

สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและนิวตรอนของคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GAMMA AND NEUTRON ATTENUATION OF HEAVYWEIGHT CONCRETE USING
AGGREGATES IN THAILAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและนิวตรอนของ
	คอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ
โดย	นายวิศรุต รุ่งเจริญฤทธิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิศรุต รุ่งเจริญฤทธิ : สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและนิวตรอนของคอนกรีตมวล
หนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ. (GAMMA AND NEUTRON ATTENUATION OF
HEAVYWEIGHT CONCRETE USING AGGREGATES IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก
: รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

ปัจจุบันพลังงานนิวเคลียร์ได้ถูกนำมาใช้ในด้านการผลิตพลังงานหรือในกระบวนการทาง
อุตสาหกรรมหรือนำมาใช้รักษาในทางการแพทย์และอนามัย แต่ทว่าในการจะได้มาซึ่งพลังงาน
นิวเคลียร์นั้นจะต้องมีการใช้สารกัมมันตภาพรังสีและมีปลดปล่อยพลังงานและอนุภาคต่างๆออกมา
ซึ่งสิ่งที่ถูกปล่อยออกมานั้นส่งผลเสียกับสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมอีกทั้งยังใช้เวลานานกว่าจะ
สลายไปเอง ดังนั้นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นที่ดีที่สุดคือการป้องกันการรั่วไหลของรังสีที่จะ
เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีที่ดีที่สุดคือการใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่มีความหนาแน่นสูงหรือที่
เรียกว่าคอนกรีตมวลหนัก งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องการป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอน ซึ่งเมื่อ
ได้พิจารณาจากแหล่งวัสดุภายในประเทศเพื่อหาแร่ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้แทนหินในการทำ
คอนกรีตมวลหนักพบว่า แร่แบไรต์ เป็นแร่ที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านการจัดหาและคุณสมบัติใน
การนำมาใช้ทำคอนกรีตมวลหนัก จากนั้นจึงได้ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลจาก 25 สัดส่วน
ผสมเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนักกับค่าสัมประสิทธิ์การ
ลดทอนรังสี จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์
การลดทอนของรังสีแกมมา โดยเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน
รังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้น และการมีเหล็กผสมในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน
รังสีนิวตรอนสูงกว่าในคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กผสมอยู่

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170487221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Heavyweight concrete, Barite, Gamma and Neutron attenuation coefficients

Wisarute Rungjaroenkiti : GAMMA AND NEUTRON ATTENUATION OF HEAVYWEIGHT CONCRETE USING AGGREGATES IN THAILAND. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

At present, nuclear energy is used for power generation or industrial processes or medical and sanitation purposes. However, to obtain nuclear energy, radioactive substances must be used which energies and particles are released. It is released that adversely affects living organisms and their environment which takes a long time to decompose. Therefore, the best protection against possible hazard is to prevent the occurrence of radiation leakage. From several previous research found that the concrete which used for radiation shielding has the property of high density or also known as heavy concrete. This research will focus on protection against gamma and neutron rays. When we are considering domestic material sources to find minerals that can be used as a substitute for aggregates in making heavy concrete. We find that barite is a suitable mineral for both procurement and properties for using in heavy concrete. We collect the data from 25 mixed proportions then we determine the relationship between the density of heavy-weight concrete and the gamma attenuation coefficient. The results showed that the density of the concrete influenced the gamma attenuation coefficient. When the density of the concrete increases, the gamma attenuation coefficient will be increased. The concrete with iron as mixture has more higher neutron attenuation coefficient than the concrete without iron as mixture.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือของคณาจารย์และสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยและการแก้ไขปัญหา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณหน่วยทดสอบวัสดุภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์โยธาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดตัวอย่างและคัดขนาดเพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมนิเวศลิษฐ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบยิงรังสีด้วยแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาและรังสีนิวตรอน ขอขอบพระคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้ทุนในงานวิจัย สุดท้ายนี้หวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ให้กับผู้ที่สนใจและผู้ที่ต้องการนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาองค์กรต่อไป

วิศรุต รุ่งเจริญกิติ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีของคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนรังสี.....	6
2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมาตรฐาน ACI318M-08 กับ ACI349M-13.....	14
2.4 มาตรฐานอื่น ๆที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.5 การค้นหาทรัพยากรที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหนักจากภายในประเทศ.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 การกำหนดส่วนผสมของคอนกรีต	22
3.3 การเตรียมวัสดุมวลรวม	24
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม	24
3.5 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา	25
3.6 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา	26
3.7 การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต	27
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย	28
4.1 ความหนาแน่นของมวลรวม	28
4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีแกมมา	28
4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีนิวตรอน	33
4.4 การหาค่า MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีต	36
4.5 ผลจากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต	37
4.6 การเปรียบเทียบอื่น ๆ จากผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต	40
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	59
ประวัติผู้เขียน	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m ³ ของ Ilker Bekir Topcu ...	7
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบของคอนกรีตมวลหนักของ Ilker Bekir Topcu.....	7
ตารางที่ 4 อัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตมวลหนักของนายदनุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว	8
ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m ³ ของนายเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง ..	9
ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m ³ ของ Ahmed S. Ouda... 12	12
ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่าง f_c '25 MPa ของ Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena	13
ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่าง f_c '35 MPa ของ Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena	13
ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่างของ Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena	14
ตารางที่ 10 ความแตกต่างในเรื่องวัสดุซีเมนต์ระหว่าง ACI318-08 กับ ACI349M-13.....	15
ตารางที่ 11 ความแตกต่างในเรื่องวัสดุมวลรวมระหว่าง ACI318-08 กับ ACI349M-13	16
ตารางที่ 12 แสดงสัดส่วนผสมของที่คอนกรีตจะทำในงานวิจัยนี้.....	22
ตารางที่ 13 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้.....	28
ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Cs-137 (662 keV).....	29
ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Co-60 (1174 keV).....	30
ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Co-60 (1332 keV).....	31

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตจากรังสีนิวตรอน.....	33
ตารางที่ 18 MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีต	36
ตารางที่ 19 ผลกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม	38
ตารางที่ 20 ค่า RBE ของรังสีชนิดต่างๆ (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ พ.ศ.2545)...	54
ตารางที่ 21 ค่า QF ของรังสีชนิดต่างๆ (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ พ.ศ.2545)	54
ตารางที่ 22 ความไวของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะต่อรังสีเอกซ์หรือแกมมา (Acute exposure) ...	55
ตารางที่ 23 ปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Acute exposure).....	56
ตารางที่ 24 ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการรับปริมาณรังสีของร่างกาย (Acute exposure).....	57
ตารางที่ 25 Acute radiation syndrome	58
ตารางที่ 26 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 662 keV	60
ตารางที่ 27 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1174 keV	61
ตารางที่ 28 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1332 keV	62
ตารางที่ 29 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอน	63

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 อิทธิพลของสเมกไทต์ที่มีต่อการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลรวมแบไรต์ของนายตุนุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว.....	9
รูปที่ 2 บริเวณที่มีการขอใบประทานบัตรในการทำเหมืองแร่แบไรต์ที่ได้รับการอนุญาตแล้ว.....	19
รูปที่ 3 บริเวณที่มีการขอใบประทานบัตรในการทำเหมืองแร่แบไรต์ที่ได้รับการอนุญาตแล้วในประเทศ.....	20
รูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในมวลรวมของคอนกรีต.....	23
รูปที่ 5 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา.....	25
รูปที่ 6 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีนิวตรอน.....	26
รูปที่ 7 ตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบทางรังสี.....	27
รูปที่ 8 ตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต.....	27
รูปที่ 9 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (แกมมา).....	32
รูปที่ 10 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (นิวตรอน).....	34
รูปที่ 11 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอน.....	35
รูปที่ 12 ความหนาแน่นกับกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต.....	39
รูปที่ 13 ความหนาแน่นกับกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต.....	39
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 14 – 17.....	40
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 14 – 17....	41
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 24 - 25.....	41
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 24 - 25.....	42
รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 1, 18 และ 23.....	43

รูปที่ 19 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 1, 18 และ 23 43

รูปที่ 20 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20 44

รูปที่ 21 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20 45

รูปที่ 22 การเปรียบเทียบค่ากำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20 45



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประโยชน์จากการใช้พลังงานนิวเคลียร์ไม่ใช่เพียงแค่การผลิตพลังงานสะอาดเพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่การนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์นั้นมีประโยชน์ทั้งการใช้ในด้านอุตสาหกรรม, การปรับปรุงพืชในการเกษตรและใช้ในการรักษาทางการแพทย์ได้อีกด้วย แต่การให้ได้มาซึ่งพลังงานนิวเคลียร์จะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีและอนุภาคต่าง ๆ จากการใช้สารกัมมันตภาพรังสี และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับมากเกินไป โดยรังสีที่อาจเกิดขึ้นได้จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีประกอบด้วย

“รังสีแอลฟา คือ นิวเคลียสของธาตุฮีเลียม (ประกอบด้วยโปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว) ที่หลุดออกมาจากนิวเคลียส เนื่องจากมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการแตกตัวของตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน จึงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุได้ระยะทางสั้นมากหรือกล่าวได้ว่าอำนาจในการทะลุทะลวงต่ำที่สามารถใช้กระดาษบางแผ่นเดียวก็สามารถกันได้ ใช้ประโยชน์ในเครื่องตรวจจับควัน

รังสีบีตา เกิดจากความไม่สมดุลของแรงกระทำระหว่างอนุภาคโปรตอนและนิวตรอน เพราะมีนิวตรอนในนิวเคลียสมากเกินไป ทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนแผ่ออกมาจากนิวเคลียส มีขนาดที่เล็กกว่าอนุภาคแอลฟาอำนาจทำให้ตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการแตกตัวน้อยกว่า แต่สามารถทะลุผ่านวัตถุได้หนากว่า ใช้ประโยชน์ในการควบคุมความหนาของกระดาษและใช้วางไว้ที่ตาหลังการผ่าตัดต่อกระจกเพื่อไม่ให้กลับมาเป็นอีกครั้ง

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส หลังจากรังสีแอลฟาหรืออนุภาครังสีชนิดต่าง ๆ โดยนิวไคลด์ลูกยังไม่เสถียร จึงต้องลดพลังงานลงจากการให้รังสีแกมมา เพื่อให้เกิดความเสถียร สามารถทำให้ตัวกลางที่ผ่านแตกตัวได้และมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมาก

รังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงเหมือนกับรังสีแกมมาแต่จุดกำเนิดอยู่ที่ชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม เป็นผลมาจากการเร่งอนุภาคเข้าไปในอะตอม

รังสีนิวตรอน คือ อนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในสภาวะอิสระและมีพลังงาน โดยปกติจะไม่สามารถคงอยู่ในสภาพได้นานเพราะจะแตกตัวออกเป็นอนุภาคนิวคลีออนอื่น มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถถูกยับยั้งการเคลื่อนที่ได้ด้วยสารที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ” [1]

จากความรู้เกี่ยวกับรังสีที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานนิวเคลียร์ที่มีความอันตรายสูงเทียบกับรังสีอื่น คือ รังสีแกมมาและนิวตรอน เนื่องด้วยการที่เป็นคลื่นพลังงานสูงที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงและยังทำให้ตัวกลางที่เดินทางผ่านเกิดการแตกตัวทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับรังสีในปริมาณมาก นอกจากนี้รังสียังไม่มีสี กลิ่น หรือสิ่งที่สามารถสังเกตได้ อาการที่เกิดขึ้นได้จากการรับรังสีแกมมาไม่ว่าร่างกายได้รับรังสีเข้าไปแบบได้รับรังสีปริมาณมากในช่วงเวลาสั้นๆ หรือได้รับรังสีปริมาณน้อยในช่วงเวลานาน เช่น ผิวหนังไหม้ ผมร่วง จำนวนเม็ดเลือดน้อยลง เป็นต้น จากหลักการป้องกันอันตรายจากรังสีจากภายนอกที่มียู่ 3 ข้อ คือ

- (1) ลดเวลาในการรับรังสีให้น้อยที่สุด
- (2) อยู่ให้ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุด
- (3) ใช้เครื่องกำบังที่เหมาะสม

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเข้าหลักการป้องกันโดยการใช้เครื่องกำบังที่เหมาะสม โดยการสร้างคอนกรีตที่ใช้ป้องกันการรั่วไหลของรังสี โดยจะใช้เป็นคอนกรีตมวลหนักที่มีความหนาแน่นสูง ใช้เป็นส่วนโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างที่จะใช้กักเก็บและป้องกันการรั่วไหลของรังสี โดยพิจารณาความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตและความหนาของคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.) เพื่อศึกษามาตรฐานส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานด้านสถานประกอบการทางนิวเคลียร์และรังสี
- 2.) สืบหาแหล่งแร่และปริมาณที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการกำบังรังสี
- 3.) นำเสนอส่วนผสมของคอนกรีตที่เป็นไปได้และทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.) ศึกษาคุณสมบัติการลดทอนรังสีของคอนกรีต โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาจาก โคบอลต์-60 (^{60}Co) และ ซีเซียม-137 (^{137}Cs) และแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน
- 2.) ศึกษาโดยอ้างอิงมาตรฐานจาก ACI 349-M13, ACI 228.2R-13, ACI211.1-91, ANSI/ANS-6.4-2006 (R2016) และ BPVC-III-2 – 2019

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี และความหนาแน่นของ คอนกรีตมวลหนัก
- 2.) แสดงองค์ประกอบของคอนกรีตมวลหนักที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติในการลดทอนรังสีแกมมาที่มีปริมาณมวลรวมในสัดส่วนผสมและชนิดมวลรวมที่แตกต่างกัน

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.) ศึกษางานวิจัยที่แล้วมาของการลดทอนรังสีของคอนกรีตมวลหนัก
- 2.) ศึกษาวัสดุที่หาได้ในประเทศเพื่อนำมาทำมวลรวมหนัก
- 3.) เขียนโครงร่างวิจัยและเสนองานวิจัย
- 4.) จัดหาวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบ
- 5.) หล่อตัวอย่างคอนกรีตที่จะใช้ในการทดสอบ
- 6.) ทดสอบตัวอย่างคอนกรีต
- 7.) เปรียบเทียบผลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ
- 8.) สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และนำเสนอบทความวิชาการ

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี

ACI 304.3R-96 ได้ให้นิยามไว้ว่า คอนกรีตมวลหนักนั้นใช้ในการถ่วงน้ำหนักของสะพานที่สามารถยกขึ้นได้ แต่โดยทั่วไปจะใช้ในโครงสร้างป้องกันรังสีและแตกต่างจากคอนกรีตน้ำหนักปกติโดยมีความหนาแน่นสูงกว่าและองค์ประกอบพิเศษเพื่อพัฒนาคุณสมบัติในการลดทอนรังสี เมื่อใช้คอนกรีตมวลหนักป้องกันเพื่อลดนิวตรอนควรรวมวัสดุที่สามารถก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนอยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตด้วย นอกจากนี้ยังได้แนะนำให้ใช้สัดส่วนผสม ที่ w/c ประมาณ 0.6 เพื่อการป้องกันนิวตรอนของน้ำส่วนเกินในคอนกรีต [2]

เราสามารถทำการลดทอนรังสีได้โดยการนำวัสดุมาบังรังสี หากวัสดุนั้นมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีส่งผลให้ความเข้มของรังสีลดลงขึ้นกับความหนาของวัสดุนั้น ซึ่งอัตราการลดลงของปริมาณรังสีสามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนาและหาได้จากสมการ (2.2) ที่ได้มาจากการสมการที่ (2.1)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ ลัย} \quad (2.2)$$

โดยที่

- I = ความเข้มชั้นของรังสีเมื่อมีการกำบังรังสี
- I_0 = ความเข้มชั้นของรังสีเมื่อไม่มีกำบังรังสี
- μ = ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีเชิงมวล (g/cm^2)
- x = ความหนา (cm)

หรือสามารถเขียนสมการได้เป็นสมการที่ (3)

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad (2.3)$$

โดยที่

- ρ = ความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ

ซึ่งหลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแล้ว จะต้องนำมาคำนวณหาค่า Mean Free Path (MFP), Half Value Layer (HVL), และ Tenth Value Layer (TVL) [3, 4] ตามสมการที่ (2.4), (2.5), และ (2.6)

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (2.4)$$

MFP คือ ระยะทางเฉลี่ยที่รังสีเคลื่อนที่ได้ ก่อนที่จะมีปฏิกิริยากับวัสดุกำบัง

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.5)$$

HVL คือ ความหนาของวัสดุกำบังที่สามารถลดความเข้มของรังสีลงเหลือ 50% ของความเข้มรังสีจากแหล่งกำเนิด

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (2.6)$$

TVL คือ ความหนาของวัสดุกำบังที่สามารถลดความเข้มของรังสีลงเหลือ 10% ของความเข้มรังสีจากแหล่งกำเนิด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนรังสี

ในปี ค.ศ. 2003 Ilker Bekir Topcu [5] ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลหนักที่ทำจากแบไรต์ โดยมีการทดสอบคุณสมบัติของแบไรต์ที่นำมาใช้ทำคอนกรีตมวลหนัก จากนั้นในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต Ilker Bekir Topcu ได้ปรับเปลี่ยน w/c ให้แตกต่างกันใน 7 สัดส่วนผสม และซีเมนต์ที่แตกต่างกัน 2 ประเภท

