

ประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ

ผู้แต่ง พลยุทธ์ ทองผาสุก¹ ธนกร พันหา² ปณณวิษณุ พลະศุนย์³ และ รศ. ดร. วิจิต ปานสุข⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประโยชน์ในด้านการใช้พลังงานนิวเคลียร์มีหลายด้าน การนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์นั้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีและอนุภาคต่างๆ การสร้างสิ่งป้องกันการรั่วไหลของรังสีที่มีประสิทธิภาพจะเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเกี่ยวกับการป้องกันรังสีแกมมาซึ่งเป็นรังสีที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง วัสดุที่ใช้กำบังรังสีแกมมาได้ดีนั้นต้องมีความหนาแน่นมาก ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างนั้นใช้คอนกรีตเพื่อความทนทานในการใช้งานสิ่งปลูกสร้าง คอนกรีตที่ใช้กำบังรังสี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคอนกรีตมวลหนักมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นสูง มวลรวมที่ใช้ทำคอนกรีตพิจารณาความเหมาะสมในด้านคุณสมบัติและการจัดหาแหล่งวัสดุภายในประเทศจึงได้เลือกเป็น แร่แบไรต์ และทำการเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยต่างๆ เพื่อนำสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนักกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาวิเคราะห์สัดส่วนคอนกรีตที่ได้ ออกแบบโดยมีความหนาแน่นในช่วง 2485-3715 กก/ลบ.ม. แล้วนำเสนอออกมาเป็นความหนาแน่นคอนกรีตที่สามารถกันรังสีได้ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 99 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลหนัก, แร่แบไรต์, รังสีแกมมา, การป้องกันรังสีแกมมา

Abstract

Currently, there are many benefits to using nuclear energy. the use of radioactive materials to produce nuclear energy releases excess energy in the form of radiation and particles. Creating effective radiation leak prevention measures is a good way to prevent potential hazards. In this research, the focus will be on gamma radiation protection, which has high penetrating power. Materials that are good for gamma radiation must be very dense. Which considers the suitability of

the properties and the procurement of domestic sources of materials, therefore we choose barite and collecting various research data to use the equation to show the relationship between the density of heavy mass concrete and the gamma attenuation coefficient to analyze the proportion of the designed concrete which had the bulk density in range of 2,485-3,715 kg/m³ to present into the concrete thickness that can radiation protection at 50 percent and 99 percent.

Keywords: heavyweight concrete, barite, gamma-ray, radiation shielding

1. บทนำ

ในปัจจุบันประโยชน์ในด้านการใช้พลังงานนิวเคลียร์มีหลายด้าน เช่นใช้ในการผลิตพลังงานสะอาดสำหรับใช้ในกิจกรรมต่างๆหรือด้านการแพทย์และอนามัยเป็นต้นแต่การนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์นั้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีและอนุภาคต่างๆโดยรังสีที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีประกอบด้วยรังสีแอลฟา (alpha rays หรือ a-rays) รังสีบีตา (beta rays หรือ b-rays) รังสีแกมมา (gamma rays หรือ g-rays) รังสีเอกซ์ (X-rays) และอนุภาคนิวตรอน (Neutrons) [1], [2], [3] อันตรายจากรังสีแกมมา หากได้รับในปริมาณที่สูงจะส่งผลกระทบต่อร่างกายเช่นอาจมีอาการผื่นวงเซลล์ตายผิวหนังไหม้ ฯลฯ เนื่องจากรังสีที่แผ่ออกจากธาตุกัมมันตรังสีเมื่อผ่านเข้าไปในสิ่งมีชีวิตจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมตามแนวทางที่รังสีผ่านไป

