมมา
- 1.4.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทำวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ได้โปรแกรมคำนวณกัมมันตรังสีแกมมาด้วยคอนกรีต
- 1.5.2 ได้เทคนิคการคำนวณค่า Build-up factor ด้วยโปรแกรม MCNP5

#### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 Charanjeet Singh [1] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Simultaneous effect of collimator size and absorber thickness on the gamma ray build-up factor พบว่าสามารถหาค่า Build-up factor จากการทดลองโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ที่มีตัวกลางเป็น Bakelite และ Perspex ภายใต้เงื่อนไขของตัวบังคับลำรังสี (Collimator) โดยการวัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวบังคับลำรังสี (Collimator) และความหนาของวัสดุทดสอบ เพื่อป้องกันการกระเจิงของโฟตอนที่เข้ามาสู่หัววัด.

1.6.2 Adnan A. Abdulfattah [2] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Effect of exposure Build-up factor on Reactor Shielding เพื่อวัดค่า Build-up factor จากต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานเดี่ยว (0.1, 1 และ 10 MeV) โดยพิจารณาที่ความหนา 10 mfp ของน้ำ เหล็ก ตะกั่ว และยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) อีกทั้งได้ทำการทดลองวัดค่า Build-up factor ของรังสีแกมมาในวัสดุผสม (2 ชั้น) เพื่อหาความแตกต่างในแต่ละชั้น โดยวางวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ อยู่ใกล้กับต้นกำเนิดรังสีและตามด้วยวัสดุที่มีเลขอะตอมสูงกว่า หรือวางสลับกันจากข้างต้น.

1.6.3 S.J. Stankovic [3] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Components of Different Type Materials เพื่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Mass Attenuation Coefficient) และการทะลุผ่านของรังสี (Transmission) ของคอนกรีตต่างชนิดกัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ซึ่งทำการจำลองด้วยโปรแกรม Monte Carlo โดยใช้โค้ด FOTELP-2K6 และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยของ Dunster's [4] และ Kim's [5]

1.6.4 I. Akkurt [6] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Linear Attenuation Coefficient) ของแบไรท์ (Barite) และคอนกรีตผสมแบไรท์ นำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตะกั่ว

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

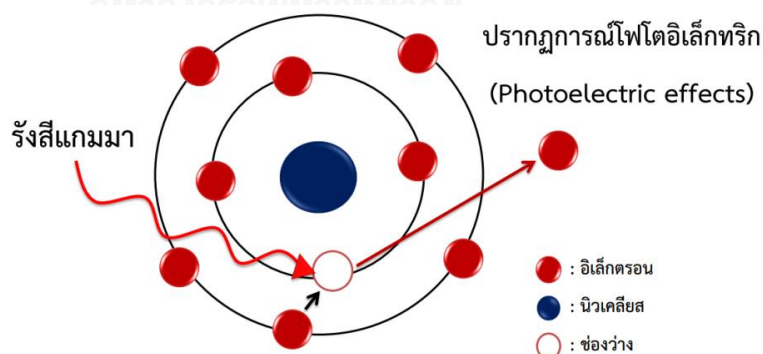
#### 2.1 รังสีแกมมา (Gamma ray) [7]

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นสั้นและมีความถี่สูง ทำให้มีพลังงานสูงมากและมีอำนาจการทะลุทะลวงสูง ซึ่งเกิดจากความไม่เสถียรในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ ในปัจจุบันรังสีแกมมาเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมด้านการแพทย์ และด้านการเกษตร เนื่องจากรังสีแกมมามีอำนาจการทะลุทะลวงสูง ทำให้เหมาะแก่การฉายรังสีผ่านวัสดุที่หนา มาก ๆ ได้ โดยนิยมใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 (Cs-137) และโคบอลต์-60 (Co-60) เป็นต้น

อันตรกิริยาของรังสีแกมมา มีดังนี้

##### 2.1.1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effects) [7]

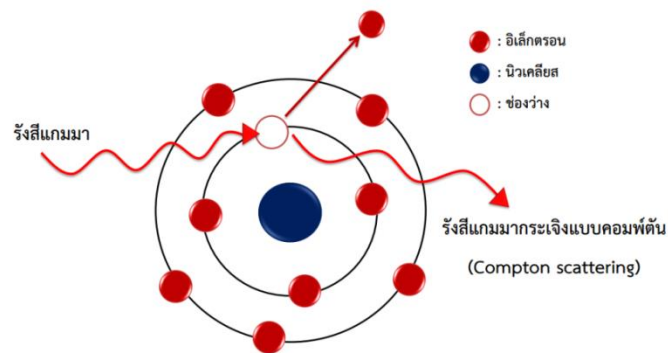
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีโฟตอนพลังงานต่ำเข้าชนวัสดุตัวอย่าง พลังงานของโฟตอนจะถูกดูดกลืนและถ่ายเทไปยังอิเล็กตรอน จนมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา และอิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ พรอมคายพลังงานออกมาเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะ (Characteristic x-rays) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effects)

### 2.1.2. การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering) [7]

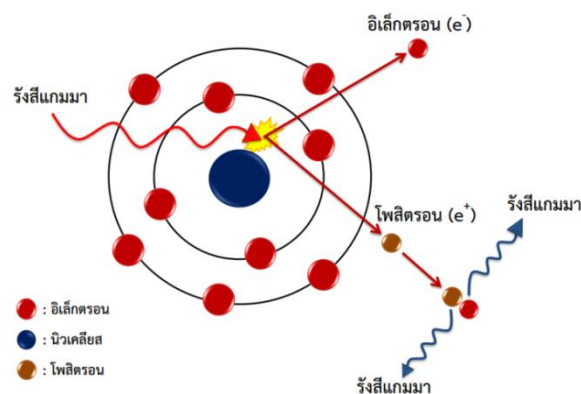
การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน เกิดขึ้นได้กับโฟตอนพลังงานสูง ที่มีช่วงพลังงานตั้งแต่ 30 keV ถึง 10 MeV ไปชนกับอิเล็กตรอนในวัสดุ ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน จากนั้นโฟตอนจะกระเจิงไปอีกทางและอิเล็กตรอนจะหลุดออกจากวงโคจรกระเจิงไปอีกทางเช่นกัน โดยอันตรกิริยาดังกล่าว จะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม อันตรกิริยานี้ไม่ขึ้นกับเลขอะตอมโดยตรง แต่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของตัวกลาง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการเกิดการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering)

### 2.1.3. การเกิดคู่อนุภาค (Pair Production) [7]

เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีโฟตอนพลังงานสูงกว่า 1.022 MeV เข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม และโฟตอนจะกลายเป็นคู่อนุภาคอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ซึ่งทั้งคู่มีพลังงาน 0.511 MeV จากนั้นโพสิตรอนจะจับตัวกับอิเล็กตรอนอิสระและปล่อยรังสีแกมมาคู่พลังงาน 0.511 MeV ในทิศตรงกันข้าม เรียกรังสีคู่ที่ออกมาว่า แอนนิฮิเลชัน โฟตอน (Annihilation Photon) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการเกิดคู่อนุภาค (Pair Production)

## 2.2 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

เมื่อรังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับวัสดุกำบังรังสี จะสามารถเกิดได้ทั้ง 3 แบบดังกล่าวในหัวข้อ 2.1 ซึ่งอาจขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของวัสดุกำบังรังสี โดยอันตรกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม ถ้ากำหนดให้  $\sigma$  คือ โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่ออะตอมของวัสดุ มีหน่วยเป็น บาร์น (Barn) โดย 1 บาร์น เท่ากับ  $10^{-24}$  ซม<sup>2</sup> ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาทั้งหมดหาได้จากสมการที่ 1

$$\sigma = \sigma_{PE} + \sigma_{PP} + \sigma_{CS} \quad (1)$$

โดย  $\sigma_{PE}$ ,  $\sigma_{PP}$  และ  $\sigma_{CS}$  คือ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่ออะตอมแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effects) แบบเกิดคู่ออนุภาค (Pair Production) และแบบกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton Scattering) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจำนวนอะตอมต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของวัสดุกำบังรังสี โดยกำหนดให้ N คือ จำนวนอะตอมต่อ ซม<sup>3</sup> ดังนั้นจากสมการที่ 1 พบว่าถ้ารังสีแกมมาสามารถเกิดอันตรกิริยากับทุก อะตอม จะได้

$$N\sigma = N\sigma_{PE} + N\sigma_{PP} + N\sigma_{CS} \quad (2)$$

หรือ

$$\mu = \mu_{PE} + \mu_{PP} + \mu_{CS} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 ค่า  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ของวัสดุกำบังรังสี หมายถึง แพรกชั้น (Fraction) ของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร

## 2.3 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี

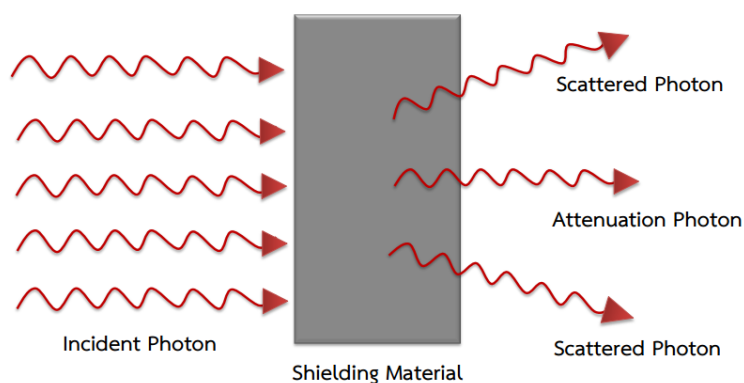
เมื่อมีการปฏิบัติงานทางด้านรังสี สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงขณะปฏิบัติงาน ซึ่งจะมี 3 อย่างหลัก ๆ คือ

1. เวลา (Time)
2. ระยะทาง (Distance)
3. กำบังรังสี (Shielding)

ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ปฏิบัติการทางรังสีได้รับปริมาณรังสีให้น้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นไปตามหลัก ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

## 2.4 วัสดุกำบังรังสีแกมมา (Gamma-ray Shielding) [8]

วัสดุกำบังรังสีแกมมา ควรเป็นวัสดุที่มีค่าเลขอะตอมสูง ๆ เช่น ตะกั่ว เหล็ก คอนกรีต เป็นต้น



**รูปที่ 4** ลำรังสีแกมมาตกกระทบวัสดุกำบังรังสี เกิดรังสีที่ทะลุผ่านโดยไม่เกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (Attenuation Photon) และรังสีกระเจิง (Scattered Photon)

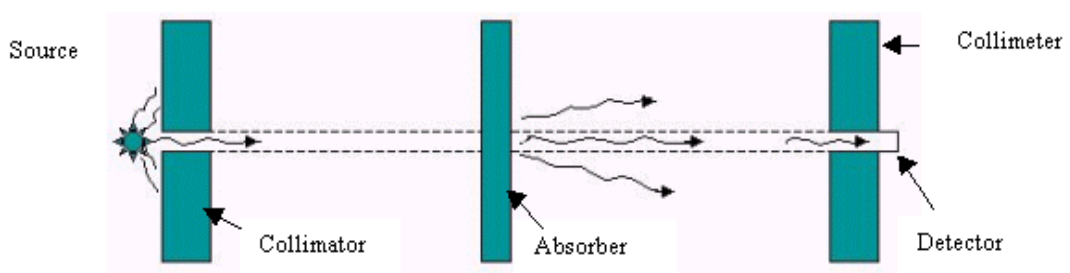
การกำบังรังสีแกมมาโดยใช้วัสดุต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอม ( $Z$ ) ของวัสดุและพลังงานของรังสีแกมมา อีกทั้งจำนวนของรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุตัวอย่าง จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ แฟกเตอร์ของการลดทอน (Attenuation factor :  $e^{-\mu x}$ ) และ Build-up factor ( $B$ ) โดยค่าแฟกเตอร์ของการลดทอน (Attenuation factor) จะพิจารณาจากค่าของรังสีที่เกิดการลดทอนผ่านวัสดุ รวมไปถึงรังสีที่เกิดอันตรกิริยากับวัสดุและรังสีที่ทะลุผ่าน ส่วนค่า Build-up factor สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของผลรวมระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีที่ทะลุผ่านโดยไม่เกิดอันตรกิริยาต่อรังสีที่ทะลุผ่านโดยไม่เกิดอันตรกิริยา ซึ่งค่า Build-up factor จะเปลี่ยนแปลง เมื่อมีความหนาของวัสดุกำบังรังสีเปลี่ยน โดยพิจารณาจากค่า Relaxation Lengths ( $\mu x$ ) โดยจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Linear Attenuation Coefficient,  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )) ของวัสดุชนิดนั้น ๆ

## 2.5 การลดทอนรังสีแกมมา (Gamma-ray Attenuation) [7]

เมื่อพิจารณาระบบวัสดุรังสี ให้ลำรังสีแกมมาทะลุผ่านวัสดุกำบังรังสี โดยกำหนดให้ลำรังสีที่ทะลุผ่าน โดยไม่เกิดอันตรกิริยาการลดทอนรังสีแสดงดังรูป 5 ดังนั้นการทะลุผ่านของรังสีแกมมาต่อวัสดุ โดยไม่เกิดอันตรกิริยากับวัสดุ สามารถหาได้จากสมการกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

|        |       |  |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | $I_x$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อผ่านวัสดุหรือสิ่งก้ำบังรังสี                                    |
|        | $I_0$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อไม่มีวัสดุหรือไม่มีสิ่งก้ำบังรังสี                              |
|        | $\mu$ | คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน (Linear Attenuation Coefficient) มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-1}$ |
|        | $x$   | คือ ความหนาของวัสดุหรือสิ่งก้ำบังรังสี มีหน่วยเป็น cm                                  |



รูปที่ 5 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบบังคับลำรังสี (Narrow Beam - Good Geometry)

ที่มา <http://www.nucleonica.net>

## 2.6 Build-up factor (B) [8]

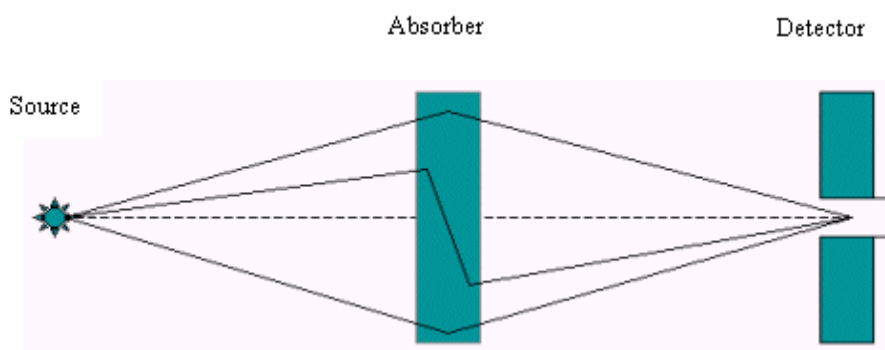
เมื่อลำรังสีตกกระทบวัสดุก้ำบัง จะมีการทะลุผ่านของลำรังสีบางส่วน และจะมีลำรังสีส่วนหนึ่งเกิดอันตรกิริยาชนแบบกระเจิงและทะลุออกมา ทำให้ปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งการจัดระบบนี้เรียกว่า ระบบการก้ำบังรังสีแบบไม่บังคับลำรังสี (Poor Geometry) ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านหาได้จากสมการที่ 5

$$I_x = BI_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

|        |       |  |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | $I_x$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อผ่านวัสดุหรือสิ่งก้ำบังรังสี                                    |
|        | $I_0$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อไม่มีวัสดุหรือไม่มีสิ่งก้ำบังรังสี                              |
|        | B     | คือ ค่า Build-up factor  |
|        | $\mu$ | คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน (Linear Attenuation Coefficient) มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-1}$ |
|        | $x$   | คือ ความหนาของวัสดุหรือสิ่งก้ำบังรังสี มีหน่วยเป็น cm                                  |



เนื่องจากรังสีแกมมา เมื่อทำอันตรกิริยากับแผ่นคอนกรีต จะมีทั้งการทะลุผ่านและการกระเจิง ปริมาณความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องพิจารณาค่า Build-up factor ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ปริมาณความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นจากการกระเจิงของรังสี ลักษณะดังกล่าวจะเกิดกับการจัดระบบวัดแบบไม่บังค้ำลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบไม่บังค้ำลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry)

ที่มา <http://www.nucleonica.net>

ค่า Build-up factor หมายถึง อัตราปริมาณความเข้มรังสีรวมที่ทะลุผ่านและรังสีกระเจิงต่อปริมาณความเข้มรังสีที่ทะลุผ่าน ดังสมการที่ 6 ดังนั้นค่า Build-up factor จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ

$$B = \frac{I+I_s}{I} \quad (6)$$

- |        |       |                                      |
|--------|-------|--------------------------------------|
| โดยที่ | I     | คือ ความเข้มรังสีรวมที่ทะลุผ่านวัสดุ |
|        | $I_s$ | คือ ความเข้มรังสีกระเจิง             |
|        | B     | คือ ค่า Build-up factor              |

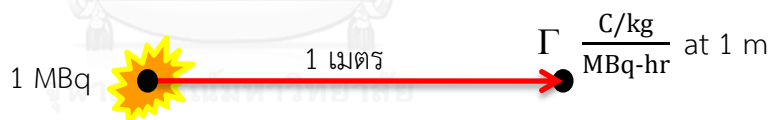
ค่า Build-up factor, B จะขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณที่ได้จากการวัดหรือการคำนวณ เช่น ปริมาณรังสี เป็นต้น
2. การจัดระบบวัด
  - 2.1 แบบบังคับลำรังสี
  - 2.2 แบบไม่บังคับลำรังสี
  - 2.3 แบบต้นกำเนิดรังสีเป็นจุด
  - 2.4 การจัดระบบวัดแบบอื่น ๆ
3. ความหนาของวัสดุกำบังรังสี ที่อยู่ในรูปของ Relaxation Lengths ( $\mu x$ )
  - 3.1 ค่า Linear Attenuation Coefficient,  $\mu$  จะขึ้นอยู่กับ พลังงานของรังสีแกมมา และชนิดของวัสดุหรือเลขอะตอม (Z) ของวัสดุ
  - 3.2 ความหนาของสิ่งกำบังรังสี

## 2.7 Source Strength (Specific Gamma-ray Emission)

Source Strength หมายถึง อัตราปริมาณรังสีที่ระยะห่าง 1 เมตร เมื่อวางต้นกำเนิดรังสีแกมมาหนึ่งหน่วยความแรง (เช่น 1 MBq หรือ 1 Ci) มีหน่วยเป็น (C/kg)/MBq-hr at 1 m หรือ R/Ci-hr at 1 m

สำหรับหน่วย SI

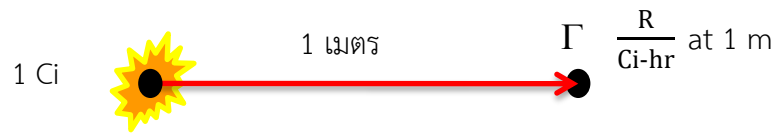


รูปที่ 7 ค่า Source Strength (Specific Gamma-ray Emission) ที่ระยะ 1 เมตร จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ในหน่วย MBq

จะได้สมการ 
$$\Gamma = 3.65 \times 10^{-9} \sum_i f_i \times E_i \frac{\text{C/kg}}{\text{MBq-hr}} \text{ at } 1 \text{ m} \quad (7)$$

โดย  $\Gamma$  คือ Source Strength หรือ Specific Gamma-ray Emission มีหน่วยเป็น  $\frac{\text{C/kg-m}^2}{\text{MBq-hr}}$   
 $f_i$  คือ เปอร์เซ็นต์การสลายตัวให้แต่ละพลังงาน  
 $E_i$  คือ พลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมา

สำหรับหน่วยเก่า



**รูปที่ 8** ค่า Source Strength (Specific Gamma-ray Emission) ที่ระยะ 1 เมตร  
จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ในหน่วย Ci

จะได้สมการ 
$$\Gamma = 0.5 \sum_i f_i \times E_i \quad \frac{R}{\text{Ci-hr}} \text{ at } 1 \text{ m} \quad (8)$$

โดย  $\Gamma$  คือ Source Strength หรือ Specific Gamma-ray Emission มีหน่วยเป็น  $\frac{R \cdot m^2}{\text{Ci-hr}}$   
 $f_i$  คือ เปอร์เซ็นต์การสลายตัวให้แต่ละพลังงาน  
 $E_i$  คือ พลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมา มีหน่วยเป็น MeV

เมื่อได้ค่า Source Strength หรือ Specific Gamma-ray Emission ( $\Gamma$ ) ตามสมการข้างต้น  
แล้ว ทำให้สามารถคำนวณปริมาณรังสีที่ระยะต่าง ๆ ได้ ดังนี้

จากกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (9)$$

เมื่อ  $d_1 = 1$  เมตร จะได้

$$I_2 = \frac{I_1}{d_2^2} \quad (10)$$

ดังนั้น 
$$\dot{X} = \frac{\Gamma \times A}{d^2} \quad (11)$$

โดย  $I_1, I_2$  คือ ค่าความเข้มของรังสี ณ ตำแหน่งใดๆ  
 $\dot{X}$  คือ Exposure rate มีหน่วยเป็น (C/kg)/hr at 1 m หรือ R/hr at 1 m  
 $\Gamma$  คือ Source Strength หรือ Specific Gamma-ray Emission  
 มีหน่วยเป็น  $\frac{C/kg}{\text{MBq-hr}}$  at 1 m หรือ  $\frac{R}{\text{Ci-hr}}$  at 1 m  
 $A$  คือ Activity มีหน่วยเป็น MBq หรือ Ci

$d_1, d_2$  คือ ระยะจากต้นกำเนิดรังสีไปถึงจุดที่ต้องการวัดปริมาณรังสี มีหน่วยเป็น เมตร (m)

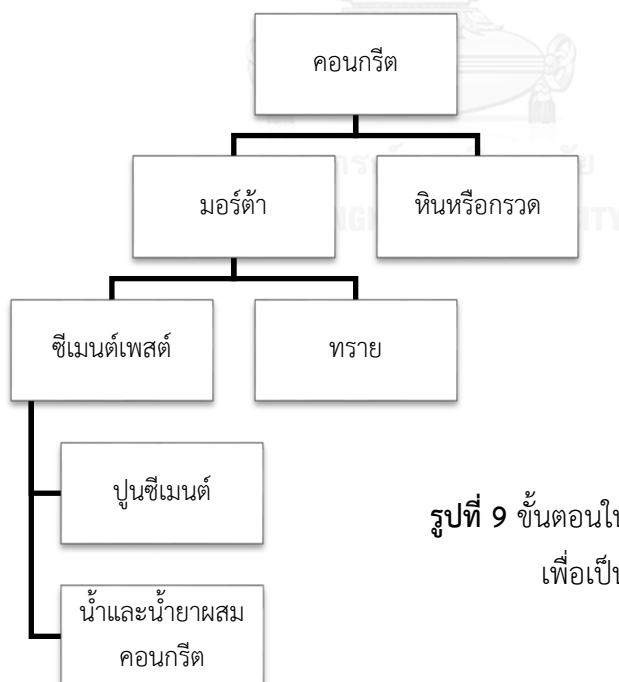
## 2.8 คอนกรีต (Concrete) [9]