จากการทดสอบ Ilker Bekir Topcu พบว่า w/c ที่ดีที่สุดสำหรับคอนกรีตมวลหนัก คือ 0.40 และปริมาณปูนซีเมนต์ไม่ควรต่ำกว่า 350 กก. / ลบ.ม. เนื่องจากให้กำลังสูงสุด มีช่องว่างในคอนกรีตน้อยและมีความสามารถในการทำงานดี

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m³ ของ Ilker Bekir Topcu

W/c ratio	Amount of water (kg/m ³)	Amount of cement (kg/m ³)	Amount of aggregate (kg/m ³)	Absorbed water (kg/m ³)	Slump (cm)
0.30	105	350	3038	24.30	0.5
0.35	123	350	2967	23.70	1.0
0.40	140	350	2876	23.00	1.5–2
0.45	158	350	2835	22.65	2.5
0.50	175	350	2756	22.00	4-5
0.55	193	350	2683	21.46	6-7
0.60	210	350	2615	20.92	7.0

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบของคอนกรีตมวลหนักของ Ilker Bekir Topcu

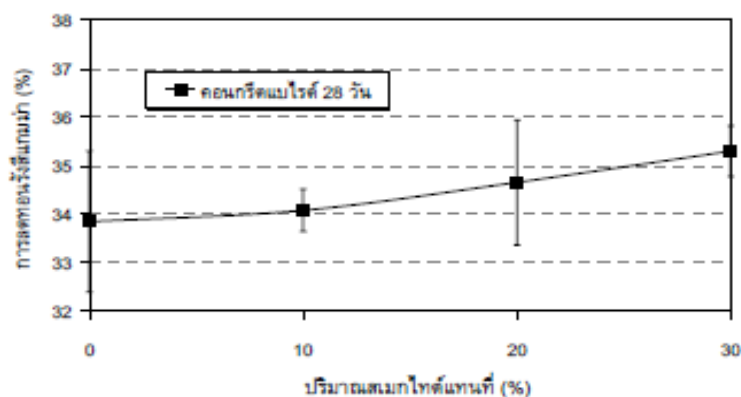
Cement type	W/c ratio	Unit weight (kg/m ³)	Resonance frequency (kHz)	Ultrasound duration (μs)	Schmidt hardness	Compressive strength (MPa)
PKC 32.5	0.30	3288	3.08	68.9	36	31.8
	0.35	3280	3.10	69.1	34	31.1
	0.40	3272	3.10	68.2	34	31.2
	0.45	3247	3.09	69.4	35	29.2
	0.50	3227	3.13	70.5	35	28.6
	0.55	3220	3.14	70.8	33	27.6
	0.60	3203	3.14	70.6	33	26.0
PC 42.5	0.30	3359	3.10	69.1	44	40.1
	0.35	3356	3.11	69.5	43	39.4
	0.40	3346	3.11	69.5	42	42.6
	0.45	3322	3.13	69.9	40	35.9
	0.50	3309	3.15	70.8	40	35.6
	0.55	3296	3.15	71.0	39	33.8
	0.60	3278	3.16	71.2	39	32.5

ในปี ค.ศ. 2009 นายตุนุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว [6] ได้ศึกษาเรื่องการกำบังรังสีของคอนกรีตมวลรวมแบไรต์ผสมผงเมกไทด์ โดยการผสมผงเมกไทด์ลงไปคอนกรีตมวลหนักที่มีมวลรวมเป็นแบไรต์ในสัดส่วนที่ต่างกันทั้งหมด 3 อัตราส่วนด้วยกัน คือ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งคอนกรีตมวลหนักมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อแบไรต์มวลรวมละเอียด 1:2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.4 มาทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตตัวอย่าง โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเป็น Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV

จากการทดสอบนายตุนุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว ได้สรุปผลว่าผงเมกไทด์ช่วยชะลอเวลาการก่อตัวของเพสต์และมีความต้องการน้ำมากขึ้นในการหล่อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง ส่วนการดูดซึมน้ำและความต้านทานไฟฟ้าประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตมวลหนักของนายตุนุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว

วัสดุผสม	อัตราส่วนผสม			
	ปริมาณ (กก./ลบ.ม.)			
	0	10	20	30
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	350	333	296	259
มวลรวมแบไรต์หยาบ	1750	1750	1750	1750
มวลรวมแบไรต์ละเอียด	1100	1100	1100	1100
ผงเมกไทด์	0	37	74	111
น้ำ	140	140	140	140
W/B	0.4	0.4	0.4	0.4



รูปที่ 1 อิทธิพลของสเมกไทต์ที่มีต่อการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลรวมแบบไร้ซีเมนต์ของนายคุณุพล ตันนโยภาส และ นายวิชัย นกแก้ว

ในปี ค.ศ. 2011 นายเอกสิทธิ์ วงศ์จิริง [7] ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมและคอนกรีตมวลหนักแบบไม่ทำลาย โดยการใช้สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งอิงตามงานวิจัย Properties of heavyweight concrete produced with barite ของ Topcu มาทำการทดสอบด้วยค้อนกระแทกจากตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 cm * 10 cm * 10 cm และการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิคจากตัวอย่างพื้นและคาน โดยตัวอย่างคานมีขนาด 10 cm * 50 cm * 10 cm และตัวอย่างพื้นมีขนาด 30 cm * 30 cm * 10 cm

จากนั้นจึงตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีด้วยรังสีแกมมาโดยนำตัวอย่างคานหลังจากการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิคมาตัดให้มีหน้าตัด 10 cm * 10 cm หนา 2 cm เพื่อนำมาทดสอบการป้องกันรังสีที่ความหนา 2, 4, 6, 8 และ 10 cm ก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีในแต่ละตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m³ ของนายเอกสิทธิ์ วงศ์จิริง

ชนิดคอนกรีต (w/c, %CA)	ปูนซีเมนต์ kg/m ³	เถ้าลอย kg/m ³	W/B	น้ำ kg/m ³	มวลรวม หยาบ kg/m ³	มวลรวม ละเอียด kg/m ³
B-3 (0.50, 0.55)	350	-	0.5	175	2150	604
B-4 (0.57, 0.45)	350	-	0.57	200	1760	920
B-5 (0.57, 0.55)		-			1955	711
B-6 (0.57, 0.55)		-			2150	500

ชนิดคอนกรีต (w/c, %CA)	ปูนซีเมนต์ kg/m ³	เถ้าลอย kg/m ³	W/B	น้ำ kg/m ³	มวลรวม หยาบ kg/m ³		มวลรวม ละเอียด kg/m ³	
B-7 (0.65, 0.45)	350	-	0.65	228	1760		803	
B-8 (0.65, 0.50)	315	35			1955		593	
B-9 (0.65, 0.55)	280	70			2150		384	
S-1 (0.50, 0.55)	350	-	0.5	175	2288		604(B)	
BF-1 (0.57, 0.55)	315	35	0.57	200	2150		500	
BF-2 (0.57, 0.55)	280	70			2150		500	
BF-3 (0.57, 0.55)	245	105			2150		500	
BF-4 (0.57, 0.55)	210	140			2150		500	
N-1 (0.50, 0.45)	350	-	0.5	175	1215		646	
N-2 (0.50, 0.55)		-			1350		514	
N-3 (0.50, 0.50)		-			1485		317	
NF-0 (0.57,0.55)	350	-	0.57	200	1485		317	
NF-1 (0.57,0.55)	315	35			1485		317	
NF-2 (0.57,0.55)	280	70			1485		317	
NF-3 (0.57,0.55)	245	105			1485		317	
NF-4 (0.57,0.55)	210	140			1485		317	
Bo type					B	L	B	S
BO-1 (0.57,0.55)	350	-	0.57	200	572	1114	146	277
BO-2 (0.57,0.55)		-			1144	743	292	185
BO-3 (0.57,0.55)		-			1716	371	439	92

%CA = อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตโดยปริมาตร

B = แบริ่ง L = หินปูน S = ทราย

ซึ่งในงานวิจัยนี้ นายเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง พบว่าความเร็วคลื่นในมวลรวมสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความเร็วคลื่นในคอนกรีตที่รู้สัดส่วนผสมได้ รวมถึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีได้อีกด้วย นั่นคือสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นและประมาณได้ด้วยการใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ในปี ค.ศ. 2014 Ahmed S. Ouda [8] ได้ทำการเตรียมส่วนผสมคอนกรีต 15 สัดส่วนผสมใช้มวลรวมหยาบของแบไรต์ (barite) แมกไนต์ (magnetite), โกเอไทต์ (goethite) และเซอร์เพนไทต์ (serpentine) พร้อมกับการเติมซิลิกาฟูม (SF) 10% เถ้าลอย (FA) 20% และตะกรันเตาหลอมแบบบดละเอียด (GGBFS) 30% ของคอนกรีตแต่ละสัดส่วนการผสม โดยทุกสัดส่วนผสมมี w/c คงที่อยู่ที่ 0.35; ปริมาณปูนซีเมนต์ 450 กก. / ลบ.ม. และอัตราส่วนทรายต่อมวลรวม คือ 40% สำหรับการทดสอบคอนกรีตความหนาแน่นสูงที่มีประสิทธิภาพสูง

ในงานวิจัยนี้มีการวัดความหนาแน่นของคอนกรีตสดและคอนกรีตหลังจากแข็งตัวแล้ว หลังจากคอนกรีตแข็งตัวจะได้รับการทดสอบกำลังต้านแรงอัดที่ 7, 28 และ 90 วัน ส่วนการวัดการลดทอนรังสีทำโดยการใช้ gamma spectrometer ของ NaI (TI) scintillation detector ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในการวัดการลดทอนรังสีคือ Cs-137 ที่มีพลังงานโฟตอน 0.662 MeV และ Co-60 ที่มีระดับพลังงานสองระดับคือ 1.173 และ 1.333 MeV

ซึ่งผลงานวิจัยของ Ahmed S. Ouda พบว่า คอนกรีตที่ทำจากมวลรวมแบไรต์มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่ามวลรวมของแมกไนต์, โกเอไทต์และเซอร์เพนไทต์ ส่วนการดูดซึมน้ำของมวลรวมโกเอไทต์ยังสูงกว่ามวลรวมของแบไรต์แมกไนต์และเซอร์เพนไทต์หลายเท่า และคอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมดีแมกไนต์ยังมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เชิงกลสูงกว่าคอนกรีตที่มีแบไรต์และโกเอไทต์ เขาจึงสรุปว่าในการทำคอนกรีตความหนาแน่นสูงที่มีประสิทธิภาพสูงหากทำด้วยมวลรวมด้วยส่วนผสมของแมกไนต์ละเอียดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาจาก Cs-137 และ Co-60

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m³ ของ Ahmed S. Ouda

Mixes	Concrete ingredients, kg/m ³										
	OPC	Fine aggregates		Coarse aggregates				Pozzolanic materials			SP
		Sand	Fine portion	M	B	G	S	SF	GGBFS	FA	
M1	450	909	-	1126	-	-	-	45	-	-	9.7
M2	450	905	-	1106	-	-	-	-	-	90	9.7
M3	450	874	-	1068	-	-	-	-	135	-	9.7
M4	450	-	1036	1235	-	-	-	45	-	-	11.2
B1	450	778	-	-	1457	-	-	45	-	-	9.5
B2	450	778	-	-	1457	-	-	-	-	90	10.8
B3	450	778	-	-	1457	-	-	-	135	-	11.3
B4	450	-	1246	-	1457	-	-	45	-	-	10.8
G1	450	700	-	-	-	855	-	45	-	-	10.4
G2	450	682	-	-	-	832	-	-	-	90	10.4
G3	450	673	-	-	-	323	-	-	135	-	10.4
G4	450	-	933	-	-	1072	-	45	-	-	10.4
S1	450	909	-	-	-	-	1126	45	-	-	9.7
S2	450	905	-	-	-	-	1106	-	-	90	9.7
S3	450	874	-	-	-	-	1068	-	135	-	9.7

ในปี ค.ศ. 2018 Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena [9] ได้นำเสนอการใช้แบริดเป็นมวลรวมคอนกรีตเพื่อป้องกันรังสีแกมมา โดยการเตรียมคอนกรีต f_c' 25 MPa กับ 35 MPa จากนั้นทำการศึกษาผลของแบริดต่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวอย่างโดยการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยแบริดและแทนที่มวลรวมหยาบและมวลละเอียดด้วยแบริด

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่าง f_c '25 MPa ของ Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena

Specimen	Thickness (cm)	Exposure (mGy)	Linear attenuation coef. μ (cm^{-1})
Normal concrete	3	25.126	0.205
	6	19.923	0.150
	10	8.842	0.166
Concrete with barite as coarse aggregates	3	23.253	0.230
	6	12.356	0.221
	10	5.018	0.222
Concrete with barite as coarse and fine aggregates	3	19.240	0.294
	6	13.573	0.205
	10	4.214	0.240

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่าง f_c '35 MPa ของ Gogot Setyo Budi, Hurijanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena

Specimen	Thickness (cm)	Exposure (mGy)	Linear attenuation coef. μ (cm^{-1})
Normal concrete	3	23.646	0.225
	6	16.506	0.172
	10	8.159	0.174
Concrete with barite as coarse aggregates	3	20.597	0.271
	6	9.419	0.266
	10	4.867	0.226
Concrete with barite as coarse and fine aggregates	3	18.668	0.304
	6	9.331	0.267
	10	3.486	0.259

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวอย่างของ Gogot Setyo Budi, Huriyanto Koentjoro, Joshua Wijaya, และ Evan Filbert Sikomena

Specimen	Concrete f_c' 25 MPa		Concrete f_c' 35 MPa	
	Density (kg/m^3)	Linear attenuation ion coef. (cm^{-1})	Density (kg/m^3)	Linear attenuation ion coef. (cm^{-1})
Normal concrete	2252	0.173	2323	0.190
Concrete with barite as coarse aggregates	3004	0.225	3064	0.254
Concrete with barite as coarse and fine aggregates	3461	0.246	3464	0.277

ซึ่งผลการทดลองของ Gogot Setyo Budi ทำให้เห็นว่าความสามารถในการป้องกันของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมเป็นแบไรต์ทั้งหมดภายใต้รังสีแกมมานั้นดีกว่าคอนกรีตที่ใช้แบไรต์เป็นมวลรวมหยาบและคอนกรีตแบบธรรมดา

2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมาตรฐาน ACI318M-08 กับ ACI349M-13

ปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยได้กำหนดให้ใช้แนวทางในการออกแบบจากประมวล ซึ่งอ้างอิงจากประมวลการออกแบบคอนกรีตของสถาบันคอนกรีตแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ ACI ซึ่งที่ใช้กันทั่วไปในงานก่อสร้างจะใช้มาตรฐาน Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary [10] แต่สำหรับงานก่อสร้างที่เกี่ยวกับพลังงานนิวเคลียร์จะใช้มาตรฐาน Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349M-13) and Commentary [11] โดยจะทำการเปรียบเทียบในส่วนของวัสดุที่ไม่ใช่การเสริมเหล็ก ซึ่งนำกับสารผสมเพิ่มในสองมาตรฐานนี้จะกำหนดไว้เหมือนกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้ถัาลอยผสมในทุกส่วนผสมซึ่งทั้งสองมาตรฐานอ้างตามมาตรฐาน ASTM C618 [12] และน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต้องเป็นไปตาม ASTM C1602M [13] หรือจะต้องไม่มีคลอไรด์ไอออนที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต เหมือนกันทั้งสองมาตรฐาน

ตารางที่ 10 ความแตกต่างในเรื่องวัสดุซีเมนต์ระหว่าง ACI318-08 กับ ACI349M-13

ACI318M-08	ACI349M-13
<p>1. วัสดุซีเมนต์จะต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องดังนี้:</p> <p>(ก) Portland cement: ASTM C150;</p> <p>(ข) Blended hydraulic cements: ASTM C595 ไม่รวม Type IS (≥ 70), ซึ่งไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักในการประสานของคอนกรีตโครงสร้าง;</p> <p>(ค) Expansive hydraulic cement: ASTM C845;</p> <p>(ง) Hydraulic cement: ASTM C1157;</p> <p>(จ) Fly ash and natural pozzolan: ASTM C618;</p> <p>(ฉ) Ground-granulated blast-furnace slag: ASTM C989;</p> <p>(ช) Silica fume: ASTM C1240</p> <p>2. วัสดุประสานที่ใช้ในงานต้องสอดคล้องกับวัสดุที่ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการเลือกสัดส่วนผสมคอนกรีต</p>	<p>1. เหมือนกันกับ ACI 318M-08.</p> <p>2. เหมือนกันกับ ACI 318M-08.</p>

ในส่วน of วัสดุซีเมนต์จะมีความแตกต่างกันตรงที่ใน ACI 349M-13 ในการขนส่งปูนซีเมนต์ทุกครั้งจะต้องมาพร้อมกับรายงานผลการทดสอบที่ผ่านการรับรองจากโรงงานซึ่งระบุผลการทดสอบที่เป็นตัวแทนของปูนซีเมนต์ที่ทำการจัดส่งและข้อจำกัดของคุณสมบัติตาม ASTM ในคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเสริม ไม่ควรใช้ซีเมนต์ในคอนกรีตโครงสร้างใด ๆ ก่อนรับผลการทดสอบความแข็งแรงที่ 7 วันตามมาตรฐาน ASTM C109

