

การทดสอบคุณสมบัติของคนกรีกตมวળหนัก ด้วยวิธีการทดสอบโดยไม่ทำลาย

นายเอกสิทธิ์ วงศ์จรัส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAVY WEIGHT CONCRETE PROPERTIES BY  
NON-DESTRUCTIVE TESTING

Mr. Ekasit Wongchirung

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลหนัก ด้วยวิธีการ
	ทดสอบโดยไม่ทำลาย
โดย	นายเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทร์ขาว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. รัตติพงษ์ สหมิตรมงคล)

เอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง : การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลหนัก ด้วยวิธีการทดสอบ  
โดยไม่ทำลาย. (EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAVY WEIGHT  
CONCRETE PROPERTIES BY NON-DESTRUCTIVE TESTING) อ. ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. วิฑิต ปานสุข, 86 หน้า.

ในการนำพลังงานปรมาณูมาใช้งานจำเป็นต้องมีการป้องกันรังสีที่เกิดขึ้น  
จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ของธาตุกัมมันตรังสีซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต หนึ่งในรังสีที่  
เกิดขึ้นนั้นรังสีแกมมาเป็นรังสีที่มีความถี่ พลังงานและอำนาจทะลุทะลวงสูง วัสดุที่ใช้กำบัง  
รังสีแกมมาได้ดีต้องมีความหนาแน่นมาก หนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ คอนกรีต ในโครงสร้าง  
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากในการกำบังรังสีที่ใช้มาเป็นระยะ  
เวลานานคอนกรีตย่อมมีการเสื่อมสภาพ การทดสอบโดยไม่ทำลายเพื่อตรวจสอบกำลังและ  
คุณภาพของคอนกรีตจึงมีความจำเป็น แต่เนื่องจากฐานข้อมูลการทดสอบด้วยวิธีการใช้ค้อน  
กระทบและคลื่นอัลตราโซนิกในปัจจุบันสร้างขึ้นจากคอนกรีตที่มีความหนาแน่นปกติ การ  
วิเคราะห์ผลการทดสอบคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมาก อาจมีความคลาดเคลื่อน การวิจัยนี้  
จึงนำเสนอผลการทดสอบคอนกรีตที่เพิ่มความหนาแน่นด้วยมวลรวมที่มีความหนาแน่นมาก  
ได้แก่แบเรต เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีความ  
หนาแน่นมากให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา..2554

## 5270650021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : HEAVY WEIGHT CONCRETE / RADIATION SHIELDING /

NON-DESTRUCTIVETEST / REBOUND HAMMER / ULTRASONIC PULSE VELOCITY

EKASIT WONGCHIRUNG : EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAVY  
WEIGHT CONCRETE PROPERTIES BY NON-DESTRUCTIVE TESTING.

ADVISOR : ASST. PROF. WITHIT PANSUK, 86 pp.

In the uses of atomic energy, the protection of living from harmful radiation produced by nuclear reactions is extremely important. Gamma ray is one of the emitted radiations of high penetration power. The appropriate material for gamma-ray shielding should have a high density so one of the popular solutions is concrete. In the case of existing reinforced concrete structures with high-density concrete, a deterioration of concrete could be found so a non-destructive measurement for strength and quality of concrete becomes necessary. However, the current equations for rebound hammer and ultrasonic pulse velocity methods are derived from normal-density concrete so they might give erroneous results for high-density one. This study shows measured results of high-density concrete using barite for an improvement of current code in the future.

Department : ...Civil Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : ...Civil Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทั้งยังเสนอแนวทางแก้ไขเมื่อพบปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ที่กรุณาได้รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว และดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล

ขอขอบพระคุณโครงการทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินในงานวิจัย หน่วยทดสอบวัสดุภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การตรวจวัดผลการลดทอนรังสี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือในการย่อยแร่

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้ที่สนใจศึกษาและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป กระผมขอขอบพระคุณและยินดีกับทุกท่านที่ตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจสร้างกุศลนี้โดยที่มีส่วนสร้างการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ขออัญเชิญอนุภาพคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดอภิบาลดลบันดาลให้ท่านและครอบครัวผู้สร้างกุศลนี้เจริญด้วยจตุรพิธพรชัย ปฏิภาณบพิวาร ธนสาร สมบัติ สุขภาพแข็งแรงและประสบแต่สิ่งที่เป็นมงคลเทอญ...

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 แนวคิดและทฤษฎีของคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี.....	7
2.3 การใช้เถ้าลอยในคอนกรีต.....	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอยในคอนกรีต.....	13
2.5 แนวคิดและทฤษฎีของการทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	13
2.5.1 ค้อนกระแทก (Rebound hammer).....	14
2.5.2 วิธีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity - UPV) .....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	18
2.7 การทดสอบแบบไม่ทำลายกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	25
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>28</b>

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.2 การเตรียมวัสดุมวลรวม.....	29
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม.....	29
3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำ ของมวลรวม หยาบ.....	29
3.3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำ ของมวลรวม ละเอียด.....	29
3.3.3 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก และปริมาณช่องว่างในมวลรวม.....	30
3.4 ตัวแปร.....	30
3.5 สัดส่วนผสมคอนกรีต.....	31
3.6 การผสม, หล่อ และบ่มขึ้นตัวอย่าง.....	32
3.7 การทดสอบชนิดไม่ทำลาย.....	32
3.7.1 การทดสอบด้วยค้อนกระทบ.....	32
3.7.2 การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	33
3.8 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา.....	34
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>36</b>
4.1 คุณสมบัติของมวลรวม.....	36
4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	37
4.3 การทดสอบชนิดไม่ทำลายด้วยค้อนกระทบ.....	43
4.4 การทดสอบชนิดไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	49
4.5 การตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา.....	59
4.6 ผลการเปรียบเทียบ.....	63
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>65</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65



	ณ
	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
5.3 การนำคอนกรีตมวลหนักไปใช้งาน.....	66
5.3.1 กรณีที่ 1.....	66
5.3.2 กรณีที่ 2.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวล ( $\mu/\rho$ ) ของคอนกรีต..	7
2.2	แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ทดสอบเทียบกับสัดส่วนผสมในอดีต ของ Makarious.....	8
2.3	แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลหนักของ Topcu และคณะ.....	9
2.4	แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Akkurt และคณะ.....	9
2.5	แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Bouzarjomehri ที่ใช้อัตราส่วนผสมมวลรวมหยาบ 65% มวลรวมละเอียด 35%.....	10
2.6	แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Bouzarjomehri ที่ใช้อัตราส่วนผสมมวลรวมหยาบ 50% มวลรวมละเอียด 50%.....	11
2.7	แสดงอัตราส่วนผสม เปรียบเทียบค่ากำลังและ ค่าการลดทอนรังสี ของอนุพลและคณะ.....	11
2.8	แสดงสัดส่วนผสมของ R. Demirboga.....	13
2.9	แสดงสัดส่วนผสมและผลทดสอบของ R. Demirboga.....	24
3.1	ตัวแปรอย่างตามชนิดมวลรวม.....	31
3.2	สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต 1 m <sup>3</sup> .....	31
4.1	คุณสมบัติมวลรวมหยาบ ตาม ASTM C29 [28], C127 [26].....	36
4.2	คุณสมบัติมวลรวมละเอียด ตาม ASTM C29 [28], C128 [27].....	36
4.3	แสดงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต.....	37
4.4	ค่าสะท้อนของค้อนกระแทกชนิดแรงเสียดทานต่ำ.....	43
4.5	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ของตัวอย่าง.....	49
4.6	ค่าโมดูลัสเฉือนของตัวอย่าง.....	52
4.7	แสดงค่าอัตราส่วนในการคำนวณหาความเร็วคลื่นในมวลรวมละเอียด.....	58
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา.....	60

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	อำนาจทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่างๆ.....	2
2.1	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\mu$ ) ต่างกัน.....	7
2.2	แสดงปริมาณรังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้ของ Makarios.....	8
2.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี เทียบกับ ความหนาแน่นของตัวอย่าง...	10
2.4	แสดงค่าการลดทอนรังสีแกมมาของมอร์ตาร์ฮีลมาไทต์-อีลมาไนต์ ที่ผสมเถ้ากลบ.....	12
2.5	แสดงส่วนประกอบของค้อนกระแทกแบบสมิทท์.....	14
2.6	แสดงแผนผังการทำงานของ Ultrasonic Pulse Velocity.....	15
2.7	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น P-Wave.....	15
2.8	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น S-Wave.....	16
2.9	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น R-Wave.....	16
2.10	แสดงรูปแบบการทดสอบ Ultrasonic Pulse Velocity.....	17
2.11	แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Karim.....	18
2.12	แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Karim.....	19
2.13	แสดงการแบ่งตารางเพื่อทดสอบ UPV ชนิด indirect test บนตัวอย่างพื้นของ Ismail.....	20
2.14	แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง UPV และ S/A ของมอร์ตาร์.....	20
2.15	แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของ UPV ผ่านตัวกลางชั้นต่างๆ.....	21
2.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัด และ ค่าสะท้อนจากค้อน เปรียบเทียบกับอัตราส่วน w/c.....	22
2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน w/c และ ระยะเวลาที่ UPV ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง.....	22

ภาพที่		หน้า
2.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UPV กับกำลังคอนกรีตและซีเมนต์เฟสค์.....	23
2.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า UPV และ กำลังของคอนกรีตเปรียบเทียบที่ 28 วัน (a) w/c =0.7 (b) w/c =0.3.....	23
2.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UPV และกำลังอัดบนตัวแปรค่า w/c และ ปริมาณมวลรวมหยาบ.....	24
2.21	แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย ผู้ผลิตค้อนกระแทก.....	26
2.22	เส้นประเมินกำลังของผู้ผลิตค้อนกระแทกชนิดแรงเสียดทานต่ำ.....	26
2.23	แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย มยผ 1502-51.....	27
2.24	แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าสะท้อนของค้อน และ กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีต บนตัวแปรของ ค่า UPV โดยผู้ผลิต.....	27
3.1	แสดงผังการทำงานของ UPV ด้วยวิธี In-direct.....	33
3.2	แสดงตำแหน่งการวัดคลื่นอัลตราโซนิก ในตัวอย่างชนิดพื้น.....	34
3.3	แสดงตำแหน่งการวัดคลื่นอัลตราโซนิก ในตัวอย่างชนิดคาน.....	34
3.4	แสดงการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา.....	35
4.1	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนัก (ksc) บนตัวแปรของ อัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์ (W/C).....	39
4.2	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนัก (ksc) บนตัวแปรของ ปริมาณมวล รวมหยาบต่อคอนกรีต (%CA).....	39
4.3	แสดง ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติ (ksc) บนตัวแปรของ ปริมาณ มวลรวมหยาบต่อคอนกรีต (%CA).....	40
4.4	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต บนปริมาณเถ้าลอย.....	40
4.5	แสดงตัวอย่างก้อนคอนกรีตมวลหนัก ที่โดนกดแตกโดย UTM.....	41
4.6	ความหนาแน่นของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าลอย.....	41
4.7	กำลังของซีเมนต์เฟสค์บนอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์.....	42
4.8	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	42

ภาพที่		หน้า
4.9	ความสัมพันธ์ ของ ค่าสะท้อนจากค้อนกระแทก เทียบกับกำลังรับแรงอัดของ ค้อนกรีต บนเส้นประเมินกำลังของผู้ผลิต.....	47
4.10	แสดงสมการประเมินของ ค้อนกรีตปกติ(เส้นทึบ) และ ค้อนกรีตมวลหนัก (เส้นขีด-จุด).....	48
4.11	แสดงสมการประเมินของ ค้อนกรีตปกติ และ ค้อนกรีตมวลหนัก ที่ปรับค่า แล้ว.....	49
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นของค้อนกรีตกับความเร็วคลื่นโดยวิธี indirect.....	51
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน.....	53
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับกำลังรับแรงอัด.....	54
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับกำลังรับแรงอัดหลังจากตัด BF3 ออก.....	55
4.16	แสดงค่าทดสอบเปรียบเทียบเทียบกับสมการที่ 4.15(เส้นเต็ม) และ 4.16(เส้นจุด).	56
4.17	แสดงค่าทดสอบเปรียบเทียบเทียบกับสมการที่ 4.15(เส้นเต็ม), 4.16(เส้นจุด) และ 4.17(เส้นขีด-จุด) ที่ปรับแก้จากสมการที่ 4.15.....	56
4.18	ความเร็วคลื่นเทียบกับปริมาณเถ้าลอยในค้อนกรีต.....	57
4.19	สมการในการคาดการณ์ความเร็วคลื่นในมวลรวมละเอียด.....	58
4.20	แสดงชุดอุปกรณ์การทดสอบรังสีแกมมา.....	59
4.21	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี กับความหนาแน่นของค้อนกรีตที่ระดับพลังงาน 0.605 MeV, 1.173 MeV และ 1.332 MeV.....	61
4.22	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี กับความหนาแน่นของค้อนกรีตที่ระดับพลังงาน 0.605 และ 1.250 MeV.....	62
4.23	ผลของเถ้าลอยต่อ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีจาก Cs-137.....	63
4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของ ค้อนกรีต ที่ระดับพลังงาน 0.605 MeV, 1.173 MeV และ 1.332 MeV.....	64
4.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของ ค้อนกรีต ที่ระดับพลังงาน 0.605 MeV และ 1.250 MeV.....	64

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทุกปี ความจำเป็นที่ต้องพัฒนาแหล่งพลังงานราคาถูกมาใช้จึงมีความจำเป็น หนึ่งในแหล่งพลังงานสะอาดคือ พลังงานจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่การจะนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ได้อย่างปลอดภัย จำเป็นต้องมีการป้องกันอันตรายจากรังสีที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน ในอาคารปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีแหล่งกำเนิดรังสีหลักจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ซึ่งเกิดจากผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชัน แบบลูกโซ่ ยูเรเนียม-235 ดังแสดงในสมการที่ 1.1



เมื่อ FP คือผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission product) ซึ่งมีหลากหลายและเป็นไอโซโทปที่ปลดปล่อยรังสีออกมา

โดยรังสีที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ประกอบด้วย รังสีแอลฟา (Alpha Particles) รังสีบีตา (Beta Particles) รังสีแกมมา (Gamma rays) และ อนุภาคนิวตรอน (Neutrons) [1], [2]

แอลฟา[1], [2] เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยโปรตอน 2 ตัวและนิวตรอน 2 ตัว เหมือนกับนิวเคลียสของของธาตุฮีเลียม (He) มีอำนาจทะลุทะลวงน้อย ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\alpha$

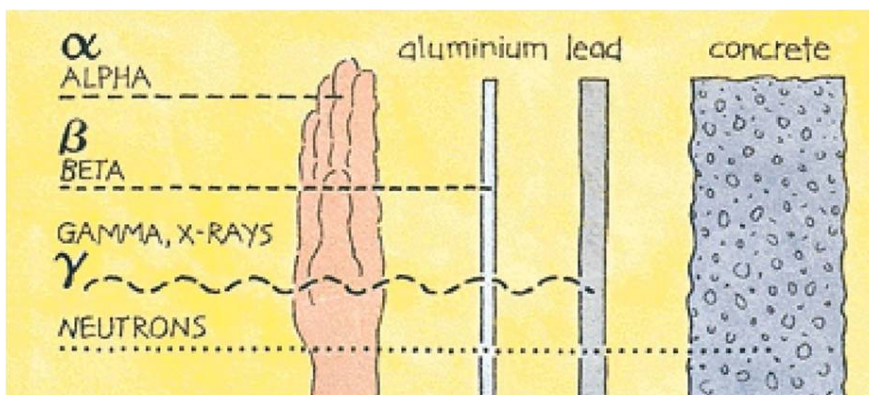
บีตา[1], [2] เป็นอนุภาคที่ออกมาจากนิวเคลียสเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในนิวเคลียสให้เกิดความเสถียร มี 2 ชนิดคือ อิเล็กตรอน และ โพสิตรอน ทั้ง 2 ชนิดมีประจุ -1 และ +1 ตามลำดับ มีมวลเพียงประมาณ 1/1800 ของอนุภาคนิวตรอน อำนาจทะลุทะลวงปานกลางสามารถผ่านชั้นกระดาษได้ แต่ผ่านโลหะหนาๆไม่ได้ ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\beta$

แกมมา[1], [2] เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียส ทำให้มีความถี่และพลังงานสูงมาก มีอำนาจทะลุทะลวงสูง รังสีแกมมามีอีกชื่อเรียกว่าโฟตอน การป้องกันการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา ใช้วัสดุที่มีเลขมวลสูง เช่น เหล็ก, ตะกั่ว และ คอนกรีตมวลหนัก ในการทำเป็นวัสดุป้องกัน ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\gamma$

รังสีเอกซ์ [2] เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน มีคุณสมบัติเหมือนรังสีแกมมา

นิวตรอน[1], [2] เป็นอนุภาคที่เป็นกลางอยู่ภายในนิวเคลียสของอะตอมไม่มีประจุไฟฟ้า แต่มีมวล เมื่ออยู่ในรูปสภาวะอิสระและมีพลังงานจะเรียกว่ารังสีนิวตรอน มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถถูกยับยั้งการเคลื่อนที่ด้วย สารที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำ ( $H_2O$ ) ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\eta$

โดยแสดงให้เห็นเข้าใจอย่างง่ายในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 อำนาจทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่างๆ

สำหรับงานทางวิศวกรรมโยธา ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยจากรังสีในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ได้แก่ โครงสร้าง หรือ เกราะป้องกันรังสีสำหรับเตาปฏิกรณ์ เป็นต้น สำหรับเตาปฏิกรณ์ ของโรงไฟฟ้าจะมีการป้องกันในระดับต่างๆกัน 7 ชั้น [3] ประกอบด้วย

เกราะชั้นที่ 1 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (fuel pellet)

เกราะชั้นที่ 2 ท่อหุ้มเม็ดเชื้อเพลิง นิวเคลียร์ (fuel clad)

เกราะชั้นที่ 3 น้ำระบายความร้อน (coolant)

เกราะชั้นที่ 4 ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor vessel)

เกราะชั้นที่ 5 กำแพงคอนกรีตกำบังรังสี (biological concrete shield)

เกราะชั้นที่ 6 แผ่นเหล็กกรุผนังด้านในอาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (steel liner)

เกราะชั้นที่ 7 อาคารคลุมปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ (reactor containment)

คอนกรีตกำบังรังสี ใช้คุณสมบัติด้าน ความหนาแน่นของวัสดุ คือคอนกรีตมวลหนัก ที่มีความหนาแน่นสูง เป็นส่วนของโครงสร้างในการป้องกันการทะลุทะลวงของรังสีแกมมา ซึ่งเป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ไม่ให้รั่วไหลออกมาภายนอก ค่าลดทอนรังสีของคอนกรีต ขึ้นกับ ความหนาแน่นของคอนกรีต ความหนา[4], [5] และ ความแน่นของวัสดุ [6]

อันตรายจากรังสีแกมมา [7] จะมีผลให้เซลล์ในร่างกายและอวัยวะต่างๆเสียหายหากได้รับปริมาณสูง เช่นภูมิคุ้มกันต้านทานลดลง ผิวหนังไหม้ กล้ามเนื้อสูญเสียการควบคุม ฯลฯ เนื่องจากรังสีจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระในเซลล์ ส่งผลให้เอ็นไซม์ และ DNA ในเซลล์เกิดความเสียหาย [2] ดังนั้นจากอันตรายของรังสีจากแกมมา การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลหนัก ดังกล่าวที่อยู่ใต้อาคารใช้งาน เพื่อนำมาประเมินสภาพ ความสมบูรณ์ ความแข็งแรง หรือความเสื่อมสภาพ ของคอนกรีต ด้วยการทดสอบแบบทำลาย เช่นการเจาะชิ้นส่วนตัวอย่างมาทดสอบ อาจทำให้เกิดการร้าวไหลของรังสีออกมาสู่ภายนอก เป็นอันตรายแก่บุคคลและสภาพแวดล้อม การทดสอบแบบไม่ทำลายจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ประเภทนี้

การทดสอบแบบไม่ทำลายมีหลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี

1. ค้อนกะแทก (Rebound Hammer)
2. คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV)

จากหลักการของค้อนกะแทก[8] ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่าการสะท้อน คือคุณสมบัติของมวลรวมในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่แตกต่างออกไปจากคอนกรีตปกติในการผสมคอนกรีตมวลหนักนี้ จึงต้องมีการสร้างข้อมูลอ้างอิง เป็นฐานข้อมูลสำหรับการตรวจสอบ

จากทฤษฎีของคลื่น [9] และงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11] พบว่า ชนิด ปริมาณ รูปร่างมวลรวมจะส่งผลให้การทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิกได้ผลแตกต่างกัน ดังนั้นสำหรับคอนกรีตมวลหนักที่มีการใช้มวลรวมชนิดอื่นนอกจาก หินปูนที่ใช้ในคอนกรีตปกติ จึงมีแนวโน้มจะให้ค่าการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางเปลี่ยนแปลงไป

โดยมวลรวมที่ใช้ เลืออกจาก มวลรวมที่มีในประเทศ เป็นหลักเพื่อความประหยัดค่าใช้จ่าย ในการผสมคอนกรีต จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาคุณสมบัติ คอนกรีตที่ผลิตได้จากมวลรวมในประเทศ เพื่อเป็นฐานข้อมูลต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.) เพื่อศึกษาคุณสมบัติการลดทอนรังสีของคอนกรีตมวลหนัก ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน จากปริมาณมวลรวมหยาบในสัดส่วนผสม และ ชนิดของมวลรวม

2.) เพื่อศึกษากระบวนการตรวจสอบ คอนกรีตมวลหนัก ด้วยวิธีไม่ทำลาย ใน 2 วิธี เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เพื่อใช้อ้างอิงในการตรวจสอบคุณสมบัติคอนกรีตในสภาวะใช้งาน บนตัวแปรความหนาแน่นที่แตกต่างกัน



3.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติการลดทอนรังสี และค่าที่ได้จากการทดสอบ ด้วยวิธีไม่ทำลาย

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.) ศึกษาคุณสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีต โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา จาก ซีเซียม-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) และ โคบอลต์-60 ( $^{60}\text{Co}$ )

2.) ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนักด้วยตัวอย่างขนาด 10 cm x10 cm x10 cm ที่อายุมากกว่า 28 วัน เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบด้านรังสี

3.) มวลรวมหยาบใช้ แร่แบไรต์ และ สินแร่เหล็ก ที่มีการผลิตในประเทศ โดยขนาดมวลรวมหยาบใหญ่สุดที่ใช้ ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4"

4.) มวลรวมละเอียดใช้ แร่แบไรต์บดละเอียด และทรายแม่น้ำ เป็นมวลรวม ขนาดที่ใช้ผ่าน ตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำตะแกรงเบอร์ 100

5.) ใช้สารผสมเพิ่มชนิดแร่ (mineral admixture) เป็นเถ้าลอย

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี และความหนาแน่นของ คอนกรีตมวลหนัก

2.) แสดงความสัมพันธ์สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายในทิศทางและความหนาแน่น ต่างๆเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนัก

3.) พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายกับสัมประสิทธิ์ การลดทอนรังสี

### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของคอนกรีตมวลหนักและการทดสอบชนิดไม่ทำลาย

ขั้นตอนที่2 ศึกษาการทดสอบด้านรังสี

ขั้นตอนที่3 ศึกษาชนิดมวลรวมหนัก และติดต่อหาแหล่งแร่ในประเทศ

ขั้นตอนที่4 เขียนโครงร่างวิจัยและเสนอโครงร่างวิจัย

ขั้นตอนที่5 หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้สำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนที่6 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยวิธีไม่ทำลายและการทดสอบทางด้านรังสี

ขั้นตอนที่7 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ขั้นตอนที่8 ศึกษาเปรียบเทียบวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบ จากขั้นตอนที่ 6 และ 7

ขั้นตอนที่9 สรุปผลงานวิจัย เพื่อจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และ นำเสนอบทความวิชาการ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎีของคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี

คอนกรีตมวลหนัก จาก ACI 304 [14, p.33] ได้ให้นิยามว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวม ที่มี ความหนาแน่นมากกว่า  $3840 \text{ kg/m}^3$  เป็นมวลรวม

ในปัจจุบันคอนกรีตมวลหนัก นิยมใช้กับอาคารเฉพาะทาง ที่เกี่ยวข้องกับรังสี เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ศูนย์วิจัยเครื่องเร่งอนุภาค โรงพยาบาล ห้องเก็บกักกากกัมมันตรังสี

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ( $\mu$ : Attenuation Coefficient) หาได้จากสมการ 2.1 และ 2.2

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

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

โดยที่  $I$  = ความเข้มหรือปริมาณรังสีเมื่อมีการกำบังรังสีที่มีค่าสัมประสิทธิ์ การลดทอนรังสี เท่ากับ  $\mu$  และมีความหนาเท่ากับ  $x$

$I_0$  = ความเข้มหรือปริมาณรังสีเมื่อไม่มีกำบังรังสี

$\mu$  = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา เมื่อมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation Coefficient) และเมื่อมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  เรียกว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (Mass attenuation Coefficient)

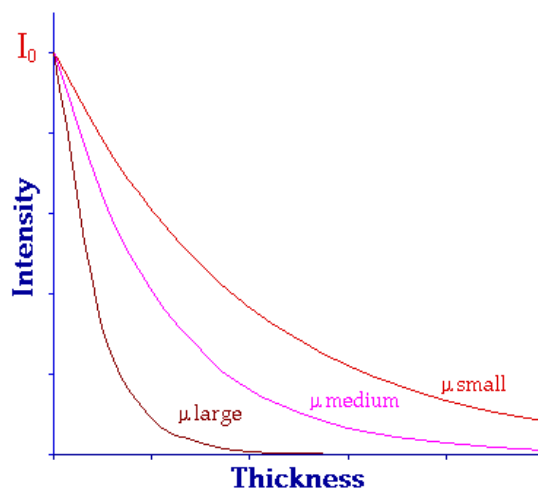
$x$  = ค่าความหนา มีหน่วยเป็น  $\text{cm}$  หรือ  $\text{g/cm}^2$

สมการที่ 2.1 จึงอาจเขียนได้เป็น

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

เมื่อ  $\rho$  = ค่าความหนาแน่นของวัสดุกำบังรังสี

โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\mu$ ) ต่างกัน [12]

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีตมีค่าตามตารางที่ 2.1 ที่ระดับพลังงานรังสีแกมมาต่างๆกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวล ( $\mu/\rho$ ) ของคอนกรีต [13]

	Gamma-Ray Energy, Mev								
Energy, MeV	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1
$\mu/\rho$	0.169	0.139	0.124	0.107	0.095	0.087	0.08	0.071	0.064
	Gamma-Ray Energy, Mev								
Energy, MeV	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
$\mu/\rho$	0.057	0.052	0.045	0.036	0.032	0.029	0.027	0.024	0.023

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตมวลหนักและการลดทอนรังสี

จาก ACI 304R.3R-96 [14] ได้ให้ข้อเสนอแนะอัตราส่วนผสมที่  $w/c \sim 0.6$  เพื่อหวังผลด้านการป้องกันนิวตรอนจาก Hydrogen Shielding ของน้ำส่วนเกินในเนื้อคอนกรีต

คศ.1995 Makarious และคณะ [4] ทำการทดสอบ คอนกรีตมวลหนัก โดยใช้ แร่ฮิลเมไนต์ เป็นส่วนผสมโดยไม่ใช้ผงเหล็ก คอนกรีตที่ได้มีความหนาแน่น  $3500 \text{ kg/m}^3$  ใช้ตัวอย่างเป็นทรงกระบอก รัศมี 15 cm แล้วเปลี่ยนความยาวของตัวอย่างเป็น 20, 30, 40 และ 45 cm ทดสอบ

โดยใช้ รังสีแกมมา และ นิวตรอน จากหน้าเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 2 MW เปรียบเทียบกับการศึกษา  
ในอดีตที่ใช้ผงเหล็ก(iron punching)ในการผสม ดังตารางที่ 2.2

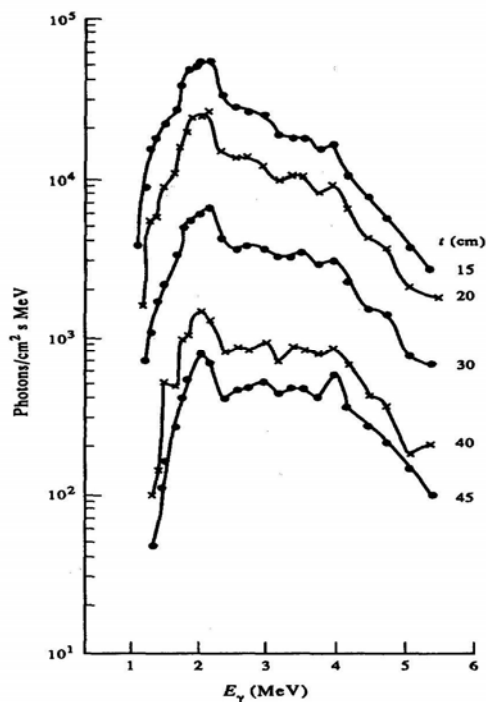
ตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ทดสอบเทียบกับสัดส่วนผสมในอดีต ของ Makarious  
[4, p196]

Concrete under investigation		Previously investigated concrete	
Composition	percentage by weight	Composition	percentage by weight
Portland cement	8.3%	Portland cement	9.0%
Ilmenite fine aggregate <sup>1</sup>	38.0%	Ilmenite fine aggregate <sup>1</sup>	18.41%
Ilmenite coarse aggregate <sup>2</sup>	25.0%	Ilmenite coarse aggregate <sup>2</sup>	18.09%
Ilmenite coarse aggregate <sup>3</sup>	23.0%	Iron punching	50.7%
Water	5.0%	Water	5.0%

1. Fine aggregate gain size (0-0.5 cm)	1. Fine aggregate gain size (0.2-0.47 cm)
2. Coase aggregate gain size (1-2 cm)	2. Coase aggregate gain size (0.47-5.81 cm)
3. Coase aggregate gain size (2-3 cm)	

Makarious ได้สรุปผลการทดสอบว่า คอนกรีตที่ใช้อิเลเมนต์โดยไม่มีผงเหล็กให้ ค่าความ  
เหมาะสมในการผสมมากกว่าการผสมผงเหล็กลงไปใ้เนื้อคอนกรีต และผลการทดสอบที่ได้ บ่งชี้  
ว่า การลดทอนรังสี ขึ้นกับ ความหนา ของวัสดุ ดังภาพที่ 2.2 โดย ปริมาณรังสีที่ตรวจวัดได้ มีค่า  
ลดลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2.2 แสดงปริมาณรังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้ของ Makarious [4, p198]

คศ.2003 Topcu และคณะ [6] ทดสอบหาสัดส่วนการผสมคอนกรีตมวลหนัก โดยผสม แร่แปรไรต์ เป็นมวลรวม มีตัวแปรคือ w/c ที่แตกต่างกัน 7ค่า โดยใช้ปริมาณซีเมนต์คงที่ที่ 350 kg/m<sup>3</sup> ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลหนักของ Topcu และคณะ [6, p816]

Amounts of heavyweight concrete composition					
W/c ratio	Amount of water (kg/m <sup>3</sup> )	Amount of cement (kg/m <sup>3</sup> )	Amount of aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Absorbed water (kg/m <sup>3</sup> )	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

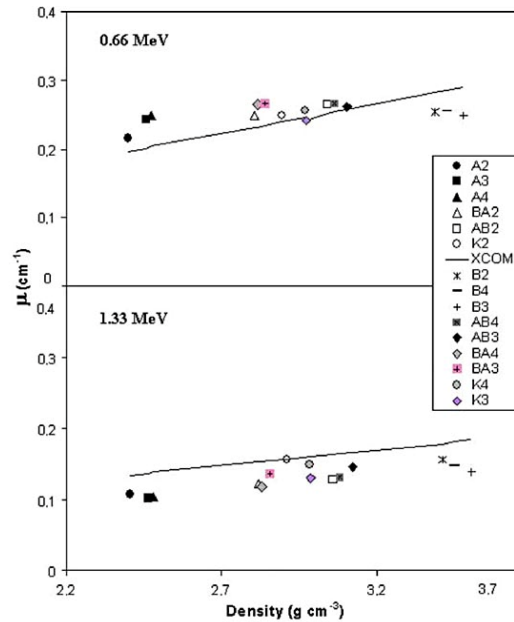
จากการทดสอบได้ข้อสรุปว่าที่ w/c = 0.4 ให้ความเหมาะสมในการผสมมากที่สุด เนื่องจาก w/c 0.3-0.5 ให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ที่ 0.4 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด เนื่องจาก สามารถทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่น ลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้มาก ขณะที่ ความสามารถในการทำงานยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยให้ข้อแนะนำปริมาณคอนกรีตไม่ควรน้อยกว่า 350 kg/m<sup>3</sup> เพื่อลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต และ ใช้เวลาในการ ผสมคอนกรีตให้น้อยเท่าที่เป็นไปได้เพื่อลด การแยกตัวของมวลรวมออกจากเนื้อคอนกรีต

คศ.2006 Akkurt และคณะ [5] ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนส่วนผสม ระหว่าง มวลรวม ปกติ กับแร่แปรไรต์และ w/c 3 ค่า ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Akkurt และคณะ [5, p154]

Composition of all types of concrete (kg/m <sup>3</sup> )															
	A2	A3	A4	B2	B3	B4	K2	K3	K4	AB2	AB3	AB4	BA2	BA3	BA4
Cement	310	362	425	310	362	425	310	362	425	310	362	425	310	362	425
Water	201	183	183	201	183	183	201	183	183	201	183	183	201	183	183
w/c	0.65	0.51	0.43	0.65	0.51	0.43	0.65	0.51	0.43	0.65	0.51	0.43	0.65	0.51	0.43
Fine normal aggregate	697	697	679				349	349	338	697	697	679			
Coarse normal aggregate	1092	1092	1061				545	547	531				1092	1092	1061
Fine Barite aggregate				1113	1114	1083	557	558	542				1113	1114	1083
Coarse Barite aggregate				1700	1701	1653	850	850	826	1700	1701	1653			

การทดสอบของ Akkurt ใช้รังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิด 2 ชนิด คือ ซีเซียม (<sup>137</sup>Cs) และ โคบอลต์ (<sup>60</sup>Co) ใช้การตรวจวัดด้วย Photon Energy พบว่า การลดทอนรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ชนิด ขึ้นกับ ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี เทียบกับ ความหนาแน่นของตัวอย่าง [5, p156]

คศ.2006 งานวิจัยจาก Bouzarjomehri [15] สำหรับคอนกรีตมวลหนักที่ใช้แบไรต์เป็นมวลรวม ใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์ ( $^{60}\text{Co}$ ) ขนาดตัวอย่าง 15x15x15 cm สำหรับทดสอบค่ากำลังอัด และขนาด 10x10 cm ความหนา 5-40 cm สำหรับการทดสอบด้านรังสี โดยคอนกรีตที่ทำกรทดสอบ มีทั้งหมด 40 ตัวอย่าง มีตัวแปรคือ ปริมาณมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด, w/c และ ปริมาณซีเมนต์ ดังตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.5 แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Bouzarjomehri ที่ใช้อัตราส่วนมวลรวมหยาบ 65% มวลรวมละเอียด 35% [15, p73]

Cement W/C	350 Kg/m <sup>3</sup>	400 Kg/m <sup>3</sup>	450 Kg/m <sup>3</sup>	500 Kg/m <sup>3</sup>
0.7	A11	A12	A13	A14
0.6	B11	B12	B13	B14
0.5	C11	C12	C13	C14
0.45	D11	D12	D13	D14
0.4	E11	E12	E13	E14

ผลการทดสอบด้วยรังสีแกมมา ค่าการลดทอนรังสี ( $\mu$ ) มีผลแปรตามความหนาแน่นของตัวอย่าง ผู้วิจัยได้สรุปผล หาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตกำบังรังสีของ โรงพยาบาล โดยพิจารณาระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการลดทอนรังสี คือสัดส่วนหมายเลข D21 โดยใช้

ปริมาณซีเมนต์ 350 kg/m<sup>3</sup> w/c=0.45 และอัตราส่วนของ มวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด 50:50 โดยให้กำลังรับแรงอัดที่ 394 ksc และค่าการลดทอนรังสี  $\mu = 0.861 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 2.6 แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักของ Bouzarjomehri ที่ใช้อัตราส่วนมวลรวมหยาบ 50% มวลรวมละเอียด 50% [15, p73]

Cement W/C	350	400	450	500
	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
0.7	A21	A22	A23	A24
0.6	B21	B22	B23	B24
0.5	C21	C22	C23	C24
0.45	D21	D22	D23	D24
0.4	E21	E22	E23	E24

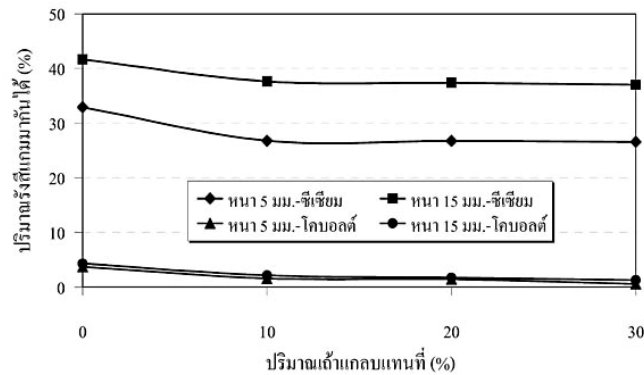
คศ.2008-2009 จากการวิจัยของ ดนูพล ตันนโยภาสและคณะ [16],[17] ทำการทดสอบเปรียบเทียบ คอนกรีตมวลหนักที่ผสม แร่แบไรต์เป็นฐานแล้วเพิ่มแร่ชนิดอื่นเพิ่มเติมต่างๆได้แก่ เพอร์ไลต์ดิบ และสเมกไทต์ โดยใช้ w/c = 0.4 พบว่า การผสมเพอร์ไลต์ดิบ 10% โดยปริมาตรให้ค่าการลดทอนรังสีที่ดีที่สุด ประมาณ 39% กำลังรับแรงอัด ประมาณ 400 ksc ส่วนสเมกไทต์ที่ 30% โดยปริมาตร ให้ค่าลดทอนรังสี ประมาณ 35% กำลังรับแรงอัด 220 ksc ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงอัตราส่วนผสม เปรียบเทียบค่ากำลังและ ค่าการลดทอนรังสี ของดนูพลและคณะ [16], [17]

	สเมกไทต์				เพอร์ไลต์ดิบ			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
ซีเมนต์ (kg.)	350	333	296	259	350	333	296	259
แบไรต์ - หยาบ (kg.)	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750
แบไรต์ - ละเอียด (kg.)	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
สารผสม (kg.)	0	37	74	111	0	37	74	111
น้ำ (kg.)	140	140	140	140	140	140	140	140
w/b	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
density - kg/m <sup>3</sup>	3450	3340	3320	3275	3537	3450	3400	2970
strength - ksc	230	215	207	224	382	397	392	335
rays c60 - %	33.9	34	34.75	35.25	35	39	37	22

คศ.2010 ดนูพล ตันนโยภาสและคณะ [18] ทดสอบคอนกรีตมวลหนักโดยใช้ มวลรวมหยาบ-ซีลมาไทต์ มวลรวมละเอียด-ซิลมาไนต์ ผสมเถ้าแกลบ ให้ค่าด้านกำลังอัดที่สูง ประมาณ 680-850 ksc แต่ความสามารถด้านการลดทอนรังสีลดลง เมื่อผสมเถ้าแกลบ ดังภาพที่ 2.4





ภาพที่ 2.4 แสดงค่าการลดทอนร้งสีเกินมาของมอร์ตาร์ซีซีมาไทต์-อิลมาไนต์ ที่ผสมแถ้ากลบ [18]

จากงานวิจัยต่างๆ จะพบว่า ความสามารถในการกำบังร้งสีของคอนกรีตมวลหนักจะขึ้นกับตัวแปร 2 ตัวคือ ความหนาแน่น (Density) ของคอนกรีต [4], [5], [15] และความหนาของคอนกรีต [4], [18]

ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้ ช่วง w/c ตั้งแต่ 0.5-0.65 ปริมาณมวลรวมหยาบตั้งแต่ 0.4-0.6 เพื่อความแตกต่างของความหนาแน่นในเนื้อคอนกรีต และปริมาณซีเมนต์ 350 kg/m<sup>3</sup>

### 2.3 การใช้แถ้าลอยในคอนกรีต

แถ้าลอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์เนื่องจากมีสัดส่วนของสารประกอบ CaO และ SiO<sub>2</sub> เป็นปริมาณมาก และมีคุณสมบัติในการเป็นสารลดน้ำเนื่องจาก [19]

1. ประจุที่ผิวของแถ้าลอยมีผลต่ออนุภาคของซีเมนต์ ป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของผงซีเมนต์
  2. ลักษณะรูปร่างของแถ้าลอยเป็นทรงกลมผิวเรียบ ช่วยลดแรงเสียดทานในการไหลของคอนกรีต
  3. แถ้าลอยมีขนาดเล็กทำให้สามารถอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมได้แน่นมากขึ้น
- จากเหตุผลทั้ง 3 ข้อ จึงมีผลทำให้ คอนกรีตที่ผลิตได้มีความต้องการน้ำส่วนเกินลดน้อยลง

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอยในคอนกรีต

2004 R. Demirboga [20] เสนองงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของ เถ้าลอย และตะกรันเหล็ก ต่อกำลังของคอนกรีต โดยมีสัดส่วนผสม ตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงสัดส่วนผสมของ R. Demirboga [20]

Mixture	Control	FA (%)			BFS (%)			FA+BFS (%)		
		50	60	70	50	60	70	50	60	70
w/c	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Cement	350	175	140	105	175	140	105	175	140	105
Fly ash	-	175	210	245	-	-	-	87.5	105	122.5
BFC	-	-	-	-	175	210	245	87.5	105	122.5
Aggregate	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775
SP (%)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Comp 28d MPa	43.6	20.9	13.8	9.7	35.0	32.3	26.4	33.4	30.9	25.3

พบว่า ปริมาณเถ้าลอยและตะกรันเหล็ก ที่มีมากเพิ่มขึ้นมีผลให้กำลังคอนกรีต มีค่าลดลง จาก คอนกรีตควบคุมที่ไม่ใส่สารผสมเพิ่ม ที่อายุ 28 วัน แต่กำลังจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มมากขึ้น จนอายุประมาณ 120 วัน

## 2.5 แนวคิดและทฤษฎีของการทดสอบแบบไม่ทำลาย

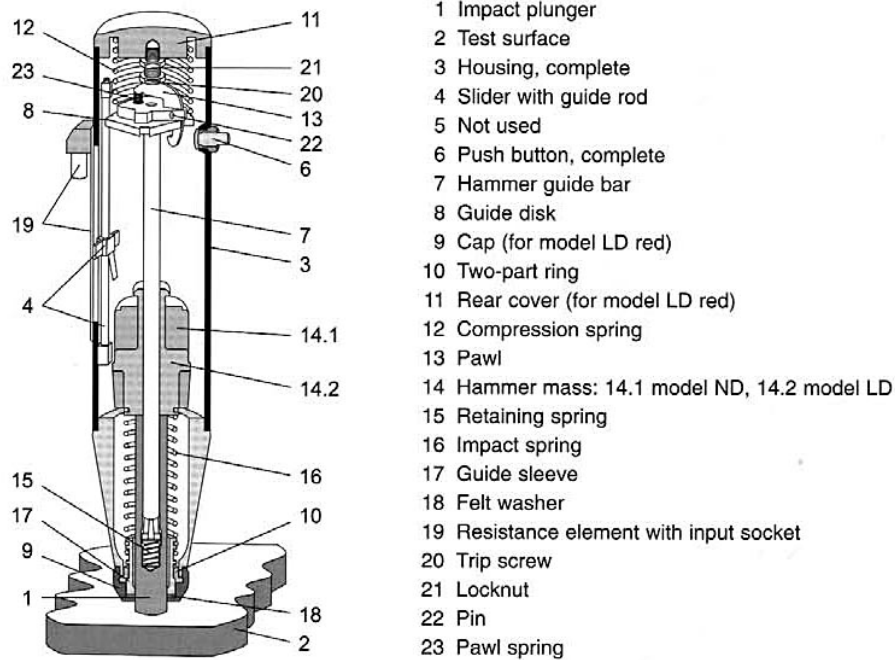
จุดประสงค์ของวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย คือการประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ทำให้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ชนิด ขนาด รูปร่างและปริมาณของมวลรวมอายุคอนกรีต ช่องว่างและปริมาณความอิมตัวด้วยน้ำของคอนกรีต ดังนั้นการที่จะนำอุปกรณ์ชนิดไหนไปทดสอบ จึงต้องมีค่าเปรียบเทียบคุณสมบัติกับผลการทดลองใน ห้องทดลอง ดังนั้นกำลังคอนกรีตที่ประเมินได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายจึงเป็นค่ากำลังเชิงเปรียบเทียบ “Relative Compressive Strength” [9, p47]

### 2.5.1 ค้อนกระแทก (Rebound hammer)

ใช้หลักการการสะท้อนของพลังงานที่แตกต่างกันของวัสดุที่มีค่าความแข็งของผิวไม่เท่ากัน โดยค่าที่วัดได้เป็น ค่าความแข็งของผิววัสดุที่ทำการทดสอบ [8] ค่าที่วัดได้มีค่า 10-100 เรียกว่าค่าการสะท้อน (Rebound Number)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการทดสอบด้วยวิธีค้อนกระแทก [8]

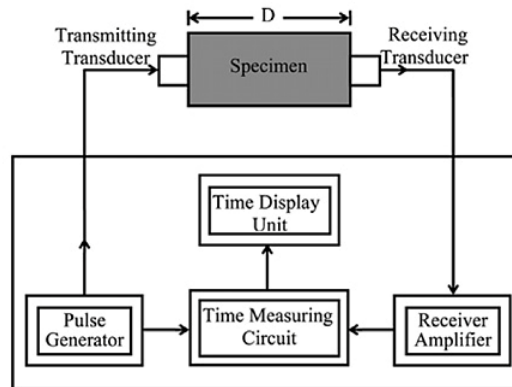
- 1 ทิศทางการทดสอบ ทั้งแนวตั้งแนวนอนแนวเฉียง จะส่งผลกับการสะท้อนของค้อน
- 2 คุณสมบัติของวัสดุรวมรวมในเนื้อคอนกรีต
- 3 รอยแตกร้าว หรือการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต ทำให้ค่าสะท้อนมีค่าลดลง
- 4 อายุคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อายุน้อย จะมีความคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของค้อนกระแทกแบบสมิทธ์ [8]

### 2.5.2 วิธีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity - UPV)

วิธี UPV ใช้หลักการยิงคลื่น อัลตราโซนิกเข้าไปในเนื้อวัสดุ แล้ววัดเวลาในการเคลื่อนจากตัวส่ง (Pulse generator) ผ่านตัวกลางไปถึงตัวรับ (Receiver) ดังภาพที่ 2.6



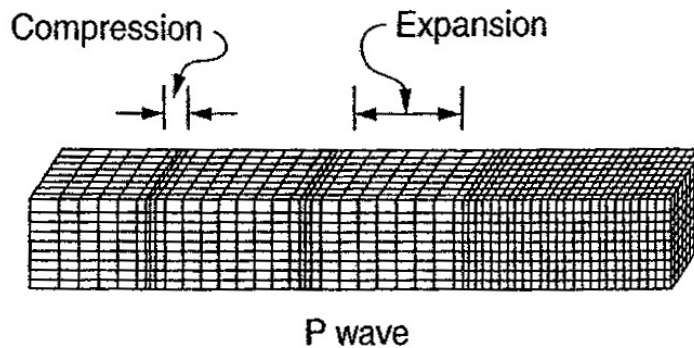
ภาพที่ 2.6 แสดงแผนผังการทำงานของ Ultrasonic Pulse Velocity [10, p346]

โดยคลื่นอัลตราโซนิกใช้คุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของคลื่น 3 ชนิด คือ

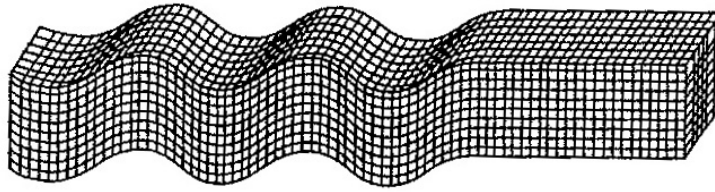
Compression-Wave (P-Wave) เป็นคลื่นอัดมีทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของคลื่น ดังภาพที่ 2.7 โดยคลื่นชนิดนี้มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด

Shear-Wave (S-Wave) เป็นคลื่นตามขวางมีลักษณะเหมือนคลื่นในเส้นเชือก ดังภาพที่ 2.8

Surface-Wave (R-Wave, Rayleigh-Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่บนผิวของวัสดุมีลักษณะคล้ายคลื่นบนผิวน้ำ ดังภาพที่ 2.9

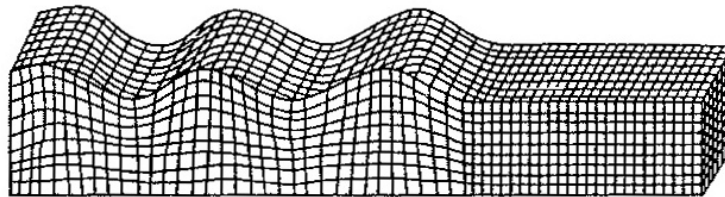


ภาพที่ 2.7 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น P-Wave [19, p4]



S wave

ภาพที่ 2.8 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น S-Wave [19, p4]



Rayleigh wave

ภาพที่ 2.9 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น R-Wave [19, p5]  
โดยคลื่นทั้ง 3 ชนิด จะมีความสัมพันธ์กับ คุณสมบัติของวัสดุ [9] ดังนี้

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \quad (2.3)$$

โดยที่  $V_p$  = ความเร็วของ p-wave

$V_s$  = ความเร็วของ s-wave

$V_r$  = ความเร็วของ r-wave

$E$  = โมดูลัสยืดหยุ่น

$G$  = โมดูลัสเฉือน

$\nu$  = อัตราส่วนของปัวซอง

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัสดุ

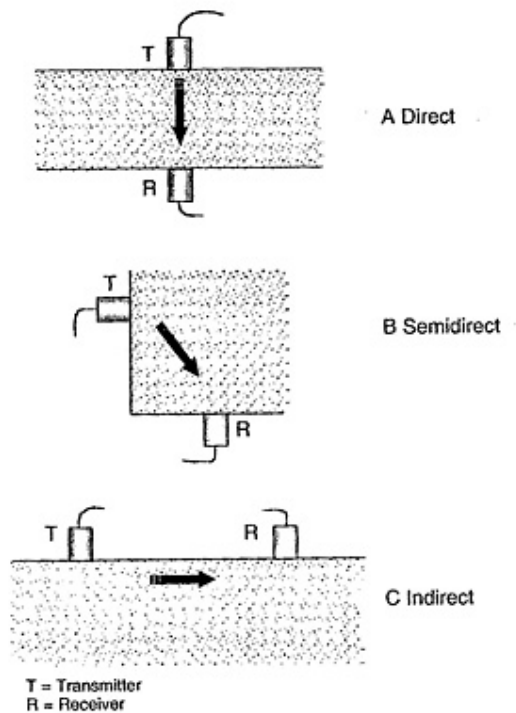
โดยปกติ ความเร็วของคลื่น p-wave จะมากกว่า s-wave และ s-wave จะมากกว่า r-wave อยู่เล็กน้อยทำให้ การวัดแบบทางตรง(direct) ดังภาพที่ 2.10 จะตรวจจับคลื่น p-wave ได้

ก่อน แต่สำหรับการวัดแบบทางอ้อม(indirect) อาจจะตรวจวัดคลื่นใดคลื่นหนึ่งได้ก่อน ขึ้นกับลักษณะของวัสดุที่จะตรวจสอบ

ความเร็วในสมการข้างต้น เป็นความเร็วในอุดมคติ สำหรับวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับ คอนกรีตที่มีความไม่แน่นอนในเนื้อวัสดุ ค่าที่ตรวจวัดได้ จึงมีค่าความแปรปรวนจากคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ช่องว่างและปริมาณความชื้นภายในคอนกรีต

จากสมการความเร็วคลื่น ความสัมพันธ์กันทางกายภาพโดยตรง ระหว่าง ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก และ กำลังของคอนกรีต ไม่ถูกนิยามไว้ แต่เมื่อนำความเร็วของคลื่นที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกำลังคอนกรีตปกติจะพบความสัมพันธ์ ทำให้สามารถคาดเดากำลังของคอนกรีตจากการตรวจวัดด้วยวิธี UPV ได้

จากคุณสมบัติของคลื่นทั้ง 3 แบบในข้างต้น ทำให้สามารถใช้การตรวจสอบได้ 3 วิธี ดังแสดงในภาพที่ 2.10



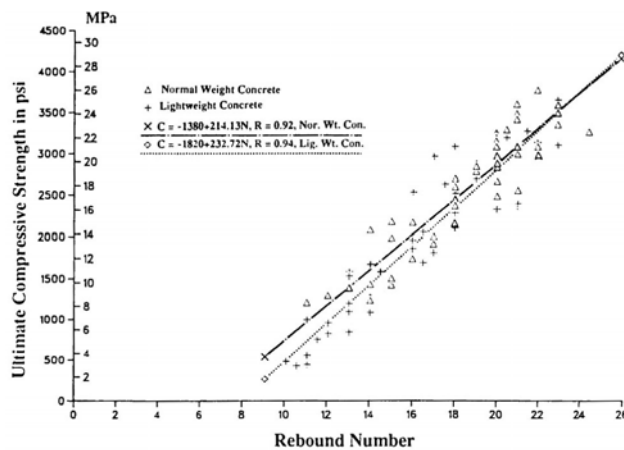
ภาพที่ 2.10 แสดงรูปแบบการทดสอบ Ultrasonic Pulse Velocity [23]

- 1.) Direct test ใช้วิธีวัดการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางตามทิศทางความหนาของตัวกลาง
- 2.) Semidirect test ใช้วิธีวัดการเคลื่อนที่ของคลื่น ผ่านทางด้านข้าง

3.) Indirect test ใช้วิธีวัดการเคลื่อนที่ของคลื่น บนพื้นผิวฝั่งเดียวกันทั้งตัวรับและตัวส่ง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแบบไม่ทำลาย

คศ.1987 Karim และคณะ [24] ทำการทดสอบเปรียบเทียบ การทดสอบแบบไม่ทำลาย 5 วิธี ได้แก่ pin penetration test, rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, pull out test และ penetration probe เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้เป็นทรงกระบอกขนาด 7.5x15 cm ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด 15X30 cm และแผ่นพื้นขนาด 46X61X10 cm ใช้ทดสอบโดยวิธีไม่ทำลายทั้ง 5 วิธี มีตัวแปรในการทดสอบคือ ชนิดของมวลรวมปกติ กับมวลรวมเบา เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับกำลังของคอนกรีต โดย pin penetration test, rebound hammer ให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง( $Y=A + BX$ ) ส่วนวิธีที่เหลือ อีก 3 วิธี ultrasonic pulse velocity, pull out test, penetration probe ให้ความสัมพันธ์ในฟังก์ชันยกกำลัง( $Y=AX^B$ )



ภาพที่ 2.11 แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Karim [21, p376]

สมการที่ Karim ตรวจสอบได้ออกมาดังสมการที่ 2.4 แสดงในภาพที่ 2.11 และสมการ 2.5 แสดงในภาพที่ 2.12

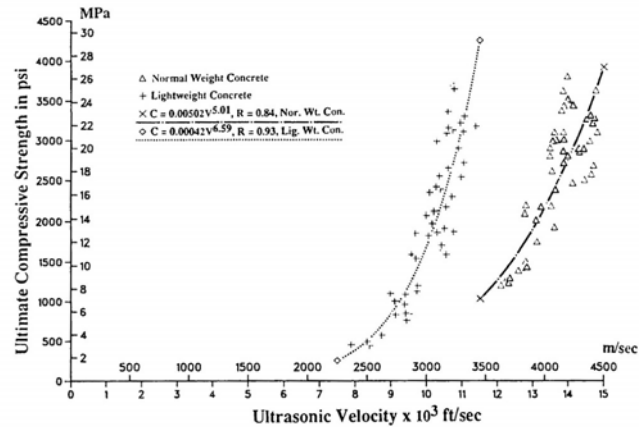
$$\text{Rebound hammer} \quad C = 214.13N - 1380 \quad (2.4)$$

$$\text{UPV} \quad C = 0.00502V^{5.01} \quad (2.5)$$

โดยที่ C = ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน่วยเป็น psi

N = ค่าสะท้อนของค้อนกระแทก

V = UPV หน่วยเป็น ft/sec x 10<sup>3</sup>



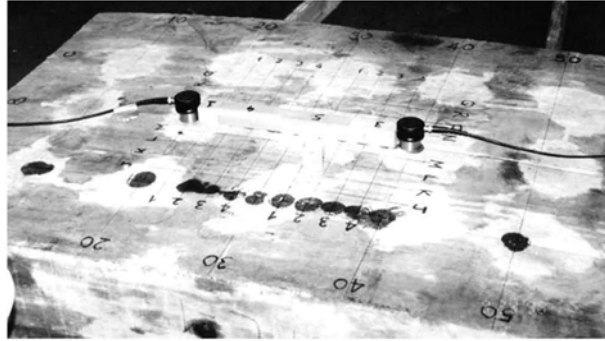
ภาพที่ 2.12 แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Karim [21, p377]

คศ.2001 Ismail และคณะ [25] ทำการทดสอบเปรียบเทียบ Ultrasonic Pulse Velocity ระหว่างวิธี direct และ indirect โดยใช้ คอนกรีตผสมเสร็จ w/c=0.45 ความหนาแน่น 2250 kg/m<sup>3</sup> หล่อตัวอย่างพื้นขนาด 150x100 cm หนา 25 cm 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm 12 ตัวอย่าง ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm 16 ตัวอย่าง

โดยตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm นำไปทดสอบ กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนของบิวซอง ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm นำไปทดสอบ ความถ่วงจำเพาะ และ UPV ด้วยวิธี direct test

ตัวอย่างพื้นใช้ทดสอบ UPV ด้วยวิธี direct test และ indirect test โดย direct test ทดสอบผ่านทางด้านความหนา 25 cm และวิธี indirect test ทดสอบโดยใช้ตารางห่างกันช่วงละ 5 cm ดังภาพที่ 2.13



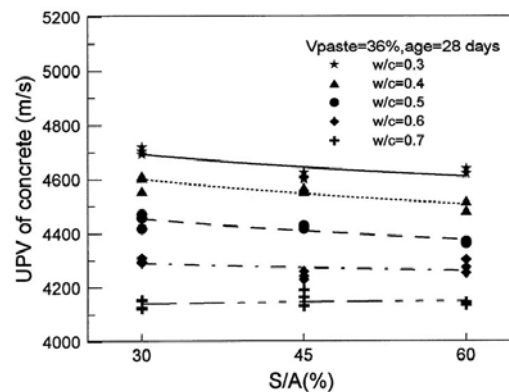


ภาพที่ 2.13 แสดงการแบ่งตารางเพื่อทดสอบ UPV ชนิด indirect test บนตัวอย่างพื้นของ Ismail [22, p453]

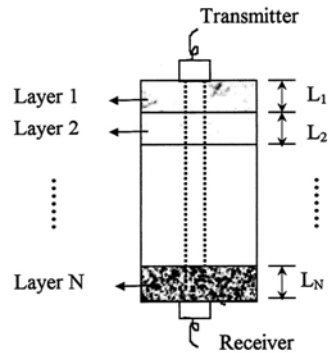
ผลการทดสอบของ Ismail และคณะพบว่า การทดสอบ แบบ direct test และ indirect test ของตัวอย่างพื้นให้ผลใกล้เคียงกัน

ศศ.2003 Lin และคณะ [11] เสนองานวิจัยเกี่ยวกับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อวิธี Ultrasonic Pulse Velocity โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด 19 ชนิด เปลี่ยน w/c ระหว่าง 0.3-0.7 ปริมาณทรายต่อมวลรวม S/A เท่ากับ 0.3, 0.45 และ 0.6 ปริมาณเพสต์ต่อปริมาตรรวมระหว่าง 0.32-0.4 มอร์ตาร์ 19 ชนิดตามคอนกรีต และซีเมนต์เพสต์ 5 ชนิด ตาม w/c ของคอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบจาก มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยทั้งหมดหล่อลงแบบทรงกระบอก 10x20 cm. การทดสอบใช้ UPV-Direct test ความถี่ 54 kHz

ผลการทดสอบในเรื่องปริมาณทรายต่อมวลรวม(S/A) พบว่าค่า UPV ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เพิ่มปริมาณ S/A ไม่แสดงผลความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง UPV และ S/A ของมอร์ตาร์ [11, p23]



รูปที่ 2.15 แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของ UPV ผ่านตัวกลางชั้นต่างๆ [11, p25]

โดย Lin ได้เสนอ สมการคลื่นของ UPV ในคอนกรีต ในปัจจัยของมวลรวมต่างๆจากแบบจำลองในภาพที่ 2.15 เป็นสมการที่ 2.4

$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_{paste}}{v_p} + \frac{(1-V_{paste})S/A}{v_{FA}} + \frac{(1-V_{paste})(1-S/A)}{v_{CA}} \quad (2.4)$$

โดย  $V_{paste}$  = ปริมาณเพสต์ในคอนกรีต  $S/A$  = ปริมาณทรายต่อมวลรวม

$v_c$  = ความเร็ว UPV ใน คอนกรีต  $v_p$  = ความเร็ว UPV ใน เพสต์

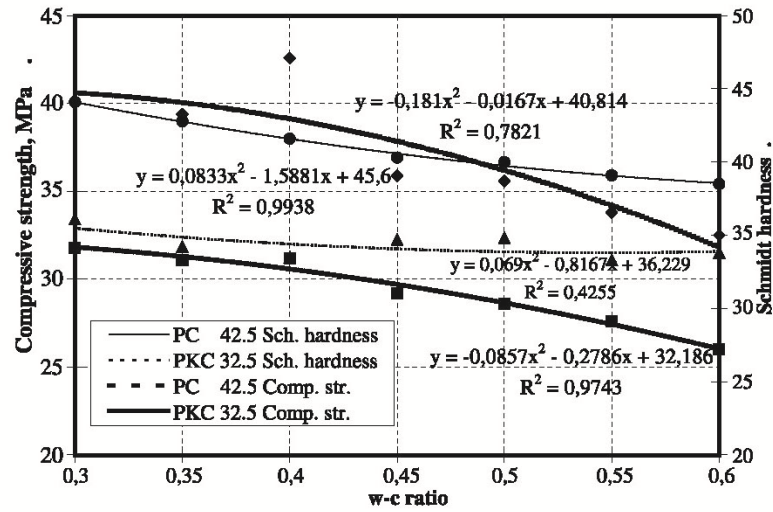
$v_{FA}$  = ความเร็ว UPV ใน มวลรวมละเอียด  $v_{CA}$  = ความเร็ว UPV ใน มวลรวมหยาบ

โดยสมการ (2.4) จะสอดคล้องกับคอนกรีตที่อายุมากกว่า 7 วันขึ้นไป เนื่องจาก คอนกรีตอายุน้อยจะมี น้ำส่วนเกินในเนื้อคอนกรีต แต่เนื่องจากรูปที่ 2.14 S/A ส่งผลต่อ UPV น้อยจึงทำการยุบสมการในส่วนของมวลรวมละเอียดกับเพสต์ เป็นมอร์ตาร์ ดังสมการที่ (2.5)

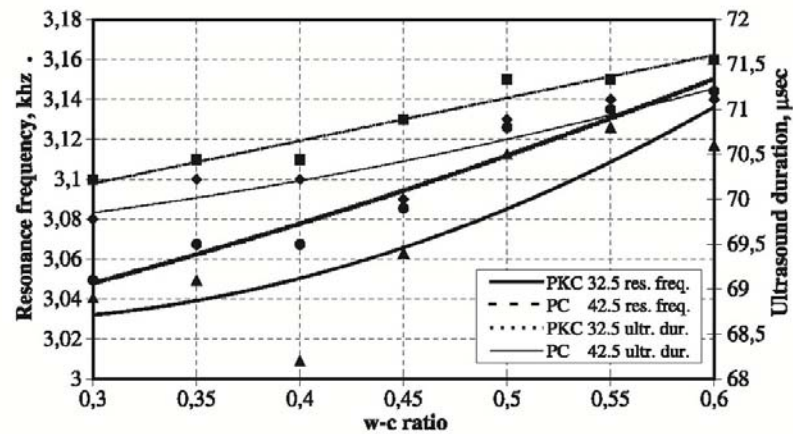
$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_{paste} + (1-V_{paste})S/A}{v_M} + \frac{(1-V_{paste})(1-S/A)}{v_{CA}} \quad (2.5)$$

โดย  $v_M$  = ความเร็ว UPV ใน มอร์ตาร์

คศ.2003 Topcu และคณะ [6] ใช้คอนกรีตมวลหนัก เปรียบเทียบวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย กับวิธีปกติ พบว่าสำหรับวิธี rebound hammer ค่าการสะท้อนค่อนข้างจะคงที่ ไม่ว่าจะเปลี่ยน w/c ไปเท่าไร แต่กำลังจะลดลงตาม w/c ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.16 และสำหรับ ultrasonic pulse velocity ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม w/c ดังภาพที่ 2.17

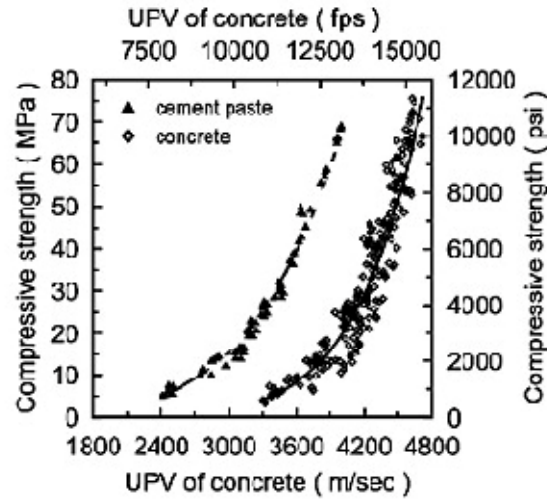


รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัด และ ค่าสะท้อนจากค้อน เปรียบเทียบกับ อัตราส่วน w/c [6, p818]



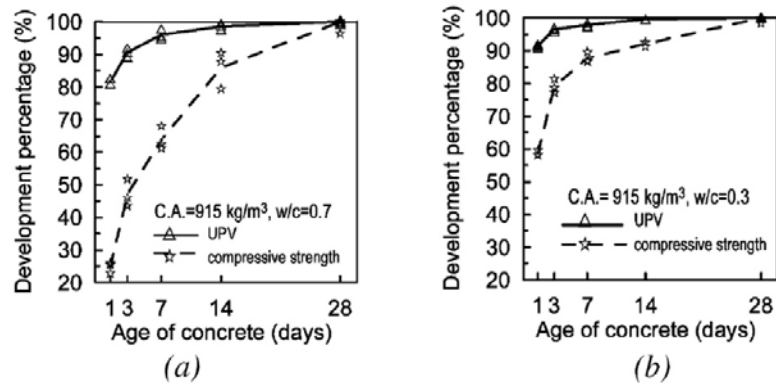
รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน w/c และ ระยะเวลาที่ UPV ใช้ในการเคลื่อนที่ ผ่านตัวกลาง [6, p818]

คศ.2007 Lin และคณะ [10] ได้ทำการวิจัยโดยใช้ ultrasonic pulse velocity โดยมีตัวแปรคือ w/c ระหว่าง 0.3-0.7 และปริมาณทรายต่อมวลรวม S/A ที่ 0.3, 0.45 และ 0.6 ควบคุมตัวแปรเรื่อง ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยใส่สารลดน้ำอย่างมาก (high-range water reducing admixture) เพื่อให้แต่ละ สัดส่วนผสม มี ค่าการยุบตัว มากกว่า 13 cm โดยตัวอย่างหล่อลงแบบทรงกระบอกขนาด 10x20 cm การทดสอบใช้ UPV-Direct test ความถี่ 54 kHz



ภาพที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UPV กับกำลังคอนกรีตและซีเมนต์เพสต์ [10, p346]

จากการทดสอบพบว่า ซีเมนต์เพสต์ กับ คอนกรีต ที่กำลังใกล้เคียงกัน ให้ค่าของ UPV แตกต่างกันอย่างเด่นชัด ซึ่งเป็นผลมาจาก มวลรวม ที่ใช้ในการผสมในคอนกรีต ทำให้ค่า UPV มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2.18



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า UPV และ กำลังของคอนกรีตเปรียบเทียบที่ 28 วัน (a)  $w/c = 0.7$  (b)  $w/c = 0.3$  [10, p347]

ในการทดสอบยังพบว่า ค่า UPV ที่อ่านได้ ที่คอนกรีตอายุน้อยกว่า 28 วัน จะมีความผิดพลาดมากขึ้นตามเวลาที่ลดลง โดย UPV ให้ค่ามากกว่าค่าทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 2.19 ดังนั้นวิธีทดสอบด้วย UPV จึงเหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่พัฒนากำลังเต็มที่แล้ว



SP (%)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Comp 28d MPa	43.6	20.9	13.8	9.7	35.0	32.3	26.4	33.4	30.9	25.3
UPV m/s	4310	3990	3910	3640	4200	4230	4110	4260	4160	4080

พบว่า คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างที่ได้ แก่ลดยและตะกรันเหล็ก มีค่า UPV-direct น้อยกว่า คอนกรีตควบคุมที่ไม่ใส่สารเพิ่มเติม และหาความสัมพันธ์ระหว่าง UPV และกำลังของคอนกรีตทุกตัวอย่าง เป็นสมการที่ 2.6 และกำลังคอนกรีตที่ผสมแก๊ลลอย เป็นสมการที่ 2.7

$$f_c' = 0.008e^{0.002V_c} \quad (2.6)$$

$$f_c' = 0.0142e^{0.0018V_c} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $f_c'$  = กำลังของคอนกรีต MPa

$V_c$  = ความเร็วคลื่น UPV ด้วยวิธี direct

## 2.7 การทดสอบแบบไม่ทำลายกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

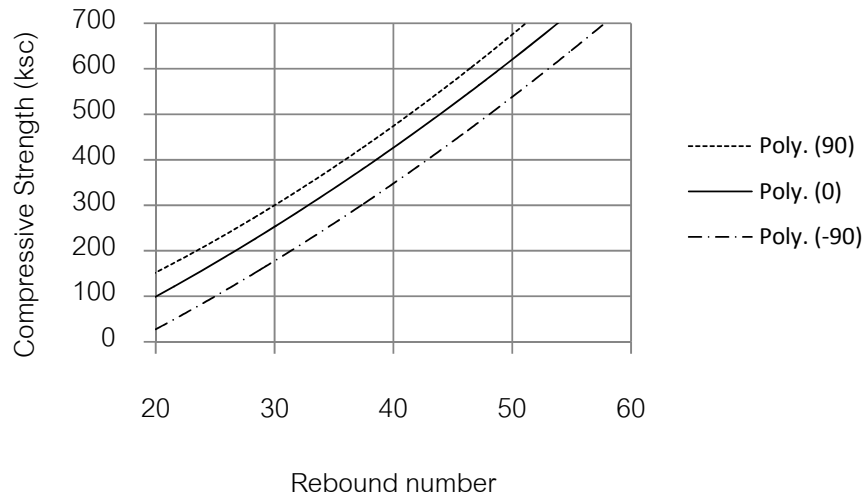
ผู้ผลิตคอนกรีตแบบชนิด N รายหนึ่ง ให้ค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แสดงในภาพที่ 2.21 โดยเส้นแบบจุด (90) เป็นข้อมูลของคอนกรีตแบบกดลง เส้นทึบ(0) เป็นข้อมูลของการกดค้อนทำมุมราบกับพื้น และ เส้นแบบขีด-จุด(-90)สำหรับการกดแบบด้นขึ้น โดยข้อมูลเส้นแบบจุดและขีด-จุดที่เป็นผลกระทบจากทิศทางการใช้คอนกรีตในมุมที่ไม่ใช่มุมราบ

ส่วนคอนกรีตชนิดแรงเสียดทานต่ำ(Friction less) ทางผู้ผลิตได้ให้สมการในการประเมินกำลัง โดยระบุว่าเป็น ค่าต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นไทล์ (lower 10<sup>th</sup> percentile curve) [21] ตามสมการที่ 2.8

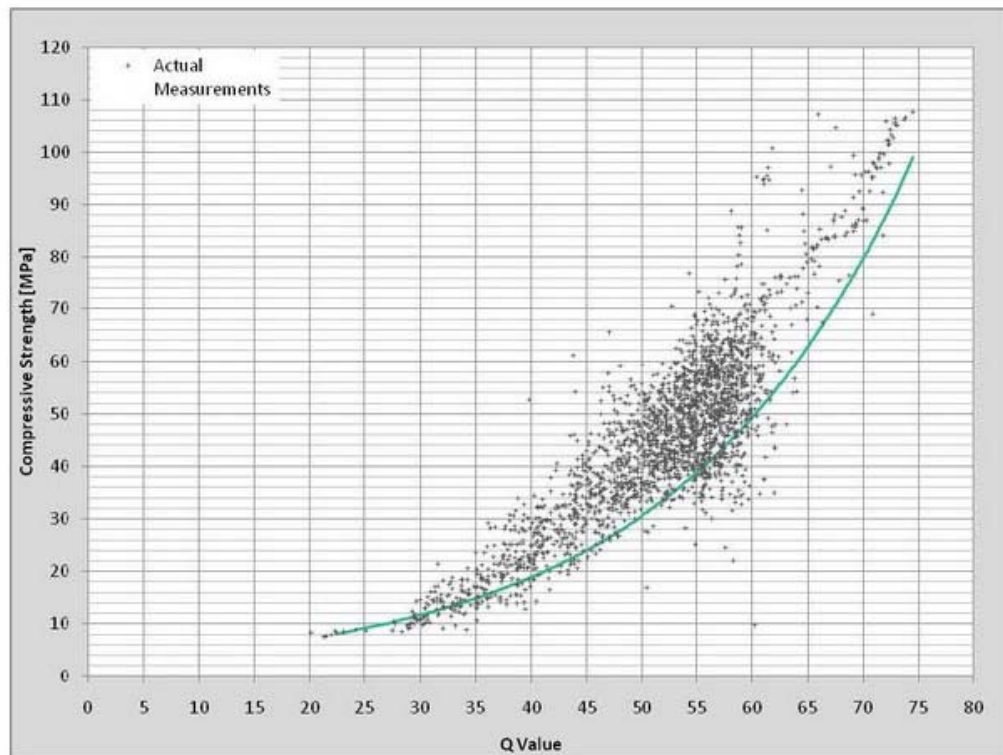
$$f_c' = 2.77e^{0.048Q} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_c'$  เป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต MPa

Q เป็นค่าสะท้อนของค้อน

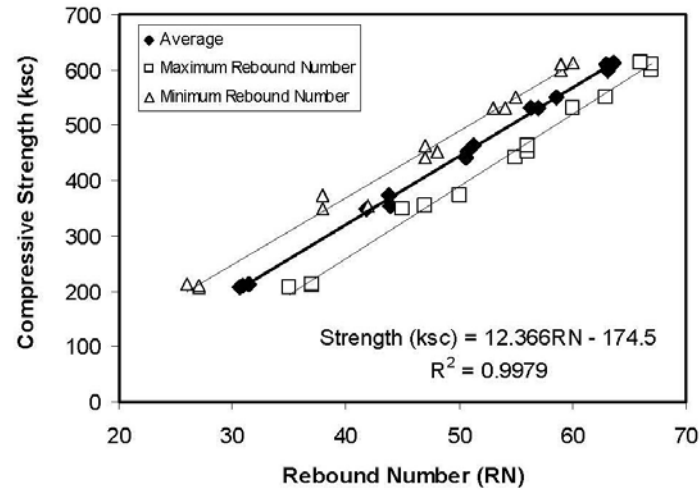


ภาพที่ 2.21 แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยผู้ผลิตคอนกรีต



ภาพที่ 2.22 เส้นประเมินกำลังของผู้ผลิตคอนกรีตชนิดแรงเสียดทานต่ำ[21]

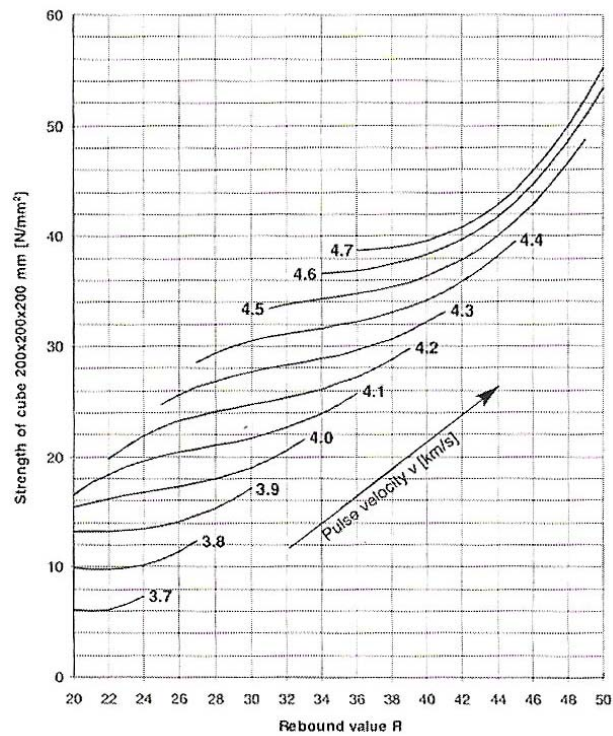
มยผ 1502-51 [8] ในส่วนของภาคผนวกได้ให้ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 แสดงค่าเปรียบเทียบของค่าสะท้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย มยผ 1502-51 [8]

สำหรับ UPV ทางผู้ผลิต ได้ให้ค่าเปรียบเทียบ บนผลของค้อนกระแทกด้วย เป็นตามภาพที่

2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าสะท้อนของค้อน และ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต บนตัวแปรของ ค่า UPV โดยผู้ผลิต



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
2. น้ำสะอาด
3. ทราแม่ น้ำ
4. หินปูน
5. แร่แบไรต์
6. สีนแร่เหล็ก (เมคเนไทต์, เฮมาไท)
7. ใ้กาลอย

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย

1. แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 30cm x30cm x10 cm
2. แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 50cm x10cm x10 cm
3. เครื่องผสมคอนกรีตชนิดใบพัดกวน pan mixer
4. เครื่องฉีดย้ำคอนกรีต
5. เครื่องตัดคอนกรีต
6. เครื่องย่อยปากงับ (jaw crusher)
7. เครื่อง Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)
8. ค้อนกระแทก ชนิดแรงเสียดทานต่ำ (Friction less)
9. ชุดทดสอบรังสี
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก
11. ชุดทดสอบ ความถ่วงจำเพาะ, ความชื้น
12. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

### 3.2 การเตรียมวัสดุมวลรวม

สำหรับแรมมวลหนัก ที่ได้มาจากเหมืองแร่ ต้องทำการบดย่อยขนาด ให้มีขนาดเล็กกลง โดยใช้เครื่องย่อยปากงับ แล้วใช้ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve) คัดขนาดมวลรวม

สำหรับมวลรวมหยาบ ให้มีขนาดใหญ่สุดผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” และค้ำงตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำงตะแกรงเบอร์ 100

หลังจากนั้นนำมวลรวมที่ได้ ไปล้างเอาเศษฝุ่นแล้วแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชม. แล้วจึงนำขึ้นมาทดสอบคุณสมบัติทางอื่นๆ ต่อไป

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

#### 3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำ ของมวลรวมหยาบ

ตาม ASTM C127 [26] ความถ่วงจำเพาะหาได้จากการนำมวลรวมหยาบประมาณ 500 g ไปแช่น้ำ 24 ชม จนอยู่ในภาวะอิ่มตัว นำขึ้นจากน้ำซับให้ผิวแห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปชั่งในน้ำ คำนวณความถ่วงจำเพาะจากสมการ 3.1

หลังจากนั้น นำมวลรวมหยาบ ไปเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105-115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณค่าการดูดซึมน้ำจากสมการ 3.2

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{A}{A-B} \quad (3.1)$$

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ(\%)} = \frac{C-A}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ A = น้ำหนักที่ภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง ชั่งในอากาศ

B = น้ำหนักที่ภาวะอิ่มตัว ชั่งในน้ำ

C = น้ำหนักที่ภาวะแห้งหลังอบ ชั่งในอากาศ

#### 3.3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำ ของมวลรวมละเอียด

ตาม ASTM C128 [27] ความถ่วงจำเพาะหาได้จากการนำมวลรวมหยาบประมาณ 1000 g ไปแช่น้ำ 24 ชม จนอยู่ในภาวะอิ่มตัว นำขึ้นจากน้ำขึ้นตั้งบนกะทะ ทำการคั่ว จนอยู่ในภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง แบ่งตัวอย่าง 500 g บรรจุใส่ขวดรูปชมพู่ นำไปชั่งน้ำหนัก เติมน้ำไลฟองอากาศ ใน

ขวด จนหมดฟองอากาศ แล้วเติมน้ำจนถึงขีดกำหนดปริมาตร ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณความถ่วงจำเพาะ จากสมการ 3.3

หลังจากนั้น นำมวลรวมที่อยู่ในขวด ใส่ถาดแล้วนำไปเข้าเตาอบ ที่ อุณหภูมิ 105-115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม แล้วชั่งน้ำหนักอีกรอบ คำนวณค่าการดูดซึมน้ำจากสมการ 3.4

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{S}{B+S-C} \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ(\%)} = 100 \left( \frac{S-A}{A} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ S = น้ำหนักที่ภาวะ อิมตัวผิวแห้ง ซึ่งในอากาศ  
 A = น้ำหนักที่ภาวะแห้งหลังอบ ซึ่งในอากาศ  
 B = น้ำหนักขวดรูปชมพู่ ที่ใส่น้ำตามปริมาตร  
 C = น้ำหนักขวดรูปชมพู่ ที่ใส่ มวลรวม และน้ำ

### 3.3.3 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก และปริมาณช่องว่างในมวลรวม

ตาม ASTM C29 [28] นำมวลรวม ใส่ในถังมาตรฐาน ที่ละ 1/3 ของความสูงถัง ใช้แท่งทดสอบทำการต่า 25 ครั้ง แล้วจึงใส่มวลรวมอีก 1/3 ทำแบบเดิม จนเต็ม ความจุถัง ชั่งน้ำหนักมวลรวมที่ใช้ทั้งหมด แล้ววัดความจุถังมาตรฐาน คำนวณหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) จากสมการ

$$\text{หน่วยน้ำหนัก } M = \frac{A}{B} \quad (3.5)$$

$$\text{ปริมาณช่องว่างในมวลรวม \%} = \left( 1 - \frac{M}{C} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ A = น้ำหนักมวลรวมเต็มความจุถัง  
 B = ปริมาตรความจุถัง  
 C = ความถ่วงจำเพาะ

## 3.4 ตัวอย่าง

ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มตามชนิดมวลรวม ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรอย่างตามชนิดมวลรวม

ชนิดคอนกรีต	w/c	ปริมาตรมวลรวมหยาบ/คอนกรีต
คอนกรีตมวลรวม แบบไรต์ (B type)	0.5,0.57,0.65	0.45,0.5,0.55
คอนกรีตมวลรวม สีนแร่เหล็ก (S type)	0.5	0.55
คอนกรีตปกติ (N type)	0.5,0.5,0.65	0.45,0.5,0.55
คอนกรีตมวลรวม แบบไรต์+หินปูน 25:50 , 50:50 , 75:25 (BO type)	0.57	0.55
คอนกรีตผสมเถ้าลอย (NF,BF)	0.57	0.55

### 3.5 สัดส่วนผสมคอนกรีต

สำหรับงานวิจัยเลือกใช้ปริมาณปูนซีเมนต์  $350 \text{ kg/m}^3$  อ้างอิงตามงานวิจัยของ Topcu [6] มีสัดส่วนผสม ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต โดยน้ำหนักต่อปริมาตรคอนกรีต  $1 \text{ m}^3$

ชนิดคอนกรีต(w/c, %CA)	ปูนซีเมนต์ $\text{kg/m}^3$	เถ้าลอย $\text{kg/m}^3$	W/B	น้ำ $\text{kg/m}^3$	มวลรวม หยาบ $\text{kg/m}^3$	มวลรวม ละเอียด $\text{kg/m}^3$
B-3(0.5,0.55)	350	-	0.5	175	2150	604
B-4(0.57,0.45)	350	-	0.57	200	1760	920
B-5(0.57,0.5)		-			1955	711
B-6(0.57,0.55)		-			2150	500
B-7(0.65,0.45)	350	-	0.65	228	1760	803
B-8(0.65,0.5)		-			1955	593
B-9(0.65,0.55)		-			2150	384
S-1(0.5,0.55)	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(0.5,0.45)	350	-	0.5	175	1215	646

N-2(0.5,0.5)		-			1350	514		
N-3(0.5,0.55)		-			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 = แปะไรต์      L = หินปูน      S = ทราย

### 3.6 การผสม, หล่อ และบ่มขึ้นตัวอย่าง

การผสมใช้เครื่องผสมชนิดใบพัดกวน (Pan Mixer) โดยมีลำดับการใส่ ส่วนผสม โดยเริ่มจาก ซีเมนต์และเถ้าลอย (ถ้ามี) ผสมกับน้ำ ครั้งหนึ่ง ผสมจนเข้ากันแล้วจึงใส่ มวลรวมละเอียด กับ น้ำอีก 1 ใน 4 ผสมจนเข้ากัน สุดท้ายจึงใส่ มวลรวมหยาบและน้ำที่เหลือ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

การหล่อ ใช้การจี้เขย่าเข้าแบบ โดยเครื่องจี้ไฟฟ้า (Vibrator) เพื่อไล่ฟองอากาศ ในเนื้อคอนกรีต แล้วทำการปาดหน้าให้เรียบ โดยเกรียงปาด

หลังการเทคอนกรีต 24 ชม ทำการถอดแบบ นำก้อนตัวอย่างไปบ่มต่อในน้ำ จนคอนกรีตอายุ 28 วันจึงนำขึ้นมา ทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ต่อไป

### 3.7 การทดสอบชนิดไม่ทำลาย

#### 3.7.1 การทดสอบด้วยค้อนกระทบ

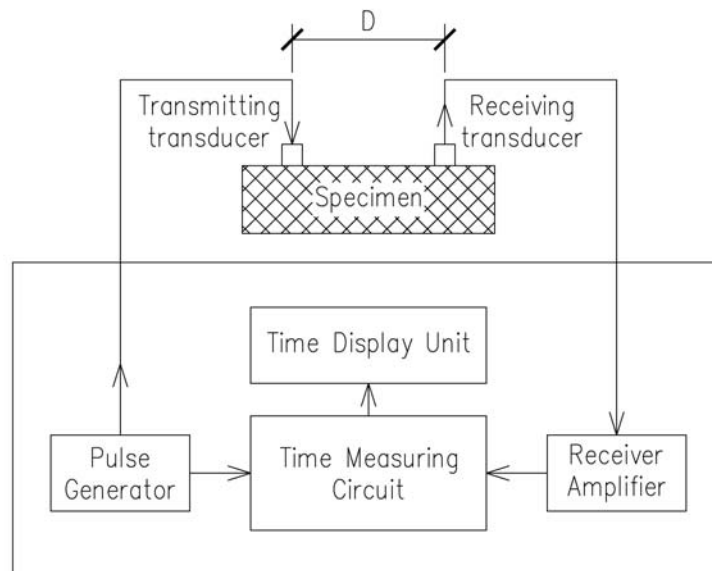
ขึ้นตัวอย่างที่ใช้ เป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด 10cm x10cm x10 cm การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.1502-51 [8] โดยเตรียมผิวตัวอย่างให้เรียบ (Capping) แล้วนำเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต เพิ่มแรงกดให้ตัวอย่างประมาณ ร้อยละ 15 ของกำลังอัดประลัยแล้วทำการวัดค่าการสะท้อนของค้อนกระทบ 16 ครั้ง แบ่งเป็น 4 หน้า หน้าละ 4 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะต้องไม่

ทดสอบในตำแหน่งเดียวกัน และห่างจากจุดเดิมอย่างน้อย 2.5 cm เฉลี่ยค่าการสะท้อนทั้งหมด เป็นค่าการสะท้อนของตัวอย่าง

### 3.7.2 การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ชิ้นส่วนสำหรับทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ชนิดคาน กว้าง 10cm ยาว 50 cm ลึก 10 cm จำนวน 1 ตัวอย่าง และ พื้น กว้าง 30 cm ยาว 30 cm ลึก 10 cm จำนวน 1 ตัวอย่าง ต่อ สัดส่วนการผสม การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.1504-51 [29]

การทดสอบใช้วิธี In-direct โดยมีผังการทำงาน ตามภาพที่ 3.1 โดยใช้วิธีให้คลื่นเคลื่อนที่ ผ่านผิวหน้าของตัวอย่าง แล้วคำนวณเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เทียบกับระยะทาง



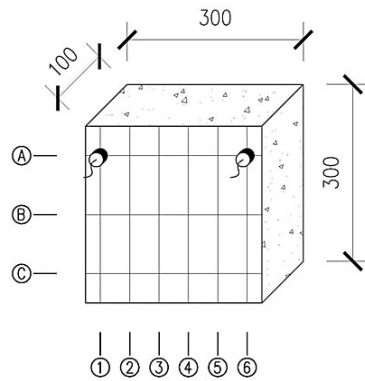
ภาพที่ 3.1 แสดงผังการทำงานของ UPV ด้วยวิธี In-direct

กำหนดตำแหน่งการวัดสำหรับ วิธี In-direct โดย ตัวอย่างพื้น แบ่งช่วงออกเป็น 3 แถว แต่ละแถว แบ่ง 5 ช่วง แต่ละช่วงห่างกัน 5 cm ดังภาพที่3.2 ตัวอย่างคาน แบ่งออกเป็น 9 ช่วง แต่ละช่วงห่างกัน 5 cm ดังภาพที่3.3 วัดเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านก้อนตัวอย่าง พร้อมระยะทาง ตั้งแต่ ระยะ 10 cm จน สู่ระยะ ค่าวนความเร็ของคลื่น โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาและระยะห่างของหัววัด

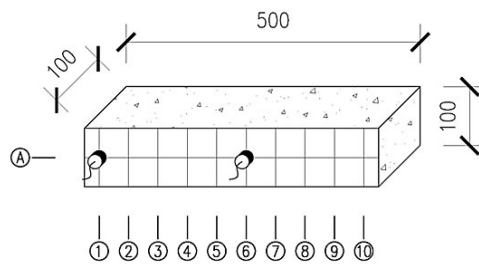
$$s = At + B \quad (3.6)$$

$$v = \frac{ds}{dt} = A \quad (3.7)$$

โดย  $S$  = ระยะห่างของหัววัด  
 $T$  = เวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่น  
 $V$  = ความเร็วคลื่น



ภาพที่ 3.2 แสดงตำแหน่งการวัดคลื่นอัลตราโซนิก ในตัวอย่างชนิดพื้น



ภาพที่ 3.3 แสดงตำแหน่งการวัดคลื่นอัลตราโซนิก ในตัวอย่างชนิดคาน

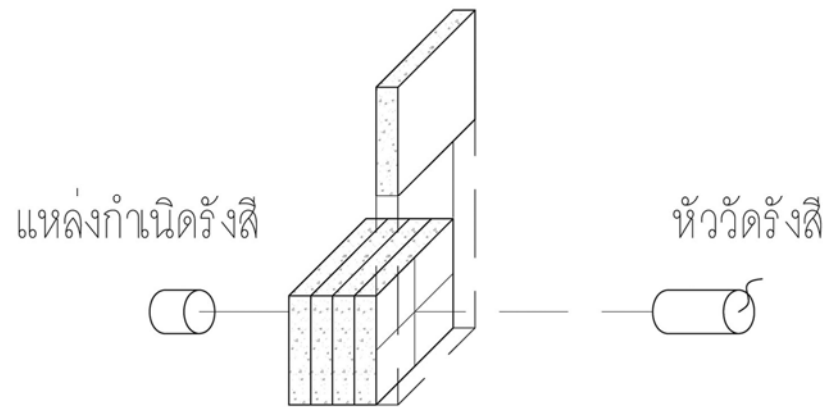
### 3.8 วิธีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา

การทดสอบคุณสมบัติการป้องกันรังสี ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10cm x10cm x50cm แล้วนำไปตัดให้มีขนาดหน้าตัด 10cm x10cm โดยมีค่าความหนา 2cm จำนวน 5 ชั้นเพื่อทดสอบการป้องกันรังสี ที่ความหนา 2, 4, 6, 8 และ 10 cm ทั้งหมด 5 ค่า ตามลำดับ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี

การทดสอบด้านรังสี ทดสอบที่ห้องทดสอบทางรังสี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาจาก ซีซีเอ็ม137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) มีระดับพลังงานทางรังสีที่ 0.605 MeV และ โคบอลต์ 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) มีระดับพลังงานทางรังสีที่ 1.17 MeV และ 1.33 MeV

ขั้นตอนการทดสอบ นำชิ้นตัวอย่างที่ตัดแล้ว วางระหว่างตำแหน่งแหล่งกำเนิดรังสี และหัววัด ดังภาพที่ 3.4 บันทึกค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ และความหนาของตัวอย่าง หลังจากนั้น ทำการ

เพิ่มความหนาจนได้ความหนาครบ แล้วคำนวณหาค่าการลดทอนสำหรับความหนาต่างๆ ตามสมการ 2.2 แล้วคำนวณหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี เป็นสมการเลขชี้กำลัง (Exponential equation) สำหรับคอนกรีตในแต่ละตัวอย่าง



ภาพที่ 3.4 แสดงการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินงานวิจัย ตามขั้นตอนที่แสดงไว้ใน บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติของมวลรวมมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยใช้มวลรวมหยาบ 3 ชนิด คือ หินปูน, แบริต์ และ เมคเนโทต์เฮมาโทต์ ขนาดมวลรวมใหญ่สุด ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" จากมาตรฐาน ACI 318 โดยมีคุณสมบัติ ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติมวลรวมหยาบ ตาม ASTM C29 [28], C127 [26]

Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	% absorption	% void
หินปูน	2700	N.A.	N.A.	N.A.
แบริต์	3910	2480	1.22	36
สินแร่เหล็ก	4160	2260	2.77	44

มวลรวมละเอียดใช้ 2 ชนิด คือ ทรายแม่น้ำ และ แบริต์ ขนาดใหญ่สุด ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยมีคุณสมบัติ ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติมวลรวมละเอียด ตาม ASTM C29 [28], C128 [27]

Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	% absorption	% void
ทรายแม่น้ำ	2650	N.A.	0.60	N.A.
แบริต์	4195	3170	0.21	24.2

โดยความหนาแน่น เป็นค่าที่ต้องใช้สำหรับการออกแบบสัดส่วนผสม โดยแบริต์ที่นำมาใช้ระหว่าง แบบหยาบและละเอียด พบว่าแบบละเอียดมีค่าความหนาแน่นมากกว่าแบบหยาบ เนื่องจาก มวลรวมหยาบมีช่องว่างภายใน พออบแล้วจึงทำให้ ช่องว่างหายไป จึงมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น

ค่าการดูดซึมน้ำ (% absorption) ใช้ในการปรับแก้ค่าในสัดส่วนผสมคอนกรีต สำหรับแร่แบไรต์ให้ผลสอดคล้องกับความหนาแน่น เนื่องจาก ช่องว่างที่มีในก้อนหินหยาบส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าแบบละเอียด

ช่องว่าง (%void) ใช้ในการออกแบบสัดส่วนผสมให้มีมวลรวมหนาแน่นมากที่สุด โดยใช้มวลรวมหยาบได้สูงสุดเท่ากับ 56% (1-0.44) เป็นตัวควบคุมปริมาณมวลรวมหยาบ ในสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด ในงานวิจัยชิ้นนี้

#### 4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

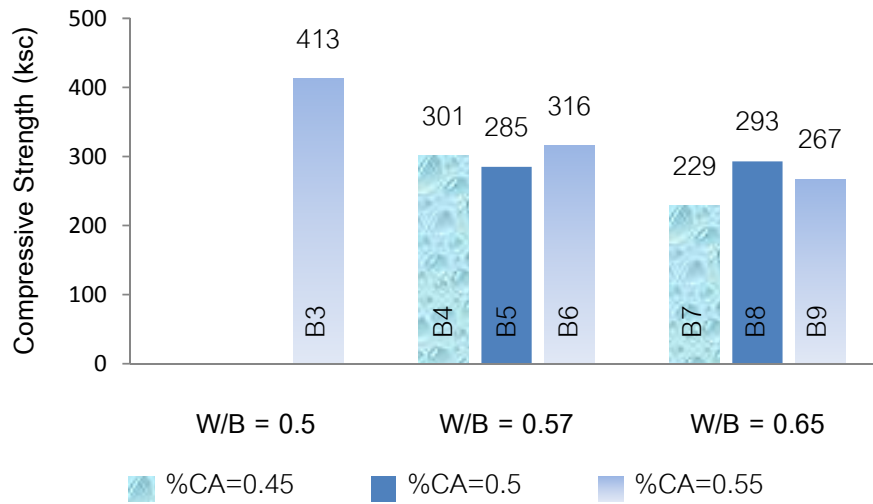
เนื่องจากคุณสมบัติทางกลเป็น ข้อบังคับถึงคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต และนำไปใช้ในการพิจารณา ความสัมพันธ์กับการทดสอบชนิดไม่ทำลายชนิดอื่นต่อไป ผลการทดสอบ มีค่าตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

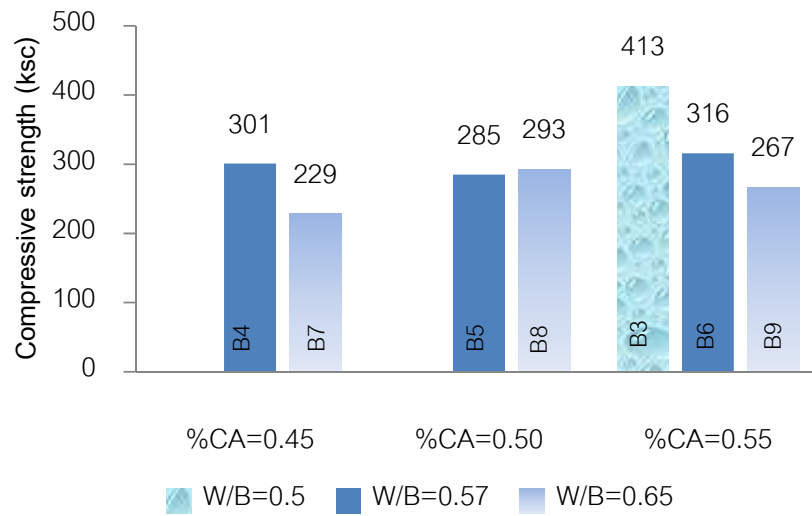
Mix	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive Strength		
		(ksc)	W/B	%CA
B3	3330	387	0.50	0.55
B4	3683	301	0.57	0.45
B5	3614	285	0.57	0.50
B6	3592	316	0.57	0.55
B7	3561	229	0.65	0.45
B8	3457	293	0.65	0.50
B9	3591	267	0.65	0.55
BF1	3247	321	0.57	0.55
BF2	3261	327	0.57	0.55
BF3	3325	215	0.57	0.55
BF4	3289	328	0.57	0.55
N1	2601	530	0.50	0.45
N2	2560	415	0.50	0.50
N3	2445	350	0.50	0.55
NF0	2448	327	0.57	0.55

NF1	2387	283	0.57	0.55
NF2	2375	297	0.57	0.55
NF3	2369	274	0.57	0.55
NF4	2347	246	0.57	0.55
BO1	2572	285	0.57	0.55
BO2	2842	286	0.57	0.55
BO3	3072	274	0.57	0.55
P0.5	1762	296	0.50	-
P0.57	1693	274	0.57	-
P0.65	1572	253	0.65	-
MN4	2110	418	0.57	FA 0.41
MN5	2042	403	0.57	FA 0.35
MN6	1958	417	0.57	FA 0.28
MB4	2748	275	0.57	FA 0.41
MB5	2618	301	0.57	FA 0.35
MB6	2522	413	0.57	FA 0.28

เมื่อพิจารณา ตามกลุ่มของคอนกรีต จะพบว่า กำลังของคอนกรีตมวลหนักมีแนวโน้มลดลงเมื่อ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 4.1 ส่วนผลกระทบจากปริมาณมวลรวมหยาบ ไม่สามารถสรุปผลว่าอัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตส่งผลต่อกำลังคอนกรีตอย่างไร ดังภาพที่ 4.2

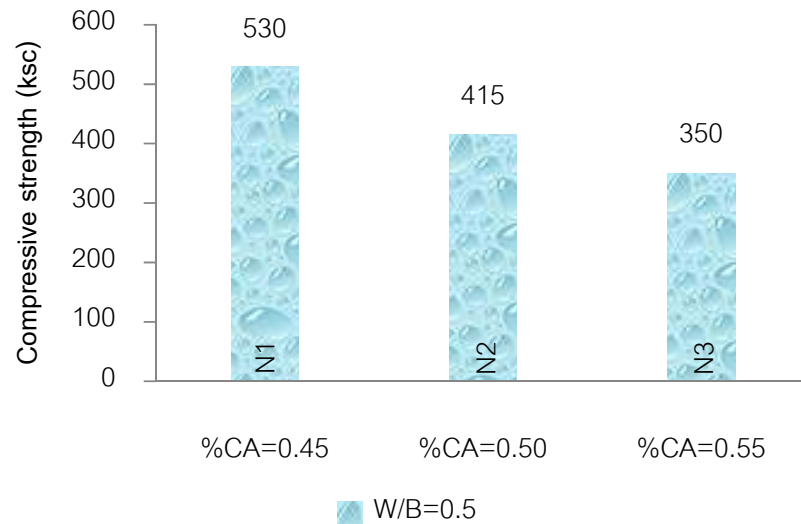


ภาพที่ 4.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนัก (ksc) บนตัวแปรของ อัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์ (W/C)



ภาพที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลหนัก (ksc) บนตัวแปรของ ปริมาณมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต (%CA)

คอนกรีตปกติพบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อมีปริมาณมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 4.3

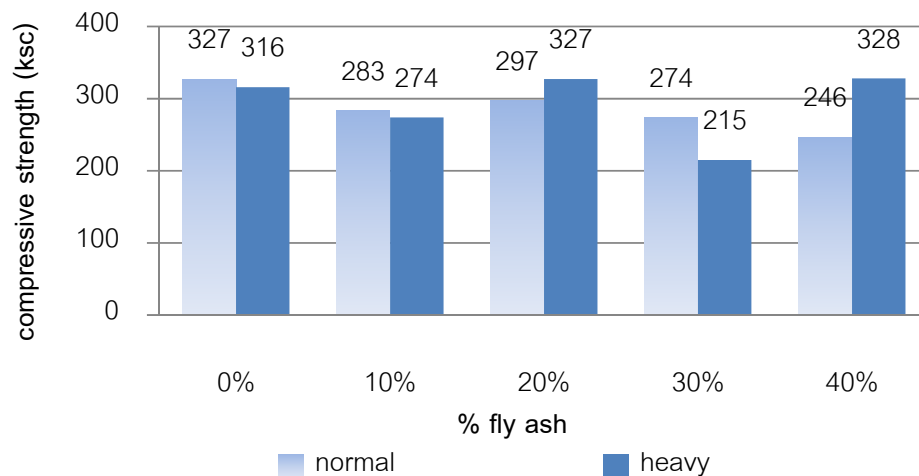


ภาพที่ 4.3 แสดง ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติ (ksc) บนตัวแปรของ ปริมาณมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต (%CA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

ผลของเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตปกติมีแนวโน้ม มีกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น สวนทางกับคอนกรีตมวลหนัก กำลัง ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นทำให้ คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ เพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากคอนกรีตปกติ มีอัตราส่วนน้ำที่มากเกินไปจนกลายเป็น น้ำส่วนเกินที่มากเกินไป ทำให้กำลังมีค่าลดลง

สำหรับคอนกรีตมวลหนักโดนควบคุมกำลังจากแร่แบไรต์ สังเกตได้จากรอบแตกของก้อนคอนกรีตที่มีรอยแตกผ่านก้อนแร่เป็นจำนวนมาก ดังภาพที่ 4.5

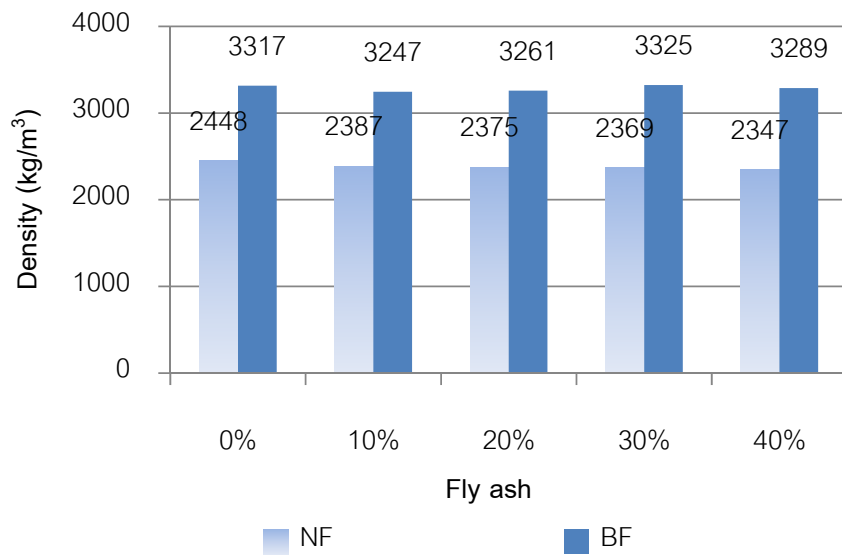


ภาพที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต บนปริมาณเถ้าลอย



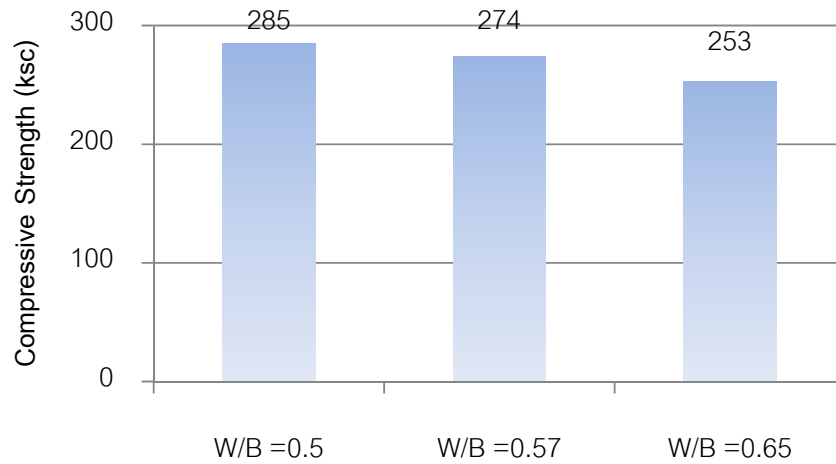
ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่างก้อนคอนกรีตมวลหนัก ที่โดนกดแตกโดย UTM

ผลของเถ้าลอยต่อความหนาแน่น ของคอนกรีต มีแนวโน้มลดลง เล็กน้อย สำหรับคอนกรีตปกติ และไม่มี ความเปลี่ยนแปลงสำหรับคอนกรีตมวลหนัก



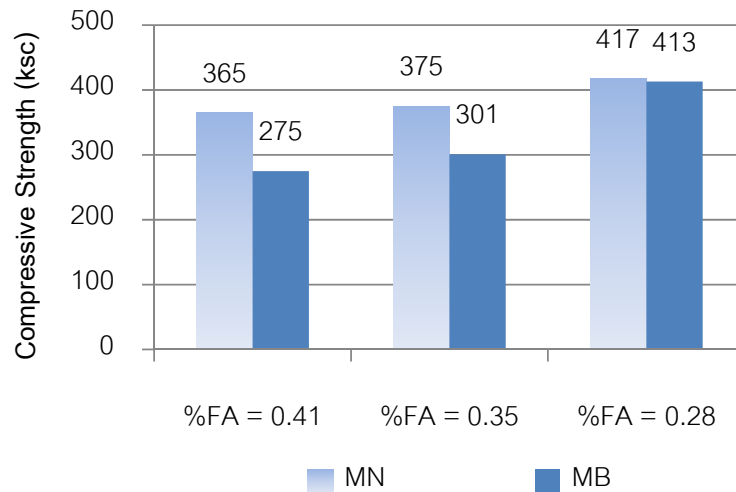
ภาพที่ 4.6 ความหนาแน่นของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าลอย

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์พิจารณาจากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์เพสต์ (P) เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของ ซีเมนต์เพสต์ มีค่าลดลง



ภาพที่ 4.7 กำลังของซีเมนต์เพสต์บนอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน

ผลของมวลรวมหยาบต่อกำลังคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน พิจารณาผลจากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นมอร์ตาร์ (MN และ MB) จะพบว่า เมื่ออัตราส่วนของมวลรวมละเอียดลดลง กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตามภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

### 4.3 การทดสอบชนิดไม่ทำลายด้วยค้อนกระแทก

ค้อนกระแทกใช้หลักการการสะท้อนของพลังงานที่แตกต่างกันของวัสดุที่มีค่าความแข็งของผิวไม่เท่ากัน โดยค่าที่วัดได้เป็น ค่าความแข็งของผิววัสดุที่ทำการทดสอบ ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ค้อนกระแทกชนิดแรงเสียดทานต่ำ โดยค่าสะท้อนที่ได้มีหน่วยเป็น Q ผลการทดสอบของคอนกรีตแต่ละชนิดแสดงตามตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ค่าสะท้อนของค้อนกระแทกชนิดแรงเสียดทานต่ำ

		Compressive stress (ksc)		Rebound Number (Q)	
B1	1	333	301	41.5	42.7
	2	274		43.5	
	3	295		43	
B3	1	392	413	41	41.8
	2	382		40	
	3	466		44.5	
B4	1	242	268	38.5	40.3
	2	253		39.5	
	3	308		43	
	4	269		40	
B5	1	266	285	39.5	41.0
	2	303		42.5	
	3	288		41	
B6	1	325	316	42.5	44.2
	2	313		43	
	3	309		47	
B7	1	232	229	39	38.4
	2	242		39.5	
	3	247		41.5	
	4	194		33.5	
B8	1	274	293	39.5	40.2



	2	296		39	
	3	309		42	
B9	1	278	267	41	38.8
	2	274		41	
	3	257		32	
	4	261		41	
BF1	1	299	274	37	33.8
	2	342		33	
	3	180		31.5	
BF2	1	285	327	38	36.5
	2	347		36.5	
	3	350		35	
BF3	1	176	215	29.5	34.3
	2	244		37	
	3	224		36.5	
BF4	1	342	328	N.A.	34.5
	2	377		37	
	3	265		32	
N1	1	600	507	42	41.5
	2	470		40	
	3	450		42.5	
N2	1	410	423	42	41.7
	2	400		41	
	3	460		42	
N3	1	360	350	N.A.	36.0
	2	330		36	
	3	360		36	
NF0	1	280	327	40.5	39.8
	2	360		39.5	

	3	340		39.5	
NF1	1	294	283	35	36.5
	2	262		35.5	
	3	294		39	
NF2	1	297	297	35	37.3
	2	297		37.5	
	3	298		39.5	
NF3	1	283	274	38.5	37.5
	2	262		36	
	3	276		38	
NF4	1	252	246	38	36.5
	2	239		36	
	3	248		35.5	
BO1	1	293	285	36.5	37.7
	2	295		41	
	3	266		35.5	
BO2	1	233	286	31	35.3
	2	293		38.5	
	3	331		36.5	
BO3	1	235	274	37.5	37.2
	2	195		34	
	3	394		40	
P0.5	1	292	285	31.5	31.3
	2	265		31	
	3	300		N.A.	
P0.57	1	289	274	30.5	31.3
	2	267		31	
	3	266		32.5	
P0.65	1	276	210	27.5	30.0

	2	97		N.A.	
	3	257		32.5	
MN4	1	259	365	32.5	33.5
	2	322		33	
	3	515		35	
MN5	1	320	375	31	32.7
	2	386		32	
	3	420		35	
MN6	1	466	417	34	33.8
	2	450		33.5	
	3	334		34	
MB4	1	312	275	30.5	30.0
	2	269		30.5	
	3	244		29	
MB5	1	385	301	32.5	30.2
	2	253		32.5	
	3	264		25.5	
MB6	1	405	413	32.5	32.3
	2	411		34	
	3	423		30.5	

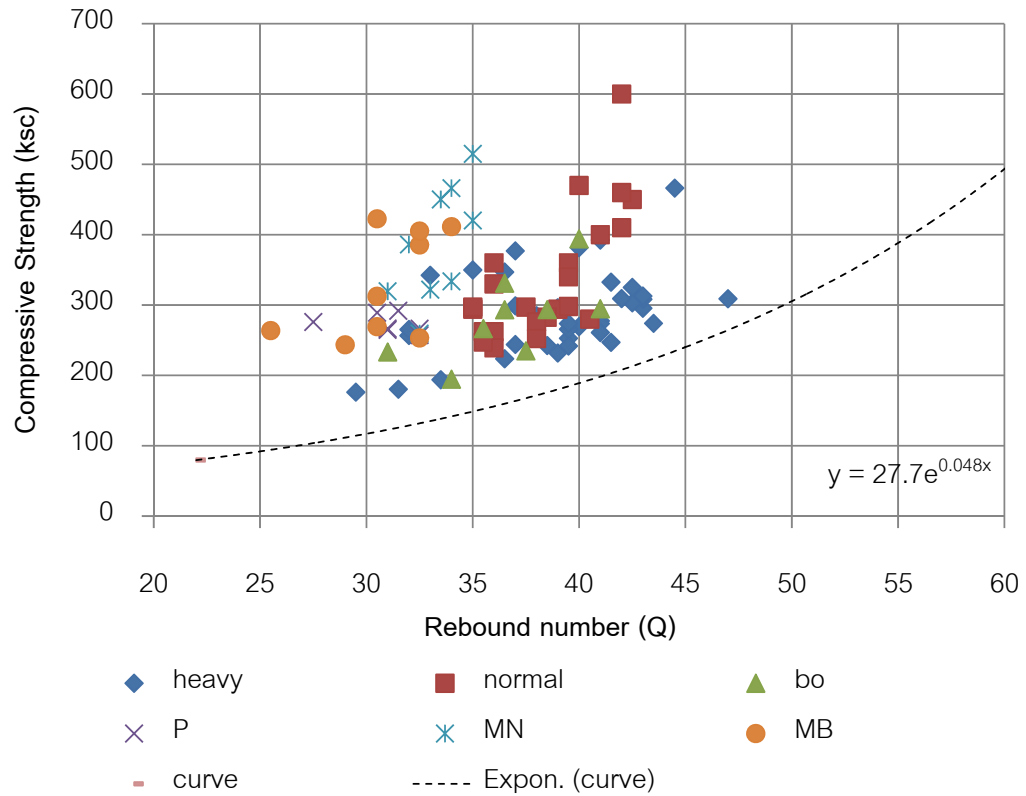
สมการเส้นประเมินกำลังจากผู้ผลิต ค้อนกระแทก มีค่าตามสมการที่ 2.8

$$f_c' = 2.77e^{0.048Q} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_c'$  เป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต MPa

Q เป็นค่าสะท้อนของค้อน

ดังนั้นเมื่อทำการ พิจารณา เปรียบเทียบระหว่าง ค่าสะท้อน กับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 4.8 พบว่าค่าที่ได้ จากเส้นประเมิน ให้ค่าประเมินกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ากำลังที่ทดสอบได้จริง ในทุกกลุ่มของตัวอย่าง ยืนยันได้ว่าสมการในการประเมินกำลังของคอนกรีตสามารถใช้สมการที่ 2.8 ในการประเมินกำลัง ได้



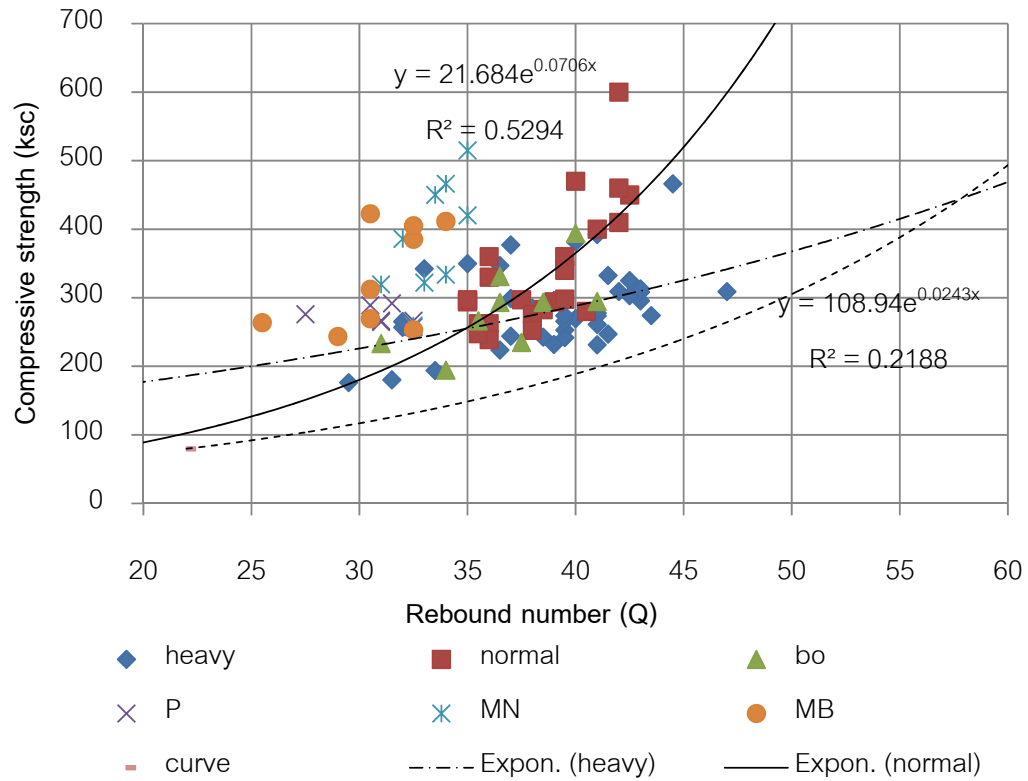
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ ของ ค่าสะท้อนจากค้อนกระแทก เทียบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต บนเส้นประเมินกำลังของผู้ผลิต

เมื่อพิจารณาจาก เส้นแนวโน้ม ของ คอนกรีต แยกตามชนิด จะพบว่า คอนกรีตปกติ ให้ สมการประมาณการเป็น สมการที่ 4.1 และคอนกรีตมวลหนักเป็นสมการที่ 4.2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (R<sup>2</sup>- Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.53 และ 0.22 ตามลำดับ

$$fc'_{normal} = 21.684e^{0.07Q} \quad (4.1)$$

$$fc'_{heavy} = 108.94e^{0.024Q} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $fc'$  เป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต: ksc  
 $Q$  เป็นค่าสะท้อนของค้อน

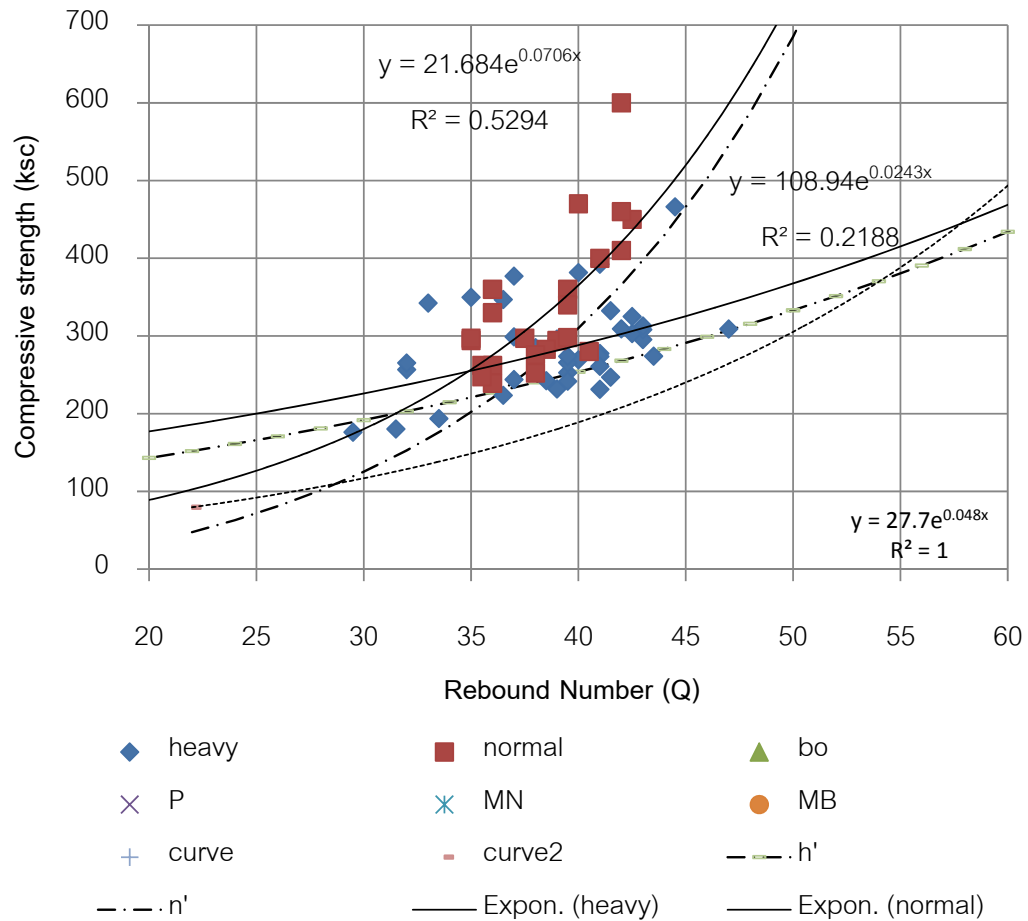


ภาพที่ 4.10 แสดงสมการประเมินของ คอนกรีตปกติ (เส้นทึบ) และ คอนกรีตมวลหนัก (เส้นขีด-จุด)

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลทดสอบ กับค่าประมาณจากสมการ เพื่อหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการปรับสมการใหม่ ให้สามารถล้อมข้อมูลได้ โดยพบว่า คอนกรีตมวลหนัก มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 17 และคอนกรีตปกติ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 27 ดังนั้นสมการ 4.1 และ 4.2 จึงปรับค่าลดลง 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงในภาพที่ 4.10

$$fc'_{normal} = 21.684e^{0.07Q} - 54 \quad (4.3)$$

$$fc'_{heavy} = 108.94e^{0.024Q} - 34 \quad (4.4)$$



ภาพที่ 4.11 แสดงสมการประเมินของ คอนกรีตปกติ และ คอนกรีตมวลหนัก ที่ปรับค่าแล้ว

#### 4.4 การทดสอบชนิดไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ในงานวิจัยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ชนิดความถี่ 54 kHz หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50mm วัดแบบไปกลับ แล้วหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา เป็นความเร็วในตัวกลาง ได้ความเร็วตามที่แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ของตัวอย่าง

Mix	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (ksc)	Beam (m/s)	Slab (m/s)	Beam + Slab (m/s)
B3	3330	413	3474	3323	3503
B4	3502	268	3351	3435	3392

B5	3614	285	3430	3430	3478
B6	3592	316	3363	3309	3429
B7	3561	229	3241	3269	3274
B8	3457	293	3378	3358	3427
B9	3591	267	3265	3305	3329
BF1	3247	274	3298	3317	3283
BF2	3261	327	3451	3347	3441
BF3	3325	215	3380	3397	3450
BF4	3289	328	3435	3240	3422
S1	3670	282	3563	3834	3593
N1	2601	530	4943	4827	5052
N2	2560	415	4605	4598	4642
N3	2445	350	4400	4521	4433
NF0	2448	327	4431	4336	4512
NF1	2387	283	4392	4406	4442
NF2	2375	297	4269	4356	4352
NF3	2369	274	4322	4422	4357
NF4	2347	246	4290	4394	4316
BO1	2572	285	4013	4021	4014
BO2	2842	286	3795	3681	3826
BO3	3072	274	3518	3325	3516
P0.5	1762	296	3215	3160	3258
P0.57	1693	274	3114	3178	3180
P0.65	1572	210	3115	3091	3088
MN4	2110	418	3931	3938	3933
MN5	2042	403	3832	3873	3801
MN6	1958	417	3639	3621	3653
MB4	2748	275	3213	3137	3243
MB5	2618	301	3198	3065	3184

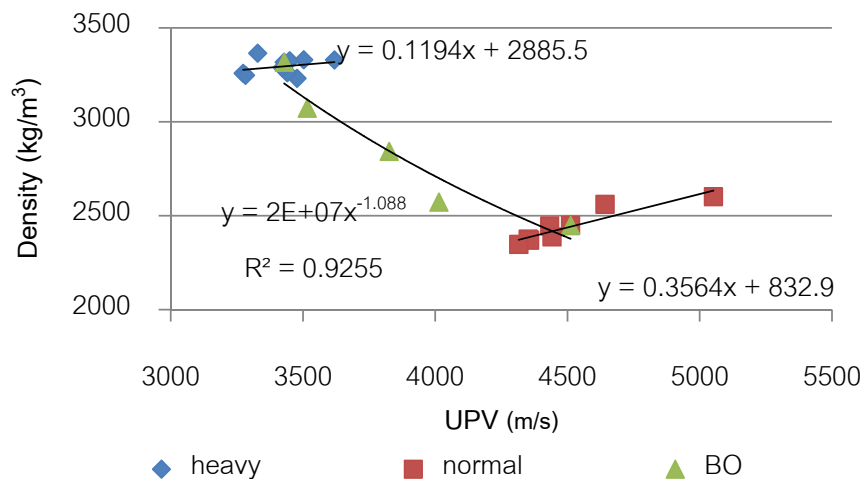
MB6                      2522                      413                      3136                      2967                      3160

เมื่อพิจารณา ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก กับความหนาแน่น จะพบว่า ความเร็วคลื่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ตามกลุ่มตัวอย่าง โดยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นและความเร็วคลื่น จากคอนกรีตที่ผสมมวลรวมปกติและมวลรวมหนัก (BO) ได้เป็นสมการที่ 4.3 โดยเป็นไปตามทฤษฎีความเร็วคลื่นในเนื้อวัสดุ ในสมการที่ 2.2 ส่วนคอนกรีตปกติ (normal) และคอนกรีตมวลหนัก (heavy) มีแนวโน้มแปรผันตาม ระหว่างความหนาแน่น และ ความเร็วคลื่น เนื่องจากการลดลงของช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คลื่นสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วมากขึ้น

$$D = 2 \times 10^7 \times V_{in}^{-1.088} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $D$  = ความหนาแน่นของคอนกรีต:  $\text{kg/m}^3$

$V_{in}$  = ความเร็วคลื่น UPV ในคอนกรีต โดยวิธี indirect:  $\text{m/s}$



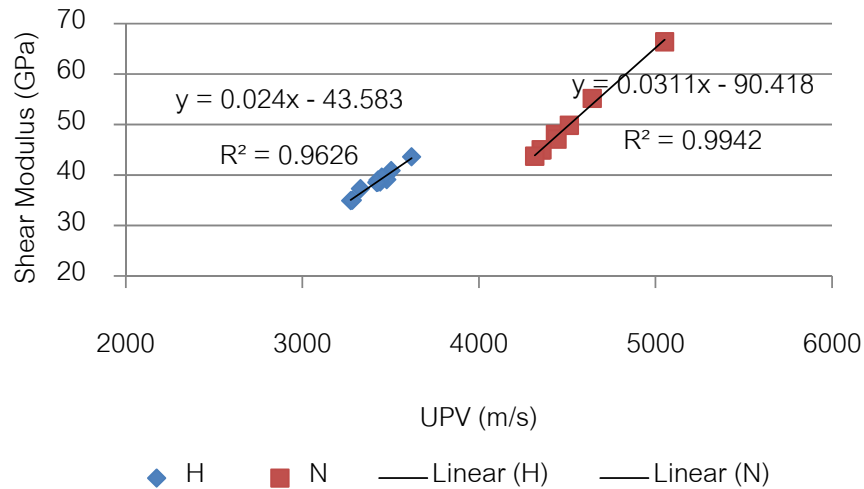
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นของคอนกรีตกับความเร็วคลื่นโดยวิธี indirect

คำนวณค่าโมดูลัสเฉือนโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.2 ระหว่าง ความเร็วคลื่นและความหนาแน่น โดยพบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นแล้ว มีความสัมพันธ์แยกกันอย่างเด่นชัดระหว่างคอนกรีตมวลหนักและคอนกรีตปกติ ในภาพที่ 4.10



ตารางที่ 4.6 ค่าโมดูลัสเฉือนของตัวอย่าง

Mix	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive (ksc)	UPV (m/s)	G (GPa)
B3	3330	413	3503	41
B4	3329	301	3619	44
B5	3231	285	3478	39
B6	3317	316	3429	39
B7	3258	229	3274	35
B8	3283	293	3427	39
B9	3365	267	3329	37
S1	3670	282	3593	47
N1	2601	530	5052	66
N2	2560	415	4642	55
N3	2445	350	4433	48
NF0	2448	327	4512	50
NF1	2387	283	4442	47
NF2	2375	297	4352	45
NF3	2369	274	4357	45
NF4	2347	246	4316	44
BF1	3247	274	3283	35
BF2	3261	327	3441	39
BF3	3325	215	3450	40
BF4	3289	328	3422	39
BO1	2572	285	4014	41
BO2	2842	286	3826	42
BO3	3072	274	3516	38



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน

โดยความสัมพันธ์ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตามสมการ 4.4 สำหรับคอนกรีตมวลหนัก และสมการที่ 4.5 สำหรับคอนกรีตปกติ

$$G_{heavy} = 0.024V_{in} - 43.583 \quad (4.6)$$

$$G_{normal} = 0.0311V_{in} - 90.418 \quad (4.7)$$

เมื่อ  $G$  = โมดูลัสเฉือน: ksc

$V_{in}$  = ความเร็วคลื่น UPV ในคอนกรีต โดยวิธี indirect: m/s

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า โมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่เป็นในรูปแบบของสมการยกกำลัง 4.8 และ 4.9

$$E = 4270W^{1.5} x \sqrt{fc'} \quad (4.8)$$

$$fc' \propto aE^2 \quad (4.9)$$

วัสดุมีคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนแสดงในสมการที่ 4.10

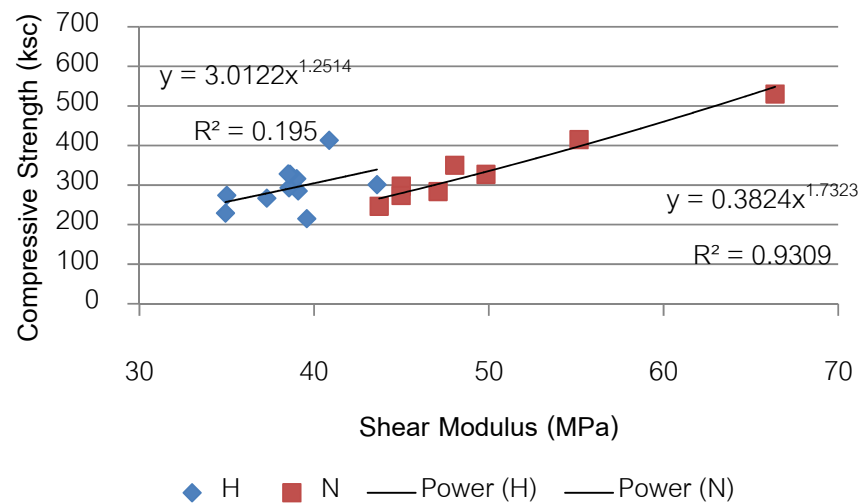
$$E = 2G(1 + \nu) \quad (4.10)$$

$$E \propto aG \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.9 และ 4.11 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสเฉือน ได้เป็น สมการที่ 4.12

$$fc' \propto aG^B \quad (4.12)$$

เมื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสเฉือน กับกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.10 ได้ผลดังในภาพที่ 4.11 โดยคอนกรีตปกติ มีความสัมพันธ์อย่างเด่นชัด แต่สำหรับคอนกรีตมวลหนัก ความสัมพันธ์ นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย ต่ำไม่เพียงพอต่อการสรุปความสัมพันธ์

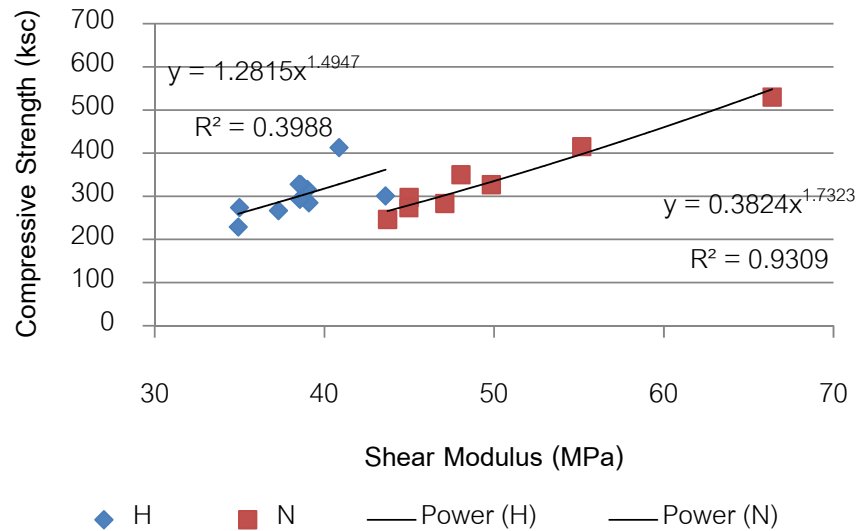


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับกำลังรับแรงอัด

หากพิจารณาจากผลภาพที่ 4.4 จะพบว่า คอนกรีตมวลหนักที่มีแก้วลอย 30% (BF3) นั้นมีแนวโน้มที่จะมี ความคลาดเคลื่อน (error) จึงทำการตัดผลของ BF3 ออก จะได้เส้นสมการแนวโน้มใหม่ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 ตามภาพที่ 4.12

$$fc'_{heavy} = 1.2815G^{1.4947} \quad (4.13)$$

$$fc'_{normal} = 0.3824G^{1.7323} \quad (4.14)$$



ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับกำลังรับแรงอัดหลังจากตัด BF3 ออก

สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่น และกำลังรับแรงอัด โดยนำสมการที่ 4.6 แทนค่าลงในสมการที่ 4.13 ได้เป็นสมการที่ 4.15

$$fc'_{heavy} = 1.2815(0.024V_{in} - 43.583)^{1.4947} \quad (4.15)$$

และนำสมการที่ 4.7 แทนลงในสมการที่ 4.14 ได้เป็นสมการที่ 4.16

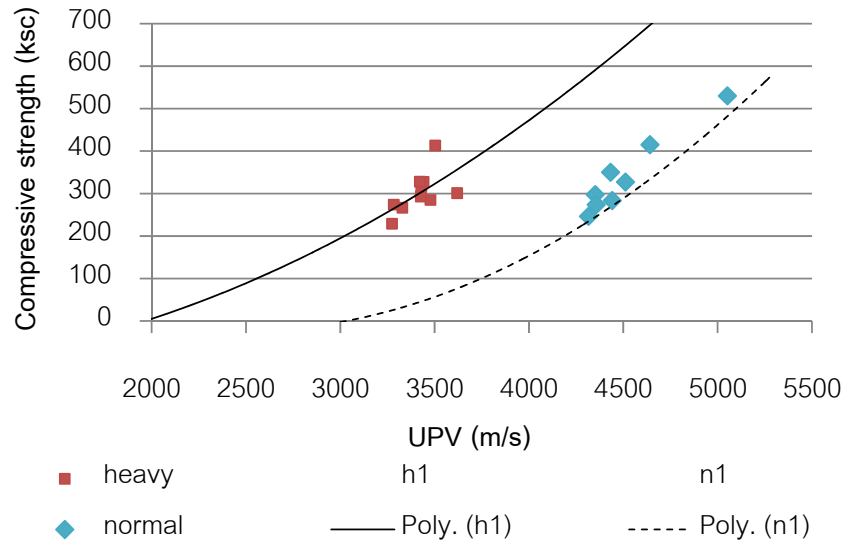
$$fc'_{normal} = 0.3824(0.0311V_{in} - 90.418)^{1.7323} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $fc'$  = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต: ksc

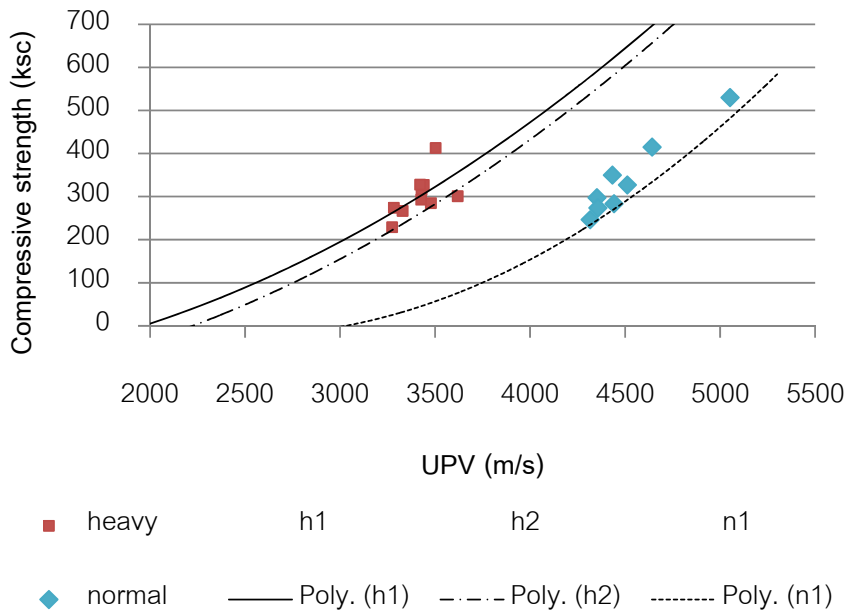
$V_{in}$  = ความเร็วคลื่น UPV ในคอนกรีต โดยวิธี indirect: m/s

ทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับสมการที่ได้ เพื่อหาข้อมูลที่ต่ำกว่า สมการ จากภาพที่ 4.14 พบว่า สมการของคอนกรีตมวลหนัก ยังไม่สามารถครอบคลุม กลุ่มตัวอย่างได้ทั้งหมด จึงทำการปรับค่า โดยหาค่าความแตกต่างของผลที่ทดสอบได้ เทียบกับค่าประมาณการจากสมการ พบว่า มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviations) เท่ากับ 20 จึงนำสมการที่ 4.15 มาลดด้วย 2 เท่า ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 40 เป็นสมการที่ 4.17

$$fc'_{heavy} = 1.2815(0.024V_{in} - 43.583)^{1.4947} - 40 \quad (4.17)$$

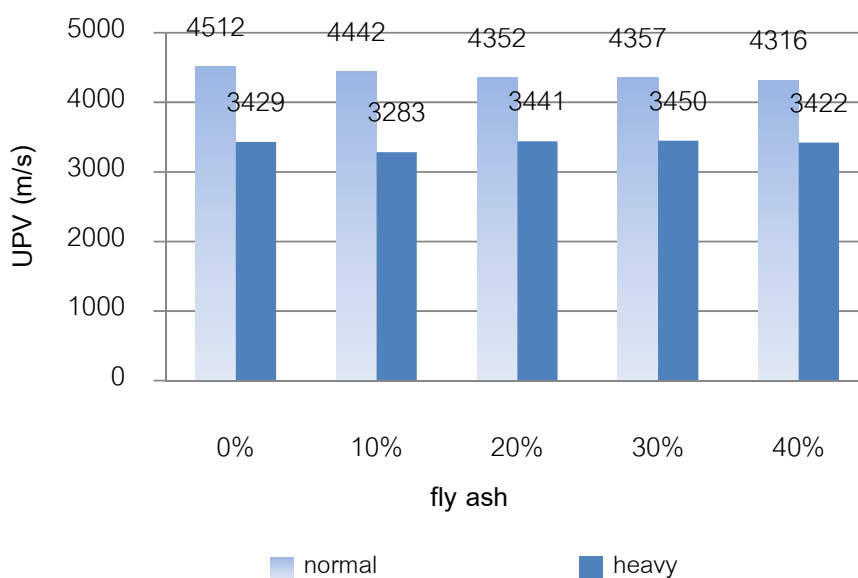


ภาพที่ 4.16 แสดงค่าทดสอบเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.15(เส้นเต็ม) และ 4.16(เส้นจุด)



ภาพที่ 4.17 แสดงค่าทดสอบเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.15(เส้นเต็ม), 4.16(เส้นจุด) และ 4.17(เส้นขีด-จุด) ที่ปรับแก้จากสมการที่ 4.15

ผลกระทบจาก ปริมาณเถ้าลอยต่อความเร็วคลื่นในคอนกรีต พบว่าความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบมี ค่าแตกต่างจากตัวควบคุม (เถ้าลอย 0%) มากที่สุด 4% จึงสรุปว่า เถ้าลอยไม่มีผลต่อความเร็วคลื่นในคอนกรีตทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตมวลหนัก



ภาพที่ 4.18 ความเร็วคลื่นเทียบกับปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีต

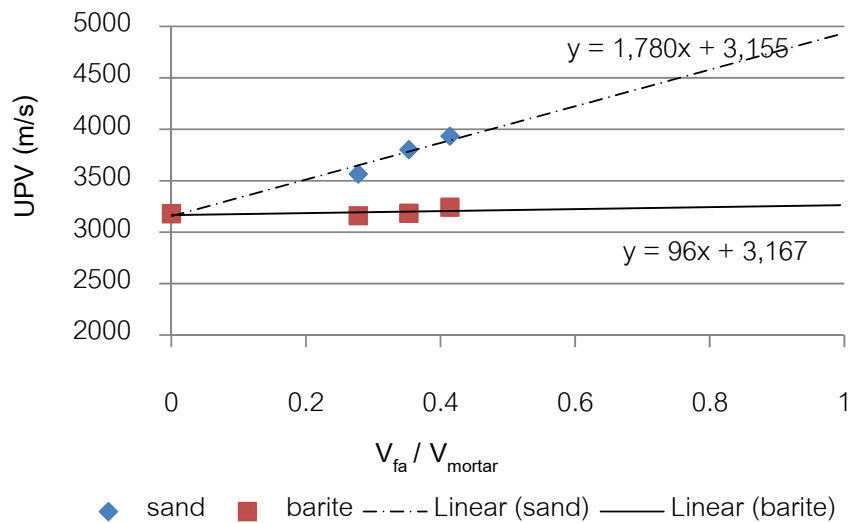
คำนวณความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในมวลรวมโดยใช้ แบบจำลองในภาพที่ 2.15 [11] โดยมีสมมติฐานความสัมพันธ์ เป็นแบบเชิงเส้น เพื่อใช้ในการประมาณการ ความเร็วคลื่นของคอนกรีตที่ทราบสัดส่วนผสมในอนาคต

มวลรวมละเอียด พิจารณาผลระหว่าง ซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ เทียบกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก แล้วสร้างสมการคาดการณ์ เมื่อ ปริมาณมวลรวมหยาบต่อมอร์ตาร์ มีค่าเท่ากับ 1 เป็นค่าความเร็วคลื่น อัลตราโซนิกของมวลรวมหยาบ โดยคำนวณหาความเร็วคลื่นใน ทราชมอน้ำมีค่าเท่ากับ 4935 m/s และแบไรต์ละเอียดมีค่าเท่ากับ 3263 m/s

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าอัตราส่วนในการคำนวณหาความเร็วคลื่นในมวลรวมละเอียด

Mix	P0.57	MN4	MN5	MN6	Sand
Vfa/Vm	0	0.414	0.353	0.278	1
UPV m/s	3,180	3,933	3,801	3,565	4,935
Mix	P0.57	MB4	MB5	MB6	Barite
Vfa/Vm	0	0.414	0.354	0.278	1
UPV m/s	3,180	3,243	3,184	3,160	3,263

Vfa/Vm = ปริมาณมวลรวมหยาบ ต่ออมอร์ตาร์



ภาพที่ 4.19 สมการในการคาดการณ์ความเร็วคลื่นในมวลรวมละเอียด

หลังจากได้ ความเร็วคลื่นในมวลรวมละเอียดแล้ว นำความเร็วที่ได้ไปใช้ในการคำนวณความเร็วคลื่นในมวลรวมหยาบ โดยใช้สมการที่ 2.4 นำมาปรับ เป็นสมการที่ 4.18 และจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาความเร็วคลื่นในมวลรวมหยาบ เป็นสมการที่ 4.19

$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_p}{V_c v_p} + \frac{V_{FA}}{V_c v_{FA}} + \frac{V_{CA}}{V_c v_{CA}} \quad (4.18)$$

$$\frac{1}{v_{CA}} = \left( \frac{1}{v_c} - \frac{V_p}{V_c v_p} + \frac{V_{FA}}{V_c v_{FA}} \right) \frac{V_c}{V_{CA}} \quad (4.19)$$

โดย  $V_C$  = ปริมาณในคอนกรีต  $v_C$  = ความเร็ว UPV ในคอนกรีต  
 $V_P$  = ปริมาณในซีเมนต์เพสต์  $v_P$  = ความเร็ว UPV ในซีเมนต์เพสต์  
 $V_{FA}$  = ปริมาณในมวลรวมละเอียด  $v_{FA}$  = ความเร็ว UPV ในมวลรวมละเอียด  
 $V_{CA}$  = ปริมาณในมวลรวมหยาบ  $v_{CA}$  = ความเร็ว UPV ในมวลรวมหยาบ

จากสมการที่ 4.19 คำนวณ ความเร็วคลื่นใน แบริต์หยาบ ได้เท่ากับ 3,566 m/s มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 165 m/s ความเร็วคลื่นในหินปูน ได้เท่ากับ 5,254 m/s มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 252 m/s

#### 4.5 การตรวจสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ด้วยรังสีแกมมา

สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ทำการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีอุปกรณ์ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.20 แสดงชุดอุปกรณ์การทดสอบรังสีแกมมา

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 แบ่งตามระดับพลังงาน ของรังสี โดยพบว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี แปรผันตามกับความหนาแน่นของคอนกรีต



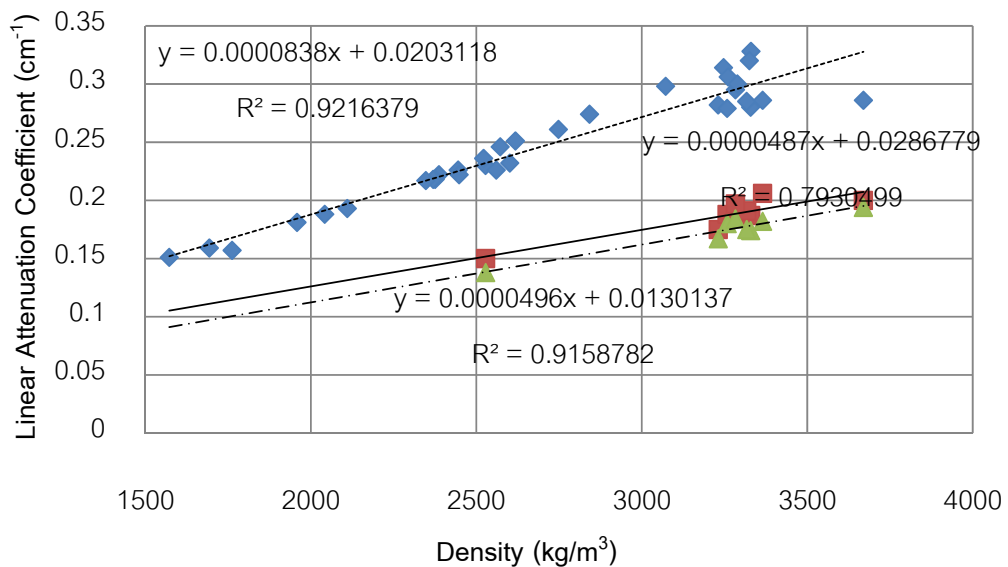
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น ( $\text{cm}^{-1}$ )

Mix	Cs-137	Co-60		
	0.622 MeV	1.173 MeV	1.332 MeV	1250 MeV *
B3	0.328	-	-	0.286
B4	0.28	0.183	0.172	0.181
B5	0.282	0.175	0.167	0.171
B6	0.285	0.191	0.175	0.183
B7	0.279	0.188	0.18	0.184
B8	0.295	0.197	0.184	0.190
B9	0.286	0.206	0.182	0.194
S1	0.286	0.2	0.194	0.144
N1	0.232	-	-	0.197
N2	0.226	-	-	
N3	0.226	-	-	
NF0	0.222	-	-	
NF1	0.222	-	-	
NF2	0.218	-	-	
NF3	0.218	-	-	
NF4	0.217	-	-	
BF1	0.314	-	-	
BF2	0.306	-	-	0.257
BF3	0.32	-	-	0.26
BF4	0.3	-	-	0.264
BO1	0.246	-	-	0.248
BO2	0.274	-	-	0.201
BO3	0.298	-	-	0.239
P0.5	0.157	-	-	0.123
P0.57	0.159	-	-	0.119
P0.65	0.151	-	-	0.116

MN4	0.193	-	-	0.147
MN5	0.188	-	-	0.145
MN6	0.181	-	-	0.138
MB4	0.261	-	-	0.211
MB5	0.251	-	-	0.185
MB6	0.236	-	-	0.171

1250 MeV \* ผลเฉลี่ยของพลังงาน 2 ระดับ คือ 1.173 และ 1.332 MeV

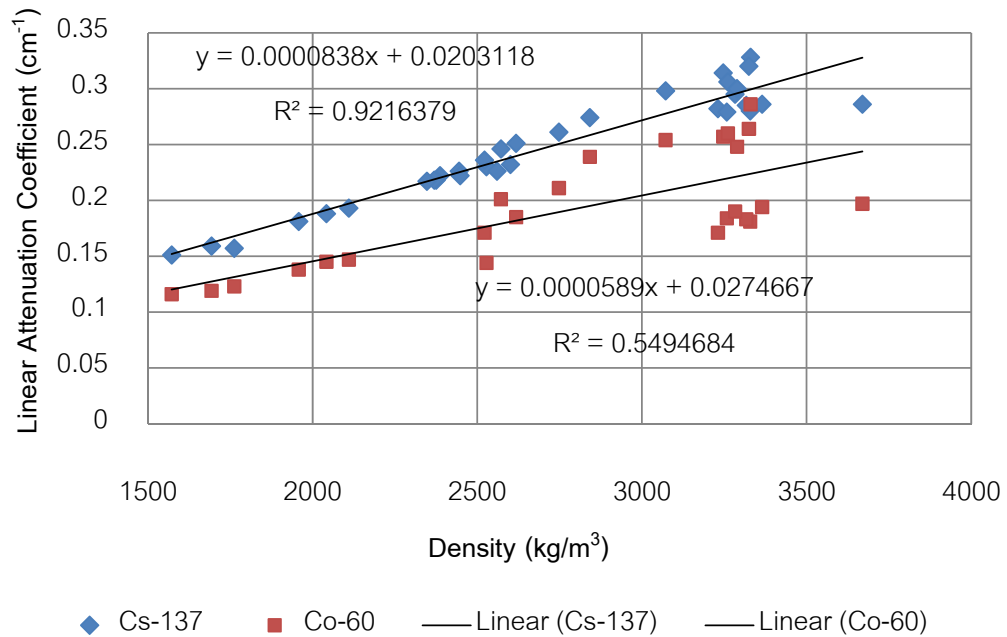
จากผลการทดสอบที่ได้ พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นชนิดเส้นตรงตามภาพที่ 4.14 และ 4.15 พิจารณา ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอนกรีตในตัวอย่าง จะพบว่า รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.622 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเท่ากับ  $0.0838 \text{ cm}^2/\text{g}$  รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.173 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเท่ากับ  $0.0487 \text{ cm}^2/\text{g}$  รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.332 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเท่ากับ  $0.0496 \text{ cm}^2/\text{g}$



◆ Cs-137                      ■ Co-60,1173                      ▲ Co-60,1332  
 ----- Linear (Cs-137)                      ——— Linear (Co-60,1173)                      - - - - Linear (Co-60,1332)

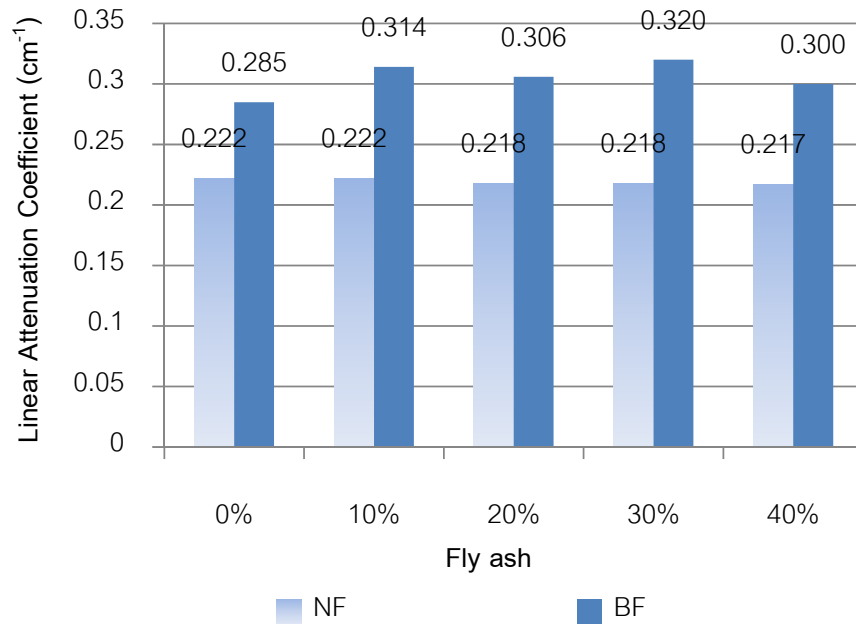
ภาพที่ 4.21 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี กับความหนาแน่นของคอนกรีตที่ระดับพลังงาน 0.622 MeV, 1.173 MeV และ 1.332 MeV

และรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.250 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเท่ากับ  $0.0589\text{cm}^2/\text{g}$



ภาพที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี กับความหนาแน่นของคอนกรีตที่ระดับพลังงาน 0.622 และ 1.250 MeV

ผลกระทบจากเถ้าลอยต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี พบว่าคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ส่วนคอนกรีตมวลหนัก มีความแปรปรวนของข้อมูลไม่อาจสรุปผลได้ โดยผลทั้งหมดสอดคล้องกับความหนาแน่น ในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.23 ผลของเถ้าลอยต่อ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีจาก Cs-137

#### 4.6 ผลการเปรียบเทียบ

จากผลของสัมประสิทธิ์ การลดทอนรังสี ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความหนาแน่น ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ที่แปรผกผัน กับความหนาแน่นของคอนกรีต จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ของ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีกับความเร็วคลื่นของคอนกรีตได้ เป็นภาพที่ 4.15 โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีมีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่สามารถอ้างอิงได้ โดยมีค่า เท่ากับ

$$\mu_{0.622MeV} = 572.87V_{in}^{-0.93} \quad (4.20)$$

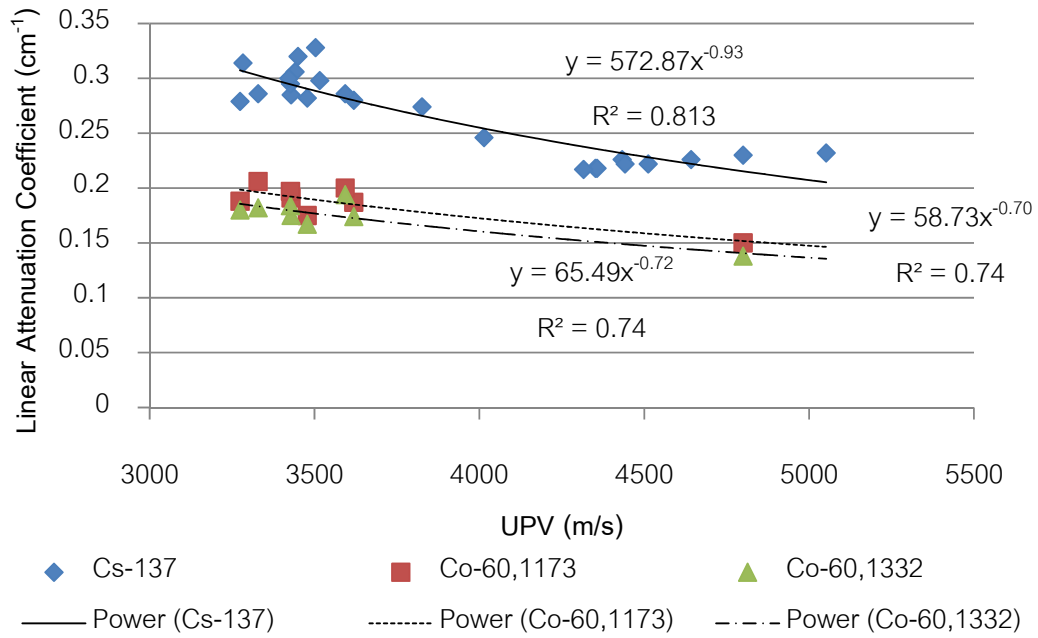
$$\mu_{1.173MeV} = 58.73V_{in}^{-0.7} \quad (4.21)$$

$$\mu_{1.332MeV} = 65.49V_{in}^{-0.72} \quad (4.22)$$

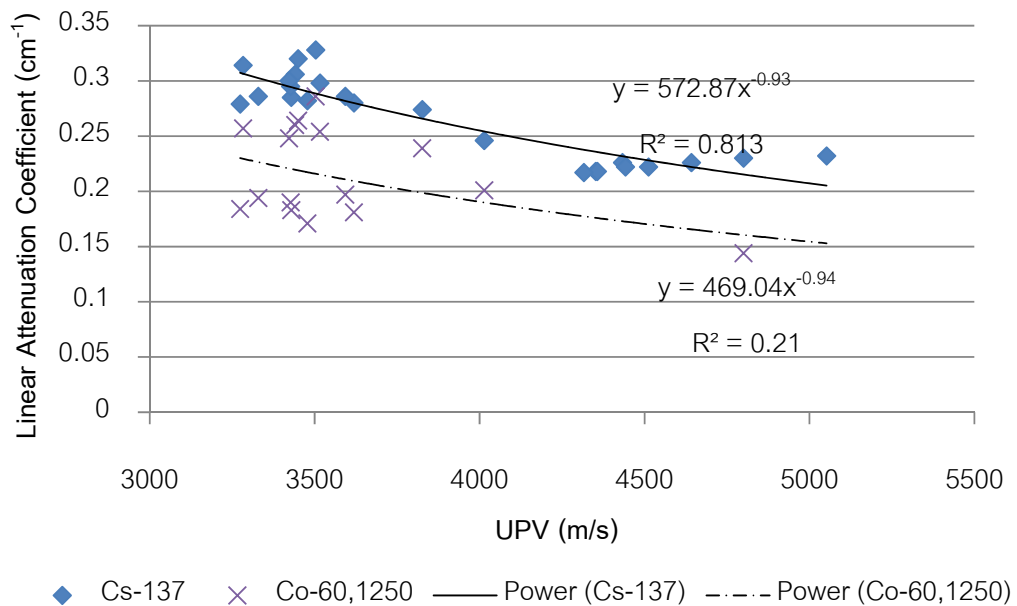
$$\mu_{1.250MeV} = 469.04V_{in}^{-0.94} \quad (4.23)$$

เมื่อ  $\mu$  = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี:  $\text{cm}^{-1}$

$V_{in}$  = ความเร็วคลื่น UPV ในคอนกรีต โดยวิธี indirect: m/s



ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีต ที่ระดับพลังงาน 0.622 MeV, 1.173 MeV และ 1.332 MeV



ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีต ที่ระดับพลังงาน 0.622 MeV และ 1.250 MeV

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากกระบวนการวิจัย ที่เสนอในบทที่ 3 และผลการวิจัยในบทที่ 4 นำมาสรุปผลการวิจัย ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ปริมาณแก๊สออกซิเจนในคอนกรีตมวลหนัก ไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด แต่ช่วยในด้านการไหลได้ดี โดยไม่มีผลต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต ด้วยวิธี in-direct

2. แบริต์ละเอียด ต้องการน้ำส่วนเกินในคอนกรีตมากกว่าทรายแม่น้ำ ในการสร้างสภาพการไหล ส่งผลให้ การใช้ แบริต์ละเอียดต้องใช้ น้ำในสัดส่วนผสมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ 0.57 สำหรับค่าการยุบตัวประมาณ 7.5 cm

3. สมการประเมินกำลังของคอนกรีตแตก ของผู้ผลิตที่ เป็นค่าต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าการประเมินที่ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างได้ทั้งหมด โดยให้ความปลอดภัยในการประเมินกำลังของคอนกรีต (conservative)

4. ความเร็วคลื่นมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของคอนกรีต เป็นไปตามสมการที่ 4.3

5. สมการในการประเมินกำลังโดยวิธี UPV ของคอนกรีตมวลหนักสามารถใช้ สมการที่ 4.17 และคอนกรีตปกติ เป็นสมการที่ 4.16 ในการประเมินกำลังได้

6. ความเร็วคลื่นใน มวลรวมสามารถนำไปใช้ในการประมาณการความเร็วคลื่นในคอนกรีต ที่รู้สัดส่วนผสมได้ รวมถึงประมาณการสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ของคอนกรีตนั้นๆ ได้อีกด้วย โดยความเร็วคลื่นใน แบริต์ละเอียด มีค่าเท่ากับ 3,263 m/s, ทรายแม่น้ำ เท่ากับ 4,935 m/s, แบริต์หยาบ เท่ากับ 3,566 m/s และ หินปูน เท่ากับ 5,253 m/s

7. สัมประสิทธิ์ การลดทอนรังสีแกมมา เป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น และสามารถประมาณการโดยใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ในสมการที่ 4.15 และ 4.16

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้ทำวิจัยขอ เสนอแนะแนวทางการปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติมต่อดังนี้

1. ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ จำกัดอยู่ที่ 350 kg/m<sup>3</sup> ทำให้ค่าที่ได้ยังไม่สามารถครอบคลุมทุกกลุ่มเป้าหมาย ในสภาพความเป็นจริงได้

2. การที่ต้องนำแร่ไป บดซ้ำ เพื่อให้ได้ขนาดละเอียด อาจก่อให้เกิดการร้าวขึ้นภายในมวลรวม เป็นเหตุให้เกิดการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัด เกิดความผิดพลาดได้

3. ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.65 เกิดสภาพการเยิ้ม (Bleeding) จำนวนมาก ควรจะมีการศึกษาปริมาณอัตราส่วน w/b ที่เหมาะสมในการใช้ผสมคอนกรีตมวลหนัก

## 5.3 การนำคอนกรีตมวลหนักไปใช้งาน

สำหรับการนำคอนกรีตมวลหนักไปใช้งานการป้องกันรังสีนั้น จำเป็นต้องทราบปริมาณและชนิดของแหล่งกำเนิดรังสี ก่อนที่จะนำไปใช้คำนวณปริมาณความหนาที่ต้องใช้ ดังนั้นในที่นี้ขอแสดงการคำนวณแบบคร่าวๆ ให้เห็นว่า การนำไปใช้ เป็นแนวทางไหนอย่างไร

5.3.1 กรณีที่ 1 แหล่งกำเนิดรังสีชนิด Cs-137 ต้องการการลดทอนลงครึ่งหนึ่ง ของปริมาณรังสีตั้งต้น

จากภาพที่ 4.21 คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเท่ากับ 0.0838 cm<sup>2</sup>/g สำหรับรังสีแกมมาจาก Cs-137 ดังนั้นใช้สมการที่ 2.3 ในการคำนวณหาค่าความหนาของคอนกรีต

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

จัดรูปสมการใหม่เป็นสมการที่ 5.1

$$x = -\frac{1}{\rho \left(\frac{\mu}{\rho}\right)} \ln \left[ \frac{I}{I_0} \right] \quad (5.1)$$

โดย  $I/I_0 = 1/2$   $\mu/\rho = 0.0838$

ดังนั้นแทนค่า ต่างๆลงในสมการที่ 5.1 จะได้เป็น สมการที่ 5.2

$$x = -\frac{1}{\rho(0.0838)} \ln\left[\frac{1}{2}\right] \quad (5.2)$$

ดังนั้น ถ้า ใช้ความหนาแน่นแตกต่างกัน จะได้ความหนาตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงความหนาของคอนกรีต ที่ต้องใช้ในการลดทอนรังสีจาก Cs-137 ลงครึ่งหนึ่ง

density (g/cm <sup>2</sup> )	Thickness for 1/2 (cm)
2.4	3.45
2.5	3.31
2.6	3.18
2.7	3.06
2.8	2.95
2.9	2.85
3.0	2.75
3.1	2.67
3.2	2.58
3.3	2.51
3.4	2.43
3.5	2.36
3.6	2.30

5.3.2 กรณีที่ 2 แหล่งกำเนิดรังสีชนิด Cs-137 กำหนดคอนกรีตมีความหนา 50 cm จากสมการที่ 2.3 จัดรูปสมการเพื่อหาค่าการลดทอนรังสี เป็นสมการที่ 5.3

$$I/I_0 = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad (5.3)$$

โดย  $x = 50$   $\mu/\rho = 0.0838$

แทนค่า ต่างๆลงในสมการที่ 5.3 จะได้เป็น สมการที่ 5.4

$$I/I_0 = e^{-(0.0838)(50\rho)} \quad (5.4)$$



ดังนั้น ถ้า ใช้ความหนาแน่นแตกต่างกัน จะได้ค่าการลดทอนดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าการลดทอนรังสี ที่คอนกรีตมีความหนา 50 cm

density g/cm <sup>2</sup>	Attenuation
2.4	1/23,295
2.5	1/35,419
2.6	1/53,852
2.7	1/81,879
2.8	1/124,492
2.9	1/189,283
3.0	1/287,794
3.1	1/437,574
3.2	1/665,304
3.3	1/1,011,556
3.4	1/1,538,010
3.5	1/2,338,453
3.6	1/3,555,478

ดังนั้น ถ้าต้องการลดทอนรังสีลง 1 ในล้านส่วน ( $1 \times 10^{-6}$ ) ต้องใช้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากกว่า  $3300 \text{ kg/m}^3$  ในการป้องกันรังสี (ที่ความหนา 50 cm )

## รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศ ราชบัณฑิตยสถาน. พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542, [ออนไลน์].แหล่งที่มา: <http://rirs3.royin.go.th/dictionary.asp> [2110, พฤศจิกายน 9]
- [2] ประมวลเพื่อสันติ,สำนักงาน. การป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ 1.
- [3] วิวัฒน์ พฤษะวัน และชาย ชีวะเกตุ. ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์, สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน 28 (2547)
- [4] A.S. Makarious, I. I. Bashter, A. EL-Sayed Abdo, M. Samir Abdel Azim and W. A. Kanzouh. On The Utilization of Heavy Concrete for Radiation Shielding. Ann. Nucl. Energy. 23, 3 (1996) : 195-206.
- [5] I. Akkurt , C. Basyigit , S. Kilincarslan, B. Mavi , A. Akkurt. Radiation shielding of concrete containing different aggregates. Cement & Concrete Composites 28 (2006): 153-157.
- [6] Ilker Bekir Topcu. Properties of heavyweight concrete produced with barite. Cement and Concrete Research 33 (2003): 815-822.
- [7] รพ.วิภาวดี, การป้องกันอันตรายจากรังสี, [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.vibhavadi.com/web/health\\_detail.php?id=183](http://www.vibhavadi.com/web/health_detail.php?id=183) [2110, พฤศจิกายน 11]
- [8] มยผ 1502-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ (Rebound Hammer), (2008)
- [9] ACI 228.2R-98 (Reapproved 2004) Nondestructive Test Method for Evaluation of Concrete in Structure (2004)
- [10] Yiching Lin ,Shin-Fang Kuo,Chiamen Hsiao, and Chao-Peng Lai. Investigation of Pulse Velocity-Strength Relationship of Hardened Concrete. ACI Materials Journal (July-August 2007): 344-350.

- [11] Yiching Lin, Chao-Peng Lai, and Tsong Yen. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete. ACI Materials Journal (January-February 2003): 21-28.
- [12] Basic Physics of Nuclear Medicine/Attenuation of Gamma-Rays, [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:[http://en.wikibooks.org/wiki/Basic\\_Physics\\_of\\_Nuclear\\_Medicine/Attenuation\\_of\\_Gamma-Rays](http://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine/Attenuation_of_Gamma-Rays) [2010, พฤศจิกายน 25]
- [13] Assoc.Prof Somyot Srisatit. Radiation Protection: Radiological Safety Documents and Assignments part2.
- [14] ACI 304R.3R-96 Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing (1996)
- [15] F. Bouzarjomehri, T. Bayat, M.H. Dashti R, J.Ghisari, N.Abdoli.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray attenuation coefficient of barite concrete. Iran. J. Radiat. Res., 4,2 (Autumn 2006) :71-75.
- [16] ดนุพล ตันนโยภาส, วิชัย นกแก้ว และชิตพล เขียวดปาน. คุณลักษณะของคอนกรีตกำบังรังสีแกมม่าผสมมวลรวมแบไรต์และหินเพอร์ไรท์ดิบบด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 6 (2008): 97-102.
- [17] ดนุพล ตันนโยภาส และวิชัย นกแก้ว. การกำบังรังสีของคอนกรีตมวลรวมแบไรต์ผสมสเมกไทต์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 7 (2009): 27-32.
- [18] ดนุพล ตันนโยภาส และวัชระ ชำวีชา. อิทธิพลของเถ้าแกลบมีต่อกำลังและกำบังรังสีของมอร์ตาร์มวลรวมซีเมนต์-ซิลิกาในดี. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ 15 (2010):.
- [19] P. Kumar Mehta. High-performance, High-Volume fly ash concrete for sustainable development.
- [20] R. Demirboga, I. Turkmen, M. B. Karakoc. Relationship between Ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. Cement and Concrete Research 34 (2004): 2329-2336.

- [21] The SilverSchmidt Reference Curve, [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.proceq.com/site/downloads/silverschmidt.html> [2012, มีนาคม 20]
- [22] Alan Williams. Civil & Structural Engineering: seismic design of building & bridges. Chicago: Kaplan AEC Education, 2007
- [23] Tarun R. Naik, V. Mohan Malhotra and John S. Popovics. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, p(8-1) – (8-17)
- [24] Karim W. Nasser and Akthem A. Al-Manaseer. Comparison of Nondestructive Tester of Hardened Concrete. ACI Materials Journal (September-October 1987): 374-380.
- [25] Ismail Ozgur Yaman, Gokhan Inci, Nazli Yesiller, and Haluk M.Aktan. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. ACI Materials Journal (November-December 2001) : 450-457.
- [26] ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (2004)
- [27] ASTM C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (1997)
- [28] ASTM C29 Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate (2009)
- [29] มยผ 1504-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย. วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity), (2008)
- [30] ASTM C39-03 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2003)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

### อันตรกิริยาของรังสีแกมมา[2]

1) Photoelectric effect เกิดเมื่อรังสีแกมมาชนกับอะตอมตัวกลาง รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาด้วยพลังงานจลน์

2) Compton scattering เกิดเมื่อรังสีแกมมาชนกับอะตอมตัวกลาง รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาด้วยพลังงานจลน์ พร้อมกับรังสีแกมมา

3) Pair production เกิดจากรังสีแกมมาพลังงานสูง เคลื่อนที่เข้าไปในนิวเคลียส แล้วแปลงสภาพจากพลังงานไปเป็นมวล โดยแปลงเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน แล้วถ้ามีพลังงานเหลือก็จะเคลื่อนที่ออกจากกันเป็น โฟตอน 2 ตัว แต่ละตัวมีพลังงานเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของรังสีแกมมาตั้งต้น

ระดับรังสีที่ยอมรับได้ สำหรับผู้ประกอบการวิชาชีพ และประชาชนทั่วไป จาก International Commission on Radiological Protection (ICRP) [2] ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับรังสีที่ยอมรับได้สำหรับผู้ประกอบการวิชาชีพ และประชาชนทั่วไป

	Occupational Dose Limit	Public Dose Limit
Effective dose	20 mSv. Per year, averaged over defined periods of 5 years	1 mSv. per year
Annual equivalent dose in:		
The lens of the eye	150 mSv.	15 mSv.
The skin	500 mSv.	50 mSv.
The hands and feet	500 mSv.	No recommendation
Pregnant Women	2 mSv.	No recommendation

### หน่วยวัดระดับรังสี [2]

พลังงาน-อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volts, eV) เป็นระดับพลังงานของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ช้ามความต่างศักย์ 1 โวลต์ โดย

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ภาคผนวก ข



ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์ Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) แสดงค่าดังตาราง ข-1

**ตารางที่ ข-1** องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ แบบไรต์ และเถ้าลอย

Chemical composition (%)	Cement Portland	Fine Barite	Fly Ash
Calcium Oxide (CaO)	65.6	-	11.84
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.69	7.29	41.68
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	4.01	27.54	2.83
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.98	3.94	13.24
Aluminum Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.6	0.72	24.2
Magnesium Oxide (MgO)	1.38	-	2.23
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	0.47	0.15	2.58
Manganese Dioxide (MnO <sub>2</sub> )	0.08	0.16	-
Zinc Oxide (ZnO)	0.05	0.05	-
Strontium oxide (SrO)	0.04	1.04	-
Copper oxide (CuO)	0.04	0.05	-
Chlorine (Cl)	0.04	-	-
Barium oxide (BaO)	0.02	58.99	-
Zirconium dioxide (ZrO <sub>2</sub> )	0.01	-	-
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	-	-	0.74
Arsenic trioxide (As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	0.07	-
Loss on ignition (LOI)	-	-	0.38

### ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ผลการตรวจวัดการลดทอนรังสีแกมมา : เวลาการตรวจวัด 120 วินาทีต่อชิ้นตัวอย่าง

Mix		Thickness (cm)	total Thickness (cm)	0.605 MeV	1.173 MeV	1.332 MeV
B3	lo	0.00	0.00	545233	155782	
	B3-1	1.95	1.95	321107	101639	
	B3-2	2.36	4.30	163924	57137	
	B3-3	2.22	6.52	80557	31871	
	B3-4	2.24	8.76	37089	15436	
	B3-5	2.26	11.02	13967	6415	
B4	lo	0.00	0.00	846802	29711	27262
	B4-1	2.06	2.06	473285	19312	18632
	B4-2	2.15	4.21	262047	13100	13147
	B4-3	2.16	6.37	144587	8897	9274
	B4-4	2.18	8.55	80719	5661	6208
	B4-5	2.26	10.81	39868	3965	4042
B5	lo	0.00	0.00	543537	26804	26081
	B5-1	2.15	2.15	310684	18168	18264
	B5-2	2.20	4.35	173554	11902	12319
	B5-3	2.20	6.55	89323	8450	8818
	B5-4	2.15	8.70	49014	6123	6204
	B5-5	2.13	10.83	25985	3875	4222
B6	lo	0.00	0.00	542152	29130	27752
	B6-1	2.16	2.16	307283	19795	18617
	B6-2	2.12	4.28	172473	13057	13137
	B6-3	2.13	6.41	97374	8775	9511
	B6-4	2.20	8.61	46640	5417	6012
	B6-5	2.00	10.61	27012	3984	4289
B7	lo	0.00	0.00	325567	28876	27709

	B7-1	2.18	2.18	183337	19504	18499
	B7-2	2.17	4.44	99938	13018	12855
	B7-3	2.25	6.69	50732	8150	7665
	B7-4	2.26	8.86	26699	5400	5649
	B7-5	2.18	11.01	15734	3750	3858
B8	lo	0.00	0.00	326685	28765	27153
	B8-1	2.05	2.05	190248	18312	18431
	B8-2	2.16	4.21	102547	12032	12501
	B8-3	2.17	6.38	55008	8019	8021
	B8-4	2.26	8.64	27231	5281	5434
	B8-5	2.22	10.86	13269	3277	3716
B9	lo	0.00	0.00	327812	29135	26678
	B9-1	2.13	2.13	177015	18622	18253
	B9-2	2.15	4.28	99025	12431	12545
	B9-3	2.22	6.50	52402	8031	8288
	B9-4	2.21	8.71	28629	4995	5683
	B9-5	2.22	10.93	13920	2973	3605
S1	lo	0.00	0.00	326367	28674	28674
	S1-1	2.20	2.20	177262	18699	17753
	S1-2	2.12	4.32	92309	11658	11811
	S1-3	2.12	6.44	53349	7758	7680
	S1-4	2.13	8.57	27509	5062	5318
	S1-5	2.26	10.83	14981	3337	3440
BF1	lo	0.00	0.00	545557	153382	
	BF1-1	1.92	1.92	336503	108786	
	BF1-2	1.82	3.74	205708	70253	
	BF1-3	2.16	5.89	102158	44833	

	BF1-4	2.08	7.97	47334	22933		
	BF1-5	2.30	10.26	22857	10970		
<hr/>							
BF2	lo	0.00	0.00	543520	154098		
	BF2-1	1.94	1.94	322698	103900		
	BF2-2	2.07	4.01	192588	69422		
	BF2-3	2.00	6.01	101752	40790		
	BF2-4	2.13	8.14	46900	20858		
	BF2-5	1.91	10.05	25680	11385		
<hr/>							
BF3	lo	0.00	0.00	544306	156537		
	BF3-1	2.19	2.19	298212	100819		
	BF3-2	2.06	4.25	172191	64551		
	BF3-3	1.95	6.20	92946	40290		
	BF3-4	2.29	8.49	41570	19819		
	BF3-5	2.17	10.66	17639	9190		
<hr/>							
BF4	lo	0.00	0.00	544306	151318		
	BF4-1	1.98	1.98	327384	106979		
	BF4-2	1.75	3.73	208895	71871		
	BF4-3	2.38	6.11	105463	38774		
	BF4-4	2.32	8.43	48154	21065		
	BF4-5	2.25	10.67	22217	11088		
<hr/>							
N1	lo	0.00	0.00	627979	-	-	
	N1-1	1.70	1.70	419657	-	-	
	N1-2	1.95	3.65	296309	-	-	
	N1-3	1.90	5.55	194667	-	-	
	N1-4	1.70	7.25	125806	-	-	
	N1-5	2.15	9.40	67416	-	-	
<hr/>							
N2	lo	0.00	0.00	628132	-	-	

	N2-1	2.00	2.00	419012	-	-
	N2-2	1.74	3.74	292396	-	-
	N2-3	1.83	5.57	196349	-	-
	N2-4	1.78	7.35	130171	-	-
	N2-5	2.06	9.41	73292	-	-
N3	lo	0.00	0.00	625177	-	-
	N3-1	1.70	1.70	448374	-	-
	N3-2	2.10	3.80	287257	-	-
	N3-3	1.85	5.65	194985	-	-
	N3-4	1.70	7.35	129042	-	-
	N3-5	2.15	9.50	71351	-	-
NF0	lo	0.00	0.00	626014	-	-
	NF0-1	1.80	1.80	439338	-	-
	NF0-2	1.80	3.60	298414	-	-
	NF0-3	1.80	5.40	207012	-	-
	NF0-4	1.95	7.35	130575	-	-
	NF0-5	2.10	9.45	76001	-	-
NF1	lo	0.00	0.00	617101	-	-
	NF1-1	1.75	1.75	437454	-	-
	NF1-2	1.70	3.45	300998	-	-
	NF1-3	2.00	5.45	199540	-	-
	NF1-4	1.75	7.20	135240	-	-
	NF1-5	2.15	9.35	75857	-	-
NF2	lo	0.00	0.00	618631	-	-
	NF2-1	1.90	1.90	422854	-	-
	NF2-2	1.80	3.70	290141	-	-
	NF2-3	1.95	5.65	195507	-	-

	NF2-4	1.96	7.61	123670	-	-
	NF2-5	1.80	9.41	78323	-	-
NF3	lo	0.00	0.00	619624	-	-
	NF3-1	1.90	1.90	425257	-	-
	NF3-2	1.70	3.60	297966	-	-
	NF3-3	1.95	5.55	201599	-	-
	NF3-4	1.90	7.45	128609	-	-
	NF3-5	2.00	9.45	77670	-	-
NF4	lo	0.00	0.00	615850	-	-
	NF4-1	2.00	2.00	402860	-	-
	NF4-2	1.90	3.90	283896	-	-
	NF4-3	1.85	5.75	198630	-	-
	NF4-4	1.90	7.65	125242	-	-
	NF4-5	1.75	9.40	76598	-	-
BO1	lo	0.00	0.00	269748	153636	
	BO1-1	2.10	2.10	172925	106723	
	BO1-2	1.76	3.86	116302	78685	
	BO1-3	2.00	5.86	74876	51180	
	BO1-4	2.02	7.88	44179	34510	
	BO1-5	1.91	9.79	23252	21105	
BO2	lo	0.00	0.00	270000	150285	
	BO2-1	2.02	2.02	162981	101168	
	BO2-2	1.83	3.84	101085	65614	
	BO2-3	2.08	5.92	56801	41529	
	BO2-4	1.79	7.70	34308	26219	
	BO2-5	1.69	9.39	20656	15546	
BO3	lo	0.00	0.00	271813	152454	

	BO3-1	1.94	1.94	169053	105800
	BO3-2	1.76	3.70	104084	71838
	BO3-3	2.13	5.83	57819	43409
	BO3-4	1.89	7.72	30605	24697
	BO3-5	1.99	9.71	14810	12771
<hr/>					
P0.5	lo	0.00	0.00	273073	155279
	P0.5-1	1.98	1.98	204812	124842
	P0.5-2	2.03	4.01	148193	100085
	P0.5-3	2.28	6.29	105901	74283
	P0.5-4	2.09	8.38	76131	58230
	P0.5-5	2.25	10.63	50965	41733
<hr/>					
P0.57	lo	0.00	0.00	274157	153042
	P0.57-1	2.22	2.22	198741	120042
	P0.57-2	2.11	4.33	142414	95130
	P0.57-3	2.05	6.37	104087	71427
	P0.57-4	2.20	8.57	73005	56581
	P0.57-5	2.11	10.68	49645	43233
<hr/>					
P0.65	lo	0.00	0.00	274157	155562
	P0.65-1	2.29	2.29	198220	119473
	P0.65-2	2.07	4.35	145539	95438
	P0.65-3	1.98	6.33	110792	75317
	P0.65-4	2.26	8.59	78425	58492
	P0.65-5	2.40	10.99	51641	43177
<hr/>					
MN4	lo	0.00	0.00	271546	155204
	MN4-1	2.30	2.30	179510	118666
	MN4-2	2.07	4.37	121405	85817
	MN4-3	2.01	6.38	82258	63922



	MN4-4	2.05	8.43	56326	46213
	MN4-5	2.18	10.61	34452	33323
MN5	lo	0.00	0.00	269769	151836
	MN5-1	2.37	2.37	180025	115289
	MN5-2	1.96	4.32	128206	88395
	MN5-3	2.24	6.56	80765	63443
	MN5-4	2.11	8.67	57198	45673
	MN5-5	2.25	10.92	33950	31642
MN6	lo	0.00	0.00	275117	154278
	MN6-1	2.14	2.14	193644	120580
	MN6-2	2.31	4.45	125876	85481
	MN6-3	2.05	6.50	87645	63793
	MN6-4	1.98	8.48	62672	50833
	MN6-5	1.92	10.39	41377	36415
MB4	lo	0.00	0.00	271475	152417
	MB4-1	2.36	2.36	157255	100182
	MB4-2	1.98	4.33	99707	69888
	MB4-3	2.21	6.54	56095	41705
	MB4-4	2.06	8.59	30825	28628
	MB4-5	1.95	10.54	17315	16023
MB5	lo	0.00	0.00	270528	157556
	MB5-1	2.10	2.10	173815	113236
	MB5-2	2.09	4.18	108858	80789
	MB5-3	2.21	6.39	61967	55638
	MB5-4	2.00	8.39	36053	34988
	MB5-5	2.21	10.60	18995	22191
MB6	lo	0.00	0.00	269409	156427

MB6-1	2.04	2.04	178926	117254
MB6-2	2.11	4.15	112712	80564
MB6-3	2.17	6.32	68318	56155
MB6-4	2.23	8.55	39998	38741
MB6-5	2.00	10.55	21807	25787

---

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง เกิดวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ.2527 มีภูมิลำเนาอยู่ที่เขตคลองเตย จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสายน้ำทิพย์ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเทพศิรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548

ทำงานเป็นวิศวกรโครงสร้าง ใน บ.Architectural Engineering 49 Limited ทำหน้าที่วิเคราะห์ออกแบบงานโครงสร้าง งานบ้าน อาคาร ตึกสูง ตั้งแต่ปี 2549 ถึงปี 2552

เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 จบจนปัจจุบัน