คอนกรีต เป็นวัสดุที่สำคัญมากในการก่อสร้างสิ่งต่าง ๆ เช่น อาคาร บ้านเรือน และ สาธารณูปโภคต่าง ๆ เป็นต้น และคอนกรีตจะแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นตัวประสาน คือ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต
2. ส่วนที่เป็นมวลรวม คือ ทราย หินหรือกรวด

เมื่อนำทั้ง 2 ส่วนมาผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการ จะได้คอนกรีตออกมาในรูปของของเหลวที่มีความหนืดสามารถเทในแบบหล่อตามต้องการได้ ซึ่งจะเป็นของเหลวในช่วงแรกเท่านั้น เรียกคอนกรีตช่วงนี้ว่า คอนกรีตสด (Fresh concrete) จากนั้นจากของเหลวจะกลายเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็ง และสุดท้ายจะกลายเป็นของแข็งในที่สุด เรียกว่า คอนกรีตแข็งตัว (Hardened concrete) ซึ่งจะสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อมีอายุของคอนกรีตมากขึ้นจนถึงช่วงเวลาหนึ่ง ความสามารถในการรับแรงอัดจะเริ่มคงที่

ในการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อทำคอนกรีต จะมีชื่อเรียกวัดวัสดุต่าง ๆ ที่ผสม ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ขั้นตอนในการผสมวัสดุต่าง ๆ เพื่อเป็นคอนกรีต

## 2.9 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์

### 2.9.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP) [10]

Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP) เป็นโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการต่างๆทางนิวเคลียร์ ซึ่งถูกพัฒนามาจาก Los Alamos National Laboratory ตั้งแต่ปี ค.ศ.1957 และมีการปรับปรุงแก้ไขต่อไป ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายใน Radiation Safety Information Computational Center ในเมือง Oak Ridge, Tennessee ประเทศสหรัฐอเมริกา และในต่างประเทศโดย Nuclear Energy Agency ในเมืองปารีส ประเทศฝรั่งเศส ประเทศเหล่านี้นำไปใช้เพื่อการจำลองกระบวนการทางนิวเคลียร์ เช่น การเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นอกจากนี้ยังสามารถจำลองการเกิดอันตรกิริยากับวัสดุของอนุภาคนิวตรอน โฟตอนและอิเล็กตรอนอีกด้วย

โดยมีการเขียนโค้ดหรือคำสั่งเป็นข้อมูลขาเข้า (Input file) ในการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP ซึ่งข้อมูลขาเข้าจะประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลทางกายภาพของวัสดุในการจำลองฯ
2. ข้อมูลของวัสดุและการเลือกตำแหน่งของวัสดุในการจำลองฯ
3. ตำแหน่งและคุณสมบัติเฉพาะของต้นกำเนิดรังสี
4. ชนิดของการแสดงผลของข้อมูลขาออก (Output file)

### 2.9.2 Visual Basic 6.0 [11]

Visual Basic เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานพัฒนาโปรแกรมบนระบบ Windows เนื่องจากเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้เทคโนโลยีในลักษณะ Visualize ทำให้สะดวกในการใช้เครื่องมือที่โปรแกรมได้จัดเตรียมไว้ให้สำหรับการออกแบบหน้าจอและสิ่งต่าง ๆ เพื่อการเขียนโปรแกรมให้สำเร็จ ซึ่งจะแตกต่างจากสมัยก่อน ที่จะออกแบบหน้าจอยังคงต้องเขียน Source Code ซึ่งมีความยุ่งยากและเกิดความยากลำบาก

Visual Basic เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ที่ใช้ได้ตั้งแต่ระดับต้น เพื่อใช้สร้างโปรแกรมง่าย ๆ บน Windows หรือโปรแกรมเมอร์ระดับกลาง ที่สามารถเรียกใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนโปรแกรมเมอร์ระดับมืออาชีพ ที่จะพัฒนาโปรแกรมในระดับสูง โดยการใช้ Object Linking and Embedding (OLE) และ Application Programming Interface (API) ของระบบ windows มาประกอบการเขียนโปรแกรม

Visual Basic เป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างโปรแกรมต่างๆ เช่น

1. โปรแกรมบนระบบปฏิบัติการ windows เช่น โปรแกรมคำนวณเลข เป็นต้น
2. โปรแกรมฐานข้อมูล เช่น Microsoft access, Microsoft SQL server
3. โปรแกรมบนอินเทอร์เน็ต

หลักในการเขียนโปรแกรมใน Visual Basic สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

1. การออกแบบหน้าจอของโปรแกรม เป็นส่วนที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้ เรียกว่า user interface
2. การเขียนโปรแกรม เป็นการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบควบคุม บนฟอร์มให้เหมาะสมและเขียนคำสั่งตอบสนองโปรแกรมที่สร้างขึ้น

## 2.10 วิธีการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีต

### 2.8.1 ใส่ข้อมูล

1. พลังงานของรังสีแกมมา (MeV)
2. ความแรงรังสี (Ci)
3. ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับจุด Exposure (m)
4. ความหนาของคอนกรีต (cm)
5. ค่า Exposure ที่ระยะที่ต้องการ (mR/hr)
6. ชนิดของคอนกรีต

### 2.8.2 อ่านค่าคงที่

1. ค่า  $\mu$  และค่า  $\mu_x$  (เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง)
2. ค่า B (ค่าที่คำนวณจากสมการ)

### 2.8.3 การคำนวณ

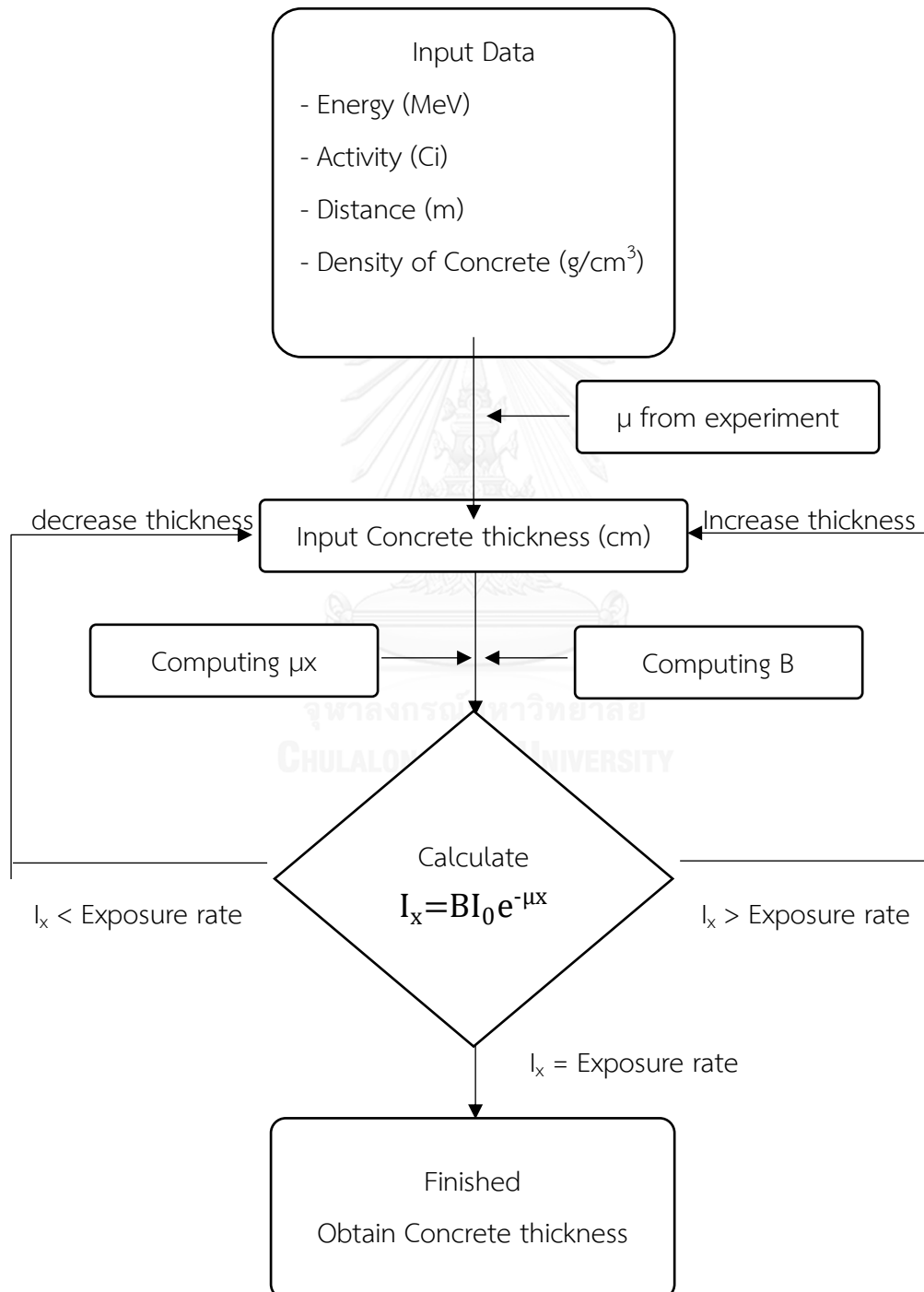
ค่า Exposure ที่ระยะที่ต้องการเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ จากสมการที่ 5

$$I_x = BI_0 e^{-\mu x}$$

|        |       |   |
|--------|-------|---|
| โดยที่ | $I_x$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อผ่านวัสดุหรือสิ่งกีดขวางรังสี                                      |
|        | $I_0$ | คือ ความเข้มรังสี เมื่อไม่มีวัสดุหรือไม่มีสิ่งกีดขวางรังสี                                |
|        | B     | คือ ค่า Build-up factor   |
|        | $\mu$ | คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน (Linear Attenuation Coefficient)<br>มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-1}$ |

x คือ ความหนาของวัสดุหรือสิ่งก่้างรังสี มีหน่วยเป็น cm

ถ้าค่า Exposure ที่กำหนด มีค่ามากกว่าค่า Exposure ที่ต้องการ ให้ใส่ค่าความหนาเพิ่มขึ้น หรือถ้าค่า Exposure ที่กำหนด มีค่าน้อยกว่าค่า Exposure ที่ต้องการ ให้ใส่ค่าความหนาลดลง แล้วคำนวณใหม่จนได้ค่าที่ต้องการ ดังแผนภาพการคำนวณในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนภาพการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีต

### บทที่ 3

#### วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัสดุ

- 3.1.1 แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้  
 คอนกรีตชุดที่ 1 ความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  ขนาด 30 ซม.  $\times$  30 ซม.  $\times$  6 ซม.  
 จำนวน 10 แผ่น  
 คอนกรีตชุดที่ 2 ความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  ขนาด 30 ซม.  $\times$  30 ซม.  $\times$  3 ซม.  
 จำนวน 20 แผ่น  
 คอนกรีตชุดที่ 3 ความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  ขนาด 30 ซม.  $\times$  30 ซม.  $\times$  3 ซม.  
 จำนวน 20 แผ่น
- 3.1.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV อัตราปริมาณรังสี 1.30 mR/hr ที่ระยะ 5 เมตร (21/12/58) ณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กรุงเทพฯ
- 3.1.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV อัตราปริมาณรังสี 1.27 mR/hr ที่ระยะ 5 เมตร (21/12/58) ณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กรุงเทพฯ

##### 3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 โต๊ะวางแผ่นคอนกรีตและอื่น ๆ
- 3.2.2 ตะกั่วหุ้มหัววัดรังสี

##### 3.3 เครื่องมือ

- 3.3.1 หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ [NaI(Tl)] ขนาด 2 นิ้ว  $\times$  2 นิ้ว
- 3.3.2 อุปกรณ์ขยายและวิเคราะห์สัญญาณ พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงาน Genie-2000 ของ CANBERRA
- 3.3.3 เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

##### 3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

- 3.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual Basic 6.0
- 3.4.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Monte Carlo N-Particle Transport Code 5 (MCNP5)



### 3.5 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้สามารถแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และเทคนิคการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต, ส่วนที่ 2 การจำลองการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต ด้วยโปรแกรม MCNP5 และส่วนที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic 6 ดังต่อไปนี้

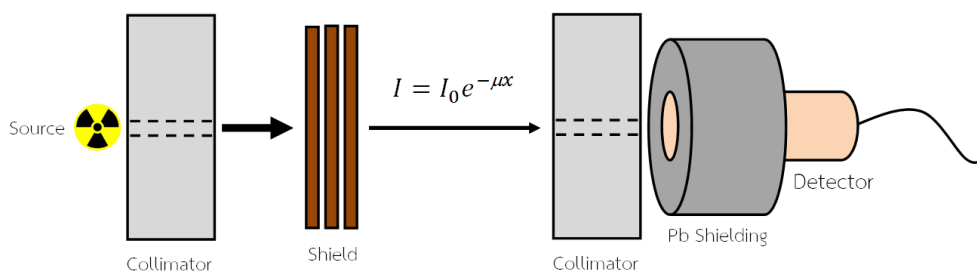
#### 3.5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และเทคนิคการหาค่า Build-up factor

ขั้นตอนของการทดลองในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และเทคนิคการหาค่า Build-up factor เพื่อนำไปสู่การหาค่าความหนาของคอนกรีตในการเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา โดยคอนกรีตที่ใช้มีความหนาแน่นต่างกัน 3 ชนิด ดังที่ได้ระบุในหัวข้อ 3.1 และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 3.4.3 ทั้งนี้การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

##### 3.5.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient)

ทำการจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบบังคับลำรังสี (Narrow Beam - Good Geometry) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีต ดังรูปที่ 11

วางแผ่นคอนกรีตระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี วัดค่าความเข้มรังสี (I) และเพิ่มแผ่นคอนกรีต แล้ววัดค่าความเข้มรังสี นำค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเขียนกราฟ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) จากความชันของกราฟ ซึ่งได้แสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในบทที่ 4 ผลการวิจัย



**รูปที่ 11** การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบบังคับลำรังสี (Narrow Beam - Good Geometry) สำหรับการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

### 3.5.1.2 เทคนิคการหาค่า Build-up factor

การหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดระบบวัดแบบไม่บังคับลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry) เพื่อให้รังสีเกิดอันตรกิริยากับแผ่นคอนกรีต เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมพ์ตันกับคอนกรีตและเข้าสู่หัววัดรังสีแกมมา ทำให้หัววัดได้วัดค่าความเข้มของรังสี ดังนั้นรังสีที่เข้าสู่หัววัด จะมีทั้งรังสีที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับคอนกรีต และรังสีที่เกิดจากการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน ทำให้สามารถหาค่า Build-up factor ได้ ดังรูปที่ 14

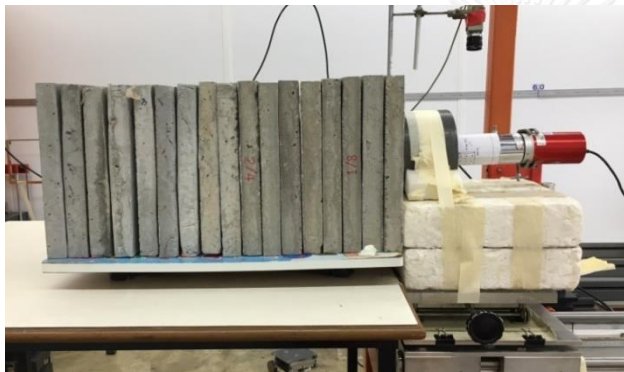
ขั้นตอนที่ 2 ทำการวัดค่าความเข้มรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV อัตราปริมาณรังสี 3400 mR/hr ที่ระยะ 1 เมตร (ณ วันที่ 29/5/58) โดยวางหัววัด NaI(Tl) ขนาด 2x2 นิ้ว ห่างจากต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะ 5 เมตร และทำการวัดโดยใช้เวลา 300 วินาทีต่อครั้ง พร้อมบันทึกผล



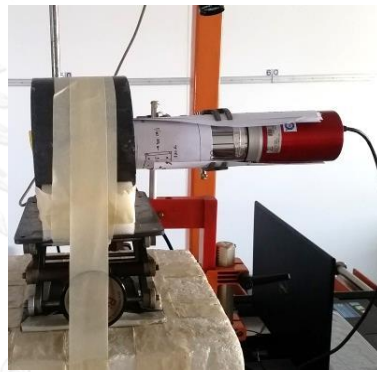
(a)



(b)



(c)



(d)

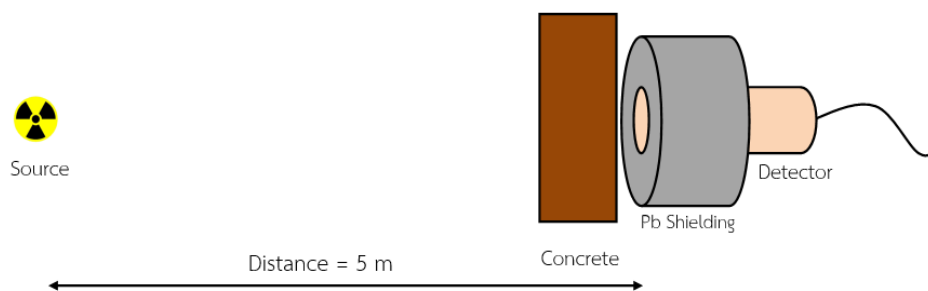
### รูปที่ 12 การจัดระบบวัดที่ใช้ในการวิจัย

(a) การจัดระบบวัดไม้บังคับลำรังสี

(b) เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

(c) การจัดวางแผ่นคอนกรีตกับหัววัดรังสีแกมมา

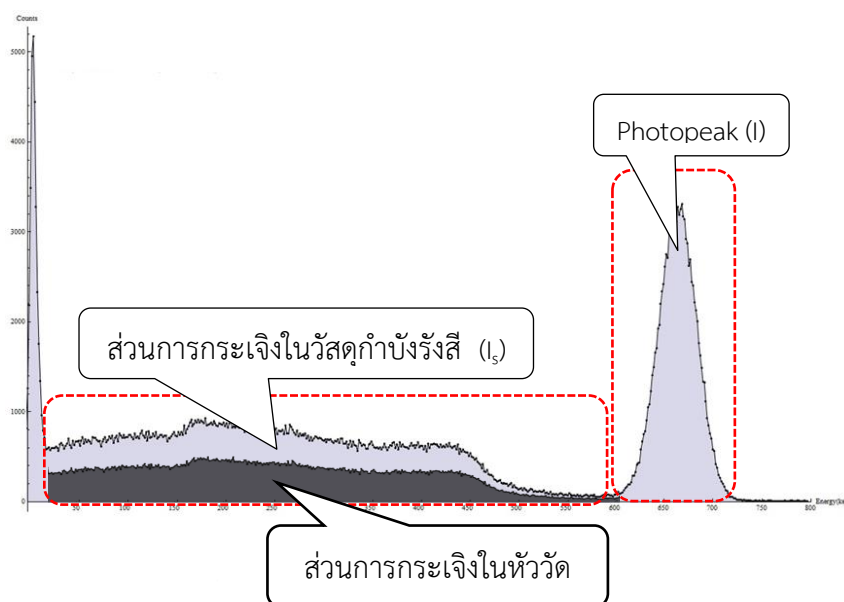
(d) หัววัดรังสีแกมมา NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ที่ถูกหุ้มด้วยตะกั่ว



**รูปที่ 13** การจัดระบบวัดรังสีแกมมาแบบไม่บังคับลำรังสี (Broad Beam - Poor Geometry) สำหรับการทดลองหาค่า Build-up factor

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นคอนกรีตที่เตรียมไว้ มาวางเป็นวัสดุกำบังรังสีระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี โดยขนาดของแผ่นและจำนวนของแผ่นคอนกรีตได้แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก. ทำการวัดโดยเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีตทีละแผ่น และฉายรังสีนาน 300 วินาทีต่อครั้ง จากนั้นบันทึกค่า integral ของสเปกตรัมทั้งหมด (R) และค่า integral จาก Photo peak (I) จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 และทำซ้ำเมื่อมีการเพิ่มความหนาของคอนกรีต เมื่อทำการวัดค่าครบทั้ง 20 แผ่น จากนั้นเปลี่ยนคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่างกัน ทำการทดลองซ้ำจนครบ 3 ความหนาแน่น สำหรับต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 ทำตามขั้นตอนเดียวกันกับการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 แต่ปรับเวลาในการฉายรังสีเป็น 420 วินาทีต่อครั้ง

ขั้นตอนที่ 4 นำค่า integral ของสเปกตรัมทั้งหมด (R) มาลบกับค่า integral จาก Photo peak (I) ที่ความหนาต่าง ๆ จะได้ส่วนเฉพาะสเปกตรัมที่เกิดการกระเจิงทั้งหมด ซึ่งเป็นการกระเจิงรวม ที่เกิดขึ้นในหัววัดรังสีเองและจากวัสดุกำบังรังสี จากนั้นนำค่าการกระเจิงทั้งหมด ลบกับค่าที่เกิดจากการกระเจิงในหัววัด ดังนั้นจะได้ส่วนของการกระเจิงที่เกิดจากวัสดุกำบังรังสีจริง ๆ หรือ  $I_s$  นั้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 กราฟสเปกตรัมแสดงส่วนของ R, I และ  $I_s$   
 ที่มา <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/1459031>

ขั้นตอนที่ 5 นำค่า I และ  $I_s$  มาคำนวณหาค่า Build-up factor ตามสมการที่ 6 และได้ค่าดังตารางในบทที่ 4

ในส่วนของการทดลองทั้ง 2 ขั้นตอน ผลที่ได้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และค่า Build-up factor ของคอนกรีตทั้ง 3 ความหนาแน่น โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ทั้งนี้ค่าที่ได้จะแสดงรายละเอียดผลการทดลองในบทที่ 4

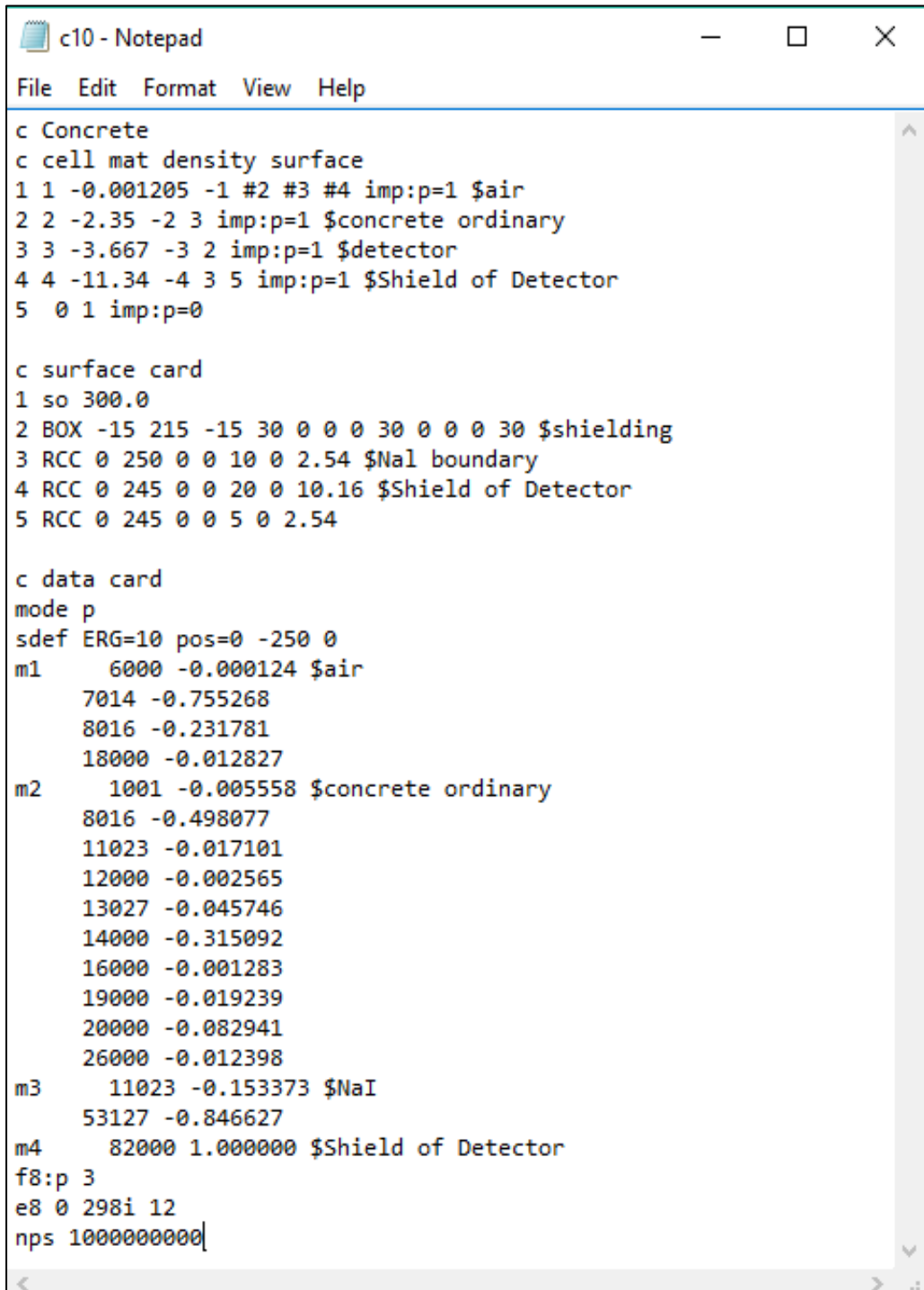
### 3.5.2 การจำลองการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต ด้วยโปรแกรม MCNP5

ส่วนนี้เป็นขั้นตอนของการจำลองด้วย MCNP5 เพื่อหาค่า Build-up factor โดยใช้คอนกรีตแบบ Ordinary (NBS04) ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  (ข้อมูลตามคู่มือของโปรแกรม MCNP5) จำนวน 20 แผ่น และใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.5 MeV, 0.662 MeV, 1.25 MeV, 5 MeV และ 10 MeV ทำการจัดระบบการวัดเหมือนกับการทดลองจริง ดังรูปที่ 14 โดยการเขียนโค้ดหรือคำสั่งแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 แสดงขอบเขตพื้นผิวของความหนาแน่นของวัสดุอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบวัด เช่น คอนกรีต หัววัดรังสี และตะกั่ว เป็นต้น

ส่วนที่ 2 แสดงขนาดและตำแหน่งของวัสดุอุปกรณ์ในระบบวัด

และส่วนที่ 3 แสดงรายละเอียดสัดส่วนของธาตุต่าง ๆ ในวัสดุอุปกรณ์ตามตารางในคู่มือของโปรแกรม MCNP5 ค่าพลังงานของรังสีแกมมา จำนวนอนุภาคของโฟตอนที่ปล่อยออกมา และตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ดังรูปที่ 15 โดยได้แสดงโค้ดหรือคำสั่งแบบละเอียดในภาคผนวกท้ายเล่ม



```

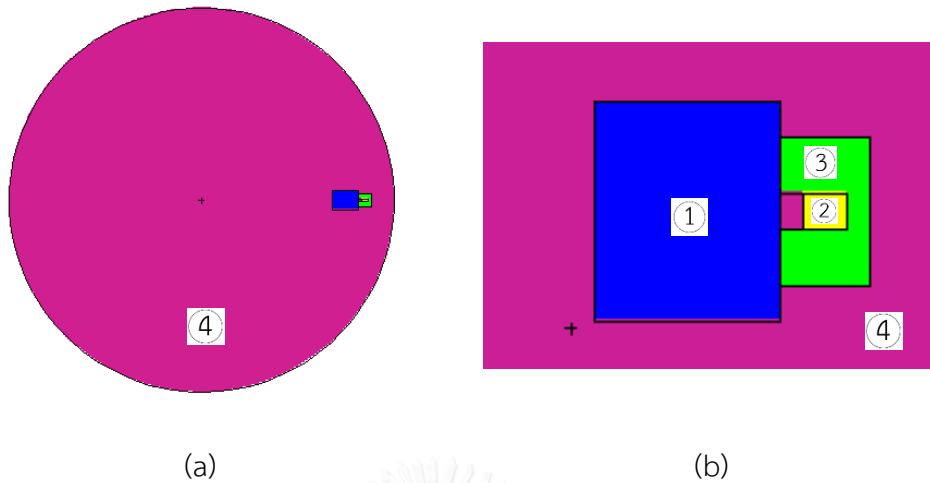
c10 - Notepad
File Edit Format View Help
c Concrete
c cell mat density surface
1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 $air
2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 $concrete ordinary
3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 $detector
4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 $Shield of Detector
5 0 1 imp:p=0

c surface card
1 so 300.0
2 BOX -15 215 -15 30 0 0 0 30 0 0 0 30 $shielding
3 RCC 0 250 0 0 10 0 2.54 $NaI boundary
4 RCC 0 245 0 0 20 0 10.16 $Shield of Detector
5 RCC 0 245 0 0 5 0 2.54

c data card
mode p
sdef ERG=10 pos=0 -250 0
m1 6000 -0.000124 $air
7014 -0.755268
8016 -0.231781
18000 -0.012827
m2 1001 -0.005558 $concrete ordinary
8016 -0.498077
11023 -0.017101
12000 -0.002565
13027 -0.045746
14000 -0.315092
16000 -0.001283
19000 -0.019239
20000 -0.082941
26000 -0.012398
m3 11023 -0.153373 $NaI
53127 -0.846627
m4 82000 1.000000 $Shield of Detector
f8:p 3
e8 0 298i 12
nps 1000000000|

```

รูปที่ 15 ตัวอย่างการเขียนโค้ดในสกุลไฟล์ .txt เพื่อการจำลองด้วย MCNP



รูปที่ 16 (a) การจัดระบบวัดในการจำลองด้วย MCNP5

(b) การจัดวางแผ่นคอนกรีตกับหัววัดรังสี

- โดย
- ① คือ คอนกรีต
  - ② คือ หัววัดรังสีแกมมา
  - ③ คือ ตะกั่วกำบังรังสีให้กับด้านข้างของหัววัด
  - ④ คือ ขอบเขตของพื้นที่ในการวัด

เมื่อทำการจัดระบบวัดรังสีด้วยการเขียนโค้ดหรือคำสั่งที่อยู่ในรูปของสกุลไฟล์ .txt เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการรันโปรแกรมโดยใช้ Command Prompt ที่มีอยู่ในคอมพิวเตอร์ โดยการแจ้งตำแหน่งและชื่อของไฟล์ input และไฟล์ output ในรูปของสกุลไฟล์ .txt พร้อมทั้งทำการรันข้อมูล จากนั้นเมื่อได้ข้อมูลที่เป็น output (สกุลไฟล์ .txt) และแสดงข้อมูลต่าง ๆ หลังจากรันข้อมูล โดยทำการเลือกข้อมูลที่แสดงค่าพลังงานของโฟตอนกับค่าการนับวัด ดังรูปที่ 17

```

oc7 - Notepad
File Edit Format View Help

Thread Name & Version = MCNP5_RSICC, 1.40

m c n p 5

-----
| This program was prepared by the Regents of the University of |
| California at Los Alamos National Laboratory (the University) under |
| contract number W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy |
| (DoE). The University has certain rights in the program pursuant to |
| the contract and the program should not be copied or distributed |
| outside your organization. All rights in the program are reserved |
| by the DoE and the University. Neither the U.S. Government nor the |
| University makes any warranty, express or implied, or assumes any |
| liability or responsibility for the use of this software. |
|-----

1mcnp      version 5      ld=11012005      10/30/16 16:05:49
*****
i=c7.txt o=oc7.txt
probid = 10/30/16 16:05:49

1-      c Concrete
2-      c cell mat density surface
3-      1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 $air
4-      2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 $concrete regular
5-      3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 $detector
6-      4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 $$Shield of Detector
7-      5 0 1 imp:p=0
8-

```

(a)

```

oc7 - Notepad
File Edit Format View Help

cell 3
energy
0.0000E+00 1.0000E-09 1.0000
4.0134E-02 1.1560E-06 0.0294
8.0268E-02 1.1200E-07 0.0945
1.2040E-01 9.6000E-08 0.1021
1.6054E-01 7.5000E-08 0.1155
2.0067E-01 8.0000E-08 0.1118
2.4080E-01 6.0000E-08 0.1291
2.8094E-01 3.5000E-08 0.1690
3.2107E-01 4.5000E-08 0.1491
3.6120E-01 4.3000E-08 0.1525
4.0134E-01 4.7000E-08 0.1459
4.4147E-01 4.2000E-08 0.1543
4.8161E-01 2.6000E-08 0.1961
5.2174E-01 1.1500E-07 0.0933
5.6187E-01 3.0000E-08 0.1826
6.0201E-01 1.9000E-08 0.2294
6.4214E-01 2.5000E-08 0.2000
6.8227E-01 1.9000E-08 0.2294
7.2241E-01 1.6000E-08 0.2500
7.6254E-01 9.0000E-09 0.3333
8.0268E-01 1.4000E-08 0.2673
8.4281E-01 1.8000E-08 0.2357
8.8294E-01 1.3000E-08 0.2774
9.2308E-01 1.3000E-08 0.2774
9.6321E-01 1.2000E-08 0.2887
1.0033E+00 7.0000E-09 0.3780
1.0435E+00 8.0000E-09 0.3536

```

(b)

รูปที่ 17 (a) รายละเอียดของ output ที่ได้จากการรันโปรแกรมด้วย Command Prompt

(b) ค่าพลังงานของโฟตอนกับสัดส่วนของค่านับวัดรังสี



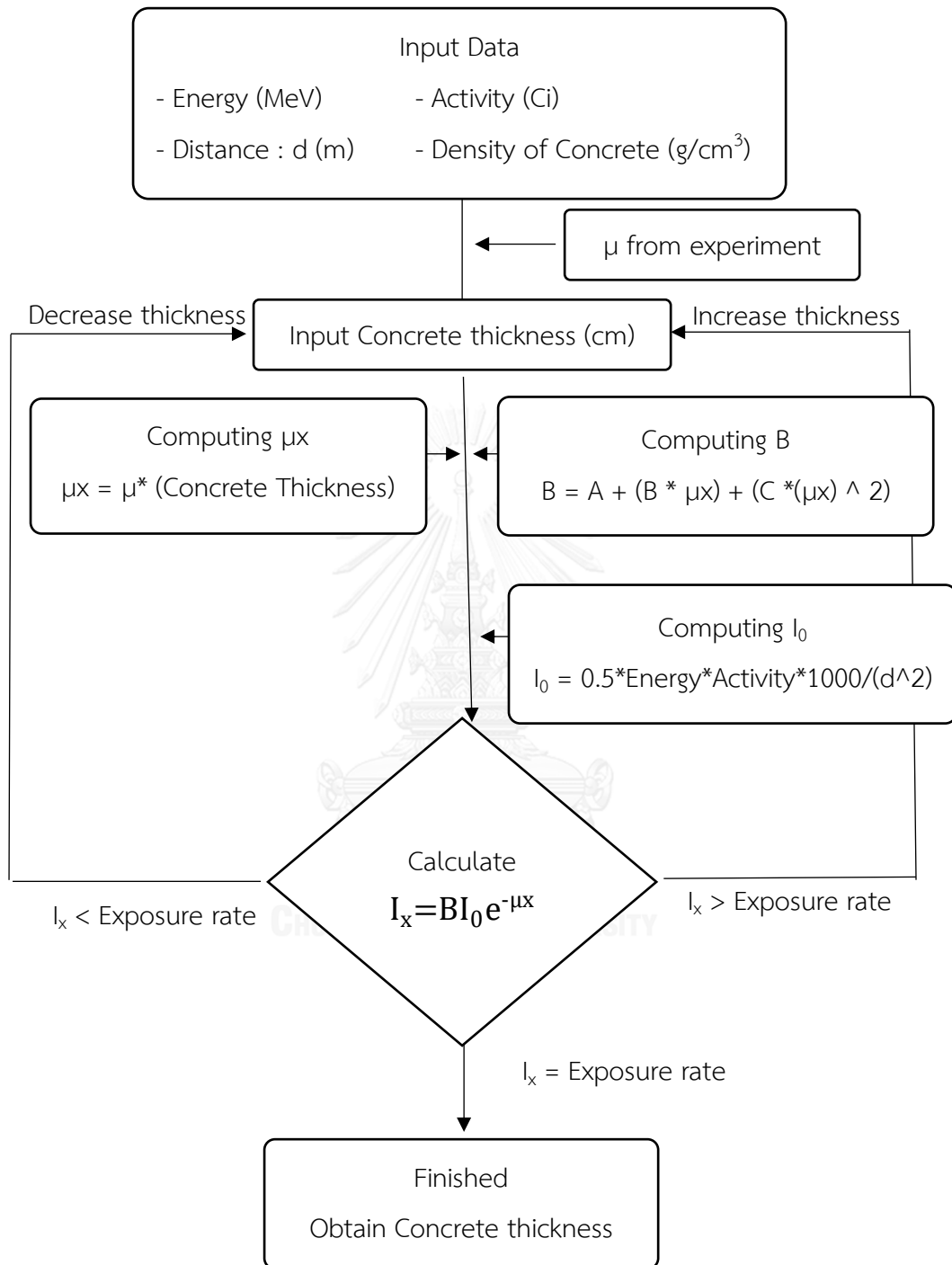
นำค่าสัดส่วนของค่านับวัดรังสีคูณกับจำนวนอนุภาค (ตามภาคผนวก ค.) จะได้ค่านับวัดรังสีที่เข้าหัววัด นำค่าพลังงานของรังสีแกมมากับค่านับวัดรังสีเขียนกราฟและวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 4 ในหัวข้อ 3.4.1.1 เพื่อคำนวณหาค่า Build-up factor ได้แสดงรายละเอียดในบทที่ 4

### 3.5.3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้าง คือ โปรแกรม Visual Basic 6 โดยการสร้างโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง เป็นหน้าจอของโปรแกรม เป็นส่วนที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้ เรียกว่า user interface และส่วนที่สอง เป็นการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบควบคุมบนฟอร์มให้เหมาะสมและเขียนคำสั่งตอบสนองโปรแกรมที่สร้างขึ้น



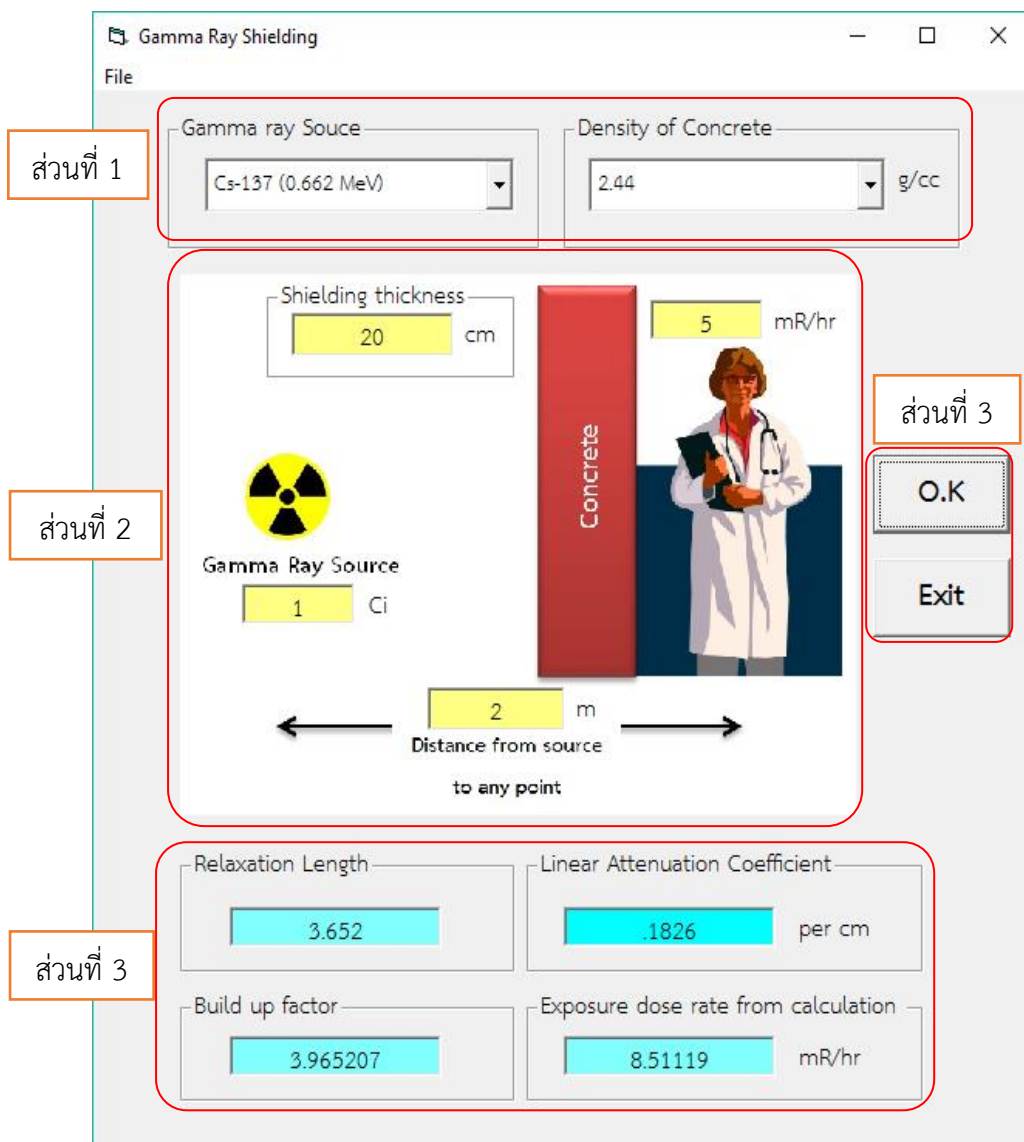
ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 แผนภาพการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

### 3.5.3.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

จากงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยการเขียนคำสั่งให้โปรแกรมได้คำนวณตามที่เรต้องการ และมีฟังก์ชันการใช้งานดังต่อไปนี้



รูปที่ 19 หน้าต่างของโปรแกรมคำนวณความหนาของคอนกรีต

ได้ออกแบบหน้าจอเพื่อรับข้อมูลและแสดงผลการคำนวณในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ดังรูปที่ 19 ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่เลือกข้อมูลจากโปรแกรม มีดังนี้

1. ต้นกำเนิดรังสีแกมมาและพลังงานของรังสีแกมมา
  - 1.1 Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV
  - 1.2 Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV
2. ความหนาแน่นของคอนกรีต (Density: g/cm<sup>3</sup>)
  - 2.1 ความหนาแน่น 2.13 g/cm<sup>3</sup>
  - 2.2 ความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup>
  - 2.3 ความหนาแน่น 2.47 g/cm<sup>3</sup>
  - 2.4 ความหนาแน่น 2.35 g/cm<sup>3</sup>

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่จะต้องใส่ข้อมูล มีดังนี้

1. ค่าความหนาของวัสดุกำบังรังสีหรือคอนกรีต (Shielding thickness: cm)
2. อัตราปริมาณรังสีด้านหลังกำบังรังสีแกมมา (ในหน่วยมิลลิเรนเกนต่อชั่วโมง: mR/hr)
3. ค่าความแรงของต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Activity: Ci)
4. ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ด้านหลังกำบังรังสี (Distance: m)

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ใช้ในการสั่งการให้โปรแกรมทำงาน หยุดทำงาน หรือนำข้อมูลจากแหล่งอื่นมาใช้ มีดังนี้

1. ปุ่ม O.K. เป็นปุ่มเพื่อตกลงหรือยืนยันให้โปรแกรมได้คำนวณค่าที่ต้องการ
2. ปุ่ม Exit เป็นปุ่มเพื่อยกเลิกหรือหยุดการใช้งานของโปรแกรม
3. เมนู file มีเมนู Exit สำหรับยกเลิกหรือหยุดการทำงาน of โปรแกรม

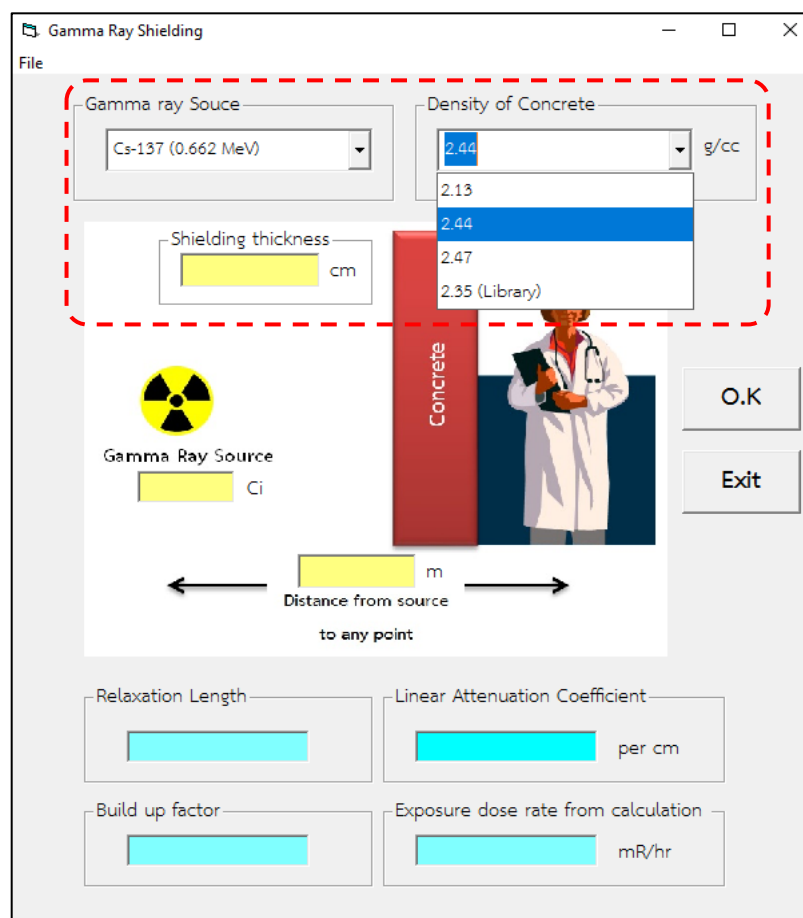
ส่วนที่ 4 เป็นส่วนของการแสดงผล มีดังนี้

1. ค่า Relaxation length
2. ค่า Build-up factor
3. ค่า Linear Attenuation Coefficient (cm<sup>-1</sup>)
4. ค่า Exposure dose rate จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (mR/hr)

การพัฒนาโปรแกรกดังกล่าวทำได้โดยการเขียนโค้ดหรือคำสั่งด้วยภาษาของโปรแกรม รายละเอียดการเขียนโค้ดของโปรแกรม ได้แสดงในภาคผนวกท้ายเล่ม

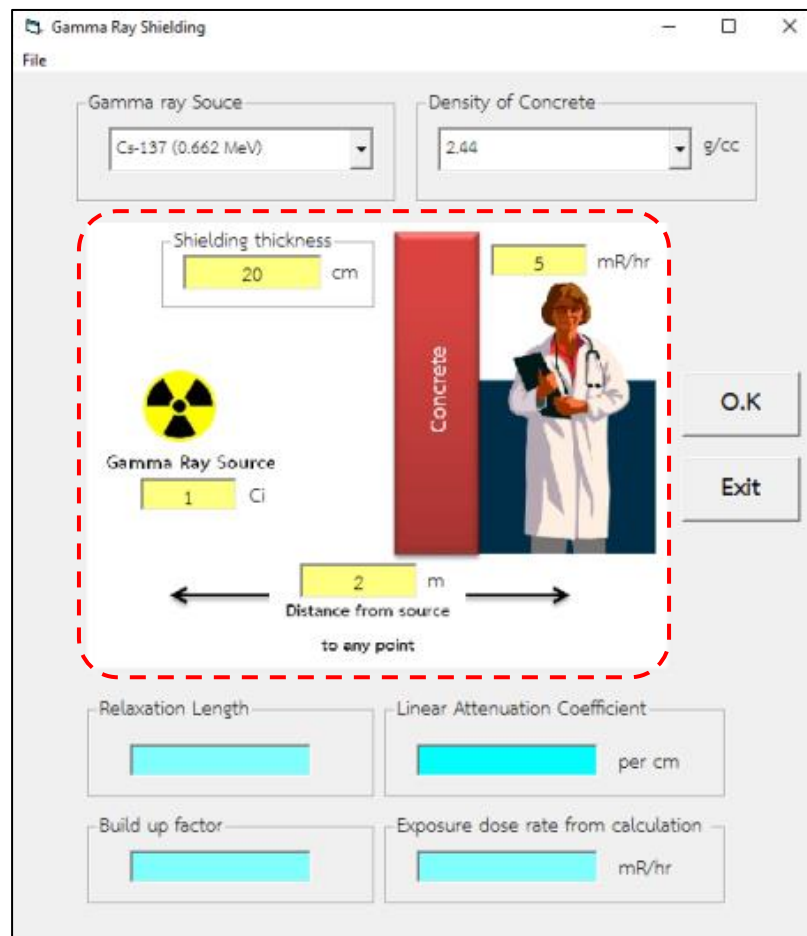
### 3.5.3.2 วิธีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

1. ทำการเปิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา จนได้หน้าต่างดังรูปที่ 19
2. เลือกต้นกำเนิดรังสีและความหนาแน่นของคอนกรีตที่ต้องการ



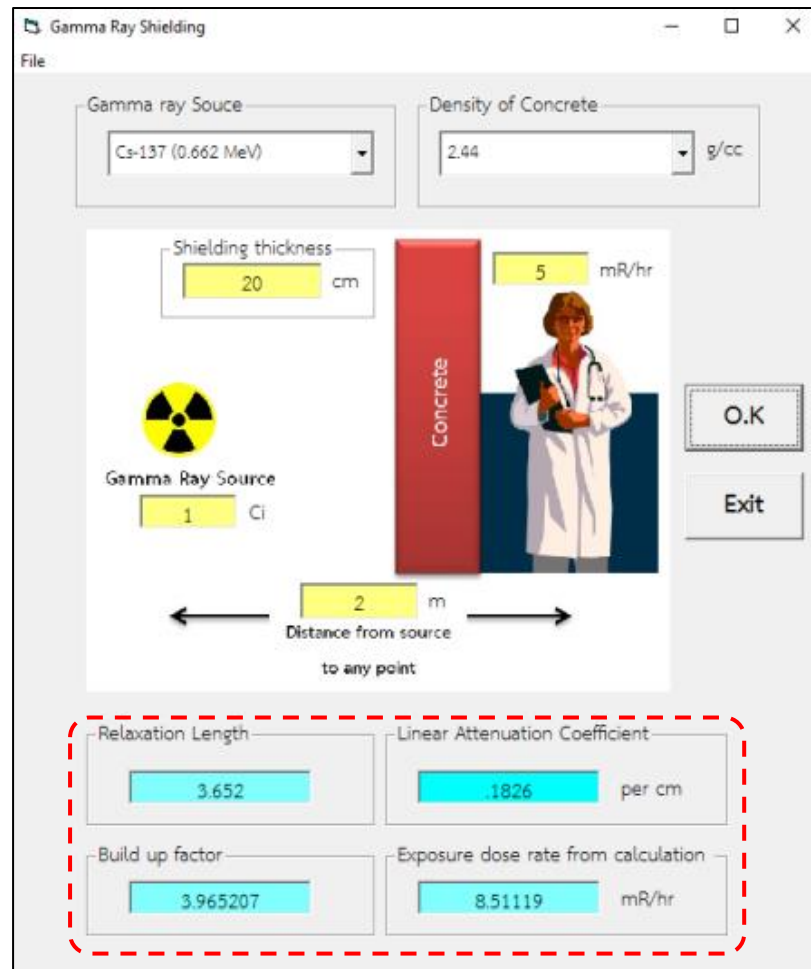
รูปที่ 20 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขณะเลือกต้นกำเนิดรังสีและความหนาแน่นของคอนกรีต

3. กรอกข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการ ดังนี้
  - ค่าความหนาของวัสดุกำบังรังสีหรือคอนกรีต (cm)
  - ค่าความแรงรังสีที่ต้องการหลังจากกำบังรังสีแกมมา (mR/hr)
  - ค่าความแรงของต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Ci)
  - ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและผู้ปฏิบัติงาน (m)



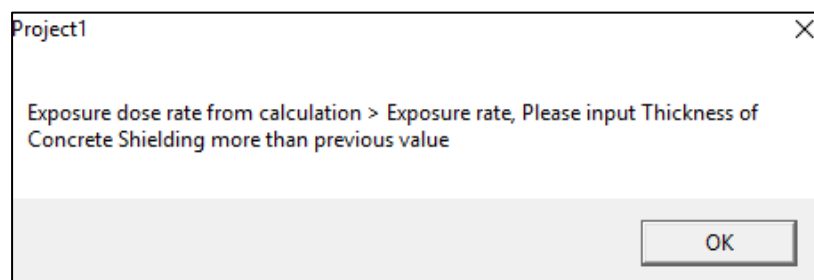
รูปที่ 21 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อกรอกข้อมูลที่ต้องการ

4. เมื่อเลือกและกรอกรายละเอียดอย่างครบถ้วน จากนั้นกดปุ่ม O.K.
5. โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณและแสดงข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้
  - ค่า Relaxation length
  - ค่า Build-up factor
  - ค่า Linear Attenuation Coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ )
  - ค่า Exposure dose rate (mR/hr)



รูปที่ 22 หน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงข้อมูลที่ได้

เมื่อค่า Exposure dose rate จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่าเกินกว่าค่า Exposure dose rate ที่ตั้งไว้ โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างแจ้งเตือนให้ปรับค่าความหนาของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 23 เพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมในการเป็นกำบังรังสีแกมมา



รูปที่ 23 หน้าต่างแจ้งเตือน เมื่อค่า Exposure dose rate จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่าเกินกว่าค่า Exposure dose rate ที่ตั้งไว้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ เป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณความหนาของคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยสนใจค่า Build-up factor ของคอนกรีต เพื่อนำไปคำนวณความหนาของคอนกรีต ดังนั้นการวิจัยจึงมุ่งเน้นในการหาค่า Build-up factor และการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในบทนี้แบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การแสดงผลการทดลองในการหาค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน 3 ค่า คือ คอนกรีตชุดที่ 1 มีค่าความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$ , คอนกรีตชุดที่ 2 มีค่าความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และคอนกรีตชุดที่ 3 มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$  และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$

ส่วนที่ 2 การแสดงค่า Build-up factor จากจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 และแสดงค่า Build-up factor จากการทดลองเปรียบเทียบกับจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

ส่วนที่ 3 การแสดงค่าต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าได้รายละเอียดของผลการวิจัยตามข้อมูลข้างล่างนี้

#### 4.1 การหาค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน

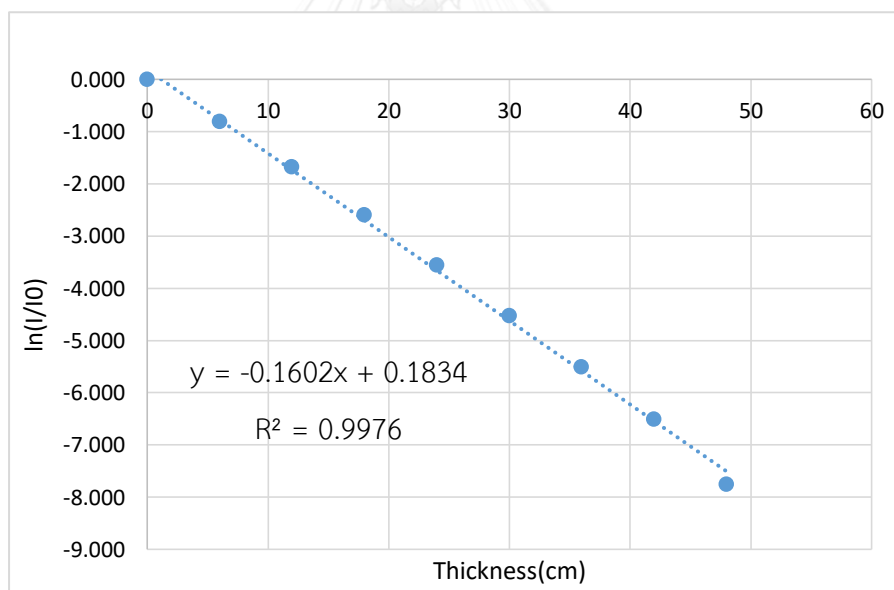
##### 4.1.1 คอนกรีตชุดที่ 1 ค่าความหนาแน่น $2.13 \text{ g/cm}^3$

คอนกรีตชุดที่ 1 ขนาด  $6 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  จำนวน 8 แผ่น น้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่น  $11.50 \text{ kg}$  และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย  $2.13 \text{ g/cm}^3$  ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$  และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$



ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137

| Thickness (cm) | I (cps)  | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|----------------|----------|------------------|-----------------------|
| 0              | 6188.260 | 1                | 0.000                 |
| 6              | 2741.098 | 0.442951         | -0.814                |
| 12             | 1156.875 | 0.186947         | -1.677                |
| 18             | 457.920  | 0.073998         | -2.604                |
| 24             | 175.303  | 0.028328         | -3.564                |
| 30             | 66.702   | 0.010779         | -4.530                |
| 36             | 25.085   | 0.004054         | -5.508                |
| 42             | 9.230    | 0.001492         | -6.508                |
| 48             | 2.658    | 0.00043          | -7.753                |

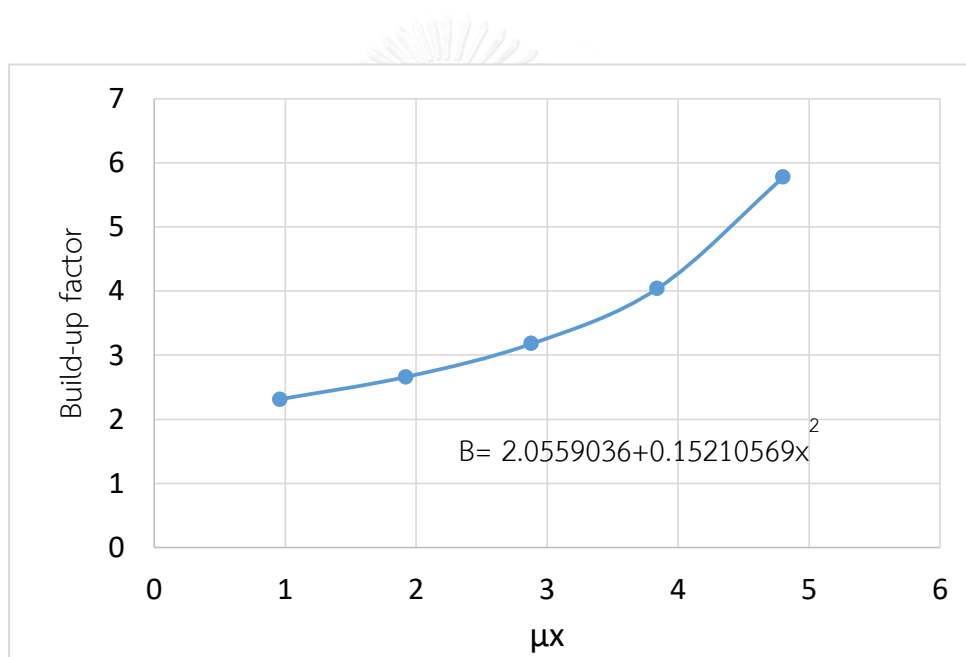


รูปที่ 24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV

จากรูปที่ 24 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1602 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 2 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ  $B$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  และค่า  $\mu = 0.1602 \text{ cm}^{-1}$

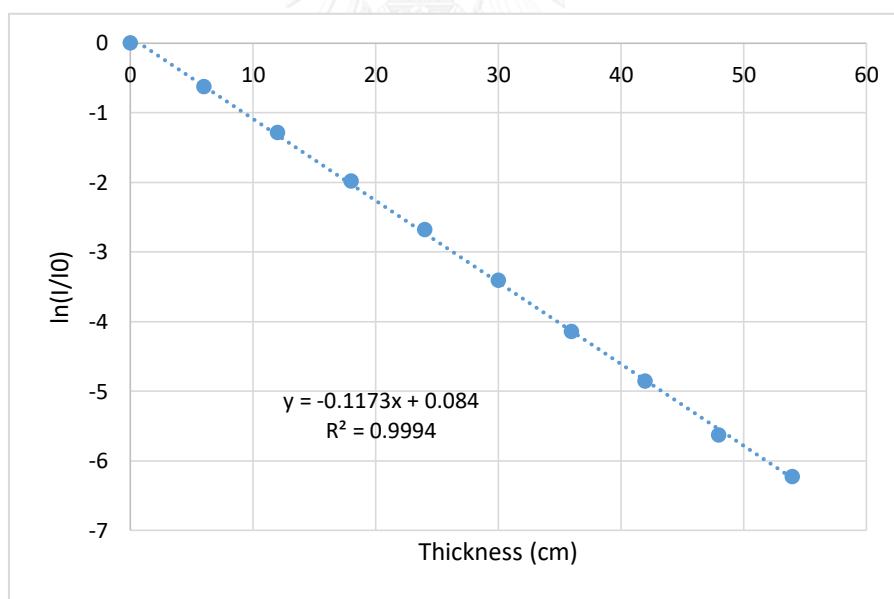
| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | $B$   |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 6              | 0.961   | 68527.458 | 89997.708   | 2.313 |
| 12             | 1.922   | 28921.875 | 48036.000   | 2.661 |
| 18             | 2.884   | 11448.000 | 24946.583   | 3.179 |
| 24             | 3.845   | 4382.583  | 13327.625   | 4.041 |
| 30             | 4.806   | 1667.542  | 7966.125    | 5.777 |



รูปที่ 25 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV

ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  จากต้นกำเนิดรังสี Co-60

| thickness | I (cps)  | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|----------|------------------|-----------------------|
| 0         | 1678.583 | 1                | 0                     |
| 6         | 895.108  | 0.533252         | -0.62876              |
| 12        | 465.405  | 0.277261         | -1.2828               |
| 18        | 231.930  | 0.13817          | -1.97927              |
| 24        | 115.073  | 0.068554         | -2.68014              |
| 30        | 55.530   | 0.033081         | -3.40878              |
| 36        | 26.613   | 0.015855         | -4.14429              |
| 42        | 13.062   | 0.007781         | -4.85602              |
| 48        | 5.998    | 0.003573         | -5.63422              |
| 54        | 3.319    | 0.001977         | -6.22602              |

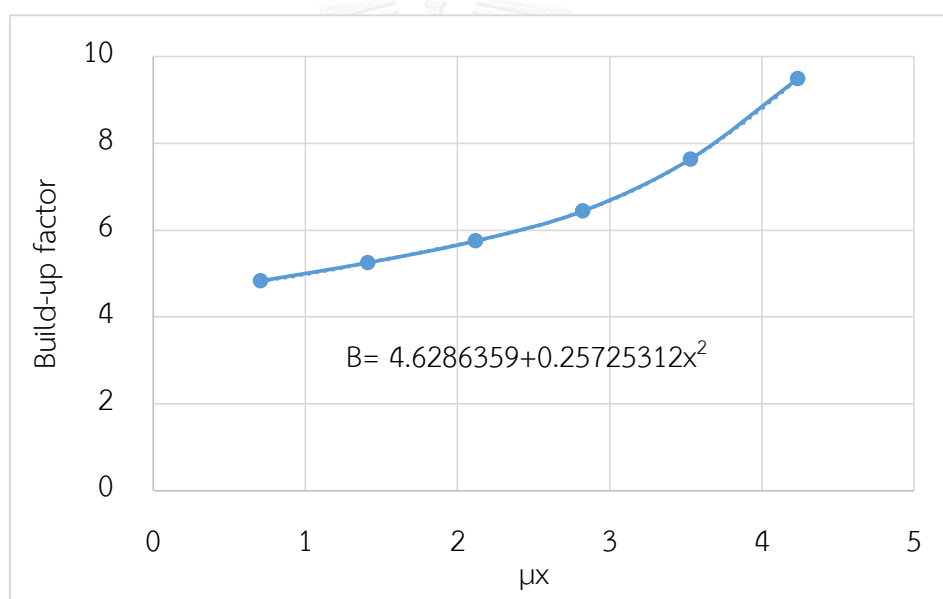


รูปที่ 26 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$

จากรูปที่ 26 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1173 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 4 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ  $B$  จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  และค่า  $\mu = 0.1173 \text{ cm}^{-1}$

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | $B$   |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 6              | 0.706   | 22377.708 | 85718.250   | 4.831 |
| 12             | 1.412   | 11635.125 | 49457.417   | 5.251 |
| 18             | 2.119   | 5798.250  | 27548.958   | 5.751 |
| 24             | 2.825   | 2876.833  | 15649.833   | 6.440 |
| 30             | 3.531   | 1388.250  | 9211.458    | 7.635 |
| 36             | 4.237   | 665.333   | 5647.292    | 9.488 |



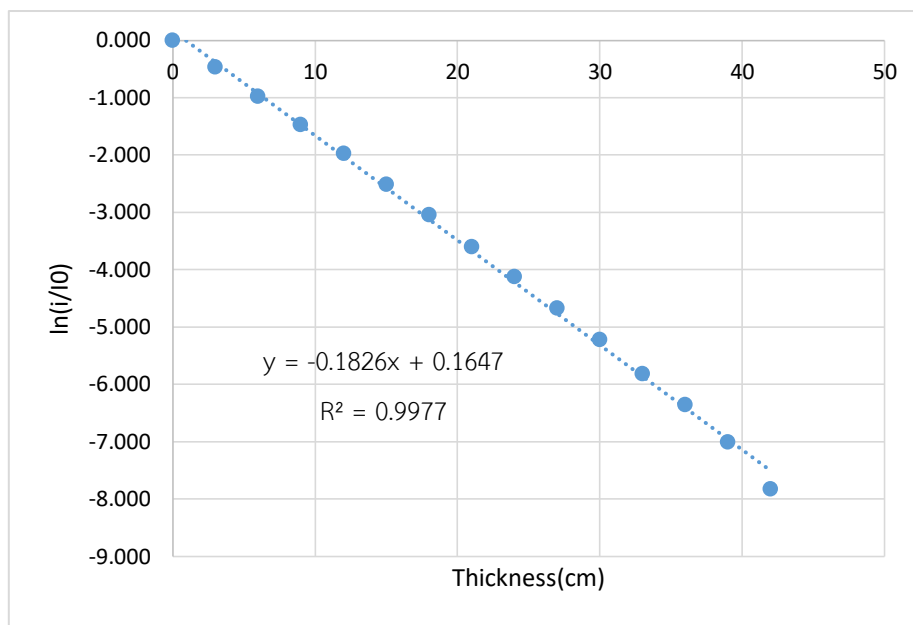
รูปที่ 27 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 1 ที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

#### 4.1.2 คอนกรีตชุดที่ 2 ค่าความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$

คอนกรีตชุดที่ 2 ขนาด  $3 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  จำนวน 15 แผ่น น้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่น 6.60 kg และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย  $2.44 \text{ g/cm}^3$  ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

**ตารางที่ 5** ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137

| Thickness (cm) | I(cps)   | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|----------------|----------|------------------|-----------------------|
| 0              | 6174.453 | 1                | 0.000                 |
| 3              | 3880.600 | 0.628493         | -0.464                |
| 6              | 2318.537 | 0.375505         | -0.979                |
| 9              | 1423.783 | 0.230593         | -1.467                |
| 12             | 854.860  | 0.138451         | -1.977                |
| 15             | 499.267  | 0.08086          | -2.515                |
| 18             | 294.137  | 0.047638         | -3.044                |
| 21             | 169.177  | 0.027399         | -3.597                |
| 24             | 99.780   | 0.01616          | -4.125                |
| 27             | 58.000   | 0.009394         | -4.668                |
| 30             | 33.440   | 0.005416         | -5.218                |
| 33             | 18.460   | 0.00299          | -5.813                |
| 36             | 10.693   | 0.001732         | -6.359                |
| 39             | 5.600    | 0.000907         | -7.005                |
| 42             | 2.467    | 0.000399         | -7.825                |

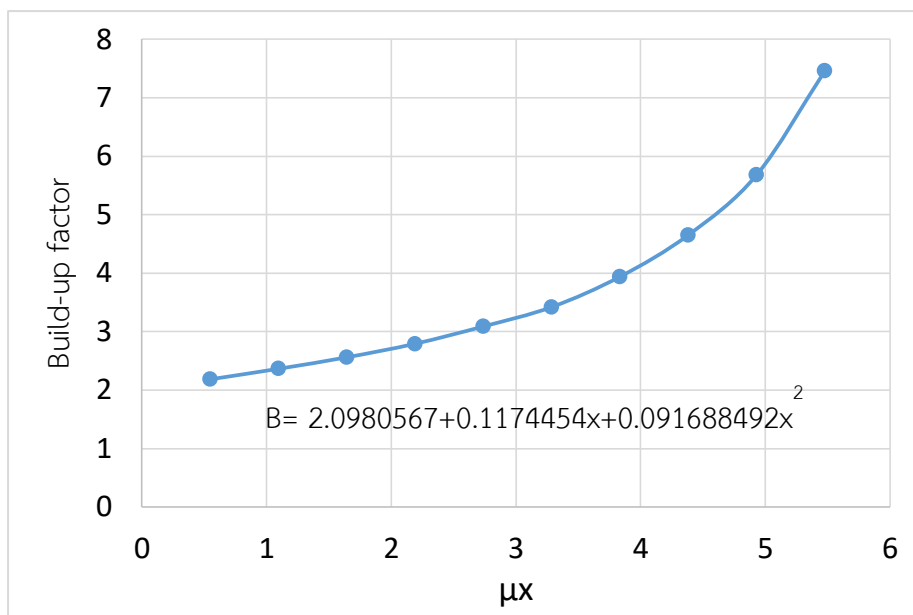


**รูปที่ 28** กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV

จากรูปที่ 28 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1826 \text{ cm}^{-1}$

**ตารางที่ 6** ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ  $B$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และค่า  $\mu = 0.1826 \text{ cm}^{-1}$