ตารางที่ 11 ความแตกต่างในเรื่องวัสดุมวลรวมระหว่าง ACI318M-08 กับ ACI349M-13

ACI318M-08	ACI349M-13
<p>1. มวลรวมคอนกรีตต้องเป็นไปตามข้อกำหนดข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้:</p> <p>(ก) ธรรมดา: ASTM C33;</p> <p>(ข) มวลเบา: ASTM C330.</p> <p>ข้อยกเว้น: มวลรวมที่แสดงโดยการทดสอบหรือการใช้งานที่เกิดขึ้นจริงเพื่อผลิตคอนกรีตที่มีความแข็งแรงและความทนทานเพียงพอและได้รับการอนุมัติจากเจ้าหน้าที่ก่อสร้างอาคาร</p> <p>2. ขนาดสูงสุดที่กำหนดของมวลรวมหยาบจะต้องไม่ใหญ่กว่า:</p> <p>(a) 1/5 ของด้านที่แคบที่สุดระหว่างด้านของมวลรวมหยาบไม้</p> <p>(b) 1/3 ความลึกของมวลรวมหยาบไม้</p> <p>(c) 3/4 ของระยะที่น้อยที่สุดระหว่างช่วงของเหล็กเสริม กลุ่มเหล็กเสริม หรือลวดสำหรับคอนกรีตอัดแรง</p>	<p>1. มวลรวมคอนกรีตต้องเป็นไปตามข้อกำหนดข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้:</p> <p>(ก) ธรรมดา: ASTM C33;</p> <p>(ข) กำบังรังสี: (ASTM C637).</p> <p>ข้อยกเว้น: มวลรวมที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 หรือ C637 แต่ได้รับการแสดงโดยการทดสอบพิเศษหรือบริการจริงเพื่อผลิตคอนกรีตที่มีความแข็งแรงและความทนทานเพียงพอสำหรับคอนกรีตธรรมดาต้องได้รับอนุญาตจากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและได้รับใบอนุญาต</p> <p>2. เหมือนกันกับ ACI 318M-08.</p>

2.4 มาตรฐานอื่น ๆที่เกี่ยวข้อง

นอกเหนือจาก ACI318M-08 และ ACI349M-13 ที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ยังมีมาตรฐานอื่นที่ได้กล่าวถึงหรือถูกใช้อ้างอิงในงานคอนกรีตมวลหนักและการป้องกันรังสีจากงานนิวเคลียร์ เช่น

1.) Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) [14]

เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเลือกสัดส่วนสำหรับคอนกรีตซีเมนต์ไฮดรอลิกที่มีและไม่มีวัสดุประสานและส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ ซึ่งคอนกรีตนี้ประกอบด้วยมวลรวมปกติ และ / หรือ มวลรวมความหนาแน่นสูง ที่มีความสามารถในการทำงานได้เหมาะสำหรับการก่อสร้างแบบหล่อในสถานที่

2.) Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13) [15]

เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเพื่อประเมินสภาพของคอนกรีตในฐานรากลึกระหว่างอาคารทางเท้าเชื่อมและการก่อสร้างคอนกรีตอื่น ๆ แต่ไม่ได้รวมถึงการทดสอบใน ACI 437R

3.) American National Standard Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants (ANSI/ANS-6.4-2006) [16]

เป็นมาตรฐานที่ประกอบด้วยวิธีการและข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้เพื่อการคำนวณความหนาของคอนกรีตที่ต้องการสำหรับการป้องกันรังสีในพลังงานนิวเคลียร์ และมีการให้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหนัก ได้แก่

- (1) อิลเมไนต์ (Ilmenite) มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 4.72 ± 0.04 ในแร่บริสุทธิ์
- (2) ไลโมนไนต์ (Limonite) มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.7 ถึง 4.3
- (3) แมกนีไทต์ (Magnetite) มีความถ่วงจำเพาะ 5.17 ในแร่บริสุทธิ์
- (4) แบไรต์ (Barite) มีความถ่วงจำเพาะ 4.5 ในแร่บริสุทธิ์

4.) 2019 ASME BPVS Section III – Rules For Construction Of Nuclear Facility Component Division 2 Code for Concrete Containments (The American Society of Mechanical Engineers, 2019) [17]

เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงองค์ประกอบของการก่อสร้างที่มีความเกี่ยวข้องกับงานนิวเคลียร์ โดยในส่วนที่กล่าวถึงคอนกรีตมวลหนักซึ่งได้ระบุไว้ว่ามวลรวมหนักที่ใช้ต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 2600 kg/m^3 และเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังนี้

- (1) ASTM C637
- (2) ข้อกำหนดในการก่อสร้างสำหรับงานเจาะเหล็ก งานเหล็กเสริมแรงฉีกรอง งานยิงเหล็กหรือวัสดุที่มีโบรอนใช้เป็นมวลรวมของคอนกรีต

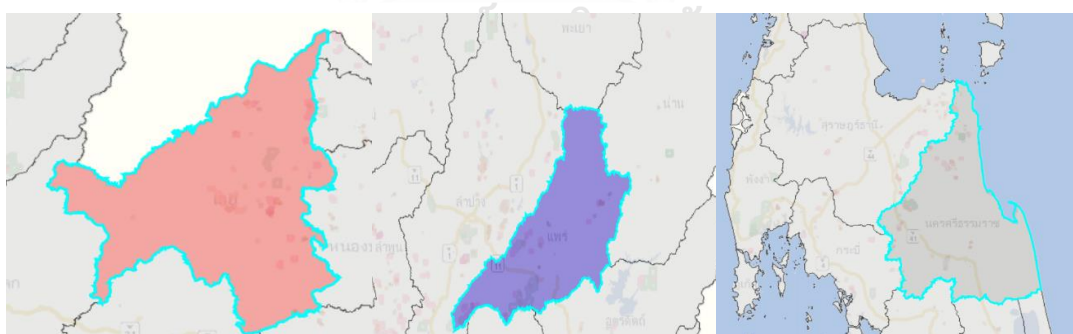
5.) ASTM Standards

1. ASTM C109 [18] – มาตรฐานเกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดของของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 2 in. หรือ 50 mm.
2. ASTM C150 [19] – มาตรฐานเกี่ยวกับใช้งานปูนซีเมนต์ 8 ประเภท ดังนี้
 - (1) Type 1: ใช้สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่ไม่มีการระบุคุณสมบัติพิเศษของคอนกรีตเพิ่มเติม
 - (2) Type 1A: Type 1 ที่มีการผสมสารกักกระจายฟองอากาศ
 - (3) Type 2: ใช้ในงานที่ต้องทนทานต่อซัลเฟตหรือลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน
 - (4) Type 2A: Type 2 ที่มีการผสมสารกักกระจายฟองอากาศ
 - (5) Type 3: ใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูงเร็ว
 - (6) Type 3A: Type 3 ที่มีการผสมสารกักกระจายฟองอากาศ
 - (7) Type 4: ใช้ในงานที่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ
 - (8) Type 5: ใช้ในงานที่ต้องการความสามารถทนทานต่อซัลเฟตสูง
3. ASTM C33 [20] – มาตรฐานเกี่ยวกับการกำหนดสิ่งที่เป็นสำหรับการจัดลำดับและคุณภาพของมวลรวมละเอียดและหยาบสำหรับใช้ในคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมเบาและมวลรวมหนัก
4. ASTM C330 [21] – มาตรฐานที่ครอบคลุมถึงมวลรวมน้ำหนักเบาที่มีไว้สำหรับใช้ในคอนกรีตโครงสร้างซึ่งมีใจความหลักคือการลดความหนาแน่นในขณะที่สามารถรักษากำลังอัดของคอนกรีตไว้ได้
5. ASTM C39 [22] – มาตรฐานที่ครอบคลุมถึงการกำหนดกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตทรงกระบอก ที่มีหน่วยน้ำหนักเกินกว่า 800 kg/m³
6. ASTM C637 [23] - มาตรฐานเกี่ยวกับวัสดุมวลรวมของคอนกรีตที่ใช้ในการป้องกันรังสี โดยพิจารณาถึงส่วนประกอบและความถ่วงจำเพาะที่สูงของมวลรวมเป็นหลัก

2.5 การค้นหาทรัพยากรที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหนักจากภายในประเทศ

ประเทศไทยมีแหล่งแร่ชนิดต่าง ๆ กระจายอยู่ทั่วไป เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนด้านทรัพยากรแร่ของประเทศไทย จึงได้มีการค้นคว้าแหล่งแร่ชนิดต่าง ๆ กระจายอยู่ทั่วไป รวมถึงการพิจารณาความง่ายในการจัดหาโดยพิจารณาถึงเหมืองที่เปิดทำการผลิตแร่ในปัจจุบันจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เกี่ยวกับแร่ชนิดต่าง ๆ ที่พบในแต่ละพื้นที่ของประเทศ

จากงานวิจัยของนายพลยุทธ ทองผาสุก, นายธนกร พันหา และนายปณณวิษญ์ พลະศุณย์ (ค.ศ.2019) ซึ่งทำให้เราสามารถพิจารณาว่าแร่ใดนั้นเหมาะกับการนำมาเป็นมวลรวมหนักของคอนกรีตป้องกันรังสีพบว่าการใช้แร่แบไรต์มีความเหมาะสม เนื่องจากผลจากการศึกษาแร่ภายในประเทศไม่พบเหมืองแร่ชนิดอื่นที่มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าแบไรต์ โดยจะใช้ของที่มีคุณสมบัติผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรมและมีแหล่งที่มาภายในประเทศที่เปิดทำการอยู่ในปัจจุบัน [24] ซึ่งจากการหาข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ [25] เหมืองแร่ที่มีใบอนุญาตประทานบัตรเหมืองอยู่ใน 3 จังหวัด คือ จังหวัดแพร่ จังหวัดเลยและจังหวัดนครศรีธรรมราช



รูปที่ 2 บริเวณที่มีการขอใบประทานบัตรในการทำเหมืองแร่แบไรต์ที่ได้รับการอนุญาตแล้ว

จังหวัดเลย - สีส้ม จังหวัดแพร่ - สีม่วง จังหวัดนครศรีธรรมราช - สีเทา

จากระบบภูมิสารสนเทศอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (ธันวาคม 2020)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3 บริเวณที่มีการขอใบประทานบัตรในการทำเหมืองแร่แบไรต์ที่ได้รับการอนุญาตแล้วในประเทศ
จากระบบภูมิสารสนเทศอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (ธันวาคม 2020)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 - ใช้ในงานโครงสร้าง เอสซีจี (ปูนซีเมนต์ถุง 50 กก.)
2. น้ำประปา - มีคุณสมบัติทางกายภาพ ไม่มีกลิ่นและรส ความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 มีความขุ่นไม่เกิน 4 NTU (Nephelometric Turbidity Units) มีสีปรากฏไม่เกิน 15 Pt-Co Unit (Platinum Cobalt Units)
3. ทราเยมน้ำ - ที่มีขนาดใหญ่สุดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเล็กสุดค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 100
4. หินปูน - ที่มีขนาดใหญ่สุดผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” และเล็กสุดค้างที่ตะแกรงเบอร์ 4
5. แร่แบไรต์ - จากแหล่งแร่ในจังหวัดแพร่และจังหวัดเลย
6. เหล็กข้ออ้อย - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.
7. ถ้ำลอย - จากโรงไฟฟ้าถ่านหินในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
8. เศษหินแกรนิต - จากเหมืองหินเทพศิลาในจังหวัดชลบุรี

2.) เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย

1. แบบหล่อคอนกรีต
2. เครื่องผสมคอนกรีตชนิดใบพัดกวน pan mixer
3. เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต
4. อุปกรณ์ทดสอบบร้งสี่ และแหล่งกำเนิดรังสี
5. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะ
6. เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (Compression Machines)
7. เครื่องมือบดแร่

3.2 การกำหนดส่วนผสมของคอนกรีต

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอนของคอนกรีตนั้นขึ้นกับความหนาแน่นเป็นสำคัญ จึงได้มีการกำหนดส่วนผสมของคอนกรีตขึ้นทั้งหมด 25 ตัวอย่าง โดยใช้หลักในการกำหนดส่วนผสมคือ การปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของคอนกรีตของแต่ละส่วนผสมให้มีความแตกต่างกัน โดยใช้มวลรวมที่เป็นมวลรวมหนักตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวถึง ตามที่มีการนำเสนอจากงานวิจัยของนายพลยุทธ ทองผาสุก, นายธนกร พันหา และนายปณณวิชญ์ พลະศุนย์

ตารางที่ 12 แสดงสัดส่วนผสมของที่คอนกรีตจะทำในงานวิจัยนี้

Mix	Cementitious Materials (kg/m ³)		Water (liter/m ³)	W/B Ratio	Fine Aggregate (kg/m ³)				Coarse Aggregate (kg/m ³)	
	Type I Cement	Fly ash			Iron	Sand	Granite	Barite	Limestone	Barite
1	340	85	170	0.4	700	0	0	1320	0	1080
2	340	85	170	0.4	550	0	0	1320	0	1160
3	340	85	170	0.4	400	0	0	1320	0	1240
4	340	85	170	0.4	250	0	0	1320	0	1320
5	340	85	170	0.4	100	0	0	1320	0	1400
6	340	85	170	0.4	700	0	0	1310	0	1100
7	340	85	170	0.4	700	0	0	1415	0	1000
8	340	85	170	0.4	700	0	0	1520	0	900
9	340	85	170	0.4	700	0	0	1390	0	1025
10	340	85	170	0.4	700	0	0	1470	0	950
11	340	85	170	0.4	700	0	0	1550	0	875
12	340	85	170	0.4	0	0	0	1460	0	1300
13	340	85	170	0.4	0	0	0	1410	0	1350
14	340	85	170	0.4	0	0	0	1510	0	1250
15	340	85	170	0.4	0	0	0	1320	1000	0

Mix	Cementitious Materials (kg/m ³)		Water (liter/m ³)	W/B Ratio	Fine Aggregate (kg/m ³)				Coarse Aggregate (kg/m ³)	
	Type I Cement	Fly ash			Iron	Sand	Granite	Barite	Limestone	Barite
	16	340			85	170	0.4	0	0	1025
17	340	85	170	0.4	0	1025	0	0	0	1100
18	340	85	170	0.4	700	300	300	300	0	1080
19	368.8	85	150	0.33	700	0	0	1320	0	1080
20	354.4	85	160	0.36	700	0	0	1320	0	1080
21	340	85	167.5	0.39	690	0	0	1320	0	1091
22	340	85	167.5	0.39	690	0	0	1327.2	0	1080
23	340	85	170	0.4	700	410	410	0	0	1080
24	340	85	170	0.40	350	0	130	1320	0	1080
25	340	85	170	0.40	350	150	0	1320	0	1080



รูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในมวลรวมของคอนกรีต

(จากซ้ายบน แปรไรต์ - เศษหินแกรนิต เถ้าลอย - เหล็กขี้ฉ้อ หินปูน - ทราย)

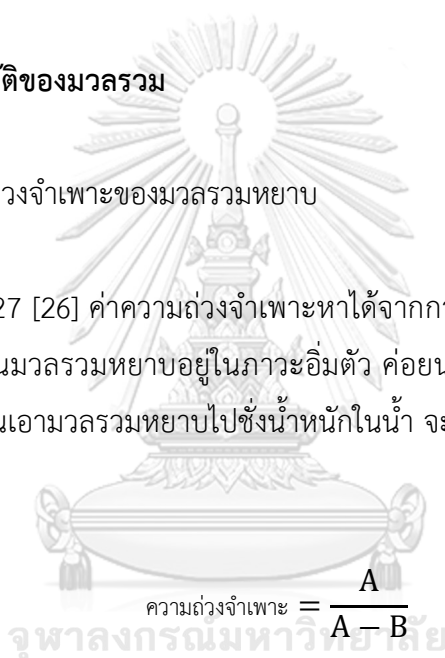
3.3 การเตรียมวัสดุมวลรวม

สำหรับแร่แปรที่ได้ซื้อมาจากทางเหมืองแร่ในประเทศ จะต้องทำการบดย่อยขนาดให้เล็กลง โดยใช้เครื่องบด จากนั้นคัดขนาดมวลรวมโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน ให้มวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่สุดผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” และเล็กสุดค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 4 เช่นเดียวกับหินปูน ในขณะที่มวลรวมละเอียดขนาดอยู่ระหว่าง ตะแกรงเบอร์ 4 และส่วนที่ค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 100 เช่นเดียวกับทรายธรรมชาติและหินฝุ่น ตามมาตรฐาน ASTM C637-98a หลังจากนั้นนำมวลรวมที่ได้ไปล้างเอาเศษฝุ่นออก แล้วแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชม. แล้วจึงนำขึ้นมาทดสอบคุณสมบัติทางอื่น ๆ ต่อไป

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

1.) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

จาก ASTM C127 [26] ค่าความถ่วงจำเพาะหาได้จากการนำมวลรวมหยาบประมาณ 500 กรัม ไปแช่น้ำ 24 ชม จนมวลรวมหยาบอยู่ในภาวะอิ่มตัว ค่อยนำขึ้นมาซับให้ผิวแห้งก่อนนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศ จากนั้นเอามวลรวมหยาบไปชั่งน้ำหนักในน้ำ จะสามารถคำนวณความถ่วงจำเพาะจากสมการ



