

## การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

วิเชียร ชาลี<sup>1\*</sup> และ ธีรพงศ์ เชื้อพล<sup>2</sup>  
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาเทียบกับคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 (ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล) ท่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบความแน่นของคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุคอนกรีต 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบกับผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเล 10 ปี ผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีแนวโน้มลดลง และมีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ส่วนความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุ 90 วันมีแนวโน้มสูงขึ้นและเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ อายุของคอนกรีตที่นานขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าคอนกรีตธรรมดา การศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกได้

**คำสำคัญ :** คลื่นอัลตราโซนิก / ความคงทน / การแทรกซึมของคลอไรด์ / สิ่งแวดล้อมทะเล / เถ้าถ่านหิน

\* Corresponding author: E-mail: wichian@buu.ac.th

<sup>1\*</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

## Evaluation of Chloride Penetration in Fly Ash Concrete under Marine Environment by Ultrasonic Wave

Wichian Chalee<sup>1\*</sup> and Theerapong Chuapob<sup>2</sup>

Burapha University, Muang, Chonburi, 20131

### Abstract

This research, the ultrasonic wave was utilized for evaluation of chloride penetration of normal and fly ash concrete under marine environment. Fly ash concretes were cast by using fly ash from Mea Moh power plant to partially replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) were varied at 0.45, 0.55, and 0.65. (the same mix proportions of concrete exposed to marine site). The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for ultrasonic test at 28 and 90 days of curing. The concrete dense by ultrasonic test was used to compare with chloride diffusion coefficient of concrete at 10-year exposure in marine site. The results show that the ultrasonic wave velocity in 28 day concrete decrease with the increase of fly ash replacement of Portland cement type I, which is opposite trend with chloride diffusion coefficient. In the other hand, by 90 days results, the increase of fly ash resulted in increase in ultrasonic wave velocity which is consistent with chloride diffusion coefficient. In addition, the increase of curing age result in the increase of ultrasonic wave velocity which is more effective on increasing ultrasonic wave velocity in fly ash concrete than in normal concrete. The ultrasonic test developed in this study can be efficiently used to predict the chloride diffusion coefficient of normal concrete and concrete containing fly ash of 15, 25, 35 and 50 by weight of binder.

**Keywords :** Chloride penetration / Durability / Fly ash / Marine environment / Ultrasonic wave

---

\* Corresponding author: E-mail: [wichian@buu.ac.th](mailto:wichian@buu.ac.th).

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรือโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งจะประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรง ที่เป็นผลมาจากแรงกระแทกของคลื่นกวัดทวาย ความแปรปรวนของน้ำทะเล ความชื้น อุณหภูมิน้ำขึ้น-ลง ตลอดจนเกลือคลอไรด์และซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำทะเล มีผลทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเกิดสนิม คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวเสียหายอย่างรุนแรง [1-4] การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทนเพื่อใช้ในสภาพที่มีผลกระทบจากทะเล จำเป็นต้องทราบถึงอัตรา การแทรกซึมของคลอไรด์ที่เกิดจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติ ที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสอยู่เพื่อจะได้วิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่การศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลานานมาก ตลอดจนต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลค่อนข้างสูง

มาตรฐาน ASTM C597 หรือ BS 1881 Part203 [5, 6] ได้กำหนดรายละเอียดการทดสอบกำลังของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) โดยวิธีนี้เป็นการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse) โดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิมซึ่งความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางคอนกรีตขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต โดยที่คอนกรีตมีความแน่นสูง ความพรุนต่ำ คลื่นจะสามารถเดินทางผ่านคอนกรีตได้เร็วสามารถประเมินได้ว่าคอนกรีตจะรับแรงเชิงกลได้สูง อย่างไรก็ตามกรณีของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินกลับพบว่าการใช้เถาถ่านหินผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้นความพรุนน้อยลงเนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน และการอุดช่องว่างของอนุภาคเถาถ่านหิน แต่กลับพบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าต่ำลง [7-9] ซึ่งไม่สามารถใช้หลักการของคลื่นอัลตราโซนิกในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ได้ชัดเจนเหมือนคอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตาม

ก็ตามความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่แปรผันตรงกับ ความแน่นของคอนกรีตน่าจะเป็นประโยชน์ในการประเมินความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีทั้งในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน เนื่องจากความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าในคอนกรีตขึ้นกับความแน่นและความทึบน้ำในคอนกรีตเป็นหลัก [10,11] ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้เปรียบเทียบผลการทดสอบความแน่นของเนื้อคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยมุ่งเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลายซึ่งสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วเชื่อมโยงกับค่าที่ได้จากการทดสอบที่ให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกต้อง เพื่อเป็นฐานข้อมูลประกอบการประเมินสมบัติด้านความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลต่อไป

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถาถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นวัสดุประสานซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 [12] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนักสำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะมีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นเถาถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [12] โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้ มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	21.52	36.02
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	20.58
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.51	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	0.10	0.69
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	0.24	1.69
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	2.11	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.07

## 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างทดสอบใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับกลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 10 ปี ซึ่งได้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานของ ACI 211.1-91 [13] และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35

และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 อัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบความแน่นของคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยการยิงคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

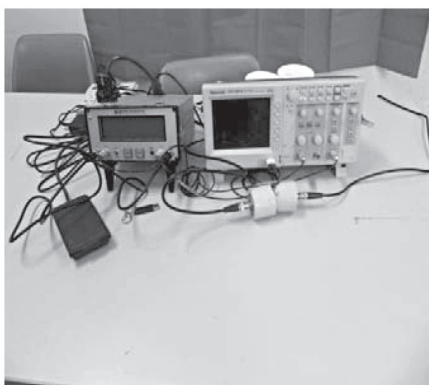
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. <sup>3</sup> )				
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	หิน	น้ำ
0.45	0	478	0	639	1024	215
	15	406	72	639	1004	215
	25	359	119	639	990	215
	35	311	167	639	977	215
	50	239	239	639	957	215
0.55	0	478	0	639	971	262
	15	406	72	639	948	262
	25	359	119	639	933	262
	35	311	167	639	918	262
	50	239	239	639	897	262
0.65	0	478	0	639	922	311
	15	406	72	639	898	311
	25	359	119	639	881	311
	35	311	167	639	864	311
	50	239	239	639	840	311

### 2.3 การทดสอบ

ความแน่นของคอนกรีตทดสอบโดยการยิงคลื่นอัลตราโซนิก (รูปที่ 1) ผ่านตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่อายุบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบแสดงในรูปของความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแน่นของคอนกรีต นอกจากนั้นได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.<sup>3</sup> ที่แช่ในน้ำทะเลเป็น

เวลา 10 ปีมาเจาะตรงบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. และตัดแท่งคอนกรีตที่เจาะตามขวางให้มีความหนา 10 มม. บดตัวอย่างที่ได้จากการตัดแต่ละชิ้นให้ละเอียดเพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 [14] คำนวณสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ( $D_c$ ) หลังแช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของพิคส์ตามรายละเอียดที่แสดงในการศึกษาที่ผ่านมา [15]



ก) เครื่องทดสอบอัลตราโซนิก



ข) ยิงคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต

รูปที่ 1 การทดสอบหาความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต

## 3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

### 3.1 ผลของเถ้านหินต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

ผลทดสอบความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับ พบว่าปริมาณเถ้านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เช่น ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่เป็นคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 เท่ากับ 7052, 6578, 6915, 6764 และ 6535 เมตร/วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า

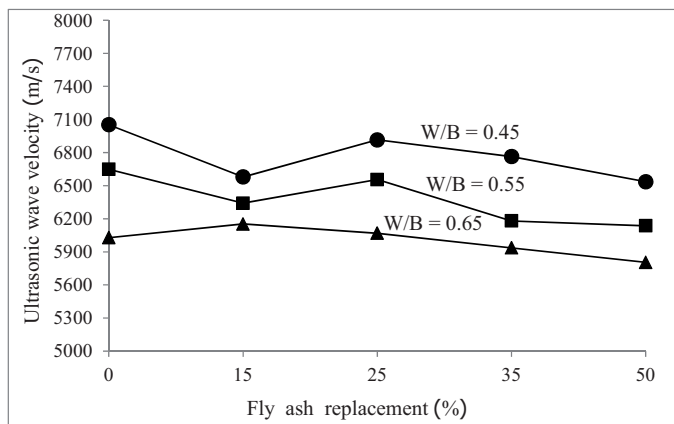
ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินยังไม่สมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน จึงส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในปริมาณสูงซึ่งมีความแน่นลดลง และจากขนาดอนุภาคของเถ้านหินที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์จึงมีผลให้ความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่า ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้านหินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วันค่อนข้างชัดเจน ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้านหินมีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2 ข) เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่เป็นคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ

15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตอายุ 90 วันเท่ากับ 7111, 6864, 7015, 7072 และ 6901 เมตร/วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในเม็ดถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น [16] โดยส่งผลให้คลื่นอัลตราโซนิกสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ พบว่าที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินเกือบทุกส่วนผสมมีแนวโน้มของความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเม็ดถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานใน

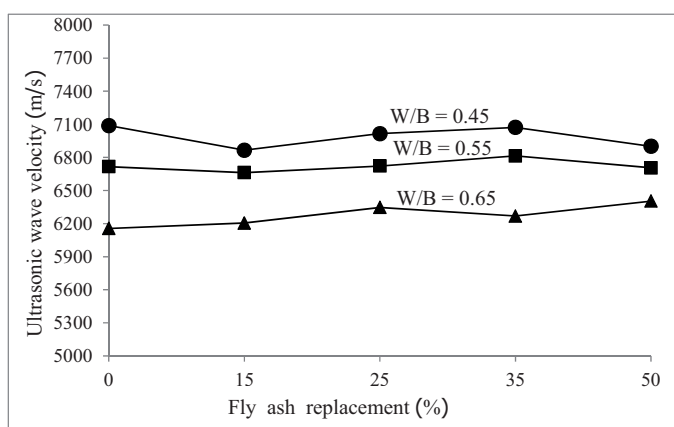
คอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินที่มีอายุถึง 90 วัน ยังไม่สามารถส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นได้เท่ากับคอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตาม ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินที่อายุ 90 วัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีแนวโน้มที่ปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินจะส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นในระยะยาว ซึ่งอาจจะสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเม็ดถ่านหิน เนื่องจากผลการศึกษาที่ผ่านมา [17] พบว่า คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้นมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่ออายุมากขึ้นถึง 1 ปี ซึ่งน่าจะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินมีความแน่นเพิ่มขึ้นด้วย

**ตารางที่ 3** ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ร้อยละการแทนที่เม็ดถ่านหิน	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c \times 10^6 \text{มม.}^2/\text{วินาที}$ )	ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต ( $V, 10^3 \text{เมตร/วินาที}$ )	
			28 วัน	90 วัน
W/B=0.45	0	3.65	7052	7111
	15	1.55	6578	6864
	25	1.25	6915	7015
	35	0.95	6764	7072
	50	0.5	6535	6901
W/B=0.55	0	6.08	6648	6716
	15	2.34	6341	6661
	25	1.56	6555	6721
	35	1.23	6181	6813
	50	0.65	6136	6705
W/B=0.65	0	7.33	6028	6155
	15	2.55	6153	6204
	25	2.07	6068	6346
	35	1.75	5936	6268
	50	1.22	5804	6404



ก) อายุคอนกรีต 28 วัน



ข) อายุคอนกรีต 90 วัน

รูปที่ 2 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต

พิจารณาคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มของความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตกลุ่มนี้มีความแน่นสูงสุด อาจเป็นเพราะสัดส่วนผสมของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่เหมาะสมที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้พอดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7,18] ที่พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เถ้าร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดค่อนข้างสูงและการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตมีค่าต่ำลงเมื่ออายุคอนกรีตสูงถึง 90 วัน

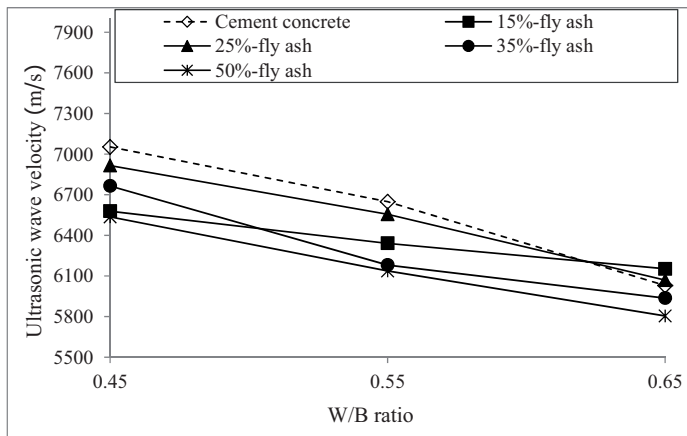
### 3.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลชัดเจนให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น โดยพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงมีผลต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น การลดลงของ W/B จาก 0.65 เป็น 0.45 ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1024

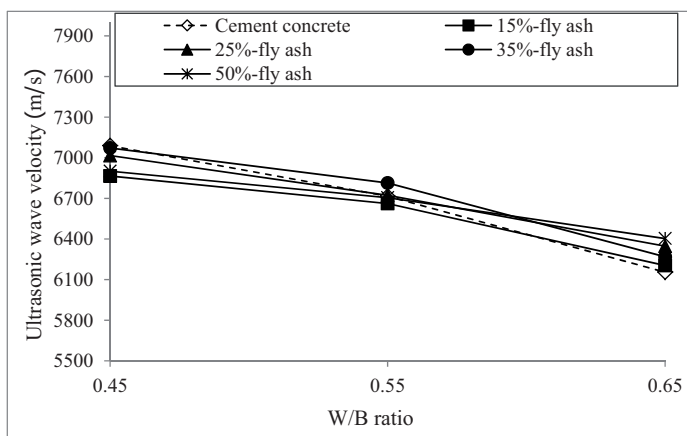


เมตร/วินาที (โดยเพิ่มจากความเร็ว 6028 เมตร/วินาที ที่ W/B เท่ากับ 0.65 เป็น 7052 เมตร/วินาที ที่ W/B เท่ากับ 0.45) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การลดลงของ W/B ดังกล่าว ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 425, 847, 827 และ 731 เมตร/วินาที ตามลำดับ การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดาตามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน อาจเป็นผลจากความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่ได้ขึ้นกับ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินด้วย [15, 19] ซึ่งเถ้าถ่านหินที่มีลักษณะอนุภาคกลมตันและมีองค์ประกอบออกไซด์ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตดีขึ้น ส่วนความแน่นของคอนกรีตธรรมดาจะขึ้นกับปริมาณน้ำที่ผสมในคอนกรีตเป็นหลัก โดยปริมาณน้ำในคอนกรีตที่สูงขึ้นจะมีผลให้คอนกรีตมีความพรุนสูง จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตมีความเร็วลดลงอย่างชัดเจน



ก) อายุคอนกรีต 28 วัน



ข) อายุคอนกรีต 90 วัน

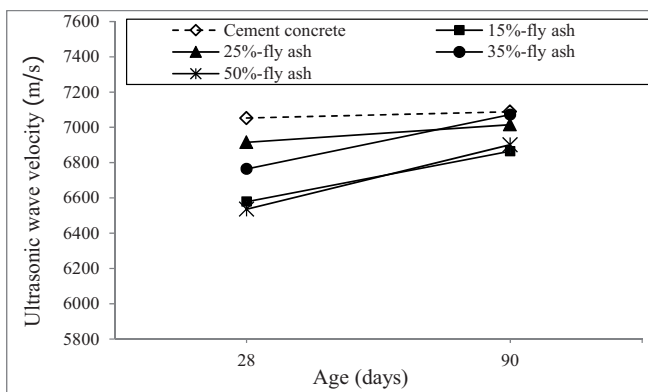
รูปที่ 3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต



### 3.3 ผลของอายุของคอนกรีตต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

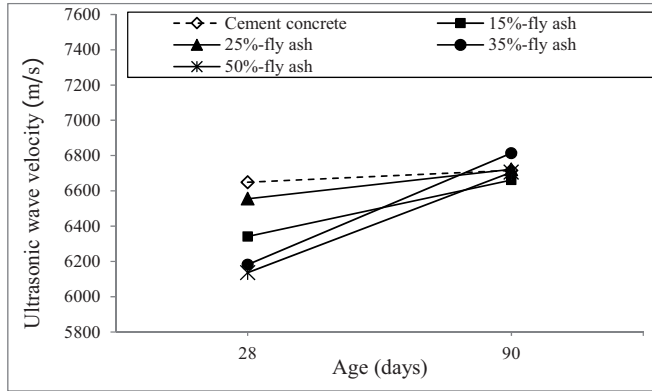
พิจารณาผลของอายุของคอนกรีตต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) พบว่า ช่วงอายุคอนกรีต 28 ถึง 90 วัน ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตมีค่าสูงชันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 รูปที่ 4(ข) และ 0.65 รูปที่ 4(ค) โดยการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มชัดเจนกว่าคอนกรีตธรรมดา เช่น คอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 มีอายุเพิ่มจาก 28 วัน เป็น 90 วัน ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 59 เมตร/วินาที (โดยเพิ่มจากความเร็ว 7052 เมตร/วินาที ที่อายุ 28 วัน เป็น 7111 เมตร/วินาที ที่อายุ 90 วัน) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ W/B เดียวกันนี้ มีความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตจากอายุ 28 วัน เป็น 90 วัน เพิ่มขึ้นเท่ากับ 286, 100, 308

และ 366 เมตร/วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ยังไม่ส่งผลชัดเจนต่อความแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แต่ส่งผลชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้นเป็น 90 วัน โดยความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินระยะยาวเกิดจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างวัสดุปอซโซลานกับด่างในคอนกรีตและการหลุดตัวของกายภาพในช่องว่างคอนกรีต [20, 21] ทำให้คอนกรีตความแน่นมากขึ้นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจึงเพิ่มจากอายุ 28 ถึง 90 วันค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตในช่วงอายุ 28 ถึง 90 วันค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อายุ 28 วันค่อนข้างเกิดขึ้นสมบูรณ์และส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นอยู่แล้ว (สังเกตจากความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกค่อนข้างสูงที่ 28 วัน)

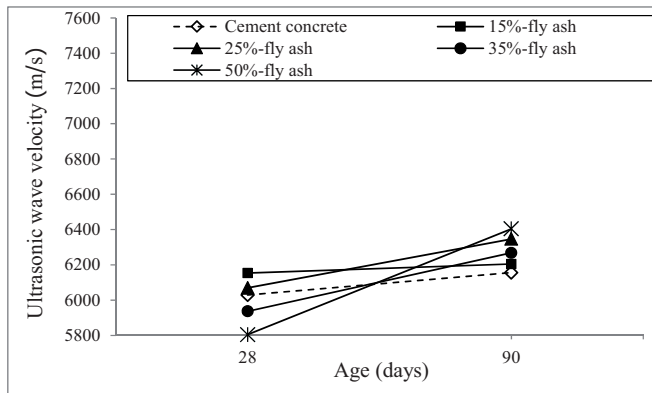


ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

รูปที่ 4 ผลของอายุของคอนกรีตต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

รูปที่ 4 (ต่อ) ผลของอายุของคอนกรีตต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีต

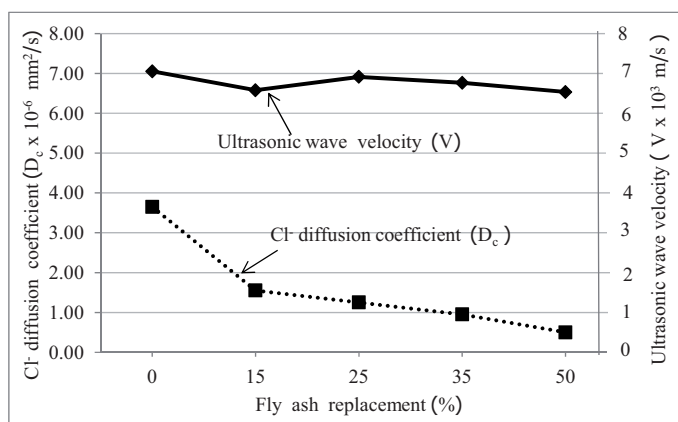
**3.4 ผลของเถ้านหินต่อสมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์และความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีต**

พิจารณาความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่อายุ 28 วัน เทียบกับสมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ดังรูปที่ 5(ก), 5(ข) และ 5(ค) ตามลำดับ พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความแน่นของคอนกรีตที่วัดจากความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคมีทิศทางตรงข้ามกับสมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์ กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินใน

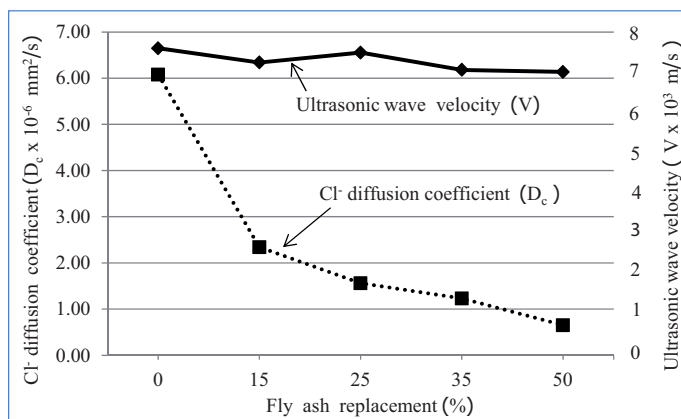
ปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความแน่นของคอนกรีตน้อยลง ขณะที่สมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าต่ำลงอย่างชัดเจน (ความแน่นของคอนกรีตสูงขึ้น) การที่ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีทิศทางตรงข้ามกับสมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี แสดงถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตโดยจะส่งผลเสียต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะสั้น (ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคต่ำลงความพรุนมากขึ้น) และให้ผลดีเมื่ออายุมากขึ้น (เทียบน้ำหนักขึ้นสมบัติการแทรกซึม

คลอไรด์ต่ำลง) ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ปฏิกริยาปอซโซลานในระยะยาวมีผลทำให้คอนกรีตมีความแน่นและลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ได้อย่างชัดเจน ส่วนผลทดสอบความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 6) พบว่าความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีทิศทางสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี โดยการใช้เถ้าถ่านหิน

ในคอนกรีตปริมาณที่สูง ความแน่นของคอนกรีตที่วัดจากความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มมากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีแนวโน้มลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ได้

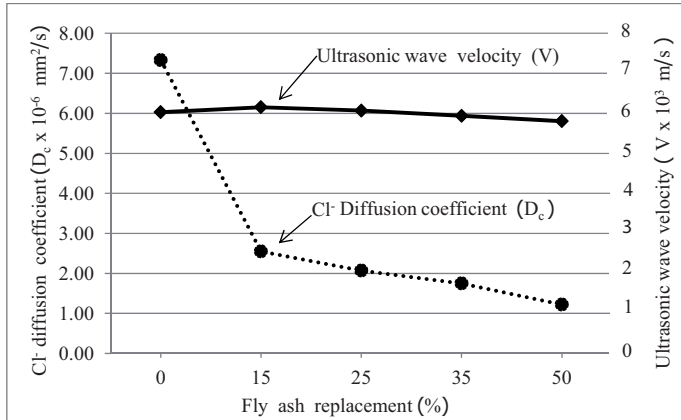


ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



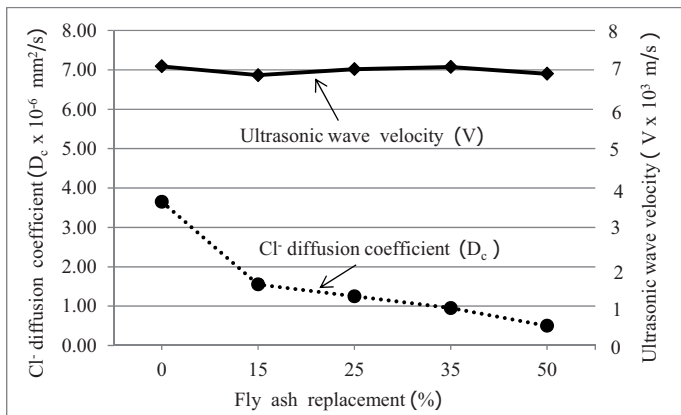
ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

**รูปที่ 5** ความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตอายุ 28 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี



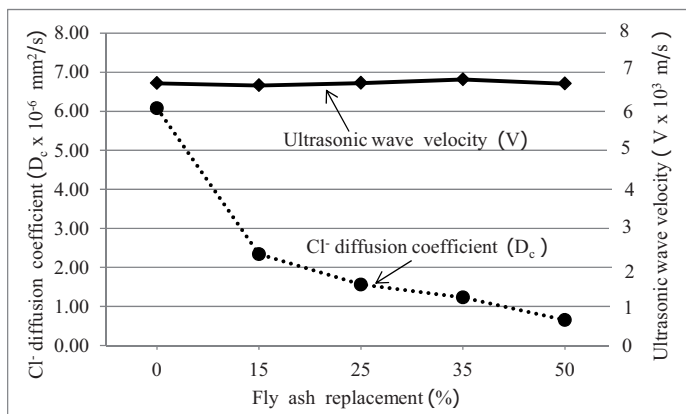
ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

**รูปที่ 5 (ต่อ)** ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตอายุ 28 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี

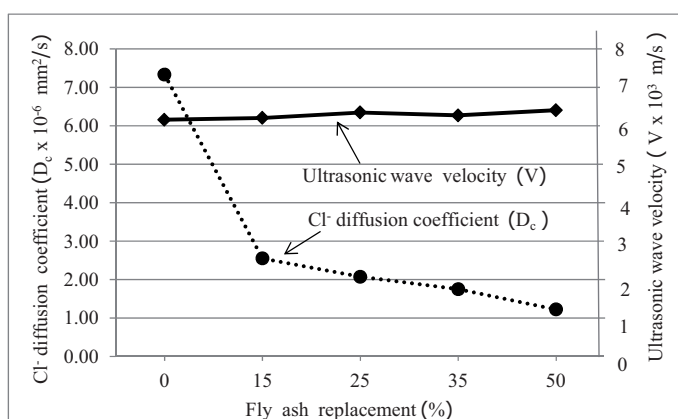


ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

**รูปที่ 6** ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตอายุ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

**รูปที่ 6 (ต่อ)** ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตอายุ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี

### 3.5 การประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาวจากผลการทดสอบความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

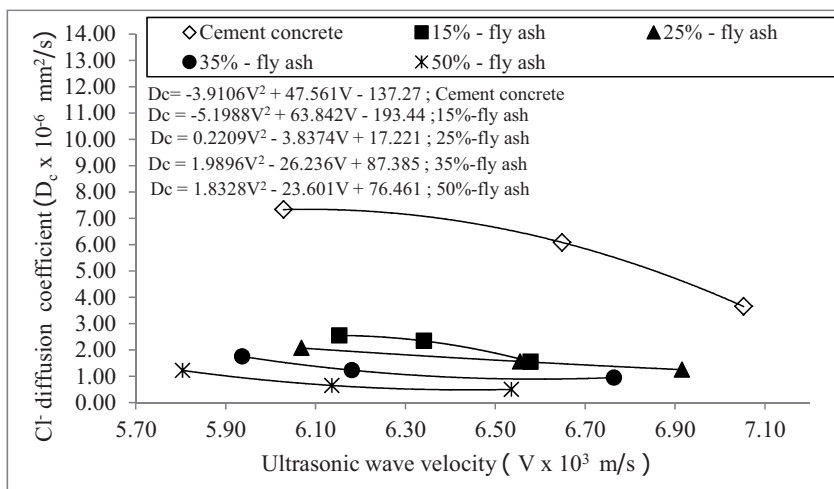
พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี กับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีกำลังอัด 3 ระดับ ( $W/B = 0.45, 0.55$  และ  $0.65$ ) ที่อายุคอนกรีต 28

และ 90 วัน ดังรูปที่ 7(ก) และ 7(ข) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตสูงขึ้น มีผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง เนื่องจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่สูงขึ้น แสดงถึงเนื้อคอนกรีตที่แน่นขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่มีค่าลดลง โดยการเพิ่มความเร็วจลื่นอัลตราโซนิกมีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับ

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน) และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน การเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต ที่มีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน น่าจะเป็นผลจากปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาที่เป็นปัจจัยหลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต และส่งผลต่อความแน่นของคอนกรีตอย่างชัดเจน [16, 17] โดยปริมาณน้ำที่ลดลง (W/B ลดจาก 0.65 เป็น 0.45) ส่งผลให้ความแน่นของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกสูงขึ้น และสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวที่ลดลงอย่างชัดเจนด้วย ส่วนความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในช่วงอายุคอนกรีต 90 วัน หลังหล่อตัวอย่างทดสอบ เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานควบคู่กันไป [16, 17] โดยอายุช่วงต้นของคอนกรีตจะเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ซึ่งปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่ลดลงยังคงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น และส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกสูงขึ้น แต่หลังจากนั้นความแน่นของคอนกรีตจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

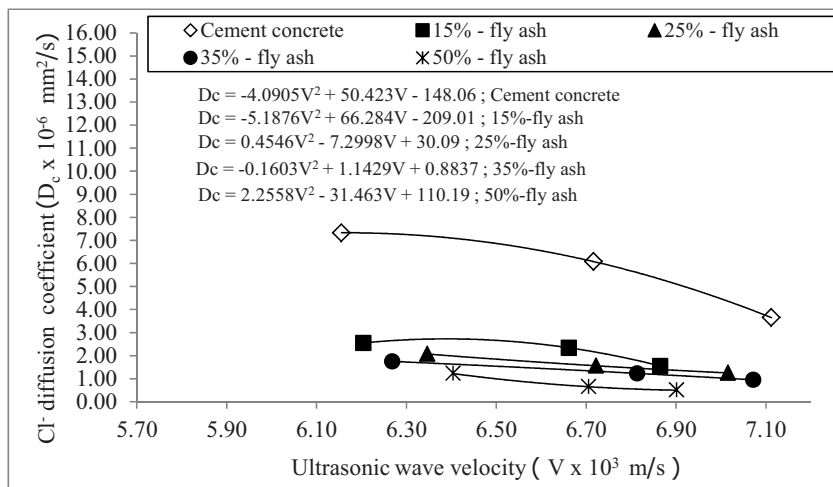
เป็นหลัก ที่ทำให้โพรงในคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น โดยความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาวไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินด้วย ดังนั้นการลดลงของปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน จึงไม่มีผลชัดเจนต่อการเพิ่มขึ้นของความแน่นในคอนกรีตกลุ่มนี้ในระยะยาวมากนักจึงส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน มีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลาจนถึง 10 ปีไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุ 28 และ 90 วัน ในคอนกรีตกลุ่มนี้ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว

การศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลระยะยาว จากความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่ทดสอบในช่วงต้นของอายุคอนกรีตได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุ 28 และ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี (รูปที่ 7)



ก) อายุคอนกรีต 28 วัน

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี กับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต



ข) อายุคอนกรีต 90 วัน

รูปที่ 7 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี กับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต

โดยใช้หลักการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้  
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ( $V_{28}$ ) กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c$ ) ดังสมการที่ (1) ถึง (5)

$$D_c = 3.911 (V_{28}^2) + 47.561 (V_{28}) - 137.27$$

(คอนกรีตธรรมดา) (1)

$$D_c = 5.199 (V_{28}^2) + 63.862 (V_{28}) - 193.44$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15) (2)

$$D_c = 0.221 (V_{28}^2) + 3.837 (V_{28}) - 17.221$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25) (3)

$$D_c = 1.990 (V_{28}^2) + 26.236 (V_{28}) - 87.385$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35) (4)

$$D_c = 1.833 (V_{28}^2) + 23.601 (V_{28}) - 76.461$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50) (5)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ( $V_{90}$ ) กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c$ ) ดังสมการที่ (6) ถึง (10)

$$D_c = -4.091 (V_{90}^2) + 50.423 (V_{90}) - 148.06$$

(คอนกรีตธรรมดา) (6)

$$D_c = -5.188 (V_{90}^2) + 66.284 (V_{90}) - 209.01$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15) (7)

$$D_c = 0.454 (V_{90}^2) - 7.300 (V_{90}) + 30.09$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25) (8)

$$D_c = -0.160 (V_{90}^2) + 1.143 (V_{90}) + 0.884$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35) (9)

$$D_c = 2.256 (V_{90}^2) - 31.463 (V_{90}) + 110.19$$

(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50) (10)



เมื่อ  $D_c$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์  
ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี ( $\times 10^{-6}$  มม.<sup>2</sup>/วินาที)

$V_{28} V_{90}$  = ความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิคใน  
คอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ( $\times 10^3$  เมตร/  
วินาที)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิค  
ที่อายุ 28 และ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ  
คลอไรด์ที่แช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ช่างค้น  
ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุนามในข้อมูลที่มี  
มีการแปรเปลี่ยนความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิคและ  
สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ 3 ค่า ความ  
สัมพันธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น ในการประเมิน  
สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะ  
ยาว จากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยการวัดความเร็ว  
ของคลิ่นอัลตราโซนิคในคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีต  
ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก  
วัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง  
0.45 ถึง 0.65 ได้

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1) การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลิ่น  
อัลตราโซนิคในคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีแนวโน้มลดลง แต่  
มีแนวโน้มสูงขึ้นที่อายุ 90 วัน

2) คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ  
มีความเร็วของคลิ่นอัลตราโซนิคสูงกว่าคอนกรีตที่มี  
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยเห็นผลได้ชัดเจนใน  
คอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

3) อายุของคอนกรีตที่นานขึ้นส่งผลให้ความเร็วของ  
คลิ่นอัลตราโซนิคในคอนกรีตสูงขึ้นโดยชัดเจน ในคอนกรีต  
ที่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

4) ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมิน  
สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา  
และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ  
50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 หลังจากแช่น้ำทะเล

เป็นเวลา 10 ปีจากผลการทดสอบความเร็วของคลิ่นอัลตรา  
โซนิคในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนุอดหนุนการวิจัยงบประมาณ  
เงินรับฝาก (เงินงบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัย  
บูรพา โครงการส่งเสริมการวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาและ  
การพัฒนามหาวิทยาลัย สำนักงานคณะกรรมการการ  
อุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 (HERP)

#### 6. เอกสารอ้างอิง

1. Chalee, W., and Jaturapitakkul, C., 2011, "Chloride binding capacity of concrete containing rice husk bark ash under marine environment" , *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 34 No. 2, pp. 245-255 (In Thai).
2. Charoenprom, K., and Chalee, W., 2011, "Chloride penetration depth in concrete under marine exposure", *The Journal of KMUTNB*, Vol. 21 No.3, pp. 257-266 (In Thai).
3. Chalee, W., and Jaturapitakkul, C., 2011, "Threshold chloride content of fly ash concrete under marine environment", *The Journal of Industrial Technology*, Vol. 7 No.1, pp. 21-28 (In Thai).
4. Chalee, W., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C., 2010, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis." *Mater Design*, Vol. 31 No.1, pp. 1242-1249.
5. ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 2006.
6. BS 1881-203. Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.
7. Chalee, W., Teekavanit M., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C., 2007, "Effect of seawater on compressive strength, chloride penetration and corrosion of steel in fly ash concrete for

- 4-year exposure in marine environment”, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 30 No. 1, pp. 153-166 (In Thai).
8. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste”, *Cem Concr Compos*, Vol. 27 No.1, pp. 425-428.
9. Rukzon, S., and Chindaprasirt, P., 2009, “Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash”, *Inter J Minera Metallu Mater*, Vol. 16 No. 1, pp. 475-481.
10. Ramezaniapour, AA., and Malhotra, VM., 1995, “Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-Ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume”, *Cem Concr Comp*, Vol. 17 No.1, pp. 125-133.
11. Chindaprasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, HT., and Sirivivatnanon, V., 2007, “Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete”, *Constr Build Mater*, Vol. 21 No.1, pp. 356-361.
12. ASTM C618-03. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 2003.
13. ACI 211.1-91. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Detroit, 2002.
14. ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01 1999.
15. Chalee, W., and Jaturapitakkul, C., 2009, “Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment,” *Mater Struct*, Vol. 42 No.1, pp. 505-514.
16. Neville, A.M., 1996, “Properties of Concrete”, 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley
17. Chindaprasirt, P., and Jaturapitakkul, C., 2008, “Cement, Pozzolan and Concrete”, 5<sup>th</sup> ed, *Thailand Concrete Association*, pp. 11-13, and pp. 238-240 (In Thai).
18. Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanachu, P., 2012, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 16-22.
19. Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C., 2007, “Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment”, *Constr Build Mater*, Vol. 21 No.1, pp. 965-971.
20. Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2005, “Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar,” *Cem Concr Res*, Vol. 35 No.1, pp. 1145-1151.
21. Jidrada, P., Chatveera, B., and Makul, N., 2012, “Effect of combined coal-biomass ash on the chloride penetration resistance of mortar cement: A case study of different anthracite, bituminous, rice husk and eucalyptus ash exposed to synthetic seawater,” *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 35 No.4, pp. 468-499 (In Thai).