รังสีเป็นอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากอะตอมจึงไม่มีสีกลิ่นหรือสิ่งที่สามารถสังเกตได้ทำให้ผู้ที่ได้รับจะไม่ทราบว่าตนเองได้รับรังสีการก่อสร้างป้องกันการรั่วไหลของรังสีที่มีประสิทธิภาพจะเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคอนกรีตมวลหนักที่มีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นสูงใช้เป็นส่วนโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างที่จะใช้กักเก็บและป้องกันการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี

โดยพิจารณาความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต และความหนาของตัวโครงสร้างในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานทางเทคนิคที่ใช้ควบคุมการก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ที่ครบถ้วนทั้งในแง่ของความปลอดภัยทางรังสีและนิวตรอนรวมไปถึงความแข็งแรงทนทานของโครงสร้างของสถานประกอบการในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุภัยพิบัติหรือการก่อวินาศกรรมดังนั้นการศึกษาวเคราะห์องค์ประกอบของคอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อให้การดำเนินงานในกิจกรรมทางนิวเคลียร์มีความปลอดภัยและเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยจึงมีความสำคัญที่ควรเร่งเตรียมการตลอดจนงานศึกษาวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานประกอบการทางรังสีประเภทอื่นๆที่ต้องมีการป้องกันอันตรายทางรังสีและนิวตรอนได้อีกด้วย

2. วิธีการดำเนินโครงการ (Methods)

2.1 การศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

การศึกษามาตรฐานส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานด้านสถานประกอบการทางนิวเคลียร์และรังสีตามมาตรฐานสากลเพื่อคัดเลือกมวลรวมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวมหนักเพื่อป้องกันรังสีแกมมา โดยค้นคว้าจากมาตรฐาน 2019 ASME BPVS Section III – Rules For Construction Of Nuclear Facility Component [4] , American Nuclear Society – Nuclear Analysis And Design Of Concrete Radiation Shielding For Nuclear Power Plants [5]

2.2 การสำรวจแร่ภายในประเทศ

ประเทศไทยมีแหล่งแร่ชนิดต่างๆกระจายอยู่ทั่วไปเพื่อให้ทราบถึงต้นทุนด้านทรัพยากรแร่ของประเทศไทยจึงได้มีการค้นคว้าแหล่งแร่ชนิดต่างๆกระจายอยู่ทั่วไปอีกทั้งยังต้องพิจารณาถึงความง่ายในการจัดหาโดยพิจารณาถึงเหมืองที่เปิดทำการผลิตในปัจจุบันจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เกี่ยวกับแร่ชนิดต่างๆที่พบในแต่ละพื้นที่ของประเทศอีกทั้งยังได้มีรายละเอียดเช่นปริมาณการใช้ปริมาณการนำเข้าส่งออก เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาว่าแร่ใดนั้นเหมาะสมกับการนำมาเป็นมวลรวมหนักของคอนกรีตป้องกันรังสี

2.3 การกำหนดส่วนผสมคอนกรีต

เนื่องจากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า การป้องกันรังสีแกมมาของคอนกรีตนั้นขึ้นกับความหนาแน่นเป็นสำคัญจึงได้มีการกำหนดส่วนผสมของคอนกรีตขึ้นทั้งหมด 25 ตัวอย่างโดยใช้หลักในการกำหนดส่วนผสมคือการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของคอนกรีตของแต่ละส่วนผสมให้มีความแตกต่างกันโดยใช้มวลรวมที่เป็นมวลรวมหนักตามมาตรฐานที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.1

2.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมการจากการวิจัยของ Gogot Setyo Budi และคณะ [6]

$$\mu = 0.006e^{1.04\gamma} \quad (1)$$

โดยที่ γ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีตในหน่วย kg/dm^3

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นในหน่วย cm^{-1}

$$\mu = 0.0001\gamma - 0.0855 \quad (2)$$

โดยที่ γ คือ ความหนาแน่นในหน่วย kg/m^3

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น

สมการจากการวิจัยของ Mukhtar Oluwaseun Azeez และคณะ [7]

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{2 \times 10^8}{W_c^{2.575}} \quad (3)$$