$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{A}{A - B}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักที่ภาวะอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ

$B =$ น้ำหนักที่ภาวะอิ่มตัวชั่งในน้ำ

2.) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

จาก ASTM C128 [27] ค่าความถ่วงจำเพาะหาได้จากการนำมวลรวมหยาบประมาณ 1000 กรัม ไปแช่น้ำ 24 ชม จนมวลรวมละเอียดอยู่ในภาวะอิ่มตัว ค่อยนำขึ้นจากน้ำมาทำการควั่นกระชกจนกระทั่งมวลรวมละเอียดอยู่ในภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แบ่งออกมาประมาณ 500 กรัม บรรจุใส่ขวดรูปชมพู่นำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำจนถึงขีดกำหนดปริมาตร แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง สามารถคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะได้ จากสมการ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{S}{B + S - C}$$

- เมื่อ S = น้ำหนักที่ภาวะอิ่มตัวผิวแห้งซึ่งในอากาศ
 B = น้ำหนักขูดรูปขมฟู่ที่ใส่น้ำตามปริมาตร
 C = น้ำหนักขูดรูปขมฟู่ที่ใส่มวลรวมและน้ำ

3.5 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีแกมมาจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากธาตุกัมมันตรังสี Cs-137 และ Co-60 โดยที่ใช้พลังงานโฟตอน 662 keV จาก Cs-137 และระดับพลังงานสองระดับ 1173 และ 1332 keV จาก Co-60 การจัดเตรียมการทดสอบเริ่มโดยการติดตั้งกำบังที่ใช้ใส่แหล่งกำเนิดรังสีและวัดระยะห่างจากกำบังไปยังเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาให้มีระยะทางยาวกว่าตัวอย่างที่ใช้ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. ความหนา 10 ซม. โดยเว้นช่องไว้ประมาณ 10 ซม. และใช้แผ่นตะกั่วกำบังด้านข้างของแหล่งกำเนิดและเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อกำบังไม่ให้รังสีที่แผ่จากแหล่งอื่นเข้ามารบกวนการทดสอบ วัดค่าความเข้มของรังสีที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ไม่ได้กำบัง จากนั้นนำตัวอย่างมาวางขวางลำของรังสีแกมมาที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีหลังจากเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง ไปยังเครื่องตรวจวัดที่อยู่ด้านหลังของตัวอย่างตามที่แสดงในรูปที่ 5

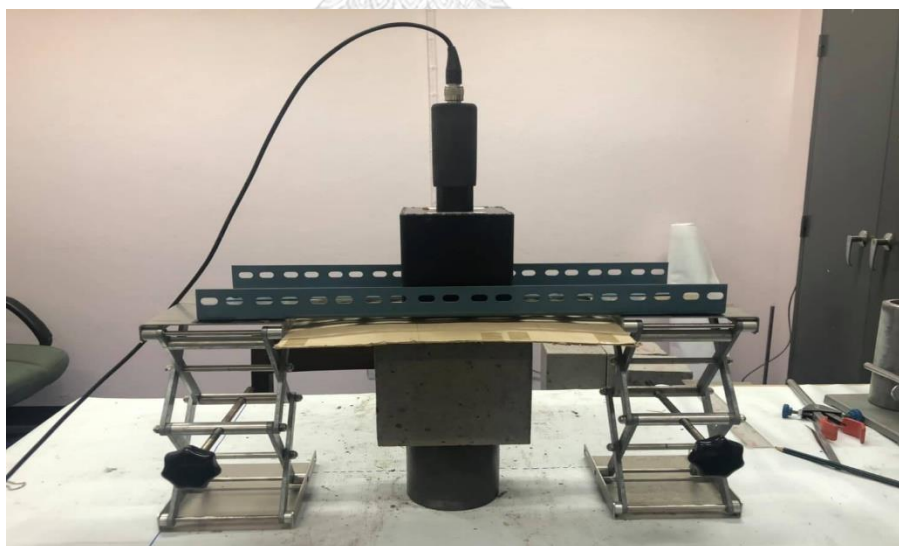


รูปที่ 5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

ในการทดสอบจะขยับตัวอย่างเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ลำของรังสีเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง 5 จุด เพื่อให้ค่าที่วัดออกมานั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของตัวอย่างมากที่สุดในกรณีที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านไปบริเวณที่อาจจะมีความหนาแน่นแตกต่างจากบริเวณอื่น เช่น เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตไปโดยไม่ผ่านเหล็กที่ผสมอยู่ในคอนกรีต หรือเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตไปโดยผ่านเหล็กที่ซ้อนทับกันในคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแกมมาที่วัดได้จากการทดสอบที่ตำแหน่งเดียวไม่สามารถเป็นตัวแทนของตัวอย่างนั้นได้ ก่อนจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมา

3.6 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีนิวตรอน การจัดเตรียมการทดสอบเริ่มโดยการติดตั้งกำบังที่ใช้ใส่แหล่งกำเนิดนิวตรอนให้ฉายไปในแนวตั้งฉากกับระนาบขึ้นตามทีแสดงในรูปที่ 3 ก่อนนำตัวอย่างมาวางไว้ด้านบนของกำบังและนำแผ่นตะกั่วปิดด้านข้างของตัวอย่างทั้ง 4 ด้าน โดยใช้ตัวอย่างขนาดลูกบาศก์ 15 ซม. x 15 ซม. ความหนา 15 ซม. ในการทดสอบแล้วด้านบนของตัวอย่างจะติดตั้งเครื่องตรวจวัดรังสีนิวตรอนเพื่อวัดค่าความเข้มรังสีที่ผ่านตัวอย่างมาที่เครื่องตรวจวัดรังสีนิวตรอนตามรูปที่ 6 ในการตรวจวัดความเข้มรังสีนิวตรอนจะพิจารณา fast neutrons เป็นหลัก



รูปที่ 6 การทดสอบหาลัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีนิวตรอน

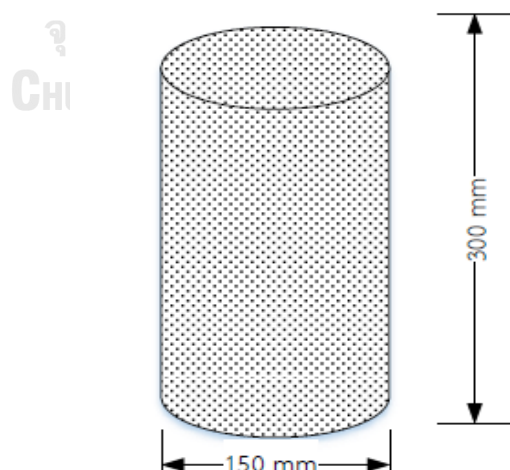
หลังจากการตรวจวัดค่าความเข้มของรังสีนิวตรอนหาที่มีกำบัง จึงตรวจวัดค่าความเข้มของรังสีนิวตรอนที่ไม่ผ่านการกำบัง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนหรือเรียกว่า Macroscopic fast neutron removal cross-section เนื่องจากขนาดลำของรังสีนิวตรอนที่ออกมาจากกำบังมีขนาดกว้าง เป็นเหตุให้การทดสอบจึงสามารถหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวอย่างจากตำแหน่งเดียวได้



รูปที่ 7 ตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบทางรังสี

3.7 การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต

จาก ASTM C39 หล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 3 ชิ้นต่อสัปดาห์ผสม จากนั้นบ่มเก็บไว้ 28 วัน ก่อนที่จะนำมาเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต แล้วจึงคำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด



รูปที่ 8 ตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต

บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ความหนาแน่นของมวลรวม

การศึกษาในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุที่อยู่ในสถานะอิมพัลส์แห่งมาผสมคอนกรีตมวลหนักซึ่งจากการหาความหนาแน่นของแต่ละวัสดุจะได้ค่าตามตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ
หินปูน	2.71
ทรายธรรมชาติ	2.56
หินฝุ่น (เศษหินแกรนิต)	2.58
แบไรต์ (มวลรวมหยาบ)	3.91
แบไรต์ (มวลรวมละเอียด)	4.20
เหล็กขี้อ้อย	7.80

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีแกมมา

จากการทดสอบรังสีแกมมาด้วยแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 ที่ระดับพลังงาน 662 keV และ Co-60 ที่ระดับพลังงาน 1174 keV และ 1332 keV ในทุกตัวอย่างทั้ง 25 สัดส่วนผสม จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาตามในตารางที่ 14, 15 และ 16 สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีได้ดังรูปที่ 9

ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Cs-137 (662 keV)

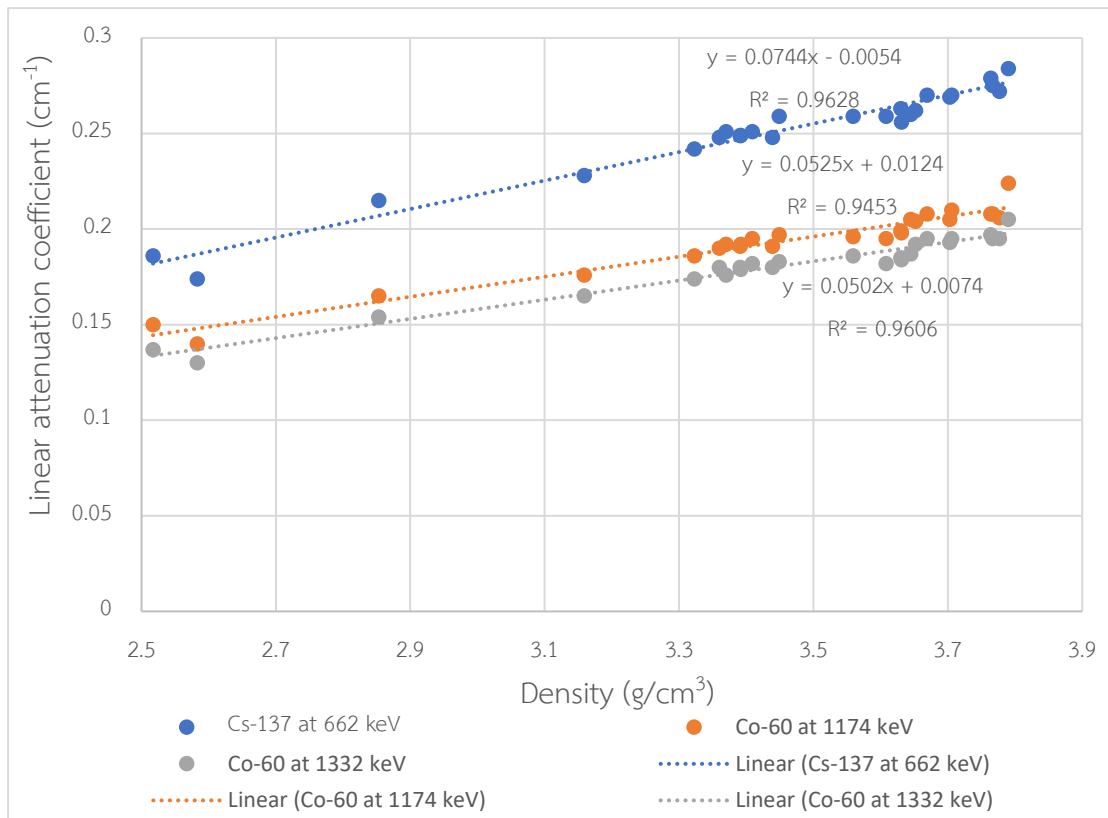
Mix	Density (g/cm ³)	Linear attenuation coefficient (cm ⁻¹)		
		Average	Min	Max
1	3.630	0.263	0.234	0.276
2	3.764	0.279	0.252	0.301
3	3.608	0.259	0.253	0.267
4	3.559	0.259	0.250	0.265
5	3.392	0.249	0.243	0.256
6	3.669	0.270	0.259	0.283
7	3.777	0.272	0.242	0.290
8	3.706	0.270	0.246	0.283
9	3.631	0.256	0.233	0.269
10	3.645	0.260	0.243	0.284
11	3.790	0.284	0.260	0.298
12	3.449	0.259	0.236	0.268
13	3.370	0.251	0.243	0.258
14	3.391	0.249	0.240	0.260
15	2.853	0.215	0.213	0.217
16	2.517	0.186	0.177	0.207
17	2.583	0.174	0.171	0.178
18	3.323	0.242	0.216	0.255
19	3.652	0.262	0.244	0.285
20	3.409	0.251	0.244	0.260
21	3.703	0.269	0.253	0.281
22	3.767	0.275	0.251	0.287
23	3.159	0.228	0.207	0.240
24	3.360	0.248	0.245	0.251
25	3.439	0.248	0.238	0.258

ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Co-60 (1174 keV)

Mix	Density (g/cm ³)	Linear attenuation coefficient (cm ⁻¹)		
		Average	Min	Max
1	3.630	0.199	0.187	0.205
2	3.764	0.208	0.189	0.222
3	3.608	0.195	0.187	0.201
4	3.559	0.196	0.191	0.205
5	3.392	0.192	0.181	0.202
6	3.669	0.208	0.201	0.219
7	3.777	0.206	0.202	0.221
8	3.706	0.210	0.191	0.219
9	3.631	0.198	0.182	0.209
10	3.645	0.205	0.190	0.215
11	3.790	0.224	0.210	0.241
12	3.449	0.197	0.185	0.204
13	3.370	0.192	0.185	0.202
14	3.391	0.191	0.187	0.194
15	2.853	0.165	0.163	0.168
16	2.517	0.150	0.136	0.169
17	2.583	0.140	0.136	0.142
18	3.323	0.186	0.161	0.196
19	3.652	0.204	0.187	0.221
20	3.409	0.195	0.183	0.203
21	3.703	0.205	0.189	0.220
22	3.767	0.208	0.183	0.221
23	3.159	0.176	0.157	0.192
24	3.360	0.190	0.186	0.198
25	3.439	0.191	0.181	0.207

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากแหล่งกำเนิด Co-60 (1332 keV)

Mix	Density (g/cm ³)	Linear attenuation coefficient (cm ⁻¹)		
		Average	Min	Max
1	3.630	0.185	0.171	0.193
2	3.764	0.197	0.179	0.212
3	3.608	0.182	0.174	0.189
4	3.559	0.186	0.181	0.193
5	3.392	0.179	0.174	0.181
6	3.669	0.195	0.188	0.203
7	3.777	0.195	0.170	0.210
8	3.706	0.195	0.174	0.203
9	3.631	0.184	0.169	0.195
10	3.645	0.187	0.173	0.200
11	3.790	0.205	0.187	0.217
12	3.449	0.183	0.170	0.187
13	3.370	0.176	0.170	0.183
14	3.391	0.180	0.171	0.185
15	2.853	0.154	0.152	0.156
16	2.517	0.137	0.128	0.154
17	2.583	0.130	0.127	0.133
18	3.323	0.174	0.154	0.186
19	3.652	0.192	0.177	0.208
20	3.409	0.182	0.176	0.188
21	3.703	0.193	0.185	0.206
22	3.767	0.195	0.173	0.207
23	3.159	0.165	0.150	0.177
24	3.360	0.180	0.176	0.182
25	3.439	0.180	0.173	0.194



รูปที่ 9 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (แกมมา)

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีแกมมามีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้นในทุกพลังงานของรังสีแกมมา โดยสัดส่วนผสมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมามากที่สุด คือ 0.284 1/cm^{-1} ในสัดส่วนผสมที่ 11 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูงสุด (3.790 g/cm^3) จากในตัวอย่างทั้งหมด 25 สัดส่วนผสม เมื่อนำมาเทียบกับสัดส่วนผสมที่ 17 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีความหนาแน่นต่ำสุด (2.517 g/cm^3) และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาน้อยสุด คือ 0.186 1/cm^{-1} จะพบว่าเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมา 50% ของความหนาแน่นตัวอย่างน้อยสุด ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้นจะเพิ่มขึ้น 52%

การทำให้สัดส่วนผสมที่มีการเปลี่ยนวัสดุรวมให้มีน้ำหนักมากขึ้นจะสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้มากขึ้น ไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดจากในกลุ่มที่สัดส่วนผสมมีเหล็กและกลุ่มที่ไม่มีเหล็กอยู่ในสัดส่วนผสมนอกเหนือจากความหนาแน่นที่มากขึ้น เป็นผลมาจากการที่รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงกว่ารังสีเอกซ์แต่ไม่มีประจุทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ไม่ดีเท่ารังสีแอลฟากัมบรังสีบีตา โดยที่ความชันของเส้นตรงในรูปที่ 9 คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล

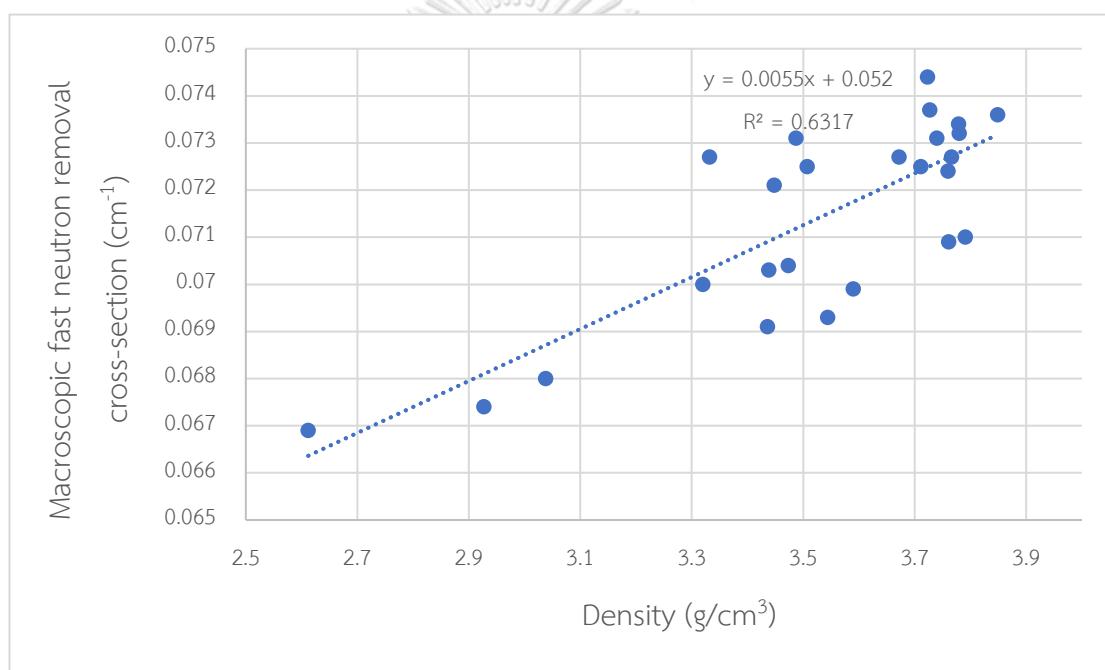
4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีนิวตรอน

จากการทดสอบรังสีนิวตรอนที่พลังงานสูงกว่า 100 keV (fast neutrons) ในทุกตัวอย่างทั้ง 25 สัดส่วนผสม จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนตามในตารางที่ 17 ซึ่งสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีได้ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของตัวอย่างคอนกรีตจากรังสีนิวตรอน

Mix	Density (g/cm ³)	Macroscopic fast neutron removal cross-section (cm ⁻¹)	Mass removal cross-section (cm ² /g)
1	3.761	0.0709	0.0188
2	3.766	0.0727	0.0193
3	3.59	0.0699	0.0195
4	3.438	0.0703	0.0205
5	3.448	0.0721	0.0209
6	3.849	0.0736	0.0191
7	3.791	0.0710	0.0187
8	3.74	0.0731	0.0195
9	3.78	0.0732	0.0194
10	3.76	0.0724	0.0192
11	3.779	0.0734	0.0194
12	3.544	0.0693	0.0196
13	3.436	0.0691	0.0201
14	3.473	0.0704	0.0203
15	3.038	0.0680	0.0224
16	2.612	0.0669	0.0256
17	2.927	0.0674	0.0230
18	3.32	0.0700	0.0211
19	3.727	0.0737	0.0198
20	3.711	0.0725	0.0195

Mix	Density (g/cm ³)	Macroscopic fast neutron removal cross-section (cm ⁻¹)	Mass removal cross-section (cm ² /g)
21	3.723	0.0744	0.0200
22	3.672	0.0727	0.0198
23	3.332	0.0727	0.0218
24	3.507	0.0725	0.0207
25	3.487	0.0731	0.0210

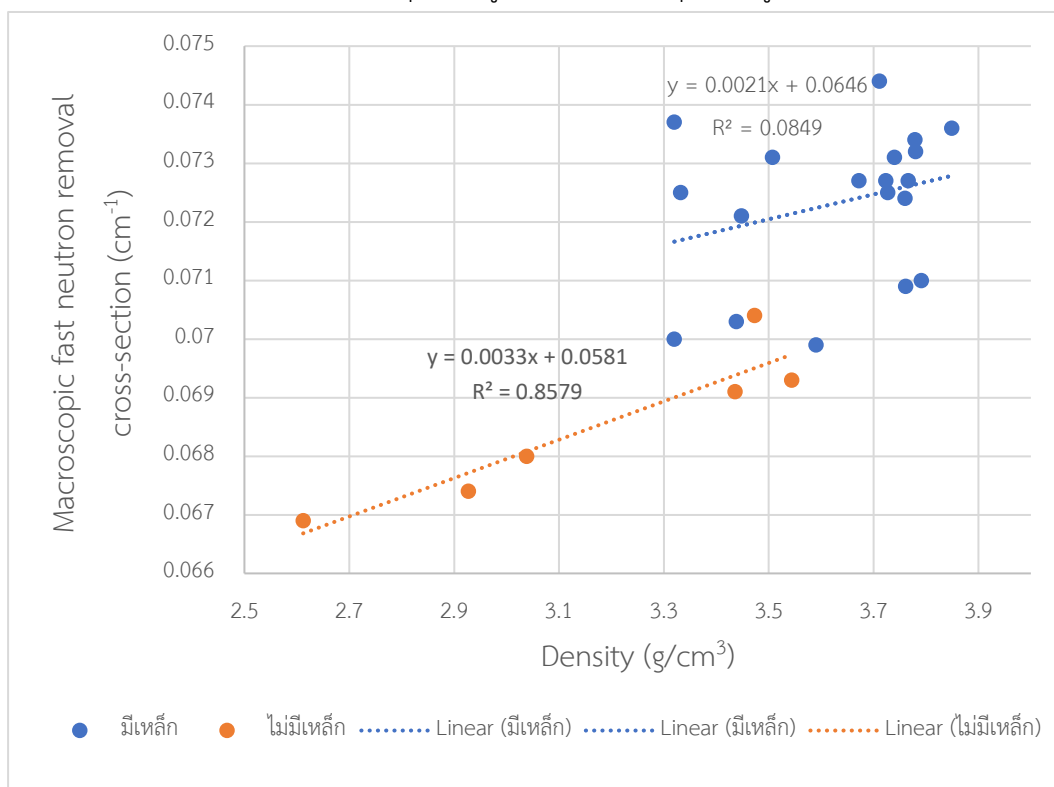


รูปที่ 10 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (นิวตรอน)

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีนิวตรอนมีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ทว่าจากการรังสีนิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสในสารเป็นหลัก ในขณะที่รังสีแกมมาทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน [3-4] ทำให้ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำคอนกรีตมีผลกับความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอน โดยทั่วไปนิวตรอน (fast neutrons) การเกิดการกระเจิง (scattering interactions) มีโอกาสเกิดมากกว่าการจับนิวตรอน (capture interactions) ซึ่งการกระเจิงสำหรับนิวตรอนสามารถแบ่งออกเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (พลังงานจลน์ของระบบ

เป้าหมายที่ถูกนิวตรอนชนที่สงวนไว้เท่าเดิม) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (พลังงานจลน์ของระบบเป้าหมายที่ถูกนิวตรอนชนจะลดลงจากการกระตุ้นของนิวเคลียสเป้าหมายและการปล่อยรังสีแกมมาในภายหลัง)

ซึ่งจากตัวอย่างทั้ง 25 สัดส่วนผสมสามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่างคอนกรีตที่มีเหล็กเป็นส่วนผสม และกลุ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กผสม ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของผลการทดสอบระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่ม จากรูปที่ 10 ให้สังเกตได้ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความหนาแน่นของคอนกรีตกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอน (แบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ สีฟ้า - มีเหล็กผสม และสีส้ม - ไม่มีเหล็กผสม)

จากการแบ่งกลุ่มพบว่ากลุ่มที่มีเหล็กผสมอยู่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีเหล็กอยู่ในสัดส่วนผสมเป็นผลมาจากการที่รังสีนิวตรอนจะเสียพลังงานจากการชนเหล็กมากกว่าการชนกับแร่แบไรต์เพราะมีส่วนประกอบธาตุที่เบาว่า โดยสัดส่วนผสมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนสูงสุด คือ 0.0744 1/cm^{-1} ในสัดส่วนผสมที่ 21 ที่มีเหล็กผสม (ความหนาแน่น 3.723 g/cm^3) และสัดส่วนผสมที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนน้อยสุด คือ 0.0669 1/cm^{-1} ในสัดส่วนผสมที่ 16 ที่ไม่มีเหล็กผสมอยู่ (ความหนาแน่น 2.927 g/cm^3) ซึ่งเมื่อเทียบกันแล้วค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนมีความต่างกัน 11%

4.4 การหาค่า MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีต

ในการนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่ของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมาใช้งาน จำเป็นที่จะต้องคำนวณหา MFP, HVL, และ TVL จากสมการที่ 2.4, 2.5, และ 2.6 เพื่อให้รู้ว่าคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีนั้นต้องการความหนาเท่าใด จึงจะมีสมารถกำบังรังสีที่เกิดขึ้นได้ตามที่งานต้องการ จะได้ค่าตามตารางที่ 18

ตารางที่ 18 MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีต

Mix	Gamma ray from Cs-137 at 662 keV (cm)			Gamma ray from Co-60 at 1174 keV (cm)			Gamma ray from Co-60 at 1332 keV (cm)			Neutron ray fast neutrons (cm)		
	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL
1	3.8	2.6	8.8	5.0	3.5	11.6	5.4	3.8	12.4	14.1	9.8	32.5
2	3.6	2.5	8.3	4.8	3.3	11.1	5.1	3.5	11.7	13.8	9.5	31.7
3	3.9	2.7	8.9	5.1	3.6	11.8	5.5	3.8	12.7	14.3	9.9	32.9
4	3.9	2.7	8.9	5.1	3.5	11.8	5.4	3.7	12.4	14.2	9.9	32.8
5	4.0	2.8	9.3	5.2	3.6	12.0	5.6	3.9	12.9	13.9	9.6	31.9
6	3.7	2.6	8.5	4.8	3.3	11.1	5.1	3.6	11.8	13.6	9.4	31.3
7	3.7	2.6	8.5	4.9	3.4	11.2	5.1	3.6	11.8	14.1	9.8	32.4
8	3.7	2.6	8.5	4.8	3.3	11.0	5.1	3.6	11.8	13.7	9.5	31.5
9	3.9	2.7	9.0	5.1	3.5	11.6	5.4	3.8	12.5	13.7	9.5	31.5
10	3.9	2.7	8.9	4.9	3.4	11.2	5.4	3.7	12.3	13.8	9.6	31.8
11	3.5	2.4	8.1	4.5	3.1	10.3	4.9	3.4	11.2	13.6	9.4	31.4
12	3.9	2.7	8.9	5.08	3.52	11.7	5.5	3.8	12.6	14.4	10.0	33.2
13	4.0	2.8	9.2	5.2	3.6	12.0	5.7	3.9	13.1	14.5	10.0	33.3
14	4.0	2.8	9.3	5.2	3.6	12.1	5.6	3.9	12.8	14.2	9.9	32.7
15	4.7	3.2	10.7	6.1	4.2	14.0	6.5	4.5	15.0	14.7	10.2	33.9
16	5.4	3.7	12.4	6.7	4.6	15.4	7.3	5.1	16.8	15.0	10.4	34.4
17	5.8	4.0	13.2	7.1	5.0	16.5	7.7	5.3	17.7	14.8	10.3	34.2

Mix	Gamma ray from Cs-137 at 662 keV (cm)			Gamma ray from Co-60 at 1174 keV (cm)			Gamma ray from Co-60 at 1332 keV (cm)			Neutron ray fast neutrons (cm)		
	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL	MFP	HVL	TVL
18	4.1	2.9	9.5	5.4	3.7	12.4	5.8	4.0	13.2	14.3	9.9	32.9
19	3.8	2.7	8.8	4.9	3.4	11.3	5.2	3.6	12.0	13.6	9.4	31.2
20	4.0	2.8	9.2	5.1	3.6	11.8	5.5	3.8	12.7	13.8	9.6	31.8
21	3.7	2.6	8.6	4.9	3.4	11.2	5.2	3.6	11.9	13.4	9.3	31.0
22	3.6	2.5	8.4	4.8	3.3	11.1	5.1	3.6	11.8	13.8	9.5	31.7
23	4.4	3.0	10.1	5.7	3.9	13.1	6.1	4.2	14.0	13.8	9.5	31.7
24	4.0	2.8	9.3	5.3	3.7	12.1	5.6	3.9	12.8	13.8	9.6	31.8
25	4.0	2.8	9.3	5.2	3.6	12.1	5.6	3.9	12.8	13.7	9.5	31.5

ในการทดสอบด้วยรังสีแกมมาเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด (สัดส่วนผสมที่ 17) กับความหนาแน่นมากที่สุด (สัดส่วนผสมที่ 11) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้นจะเพิ่มขึ้น 52% ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณ MFP, HVL, และ TVL ลดลง 35%

ในการทดสอบด้วยรังสีนิวตรอนเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนน้อยที่สุด (สัดส่วนผสมที่ 16) กับมากที่สุด (สัดส่วนผสมที่ 21) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้นจะเพิ่มขึ้น 43% ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณ MFP, HVL, และ TVL ลดลง 30%

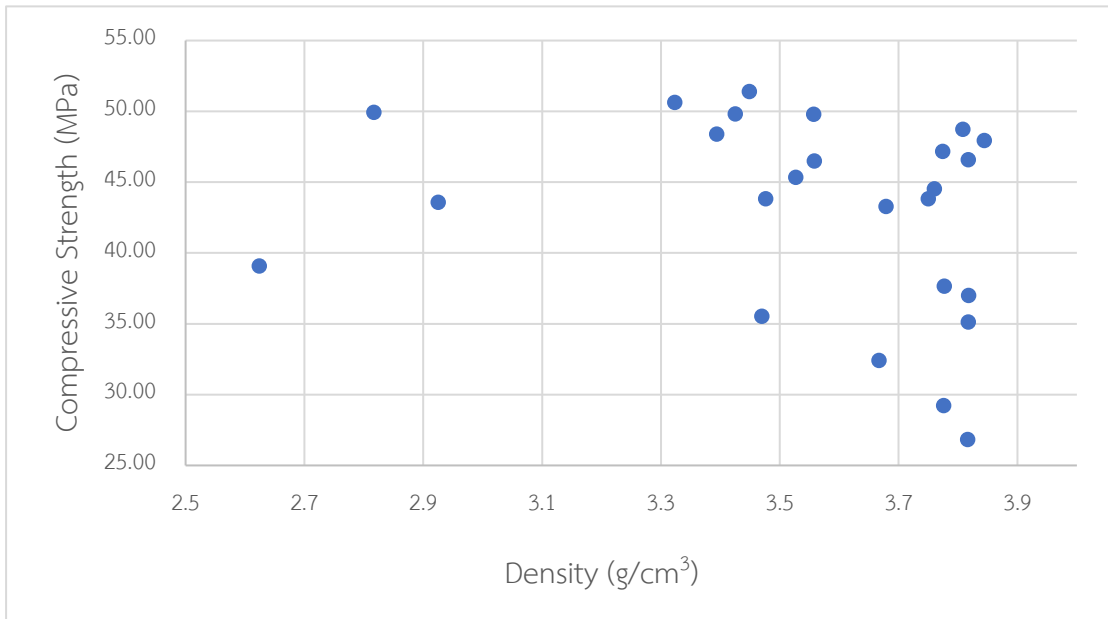
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5 ผลจากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต

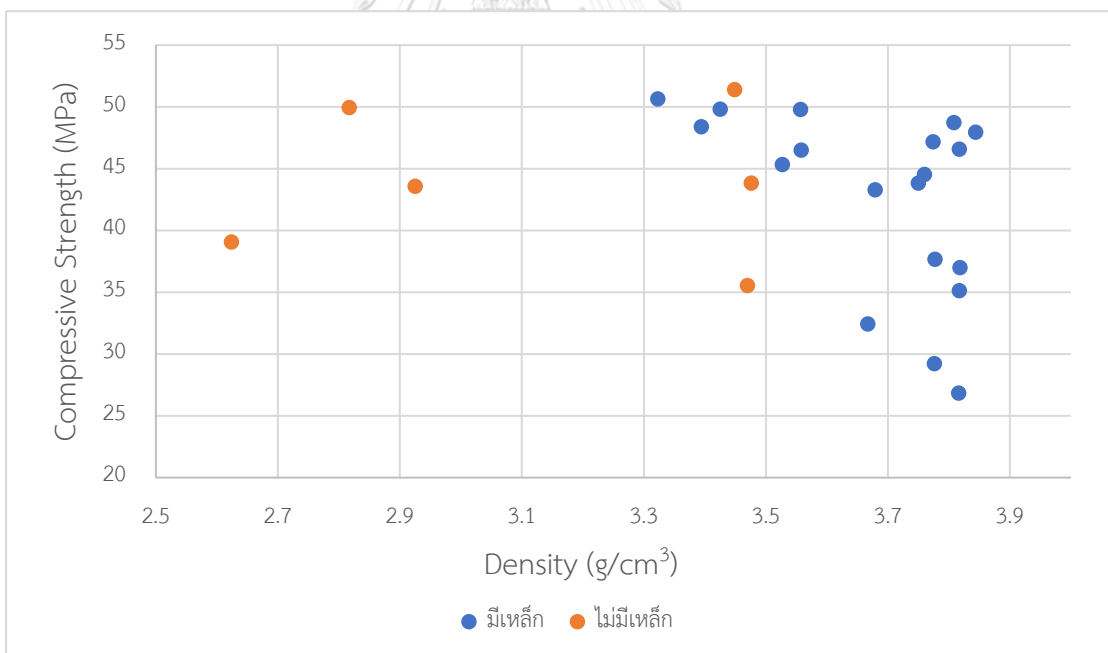
จากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต พบว่ากำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมเฉลี่ยแล้วมีค่ามากกว่า 25 MPa ตามตารางที่ 19 พบว่าสัดส่วนผสมที่ให้กำลังอัดคอนกรีตมากที่สุดที่ 51.40 MPa ในสัดส่วนผสมที่ 13 และสัดส่วนผสมที่ให้กำลังอัดคอนกรีตน้อยที่สุดที่ 26.83 MPa ในสัดส่วนผสมที่ 21 แม้ว่าสัดส่วนผสมที่ 21 จะมีความหนาแน่นสูงกว่าสัดส่วนผสมที่ 13 ถึง 10.6% และในสัดส่วนผสมที่มีเหล็กพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตลดลงที่ความหนาแน่นสูงขึ้น ในสัดส่วนผสมที่ไม่มีเหล็กไม่สามารถคาดการณ์กำลังอัดได้ ซึ่งทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนผสมหรือความหนาแน่นมีผลต่อกำลังต้านแรงอัดอย่างไร ทั้งในสัดส่วนผสมที่มีเหล็กและสัดส่วนผสมที่ไม่มีเหล็ก ตามรูปที่ 12 และรูปที่ 13

ตารางที่ 19 ผลกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม

Mix	Average Density (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)			Average (MPa)	SD
1	3.776	29.62	26.21	31.87	29.23	2.32
2	3.777	29.48	41.07	42.43	37.66	5.81
3	3.679	37.08	38.68	54.10	43.29	7.67
4	3.557	39.68	56.85	52.85	49.79	7.34
5	3.425	44.61	50.19	54.66	49.82	4.11
6	3.808	39.64	55.32	51.21	48.73	6.64
7	3.818	40.20	47.07	23.71	36.99	9.80
8	3.750	40.11	42.09	49.26	43.82	3.93
9	3.774	37.49	49.46	54.55	47.17	7.15
10	3.817	38.80	53.46	47.47	46.58	6.02
11	3.844	40.14	51.43	52.30	47.95	5.54
12	3.470	18.79	44.57	43.28	35.54	11.86
13	3.449	48.34	50.07	55.79	51.40	3.18
14	3.476	44.11	43.71	43.66	43.82	0.20
15	2.925	35.89	54.24	40.62	43.58	7.78
16	2.624	38.93	40.03	38.27	39.07	0.73
17	2.817	23.08	61.41	65.30	49.93	19.05
18	3.394	46.28	53.03	45.89	48.40	3.28
19	3.760	39.15	49.75	44.66	44.52	4.33
20	3.667	22.98	24.39	49.89	32.42	12.36
21	3.816	29.03	13.23	38.22	26.83	10.32
22	3.817	29.30	37.52	38.55	35.12	4.14
23	3.323	41.93	54.62	55.33	50.63	6.15
24	3.527	37.60	49.67	48.77	45.34	5.49
25	3.558	42.77	41.85	54.86	46.49	5.93



รูปที่ 12 ความหนาแน่นกับกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต



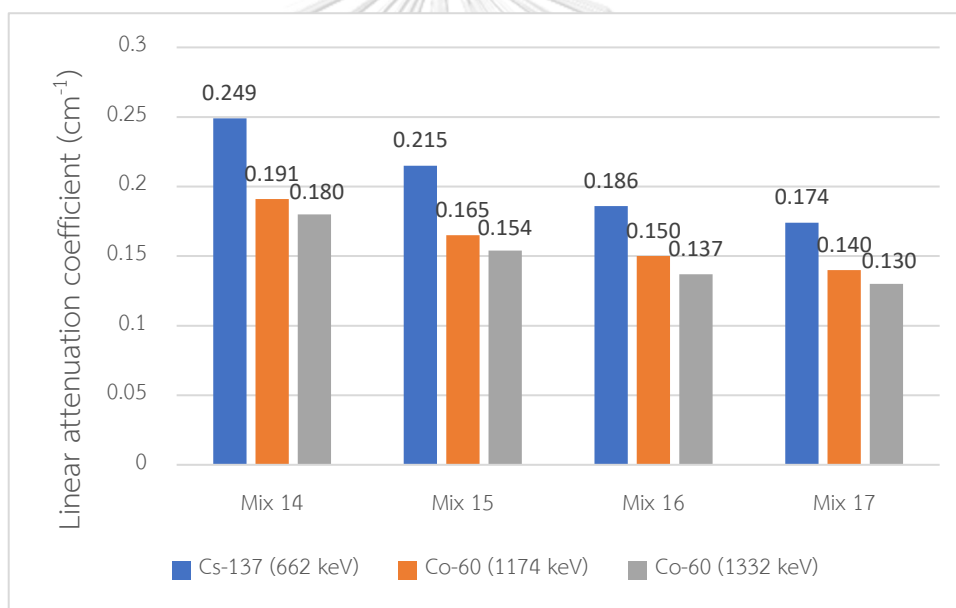
รูปที่ 13 ความหนาแน่นกับกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีต

(แบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ สีฟ้า - มีเหล็กผสม และสีส้ม - ไม่มีเหล็กผสม)

4.6 การเปรียบเทียบอื่น ๆ จากผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

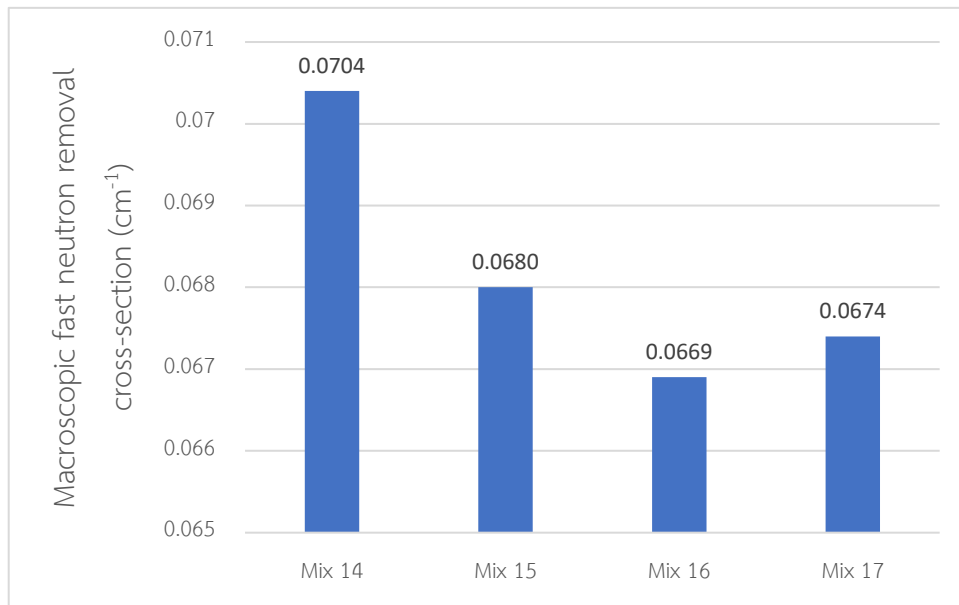
4.6.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมาจากวัสดุที่ต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดให้มาจากวัสดุที่ต่างกัน ในสัดส่วนผสมที่ 14 – 17 ที่ไม่มีเหล็กเป็นมวลรวม โดยที่สัดส่วนผสมที่ 14 ใช้แบริต์เป็นมวลรวมอย่างเดียว สัดส่วนผสมที่ 15 ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนและมวลรวมหยาบเป็นแบริต์, สัดส่วนผสมที่ 16 ใช้มวลรวมหยาบเป็นแบริต์และใช้มวลรวมละเอียดเป็นเศษหินแกรนิต และสัดส่วนผสมที่ 17 ใช้มวลรวมหยาบเป็นแบริต์และใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำ พบว่าการเปลี่ยนมวลรวมจากแบริต์เป็นมวลรวมชนิดอื่นที่มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาลดลงในทุกพลังงานรังสีแกมมาที่ใช้ในการทดสอบ ตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 14 – 17

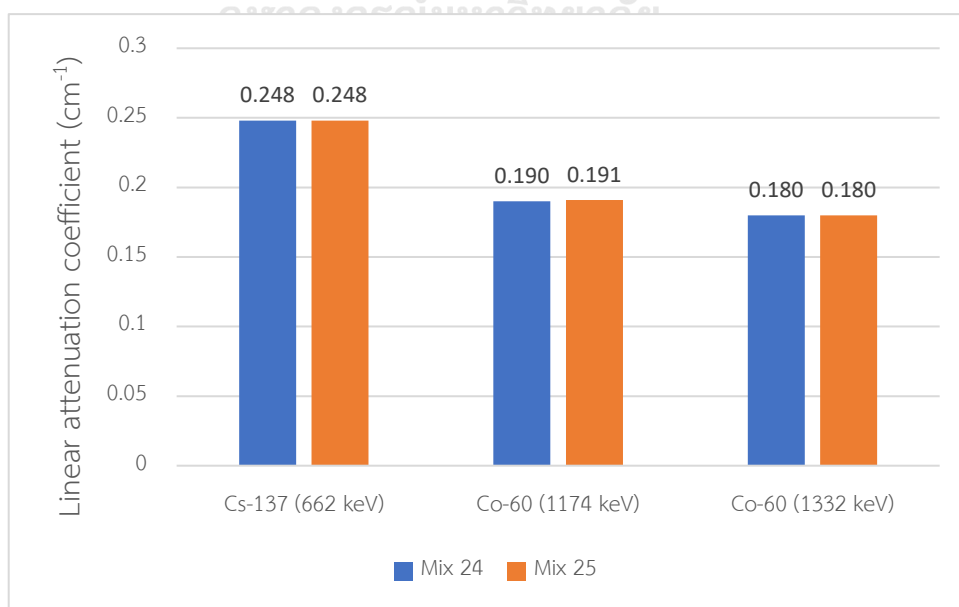
ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนก็ลดลงเช่นกัน แต่พบว่ามวลรวมที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่สูงกว่ามวลรวมที่ใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด ตามรูปที่ 15 เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบรังสีนิวตรอนของสัดส่วนผสมที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่า



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 14 – 17

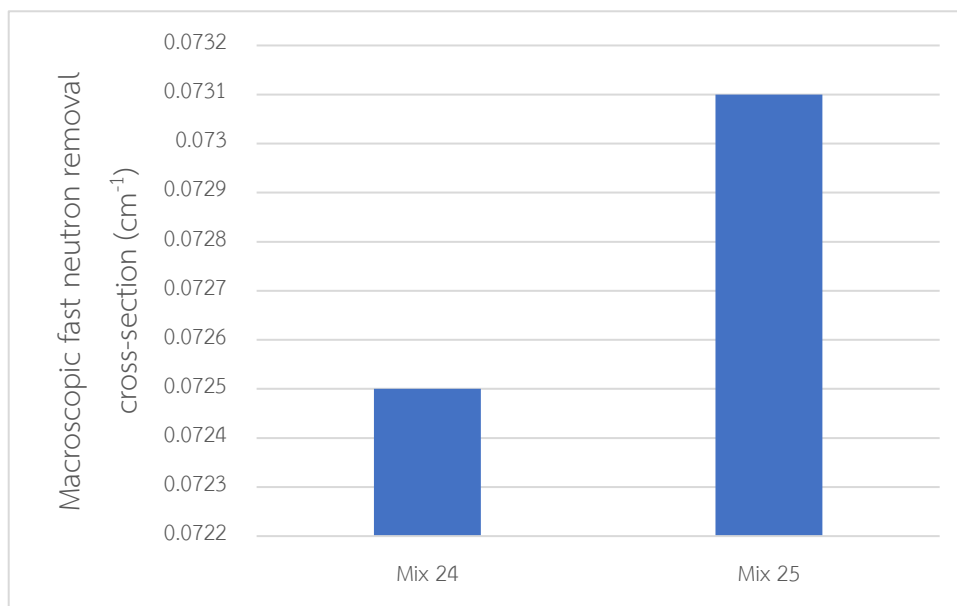
4.6.2 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีมวลรวมละเอียดให้มาจากวัสดุที่ต่างกันแต่มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน

ในสัดส่วนผสมที่ 24 – 25 ซึ่งมีเหล็กปริมาณครึ่งหนึ่งของสัดส่วนผสมที่ 1 และแบไรต์เป็นมวลรวมหยาบ โดยในสัดส่วนผสมที่ 24 ใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมหยาบ และในสัดส่วนที่ 25 ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบ พบว่าตัวอย่างที่ใช้ทดสอบด้วยรังสีค่าความหนาแน่นไม่ต่างกันมาก (ต่างกันไม่เกิน 0.080 g/cm³) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ตามรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 24 - 25

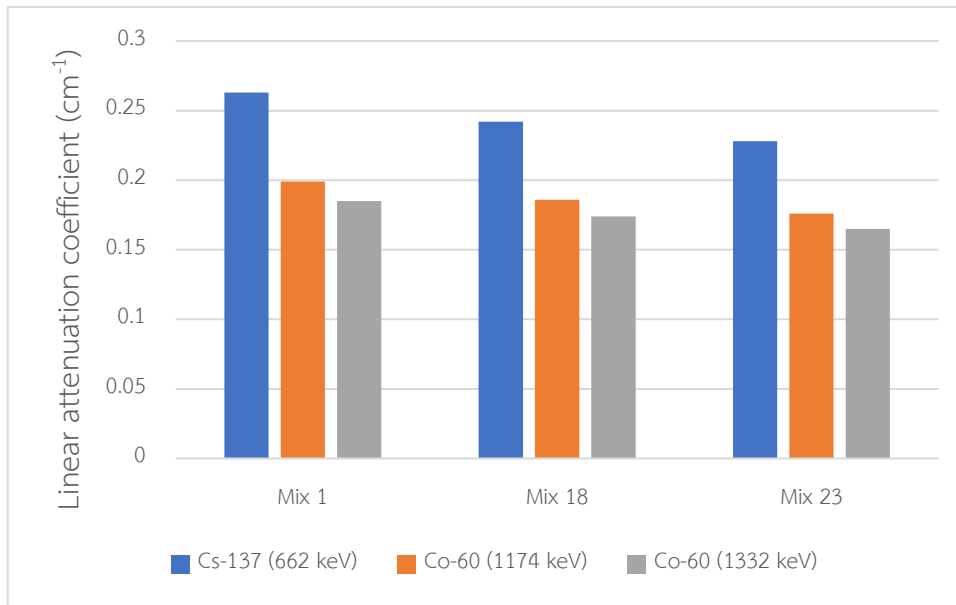
ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนของสัดส่วนผสมที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดมีค่ามากกว่าสัดส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด ตามรูปที่ 17 แม้ว่าตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 0.025 g/cm^3)



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 24 - 25

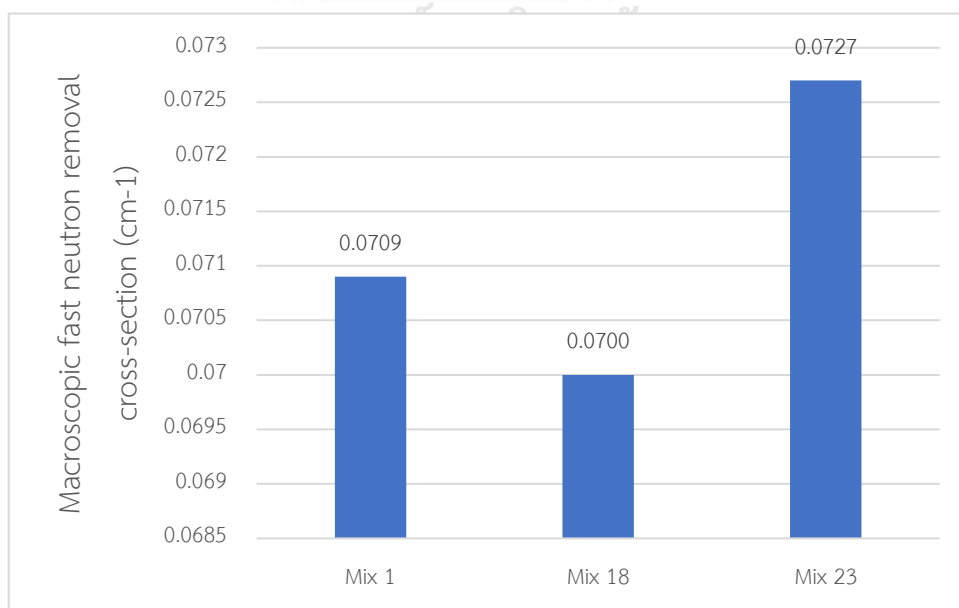
4.6.3 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีมวลรวมละเอียดให้มาจากวัสดุที่ต่างกัน

ในสัดส่วนผสมที่ 1, 18 และ 23 ที่มีเหล็กและแบไรต์เป็นมวลรวมหยาบ โดยสัดส่วนผสมที่ 1 ใช้แบไรต์เป็นมวลรวมหยาบ, สัดส่วนที่ 18 ใช้ทรายแม่น้ำ, เศษหินแกรนิต และแบไรต์เป็นมวลรวมละเอียด และสัดส่วนผสมที่ 23 ใช้ทรายกับเศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนวัสดุมวลรวมละเอียด



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 1, 18 และ 23

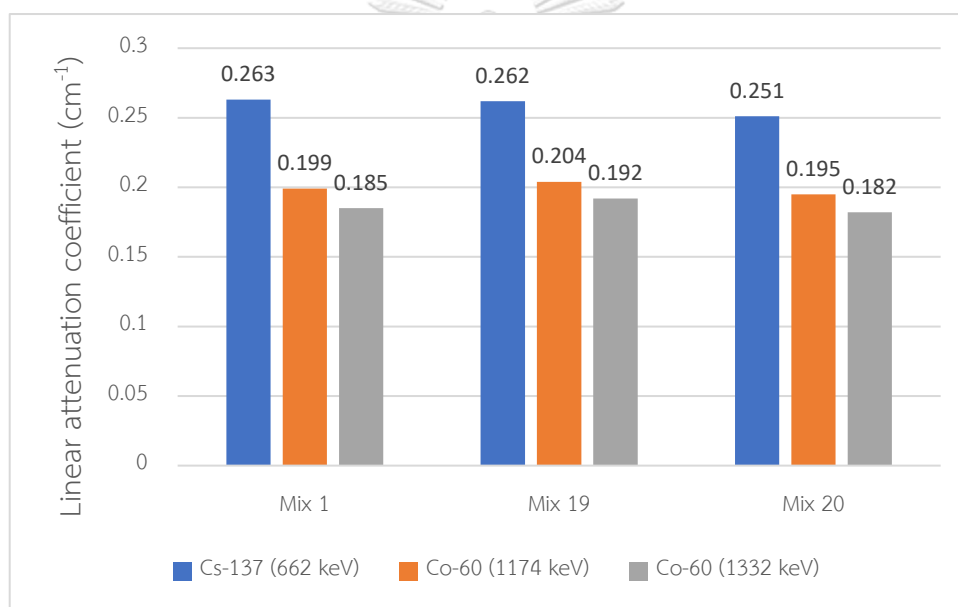
แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนกลับเพิ่มขึ้นเมื่อไม่ได้ใช้แบเรียมเป็นมวลรวมละเอียดในสัดส่วนผสมที่ 23 แม้ว่าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าสัดส่วนผสมที่ 1 เนื่องจากรังสีนิวตรอนสูญเสียพลังงานกับวัสดุกำบังที่สารประกอบที่มีธาตุเบา ซึ่งในทฤษฎีธรรมชาติและเศษหินแกรนิต มีสารประกอบที่เป็นธาตุเบากว่าแร่แบเรียม ส่วนในสัดส่วนผสมที่ 18 อาจเป็นผลที่เกิดจากการทดสอบรังสียิงผ่านตัวอย่างบริเวณที่มีแบเรียมหนาแน่นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนลดลงตามรูปที่ 19



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 1, 18 และ 23

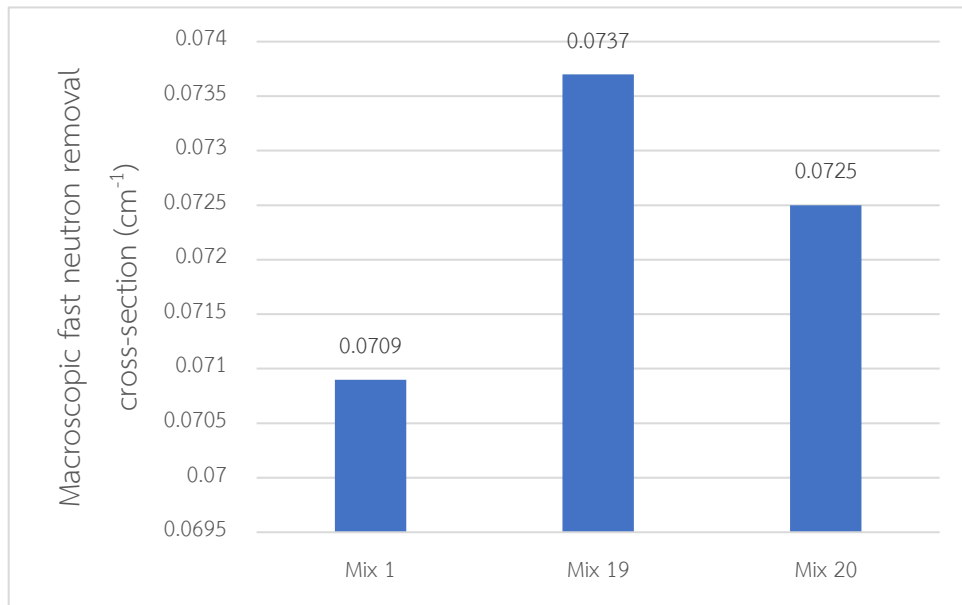
4.6.4 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มี w/b แตกต่างกัน

โดยให้สัดส่วนผสมที่ 1 ($w/b = 0.4$) เป็นตัวควบคุมและทำการเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในสัดส่วนผสมที่ 19 ($w/b = 0.33$) และ 20 ($w/b = 0.36$) และไปเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 แทน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำผสมยากขึ้นเนื่องจากการใช้ปริมาณน้ำที่น้อยลง แต่สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาก็ยังขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ซึ่งในสัดส่วนผสมที่ 19 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 0.025 g/cm^3) กับสัดส่วนผสมที่ 1 ในขณะที่สัดส่วนผสมที่ 20 มีความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาน้อยกว่า ตามรูปที่ 20

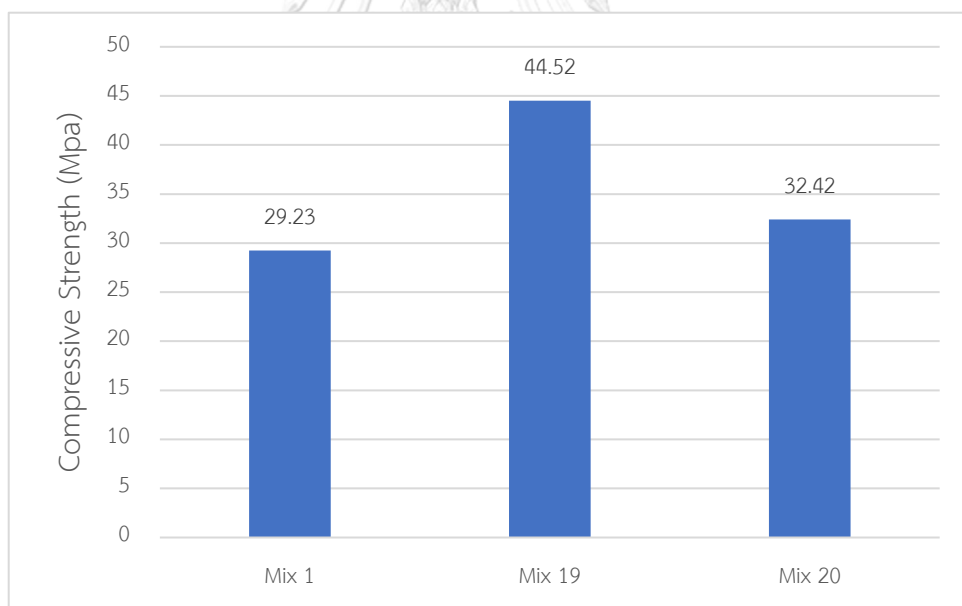


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนของสัดส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจะสูงกว่าสัดส่วนผสมที่ 1 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามรูปที่ 21 และให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่สูงกว่า เนื่องจากมี w/b น้อยกว่าตามรูปที่ 22



รูปที่ 21 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอนในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20



รูปที่ 22 การเปรียบเทียบค่ากำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสมที่ 1, 19 และ 20

บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1.) จากการศึกษาพบว่าวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างสำหรับงานด้านสถานประกอบการทางนิวเคลียร์และรังสีไม่มีความแตกต่างกับงานก่อสร้างธรรมดา ยกเว้นในส่วนของมวลรวมของคอนกรีตมวลเบาที่เปลี่ยนเป็นมวลรวมของคอนกรีตมวลหนัก

2.) จากการศึกษาหามวลรวมภายในประเทศพบว่าแร่แบไรต์มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นมวลรวมของคอนกรีต

3.) การใช้เหล็กและแร่แบไรต์เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และทำให้ความสามารถในการกัมบังรังสีแกมมาดีขึ้นกว่าการใช้แบไรต์เป็นมวลรวมอย่างเดียว

4.) ชนิดของวัสดุมวลรวมและความหนาแน่นของคอนกรีตมีผลกับความสามารถในการกัมบังรังสีนิวตรอน การมีเหล็กผสมอยู่ในคอนกรีตทำให้ทั้งความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอนสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเป็นมวลรวม

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอเสนอแนวทางในการปรับปรุงงานและการศึกษาเพิ่มเติมที่อาจจะจำเป็นสำหรับงานอื่น ๆ ในอนาคต

1.) ในการทำส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักต้องมีการคำนึงถึงความสามารถในการทำงาน (workability) ของคอนกรีตเพิ่มเติม

2.) ในการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.4 พบว่าในบางสัดส่วนผสมที่มีเหล็กเป็นมวลรวมหยาบมีความสามารถในการทำงานไม่ดีแม้กำลังที่ได้จะสูงกว่า 25 MPa จึงควรใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า 0.4

3.) ในการจัดทำคอนกรีตที่สามารถกัมบังรังสีนิวตรอนจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงรังสีแกมมา (Secondary Gamma Rays) ที่เกิดขึ้นจากรังสีนิวตรอนด้วย

4.) การคิดคำนวณเทียบความคุ้มค่าราคาของคอนกรีตอาจจะจำเป็นสำหรับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามที่ต้องการในราคาที่เหมาะสม

5.) หากต้องการให้มั่นใจว่าการกระจายตัวของมวลรวมในคอนกรีตสม่ำเสมอ ให้ใช้วิธีการวางตำแหน่งมวลรวมไปในแบบก่อน (Preplaced aggregate concrete)

6.) การนำคอนกรีตไปใช้กำบังรังสีจำเป็นต้องทราบก่อนต้องการกำบังรังสีอะไร จากความเข้มและชนิดแหล่งกำเนิดของรังสี รวมไปถึงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตว่ามีผลเสียในการกำบังรังสีหรือไม่



บรรณานุกรม

1. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2006). ศัพท์นิวเคลียร์ฉบับประชาชน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oap.go.th/images/documents/resources/media-library/publications/5002079L01.pdf> [2020, กรกฎาคม 28]
2. American Concrete Institute. (1996). Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing.
3. Daniel R. McAlister. (2018). Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.eichrom.com/wp-content/uploads/2018/02/Gamma-Ray-Attenuation-White-Paper-by-D-M-rev-6-1-002.pdf> [2020, ตุลาคม 10]
4. Daniel R. McAlister. (2016). Neutron Shielding Materials. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.eichrom.com/wp-content/uploads/2018/02/neutron-attenuation-white-paper-by-d-m-rev-2-1.pdf> [2020, ตุลาคม 10]
5. Ilker Bekir Topcu. (2003). Properties of heavyweight concrete produced with barite. *Cement and Concrete Research* 33: 815-822.
6. ดนุพล ตันนโยภาส และวิชัย นกแก้ว. (2009). การกำบังรังสีของคอนกรีตมวลรวมแบไรต์ผสมสเมกไทต์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 7: 27-32.
7. Ekasit Wongchirung. (2011). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAVY WEIGHT CONCRETE PROPERTIES BY NON-DESTRUCTIVE TESTING. Master's Thesis. *Civil Engineering*. Chulalongkorn University.
8. Ahmed S. Ouda. (2014). Development of High- Performance Heavy Density Concrete Using Different Aggregates for Gamma- Ray Shielding. The 2014 world congress on Advances in Civil, Environment, and Materials Research (ACEM14): 5-9.
9. Budi, G.S., Koentjoro, H., Wijaya, J., and Sikomena, E. F. (2008). The attenuation coefficient of barite concrete subjected to gamma-ray radiation. MATEC Web of Conferences 258 (SCESCM 2018).
10. American Concrete Institute. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary.

11. American Concrete Institute. (2017). Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349M-13) and Commentary.
12. American Society for Testing and Materials. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
13. American Society for Testing and Materials. (2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.
14. American Concrete Institute. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
15. American Concrete Institute. (2013). Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
16. American Nuclear Society. (2006). American National Standard Nuclear Analysis and Design Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants.
17. The American Society of Mechanical Engineers. (2019). RULES FOR CONSTRUCTION OF NUCLEAR FACILITY COMPONENTS Division 2.
18. American Society for Testing and Materials. (2007). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
19. American Society for Testing and Materials. (2007). Standard Specification for Portland Cement. 2007
20. American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Specification for Concrete Aggregates.
21. American Society for Testing and Materials. (2009). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
22. American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
23. American Society for Testing and Materials. (1998). Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete.
24. พลยุทธ์ ทองผาสุก, ธนกร พันหา และปริญญวิษฐ์ พลະศุนย์. (2020). ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ. Bachelor's thesis. Civil Engineering. Chulalongkorn University.
25. อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2020). ระบบ

สารสนเทศอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<https://gisweb.dpim.go.th/main/GISLogin.aspx> [2020, กันยายน 12]

26. American Society for Testing and Materials. (1993). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.
27. American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
28. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2007). การประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.oap.go.th/images/documents/resources/media-library/publications/value_quantity_radioactivity_assessment_within_from_the_body.pdf [2020, กรกฎาคม 28]
29. ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2020). เอกสารประกอบการอบรม-นักวิจัย. โครงการฝึกอบรมหลักสูตรการป้องกันอันตรายจากรังสีสำหรับนักวิจัยและผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี.
30. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2009). คู่มืออบรมป้องกันอันตรายจากรังสี. กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ช่องทางการได้รับรังสีเข้าสู่ร่างกายและการประเมินค่าปริมาณรังสีในร่างกาย [28, 29]

การได้รับรังสีของมนุษย์มาจาก 2 ทาง คือการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย และการได้รับรังสีจากภายในร่างกาย โดยในการรับรังสีจากภายนอกร่างกาย หากไม่ได้ปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสีก็ จะไม่ได้รับรังสี แต่การรับรังสีจากภายในร่างกายเป็นการที่มีสารรังสีเข้าสู่ร่างกายทำให้รังสีอยู่ตลอดเวลาจนกว่าสารรังสีนั้นจะหมดไปจากร่างกาย ซึ่งสารรังสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 4 ทาง คือ 1. การหายใจ (inhalation) 2. การกิน (Ingestion) 3. ซึมผ่านทางผิวหนัง (Absorption) 4. ทางบาดแผล (Wound)

ร่างกายมนุษย์สามารถขจัดสารรังสีออกได้ด้วยกลไกการขจัดของเสียจากร่างกายเช่น การขับถ่ายออกทางปัสสาวะหรืออุจจาระ การหายใจเข้าออก และเหงื่อ เป็นต้น นอกจากนี้สารรังสียังลดลงได้จากการสลายตัวของสารรังสีเอง ซึ่งวิธีการตรวจวัดปริมาณรังสีในร่างกายมี 3 วิธี คือ

1. ตรวจวัดจากสิ่งขับถ่าย
2. ตรวจวัดจากร่างกายโดยตรงโดยใช้เครื่องวัดรังสีทั่วร่างกาย (Whole body counter)
3. วัดจากตัวอย่างอื่นๆ เช่น การวัดตัวอย่างอากาศในบริเวณที่ปฏิบัติงานกับสารรังสี

เมื่อนำค่าปริมาณรังสีที่วัดได้จากวิธีการตรวจวัดต่างๆ มาคำนวณเป็นค่าปริมาณรังสีจากร่างกายในร่างกาย โดยคำนวณในรูปแบบของค่าปริมาณรังสียังผล (Committed Effective Dose Equivalent: CEDE) ซึ่งผู้ที่ปฏิบัติงานด้านรังสี ผลรวมการรับรังสีจากทั้งภายนอกและภายในร่างกาย ในหนึ่งปีไม่ควรเกิน 20 mSv และประชาชนทั่วไปไม่เกิน 1 mSv ต่อปี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน่วยวัดทางรังสี (Radiation units) [29, 30]

หน่วยวัดรังสีที่นิยมใช้กันอยู่มีอยู่ 4 หน่วย คือ

1. เกรย์ (Grey: Gy) – เป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนไว้เมื่อได้รับรังสี (Absorbed dose) โดยที่มีการกำหนดไว้ว่า $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kilogram (J/kg)} = 100 \text{ rads}$ ตามในระบบ SI
2. แร็ด (Radiation absorbed dose: rad) – เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนไว้เมื่อได้รับรังสี (หน่วยเดิม) โดยที่ $1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gram}$

3. เร็ม (Radiation equivalent man; Roentgen equivalent man: rem) – เป็นหน่วยเก่าที่ใช้วัดปริมาณรังสีสมมูล (Dose equivalent) ที่เป็นผลคูณระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose) ที่มีหน่วยเป็นเร็ดกับค่าปรับเทียบที่แตกต่างกันตามชนิดและพลังงานรังสีของรังสี (Relative biological effect: RBE) หรือเป็นผลคูณระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนที่มีหน่วยเป็นเร็ดกับค่า Quality factor (QF) ซึ่ง $\text{rem} = \text{rad} \times \text{RBE} = \text{rad} \times \text{QF}$

4. ซีเวิร์ต (Sievert: Sv) - เป็นหน่วย SI ที่ใช้วัดปริมาณสมมูลเป็นผลคูณระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนที่มีหน่วยเป็นเกรย์กับค่าปรับเทียบที่แตกต่างกันตามชนิดและพลังงานรังสีของรังสี หรือเป็นผลคูณระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนที่มีหน่วยเป็นเกรย์กับค่า QF ซึ่ง $\text{Sv} = \text{Gy} \times \text{RBE} = \text{Gy} \times \text{QF}$ และ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rems} = 1 \text{ J/kg}$

* ในเอกสารบางเล่มมีการคิดรวมปัจจัยการแจกจ่าย (Distribution factor: DF) ด้วยจะได้ $\text{rem} = \text{rad} \times \text{QF} \times \text{DF}$ หรือ $\text{Sv} = \text{rad} \times \text{QF} \times \text{DF}$

ตารางที่ 20 ค่า RBE ของรังสีชนิดต่างๆ (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ พ.ศ.2545)

Radiation	RBE
X-ray, Gamma ray	1
Beta ray	1
Thermal neutron	4-5
Fast neutron	10
Alpha ray	10-20

ตารางที่ 21 ค่า QF ของรังสีชนิดต่างๆ (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ พ.ศ.2545)

Radiation	QF
X-ray, Gamma ray	1
Beta ray ($E_{\text{max}} > 0.003 \text{ MeV}$)	1
Beta ray ($E_{\text{max}} < 0.003 \text{ MeV}$)	1.7
Neutron of unknown energies	10
Alpha particles, Fission fragments, Heavy particles of unknown charge	20
High-Energy Photons	10

ผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต [29]

สิ่งมีชีวิตประกอบด้วยหน่วยเล็กที่สุด คือ เซลล์ (Cell) รวมตัวกันเป็นเนื้อเยื่อ (Tissue) และหลายๆ เนื้อเยื่อรวมกันเป็นอวัยวะ (Organ) ซึ่งเมื่ออวัยวะมาทำงานรวมกันภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ หากมีส่วนใดส่วนหนึ่งถูกทำลายหรือเกิดความเสียหาย ก็จะส่งผลเสียต่อการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิตได้

เมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านเซลล์จะก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรือเกิดการกระตุ้น/ตื่นตัว (Excitation) ของอะตอมและโมเลกุลที่อยู่ในเซลล์ อนุภาคนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะสามารถทำอันตรายต่อเซลล์เนื่องจากพลังงานที่ได้จากรังสีมีมากพอที่จะทำลายพันธะทางเคมีของ DNA หรือโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่ในเซลล์ ทำให้เกิดอันตรายต่อเซลล์ที่ได้รับรังสี

ตารางที่ 22 ความไวของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะต่อรังสีเอกซ์หรือแกมมา (Acute exposure)

ชนิดของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะ	ผลการตอบสนอง
Blood - forming organ - Lymph nodes - Thymus - Spleen - Bone marrow	มีความไวต่อรังสีมาก เมื่อได้รับรังสีประมาณ 50 rad ส่งผลต่อจำนวนเซลล์เม็ดเลือดขาวภายใน 15 นาที จำนวนเม็ดเลือดแดงลดลง 2-3 สัปดาห์ ต่อมา ทำให้ร่างกายอ่อนเพลีย โลหิตจางและติดเชื้อได้ง่าย
Reproductive organs - male - female	มีความไวต่อรังสีปานกลาง เมื่อได้รับรังสี 200-300 rad หลังจากนั้น 12-15 เดือน จะก่อให้เกิดการเป็นหมันชั่วคราว ยิ่งได้รับปริมาณสูงกว่านี้จะก่อให้เกิดการเป็นหมัน (ในผู้ชายมากกว่าผู้หญิง)
Digestive organs - small intestine - lower intestine - esophagus - pharynx	มีความไวต่อรังสีต่ำ เมื่อได้รับรังสี 500-1000 rad เกิดการเสื่อมของอวัยวะในระบบย่อยอาหารภายใน 30 นาที เช่น เกิดความเสื่อมของระบบการคัดหลั่งของเหลว เกิดการแตกของเซลล์ ระบบการดูดซึมอาหารและน้ำ ล้มเหลว เกิดการสูญเสียน้ำเนื่องจากท้องเสีย เกิดการติดเชื้อ เป็นต้น

ชนิดของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะ	ผลการตอบสนอง
Vascular system - arteries - capillaries - veins	มีความต้านทานต่อรังสีปานกลาง ความไวต่อรังสีขึ้นกับชนิดของระบบ หลอดเลือด จะเกิดความเสียหายต่อระบบหลอดเลือดเมื่อได้รับรังสี 600-1500 rad โดยเฉพาะที่หัวใจ
Skin	มีความต้านทานต่อรังสี เมื่อได้รับรังสี 500-1000 rad จึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหนัง
Bone and teeth	เมื่อได้รับรังสี 700-1500 rad มีบางส่วนของกระดูกถูกทำลาย แต่สามารถซ่อมแซมได้ภายใน 2-6 สัปดาห์ หลังจากได้รับรังสี
Respiratory system	มีความต้านทานต่อรังสี เมื่อได้รับรังสี 1000-2000 rad จะก่อให้เกิดการอักเสบของปอด เกิดเลือดออกเนื่องจากผลของรังสีต่อหลอดเลือด
Urinary system	เมื่อได้รับรังสี 500-2000 rad จะเกิดอันตรายตามมาภายหลังจากการได้รับรังสี ซึ่งระยะเวลาอาจจะผ่านไปเป็นปีจึงจะแสดงอาการต่อระบบหลอดเลือด
Muscle and connective tissues	มีความต้านทานต่อรังสีมาก ต้องได้รับรังสีมากกว่า 2000 rad จึงจะเกิดอันตรายเพียงเล็กน้อย
Nervous tissue	มีความต้านทานต่อรังสีมาก ต้องได้รับรังสีมากกว่า 3000 rad จึงจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อรูปร่างของเซลล์หรือเนื้อเยื่อ

ตารางที่ 23 ปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Acute exposure)

Species	Rads
Guinea pig	175-409
Dog	350
Goat	350
Man	350-450
Mouse	550
Rat	590-970
Monkey	600

Species	Rads
Rabbit	800
Fowl	1000
Goldfish	2300

ตารางที่ 24 ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการรับปริมาณรังสีของร่างกาย (Acute exposure)

Acute Dose (rads)	Probable effect
0-50	ไม่มีอาการ อาจมีการเปลี่ยนแปลงของระบบเลือดเล็กน้อย
80-120	คลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1 วัน (มีโอกาสเกิด 5-10% ของคนที่ได้รับรังสี) อ่อนเพลีย
130-170	คลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1 วัน ตามมาด้วยอาการ Radiation sickness (มีโอกาสเกิด 25% ของคนที่ได้รับรังสี)
180-220	คลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1 วัน ตามมาด้วยอาการ Radiation sickness (มีโอกาสเกิด 50% ของคนที่ได้รับรังสี)
270-330	เกือบทุกคนมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1 วัน ตามมาด้วยอาการ Radiation sickness มีอัตราการตาย 20% ในช่วง 2-6 สัปดาห์ ผู้ป่วยที่ รอดชีวิตจะมีอาการดีขึ้นภายใน 3 เดือน
400-500	ทุกคนมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1 วัน ตามมาด้วยอาการ Radiation sickness มีอัตราการตาย 50% ภายใน 1 เดือน ผู้ป่วยที่รอด ชีวิตจะมีอาการดีขึ้นภายใน 6 เดือน
550-750	ทุกคนมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนภายใน 4 ชั่วโมง ตามมาด้วยอาการ Radiation sickness มีอัตราการตายเกือบ 100% ผู้ป่วยที่รอดชีวิตจะมี อาการดีขึ้นภายใน 6 เดือน
1000	ทุกคนมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนภายใน 1-2 ชั่วโมง ตายจาก Radiation sickness 100%
5000	ตาย 100% ภายใน 1 สัปดาห์

ตารางที่ 25 Acute radiation syndrome

การตอบสนอง	ปริมาณ (rads)	กลุ่มอาการ
Hematopoietic death	700-1000	ตายภายใน 10-21 วัน มีสาเหตุเนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบเลือด ทำให้มีเลือดออก เกิดการติดเชื้
Gastro-intestinal death	1000-10000	คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย ตายภายใน 4-7 วัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของเซลล์ในระบบทางเดินอาหาร
Central nervous system death	10000-100000	การสื่อสารผิดปกติ เริ่มไม่รู้สึกรู้ตัว เกิดอาการโคม่าและตายภายใน 2 วัน เนื่องจากระบบประสาทถูกทำลาย
Molecular death	Over 100000	ตายทันที เนื่องจากระบบเมตาบอลิซึมที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตผิดปกติ



ตารางที่ 26 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 662 keV

Mix No.	Linear attenuation coefficient at 662 keV (cm ⁻¹)							
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Min	Max	Average
1	0.234	0.276	0.268	0.262	0.274	0.234	0.276	0.263
2	0.283	0.301	0.284	0.252	0.275	0.252	0.301	0.279
3	0.253	0.262	0.259	0.256	0.267	0.253	0.267	0.259
4	0.260	0.250	0.265	0.260	0.261	0.250	0.265	0.259
5	0.243	0.246	0.256	0.251	0.251	0.243	0.256	0.249
6	0.260	0.274	0.275	0.259	0.283	0.259	0.283	0.270
7	0.242	0.282	0.290	0.278	0.267	0.242	0.290	0.272
8	0.246	0.273	0.271	0.283	0.276	0.246	0.283	0.270
9	0.233	0.269	0.265	0.254	0.262	0.233	0.269	0.256
10	0.243	0.252	0.284	0.266	0.253	0.243	0.284	0.260
11	0.295	0.280	0.298	0.260	0.286	0.260	0.298	0.284
12	0.265	0.268	0.236	0.262	0.266	0.236	0.268	0.259
13	0.243	0.251	0.258	0.256	0.245	0.243	0.258	0.251
14	0.243	0.260	0.240	0.246	0.254	0.240	0.260	0.249
15	0.214	0.217	0.214	0.215	0.213	0.213	0.217	0.215
16	0.178	0.186	0.207	0.177	0.181	0.177	0.207	0.186
17	0.173	0.178	0.175	0.176	0.171	0.171	0.178	0.174
18	0.216	0.255	0.253	0.246	0.239	0.216	0.255	0.242
19	0.244	0.260	0.285	0.260	0.263	0.244	0.285	0.262
20	0.248	0.260	0.255	0.244	0.246	0.244	0.260	0.251
21	0.265	0.273	0.281	0.253	0.271	0.253	0.281	0.269
22	0.287	0.280	0.279	0.251	0.276	0.251	0.287	0.275
23	0.222	0.229	0.240	0.240	0.207	0.207	0.240	0.228
24	0.245	0.248	0.248	0.251	0.246	0.245	0.251	0.248
25	0.238	0.258	0.243	0.246	0.254	0.238	0.258	0.248

ตารางที่ 27 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1174 keV

Mix No.	Linear attenuation coefficient at 1174 keV (cm ⁻¹)							
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Min	Max	Average
1	0.187	0.204	0.205	0.197	0.202	0.187	0.205	0.199
2	0.210	0.217	0.222	0.189	0.200	0.189	0.222	0.208
3	0.187	0.201	0.193	0.194	0.201	0.187	0.201	0.195
4	0.191	0.192	0.195	0.196	0.205	0.191	0.205	0.196
5	0.181	0.184	0.196	0.196	0.202	0.181	0.202	0.192
6	0.201	0.206	0.214	0.202	0.219	0.201	0.219	0.208
7	0.181	0.215	0.221	0.208	0.202	0.202	0.221	0.206
8	0.191	0.211	0.212	0.217	0.219	0.191	0.219	0.210
9	0.182	0.209	0.200	0.198	0.203	0.182	0.209	0.198
10	0.190	0.209	0.215	0.215	0.193	0.190	0.215	0.205
11	0.241	0.220	0.233	0.210	0.217	0.210	0.241	0.224
12	0.199	0.204	0.185	0.198	0.198	0.185	0.204	0.197
13	0.185	0.192	0.202	0.195	0.189	0.185	0.202	0.192
14	0.189	0.194	0.187	0.189	0.194	0.187	0.194	0.191
15	0.163	0.163	0.167	0.168	0.166	0.163	0.168	0.165
16	0.136	0.151	0.169	0.147	0.147	0.136	0.169	0.150
17	0.142	0.142	0.139	0.139	0.136	0.136	0.142	0.140
18	0.161	0.196	0.194	0.189	0.188	0.161	0.196	0.186
19	0.187	0.207	0.221	0.204	0.200	0.187	0.221	0.204
20	0.203	0.193	0.183	0.199	0.196	0.183	0.203	0.195
21	0.204	0.204	0.220	0.189	0.207	0.189	0.220	0.205
22	0.221	0.214	0.211	0.183	0.210	0.183	0.221	0.208
23	0.164	0.177	0.191	0.192	0.157	0.157	0.192	0.176
24	0.189	0.186	0.192	0.198	0.186	0.186	0.198	0.190
25	0.181	0.207	0.186	0.187	0.196	0.181	0.207	0.191

ตารางที่ 28 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1332 keV

Mix No.	Linear attenuation coefficient at 1332 keV (cm ⁻¹)							
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Min	Max	Average
1	0.171	0.191	0.193	0.184	0.188	0.171	0.193	0.185
2	0.208	0.201	0.212	0.179	0.187	0.179	0.212	0.197
3	0.174	0.189	0.179	0.181	0.188	0.174	0.189	0.182
4	0.184	0.181	0.186	0.185	0.193	0.181	0.193	0.186
5	0.174	0.180	0.181	0.177	0.181	0.174	0.181	0.179
6	0.192	0.196	0.197	0.188	0.203	0.188	0.203	0.195
7	0.170	0.207	0.210	0.198	0.191	0.170	0.210	0.195
8	0.174	0.198	0.198	0.202	0.203	0.174	0.203	0.195
9	0.169	0.195	0.188	0.182	0.184	0.169	0.195	0.184
10	0.173	0.184	0.200	0.200	0.178	0.173	0.200	0.187
11	0.217	0.202	0.216	0.187	0.204	0.187	0.217	0.205
12	0.187	0.187	0.170	0.185	0.185	0.170	0.187	0.183
13	0.171	0.177	0.183	0.181	0.170	0.170	0.183	0.176
14	0.174	0.185	0.171	0.183	0.184	0.171	0.185	0.180
15	0.155	0.156	0.154	0.154	0.152	0.152	0.156	0.154
16	0.128	0.138	0.154	0.132	0.134	0.128	0.154	0.137
17	0.127	0.133	0.130	0.131	0.130	0.127	0.133	0.130
18	0.154	0.186	0.185	0.175	0.172	0.154	0.186	0.174
19	0.177	0.191	0.208	0.190	0.193	0.177	0.208	0.192
20	0.184	0.179	0.176	0.182	0.188	0.176	0.188	0.182
21	0.189	0.191	0.206	0.185	0.195	0.185	0.206	0.193
22	0.207	0.201	0.198	0.173	0.197	0.173	0.207	0.195
23	0.160	0.163	0.177	0.175	0.150	0.150	0.177	0.165
24	0.176	0.181	0.181	0.182	0.177	0.176	0.182	0.180
25	0.173	0.194	0.175	0.174	0.183	0.173	0.194	0.180

ตารางที่ 29 ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีนิวตรอน

Mix No.	Macroscopic fast neutron removal cross-section Σ_R (cm ⁻¹)			Mass removal cross-section Σ_R/ρ (cm ² /g)		
1	0.0709	±	0.0015	0.0188	±	0.0004
2	0.0727	±	0.0016	0.0193	±	0.0004
3	0.0699	±	0.0015	0.0195	±	0.0004
4	0.0703	±	0.0015	0.0205	±	0.0004
5	0.0721	±	0.0016	0.0209	±	0.0005
6	0.0736	±	0.0016	0.0191	±	0.0004
7	0.0710	±	0.0015	0.0187	±	0.0004
8	0.0731	±	0.0016	0.0195	±	0.0004
9	0.0732	±	0.0016	0.0194	±	0.0004
10	0.0724	±	0.0016	0.0192	±	0.0004
11	0.0734	±	0.0016	0.0194	±	0.0004
12	0.0693	±	0.0015	0.0196	±	0.0004
13	0.0691	±	0.0015	0.0201	±	0.0004
14	0.0704	±	0.0015	0.0203	±	0.0004
15	0.0680	±	0.0015	0.0224	±	0.0005
16	0.0669	±	0.0015	0.0256	±	0.0006
17	0.0674	±	0.0015	0.0230	±	0.0005
18	0.0700	±	0.0015	0.0211	±	0.0005
19	0.0737	±	0.0016	0.0198	±	0.0004
20	0.0725	±	0.0016	0.0195	±	0.0004
21	0.0744	±	0.0016	0.0200	±	0.0004
22	0.0727	±	0.0016	0.0198	±	0.0004
23	0.0727	±	0.0016	0.0218	±	0.0005
24	0.0725	±	0.0016	0.0207	±	0.0004
25	0.0731	±	0.0016	0.0210	±	0.0004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Wisarute Rungjaroenkiti
วัน เดือน ปี เกิด	12 Oct 1995
สถานที่เกิด	Bangkok
วุฒิการศึกษา	Chulalongkorn University
ที่อยู่ปัจจุบัน	651 Soi Charunsanitwong 75 Charunsanitwong Rd. Bang plat Bang plat 10700



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY