

# การศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเพื่อการออกแบบกำแพงป้องกันรังสีด้วยวัสดุคอนกรีตมวลหนักที่ใช้มวลรวมภายในประเทศ

## วิชา วิศวกรรมทางวิศวกรรมโยธา

นายประวิณ ภูหนองโอง นางสาวปพิชญา ผุดผ่อง และรศ.ดร.วิฑิต ปานสุข

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

### บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนาการออกแบบคอนกรีตเพื่อสถานประกอบการทางนิวเคลียร์โดยจะทำการวิเคราะห์และศึกษาความแตกต่างระหว่างมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตทั่วไป ACI 318-11 กับมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตมวลหนักเพื่อป้องกันรังสีนิวเคลียร์ ACI 349M-13 โดยงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสี การออกแบบสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีตและการออกความหนาของกำแพงสำหรับกำบังและลดทอนรังสีแกมมาซึ่งเริ่มด้วยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีแกมมาของแต่ละแหล่งกำเนิดเพื่อทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีของแหล่งกำเนิดแต่ละชนิดนั้นคือ Cs-137 (662 keV) Co-60 (1174 keV) และ Co-60 (1332 keV) ที่ความหนาแน่นใดๆของชิ้นตัวอย่าง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของแหล่งกำเนิดรังสีเป็นเท่าใด โดยค่าประสิทธิภาพการลดทอนรังสีจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยนั้นคือ ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้สำหรับป้องกันรังสีและความรุนแรงในการปลดปล่อยรังสี เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีแกมมาของแหล่งกำเนิดแต่ละชนิดแล้วจะทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้วัสดุมวลหนักเป็นส่วนผสมเพื่อให้ได้มีความหนาแน่นของกำแพงป้องกันรังสีที่เหมาะสม โดยวัสดุที่เลือกใช้ที่แตกต่างจากส่วนผสมคอนกรีตทั่วไปได้แก่ เหล็กข้ออ้อยสับ แบร์ไรต์ และกากโครเมียมจากโรงงานบำบัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย และเมื่อได้ส่วนผสมที่ได้ออกแบบมาแล้วก็นำค่านั้นเพื่อไปออกแบบความหนาแน่นกำแพงเพื่อป้องกันรังสีให้เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐาน

### Abstract

This report is made for study and development of design of concrete for nuclear institute. The institute analyzes and compares the differences between ACI 318-11, the standard

of general concrete design, and ACI 349M-13, the standard of heavyweight concrete for nuclear radiation protection. Nowadays nuclear power has been used in medical and other applications. Nuclear power plants where generating nuclear power including gamma rays and neutrons is harmful to the environment if there is leakage from the plant. In order to prevent the gamma leakage from nuclear power plants, we have dedicated our efforts to gamma attenuation coefficient, design of concrete mixture and thickness of radiation shielding. In this work, we analyzed and compared the correlation of intensity and gamma attenuation coefficient from the different gamma sources which are Cs-137 (662 keV), Co-60 (1174 keV) and Co-60 (1332 keV) depending on specimens' density. There are two factors for gamma attenuation coefficient; density of shielding materials and intensity of gamma sources, consequently, the gamma attenuation coefficient is estimated. Moreover, the variation of mixture proportion of heavyweight concrete based materials are produced to achieve the appropriate density of gamma shielding. Punching deformed bar. Here, the materials used in gamma applications are differentiated from typical concrete materials including punching deformed bar, barite and chromium slag from industrial waste disposal plants in Thailand. After the concrete composition is designed, the gamma attenuation is determined and used for shielding thickness determination for gamma radiation protection and fit to the standard

## 1. คำนำ

เนื่องในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้งานคอนกรีตมวลหนักในงานก่อสร้างของสถานประกอบการนิเวศลิษฐ์ ซึ่งในปัจจุบันจะใช้ในอาคารที่มีการเก็บรังสีนิวเคลียร์สำหรับการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ อีกทั้งอาจมีการใช้ในสถานประกอบการทางนิเวศลิษฐ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า คอนกรีตมวลหนักจะประกอบไปด้วย น้ำ ปูนซีเมนต์ และมวลรวมมวลหนักที่มีคุณสมบัติมีความหนาแน่นสูง เช่น แร่ไรต์ เป็นต้น โดยจะใช้ในการก่อสร้างอาคารเฉพาะ อาทิเช่น สถานกักเก็บกากกัมมันตรังสี โรงไฟฟ้าพลังปรมาณู ศูนย์เครื่องมือเร่งอนุภาค และโรงพยาบาล ซึ่งในประเทศไทยจะใช้คอนกรีตมวลหนักในโรงพยาบาลเป็นส่วนใหญ่ แต่ในอนาคตอันใกล้อาจมีสถานประกอบการทางนิเวศลิษฐ์ชนิดอื่นๆเพิ่มเติม ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานและข้อกำหนดที่เหมาะสมกับสถานประกอบการทางนิเวศลิษฐ์

จากการศึกษาในการสร้างคอนกรีตมวลหนักทำให้ทราบว่า มวลรวมที่มีความหนาแน่นสูงเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันหรือลดปริมาณรังสีเพื่อป้องกันสำหรับผู้ปฏิบัติหน้าที่ที่เสี่ยงต่อการสัมผัสกับรังสีโดยตรง ผู้จัดทำจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแร่หรือวัสดุที่จะมาทำเป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลหนักโดยสามารถหาได้จากแหล่งที่มาภายในประเทศไทยเพื่อเป็นการบริหารต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลหนักสำหรับสถานประกอบการทางนิเวศลิษฐ์ในประเทศไทยและจากการศึกษาความแหล่งที่มาสำหรับส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักนั้นพบว่าในประเทศไทยมีสินแร่แร่ไรต์อยู่ในบางพื้นที่ ซึ่งแร่ไรต์มีความหนาแน่นที่มากกว่าหินปูนที่ใช้สำหรับเป็นมวลรวมหยาบและมากกว่าทรายที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดและอีกวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีความเป็นไปได้คือ Chromium slag ซึ่งได้จากการบำบัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นวัสดุที่มีมวลมากกว่าทรายที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดอีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ต้องใช้ต้นทุนในการทำ ผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าหากเราสามารถ Chromium slag มาประยุกต์ใช้ในการทำเป็นคอนกรีตมวลหนักได้จะมีประสิทธิภาพในการบริหารต้นทุนในการสร้างคอนกรีตมวลหนักเพื่อใช้ก่อสร้างภายในประเทศ





เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของสถานประกอบการนิเวศลิษฐ์ทั้งที่มีอยู่ในประเทศไทยในปัจจุบันและโครงการที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต การวิเคราะห์และศึกษาข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องในงานคอนกรีตมวลหนักเพื่อป้องกันรังสีนิวเคลียร์ในสถานประกอบการนิเวศลิษฐ์ จึงเป็นส่วนสำคัญในการใช้งานก่อสร้างอาคารที่มีรังสีนิวเคลียร์อยู่ภายในสำหรับป้องกันรังสีนิวเคลียร์ไม่ให้ออกมาสู่สภาพแวดล้อมภายนอก เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานในอาคาร และผู้ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับสถานประกอบการนิเวศลิษฐ์

## 2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำได้สังเกตเห็นว่าการใช้วัสดุรีไซเคิลมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นคอนกรีตมวลหนักมีความน่าสนใจ จึงได้ทำการนำ

กากแร่โครเมียมมาออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักและออกแบบความหนาของกำแพงเพื่อป้องกันรังสีแกมมา โดยออกแบบเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ในประเทศไทย โดย ในอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการใช้โครเมียมและสารประกอบโครเมียมเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การชุบโลหะ ผลิตภัณฑ์ส่วนรถยนต์ เป็นต้น โดยต้องมีการบำบัดและกำจัดอย่างถูกต้อง

ตะกอน	A	B	C	D
ลักษณะตะกอน				
ปริมาณตะกอน	20	52	58	68
PercentSolid(%)	2	5.2	5.8	6.8
T-Cr(mg/kg)	359,400	284,100	204,300	176,600
Cu (mg/kg)	383.3	156	5,571	314.9
Ni (mg/kg)	32.48	<0.001	<0.001	<0.001
Zn (mg/kg)	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Mn (mg/kg)	510.3	202.1	241.9	222.5
Cd (mg/kg)	<0.001	0.256	0.186	<0.001
Pb (mg/kg)	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004

ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์กากแร่โครเมียมเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลหนัก

### 2.2 รังสีที่ต้องใช้คอนกรีตมวลหนักสำหรับป้องกันหรือลดทอนรังสีรังสีแกมมา

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส หลังจากการสลายตัวให้อนุภาครังสีชนิดต่าง ๆ โดยนิวไคลด์ลูกยังไม่เสถียร จึงต้องลดพลังงานลงจากการให้รังสีแกมมา เพื่อให้เกิดความเสถียร สามารถทำให้ตัวกลางที่ผ่านแตกตัวได้ไม่ดีเท่ารังสีแอลฟาหรือรังสีบีตา แต่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมาก จึงจำเป็นต้องกำบังด้วยตะกั่วหรือคอนกรีตหนา

### 2.3 การเตรียมวัสดุมวลรวม

ในการเตรียมวัสดุสำหรับใช้เป็นมวลรวมนั้นจะมีความแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไปโดยเฉพาะสำหรับแร่ไรต์ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีหลายขนาดจึงสามารถทำเป็นมวลรวมแบบละเอียดและมวลรวมหยาบก็ได้ โดยสำหรับมวลรวมหยาบนั้นจะมีขนาดใหญ่สุดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 และ เล็กสุดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และสำหรับมวลรวมละเอียดจะมีขนาด ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 100 ตามมาตรฐาน ASTM C637-98a และสำหรับ Deformed bar จะต้องทำการตัดเพื่อให้ได้ขนาดที่เท่ากับมวลรวมหยาบดังที่กล่าวมาและสำหรับ กากแร่โครเมียมนั้น เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงต้องใช้ตะแกรงคัดแยกให้ได้ขนาดเท่ากับมวลรวมละเอียดดังที่กล่าวมา

### 2.4 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

นำวัสดุที่ได้เตรียมมาหลังจากการคัดขนาดมาชั่งน้ำหนักเพื่อใส่วัสดุอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและทำการชั่งน้ำหนักในขวดลูกชมพู่ที่

เติมด้วยน้ำจนถึงระดับที่กำหนดและหลังจากนั้นทำการนำวัสดุมาทำการคว่ำให้แห้งเพื่อให้ได้น้ำหนักวัสดุที่อยู่สถานะผิวแห้งอิมด้วยน้ำและนำค่าที่ได้ทำการชั่งน้ำหนักทั้งหมดไปหาความถ่วงจำเพาะดังสมการ

$$SG = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{water}}} = \frac{S}{A+S-B} \quad (2.1)$$

- เมื่อ S = น้ำหนักวัสดุที่อยู่ในสถานะอิมด้วยน้ำผิวแห้ง  
 A = น้ำหนักขวดลูกชมพู่ที่มีน้ำในระดับที่กำหนด  
 B = น้ำหนักขวดลูกชมพู่ที่มีวัสดุกับน้ำในระดับที่กำหนด



รูปที่ 3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

### 2.5 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

นำวัสดุที่เป็นมวลรวมหยาบไปทำการแช่น้ำเพื่อให้อยู่ในสถานะอิมด้วยน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาชั่งให้ผิวแห้ง หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการนำวัสดุไปชั่งน้ำหนักในน้ำเพื่อให้น้ำหนักของวัสดุในน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 และนำค่าที่สามารถบันทึกไปใช้คำนวณตามสมการ

$$SG = \frac{C}{C-D} \quad (2.2)$$

- เมื่อ C = น้ำหนักวัสดุในสถานะอิมด้วยน้ำผิวแห้ง  
 D = น้ำหนักวัสดุที่ชั่งในน้ำ

### 2.6 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

จัดวางชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัด 15 \* 15 ตารางเซนติเมตร โดยมีความหนา คือ 10 เซนติเมตรไว้ด้านหน้าของแหล่งกำเนิดรังสี โดยที่เครื่องฉายรังสีมีแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี 3 ชนิด Cs-137 (662 keV) Co-60 (1174 keV) Co-60 (1332 keV) และทำการติดตั้งวัสดุกำบังที่ใช้สำหรับกำบังรังสี และติดตั้งเครื่องวัดปริมาณรังสีไว้ด้านตรงข้ามกับเครื่องฉายรังสี โดยระยะห่างระหว่างชิ้นตัวอย่างกับเครื่องตรวจวัดปริมาณรังสีต้องห่างกันเท่ากับความหนาของชิ้นตัวอย่าง และใช้แผ่นตะกั่วบังด้านข้างของระยะห่างนี้ด้วยเพื่อป้องกันรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดอื่นเข้ามาสู่เครื่องตรวจวัด เมื่อทำการตรวจวัดเสร็จให้ทำการเคลื่อนชิ้นตัวอย่างและทำการฉายรังสีและวัดค่าอีกรอบเนื่องจากการจัดเรียงตัวของส่วนผสมในเนื้อคอนกรีตแต่ละตำแหน่งไม่

เหมือนกันจึงต้องทำการวัดค่าหลายครั้งเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย โดยจะทำการวัดค่าของรังสีทั้งหมด 5 ครั้งต่อชิ้นตัวอย่าง

### 2.7 ศึกษามาตรฐานการออกแบบโครงสร้างป้องกันรังสี

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง ACI 318-11 ที่เป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป และ ACI 349-13 ที่เป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสำหรับสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ เพื่อศึกษาข้อกำหนดต่างๆที่มีความเหมือนหรือแตกต่างกันสำหรับทั้ง 2 มาตรฐานนี้

ACI318M-08	ACI349-13
1. วัสดุซีเมนต์จะต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องดังนี้ (ก.) Portland cement: ASTM 150; (ข) Blended hydraulic cements: ASTM C595 ไม่รวม Type IS (>= 70), ซึ่งไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักในการประสานของคอนกรีตโครงสร้าง; (ค) Expansive hydraulic cement: ASTM C845; (ง) Hydraulic cement: ASTM C1157; (จ) Fly ash and natural pozzolan: ASTM C618; (ฉ) Ground-granulated blast-furnace slag: ASTM C989; (ช) Silica fume: ASTM C1240 2. วัสดุประสานที่ใช้งานต้องสอดคล้องกับวัสดุที่ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการเลือกสัดส่วนผสมคอนกรีต	1. เหมือน ACI318M-13 1. เหมือน ACI318M-13

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ในมาตรฐานการก่อสร้างของ ACI 318-11 และ ACI-349M-13

ACI318M-08	ACI349-13
1. มวลรวมของคอนกรีตต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังข้อใดข้อหนึ่งต่อไปนี้ (ก.) ธรรมดา: ASTM C33 (ข) มวลเบา: ASTM C330 ข้อยกเว้น: มวลรวมที่ใช้ในการทดสอบหรือที่นำมาใช้งานเพื่อผสมเป็นคอนกรีตที่แข็งแรงและมีความทนทานต้องได้รับการรับรองและอนุมัติจากผู้ควบคุมดูแลอาคาร 2. ขนาดใหญ่ที่สุดในการกำหนดมวลรวมหยาบจะต้องไม่ใหญ่กว่าตามข้อกำหนดดังข้อใดข้อหนึ่งต่อไปนี้ (a) 1/5 ของด้านที่แคบที่สุดระหว่างด้านของแบบหล่อ (b) 1/3 ของความหนาพื้น (c) 3/4 ของระยะที่น้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม กลุ่มเหล็กเสริม หรือ ลวดสำหรับอัดแรง	1. เหมือน ACI318M-13 1. เหมือน ACI318M-13

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบวัสดุมวลรวมที่ใช้ในมาตรฐานการก่อสร้างของ ACI 318-11 และ ACI-349M-13

$I_0$  = ความเข้มข้นของรังสีก่อนถึงกำแพงรังสี  
 $\mu$  = ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีเชิงมวล ( $g/cm^2$ )  
 $X$  = ความหนา (cm)

2.8 การออกแบบกำแพงป้องกันรังสี

เมื่อนำค่าที่ทำการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนรังสีแกรมมาของแหล่งกำเนิดแต่ละชนิด และนำค่าที่ได้ไปออกแบบความหนาของกำแพงในแต่ละปริมาณรังสีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกำแพงและปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดหลังและทำการวิเคราะห์ผล

2.9 ทฤษฎีการลดทอนรังสี

ในการลดทอนปริมาณรังสีที่ถูกส่งมาจะสามารถลดลงได้โดยการที่มีวัสดุใดๆมาขวางกั้นในเส้นทางที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านโดยวัสดุใดๆจะมาประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีจะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุที่นำมาซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนาของวัสดุที่นำมาซึ่งโดยเป็นไปตามสมการที่ 2.3 และ 2.4

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

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $I$  = ความเข้มข้นของรังสีเมื่อมีการกำบังรังสี

3. ผลที่ได้จากการทดสอบ

ในการเลือกคำนวณส่วนผสมสำหรับออกแบบคอนกรีตมวลรวมหนักเพื่อให้ได้มีความหนาแน่นของกำแพงป้องกันรังสีที่เหมาะสม โดยวัสดุที่เลือกใช้ที่แตกต่างจากส่วนผสมคอนกรีตทั่วไปได้แก่ เหล็กข้ออ้อยสับ แปร์ไรต์ และกากแร่โครเมียม สำหรับนำมาใช้ในการป้องกันรังสีแกมมา ซึ่งคณะผู้วิจัยได้เลือกมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ คือ

- การออกแบบที่ 1 มวลรวมหยาบ คือ หินปูน และ มวลรวมละเอียด คือ ทราย
- การออกแบบที่ 2 มวลรวมหยาบ คือ เหล็กข้ออ้อยสับ และ มวลรวมละเอียด คือ แปร์ไรต์
- การออกแบบที่ 3 มวลรวมหยาบ คือ เหล็กข้ออ้อยสับ และ มวลรวมละเอียด คือ กากแร่โครเมียม
- การออกแบบที่ 4 มวลรวมหยาบ คือ แปร์ไรต์ และ มวลรวม

ตารางที่ 3.1 ตารางคำนวณออกแบบคอนกรีตมวลหนัก

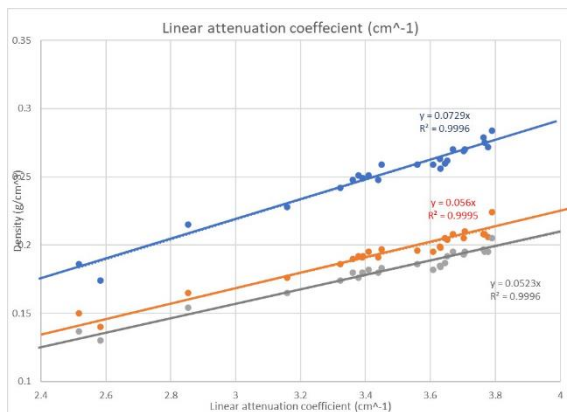
Mix design	1	2	3	4
	sand + limestone	Barite + Deformed bar	Chromium + Deformed bar	Chromium + Barite
$f_c$	40	40	40	40
$f_{cr}$	49	49	49	49
Slump (mm)	25-50	25-50	25-50	25-50
Max size of aggregate (Gmax)	19	12.5	12.5	9.5
Water ( $kg/m^3$ ) of concrete	190	199	199	207
air content (%)	2	1.5	1.5	2
W/C, by mass	0.4	0.4	0.4	0.4
weight of cement	475	498	498	518
Dry-rodded unit weight	0.66	0.59	0.59	0.5
weight of coarse aggregate (kg)	1056	944	944	800
volume of water ( $m^3$ )	0.19	0.199	0.199	0.207
volume of cement ( $m^3$ )	0.15	0.16	0.16	0.16
volume of coarse aggregate ( $m^3$ )	0.39	0.12	0.12	0.19
volume of entrapped ( $m^3$ )	0.01	0.01	0.01	0.01
volume of fine aggregate ( $m^3$ )	0.26	0.51	0.51	0.43
weight of fine aggregate (kg)	673.67	2150.56	1536.11	1284.71
coarse aggregate (moist) ( $kg/m^3$ )	1077	963	963	816
fine aggregate (moist) ( $kg/m^3$ )	714	2280	1628	1362
absorption of coarse aggregate	0.50	0.05	0.05	0.05
absorption of fine aggregate	0.70	0.08	0.08	0.08
add water	138	53	90	115
Total ( $kg/m^3$ )	2405	3793	3178	2811

ปรับแก้ในการออกแบบที่ 1 เท่ากับ 138 กิโลกรัม การออกแบบที่ 2 เท่ากับ 53 กิโลกรัม การออกแบบที่ 3 เท่ากับ 90 กิโลกรัม และ การออกแบบที่ 3 เท่ากับ 115 กิโลกรัม ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักของคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ของการออกแบบที่ 1 เท่ากับ 2405 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร การออกแบบที่ 2 เท่ากับ 3793 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร การออกแบบที่ 3 เท่ากับ 3178 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และ การออกแบบที่ 3 เท่ากับ 2811 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

S.G components				
Mix Design	1	2	3	4
Cement	3.15	3.15	3.15	3.15
Air	1.00	1.00	1.00	1.00
Coarse aggregate	2.68	7.80	7.80	4.20
Fine aggregate	2.64	4.20	3.00	3.00

ตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่เป็นส่วนผสมในคอนกรีตหนัก

เมื่อทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักสำหรับการออกแบบป้องกันรังสีแกมมาสำเร็จแล้ว ทำการนำค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้ไปคำนวณประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่าง โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเป็นไปดังกราฟด้านล่างนี้



รูปที่ 3.1 กราฟการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาโดยที่

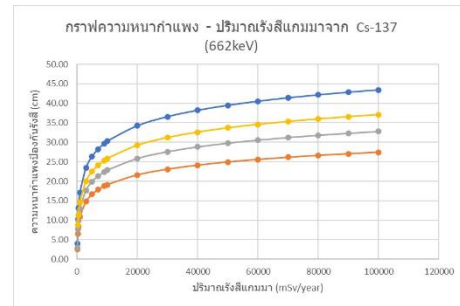
- เส้นสีฟ้าคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Cs-137(662keV)
- เส้นสีส้มคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Co-60(1174keV)

- เส้นสีเทาคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Co-60(1332keV)

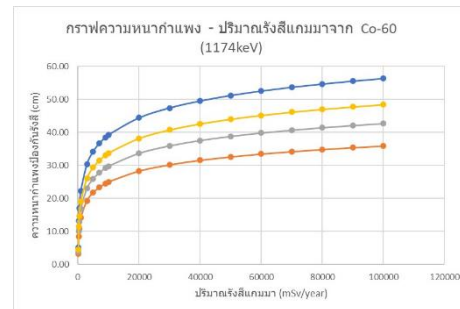
เมื่อทำการวิเคราะห์จากผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาด้วยความหนาแน่นของวัสดุได้จากสมการ

$$\mu = k\rho \quad (2.5)$$

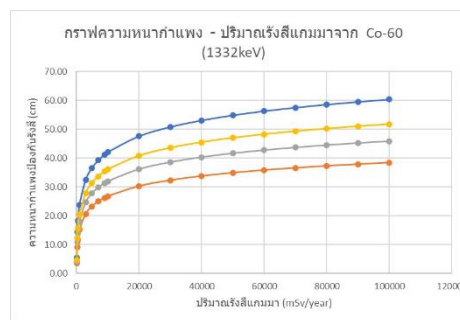
และทำการหาค่าความหนาแน่นของกำแพงได้จากสมการที่ 2.4 และได้ค่าดังนี้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากำแพงกับปริมาณรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Cs-137 (662keV)



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากำแพงกับปริมาณรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Co-60 (1174keV)



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากำแพงกับปริมาณรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด Co-60 (1332keV)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] American Concrete Institute. (1996). Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing
- [3] American National Standards Institute/American Nuclear Society. (2006). Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants. (ANSI/ANS-6.4-2006)
- [4] กรมทรัพยากรธรณี. (2001). พื้นที่แหล่งแร่เบรไรต์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.dmr.go.th/แผนที่ทรัพยากรแร่ทั้งประเทศ> [10 กุมภาพันธ์ 2566]
- [5] Lauwerys RR. Occupational Toxicology. In : Classen CD, editors. Casarette and Doull's Toxicology. The basic science of poison. 5th ed. New York: McGraw-Hill , 1995. p.987-1010.
- [6] Ramathibodi Poison Center. Chromium. (2001). [ออนไลน์].แหล่งที่มา: <http://www.ra.mahidol.ac.th/poisoncenter/bulletin/bul%20%2001/v9n4/Chromium.html> [10 กุมภาพันธ์ 2566]
- [7] บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์ สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน). (2565). การตกตะกอน  $Cr(OH)_3$  เป็น  $Cr_2O_3$  ด้วย  $Na_2S_2O_5$  และ  $NaOH$
- [8] อนุวัฒน์ จันมะโน. (2017). ฟิสิกส์นิวเคลียร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:<https://www.scimath.org/lesson -physics /item/7445-2017-08-11-07-20-11>
- [9] ศิริประภา แก้วแจ้ง. (2012). การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกัมมันตรังสีของแก้วโบโรซิลิเกตที่เติมแบเรียม บิสมัท หรือ ตะกั่ว . [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/radio30155sk\\_ch2.pdf](https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/radio30155sk_ch2.pdf) [17 กุมภาพันธ์ 2566]
- [10] American Concrete Institute. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- [11] American Concrete Institute. (2013). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11 and Commentary
- [12] American Concrete Institute. (2017). Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349M-13) and Commentary
- [13] คณะอนุกรรมการมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.(2021). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (วสท. 011008-21)
- [14] American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete (ASTM C637-20) Annual Book of ASTM standards.
- [15] 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)
- [16] อนุวัฒน์ จันมะโน. (2017). ฟิสิกส์นิวเคลียร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:<https://www.scimath.org/lesson -physics /item/7445-2017-08-11-07-20-11>
- [17] Wisarute Rungjaroenkiti. (2020) GAMMA AND NEUTRON ATTENUATION OF HEAVYWEIGHT CONCRETE USING AGGREGATES IN THAILAND. (Thesis for the Degree of Master of Engineering). Department of Civil Engineering Chulalongkorn University, Thailand.