

สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและนิวตรอนของคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ

วิศรุต รุ่งเจริญกิติ^{1*}, วิจิต ปานสุข²

^{1,2} หน่วยงานปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จังหวัดกรุงเทพฯ

*Corresponding author address: pipejint@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานนิวเคลียร์ได้ถูกนำมาใช้ในด้านการผลิตพลังงานหรือในกระบวนการทางอุตสาหกรรมหรือนำมาใช้รักษาในทางการแพทย์และอนามัย แต่ทว่าในการจะได้อำนาจซึ่งพลังงานนิวเคลียร์นั้นจะต้องมีการใช้สารกัมมันตภาพรังสีและมีปลดปล่อยพลังงานและอนุภาคต่างๆออกมา ซึ่งสิ่งที่ถูกปล่อยออกมานั้นส่งผลเสียกับสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมอีกทั้งยังใช้เวลานานกว่าจะสลายไปเอง ดังนั้นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นที่ดีที่สุดคือการป้องกันการรั่วไหลของรังสีที่จะเกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีที่ดีมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นสูงหรือที่เรียกว่าคอนกรีตมวลหนัก งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องการป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอน ซึ่งเมื่อได้พิจารณาจากแหล่งวัสดุภายในประเทศเพื่อหาแร่ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้แทนหินในการทำคอนกรีตมวลหนักพบว่า แร่แบไรต์ เป็นแร่ที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านการจัดหาและคุณสมบัติในการนำมาใช้ทำคอนกรีตมวลหนัก จากนั้นจึงได้ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลจาก 25 สัดส่วนผสมเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนักกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมา โดยเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลหนัก, แร่แบไรต์, ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและนิวตรอน

Abstract

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 any 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 suitable 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 in this experiment 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.

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

1. ที่มาและความสำคัญ

พลังงานนิวเคลียร์ถูกจัดให้เป็นพลังงานสะอาดที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้านไม่ว่าจะเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้า การศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้มาซึ่งเทคโนโลยีนิวเคลียร์มาใช้ในทางอุตสาหกรรม ทางทางการแพทย์และทางการแพทย์ เช่น การตรวจสอบคุณภาพหรือตรวจหาความผิดปกติของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์, การควบคุมความหนาของกระดาษ, การฉีดสารเภสัชรังสีเข้าร่างกายผู้ป่วยเพื่อหาตำแหน่งที่อวัยวะหรือเนื้อเยื่อมีความผิดปกติ, การฉายรังสีแกมมาเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บของอาหาร และการปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสัตว์ เป็นต้น แต่การได้มาซึ่งพลังงานนิวเคลียร์จะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีและอนุภาคต่างๆ จากการใช้สารกัมมันตภาพรังสี และ

เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับมากเกินไป โดยรังสีที่จะเกิดขึ้นได้จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีประกอบด้วย

รังสีแอลฟา คือ นิวเคลียสของธาตุฮีเลียม ประกอบด้วยโปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว ที่หลุดออกมาจากนิวเคลียส เนื่องจากมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการแตกตัวของตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน จึงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุได้ระยะทางสั้นๆหรืออำนาจในการทะลุทะลวงต่ำที่สามารถใช้กระดาษบางแผ่นเดียวก็สามารถกันได้ [1]

รังสีบีตา คือ อนุภาคอิเล็กตรอนหรือโพซิตรอนแผ่ออกมาจากนิวเคลียสของอะตอมขณะเกิดการสลายกัมมันตรังสี มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแอลฟาอำนาจทำให้ตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการแตกตัวน้อยกว่า แต่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่า ซึ่งแผ่นอะลูมิเนียมบางๆ สามารถใช้กันได้ [1]

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส หลังจากการสลายตัวให้อนุภาครังสีชนิดต่างๆ โดยนิวไคลด์ลูกยังไม่เสถียร จึงต้องลดพลังงานลงจากการให้รังสีแกมมา เพื่อให้เกิดความเสถียร สามารถทำให้ตัวกลางที่ผ่านแตกตัวได้ไม่ตีเทารังสีแอลฟาหรือรังสีบีตา แต่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมาก จึงจำเป็นต้องกำบังด้วยตะกั่วหรือคอนกรีตหนา [1]

รังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับรังสีแกมมาแต่มีพลังงานน้อยกว่าและมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำกว่า เกิดจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปอยู่ในสถานะไม่เสถียร หรือการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนความเร็วสูงกับอะตอม [1]

รังสีนิวตรอน คือ อนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในสภาวะอิสระและมีพลังงาน โดยปกติจะไม่สามารถคงอยู่ในสภาพได้นานเพราะจะแตกตัวออกเป็นอนุภาคชนิดอื่น มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง แบ่งตามพลังงานได้เป็นนิวตรอนเร็วและนิวตรอนช้า สามารถถูกยับยั้งการเคลื่อนที่ได้ด้วยสารที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ [1]

ในส่วนของโครงสร้างป้องกันรังสีนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจะมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติโดยมีความหนาแน่นสูงกว่าและมีองค์ประกอบพิเศษเพื่อพัฒนาคุณสมบัติในการลดทอนรังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้คอนกรีตมวลหนักที่มีความหนาแน่นสูงเป็นหลัก จากมาตรฐาน 2019 ASME BPVS Section III – Rules For Construction Of Nuclear Facility Component (Division2 : Code for Concrete Containments) หรือ ACI 359-19 : CODE FOR CONCRETE REACTOR VESSELS AND CONTAINMENTS [2] ได้ระบุไว้ว่าคอนกรีตมวลหนักจะต้องใช้มวลรวมหนักที่มีความหนาแน่นมากกว่า 2600 กก./ม³ และเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังนี้ 1. ASTM C637 [3] 2. ข้อกำหนดตามที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดก่อสร้างสำหรับงานเจาะเหล็ก งานเหล็กเสริมแรงเฉือน งานยิงเหล็กหรือใช้วัสดุที่มีโบรอนเป็นมวลรวมของคอนกรีต

ในปัจจุบันจากการศึกษาแร่มวลหนักที่สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมคอนกรีตได้ตามมาตรฐาน ANSI/ANS-6.4-2006;R2016 [4] ซึ่งมีการให้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหนัก ได้แก่ อิลเมนไนต์ (Ilmenite), ไลโมนไนต์ (Limonite), แมกนีไทต์ (Magnetite) และแบไรต์ (Barite) จากการศึกษาพบว่าแบไรต์มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำมวลรวม เนื่องจากเป็นแร่เดียวที่สามารถหาได้จากแหล่งภายในประเทศ [5-6] ซึ่งจากการหาข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ เหมืองแร่ที่มีใบอนุญาตประทานบัตรเหมืองอยู่ใน 3 จังหวัด คือ จังหวัดแพร่ จังหวัดเลยและจังหวัดนครศรีธรรมราช

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาและนิวตรอนจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี รวมถึงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลหนักที่มีสัดส่วนผสมของมวลรวมที่ต่างกันจากมวลรวมที่หาได้ภายในประเทศไทย เพื่อพัฒนา

คอนกรีตที่นำมาใช้กำบังรังสีในงานเครื่องปฏิกรณ์คอนกรีตและงานกักเก็บกากกัมมันตรังสี

2. วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุประสานเป็นเถ้าลอยที่มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้ในการก่อสร้างทั่วไปในทุกสัดส่วนผสม และจะมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนและชนิดของมวลรวมในแต่ละสัดส่วนผสมดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งวัสดุมีความถ่วงจำเพาะตามตารางที่ 1

2.1.1. มวลรวมหยาบ

วัสดุที่นำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ได้แก่ หินปูน แร่แบไรต์ และเหล็กข้อย่อย โดยที่ใช้วัสดุที่มีขนาดในช่วงระหว่างตะแกรงร่อน 1.5 นิ้ว และตะแกรงร่อน 3/8 นิ้ว ส่วนเหล็กข้อย่อยที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และนำมาตัดให้มีความยาวชิ้นละ 2 ซม.