โดยที่กำหนดความหนาของคอนกรีตเท่ากับ 100 mm

$\frac{I_x}{I_0}$ คือ สัดส่วนของรังสีที่ถูกลดทอนต่อรังสีที่ไม่ถูกลดทอนของการแผ่รังสีแกมมา

W_c คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kg/m^3)

$$t = \frac{8 \times 10^7}{W_c^{1.564}} \quad (4)$$

โดยที่ t คือ ความหนาขั้นต่ำของคอนกรีตที่ต้องการในการป้องกันรังสีให้ได้ 99 %

3. ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ (Results and Discussion)

3.1 ผลจากการศึกษามาตรฐาน

มาตรฐาน 2019 ASME BPVS Section III ได้ระบุถึงมวลรวมไว้ ดังนี้

- การกระจายขนาดต่างๆของมวลรวม การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบจะต้องมีขนาดที่ต่างกันอย่างน้อย 2 ขนาดและต้องมีขนาดมากกว่า 1 นิ้ว
- คุณสมบัติของมวลรวมได้ระบุว่ามวลรวมจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน C637-98a (ASTM, 2003) ว่าคอนกรีตที่จะป้องกันรังสีได้นั้นจะต้องมีส่วนประกอบที่มีความถ่วงจำเพาะสูง และเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก

มาตรฐาน American Nuclear Society – Nuclear Analysis And Design Of Concrete Radiation Shielding For Nuclear Power Plants

- มวลรวมสำหรับคอนกรีตทั่วไป

มวลรวมหยาบและละเอียดจะถูกอธิบายใน ASTM C-294-05 และคอนกรีตจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน C33-03

- มวลรวมสำหรับคอนกรีตมวลหนัก

มวลรวมชนิดพิเศษ เช่น เม็ดเหล็กชั้นรูป หรือเป็นมวลรวมที่มาจากรังสีธรรมชาติ จะต้องเป็นไปตาม ASTM C638-92 (R2002) และ ASTM C637

- (1) Heavy aggregate มีดังนี้

- Ilmenite (FeTiO_3 , with minor Mg and Mn)
- Limonite
- Magnetite (Fe_3O_4)
- Barite (BaSO_4)

(2) Hydrous aggregate

เป็นมวลรวมพิเศษที่มีความชื้นของน้ำค่อนข้างสูง ซึ่งอาจได้ใช้ถ้าต้องการรักษาปริมาณน้ำในคอนกรีตในขณะที่เกิดการบ่มได้ เพื่อที่จะให้มีความสามารถป้องกันนิวตรอนได้ซึ่งถูกระบุใน ASTM C637

3) มวลรวมที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ

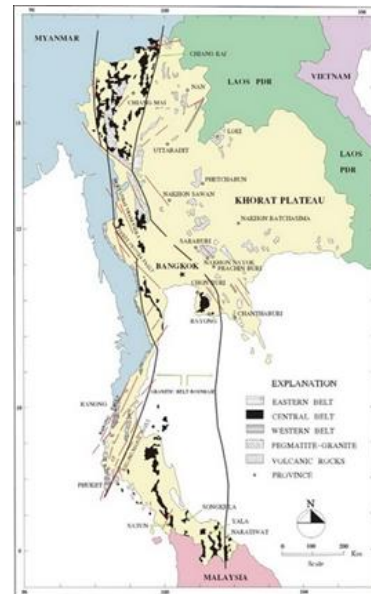
มวลรวมที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบนั้น อาจถูกใช้ผสมกับมวลรวมอื่นด้วยเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการจับนิวตรอนและลด Secondary Gamma-ray ซึ่งถูกระบุใน ASTM C638

มาตรฐาน ASTM C637 – 98a (Reapproved 2003) (ASTM, 1998) ได้ระบุถึงมวลรวมพิเศษที่สามารถนำมาใช้ในการป้องกันรังสีได้โดยพิจารณาจากองค์ประกอบของมวลรวมหรือค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงเป็นเกณฑ์หลัก มวลรวมที่ถูกมาตรฐานนี้กล่าวถึงประกอบไปด้วย

1. มวลรวมแร่ธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูงหรือมีค่าความชื้นสูงรวมไปถึงมวลรวมที่มีคุณสมบัติสูงกว่า เช่น แบไรต์ แมกนีไทด์ อิลเมไนต์ และ เซอร์เพนไทน์
2. มวลรวมที่เกิดจากการสังเคราะห์ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า เฟอร์โรฟอสฟอรัส และ โบรอนฟริต หรือส่วนประกอบโบรอนอื่นๆ
3. มวลรวมละเอียดที่ประกอบไปด้วยทรายธรรมชาติหรืออุตสาหกรรมรวมถึงแร่ธาตุที่มีความหนาแน่นสูง มวลรวมหยาบอาจประกอบไปด้วยแรบด หินบด หรือผลิตภัณฑ์สังเคราะห์

3.2 แร่ที่เหมาะสมกับการวิจัย

จากผลการศึกษามาตรฐานดังกล่าวร่วมกับการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการจัดหาแหล่งวัสดุที่สามารถนำมาใช้ได้จึงทำการคัดเลือกมวลรวมหนักที่จะนำมาทดสอบคือแบไรต์โดยมีคุณสมบัติผ่านตามาตรฐานและมีแหล่งที่มาของหินภายในประเทศที่เปิดทำการอยู่ในปัจจุบัน โดยเหมืองแร่แบไรต์จะมีอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช (หมายเลข 1), เลย (หมายเลข 2) และแพร่ (หมายเลข 3) ซึ่งแสดงในรูปภาพที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของหินอูร์เนียมในไทย (ที่มา : Department_of_Mineral_Resources. (2 June). Geology of Thailand. Available: http://www.dmr.go.th/main.php?filename=GeoThai_En)

3.3 การกำหนดส่วนผสมคอนกรีต

จากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยในอดีตผนวกกับแนวคิดในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ที่ต้องมีการคำนึงการดูดกลืนรังสี โอกาสในการเกิดการแตกร้าวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในการออกแบบผนังที่มีความหนาแน่นสูง และความเสี่ยงในการเกิดการแยกตัวของมวลรวม จึงได้นำเสนอส่วนผสมของคอนกรีตทั้ง 25 ตัวอย่างแสดงตามตารางที่ 1

3.4 การประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์จากงานวิจัยในอดีตกับส่วนผสมคอนกรีต

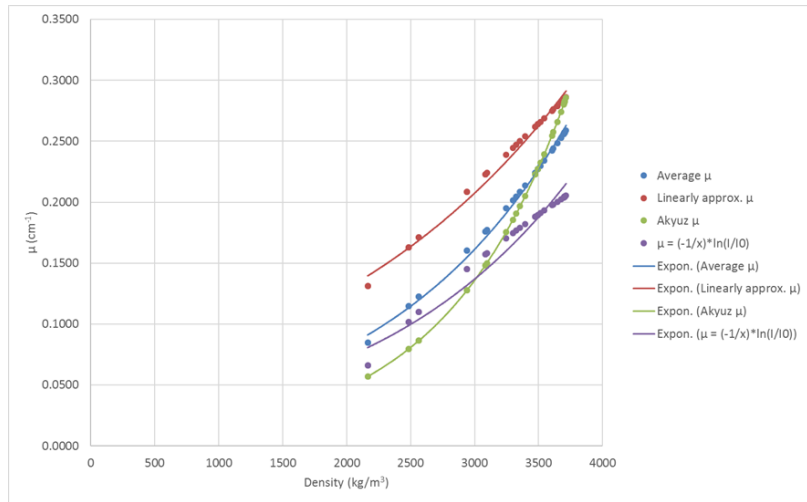
ในงานวิจัยใช้สมการที่ได้จากการรวบรวมจากงานวิจัยในอดีตตามหัวข้อ 2.4 เพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีและค่าความหนาของคอนกรีตตัวอย่างทั้ง 25 ส่วนผสมดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาระหว่างความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามกลุ่มตัวอย่างและเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาของคอนกรีตที่ใช้ในการลดความเข้มของรังสีลดลงไปจากเดิมครึ่งหนึ่ง (HVL) มีค่าลดลงและยังสอดคล้องกับค่าที่ได้จากสมการที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาขั้นต่ำที่ต้องการในการลดทอนความเข้มของรังสีลง 99% ตามรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่ได้มาจากการใช้สมการซึ่งทำการวิจัยการลดทอนรังสีโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีคือ Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตทั้ง 25 ตัวอย่าง

