ผลของเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และเส้นใยสังเคราะห์ ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต

Effect of Fly Ash, Bottom Ash and Macro Synthetic Fiber on Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ[1] และ สนธยา ทองอรุณศรี[2,*]

[1,2] สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก จ.ตาก

E-mail address: Chalattunyakij@rmutl.ac.th, Sontaya@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก (E_d) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ โดยใช้เถ้าก้นเตาในรูปแบบการเป็นวัสดุบ่มภายใน ใช้วิธีทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) และนำไปคำนวณค่า E_d ของคอนกรีต วัสดุประสานที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ในส่วนผสมเท่ากับ 2 และ 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการศึกษา พบว่า E_d ที่ประเมินจาก UPV มีค่าสูงกว่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ประมาณร้อยละ 13-39 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่า E_c และ E_d ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา มีค่า E_c และ E_d น้อยกว่าคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง E_c และ E_d มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ UPV มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

คำสำคัญ: โมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก, ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก, เถ้าลอย, เถ้าก้นเตา, เส้นใยสังเคราะห์

Abstract

This research was aimed to study the dynamic elastic modulus (E_d) of cement-only concrete, fly ash concrete, bottom ash concrete and synthetic fiber concrete. The bottom ash was used as an internal curing material. Non-destructive testing by ultrasonic pulse velocity test (UPV) was used to determine the ultrasonic pulse velocity and to calculate E_d of concrete. The Ordinary Portland cement was used in this study as binder and the water to binder ratio was 0.55. In this study, the weight percentages of replacement of cement by fly ash were 0, 30 and 50%. The volume percentages of replacement of fine aggregate by the bottom ash were 10 and 30%. The content of synthetic fibers were 2 and 4 kilograms per cubic meter. The results showed that the E_d determined with the UPV method higher than the elastic modulus (E_c) about

การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยวิธีการตามมาตรฐานและหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด อย่างไรก็ตามการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต มีข้อเสียหลายประการ เช่น ตำแหน่งทดสอบค่อนข้างจำกัด สร้างความเสียหายแก่องค์อาคาร เกิดมลภาวะในขณะทำการทดสอบ และค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก ยิ่งไปกว่านั้นกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นยังมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง [5] ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Test, NDT) เพื่อใช้ประเมินคุณภาพของคอนกรีตในระหว่างก่อสร้างหรือแม้กระทั่งในระหว่างการใช้โครงสร้างอาคาร เนื่องจาก NDT เป็นวิธีทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อย รวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการกำหนดจุดทดสอบ และมีค่าใช้จ่ายไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบทำลาย สามารถประเมินสมบัติของคอนกรีตตามอายุที่เปลี่ยนแปลงไปได้ [6,7]

การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity Test, UPV) เป็น NDT วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก (Dynamic Elastic Modulus, E_d) โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) [8] อย่างไรก็ตามโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกที่ประเมินได้จากวิธีนี้มีค่าแตกต่างจากโมดูลัสยืดหยุ่นที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469 ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว สำหรับใช้วิธี UPV ประเมินค่า E_d แล้วนำไปคำนวณหาค่า E_c ต่อไป [1,5,9-12]

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก, E_d คือ โมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก, μ คือ อัตราส่วนปัวซองไดนามิก, ρ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีต

จากสมการที่ (1) พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต งานวิจัยของ Mehta และ Monteiro [10] พบว่า E_d มีค่าสูงกว่า E_c ประมาณร้อยละ 20 30 และ 40 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง กลาง และต่ำ ตามลำดับ ปัจจุบันเทคโนโลยีคอนกรีตมีการพัฒนาให้ใช้งานหลากหลายรูปแบบมากขึ้น โดยใช้วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้นและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญ วัสดุผสมเพิ่มที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) จึงมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีต จนปัจจุบันวิศวกรมีองค์ความรู้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย และเลือกใช้ให้เหมาะกับโครงสร้างหรือสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้มวลรวมเบาที่มีความพรุนในรูปของวัสดุบ่มภายใน (Internal Curing) เพื่อลดปัญหาด้านการบ่มคอนกรีต ในประเทศไทยมีวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายในได้แก่ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูง จึงกักเก็บน้ำได้ดี อีกทั้งเถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีปริมาณมาก เถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด จึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปของวัสดุบ่มภายใน [13-16] แต่ยังมีการศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตน้อยมาก

นอกจากนี้ปัจจุบันยังเริ่มมีการใช้คอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Concrete) ประเภทต่าง ๆ ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งเพื่อเพิ่มกำลังดึงของคอนกรีต ลดการแตกร้าว เพิ่มความต้านทานต่อการรับแรงกระแทกและการสึกกร่อน [17] หรือแม้แต่การใช้เส้นใยเพื่อลดการใช้เหล็กเสริมได้บางส่วน เมื่อคอนกรีตผสมด้วยวัสดุผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นและสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีตแตกต่างกันไป ส่งผลต่อกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในประเทศไทยมีการใช้วัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีตอย่างหลากหลาย แต่ข้อมูลของคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่ไม่มีการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ ทำให้เมื่อเกิดปัญหากับโครงสร้าง เช่น โครงสร้างเกิดความเสียหาย เกิดเพลิงไหม้ หรือต้องการทราบเสถียรภาพ ความมั่นคงของโครงสร้างที่ก่อสร้างไปแล้ว จึงมักไม่ทราบส่วนผสมหรือกำลังอัดที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจประเมินสมบัติด้านกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย การทราบผลกระทบของวัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติของคอนกรีต จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการตรวจประเมินโครงสร้างให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber) ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต โดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก เปรียบเทียบกับโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่คำนวณจากสมการจากมาตรฐานการออกแบบและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต เพื่อให้ผู้สนใจสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.12 และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.27

2.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ประกอบด้วย มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด สมบัติทางกายภาพของมวลรวม แสดงในตารางที่ 1 มวลรวมหยาบที่ใช้ ได้แก่ หินปูนจาก จ.ตาก มีขนาดโตสุดของหิน 19 มิลลิเมตร มวลรวมละเอียดได้แก่ ทรายจากแม่น้ำปิง จ.ตาก และเถ้าก้นเตา จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ดังรูปที่ 1 เถ้าก้นเตาที่ใช้มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำ (Water Retainability, WR) เท่ากับ 25.69 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาในงานวิจัยนี้ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [18] เถ้าก้นเตาที่ใช้จะนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกักเก็บน้ำที่ทดสอบไว้ ดังตารางที่ 1 แล้วเก็บในภาชนะที่

มิดชิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของเถ้าก้นเตา ก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

2.3 เส้นใยสังเคราะห์

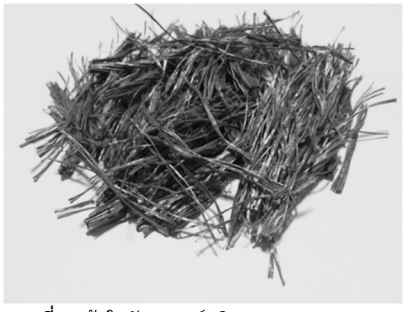
เส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Macro Synthetic ผลิตโดยบริษัทฟอร์ต้า ข้อมูลการทดสอบเส้นใยจากผู้ผลิตคือมีความถ่วงจำเพาะ 0.91 ยาว 38 มิลลิเมตร กำลังดึง 570-660 MPa ลักษณะดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวม

Physical Composition	Sand	Bottom ash	Limestone
Specific Gravity	2.57	1.64	2.69
Water Absorption (%)	0.88	-	0.66
Water Retainability (%)	-	25.69	-
Fineness Modulus	2.99	-	7.40
Unit Weight (kg/m^3)	1,648	711	1,533



รูปที่ 1 เถ้าก้นเตา



รูปที่ 2 เส้นใยสังเคราะห์ชนิด Macro Synthetic

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งสิ้น 7 ส่วนผสม รายละเอียดดังตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ใช้เส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณ 2 และ 4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์มาตรฐาน ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร เพื่อนำไปทดสอบความหนาแน่น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทดสอบตัวอย่างสัดส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย เมื่อผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 2 จะทดสอบค่าการยุบตัวก่อนนำคอนกรีตเทลงในแบบ ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 6 วัน และนำไปบ่มในอากาศ (Air Curing) ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 28 ±1 °C ความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 50±5 เป็นระยะเวลาอีก 21 วัน ดังรูปที่ 3 ดังนั้นคอนกรีตที่นำไปทดสอบจึงมีอายุ 28 วัน

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

No.	Mix proportion	Fly ash (%)	Bottom ash (%)	Synthetic fiber (kg/m^3)
1	W55	0	-	-
2	W55FA30	30	-	-
3	W55FA50	50	-	-
4	W55BA10	-	10	-
5	W55BA30	-	30	-
6	W55F2	-	-	2
7	W55F4	-	-	4



ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำ 6 วัน



ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในห้องควบคุม 21 วัน

รูปที่ 3 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัย

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน นำไปหาความหนาแน่นและทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก ตามมาตรฐาน ASTM C597 [8] เครื่องมือที่ใช้เป็นยี่ห้อ Proceq รุ่น Pundit PL-200 หัวส่งสัญญาณมีความถี่ 54 กิโลเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4 นำตัวอย่างด้านข้างที่ผิวเรียบมาทำเครื่องหมายระบุตำแหน่งทดสอบที่กึ่งกลางตัวอย่าง ทั้ง 2 ด้าน โดยแต่ละตำแหน่งต้องอยู่ตรงกันกับตำแหน่งที่อยู่ด้านตรงกันข้าม เพื่อให้ตัวส่งสัญญาณ (Receiving Transducer) และตัวรับสัญญาณ (Transmitting Transducer) อยู่ในรูปแบบการวัดแบบตรง (Direct Method) ทาตัวส่งและตัวรับสัญญาณด้วยวัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) นำตัวส่งและตัวรับสัญญาณประกบเข้ากับพื้นผิวที่จะทดสอบ หลังจากนั้นให้บันทึกค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านเนื้อคอนกรีต ทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตทั้ง 5 ตัวอย่าง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดประลัยด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 4 ชุดทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

3.3.2 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต

การประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย มีหลายวิธี เช่น การทดสอบด้วยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ตามมาตรฐาน ASTM C597 และการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์ (Resonance Frequency Test) ตามมาตรฐาน ASTM C215-14 [19] ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จะเรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก (Dynamic Elastic Modulus, E_d) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 (Static Elastic Modulus, E_c) ประมาณร้อยละ 20-40 [1,10] ข้อดีของการทดสอบด้วยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ที่เหนือกว่าการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์ คือการทดสอบด้วยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก จะไม่มีผลกระทบจากรูปร่างของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ [20] และการทดสอบสามารถดำเนินการในโครงสร้างจริงได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การทดสอบด้วยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในการหาค่า E_d แล้วนำค่า E_d ที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_d กับ E_c ต่อไป

การหาค่า E_d จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น อัตราส่วนปัวซองไดนามิก ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต ดังสมการที่ (2) อนึ่งในการศึกษาครั้งนี้สมมติฐานให้อัตราส่วนปัวซองไดนามิก (μ) มีค่าเท่ากับ 0.20 ซึ่งเป็นค่าสำหรับคอนกรีตที่ใช้โดยทั่วไป [5,21]

$$E_d = \rho\left(\frac{V}{1000}\right)^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (2)$$

เมื่อ E_d คือ โมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก (MPa), ρ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m^3), V คือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s), μ คือ อัตราส่วนปัวซองไดนามิก

3.3.3 *การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต*

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต สามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 อย่างไรก็ตาม ยังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับโมดูลัสยืดหยุ่น ที่มีการนำเสนอในมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ และมักนิยมใช้ในกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการหรือในขั้นตอนการออกแบบ นอกจากนี้การตรวจประเมินอาคารที่ก่อสร้างไปแล้ว หรือโครงสร้างที่ได้รับความเสียหาย จำเป็นต้องประเมินกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต อาจทำให้อาคารเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นและไม่ปลอดภัย อีกทั้งส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างมักมีสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกัน [5] ดังนั้นการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับโมดูลัสยืดหยุ่น ในการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลาย สมการที่ (3) เป็นสมการที่นำเสนอโดย ACI 318 Committee [3] ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า 38 MPa

$$E_c = 0.043 f_c^{0.5} \rho^{1.5} \quad (3)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa), f_c คือ กำลังอัด (MPa), ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

สมการที่ (4) เป็นสมการที่นำเสนอโดย ACI 363 Committee [20] ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 21 MPa ถึง 83 MPa

$$E_c = (3320 f_c^{0.5} + 6900)(\rho/2300)^{1.5} \quad (4)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa), f_c คือ กำลังอัด (MPa), ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

สมการที่ (5) เป็นสมการที่นำเสนอโดย มาตรฐาน CEB-FIP และ Eurocode 2 [4] ใช้สำหรับคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง

$$E_c = 22{,}000(f_c/10)^{1/3} \rho^{1.5} \quad (5)$$

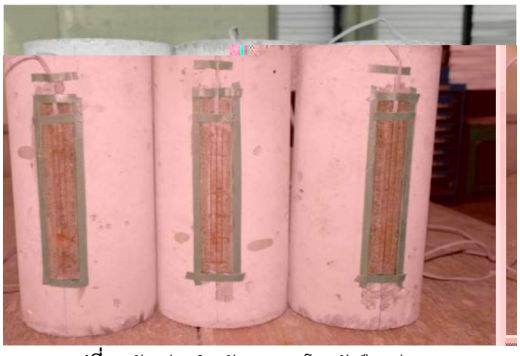
เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa), f_c คือ กำลังอัด (MPa), ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

สมการที่ (6) เป็นสมการที่นำเสนอโดย Noguchi et al. [22] เป็นสมการที่ถูกพัฒนาจากข้อมูลจำนวนมากกว่า 3,000 ชุดข้อมูล และมีสัมประสิทธิ์ สำหรับปรับแก้ชนิดของมวลรวมหยาบ (k_1) และปรับแก้ชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม (k_2) ใช้สำหรับคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง

$$E_c = k_1 k_2 1.486\times10^{-3} f_c^{\,1/3} \rho^2 \quad (6)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa), f_c คือ กำลังอัด (MPa), ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3), k_1 คือ สปส.ปรับแก้ชนิดมวลรวมหยาบ (สำหรับหินปูน ค่า k_1=1.20), k_2 คือ สปส.ปรับแก้ชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม (สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย ค่า k_2=1.10, คอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ค่า k_2=1.00)

งานวิจัยนี้ไม่มีการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) แต่จะเลือกใช้สมการที่ดีที่สุดจาก สมการที่ (3) – (6) โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในประเทศไทย ของ มนตรี คงสุข [23] เนื่องจากเป็นงานวิจัยในประเทศไทยและศึกษาคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ มนตรี คงสุข [23] ทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C496 ปัจจัยที่ใช้ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.55 ทดสอบที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ใช้แผ่นวัดความเครียด (Strain Gauge) ยาว 12 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่นต่อตัวอย่างในการวัดความเครียด ดังรูปที่ 5 เมื่อวิเคราะห์จนได้สมการคำนวณค่า E_c จากกำลังอัด ที่เหมาะสมแล้ว จะนำสมการที่ได้ไปคำนวณค่า E_c จากผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมในตารางที่ 2 แล้วจึงนำ E_c ที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการถดถอย (Regression Equation) สำหรับทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจากผลทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก



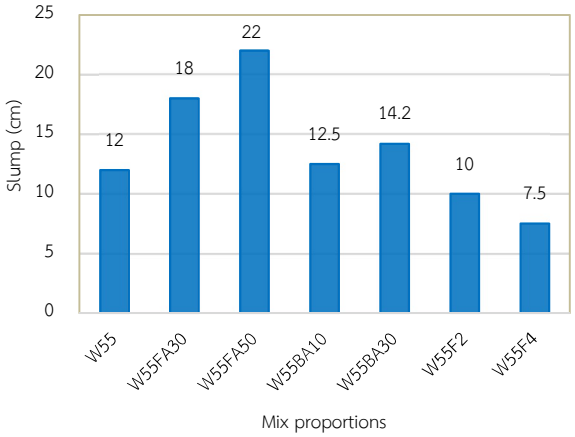
รูปที่ 5 ตัวอย่างสำหรับทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น [23]

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ความสามารถเทได้ของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 6 จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมมีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีรูปร่างกลมจึงทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24] ที่พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำต่ำส่งผลให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวลดลง แต่หากใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำสูงจะทำให้ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะที่ผสมคอนกรีต หินและทรายเกิดการกระแทกกับเถ้าก้นเตา จนทำให้เถ้าก้นเตาที่มีความแข็งแรงต่ำแตกออกจากกันได้ง่าย [25] น้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตาจึงถูกปลดปล่อยออกมาขณะผสมคอนกรีต

จากรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์มีค่าการยุบตัวต่ำกว่าคอนกรีตปกติ (W55) และมีค่าการยุบตัวลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นยาว เมื่อผสมและกระจายตัวอยู่ในคอนกรีต มอร์ตาร์ส่วนหนึ่งจะเคลือบอยู่บนผิวของเส้นใยสังเคราะห์ และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของเส้นใยจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

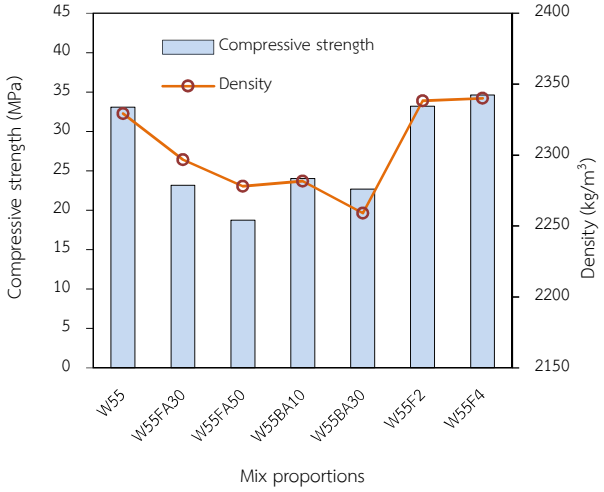
4.2 กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 7 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดและความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติและลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลง มีความพรุนสูง สอดคล้องกับความหนาแน่นที่ลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น อีกทั้งเป็นการทดสอบที่อายุ 28 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ยังเกิดไม่มากพอที่จะชดเชยกำลังอัดที่ลดลง

คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูง มีความแข็งแรงและความถ่วงจำเพาะ

น้อยกว่าทราย จึงส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตามีกำลังอัดและความหนาแน่นลดลง

คอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณ 2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดและความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ แต่เมื่อใช้เส้นใยในปริมาณ 4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ากำลังอัดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการใช้เส้นใยในปริมาณน้อยส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตไม่มากนัก [17]

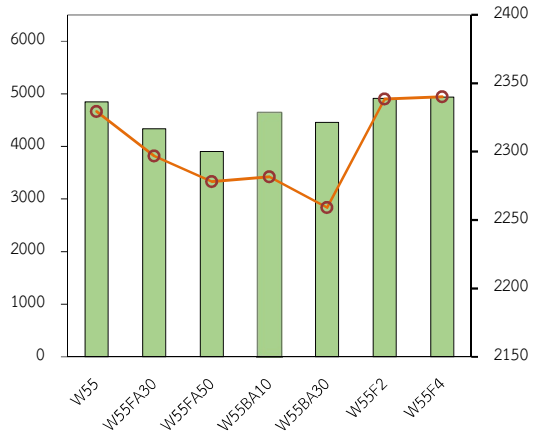


รูปที่ 7 กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต

4.3 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 8 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา มี UPV ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 7 และสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่น้อยลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่ลดลงจากความพรุนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คลื่นอัลตราโซนิกกระจายเชื่อมต่อกันไม่ดีและเป็นผลให้ UPV ลดลง [26] แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตา ส่งผลกระทบต่อ UPV ในทิศทางเดียวกับกำลังอัดและความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปของคอนกรีต

ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณ 2 และ 4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มี UPV ใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ สอดคล้องกับกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณที่ศึกษาในวิจัยนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อ UPV



รูปที่ 8 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและความหนาแน่นของคอนกรีต

4.4 การวิเคราะห์สมการคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีต

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมการคำนวณค่า E_c ของคอนกรีตจากมาตรฐานการออกแบบและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังสมการที่ (3) – (6) เปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ มนตรี คงสุข [23] ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9 พบว่าค่า E_c ที่คำนวณจากสมการที่ (3) และ (4) จากมาตรฐาน ACI318 และ ACI363 ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee et al. [1] สาเหตุมาจากสมการของ ACI318 และ ACI363 ไม่มีตัวแปรที่เกี่ยวกับชนิดของมวลรวมหยาบและชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโมดูลัสของมวลรวมหยาบและชนิดของวัสดุผสมเพิ่มมีผลกระทบต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ [22] จากรูปที่ 9 พบว่าค่า E_c จากผลการทดสอบของ มนตรี คงสุข [23] มีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากสมการที่ (3) และ (4) จำนวน 2 จุด ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลค่า E_c ที่อายุ 3 และ 7 วันของส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ถือว่าเป็นช่วงอายุเริ่มต้น (Early-age) ความชื้นสูงและกำลังอัดต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่าง Ec กำลังอัดมักจะไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) [5] ค่า E_c จึงมีค่าต่ำกว่าแนวโน้มของคอนกรีตที่มีอายุมากหรือกำลังอัดสูง ส่วนค่า E_c จากสมการที่ (5) และ (6) จากมาตรฐาน CEB-FIP, Eurocode 2 และ Noguchi et al. ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ มนตรี คงสุข [23] การเปรียบเทียบสมการคำนวณค่า E_c ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลการทดสอบนี้จะใช้ ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) คำนวณดังสมการที่ (7) เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของค่าจากการทดสอบและค่าที่ได้จากสมการต่าง ๆ โดยสมการที่มีความถูกต้องมากกว่าจะมีค่า MAPE ต่ำกว่า ผลการวิเคราะห์ค่า MAPE ของสมการทั้ง 4 ดังตารางที่ 3 จากตารางที่ 3 พบว่าสามารถเรียงลำดับสมการที่มีความถูกต้องสูงไปต่ำคือ Noguchi et al. มีความถูกต้องสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ CEB-FIP และ Eurocode 2, ACI318 และ ACI363 ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการของ Noguchi et al. ในการคำนวณค่า E_c ของคอนกรีต นอกจากจะพิจารณาจากค่า MAPE แล้วสมการของ Noguchi et al. ยังสามารถ

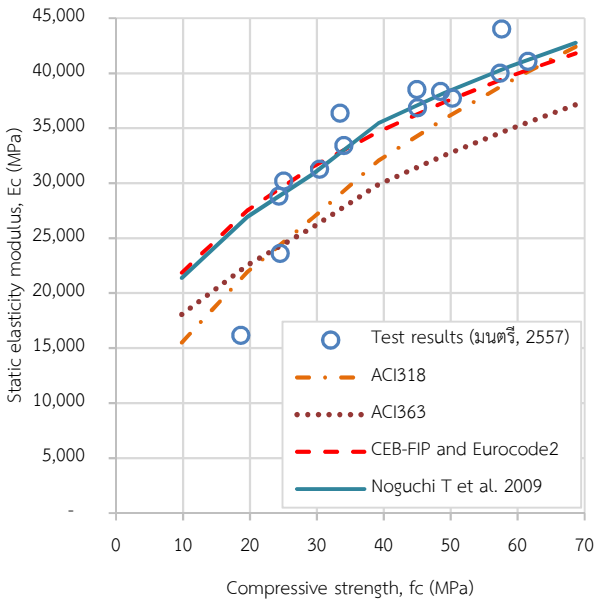
พิจารณาผลของชนิดของมวลรวมหยาบและชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม ได้แก่ เถ้าลอย ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งศึกษาในงานวิจัยนี้

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{A_i - P_i}{A_i}\right| \quad (7)$$

เมื่อ *MAPE* คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์, *n* คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ, A_i คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ, P_i คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ MAPE ของสมการที่ (3) - (6)

Equation	Code	MAPE (%)
(3)	ACI318	11.64
(4)	ACI363	17.40
(5)	CEB-FIP และ Eurocode 2	9.53
(6)	Noguchi et al.	8.70



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิก

ตารางที่ 4 และรูปที่ 10 แสดงค่า E_c ที่คำนวณจากสมการที่ (6) และค่า E_d จากสมการที่ (2) พบว่า E_d ที่ประเมินจาก UPV มีค่าสูงกว่าค่า E_c ประมาณร้อยละ 13-39 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1,5,10,11,21,27] จากรูปที่ 10 พบว่าคอนกรีตปกติ (W55) มีค่า E_c และ E_d ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา มีค่า E_c และ E_d น้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น การลดลงของ E_c เมื่อผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีความสัมพันธ์กับเมทริกซ์เฟส (Matrix Phase) [10] การใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาทำให้ความพรุนในซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงลดลงจึงทำให้ E_c ลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า E_c และ E_d พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่า E_d มากกว่า E_c และความแตกต่างนี้มีค่าเพิ่มตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่ทำให้มีความแตกต่างกันเนื่องจากลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีต ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นทั้งสองประเภทในลักษณะต่างกัน [28] การทดสอบหาค่า E_c ตามมาตรฐาน ASTM C496 มีการใช้หน่วยแรงในการทดสอบสูง เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่น โดยเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนท์ (Secant Modulus) ในขณะที่การทดสอบด้วย UPV มีหน่วยแรงเกิดขึ้นในตัวอย่างน้อยมาก E_d ที่ทดสอบได้จึงเป็น โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (Initial Tangent Modulus) ดังนั้นจึงมีความชันมากกว่ากรณี E_c และทำให้ E_d มีมากกว่า E_c [21,29]

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_c และ E_d พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นทั้งสองของ คอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังสมการที่ (8) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.896 ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าแตกต่างออกไปจากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ ไม่อยู่ในแนวโน้มเดียวกัน อาจเกิดเนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา เป็นการใช้เถ้าก้นเตาที่มีความพรุนสูงและอิ่มตัวด้วยน้ำแทนที่มวลรวมละเอียด ในขณะที่การใช้เถ้าลอยหรือเส้นใยสังเคราะห์เป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมในซีเมนต์เพสต์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของมวลรวม จึงส่งผลกระทบต่อสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีตแตกต่างกัน ควรมีการศึกษาประเด็นนี้เพิ่มเติมในอนาคต

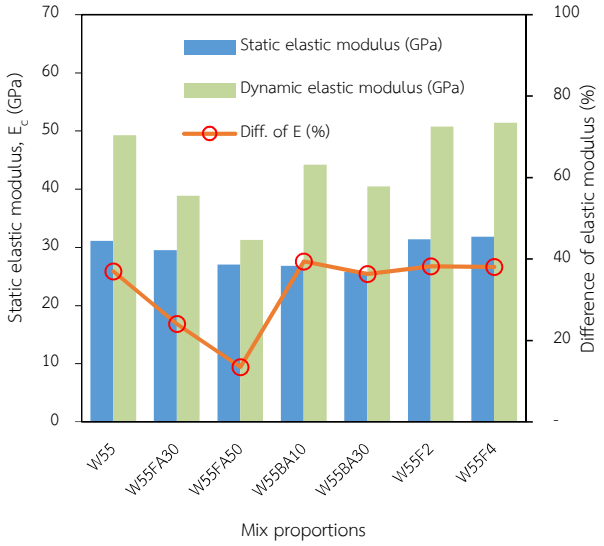
$$E_c = 0.218E_c + 20.495 \quad (8)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa), Ed คือ โมดูลัสยืดหยุ่นไดนานิก (GPa)

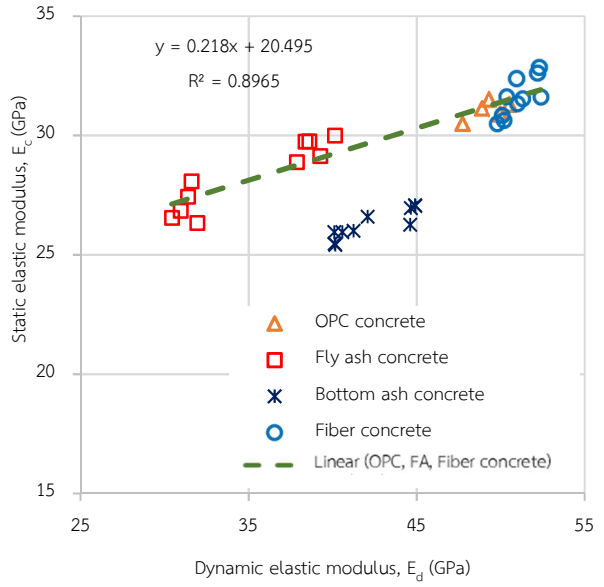
ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต

Mix proportions	Density (kg/m^3)	f_c (MPa)	UPV (m/s)	E_c (MPa) from Eq.(6)	E_d (MPa) from Eq.(2)	k for Eq.(6)	
						k1	k2
W55	2329	33.11	4848	31,069	49,273	1.2	1.0
W55FA30	2297	23.17	4335	29,500	38,846	1.2	1.1
W55FA50	2278	18.74	3904	27,039	31,248	1.2	1.1
W55BA10	2282	24.04	4640	26,791	44,210	1.2	1.0
W55BA30	2259	22.67	4459	25,758	40,425	1.2	1.0
W55F2	2338	33.21	4910	31,342	50,737	1.2	1.0
W55F4	2340	34.62	4939	31,825	51,375	1.2	1.0

Note : f_c=Compressive strength; UPV=Ultrasonic pulse velocity; E_c=Static elastic modulus; E_d=Dynamic elastic modulus; k_1=Correction factor for coarse aggregate; k_2=Correction factor for type of admixture



รูปที่ 10 โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต



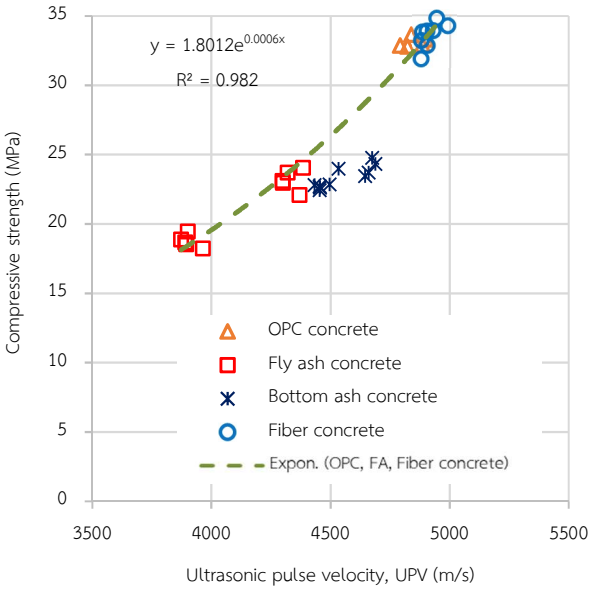
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกของคอนกรีต

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) ของคอนกรีต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ (9) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.982 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยมีผลต่อ UPV แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับคอนกรีตปกติ ส่วนการใช้เส้นใยสังเคราะห์ไม่มีผลกับ UPV ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าแตกต่างออกไปจากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ ไม่อยู่ในแนวโน้มเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้พบในความความสัมพันธ์ระหว่าง E_c และ E_d เช่นกัน อาจเกิดเนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา เป็นการใช้เถ้าก้นเตาที่มีความพรุนสูงและอิ่มตัวด้วยน้ำแทนที่มวลรวมละเอียด ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำและความชื้นในตัวอย่าง [30] โดย UPV จะเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการทดสอบคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบของความชื้นในเถ้าก้นเตาด้วย เพื่อให้การประเมินกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

$$f_c = 1.0812e^{0.0006V} \quad (9)$$

เมื่อ f_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa), e คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ, V คือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต

5. บทสรุป

จากผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีกำลังอัดและความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ มีกำลังอัดและความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

2) คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา มี UPV ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตา ส่งผลกระทบต่อ UPV ในทิศทางเดียวกับกำลังอัดและความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปของคอนกรีต ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ มี UPV ใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ดังนั้นการใช้เส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด ความหนาแน่นและ UPV

3) โมดูลัสยืดหยุ่นไดนามิกที่ประเมินจาก UPV มีค่าสูงกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณร้อยละ 13-39 คอนกรีตปกติมีค่า E_c และ E_d ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา มีค่า E_c และ E_d น้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีผลกระทบต่อค่า E_c และ E_d ในขณะที่เส้นใยสังเคราะห์ในปริมาณที่ศึกษาไม่มีผลกระทบต่อ ค่า E_c และ E_d ของคอนกรีต

4) ความสัมพันธ์ระหว่าง E_c และ E_d ของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และมี R^2 = 0.896 ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าแตกต่างออกไปจากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ ไม่เหมาะที่จะนำข้อมูลของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามาสร้างความสัมพันธ์ร่วมกับคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

5) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ UPV ของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล มีค่า R^2=0.982 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยมีผลต่อ UPV แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์ แต่คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีแนวโน้มแตกต่างออกไปจากคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

[1] Lee, B.J., Kee S.H., Oh, T.K. and Kim, Y.Y. (2017). Evaluating the dynamic elastic Modulus of concrete using shear-wave velocity measurements. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, pp.1-13.

[2] ASTM C469/C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression; ASTM International: West Conshohoken, PA, USA, 2014.

[3] ACI318 ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2014; p.503.

[4] Eurocode EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-2: General Rules-Structure Fire Design; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.

[5] Park, J.Y., Sim, S.H., Yoon, Y.G. and Oh, T.K. (2020). Prediction of static modulus and compressive strength of concrete from dynamic modulus associated with wave velocity and resonance frequency using machine learning techniques. Materials, 13, pp.1-24.

[6] Vivithkeyoonvong, S. and Puwapattanachat, S. (2000). Estimative equation for compressive strength of concrete by rebound hammer and ultrasonic pulse velocity methods. Proceedings of the sixth national convention on civil engineering, Phetchaburi, Thailand, 10-12 May 2000, Vol. 1 pp. MAT. 77-82.

[7] Almasaeid, H.H., Suleiman, A. and Alawneh R. (2022). Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. *Case Studies in Construction Material*, 16, pp.1-16.

[8] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, West Conshohocken, ASTM International (2002).

[9] Pal, P. (2019). Dynamic poisson's ratio and modulus of elasticity of pozzolana Portland cement concrete. *International journal of engineering and technology innovation*, 9, pp.131-144.

[10] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2013). *Concrete: microstructure, properties and materials*, 4th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.674.

[11] Panzera, T.H., Christoforo, A.L., Cota, F.P., Borges, P.H.R. and Bowen, C.R. (2011). Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials, advances in composite materials. In book; Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials., pp.411-436.

[12] Malhotra, V.M. and Carino, N.J. (2004). *Handbook on Non-destructive testing of concrete*, 2nd ed. CRC Press LLC.

[13] Bucholc, J. and Ghafoori, N. (1996). Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineer*, 8(3), pp.128-137.

[14] Bai, Y., Darcy F. and Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 19, pp.691-697.

[15] Andrade, L.B., Rocha, J.C. and Cheriaf, M. (2009). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp.609-614.

[16] Shi-Cong, K. and Chi-Sun, P. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and

fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 23, pp.2877-2886.

[17] ACI 544.1R-96, Report on fiber reinforced concrete, Report by ACI Committee 544, Farmington Hills, American Concrete Institute (2002),

[18] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S. (2007). A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 21, pp.1322-1334.

[19] ASTM C215, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.

[20] ACI committee 363. (1984). State-of-the-art report on high-strength concrete. *ACI Journal Proceeding, 81*, pp.364–411.

[21] Thomaz, W.A., Miyaji, D.Y. and Possan, E. (2021). Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, pp.1-17.

[22] Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K.M., Chiaia, B.M. and Fantilli, A.P. (2009). A Practical Equation for Elastic Modulus of Concrete. ACI Structural Journal, 106(5), pp.690-696.

[23] มนตรี คงสุข (2557). *การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวและการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีต.* วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, ประเทศไทย.

[24] สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2555). ผลของการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวของคอนกรีต. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 8. ชลบุรี. MAT19.

[25] Kim, B., Prezzi, M. and Lee, J. (1996). Mechanical properties of class F fly and bottom ash mixtures for embankment application. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference held at Ahmedabad*, December, pp.532-535.

[26] Slamet, W., Faqih, M., Maris, N. and Hidayat, M. (2022). Correlation of ultrasonic pulse velocity with porosity and compressive strength of mortar with limestone for building quality assessment. *U Karst*, 6, pp.190-202.

[27] Lydon, F.D. and Balendran, R.V. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research, 16*, pp.314–324.

[28] Philleo, R.E. (1955). Comparison of results of three methods for determining Young' s modulus of elasticity of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 26(5), pp. 461–469.

[29] Mindess, S., Young, J.F. and Darwing, D. (2003). *Concrete 2nd Edition*, Prentice Hall, Pearson Education, pp.307.

[30] Godinho, J.J, Tennison & Medeiros, Marcelo-Silva, M.S. and Medeiros, M.H.F. (2020). Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. *Revista IBRACON structure and Materials*, 13, pp.222-247.