2.1.2. มวลรวมละเอียด

วัสดุที่นำมาใช้เป็นมวลละเอียด ได้แก่ ทรายธรรมชาติ เศษหินแกรนิต และแร่แบไรต์ โดยที่ใช้วัสดุที่มีขนาดในช่วงระหว่างตะแกรงร่อนเบอร์ 4 และตะแกรงร่อนเบอร์ 200 ซึ่งแร่แบไรต์ที่นำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดได้มีการนำแร่ที่ได้มาจากเหมืองไปย่อยและคัดขนาดที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนเศษหินแกรนิตมาจากเหมืองหินศิลาจังหวัดชลบุรี



รูปที่ 1 รูปวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเรียง(จากซ้ายไปขวา) เหล็กข้อย่อย-แบไรต์-หินปูน เถ้าลอย-ทราย-เศษหินแกรนิต

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้

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

2.2. สัดส่วนผสมและวิธีการผสมคอนกรีตมวลหนัก

การศึกษาในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุที่อยู่ในสถานะอิมพัลส์ในการผสมคอนกรีตมวลหนักซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยในการผสมคอนกรีตทำโดยการใส่มวลรวมหยาบซีเมนต์ และเถ้าลอย ผสมกันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นผสมมวลรวมละเอียดและเหล็กข้ออ้อย (ในสัดส่วนผสมที่มี) อีกเป็นเวลา 5 นาที เมื่อทำการผสมเสร็จนำคอนกรีตมาเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้ ในส่วนของ การบ่มตัวอย่างจะนำตัวอย่างไปบ่มโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบ

2.3. วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอน

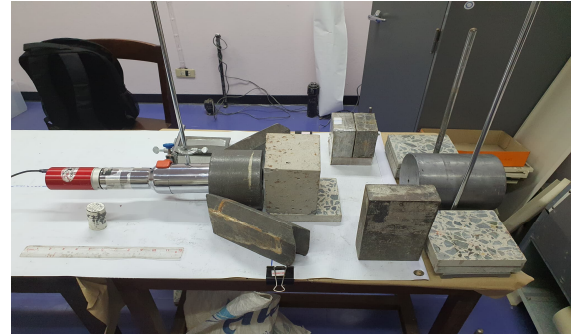
การทดสอบจะจัดทำที่ห้องทดสอบทางรังสี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาและนิวตรอน โดยนำตัวอย่างที่หล่อไว้แล้ววางระหว่างตำแหน่งแหล่งกำเนิดรังสีและหัววัด บันทึกค่าปริมาณรังสีที่วัดได้และความหนาของตัวอย่างที่ใช้กำกับ แล้วคำนวณหาค่าการลดทอนสำหรับความหนาต่างๆ แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีสำหรับคอนกรีตในแต่ละตัวอย่าง

2.3.1. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีแกมมา [7-9] จะใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากธาตุกัมมันตรังสี Cs-137 และ Co-60 โดยใช้พลังงานโฟตอน 662 keV จาก Cs-137 และระดับพลังงานสองระดับ 1173 และ 1332 keV จาก Co-60 การเตรียมการทดสอบเริ่มโดยการติดตั้งกำบังที่ใช้ใส่แหล่งกำเนิดรังสีและวัดระยะห่างจากกำบังไปยังเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาให้มีระยะทางยาวกว่าตัวอย่างความหนา 10 ซม. และใช้แผ่นตะกั่วกำบังด้านข้างของแหล่งกำเนิดและเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อกำบังไม่ให้รังสีที่แผ่จากแหล่งอื่นเข้ามารบกวนการทดสอบ วัดค่าความเข้มของรังสีที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ไม่ได้กำบัง จากนั้นนำตัวอย่างมาวางขวางลำของรังสีแกมมาที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีหลังจากเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง ไปยังเครื่องตรวจวัดที่อยู่ด้านหลังของตัวอย่างตามที่แสดงในรูปที่ 2

ในการทดสอบจะขยับตัวอย่างเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ลำของรังสีเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง 5 จุด เพื่อให้ค่าที่วัดออกมานั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของตัวอย่างมากที่สุดในกรณีที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านไปบริเวณที่อาจมีความหนาแน่นแตกต่างจากบริเวณอื่น เช่น เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตไปโดยไม่ผ่านเหล็กที่ผสมอยู่ในคอนกรีต หรือเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตไปโดยผ่านเหล็กที่ซ้อนทับกันในคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแกมมาที่วัดได้จากการทดสอบที่ตำแหน่งเดียวไม่สามารถเป็นตัวแทนของตัวอย่างนั้นได้ ก่อนจะนำ

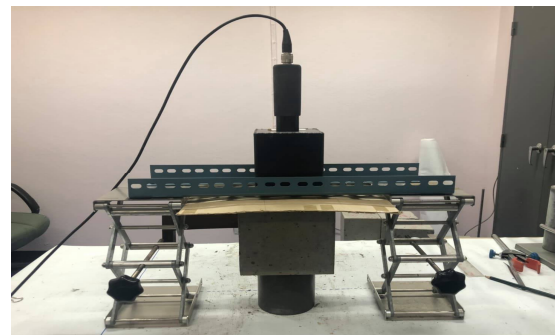
ค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมา



รูปที่ 2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

2.3.2. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีนิวตรอน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนด้วยรังสีนิวตรอน [10] การเตรียมการทดสอบเริ่มโดยการติดตั้งกำบังที่ใช้ใส่แหล่งกำเนิดนิวตรอนให้ฉายไปในแนวตั้งฉากกับระนาบขึ้นตามทีแสดงในรูปที่ 3 ก่อนนำตัวอย่างมาวางไว้ด้านบนของกำบังและนำแผ่นตะกั่วปิดด้านข้างของตัวอย่างทั้ง 4 ด้าน โดยใช้ตัวอย่างขนาดลูกบาศก์ 15 ซม. ในการทดสอบแล้วด้านบนของตัวอย่างจะติดตั้งเครื่องตรวจวัดรังสีนิวตรอนเพื่อวัดค่าความเข้มรังสีที่ผ่านตัวอย่างมาที่เครื่องตรวจวัดรังสีนิวตรอน ในการตรวจวัดความเข้มรังสีนิวตรอนจะพิจารณา fast neutrons เป็นหลัก หลังจากการตรวจวัดค่าความเข้มของรังสีนิวตรอนหาที่มีกำบัง จึงตรวจวัดค่าความเข้มของรังสีนิวตรอนที่ไม่ผ่านการกำบัง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนหรือเรียกว่า Macroscopic fast neutron removal cross-section เนื่องจากขนาดลำของรังสีนิวตรอนที่ออกมาจากกำบังมีขนาดกว้าง เป็นเหตุให้การทดสอบจึงสามารถหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวอย่างจากตำแหน่งเดียวได้



รูปที่ 3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีนิวตรอน

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสม	ซีเมนต์ (kg/m ³)	เถ้าลอย (kg/m ³)	เหล็กขี้เถ้า (kg/m ³)	น้ำ (liter/m ³)	มวลรวมละเอียด (kg/m ³)			มวลรวมหยาบ (kg/m ³)	
					ทรายแม่น้ำ	หินฝุ่น	แบไรต์	หินปูน	แบไรต์
1	340	85	700	170	0	0	1320	0	1080
2	340	85	550	170	0	0	1320	0	1160
3	340	85	400	170	0	0	1320	0	1240
4	340	85	250	170	0	0	1320	0	1320
5	340	85	100	170	0	0	1320	0	1400
6	340	85	700	170	0	0	1310	0	1100
7	340	85	700	170	0	0	1415	0	1000
8	340	85	700	170	0	0	1520	0	900
9	340	85	700	170	0	0	1390	0	1025
10	340	85	700	170	0	0	1470	0	950
11	340	85	700	170	0	0	1550	0	875
12	340	85	0	170	0	0	1460	0	1300
13	340	85	0	170	0	0	1410	0	1350
14	340	85	0	170	0	0	1510	0	1250
15	340	85	0	170	0	0	1320	1000	0
16	340	85	0	170	0	1025	0	0	1100
17	340	85	0	170	1025	0	0	0	1100
18	340	85	700	170	300	300	300	0	1080
19	368.8	85	700	150	0	0	1320	0	1080
20	354.4	85	700	160	0	0	1320	0	1080
21	340	85	690	167.5	0	0	1320	0	1091
22	340	85	690	167.5	0	0	1327.2	0	1080
23	340	85	700	170	410	410	0	0	1080
24	340	85	350	170	0	130	1320	0	1080
25	340	85	350	170	150	0	1320	0	1080

2.3.3. สมการที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี

จากการทดสอบจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้จากสมการที่ (1) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (2)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad (2)$$

- โดยที่
- I = ความเข้มของรังสีเมื่อมีการกำบัง
 - I₀ = ความเข้มของรังสีเมื่อไม่มีการกำบัง
 - μ = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสี
 - x = ความหนาของคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสี
 - ρ = ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

ซึ่งหลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแล้ว นำมาหาค่า Mean Free Path (MFP), Half Value Layer (HVL), และ

Tenth Value Layer (TVL) [11-12]ตามสมการที่ (3), (4), และ (5)

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

MFP คือ ระยะทางเฉลี่ยที่รังสีเคลื่อนที่ได้ ก่อนที่จะมีปฏิกิริยากับวัสดุกำบัง

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (4)$$

HVL คือ ความหนาของวัสดุกำบังที่สามารถลดความเข้มของรังสีลงเหลือ 50% ของความเข้มรังสีจากแหล่งกำเนิด

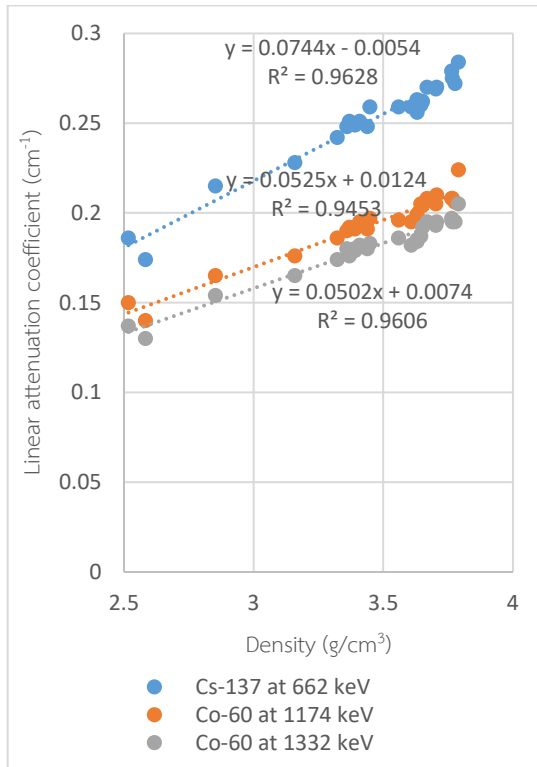
$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (5)$$

TVL คือ ความหนาของวัสดุกำบังที่สามารถลดความเข้มของรังสีลงเหลือ 10% ของความเข้มรังสีจากแหล่งกำเนิด

3. ผลที่ได้จากการทดสอบ

3.1. สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีแกมมา

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าจากการทดสอบตัวอย่างทรงลูกบาศก์หน้าตัด 15 เซนติเมตร * 15 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร คอนกรีตทั้ง 25 สัดส่วนผสมด้วยรังสีแกมมาในแหล่งกำเนิดที่ให้พลังงานแตกต่างกัน พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น



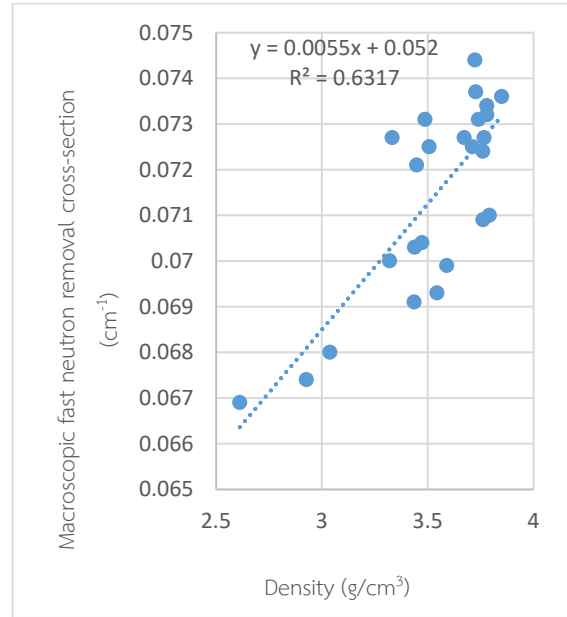
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตกับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมา

โดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจะเพิ่มขึ้นในทุกพลังงานของรังสีแกมมา ซึ่งทำให้สัดส่วนผสมที่มีการเปลี่ยนวัสดุรวมให้มีน้ำหนักมากขึ้นจะสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้มากขึ้น ไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดจากในกลุ่มที่สัดส่วนผสมมีเหล็กและกลุ่มที่ไม่มีเหล็กอยู่ในสัดส่วนผสม

3.2. สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตด้วยรังสีนิวตรอน

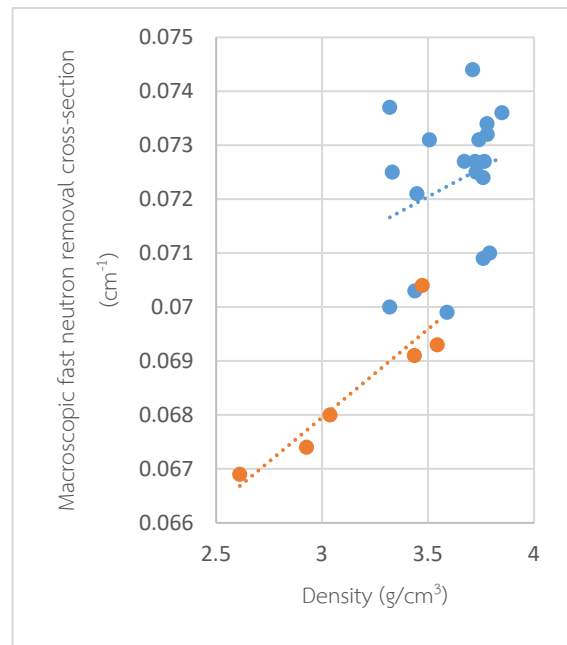
รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าจากการทดสอบตัวอย่างทรงลูกบาศก์หน้าตัด 15 เซนติเมตร * 15 เซนติเมตร ลึก 15 เซนติเมตร คอนกรีตทั้ง 25 สัดส่วนผสมด้วยรังสีนิวตรอนพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

รังสีนิวตรอนเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตกับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอน

เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มตามรูปที่ 6 ตามส่วนผสมที่มีและไม่มีเหล็กผสมอยู่ พบว่ากลุ่มที่มีเหล็กผสมอยู่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีเหล็กอยู่ในสัดส่วนผสม



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตกับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีนิวตรอน (สีน้ำเงิน - มีเหล็กผสม สีส้ม - ไม่มีเหล็กผสม)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีต

Mix	Gamma ray from Cs-137 (662 keV)			Gamma ray from Co-60 (1174 keV)			Gamma ray from Co-60 (1332 keV)			Neutron ray (fast neutrons)		
	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)
1	3.80	2.64	8.76	5.03	3.48	11.57	5.41	3.75	12.45	14.10	9.78	32.48
2	3.58	2.48	8.25	4.81	3.33	11.07	5.08	3.52	11.69	13.76	9.53	31.67
3	3.86	2.68	8.89	5.13	3.55	11.81	5.49	3.81	12.65	14.31	9.92	32.94
4	3.86	2.68	8.89	5.10	3.54	11.75	5.38	3.73	12.38	14.22	9.86	32.75
5	4.02	2.78	9.25	5.21	3.61	11.99	5.59	3.87	12.86	13.87	9.61	31.94
6	3.70	2.57	8.53	4.81	3.33	11.07	5.13	3.55	11.81	13.59	9.42	31.29
7	3.68	2.55	8.47	4.85	3.36	11.18	5.13	3.55	11.81	14.08	9.76	32.43
8	3.70	2.57	8.53	4.76	3.30	10.96	5.13	3.55	11.81	13.68	9.48	31.50
9	3.91	2.71	8.99	5.05	3.50	11.63	5.43	3.77	12.51	13.66	9.47	31.46
10	3.85	2.67	8.86	4.88	3.38	11.23	5.35	3.71	12.31	13.81	9.57	31.80
11	3.52	2.44	8.11	4.46	3.09	10.28	4.88	3.38	11.23	13.62	9.44	31.37
12	3.86	2.68	8.89	5.08	3.52	11.69	5.46	3.79	12.58	14.43	10.00	33.23
13	3.98	2.76	9.17	5.21	3.61	11.99	5.68	3.94	13.08	14.47	10.03	33.32
14	4.02	2.78	9.25	5.24	3.63	12.06	5.56	3.85	12.79	14.20	9.85	32.71
15	4.65	3.22	10.71	6.06	4.20	13.96	6.49	4.50	14.95	14.71	10.19	33.86
16	5.38	3.73	12.38	6.67	4.62	15.35	7.30	5.06	16.81	14.95	10.36	34.42
17	5.75	3.98	13.23	7.14	4.95	16.45	7.69	5.33	17.71	14.84	10.28	34.16
18	4.13	2.86	9.51	5.38	3.73	12.38	5.75	3.98	13.23	14.29	9.90	32.89
19	3.82	2.65	8.79	4.90	3.40	11.29	5.21	3.61	11.99	13.57	9.40	31.24
20	3.98	2.76	9.17	5.13	3.55	11.81	5.49	3.81	12.65	13.79	9.56	31.76
21	3.72	2.58	8.56	4.88	3.38	11.23	5.18	3.59	11.93	13.44	9.32	30.95
22	3.64	2.52	8.37	4.81	3.33	11.07	5.13	3.55	11.81	13.76	9.53	31.67
23	4.39	3.04	10.10	5.68	3.94	13.08	6.06	4.20	13.96	13.76	9.53	31.67
24	4.03	2.79	9.28	5.26	3.65	12.12	5.56	3.85	12.79	13.79	9.56	31.76
25	4.03	2.79	9.28	5.24	3.63	12.06	5.56	3.85	12.79	13.68	9.48	31.50

จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ MFP, HVL, และ TVL ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 25 สัดส่วนผสมจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของรังสีแกมมาทั้ง 3 พลังงานและรังสีนิวตรอน จะได้ค่าตามที่

แสดงในตารางที่ 3

4. สรุป

จากการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตที่ใช้กำบังรังสีมีความหนาแน่นมากขึ้นในทั้งรังสีแกมมาและรังสีนิวตรอน ซึ่งในส่วนของรังสีนิวตรอน การเพิ่มเหล็กในสัดส่วนผสมจะสามารถป้องกันรังสีนิวตรอนได้มากกว่าสัดส่วนที่ไม่ได้ผสมเหล็กเข้าไปอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเหล็กมีขนาดที่เล็กกว่าธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแบไรต์ซึ่งสามารถทำให้รังสีนิวตรอนสูญเสียพลังงานได้มากกว่า การกำบังรังสีนิวตรอน (fast neutrons) จะทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาแต่เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาจึงไม่มีปัญหาในการใช้งาน จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการผสมเหล็กและแบไรต์ในคอนกรีตทำให้ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอนได้ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ และสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

6. การอ้างอิง

- [1] สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (2006). ศัพท์นิวเคลียร์ฉบับประชาชน. งานเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ สำนักงานบริหารจัดการด้านพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers (2019). ASME BPVS Section III – Rules for Construction of Nuclear Facility Component, Division 2: Code for Concrete Containments. The American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, NY, USA, 10016-5990.
- [3] American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete (1998). ASTM C637-98a. Annual Book of ASTM standards.
- [4] American Nuclear Society (2016). American National Standard Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants. American Nuclear Society, North Kensington Avenue, La Grange Park, Illinois, USA, 60526.
- [5] Pamugo Aditya Rahman. (2011). EFFECTIVE MIX DESIGN OF HEAVYWEIGHT CONCRETE FOR GAMMA-RAY SHIELDING AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE. (Thesis for the Degree of Master of Engineering). Department of Civil Engineering Chulalongkorn University, Thailand.
- [6] พลยุทธ์ ทองผาสุก, ธนกร พันหา, และปณณวิชญ์ พลະศุนย์ (2020). ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.
- [7] Ekasit Wongchirung. (2011). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAVY WEIGHT CONCRETE PROPERTIES BY NON-DESTRUCTIVE TESTING. (Thesis for the Degree of Master of Engineering). Department of Civil Engineering Chulalongkorn University, Thailand.
- [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).
- [9] Budi, G. S., Koentjoro, H., Wijaya, J., and Sikomena, E. F. (2018). The attenuation coefficient of barite concrete subjected to gamma-ray radiation. MATEC Web of Conferences.
- [10] S.F. Olukotun, Kulwinder Singh Mann, S.T. Gbenu, F.I. Ibitoye, O.F. Oladejo, Amit Joshi, H.O. Tekin, M.I. Sayyed, M.K. Fasasi, F.A. Balogun, Turgay Korkut (2019). Neutron-shielding behaviour investigations of some clay-materials. Nuclear Engineering and Technology 51 ,1444-1450.
- [11] Daniel R. McAlister (2016). Neutron Shielding Materials. PG Research Foundation, Inc. 1955 University Lane Lisle, IL 60532, USA
- [12] Daniel R. McAlister (2018). Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials. PG Research Foundation, Inc. 1955 University Lane Lisle, IL 60532, USA