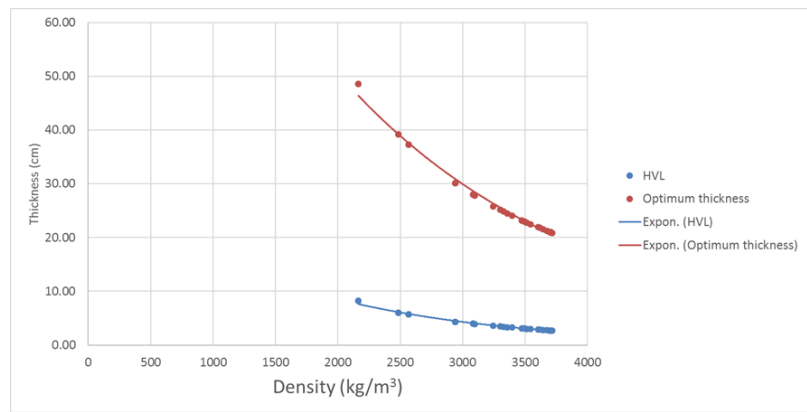
| Trial Mix No. | Mix Proportions | | | | | | | | | | Total Density |
|---------------|------------------------|---------------|--------------|-----------|--------|--------------|---------|------------|------|------|---------------|
| | Cementitious Materials | | Actual Water | W/C Ratio | Iron | Aggregate | | | | | |
| | Type I Cement | Fly ash | | | | Natural sand | หินฝุ่น | | 3/4" | | |
| | (kg/cu.m.) | (liter/cu.m.) | ธรรมดา | Barite | หินปูน | | Barite | (kg/cu.m.) | | | |
| 1 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3695 |
| 2 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 550 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3545 |
| 3 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 400 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3395 |
| 4 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 250 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3245 |
| 5 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 100 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3095 |
| 6 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1100 | 3715 |
| 7 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1000 | 3615 |
| 8 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 900 | 3515 |
| 9 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1380 | 0 | 1000 | 3675 |
| 10 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1450 | 0 | 900 | 3645 |
| 11 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1509 | 0 | 800 | 3604 |
| 12 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1450 | 0 | 1280 | 3325 |
| 13 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1410 | 0 | 1350 | 3355 |
| 14 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1490 | 0 | 1215 | 3300 |
| 15 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1320 | 650 | 0 | 2565 |
| 16 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 0 | 790 | 0 | 0 | 1100 | 2485 |
| 17 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 0 | 470 | 0 | 0 | 0 | 1100 | 2165 |
| 18 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 160 | 260 | 288 | 0 | 1080 | 3083 |
| 19 | 368.8 | 85 | 150 | 0.41 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3703.8 |
| 20 | 354.4 | 85 | 160 | 0.45 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3699.4 |
| 21 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1320 | 0 | 1091 | 3706 |
| 22 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 0 | 0 | 1327.2 | 0 | 1080 | 3702.2 |
| 23 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 700 | 165 | 400 | 0 | 0 | 1080 | 2940 |
| 24 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 350 | 0 | 130 | 1320 | 0 | 1080 | 3475 |
| 25 | 340 | 85 | 170 | 0.5 | 350 | 150 | 0 | 1320 | 0 | 1080 | 3495 |

ตารางที่ 2 ผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีและค่าความหนาของคอนกรีตจากสมการในอดีต

| Trial Mix No. | Total Density ρ (kg/m ³) | I_x/I_0 (thickness of specimen = 100 mm) | μ from $\mu = (-1/x) \cdot \ln(I/I_0)$ (cm ⁻¹) | μ from linearly approx. formula (cm ⁻¹) | μ from Akyuz equation (cm ⁻¹) | Average μ (cm ⁻¹) | HVL from average μ (cm) | Optimum thickness require for 99% radiation shielding (mm) |
|---------------|---|--|--|---|---|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | 3695 | 0.1301 | 0.2039 | 0.2840 | 0.2799 | 0.2559 | 2.71 | 210.54 |
| 2 | 3545 | 0.1448 | 0.1932 | 0.2690 | 0.2395 | 0.2339 | 2.96 | 224.64 |
| 3 | 3395 | 0.1619 | 0.1821 | 0.2540 | 0.2049 | 0.2137 | 3.24 | 240.36 |
| 4 | 3245 | 0.1818 | 0.1705 | 0.2390 | 0.1753 | 0.1949 | 3.56 | 257.96 |
| 5 | 3095 | 0.2054 | 0.1583 | 0.2240 | 0.1500 | 0.1774 | 3.91 | 277.78 |
| 6 | 3715 | 0.1283 | 0.2053 | 0.2860 | 0.2858 | 0.2590 | 2.68 | 208.77 |
| 7 | 3615 | 0.1377 | 0.1983 | 0.2760 | 0.2576 | 0.2440 | 2.84 | 217.88 |
| 8 | 3515 | 0.1480 | 0.1911 | 0.2660 | 0.2321 | 0.2297 | 3.02 | 227.65 |
| 9 | 3675 | 0.1320 | 0.2025 | 0.2820 | 0.2742 | 0.2529 | 2.74 | 212.34 |
| 10 | 3645 | 0.1348 | 0.2004 | 0.2790 | 0.2658 | 0.2484 | 2.79 | 215.08 |
| 11 | 3604 | 0.1388 | 0.1975 | 0.2749 | 0.2547 | 0.2423 | 2.86 | 218.92 |
| 12 | 3325 | 0.1708 | 0.1767 | 0.2470 | 0.1905 | 0.2048 | 3.39 | 248.32 |
| 13 | 3355 | 0.1669 | 0.1791 | 0.2500 | 0.1966 | 0.2085 | 3.32 | 244.85 |
| 14 | 3300 | 0.1741 | 0.1748 | 0.2445 | 0.1856 | 0.2016 | 3.44 | 251.27 |
| 15 | 2565 | 0.3331 | 0.1099 | 0.1710 | 0.0864 | 0.1225 | 5.66 | 372.63 |
| 16 | 2485 | 0.3615 | 0.1018 | 0.1630 | 0.0795 | 0.1148 | 6.04 | 391.56 |
| 17 | 2165 | 0.5155 | 0.0663 | 0.1310 | 0.0570 | 0.0848 | 8.18 | 485.77 |
| 18 | 3083 | 0.2075 | 0.1573 | 0.2228 | 0.1481 | 0.1761 | 3.94 | 279.47 |
| 19 | 3703.8 | 0.1293 | 0.2045 | 0.2849 | 0.2825 | 0.2573 | 2.69 | 209.76 |
| 20 | 3699.4 | 0.1297 | 0.2042 | 0.2844 | 0.2812 | 0.2566 | 2.70 | 210.15 |
| 21 | 3706 | 0.1292 | 0.2047 | 0.2851 | 0.2832 | 0.2576 | 2.69 | 209.57 |
| 22 | 3702.2 | 0.1295 | 0.2044 | 0.2847 | 0.2820 | 0.2571 | 2.70 | 209.90 |
| 23 | 2940 | 0.2344 | 0.1451 | 0.2085 | 0.1277 | 0.1604 | 4.32 | 301.02 |
| 24 | 3475 | 0.1524 | 0.1881 | 0.2620 | 0.2227 | 0.2243 | 3.09 | 231.76 |
| 25 | 3495 | 0.1502 | 0.1896 | 0.2640 | 0.2274 | 0.2270 | 3.05 | 229.69 |



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าความหนาที่ใช้ในการลดทอนความเข้มของรังสี

4. สรุปผลการดำเนินงาน (Conclusion)

1. จากการศึกษามาตรฐานส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานด้านสถานประกอบการทางนิวเคลียร์และรังสีตามมาตรฐานสากลเพื่อคัดเลือกมวลรวมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวมหนัก ได้ข้อสรุปดังนี้

- การกระจายขนาดของมวลรวม ต้องมีขนาดที่คลแตกต่างกันอย่างน้อย 2 ขนาด และมีขนาดมากกว่า 1 นิ้ว
- มีความถ่วงจำเพาะสูงและรายชื่อแร่ที่แนะนำโดยมาตรฐาน

| ชนิดของแร่ | ค่าความถ่วงจำเพาะ |
|------------------|-------------------|
| Serpentine | 2.4 ถึง 2.65 |
| Limonite | 3.4 ถึง 3.8 |
| Goethite | 3.5 ถึง 4.5 |
| Barite | 4.0 ถึง 4.4 |
| Ilmenite | 4.2 ถึง 4.8 |
| Hematite | 4.6 ถึง 5.2 |
| Magnetite | 4.6 ถึง 5.2 |
| Iron | 6.5 ถึง 7.5 |
| Ferrophosphorous | 5.8 ถึง 6.3 |
| Boron Frit | 2.6 ถึง 2.8 |
| Boron Carbide | 2.5 |
| Calcium Boride | 2.5 |

ตารางที่ 3 ชนิดของแร่และความถ่วงจำเพาะจากมาตรฐาน ASTM C637-98a

2. มวลรวมภายในประเทศที่เลือกใช้คือ แร่แบไรต์

3. สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 25 สัดส่วนที่ได้ออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] พ. สุรศักดิ์, "ชื่อนี้มีที่มา (1) รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีแกมมา," 9 เมษายน 2552. [Online]. Available: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc52/nstkc028.html>. [Accessed 16 มีนาคม 2563].
- [2] ค. มาริสา, "รังสีคืออะไร มีกี่ชนิด วัดได้อย่างไร มีผลกระทบต่อสุขภาพมากน้อยแค่ไหน," [Online]. Available: <https://www.mtec.or.th/post-knowledges/3923/>. [Accessed 16 มีนาคม 2563].
- [3] A. CHAIWAT, "ความรู้เกี่ยวกับนิวเคลียร์," 29 มิถุนายน 2559. [Online]. Available: <https://www.oap.go.th/resources/105-articles/nuclear/129-nuclear-terms>. [Accessed 16 มีนาคม 2563].

[4] The American Society of Mechanical Engineers, RULES FOR CONSTRUCTION OF NUCLEAR FACILITY COMPONENTS Division 2, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.

[5] American Nuclear Society, American National Standard Nuclear Analysis and Design Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants, Illinois: American Nuclear Society, 2006.

[6] G. S. Budi, H. Koentjoro, J. Wijaya and E. F. Sikomena, "The attenuation coefficient of barite concrete subjected to gamma-ray radiation," 2019.

[7] M. O. Azeez, S. Ahmad, S. U. Al-Dulajjan, M. Maslehuddin and A. A. Naqvi, "Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures," Construction and Building Materials, pp. 284-291, 2019.