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | $B$   |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.548   | 97015.000 | 114953.417  | 2.185 |
| 6              | 1.096   | 57963.417 | 79132.500   | 2.365 |
| 9              | 1.643   | 35594.583 | 55587.333   | 2.562 |
| 12             | 2.191   | 21371.500 | 38328.667   | 2.793 |
| 15             | 2.739   | 12481.667 | 26078.250   | 3.089 |
| 18             | 3.287   | 7353.417  | 17803.167   | 3.421 |
| 21             | 3.835   | 4229.417  | 12432.500   | 3.940 |
| 24             | 4.382   | 2494.500  | 9111.917    | 4.653 |
| 27             | 4.930   | 1450.000  | 6784.500    | 5.679 |
| 30             | 5.478   | 836.000   | 5399.083    | 7.458 |

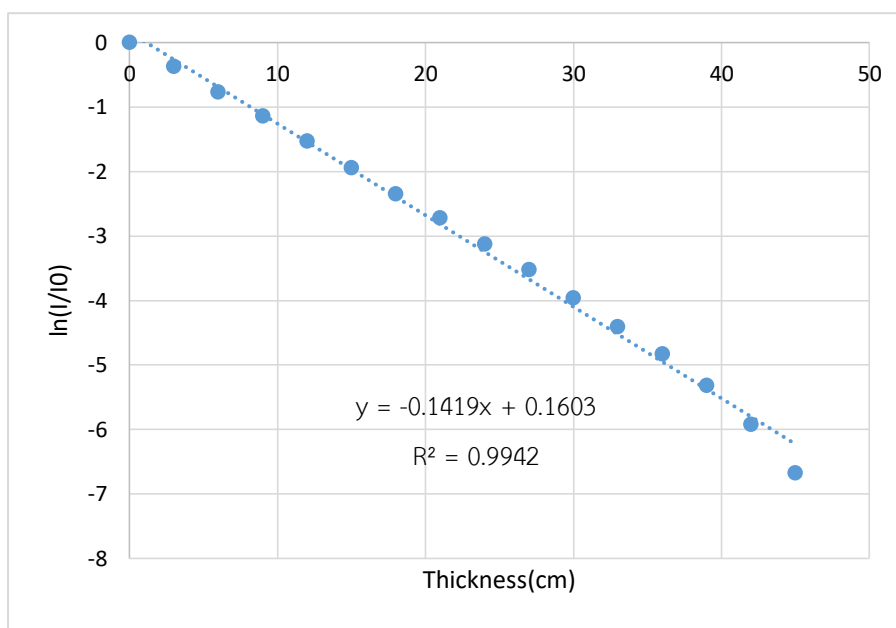


รูปที่ 29 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV

ตารางที่ 7 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มี ความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup> จากต้นกำเนิดรังสี Co-60

| thickness | I (cps)  | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|----------|------------------|-----------------------|
| 0         | 1674.695 | 1                | 0                     |
| 3         | 1154.876 | 0.689604         | -0.37164              |
| 6         | 778.226  | 0.464697         | -0.76637              |
| 9         | 538.181  | 0.321361         | -1.13519              |
| 12        | 363.800  | 0.217234         | -1.52678              |
| 15        | 241.462  | 0.144183         | -1.93667              |
| 18        | 160.129  | 0.095617         | -2.34741              |
| 21        | 110.626  | 0.066058         | -2.71723              |
| 24        | 73.650   | 0.043978         | -3.12406              |
| 27        | 49.529   | 0.029575         | -3.52084              |
| 30        | 31.960   | 0.019084         | -3.95892              |
| 33        | 20.524   | 0.012255         | -4.4018               |
| 36        | 13.443   | 0.008027         | -4.82494              |
| 39        | 8.264    | 0.004935         | -5.31144              |

| thickness | I (cps) | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|---------|------------------|-----------------------|
| 42        | 4.510   | 0.002693         | -5.91719              |
| 45        | 2.117   | 0.001264         | -6.67354              |



**รูปที่ 30** กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

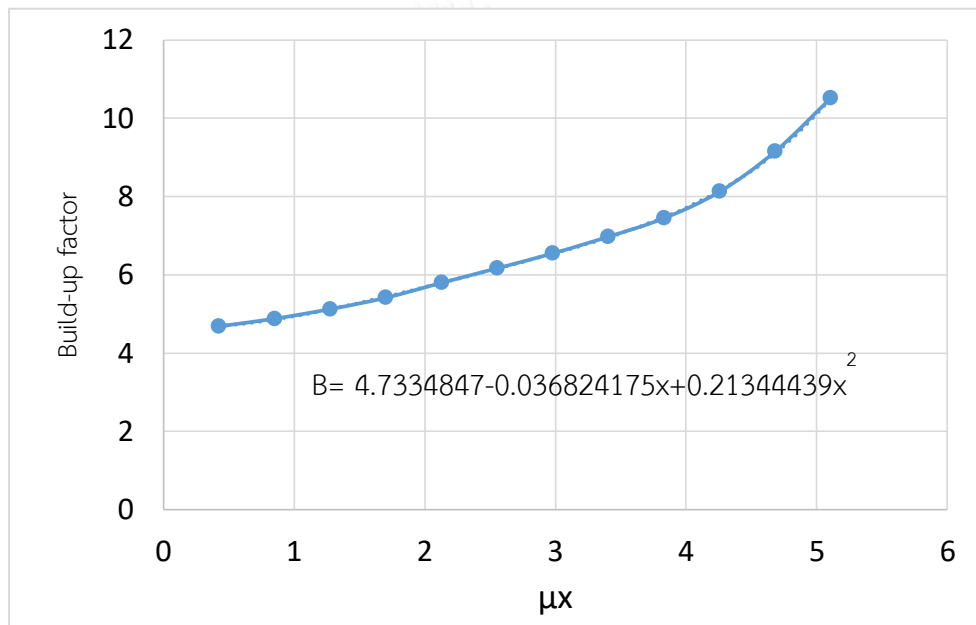
จากรูปที่ 30 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1419 \text{ cm}^{-1}$

**ตารางที่ 8** ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ), I, I<sub>s</sub> และ B จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup> และค่า  $\mu = 0.1419 \text{ cm}^{-1}$

| Thickness (cm) | $\mu x$ | I (cps)   | I <sub>s</sub> (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|----------------------|-------|
| 3              | 0.4257  | 28871.905 | 106418.929           | 4.686 |
| 6              | 0.8514  | 19455.655 | 75506.310            | 4.881 |
| 9              | 1.2771  | 13454.524 | 55505.536            | 5.125 |
| 12             | 1.7028  | 9095.000  | 40163.988            | 5.416 |
| 15             | 2.1285  | 6036.548  | 28954.405            | 5.797 |
| 18             | 2.5542  | 4003.214  | 20695.000            | 6.170 |



| Thickness (cm) | $\mu x$ | I (cps)  | $I_s$ (cps) | B      |
|----------------|---------|----------|-------------|--------|
| 21             | 2.9799  | 2765.655 | 15346.845   | 6.549  |
| 24             | 3.4056  | 1841.250 | 11002.321   | 6.975  |
| 27             | 3.8313  | 1238.214 | 7983.214    | 7.447  |
| 30             | 4.257   | 798.988  | 5693.274    | 8.126  |
| 33             | 4.6827  | 513.095  | 4183.988    | 9.154  |
| 36             | 5.1084  | 336.071  | 3199.345    | 10.520 |



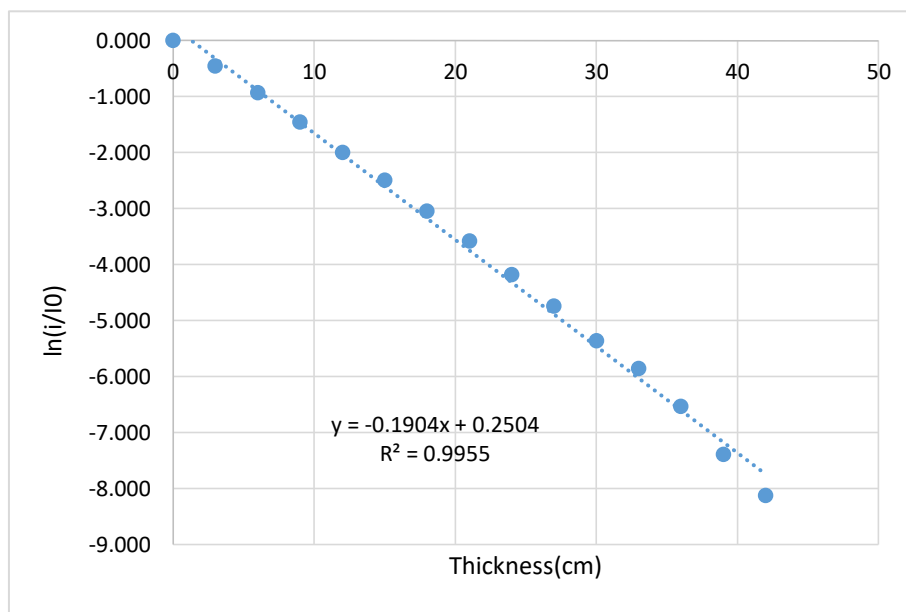
รูปที่ 31 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

#### 4.1.3 คอนกรีตชุดที่ 3 ค่าความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$

คอนกรีตชุดที่ 3 ขนาด  $3 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  จำนวน 14 แผ่น น้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่น 6.68 kg และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย  $2.47 \text{ g/cm}^3$  ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

**ตารางที่ 9** ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137

| thickness | I (cps)  | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|----------|------------------|-----------------------|
| 0         | 6311.083 | 1                | 0.000                 |
| 3         | 4006.353 | 0.634812         | -0.454                |
| 6         | 2490.427 | 0.394612         | -0.930                |
| 9         | 1463.507 | 0.231895         | -1.461                |
| 12        | 849.303  | 0.134573         | -2.006                |
| 15        | 517.377  | 0.081979         | -2.501                |
| 18        | 298.697  | 0.047329         | -3.051                |
| 21        | 175.000  | 0.027729         | -3.585                |
| 24        | 95.850   | 0.015188         | -4.187                |
| 27        | 54.810   | 0.008685         | -4.746                |
| 30        | 29.537   | 0.00468          | -5.364                |
| 33        | 17.957   | 0.002845         | -5.862                |
| 36        | 9.107    | 0.001443         | -6.541                |
| 39        | 3.857    | 0.000611         | -7.400                |
| 42        | 1.863    | 0.000295         | -8.128                |

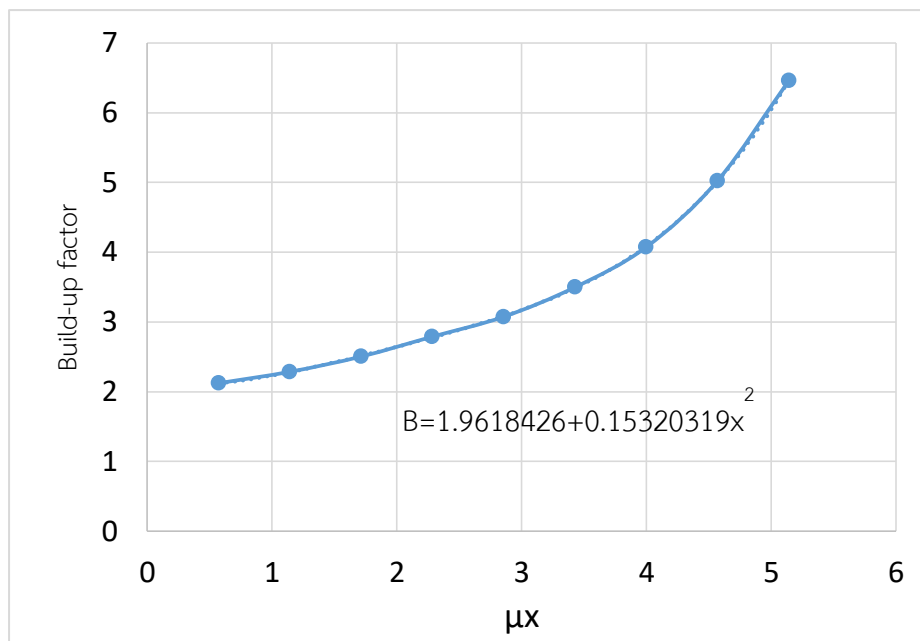


**รูปที่ 32** กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$

จากรูปที่ 32 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1904 \text{ cm}^{-1}$

**ตารางที่ 10** ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ  $B$  จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  และค่า  $\mu = 0.1904 \text{ cm}^{-1}$

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps)  | $I_s$ (cps) | $B$   |
|----------------|---------|------------|-------------|-------|
| 3              | 0.571   | 100158.833 | 112426.500  | 2.122 |
| 6              | 1.142   | 62260.667  | 80082.750   | 2.286 |
| 9              | 1.714   | 36587.667  | 55042.500   | 2.504 |
| 12             | 2.285   | 21232.583  | 37997.083   | 2.790 |
| 15             | 2.856   | 12934.417  | 26839.750   | 3.075 |
| 18             | 3.427   | 7467.417   | 18654.250   | 3.498 |
| 21             | 3.998   | 4375.000   | 13444.667   | 4.073 |
| 24             | 4.570   | 2396.250   | 9643.500    | 5.024 |
| 27             | 5.141   | 1370.250   | 7479.917    | 6.459 |

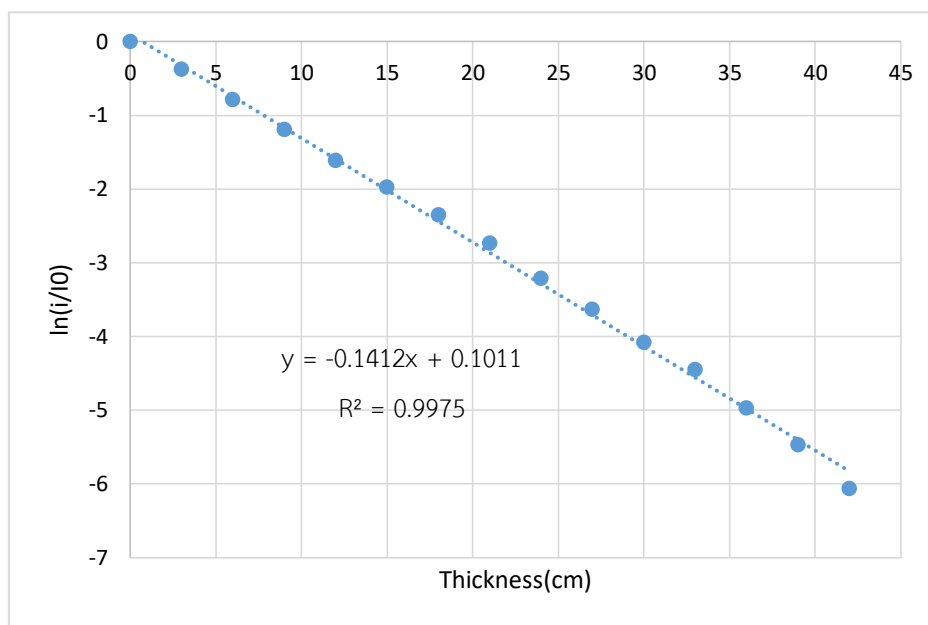


รูปที่ 33 กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV

ตารางที่ 11 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  จากต้นกำเนิดรังสี Co-60

| thickness | I (cps)  | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|----------|------------------|-----------------------|
| 0         | 1658.095 | 1                | 0                     |
| 3         | 1135.071 | 0.684563         | -0.37897              |
| 6         | 753.093  | 0.454192         | -0.78924              |
| 9         | 502.043  | 0.302783         | -1.19474              |
| 12        | 328.976  | 0.198406         | -1.61744              |
| 15        | 229.507  | 0.138416         | -1.97749              |
| 18        | 157.369  | 0.09491          | -2.35483              |
| 21        | 107.336  | 0.064734         | -2.73746              |
| 24        | 66.867   | 0.040327         | -3.21072              |
| 27        | 43.702   | 0.026357         | -3.63602              |
| 30        | 27.912   | 0.016834         | -4.08437              |
| 33        | 19.269   | 0.011621         | -4.45492              |
| 36        | 11.457   | 0.00691          | -4.97481              |

| thickness | I (cps) | I/I <sub>0</sub> | ln(I/I <sub>0</sub> ) |
|-----------|---------|------------------|-----------------------|
| 39        | 6.948   | 0.00419          | -5.47503              |
| 42        | 3.845   | 0.002319         | -6.06659              |



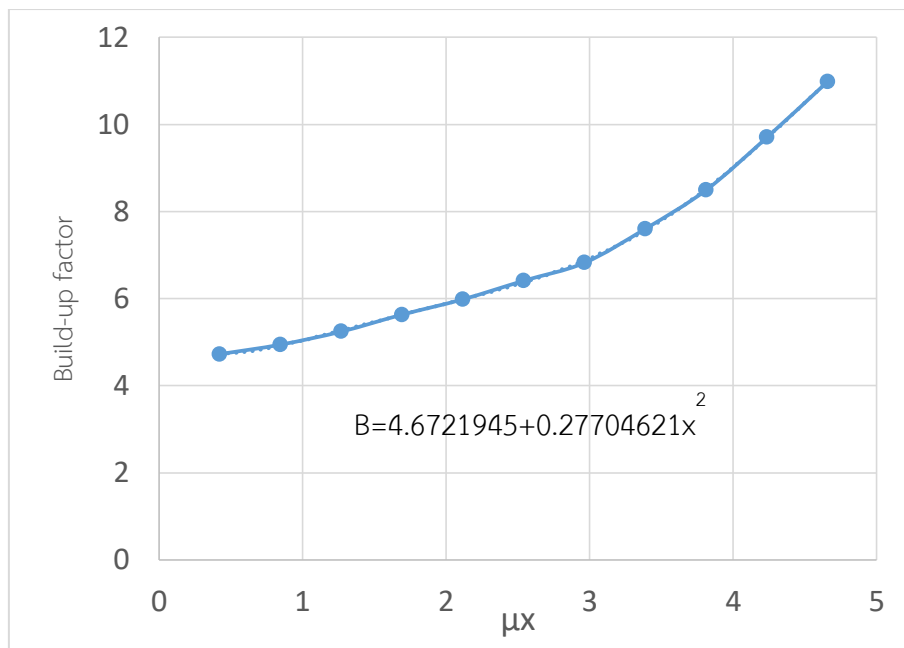
รูปที่ 34 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น 2.47 g/cm<sup>3</sup> โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

จากรูปที่ 34 เป็นกราฟระหว่างค่า  $\ln(I/I_0)$  กับค่าความหนาของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเท่ากับ  $0.1412 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 12 ค่า Relaxation length ( $\mu_x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ  $B$  จากต้นกำเนิดรังสี Co-60 สำหรับคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีความหนาแน่น 2.47 g/cm<sup>3</sup> และค่า  $\mu = 0.1412 \text{ cm}^{-1}$

| Thickness (cm) | $\mu_x$ | I (cps)   | $I_s$ (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.424   | 28376.786 | 105732.381  | 4.726 |
| 6              | 0.847   | 18827.321 | 74259.345   | 4.944 |
| 9              | 1.271   | 12551.071 | 53267.738   | 5.244 |
| 12             | 1.694   | 8224.405  | 38108.571   | 5.634 |
| 15             | 2.118   | 5737.679  | 28601.667   | 5.985 |
| 18             | 2.542   | 3934.226  | 21292.083   | 6.412 |

| Thickness (cm) | $\mu x$ | I (cps)  | $I_s$ (cps) | B      |
|----------------|---------|----------|-------------|--------|
| 21             | 2.965   | 2683.393 | 15626.905   | 6.824  |
| 24             | 3.389   | 1671.667 | 11040.476   | 7.604  |
| 27             | 3.812   | 1092.560 | 8189.405    | 8.496  |
| 30             | 4.236   | 697.798  | 6073.274    | 9.703  |
| 33             | 4.660   | 481.726  | 4811.310    | 10.988 |



**รูปที่ 35** กราฟแสดงค่า Buildup factor ของคอนกรีตชุดที่ 3 ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

จากนั้นนำค่าที่ได้เป็นข้อมูลในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์แก่ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีที่ต้องใช้รังสีแกมมาในการทำงานได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ข้อมูลดังกล่าว ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคอนกรีตแต่ละความหนาแน่นที่พลังงานต่าง ๆ และสมการค่า Build-up factor

## 4.2 การหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

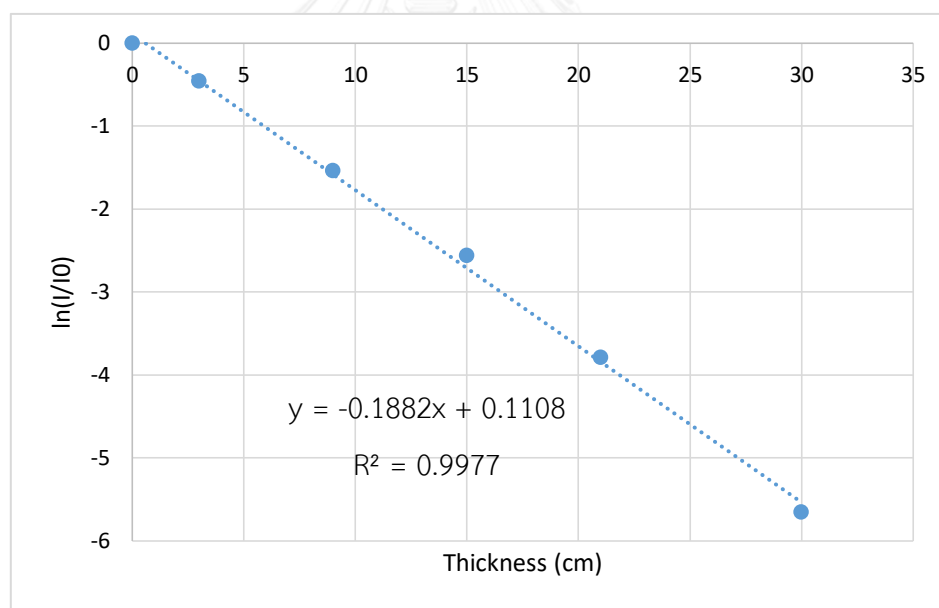
การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ในการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตแบบ Ordinary (NBS04) ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  (ข้อมูลตามคู่มือของโปรแกรม MCNP5) ความหนาของคอนกรีตอยู่ในช่วง 0-30 เซนติเมตร และใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.662 MeV, 1.25 MeV, 5 MeV และ 10 MeV โดยทำการจัดระบบการวัดเหมือนกับการทดลองจริง ดังรูปที่ 16 ในบทที่ 3

### 4.2.1 ค่า Build-up factor ของคอนกรีตจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

ได้ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ตามตารางและกราฟดังนี้

#### 4.2.1.1 รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV

จำนวนอนุภาคที่ฉายรังสีเท่ากับ  $2 \times 10^9$  ตัว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และค่า Build-up factor ของคอนกรีต ดังต่อไปนี้



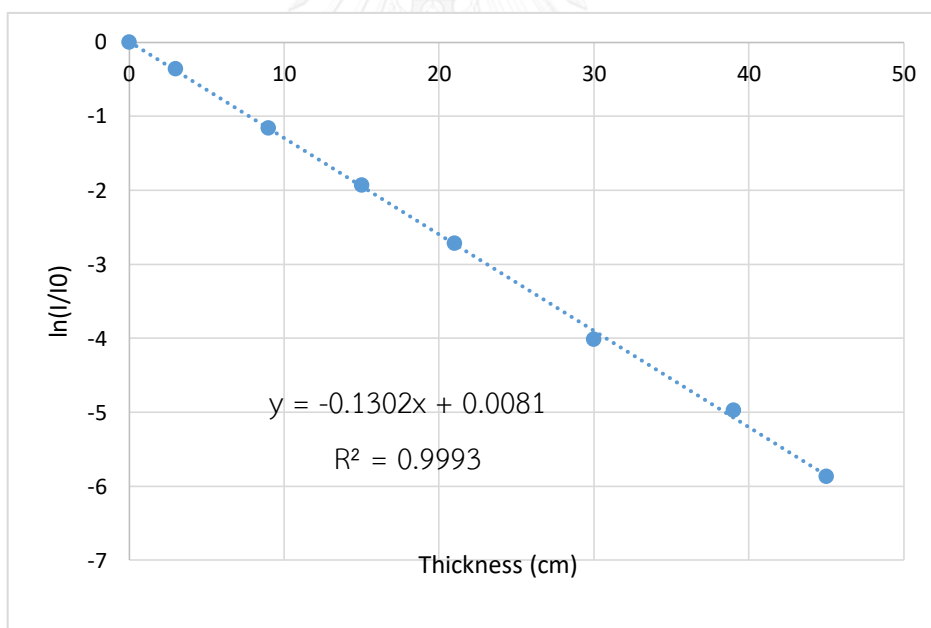
รูปที่ 36 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient :  $\mu$ ) ของคอนกรีต ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เท่ากับ  $0.1882 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 13 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.528   | 177.324   | 199.781     | 2.127 |
| 9              | 1.584   | 60.324    | 95.252      | 2.579 |
| 15             | 2.640   | 21.615    | 46.919      | 3.171 |
| 21             | 3.696   | 6.338     | 22.298      | 4.518 |
| 30             | 5.280   | 0.985     | 5.707       | 6.795 |

#### 4.2.1.2 รังสีแกมมาพลังงาน 1.25 MeV

จำนวนอนุภาคที่ฉายรังสีเท่ากับ  $1 \times 10^9$  ตัว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และค่า Build-up factor ของคอนกรีต ดังต่อไปนี้



รูปที่ 37 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient :  $\mu$ ) ของคอนกรีต ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เท่ากับ  $0.1302 \text{ cm}^{-1}$

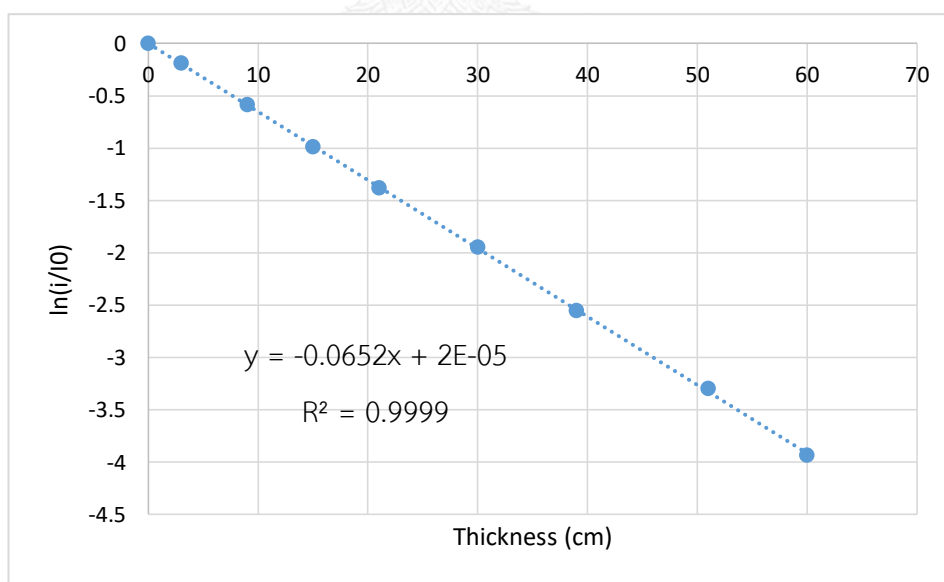


ตารางที่ 14 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมาพลังงาน 1.25 MeV

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.3906  | 37.173    | 87.647      | 3.358 |
| 9              | 1.1718  | 16.777    | 51.112      | 4.047 |
| 15             | 1.953   | 7.720     | 29.250      | 4.789 |
| 21             | 2.7342  | 3.537     | 16.583      | 5.688 |
| 30             | 3.906   | 0.963     | 6.490       | 7.741 |
| 39             | 5.0778  | 0.370     | 2.586       | 7.989 |
| 45             | 5.859   | 0.151     | 1.217       | 9.062 |

#### 4.2.1.3 รังสีแกมมาพลังงาน 5 MeV

จำนวนอนุภาคที่ฉายรังสีเท่ากับ  $5 \times 10^8$  ตัว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และค่า Build-up factor ของคอนกรีต ดังต่อไปนี้



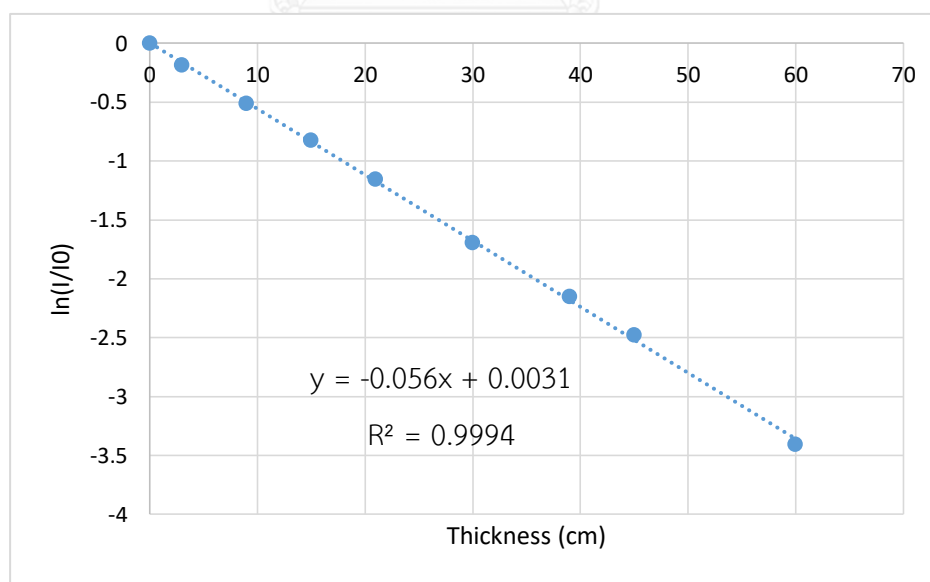
รูปที่ 38 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient :  $\mu$ ) ของคอนกรีต ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เท่ากับ  $0.0652 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 15 ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมาพลังงาน 5 MeV

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.196   | 124.357   | 68.186      | 1.548 |
| 9              | 0.587   | 83.397    | 54.091      | 1.649 |
| 15             | 0.978   | 55.801    | 43.686      | 1.783 |
| 21             | 1.369   | 37.719    | 32.378      | 1.858 |
| 30             | 1.956   | 21.417    | 21.796      | 2.018 |
| 39             | 2.543   | 11.656    | 14.550      | 2.248 |
| 51             | 3.325   | 5.547     | 7.375       | 2.330 |
| 60             | 3.912   | 2.938     | 4.331       | 2.474 |

#### 4.2.1.4 รังสีแกมมาพลังงาน 10 MeV

จำนวนอนุภาคที่ฉายรังสีเท่ากับ  $1 \times 10^9$  ตัว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และค่า Build-up factor ของคอนกรีต ดังต่อไปนี้



รูปที่ 39 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient :  $\mu$ ) ของคอนกรีต

ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เท่ากับ  $0.056 \text{ cm}^{-1}$

**ตารางที่ 16** ค่า Relaxation length ( $\mu x$ ),  $I$ ,  $I_s$  และ Build-up factor (B) จากรังสีแกมมาพลังงาน 10 MeV

| Thickness (cm) | $\mu x$ | $I$ (cps) | $I_s$ (cps) | B     |
|----------------|---------|-----------|-------------|-------|
| 3              | 0.168   | 88.884    | 124.634     | 2.402 |
| 9              | 0.504   | 64.272    | 110.989     | 2.727 |
| 15             | 0.840   | 47.012    | 92.148      | 2.960 |
| 21             | 1.176   | 33.803    | 74.869      | 3.215 |
| 30             | 1.680   | 19.692    | 54.402      | 3.763 |
| 39             | 2.184   | 12.487    | 37.384      | 3.994 |
| 45             | 2.520   | 8.993     | 29.799      | 4.313 |
| 60             | 3.360   | 3.553     | 13.084      | 4.683 |

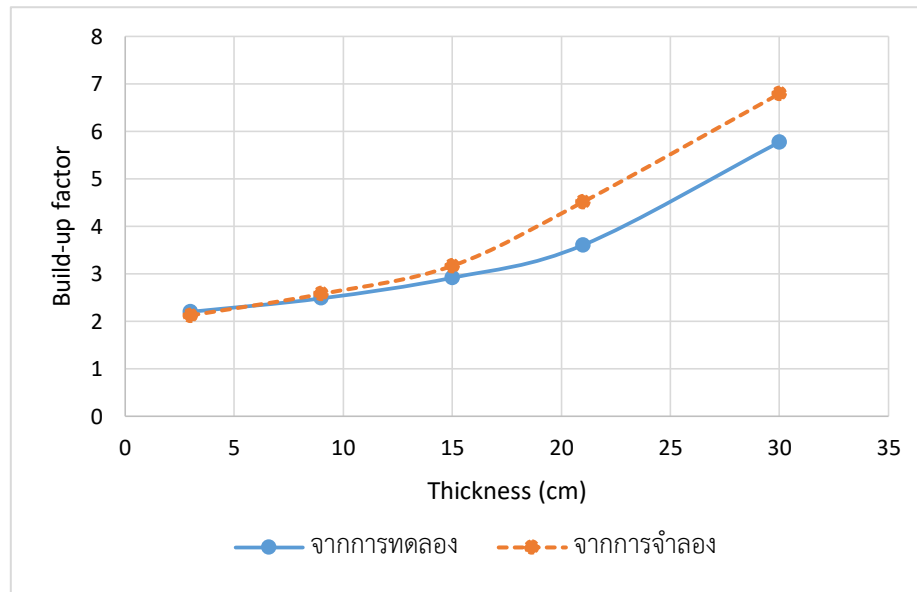
#### 4.2.2 การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

การจำลองโดยใช้คอนกรีตความหนาแน่น 2.35 g/cm<sup>3</sup> (ตามภาคผนวก ก.) ต้นกำเนิดรังสีแกมมา พลังงาน 0.662MeV และพลังงาน 1.25 MeV เพื่อหาค่า Build-up factor เปรียบกับค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 กับค่าจากการทดลองของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน ดังนี้

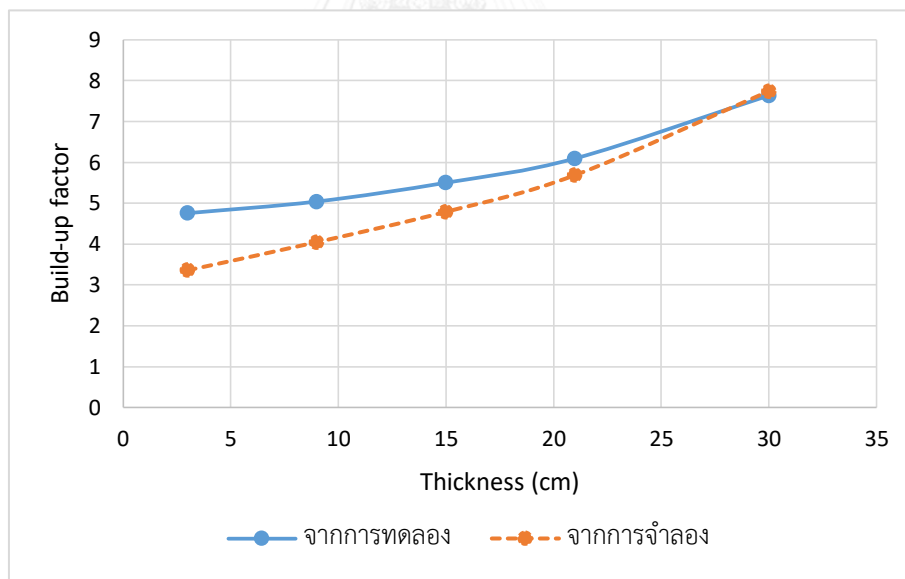
##### 4.2.2.1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตชุดที่ 1 ความหนาแน่น 2.13 g/cm<sup>3</sup>

**ตารางที่ 17** การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น 2.13 g/cm<sup>3</sup> และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| ความหนาของคอนกรีต (cm) | รังสีแกมมา พลังงาน 0.662 MeV |                 | รังสีแกมมา พลังงาน 1.25 MeV |                 |
|------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
|                        | B (จากการทดลอง)              | B (จากการจำลอง) | B (จากการทดลอง)             | B (จากการจำลอง) |
| 3                      | 2.203                        | 2.127           | 4.756                       | 3.358           |
| 9                      | 2.487                        | 2.579           | 5.041                       | 4.047           |
| 15                     | 2.920                        | 3.171           | 5.501                       | 4.789           |
| 21                     | 3.610                        | 4.518           | 6.096                       | 5.688           |
| 30                     | 5.777                        | 6.795           | 7.635                       | 7.741           |



รูปที่ 40 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา  $0.662 \text{ MeV}$



รูปที่ 41 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา  $1.25 \text{ MeV}$

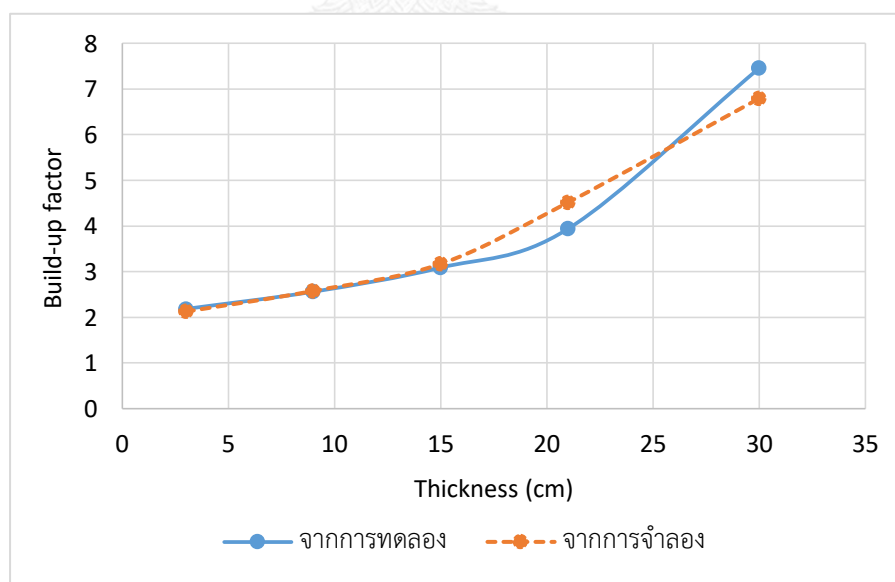
จากรูปที่ 41 และ 43 พบว่า รังสีแกมมาจาก Co-60 ซึ่งมี 2 พลังงาน คือ  $1.17 \text{ MeV}$  และ  $1.33 \text{ MeV}$  สามารถเกิดเป็น Sum peak คือ  $2.5 \text{ MeV}$  ได้ ซึ่งเกิดเป็นพีคอยู่ด้านหลังของพีคที่พลังงานทั้งสอง ทำให้ไม่ได้มีการรวมพื้นที่ใต้พีคจาก Sum peak จึงมีผลต่อค่า Build-up factor ที่มีค่า

มากกว่าความเป็นจริง โดยยิ่งที่ความหนาของคอนกรีตน้อย ๆ จะยิ่งเกิด Sum peak มาก ซึ่งจะได้ความเข้ม Photopeak (I) ที่วัดได้มีค่าลดลง จึงทำให้ค่า Build-up factor สูงกว่าความเป็นจริง

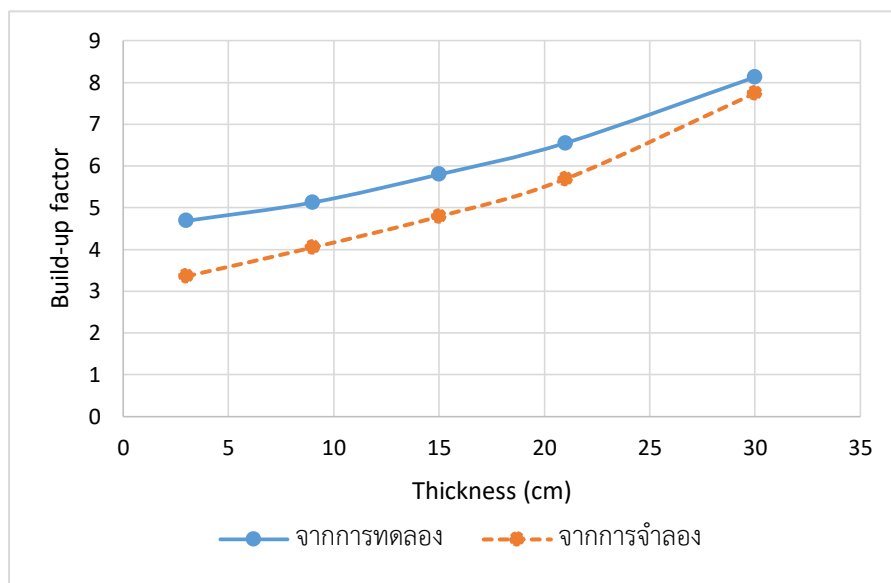
#### 4.2.2.2 เปรียบเทียบกับคอนกรีตชุดที่ 2 ความหนาแน่น $2.44 \text{ g/cm}^3$

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| ความหนาของ<br>คอนกรีต (cm) | รังสีแกมมา พลังงาน 0.662 MeV |                    | รังสีแกมมา พลังงาน 1.25 MeV |                    |
|----------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
|                            | B<br>(จากการทดลอง)           | B<br>(จากการจำลอง) | B<br>(จากการทดลอง)          | B<br>(จากการจำลอง) |
| 3                          | 2.185                        | 2.127              | 4.686                       | 3.358              |
| 9                          | 2.562                        | 2.579              | 5.125                       | 4.047              |
| 15                         | 3.089                        | 3.171              | 5.797                       | 4.789              |
| 21                         | 3.940                        | 4.518              | 6.549                       | 5.688              |
| 30                         | 7.458                        | 6.795              | 8.126                       | 7.741              |



รูปที่ 42 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา 0.662 MeV

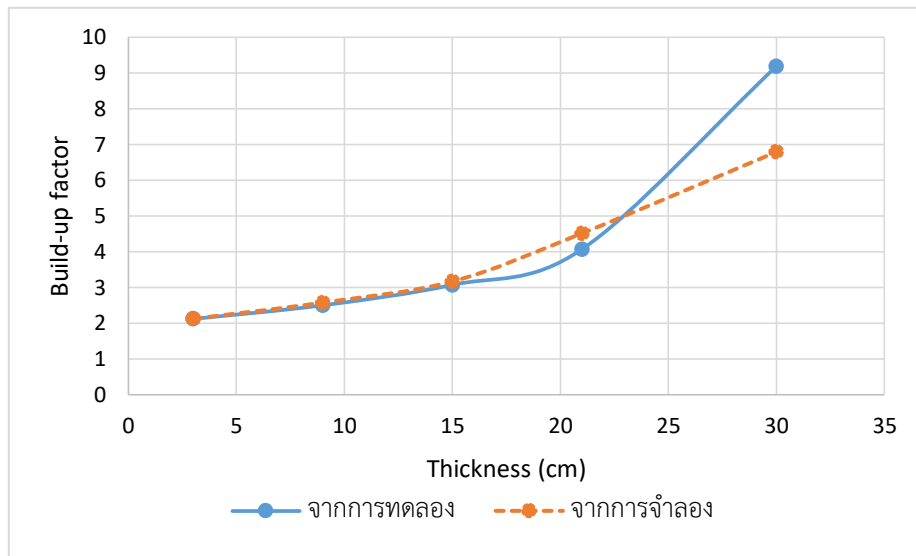


รูปที่ 43 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา  $1.25 \text{ MeV}$

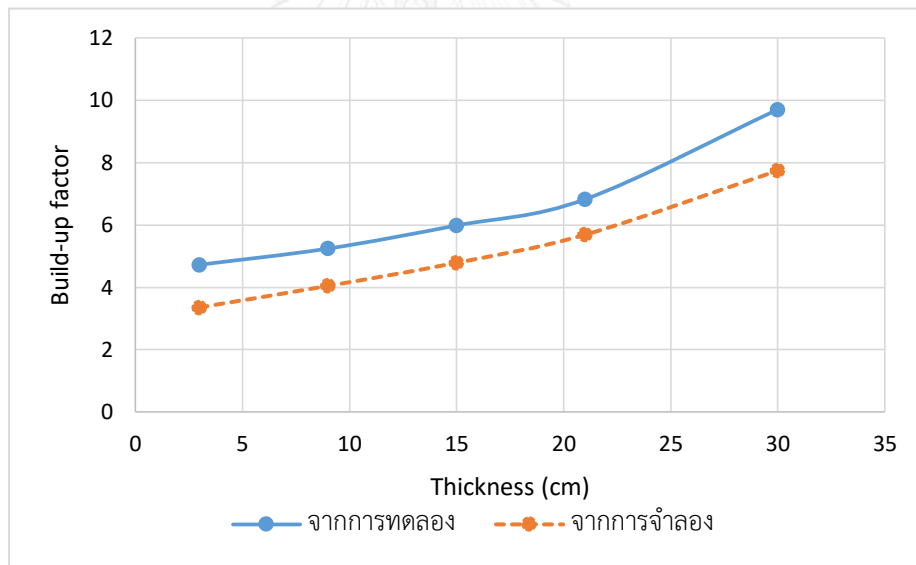
#### 4.2.2.3 เปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดที่ 3 ความหนาแน่น $2.47 \text{ g/cm}^3$

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| ความหนาของคอนกรีต (cm) | รังสีแกมมา พลังงาน $0.662 \text{ MeV}$ |                 | รังสีแกมมา พลังงาน $1.25 \text{ MeV}$ |                 |
|------------------------|--|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
|                        | B (จากการทดลอง)                        | B (จากการจำลอง) | B (จากการทดลอง)                       | B (จากการจำลอง) |
| 3                      | 2.122                                  | 2.127           | 4.726                                 | 3.358           |
| 9                      | 2.504                                  | 2.579           | 5.244                                 | 4.047           |
| 15                     | 3.075                                  | 3.171           | 5.985                                 | 4.789           |
| 21                     | 4.073                                  | 4.518           | 6.824                                 | 5.688           |
| 30                     | 9.193                                  | 6.795           | 9.703                                 | 7.741           |



รูปที่ 44 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา  $0.662 \text{ MeV}$



รูปที่ 45 กราฟเปรียบเทียบค่า Build-up factor จากการทดลองของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่พลังงานของรังสีแกมมา  $1.25 \text{ MeV}$

**ตารางที่ 20** สรุปสมการของค่า Build-up factor (B) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น ( $\mu$ ) ของคอนกรีต ที่พลังงานต่าง ๆ และคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน สำหรับใช้คำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

ก. จากการทดลอง

| ชนิดของคอนกรีต              | ความหนาแน่น             | พลังงานของรังสีแกมมา (MeV) | ค่า $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | สมการ Build-up factor (B)                       |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|---|
| คอนกรีตชุดที่ 1             | 2.13<br>$\text{g/cm}^3$ | 0.662                      | 0.1602                         | $B = 2.0559036 + 0.15210569x^2$                 |
|                             |                         | 1.25                       | 0.1173                         | $B = 4.6286359 + 0.25725312x^2$                 |
| คอนกรีตชุดที่ 2             | 2.44<br>$\text{g/cm}^3$ | 0.662                      | 0.1826                         | $B = 2.0980567 + 0.1174454x + 0.091688492x^2$   |
|                             |                         | 1.25                       | 0.1419                         | $B = 4.7334847 - 0.036824175x + 0.21344439x^2$  |
| คอนกรีตชุดที่ 3             | 2.47<br>$\text{g/cm}^3$ | 0.662                      | 0.1904                         | $B = 1.9618426 + 0.15320319x^2$                 |
|                             |                         | 1.25                       | 0.1412                         | $B = 4.6721945 + 0.27704621x^2$                 |
| คอนกรีตมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) | 2.35<br>$\text{g/cm}^3$ | 0.662                      | 0.1818                         | $B = 0.63626836 + 1.232071x + 0.2551917x^2$     |
|                             |                         | 1.25                       | 0.1332                         | $B = -0.54745891 + 1.6387672x + 0.052219553x^2$ |

ข. จากการจำลองด้วย MCNP5

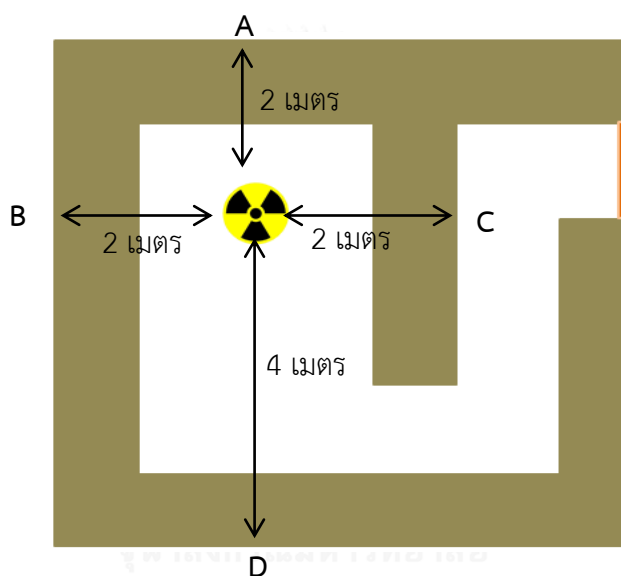
| ชนิดของคอนกรีต                    | ความหนาแน่น             | พลังงานของรังสีแกมมา (MeV) | ค่า $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | สมการ Build-up factor (B)                        |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|
| คอนกรีตมาตรฐาน NBS04 (ภาคผนวก ก.) | 2.35<br>$\text{g/cm}^3$ | 0.662                      | 0.1882                         | $B = 2.0717 + 0.0256x + 0.1653x^2$               |
|                                   |                         | 1.25                       | 0.1302                         | $B = 3.1495 + 0.494x + 0.1721x^2$                |
|                                   |                         | 5                          | 0.0652                         | $B = 1.107135 + 0.47879043x + 0.0021312998x^2$   |
|                                   |                         | 10                         | 0.0560                         | $B = 1.0480832 + 0.27272422x + 0.00091291325x^2$ |



### 4.3 การคำนวณค่าความหนาของผนังคอนกรีตในการกำบังรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม Visual basic 6

#### ตัวอย่างการคำนวณ

แสดงตัวอย่างผลจากการคำนวณความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมคำนวณความหนาผนังคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมาที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งได้จำลองเหตุการณ์ในห้องฉายรังสีแกมมา โดยให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีที่อยู่นอกห้องฉายรังสีได้รับปริมาณรังสีหรือค่า Exposure rate (mR/hr) ไม่เกิน 2.5 mR/hr (ตามข้อกำหนด ICRP) ดังรูปที่ 46 ได้กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ และผลการคำนวณในตารางที่ 21, 22, 23 และ 24



รูปที่ 46 แผนภาพห้องฉายรังสีแกมมา (Top view)

#### เงื่อนไขที่ 1

- กำหนดให้ผนังด้าน A, B และ C ห่างจากต้นกำเนิดรังสี 2 เมตร
- ความแรงรังสีมีค่า 1, 3, 5 และ 10 Ci
- ความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่า 2.13, 2.44, 2.47 และ 2.35 g/cm<sup>3</sup>

#### เงื่อนไขที่ 2

- กำหนดให้ผนังด้าน D ห่างจากต้นกำเนิดรังสี 4 เมตร
- ความแรงรังสีมีค่า 1, 3, 5 และ 10 Ci
- ความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่า 2.13, 2.44, 2.47 และ 2.35 g/cm<sup>3</sup>

หมายเหตุ : ค่า Build-up factor ของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เป็นข้อมูลจาก <http://www.nucleonica.net> (Institute for Transuranium Elements (ITU), ประเทศเยอรมนี) ดังแสดงในภาคผนวก ข. ในตารางที่ 21 และ 22 และข้อมูลจากการจำลองด้วย MCNP5 ในตารางที่ 23 และ 24

**ตารางที่ 21** ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีในเงื่อนไขที่ 1 โดยใช้ค่า Build-up factor จากการทดลองกับข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.)

| ความหนาแน่น                                 | พลังงานของรังสี | ความหนาของคอนกรีต (cm) ที่ความแรงรังสีต่างๆ |       |       |       |
|---|-----------------|---|-------|-------|-------|
|   |                 | 1 Ci  | 3 Ci  | 5 Ci  | 10 Ci |
| 2.13<br>$\text{g/cm}^3$                     | 0.662 MeV       | 33.3  | 42.5  | 46.6  | 52.1  |
|   | 1.25 MeV        | 59.5  | 71.2  | 76.6  | 83.8  |
| 2.44<br>$\text{g/cm}^3$                     | 0.662 MeV       | 28.2  | 35.7  | 39.1  | 43.8  |
|   | 1.25 MeV        | 48.0  | 57.5  | 61.9  | 67.9  |
| 2.47<br>$\text{g/cm}^3$                     | 0.662 MeV       | 28.1  | 35.8  | 39.2  | 43.8  |
|   | 1.25 MeV        | 50.0  | 59.7  | 64.2  | 70.1  |
| 2.35<br>$\text{g/cm}^3$<br>(คอนกรีตมาตรฐาน) | 0.662 MeV       | 35.6  | 43.3  | 46.6  | 51.4  |
|   | 1.25 MeV        | 50.2  | 60.1  | 64.6  | 70.7  |
|   | 5 MeV           | 108.1                                       | 126.9 | 135.6 | 147.3 |
|   | 10 MeV          | 131.2                                       | 152.7 | 162.7 | 176.1 |

จากผลการคำนวณในตารางที่ 21 พบว่าความหนาของผนังคอนกรีตเมื่อพิจารณาที่ความแรงรังสีเดียวกัน ความหนาจะลดลง เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับพลังงานของรังสีแกมมาที่เปลี่ยนไป แต่เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า 5 MeV ข้อมูลค่า Build-up factor จึงมีแค่พลังงาน 0.662 MeV และ 1.25 MeV ส่วนพลังงาน 5 MeV และ 10 MeV ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

**ตารางที่ 22** ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีในเงื่อนไขที่ 2 โดยใช้ค่า Build-up factor จากการทดลองกับข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.)

| ความหนาแน่น                                       | พลังงานของรังสี | ความหนาของคอนกรีต (cm) ที่ความแรงรังสีต่างๆ |       |       |       |
|---|-----------------|---|-------|-------|-------|
|   |                 | 1 Ci  | 3 Ci  | 5 Ci  | 10 Ci |
| 2.13<br>g/cm <sup>3</sup>                         | 0.662 MeV       | 21.7  | 31.1  | 35.4  | 41.1  |
|   | 1.25 MeV        | 44.4  | 56.4  | 61.9  | 69.3  |
| 2.44<br>g/cm <sup>3</sup>                         | 0.662 MeV       | 18.5  | 26.2  | 29.7  | 34.4  |
|   | 1.25 MeV        | 35.6  | 45.4  | 49.9  | 56.0  |
| 2.47<br>g/cm <sup>3</sup>                         | 0.662 MeV       | 18.1  | 26.1  | 29.7  | 34.5  |
|   | 1.25 MeV        | 37.3  | 47.4  | 51.8  | 58.1  |
| 2.35<br>g/cm <sup>3</sup><br>(คอนกรีต<br>มาตรฐาน) | 0.662 MeV       | 25.1  | 33.3  | 37.2  | 42.0  |
|   | 1.25 MeV        | 37.0  | 47.5  | 52.2  | 58.5  |
|   | 5 MeV           | 83.9  | 103.1 | 111.9 | 123.8 |
|   | 10 MeV          | 103.6                                       | 125.6 | 135.6 | 149.2 |

จากตารางที่ 22 ผลการคำนวณความหนาของคอนกรีตที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ ให้ค่าที่ลดลงจากตารางที่ 21 เนื่องจากเพิ่มระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงผนังด้านนอกมากขึ้น

**ตารางที่ 23** ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีในเงื่อนไขที่ 1 โดยใช้ค่า Build-up factor จากข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| ความหนาแน่นของคอนกรีต                              | พลังงานของรังสี | ความหนาของคอนกรีต (cm) ที่ความแรงรังสีต่างๆ |       |       |       |
|--|-----------------|---|-------|-------|-------|
|  |                 | 1 Ci  | 3 Ci  | 5 Ci  | 10 Ci |
| 2.35 g/cm <sup>3</sup><br>(คอนกรีต<br>มาตรฐาน)     | 0.662 MeV       | 35.6  | 43.3  | 46.6  | 51.4  |
|  | 1.25 MeV        | 50.2  | 60.1  | 64.6  | 70.7  |
|  | 5 MeV           | 108.1                                       | 126.9 | 135.6 | 147.3 |
|  | 10 MeV          | 131.2                                       | 152.7 | 162.7 | 176.1 |
| 2.35 g/cm <sup>3</sup><br>(การจำลอง<br>ด้วย MCNP5) | 0.662 MeV       | 29.1  | 36.8  | 40.3  | 44.9  |
|  | 1.25 MeV        | 52.3  | 62.7  | 67.5  | 73.8  |
|  | 5 MeV           | 102.4                                       | 120.6 | 129.0 | 140.4 |
|  | 10 MeV          | 150.4                                       | 171.8 | 181.7 | 195.1 |

**ตารางที่ 24** ค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสีในเงื่อนไขที่ 2 โดยใช้ค่า Build-up factor จากข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| ความหนาแน่นของคอนกรีต                          | พลังงานของรังสี | ความหนาของคอนกรีต (cm) ที่ความแรงรังสีต่างๆ |       |       |       |
|--|-----------------|---|-------|-------|-------|
|  |                 | 1 Ci  | 3 Ci  | 5 Ci  | 10 Ci |
| 2.35 g/cm <sup>3</sup><br>(คอนกรีตมาตรฐาน)     | 0.662 MeV       | 25.1  | 33.3  | 37.2  | 42.0  |
|  | 1.25 MeV        | 37.0  | 47.5  | 52.2  | 58.5  |
|  | 5 MeV           | 83.9  | 103.1 | 111.9 | 123.8 |
|  | 10 MeV          | 103.6                                       | 125.6 | 135.6 | 149.2 |
| 2.35 g/cm <sup>3</sup><br>(การจำลองด้วย MCNP5) | 0.662 MeV       | 18.8  | 27.0  | 30.7  | 35.5  |
|  | 1.25 MeV        | 38.9  | 49.6  | 54.3  | 61.0  |
|  | 5 MeV           | 79.2  | 97.6  | 106.1 | 117.6 |
|  | 10 MeV          | 123.0                                       | 144.7 | 154.8 | 168.3 |

จากตารางที่ 23 และ 24 พบว่าผลการคำนวณความหนาของคอนกรีต เนื่องจากการใช้ค่า Build-up factor ของคอนกรีตความหนาแน่น 2.35 g/cm<sup>3</sup> (ภาคผนวก ข.) กับค่า Build-up factor จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ได้ผลใกล้เคียงกัน แต่อาจจะแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากการคำนวณค่า Build-up factor ด้วยโปรแกรม MCNP5 ต้องการข้อมูลที่ละเอียด ซึ่งอาจไม่เท่ากับค่าที่แท้จริงของคอนกรีตมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยใช้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่างกัน ในการคำนวณหาความหนาของคอนกรีตนั้น จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน โดยมีค่า Build-up factor (B) ของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง การวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการหาค่า B จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ทั้งนี้เพื่อนำค่า B ที่ได้จากการทดลองมาทดสอบความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 โดยการตรวจสอบกับค่า B จากมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.)

ในส่วนของการทดลองเพื่อหาค่า B จะใช้คอนกรีตที่ค่าความหนาแน่นต่างกัน 3 ค่า คือ คอนกรีตชุดที่ 1 มีค่าความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$ , คอนกรีตชุดที่ 2 มีค่าความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และคอนกรีตชุดที่ 3 มีค่าความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  ความหนารวมของคอนกรีตแต่ละความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 60 เซนติเมตร โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และ Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV และสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 จะใช้คอนกรีตแบบ Ordinary (NBS04) ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  (ภาคผนวก ก.) ความหนารวมของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร และใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.662 MeV, 1.25 MeV, 5 MeV และ 10 MeV ทั้งนี้พบว่า ค่า Build-up factor จากการทดลองมีแนวโน้มและไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองด้วย MCNP5 ดังแสดงในหัวข้อ 4.2.2 ในบทที่ 4 ดังนั้นเทคนิคที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือและแม่นยำ ในการหาค่า B ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ส่วนของการทดลอง (การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) และเทคนิคการหาค่า Build-up factor), ส่วนที่ 2 การจำลองการทดลองการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีต ด้วยโปรแกรม MCNP5 และส่วนที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา

ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ของคอนกรีต 3 ชนิด ที่มีความหนาแน่นต่างๆกัน ซึ่งได้ข้อมูลของค่า Build-up factor ทั้ง 3 ชนิด โดยช่วงความหนาของคอนกรีตมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 60 เซนติเมตร ต่อหนึ่งความหนาแน่น แต่เมื่อทำการทดลองแล้ว ค่าความหนาที่ใช้ได้จริง ๆ มีค่าไม่ถึง 60 เซนติเมตร เนื่องจากระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีห่างเกินไป ทำให้เมื่อความหนาของคอนกรีต

มากจะสามารถลดทอนรังสีและกำบังรังสีได้เกือบหมด จึงไม่สามารถนำผลมาวิเคราะห์หาค่า Build-up factor ได้ที่คอนกรีตความหนา มาก ๆ แสดงรายละเอียดความหนาของคอนกรีตที่สามารถวิเคราะห์ได้ในแต่ละความหนาแน่นและพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมาได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$  เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 48 เซนติเมตร และเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 54 เซนติเมตร

หมายเหตุ : ใช้คอนกรีตที่มีความหนาแผ่นละ 6 เซนติเมตร

2. คอนกรีตที่มีความหนาแน่น  $2.44 \text{ g/cm}^3$  เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 45 เซนติเมตร และเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 45 เซนติเมตร

หมายเหตุ : ใช้คอนกรีตที่มีความหนาแผ่นละ 3 เซนติเมตร

3. คอนกรีตที่มีความหนาแน่น  $2.47 \text{ g/cm}^3$  เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 42 เซนติเมตร และเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย  $1.25 \text{ MeV}$  สามารถใช้ความหนาคอนกรีตสูงสุดที่ 42 เซนติเมตร

หมายเหตุ : ใช้คอนกรีตที่มีความหนาแผ่นละ 3 เซนติเมตร

ส่วนที่ 2 การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ในการหาค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตแบบ Ordinary (NBS04) ที่มีค่าความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  (ภาคผนวก ก.) และใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (แบบ Point source) ที่มีพลังงาน  $0.662 \text{ MeV}$ ,  $1.25 \text{ MeV}$ ,  $5 \text{ MeV}$  และ  $10 \text{ MeV}$  ซึ่งทำการจัดระบบการวัดเหมือนกับการทดลองจริง โดยใช้ความหนาของคอนกรีต 30 เซนติเมตร ได้ค่า Build-up factor และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีต ดังแสดงในหัวข้อ 4.2.1 ในบทที่ 4

เมื่อนำค่า Build-up factor ที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่า Build-up factor ของคอนกรีตที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP5 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Build-up factor กับค่า Relaxation length หรือค่า  $\mu x$  ของคอนกรีตทุกชนิด จะได้รูปแบบความสัมพันธ์ของกราฟไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกัน แต่ในบางช่วงของผลการทดลอง มีความเบี่ยงเบนของกราฟในช่วง

ต้น สำหรับต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 ดังแสดงในรูปที่ 41 และ 43 พบว่า รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60 ซึ่งมี 2 พลังงาน คือ 1.17 MeV และ 1.33 MeV สามารถเกิดเป็น Sum peak คือ 2.5 MeV ได้ ซึ่งเกิดเป็นพีคอยู่ด้านหลังของพีคที่พลังงานทั้งสอง ทำให้ไม่ได้มีการรวมพื้นที่ใต้พีคจาก Sum peak จึงมีผลต่อค่า Build-up factor ที่มีค่ามากกว่าความเป็นจริง โดยยิ่งที่ความหนาของคอนกรีตน้อย ๆ จะยิ่งเกิด Sum peak มาก ซึ่งจะได้ความเข้ม Photopeak (I) ที่วัดได้มีค่าลดลง จึงทำให้ค่า Build-up factor สูงกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้ผลดังกล่าวอาจจะเกิดข้อผิดพลาดจากการทดลองทั้งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ ตลอดจนสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง อาจจะมีผลต่อความผิดพลาดดังกล่าวด้วย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เนื่องจากความกว้างหรือขนาดของแผ่นคอนกรีตอาจจะมีขนาดกว้างไม่เพียงพอที่จะทำให้รังสีแกมมาที่ทะลุผ่านและเกิดการกระเจิงแล้วเข้าหัววัดได้
2. เนื่องจากระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีแกมมากับหัววัดรังสีอยู่ไกลเกินไป ทำให้รังสีแกมมามีอัตราปริมาณรังสีน้อยเมื่อระยะห่างมาก จนไม่สามารถทะลุผ่านคอนกรีตที่ความหนา มาก ๆ ได้ จึงเกิดข้อจำกัดในเรื่องของความหนาของคอนกรีตขณะทำการทดลอง ที่ไม่สามารถวัดที่ความหนามาก ๆ ตามที่กำหนดไว้
3. แผ่นคอนกรีตที่ใช้ เมื่อมาวางต่อกัน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่น ซึ่งมีผลต่อการกระเจิงของรังสีที่จะเข้ามาในหัววัดรังสี อาจจะมีผลต่อการหาค่า Build-up factor ของคอนกรีตได้

ส่วนที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาผนังคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยนำข้อมูลค่า Build-up factor (โดยใช้สมการของกราฟดังตารางที่ 20) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของคอนกรีต ที่ได้จากการทดลองส่วนที่ 1 และข้อมูลจากการจำลองในส่วนที่ 2 มาใช้ ทำให้สามารถคำนวณความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมา 4 พลังงาน คือ รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 พลังงาน 0.662 MeV และจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV ซึ่งเป็นข้อมูลจากการทดลอง และรังสีแกมมา พลังงาน 5 MeV และ 10 MeV ซึ่งเป็นข้อมูลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ในโปรแกรมสามารถคำนวณความหนาของคอนกรีต 4 ชนิด คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.44 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.47 \text{ g/cm}^3$  และ  $2.35 \text{ g/cm}^3$  เมื่อระบุความหนาของคอนกรีตหรือวัสดุกำบังรังสีแกมมา (ในหน่วยเซนติเมตร) ที่ต้องการ ความแรงรังสี (ในหน่วยคูรี) ที่ใช้ ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงผู้ปฏิบัติงาน (ในหน่วยเมตร) และค่าอัตราปริมาณรังสี (Exposure rate) ที่ต้องการ ทำให้โปรแกรม

สามารถคำนวณและแสดงค่าต่าง ๆ คือ ค่า Relaxation length หรือค่า  $\mu x$ , ค่า Build-up factor, ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) ในหน่วยต่อเซนติเมตร และค่าอัตราปริมาณรังสี (Exposure rate) ที่ได้จากการคำนวณ ในหน่วยมิลลิเรนเกนต่อชั่วโมง (mR/hr) ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำ แก่ผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่สนใจใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าว ทั้งนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้อาจจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาคอนกรีตหรือสิ่งกำบังรังสี ที่ต้องระบุให้อยู่ในช่วงที่โปรแกรมสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง

จากการคำนวณความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาผนังคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมาที่สร้างขึ้น โดยใช้ค่า Build-up factor ของคอนกรีตที่ได้จากการทดลอง (ความหนาแน่น  $2.13 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.44 \text{ g/cm}^3$  และ  $2.47 \text{ g/cm}^3$ ) จากการจำลอง (ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  ดังภาคผนวก ก.) และจากข้อมูลมาตรฐาน (ความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  ดังภาคผนวก ข.) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขที่ 1 และ 2 (หัวข้อ 4.3 ในบทที่ 4) ได้ผลการคำนวณความหนาของคอนกรีตพบว่า ความหนาของคอนกรีตที่ใช้ในการกำบังรังสีแกมมาจากข้อมูลของการทดลอง จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 และจากข้อมูลมาตรฐาน มีความสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งค่าความหนาของคอนกรีตที่เหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาของห้องฉายรังสี โดยใช้ค่า Build-up factor จากการทดลองกับข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) ในเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ได้แสดงในตารางที่ 21 และ 22 ตามลำดับ และใช้ค่า Build-up factor จากข้อมูลมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) และจากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ในเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ได้แสดงในตารางที่ 23 และ 24 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้ได้ผลการวิจัยตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ แต่ยังคงมีข้อจำกัดในบางตัวแปรซึ่งได้กล่าวในหัวข้อสรุปและอภิปรายผลการวิจัย ทั้งนี้ข้อจำกัดที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ข้อจำกัดของวัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย สภาพแวดล้อมในขณะที่ทำการวิจัย เป็นต้น ดังนั้นสำหรับผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการวิจัย ดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนของการทดลอง มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

1. ในการทดลองควรใช้แผ่นคอนกรีตที่มีความกว้างเพียงพอในการวัดการกระเจิงของรังสี มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ และควรมีความเรียบของแผ่นคอนกรีตในแต่ละแผ่น เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นคอนกรีตที่มากเกินไป
2. ที่ความหนาของคอนกรีตมาก ๆ ควรจัดระบบให้มีระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีที่สามารถวัดค่านับวัดรังสีที่ทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตได้



3. ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสี ไม่มีผลต่อเทคนิคการหาค่า Build-up factor ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากใช้สัดส่วนค่านับวัดของรังสีกระเจิงกับโฟโตพีคต่อโฟโตพีคของรังสีแกมมานั่นเอง

4. ห้องที่ใช้ในการทดลองควรเป็นห้องโล่ง ไม่มีวัสดุอื่นที่อาจจะเกิดการกระเจิงของรังสี ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระเจิงของรังสีจากวัสดุอื่นนอกเหนือจากคอนกรีตที่ใช้เข้าสู่หัววัดรังสีได้

ส่วนที่ 2 การจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 ควรใช้คอมพิวเตอร์ที่เป็นแบบตั้งโต๊ะหรือคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ที่มีประสิทธิภาพและขีดความสามารถสูง เพื่อการจำลองได้อย่างรวดเร็วในกรณีที่มีรายละเอียดของคำสั่งหรือมีจำนวนอนุภาคของรังสีมาก ๆ และการจำลองควรจัดระบบที่มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับสภาพห้องทดลองจริง เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง

ส่วนที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นคอนกรีตสำหรับกัมบังรังสีแกมมา ในการคำนวณค่า Build-up factor ของคอนกรีต สามารถทำได้โดยการใช้สมการจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relaxation length ( $\mu x$ ) กับค่า Build-up factor (B) และโดยการโหลดข้อมูลของค่า Build-up factor ที่อยู่ในรูปแบบไฟล์สกุล .txt สำหรับในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่า Build-up factor แบบใช้กราฟ และพลังงานของรังสีแกมมาที่ใช้ ควรเลือกได้ทุกพลังงานหรือสามารถใส่ค่าพลังงานที่ต้องการได้

## รายการอ้างอิง

1. Charanjeet, S., et al., *Simultaneous effect of collimator size and absorber thickness on the gamma ray build-up factor*. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 2004. **42**: p. 475-478.
2. Adnan, A.A., *Effect of exposure Build-up factor on Reactor Shielding*. Journal of Al-Nahrain University, 2010. **13**: p. 73-83.
3. Stankovic, S.J., *Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Components of Different Type Materials*. ACTA PHYSICA POLONICA A, 2010. **117**: p. 812-816.
4. Dunster, H.J., et al., *Handbook of Radiological Protection-Part 1: Data, Radioactive Substances Advisory Committee*. 1971: HMSO London.
5. Kirn, F.S., R.J. Kennedy, and H.O. Wyckoff, *Radiology*, 1954. **94**(63).
6. Akkurt, I., et al., *Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies*. Progress in Nuclear Energy, 2010. **52**(7): p. 620-623.
7. Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*. 1999, U.S.: John Wiley & Sons, Inc.
8. Mc Williams, F.F., *Shielding of Radiation Sources*. Massachusetts Institute of Technology.
9. วินิต ช่อวิเชียร, คอนกรีตเทคโนโลยี. 2551, กรุงเทพมหานคร: บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด.
10. Team, X.-M.C., *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. 2003, U.S.: Los Alamos National Laboratory.
11. ฉัททวุฒิ พิษผล, พิชิต สันติกุลานนท์, and พร้อมเลิศ หล่อวิจิตร, คู่มือเรียน *Visual Basic 6*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท โปรวิชั่น จำกัด.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. ข้อมูลสัดส่วนของส่วนประกอบของคอนกรีต

**คอนกรีตชนิดที่ 1 (Concrete type 1)**

ความหนาแน่น 2.13 g/cm<sup>3</sup> ขนาด 30 ซม. × 30 ซม. × 6 ซม. จำนวน 10 แผ่น  
แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

**คอนกรีตชนิดที่ 2 (Concrete type 2)**

ความหนาแน่น 2.44 g/cm<sup>3</sup> ขนาด 30 ซม. × 30 ซม. × 3 ซม. จำนวน 20 แผ่น  
สัดส่วนโดยปริมาตรของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน) เท่ากับ 1 : 2 : 4

**คอนกรีตชนิดที่ 3 (Concrete type 3)**

ความหนาแน่น 2.47 g/cm<sup>3</sup> ขนาด 30 ซม. × 30 ซม. × 3 ซม. จำนวน 20 แผ่น  
สัดส่วนโดยปริมาตรของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน) เท่ากับ 1 : 2 : 3

**คอนกรีตแบบ Ordinary Concrete (NBS 04)**

ความหนาแน่น 2.35 g/cm<sup>3</sup> แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 25 และ 26

**ตารางที่ 25** ค่าสัดส่วนของธาตุของคอนกรีตแบบ Ordinary Concrete (NBS 04)

| Element | Neutron ZA | Photon ZA | Weight Fraction | Atom Fraction | Atom Density |
|---------|------------|-----------|-----------------|---------------|--------------|
| H       | 1001       | 1000      | 0.005558        | 0.103586      | 0.007804     |
| O       | 8016       | 8000      | 0.498076        | 0.584810      | 0.044057     |
| Na      | 11023      | 11000     | 0.017101        | 0.013974      | 0.001053     |
| Mg      | 12000      | 12000     | 0.002565        | 0.001983      | 0.000149     |
| Al      | 13027      | 13000     | 0.045746        | 0.031850      | 0.002399     |
| Si      | 14000      | 14000     | 0.315092        | 0.210755      | 0.015877     |
| S       | 16000      | 16000     | 0.001283        | 0.000751      | 0.000057     |
| K       | 19000      | 19000     | 0.019239        | 0.009244      | 0.000696     |
| Ca      | 20000      | 20000     | 0.082941        | 0.038877      | 0.002929     |
| Fe      | 26000      | 26000     | 0.012398        | 0.004171      | 0.000314     |
| รวม     |            |           | 1.000000        | 1.000000      | 0.075335     |

ตารางที่ 26 ค่าสัดส่วนของธาตุของคอนกรีตแบบ Ordinary Concrete (NBS 04) ที่ใช้สำหรับการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5

| MCNP Form | Weight Fractions |           | Atom Fractions |          | Atom Densities |          |
|-----------|------------------|-----------|----------------|----------|----------------|----------|
| Neutrons  | 1001             | -0.005558 | 1001           | 0.103586 | 1001           | 0.007804 |
|           | 8016             | -0.498076 | 8016           | 0.584810 | 8016           | 0.044057 |
|           | 11023            | -0.017101 | 11023          | 0.013974 | 11023          | 0.001053 |
|           | 12000            | -0.002565 | 12000          | 0.001983 | 12000          | 0.000149 |
|           | 13027            | -0.045746 | 13027          | 0.031850 | 13027          | 0.002399 |
|           | 14000            | -0.315092 | 14000          | 0.210755 | 14000          | 0.015877 |
|           | 16000            | -0.001283 | 16000          | 0.000751 | 16000          | 0.000057 |
|           | 19000            | -0.019239 | 19000          | 0.009244 | 19000          | 0.000696 |
|           | 20000            | -0.082941 | 20000          | 0.038877 | 20000          | 0.002929 |
|           | 26000            | -0.012398 | 26000          | 0.004171 | 26000          | 0.000314 |
| Photons   | 1000             | -0.005558 | 1000           | 0.103586 | 1000           | 0.007804 |
|           | 8000             | -0.498076 | 8000           | 0.584810 | 8000           | 0.044057 |
|           | 11000            | -0.017101 | 11000          | 0.013974 | 11000          | 0.001053 |
|           | 12000            | -0.002565 | 12000          | 0.001983 | 12000          | 0.000149 |
|           | 13000            | -0.045746 | 13000          | 0.031850 | 13000          | 0.002399 |
|           | 14000            | -0.315092 | 14000          | 0.210755 | 14000          | 0.015877 |
|           | 16000            | -0.001283 | 16000          | 0.000751 | 16000          | 0.000057 |
|           | 19000            | -0.019239 | 19000          | 0.009244 | 19000          | 0.000696 |
|           | 20000            | -0.082941 | 20000          | 0.038877 | 20000          | 0.002929 |
|           | 26000            | -0.012398 | 26000          | 0.004171 | 26000          | 0.000314 |

ภาคผนวก ข. ค่า Build-up factor ของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  จากข้อมูลมาตรฐาน

ข้อมูลจากเว็บไซต์ <http://www.nucleonica.net> จัดทำโดย Institute for Transuranium Elements (ITU) ประเทศเยอรมนี

| R (mfp) | Energy (MeV) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | 15           | 10   | 8    | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1.5  | 1    | 0.8  | 0.6  | 0.5  |
| 0.5     | 1.13         | 1.18 | 1.21 | 1.25 | 1.32 | 1.31 | 1.34 | 1.39 | 1.42 | 1.49 | 1.53 | 1.6  | 1.66 |
| 1       | 1.24         | 1.34 | 1.4  | 1.48 | 1.57 | 1.62 | 1.7  | 1.83 | 1.93 | 2.11 | 2.22 | 2.41 | 2.55 |
| 2       | 1.42         | 1.61 | 1.74 | 1.92 | 2.05 | 2.22 | 2.44 | 2.8  | 3.08 | 3.59 | 3.94 | 4.48 | 4.89 |
| 3       | 1.61         | 1.88 | 2.07 | 2.35 | 2.54 | 2.81 | 3.19 | 3.82 | 4.36 | 5.35 | 6.03 | 7.1  | 7.89 |
| 4       | 1.8          | 2.16 | 2.4  | 2.77 | 3.04 | 3.41 | 3.96 | 4.92 | 5.77 | 7.35 | 8.48 | 10.3 | 11.6 |
| 5       | 1.99         | 2.43 | 2.73 | 3.2  | 3.55 | 4.03 | 4.76 | 6.07 | 7.28 | 9.61 | 11.3 | 14   | 16.0 |
| 6       | 2.18         | 2.71 | 3.07 | 3.64 | 4.06 | 4.66 | 5.58 | 7.28 | 8.9  | 12.1 | 14.5 | 18.2 | 21.1 |
| 7       | 2.38         | 2.99 | 3.41 | 4.08 | 4.58 | 5.29 | 6.42 | 8.55 | 10.6 | 14.8 | 18   | 23.1 | 27.0 |
| 8       | 2.58         | 3.28 | 3.76 | 4.52 | 5.1  | 5.94 | 7.27 | 9.86 | 12.4 | 17.8 | 21.9 | 28.6 | 33.7 |
| 10      | 3            | 3.85 | 4.45 | 5.42 | 6.16 | 7.24 | 9.02 | 12.6 | 16.3 | 24.3 | 30.7 | 41.3 | 49.6 |
| 15      | 4.08         | 5.33 | 6.21 | 7.7  | 8.86 | 10.6 | 13.6 | 20   | 27.1 | 44.0 | 58.5 | 84   | 105  |
| 20      | 5.23         | 6.86 | 8    | 10   | 11.6 | 14.1 | 18.4 | 28.1 | 39.3 | 67.9 | 94.1 | 142  | 183  |
| 25      | 6.45         | 8.45 | 9.83 | 12.4 | 14.4 | 17.6 | 23.3 | 36.7 | 52.6 | 95.5 | 137  | 216  | 286  |
| 30      | 7.71         | 10.1 | 11.7 | 14.7 | 17.3 | 21.2 | 28.4 | 45.7 | 67   | 126  | 186  | 305  | 414  |
| 35      | 8.97         | 11.7 | 13.7 | 16.8 | 20.2 | 24.8 | 33.6 | 55   | 82.1 | 160  | 242  | 408  | 567  |
| 40      | 10.2         | 13.4 | 16   | 18.6 | 23.9 | 28.5 | 38.8 | 64.6 | 98   | 197  | 303  | 527  | 747  |

รูปที่ 47 ตารางค่า Build-up factor ของคอนกรีตความหนาแน่น  $2.35 \text{ g/cm}^3$  ที่พลังงาน 0.5 - 15 MeV

ภาคผนวก ค. โค้ดหรือคำสั่งในการจำลองการทดลองด้วย MCNP5

- พลังงานของรังสีแกมมา 0.662 MeV โดยใช้อนุภาค  $2 \times 10^9$  ตัว โดยเขียนคำสั่งดังนี้
  - c Concrete
  - c cell mat density surface
  - 1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 \$air
  - 2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 \$concrete regular
  - 3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 \$detector
  - 4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 \$Shield of Detector
  - 5 0 1 imp:p=0

c surface card

1 so 300.0

2 BOX -15 242 -15 30 0 0 0 3 0 0 0 30 \$shielding

3 RCC 0 250 0 0 10 0 2.54 \$Nal boundary

4 RCC 0 245 0 0 20 0 10.16 \$Shield of Detector

5 RCC 0 245 0 0 5 0 2.54

c data card

mode p

sdef ERG=0.662 pos=0 -250 0

m1 6000 -0.000124 \$air

7014 -0.755268

8016 -0.231781

18000 -0.012827

m2 1001 -0.005558 \$concrete ordinary

8016 -0.498077

11023 -0.017101

12000 -0.002565

13027 -0.045746

14000 -0.315092

16000 -0.001283

19000 -0.019239

20000 -0.082941

26000 -0.012398

m3 11023 -0.153373 \$Nal

53127 -0.846627

m4 82000 1.000000 \$Shield of Detector

f8:p 3

e8 0 98i 1

nps 2000000000

## 2. พลังงานของรังสีแกมมา 1.25 MeV โดยใช้อนุภาค $1 \times 10^9$ ตัว โดยเขียนคำสั่งดังนี้

c Concrete

c cell mat density surface

1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 \$air

2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 \$concrete regular

3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 \$detector

4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 \$Shield of Detector

5 0 1 imp:p=0

c surface card

1 so 300.0

2 BOX -15 242 -15 30 0 0 0 3 0 0 0 30 \$shielding

3 RCC 0 250 0 0 10 0 2.54 \$NaI boundary

4 RCC 0 245 0 0 20 0 10.16 \$Shield of Detector

5 RCC 0 245 0 0 5 0 2.54

c data card

mode p

sdef ERG=1.25 pos=0 0 0

m1 6000 -0.000124 \$air

7014 -0.755268

8016 -0.231781

18000 -0.012827

m2 1001 -0.005558 \$concrete ordinary

8016 -0.498077

11023 -0.017101

12000 -0.002565

13027 -0.045746

14000 -0.315092

16000 -0.001283

19000 -0.019239



20000 -0.082941  
 26000 -0.012398  
 m3 11023 -0.153373 \$Nal  
 53127 -0.846627  
 m4 82000 1.000000 \$Shield of Detector  
 f8:p 3  
 e8 0 198i 1.5  
 nps 1000000000

### 3. พลังงานของรังสีแกมมา 5 MeV โดยใช้อนุภาค $5 \times 10^8$ ตัว โดยเขียนคำสั่งดังนี้

c Concrete  
 c cell mat density surface  
 1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 \$air  
 2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 \$concrete regular  
 3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 \$detector  
 4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 \$Shield of Detector  
 5 0 1 imp:p=0  
  
 c surface card  
 1 so 300.0  
 2 BOX -15 242 -15 30 0 0 0 3 0 0 0 30 \$shielding  
 3 RCC 0 250 0 0 10 0 2.54 \$Nal boundary  
 4 RCC 0 245 0 0 20 0 10.16 \$Shield of Detector  
 5 RCC 0 245 0 0 5 0 2.54  
  
 c data card  
 mode p  
 sdef ERG=5 pos=0 0 0  
 m1 6000 -0.000124 \$air  
 7014 -0.755268  
 8016 -0.231781

18000 -0.012827  
 m2 1001 -0.005558 \$concrete ordinary  
 8016 -0.498077  
 11023 -0.017101  
 12000 -0.002565  
 13027 -0.045746  
 14000 -0.315092  
 16000 -0.001283  
 19000 -0.019239  
 20000 -0.082941  
 26000 -0.012398  
 m3 11023 -0.153373 \$NaI  
 53127 -0.846627  
 m4 82000 1.000000 \$Shield of Detector  
 f8:p 3  
 e8 0 298i 7  
 nps 500000000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4. พลังงานของรังสีแกมมา 10 MeV โดยใช้อนุภาค $1 \times 10^9$ ตัว

c Concrete  
 c cell mat density surface  
 1 1 -0.001205 -1 #2 #3 #4 imp:p=1 \$air  
 2 2 -2.35 -2 3 imp:p=1 \$concrete regular  
 3 3 -3.667 -3 2 imp:p=1 \$detector  
 4 4 -11.34 -4 3 5 imp:p=1 \$Shield of Detector  
 5 0 1 imp:p=0  
  
 c surface card  
 1 so 300.0  
 2 BOX -15 203 -15 30 0 0 0 3 0 0 0 30 \$shielding

3 RCC 0 250 0 0 10 0 2.54 \$Nal boundary  
4 RCC 0 245 0 0 20 0 10.16 \$Shield of Detector  
5 RCC 0 245 0 0 5 0 2.54

c data card

mode p

sdef ERG=10 pos=0 -250 0

m1 6000 -0.000124 \$air

7014 -0.755268

8016 -0.231781

18000 -0.012827

m2 1001 -0.005558 \$concrete ordinary

8016 -0.498077

11023 -0.017101

12000 -0.002565

13027 -0.045746

14000 -0.315092

16000 -0.001283

19000 -0.019239

20000 -0.082941

26000 -0.012398

m3 11023 -0.153373 \$Nal

53127 -0.846627

m4 82000 1.000000 \$Shield of Detector

f8:p 3

e8 0 298i 12

nps 1000000000

ภาคผนวก ง. โค้ดหรือคำสั่งที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นคอนกรีตสำหรับกำบังรังสีแกมมา โดยใช้ Visual Basic 6

Option Explicit

Private Energy As Single

Private SN As Integer

Private ConDen As Single

Private d As Single

Private ExpRate As Single

Private Activity As Single

Private Atten As Single

Private Thick As Single

Private Sub Combo1\_Click()

Select Case Combo1.Text

Case "Cs-137 (0.662 MeV)"

SN = 1

Energy = 0.662

Combo2.Enabled = True

Case "Co-60 (1.25 MeV)"

SN = 2

Energy = 1.25

Combo2.Enabled = True

Case "Gamma ray (5 MeV)"

SN = 3

Energy = 5

Combo2.Text = "2.35 (Library)"

Combo2.Enabled = False

Case "Gamma ray (10 MeV)"

SN = 4

Energy = 10

Combo2.Text = "2.35 (Library)"



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

        Combo2.Enabled = False
    End Select
endloop:
End Sub

```

```

Private Sub Combo2_Change()
Select Case Combo2.Text
    Case "2.13 (Concrete type1)"
        ConDen = 2.13
    Case "2.44 (Concrete type2)"
        ConDen = 2.44
    Case "2.47(Concrete type3)"
        ConDen = 2.47
    Case "2.35 (Library)"
        ConDen = 2.35
End Select
End Sub

```

```

Private Sub Command1_Click()
Dim RL As Single
Dim B As Single
Dim IntExposRate As Single
Dim CalExposRate As Single
Dim dA As Single
Dim dB As Single
Dim dC As Single

```

```

If Thick < 1 Then
    MsgBox ("Please input Thickness of Concrete Shielding > 1 cm")
    Text3.SetFocus
    GoTo endloop

```

```

End If
If Thick > 500 Then
    MsgBox ("Please input Thickness of Concrete Shielding between 1-500 cm")
    Text3.SetFocus
    GoTo endloop
End If
If Activity < 0 Then
    MsgBox ("Please input Activity of Gamma ray Source > 0")
    Text4.SetFocus
    GoTo endloop
End If
If d < 0 Then
    MsgBox ("Please input Distance > 0")
    Text5.SetFocus
    GoTo endloop
End If
If ExpRate < 0 Then
    MsgBox ("Please input Exposore rate > 0")
    Text6.SetFocus
    GoTo endloop
End If
'calculation of Buildup factor
If SN = 1 Then
    Select Case Combo2.Text
        Case "2.13 (Concrete type1)"
            dA = 2.0559036
            dB = 0
            dC = 0.15210569
            Atten = 0.1602
        Case "2.44 (Concrete type2)"
            dA = 2.0980567

```

dB = 0.1174454

dC = 0.091688492

Atten = 0.1826

Case "2.47 (Concrete type3)"

dA = 1.9618426

dB = 0

dC = 0.15320319

Atten = 0.1904

Case "2.35 (Library)"

dA = 0.63626836

dB = 1.232071

dC = 0.2551917

Atten = 0.1818007

End Select

End If

If SN = 2 Then

Select Case Combo2.Text

Case "2.13 (Concrete type1)"

dA = 4.6286359

dB = 0

dC = 0.25725312

Atten = 0.1173

Case "2.44 (Concrete type2)"

dA = 4.7334847

dB = -0.036824175

dC = 0.21344439

Atten = 0.1419

Case "2.47 (Concrete type3)"

dA = 4.6721945

dB = 0

dC = 0.27704621



```

    Atten = 0.1412
    Case "2.35 (Library)"
        dA = -0.54745891
        dB = 1.6387672
        dC = 0.052219553
        Atten = 0.133245
    End Select
End If
If SN = 3 Then
    Select Case Combo2.Text
        Case "2.35 (Library)"
            dA = 1.107135
            dB = 0.47879043
            dC = 0.0021312998
            Atten = 0.0652
        End Select
    End If
    If SN = 4 Then
        Select Case Combo2.Text
            Case "2.35 (Library)"
                dA = 1.0480832
                dB = 0.27272422
                dC = 0.00091291325
                Atten = 0.056
            End Select
        End If

        RL = Atten * Thick
        B = dA + (dB * RL) + (dC * RL ^ 2)
        Label5.Caption = B
        Label4.Caption = RL
    End If
End If

```





Label3.Caption = Atten

IntExposRate = 0.5 \* Energy \* Activity \* 1000 / (d ^ 2)      '\*1000 for change R to mR

CalExposRate = IntExposRate \* B \* Exp(-RL)

Label6.Caption = CalExposRate

If CalExposRate > ExpRate Then

    MsgBox ("Exposure dose rate from calculation > Exposure rate, Please input  
Thickness of Concrete Shielding more than previous value")

    Text3.SetFocus

End If

endloop:

End Sub

Private Sub Command2\_Click()

Dim Resp As Variant

Resp = MsgBox("Are you sure?", vbYesNo + vbQuestion)

If Resp = vbYes Then End

End Sub

Private Sub Form\_Load()

Combo1.AddItem "Cs-137 (0.662 MeV)"

Combo1.AddItem "Co-60 (1.25 MeV)"

Combo1.AddItem "Gamma ray (5 MeV)"

Combo1.AddItem "Gamma ray (10 MeV)"

Combo2.AddItem "2.13 (Concrete type1)"

Combo2.AddItem "2.44 (Concrete type2)"

Combo2.AddItem "2.47 (Concrete type3)"

Combo2.AddItem "2.35 (Library)"

```
SN = 1
ConDen = 2.13
End Sub
Private Sub mnuExit_Click()
Dim Resp As Variant

Resp = MsgBox("Are you sure?", vbYesNo + vbQuestion)
If Resp = vbYes Then End
End Sub

Private Sub Text3_Change()
Thick = Val(Text3.Text) 'cm
End Sub

Private Sub Text4_Change()
Activity = Val(Text4.Text)
End Sub

Private Sub Text5_Change()
d = Val(Text5.Text)
End Sub

Private Sub Text6_Change()
ExpRate = Val(Text6.Text)
End Sub
```



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล นายมูฮำหมัดซู สุหลง

เกิดวันที่ 11 มกราคม 2534

บ้านเกิด : จังหวัดนราธิวาส

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา (พ.ศ. 2546 - 2551)

: โรงเรียนอัสตังกีเยห์อิสลามียะห์ จ.นราธิวาส

ระดับปริญญาตรี (พ.ศ. 2552 - 2555)

: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตบางเขน

ระดับปริญญาโท (พ.ศ. 2556 - 2559)

: สาขานิเวศลิยร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศลิยร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY