การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย

A Study of Relationship between Strength Activity Index and Cement Equivalence Factor of Fly ash

สำเนียง องสุพันธ์กุล[1*]
Sumnieng Ongsupankul[1*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
* ผู้นิพนธ์ประสานงานโทรศัพท์02-8894585-7 ต่อ 3041อีเมล์ : sumnieng.o@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย ค่าดัชนีกำลังได้จากการทดสอบโดยวิธีทางกล เป็นการวัดความสามารถการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ส่วนค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ เป็นค่าที่นิยมใช้ในการออกแบบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานอังกฤษ โดยค่าดังกล่าวเป็นการวัดปริมาณวัสดุปอซโซลานหนึ่งหน่วยซึ่งมีประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์ η หน่วย ค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์นี้มีความยุ่งยากในการทดสอบและใช้จำนวนตัวอย่างการทดสอบเป็นปริมาณมาก งานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทั้งสอง เพื่อให้เห็นความสามารถของเถ้าเถ้าลอยในการเป็นวัสดุปอซโซลาน เพื่อนำไปใช้ในงานมอร์ต้าร์และคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป จากผลการทดสอบพบว่า ค่าดัชนีกำลังและค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์และคอนกรีตโดยตรง การทดสอบค่าดัชนีกำลังเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน เป็นวิธีการที่สะดวกและเข้าใจได้ง่าย ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

คำสำคัญ: ดัชนีกำลัง ตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ ปอซโซลานและเถ้าลอย

Abstract This article has studied the relationship between strength activity index and cement equivalence factor for fly ash. The strength activity index is determined by mechanical test which is used to measure an effectiveness of pozzolanic reaction. This is one of the techniques used to measure the pozzolanic reaction. The cement equivalence factor is commonly used in the design of concrete containing fly ash according to the British Standard.The value is a measurement of cement equivalence factor for fly ash, which means one unit of fly ash is as effective as η unit of cement. This study shows the relationship between two variables and ability of fly ash as pozzolanic material, which can effectively be used as admixture in cement mortar and concrete. The test results

show that the strength activity index and the cement equivalence factor are directly related to the compressive strength of concrete. The strength activity index test is a popular method used to test the pozzolanic reaction. This method is convenient and easy to understand. The test results also show that the relationship between the values of strength activity index and that of cement equivalence factor for fly ash are quite similar and have tendencies in the same direction.

***Keywords*:** Strength activity index, Cement equivalence factor, Pozzolanandfly ash

1. บทนำ

ขั้นตอนการผลิตซีเมนต์นั้นมีการประมาณว่าต้องเผาวัตถุดิบถึง 1.6 ตัน ซึ่งเป็นหินปูนอยู่ร้อยละ 80 จึงจะได้ปูนเม็ด 1 ตัน และในการเผาปูนเม็ดเพื่อผลิตปูนซีเมนต์นั้น ขบวนการผลิตจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ในปริมาณเท่ากับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ ดังนั้นถ้าเราสามารถนำวัสดุอื่นมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้บางส่วนในงานคอนกรีต และทำให้ได้งานก่อสร้างคอนกรีตที่ดีมีคุณภาพ ดังเช่น คอนกรีตทั่วไปหรือดีขึ้นกว่าเดิมก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้ [1]

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นรูปของซิลิก้าและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร $Ca(OH)_2$ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) โดยที่คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแต่ละแหล่งที่เผาถ่านหิน เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะโดยทั่วไปจะมีรูปร่างส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมซึ่งแตกต่างจากเถ้าลอยจากอุตสาหกรรมอื่นๆ แต่บางครั้งอาจพบลักษณะเช่นเดียวกับของเถ้าลอยแม่เมาะ ในระยะแรกการนำเถ้าลอยมาใช้งานยังคงมีปัญหาในเรื่องการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี ซึ่งมาจากปัจจัยของคุณภาพถ่านหินที่ใช้และอุณหภูมิในการเผา ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงใช้วิธีการควบคุมคุณภาพของถ่านหินก่อนป้อนเข้าโรงไฟฟ้า [2] ซึ่งรวมถึงการควบคุมปริมาณกำมะถันในถ่านหินให้อยู่ระหว่างร้อยละ 1-3 ทำให้ได้เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในปริมาณที่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-98[3] ซึ่งจากข้อมูลองค์ประกอบเคมีของเถ้าลอย พบว่าปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ได้ลดลงจากร้อยละ 3.9 ถึง 1.5 จากจุดเด่นทางด้านรูปร่างของเถ้าลอยที่มีทรงกลมหลังจากทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบหรือในการเทคอนกรีตในที่แคบๆ ที่ต้องการให้ลื่นไหลได้ ซึ่งคอนกรีตบางชนิดจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ [2]

การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานวิธีนิยมใช้ในการทดสอบคือการทดสอบทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C 311-98b [4] เพื่อการหาอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ค่าที่ได้เป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานของวัสดุ ผลของการทำ

ปฏิกิริยาเทียบกันระหว่างมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มี W/C หลาย ๆ ค่านั้นจะให้ผลของค่าดัชนีกำลังใกล้เคียงกัน สำหรับวัสดุปอซโซลานต้องมีค่าดัชนีกำลังไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-98 [1] ซึ่งเถ้าถ่านหินหรือวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีจะมีค่าของดัชนีกำลังที่สูงคือเกินกว่าร้อยละ 100 ซึ่งจะมีคุณภาพดีมาก แสดงว่าวัสดุปอซโซลานดังกล่าวทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ดี และสามารถนำเถ้าถ่านหินดังกล่าวไปใช้ในงานคอนกรีตได้โดยไม่มีปัญหาของการให้กำลังต่ำ [2]

ค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ ซึ่งมีการทดสอบจากหลายงานวิจัยและนำไปใช้จริงแล้วในต่างประเทศ โดยที่ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล k (η) หมายถึง น้ำหนักของเถ้าลอยหนึ่งหน่วยที่มีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ k (η) หน่วย ซึ่งค่าดังกล่าวไม่คงที่แปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิด แหล่งที่มา ความละเอียด และปริมาณการแทนที่ในซีเมนต์ของเถ้าลอย รวมทั้งประเภทของปูนซีเมนต์ อายุ และวิธีการบ่มด้วย สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการออกแบบโดยอาศัยค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์นี้มีความน่าเชื่อถือในการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่แต่ละอายุ ดังจะเห็นได้จากวิธีการออกแบบตามมาตรฐานอังกฤษ ที่ได้แนะนำการใช้ค่า k (η) ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต [5]

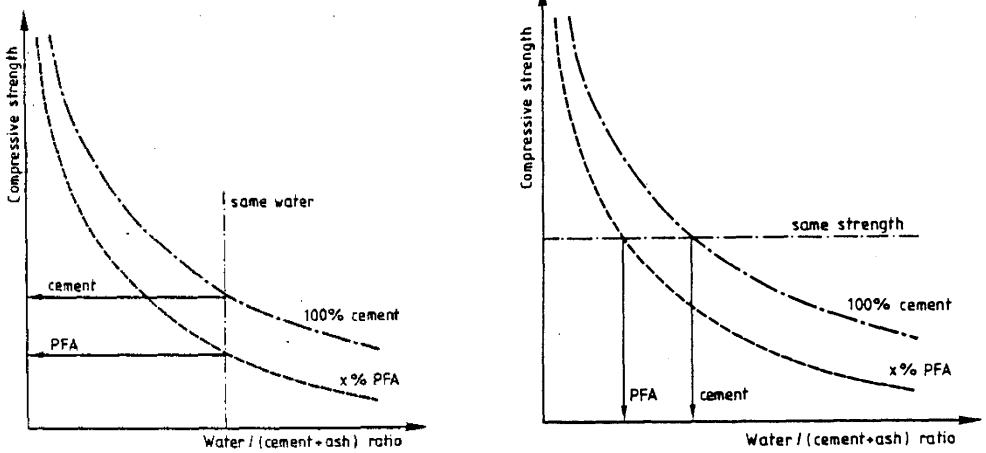
จากการศึกษางานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมาวิธีการออกแบบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่กล่าวถึงการหาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (k) มีในปริมาณที่น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงน่าจะเป็นแนวทางที่ดีในการส่งเสริมและสนับสนุนการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์และมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าแต่ก่อน สำหรับแนวทางการหาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลดังกล่าว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเถ้าจากแหล่งอื่นๆ และสารปอซโซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ (Rice husk ash : RHA) ดินขาวเผา (Calcined kaolin : MK) ตะกรันเตาถลุง (Groundgranular blast furnace slag : GGBFS) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำนายกำลังอัด และกำหนดอัตราส่วนผสมในการออกแบบต่อไป [5]

2.หลักการและเหตุผล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในและต่างประเทศ พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่า W/C ดังแสดงในรูปที่ 1 ให้เห็นถึงกำลังรับแรงอัดค่าเดียวกันมีค่า W/C แตกต่างกันและค่า W/C ที่จุดเดียวกันก็ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการทำปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เกิดสารเชื่อมประสานคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานที่เป็นสารสำคัญทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดในคอนกรีต และมอร์ต้าร์นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาอยู่ในกลุ่มของซีเมนต์ น้ำ และ วัสดุปอซโซลาน ไม่รวมถึงกลุ่มของทรายหรือหิน เข้าไปในการทำปฏิกิริยาด้วย เป็นหลักการแรกรวมถึงอาศัยความสัมพันธ์ของ W/C และกำลังรับแรงอัด แสดงในรูปที่ 1 [6] มาทำการหาตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าดัชนีกำลังในงานวิจัยนี้

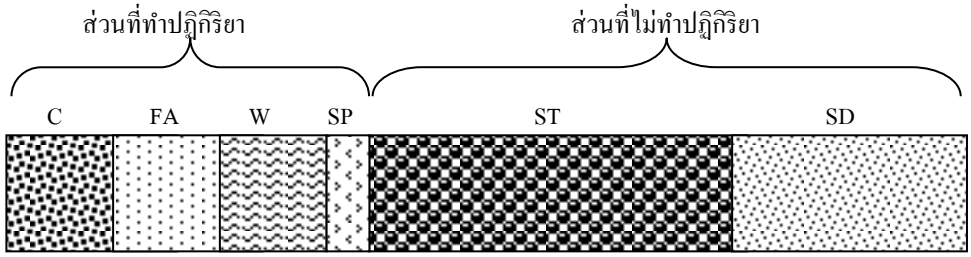
เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolanic) มีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในรูปสารประกอบของ ซิลิก้า อลูมิน่า (Silica , Alumina) เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้น ในระยะแรกน้ำกับปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ที่แข็งตัว เช่น Calcium Silicate Hydrate , Calcium Aluminate Hydrate และเป็นสารละลาย $Ca(HO)_2$ อิสระอยู่ในโพรงของเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถถูกชะล้างออกไปได้ ในช่วงต่อมา เถ้าลอยจะเข้า

ทำปฏิกิริยากับสาร $Ca(HO)_2$ ส่วนนี้ เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเหลือปริมาณ $Ca(HO)_2$ น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้นและมีความคงทนเพิ่มขึ้น [2]



(a) ค่า W/Cจุดเดียวกันให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกัน (b) กำลังรับแรงอัดค่าเดียวกันมีค่า W/Cแตกต่างกัน

รูปที่ 1 ความต้านทานแรงอัดต่ออัตราส่วนน้ำ/(ซีเมนต์+ PFA)[6]



C = ซีเมนต์, FA = เถ้าลอยหรือกลุ่มวัสดุปอซโซลาน, W = น้ำ, SP = สารลดน้ำ, ST = หิน และ SD = ทราย

รูปที่ 2 แสดงพฤติกรรมการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์

ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) เป็นวิธีทางกลวิธีหนึ่งที่สามารถใช้วัดสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานได้ การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311-98b [4] ซึ่งได้การทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง โดยให้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (1) [7]

$$\text{ดัชนีกำลัง} = \frac{A}{B}\times 100 \qquad (1)$$

A คือ ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมสาร-ปอซโซลาน

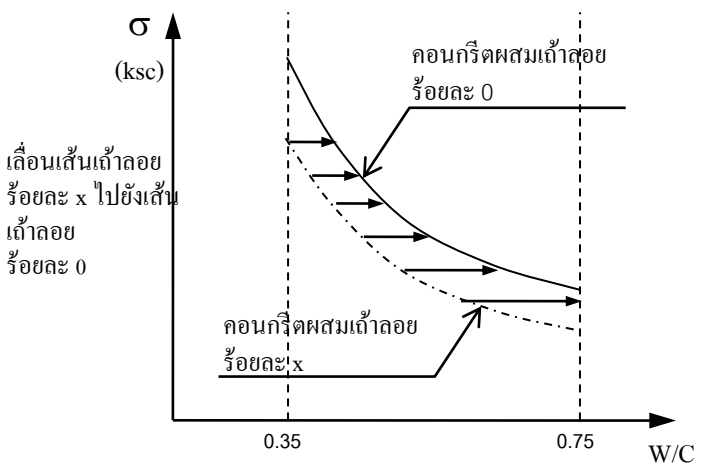
B คือ ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติ

ตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ หรือ η ซึ่งค่า η นี้มีขึ้นเพื่อหาน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่มีผลในการพัฒนากำลัง เท่ากับปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ตัวอย่าง เช่น η เท่ากับ 0.50 การใช้ปริมาณเถ้าลอย 40 กก. จะมี

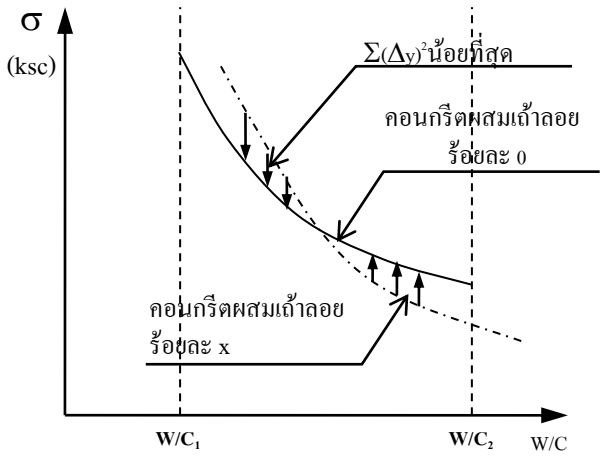
ประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ 0.50×40 = 20 กก. ดังนั้น ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 60 กก. และเถ้าลอย 40 กก. จะมีประสิทธิผลเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์เทียบเท่า Cement equivalent หนัก = 60+(0.50×40) = 80 กก. กระบวนการที่จะได้ค่า η จากแต่ละเส้นของเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละต่าง ๆ โดยสมมุติค่า η ในสมการที่ (2)

$$W/C = W/(C + \eta \times FA) \quad (2)$$

เมื่อทดลองแทนค่า η ลงในสมการที่ 2 ในรูปที่ 3 เส้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละต่าง ๆ จะเลื่อนไปทางขวาเข้าหาเส้นหนาจนใกล้เคียงที่จะทับกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือจนกระทั่งค่า $\Sigma\Delta Y^2$ มีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4 กระบวนการนี้เป็นการประมาณการหาค่า η ของเถ้าลอยและค่า η ใช้ในสำหรับสมการนี้จะใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในการทำปฏิกิริยา (reactivity coefficient) ที่อัตราส่วนร้อยละนั้นๆ ของเถ้าลอย ค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์นั้น จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งในการหาค่าประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์นั้นจะต้องใช้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นการไม่สะดวกและสิ้นเปลืองเป็นอย่างมาก ส่วนการทดสอบค่าดัชนีกำลังเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ทั้งยังเป็นวิธีการที่สะดวกและเข้าใจได้ง่าย ค่าดัชนีกำลังเป็นวิธีทางกลวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานได้ ส่วนค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ เป็นค่าที่นิยมใช้ในการออกแบบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานอังกฤษ โดยค่าดังกล่าวหมายถึงปริมาณเถ้าลอยหนึ่งหน่วยมีประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์ η หน่วย[8-9]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและ W/Cแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 0 และร้อยละ X [8-9]



รูปที่ 4 เมื่อแทนค่า η เส้นกำลังของเถ้าลอยคอนกรีตที่ X% เคลื่อนไปใกล้เส้นคอนกรีตควบคุมที่สุด[8-9]

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลัง ซึ่งเป็นวิธีทางกลวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานและค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ เป็นค่าที่นิยมใช้ในการออกแบบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยตามมาตรฐานอังกฤษ โดยค่าดังกล่าวหมายถึงปริมาณเถ้าลอยหนึ่งหน่วย ซึ่งมีประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์ 1 หน่วย

ค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งในการหาค่าประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์นั้น จะต้องใช้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นการไม่สะดวกและสิ้นเปลืองเป็นอย่างมาก ส่วนการทดสอบค่าดัชนีกำลังเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ทั้งยังเป็นวิธีการที่สะดวกและเข้าใจได้ง่าย นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีการหาค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ รวมถึงการนำค่าตัวแปรนี้ไปใช้ในการออกแบบคอนกรีตและเสนอเพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบวัสดุปอซโซลานเพื่อที่จะนำไปใช้ในออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต่อไป

4. ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในสัดส่วนผสม มอร์ต้าร์ ควบคุมโดยการทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M [10] ควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ส่วนของคอนกรีตควบคุมโดยการทดสอบค่าการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143/C C143M-98 [11] โดยกำหนดค่าการยุบตัวในการทดสอบที่8-10 ซม.

2. ศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย โดยการปรับส่วนผสมโดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวลและซีเมนต์ต่อเถ้าลอย โดยน้ำหนักที่ปริมาณร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก มอร์ต้าร์ทดสอบโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M [10] ส่วนส่วนของคอนกรีตควบคุมโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39-96 [12] ทำให้แน่นโดยอาศัยโต๊ะเขย่าคอนกรีต อายุการทดสอบที่ 28 วัน

3. ศึกษาการหาค่าดัชนีกำลังการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311-98b [4] และหาค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ η

4. ศึกษาการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังและค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์

5. ระเบียบวิธีวิจัย

การทดสอบในงานวิจัยนี้มีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุ การทดสอบหาผลกระทบต่างๆ ของมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย รวมถึงการทดสอบกำลังอัด เพื่อให้การวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงกำหนดวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้ ได้แบ่งการทดสอบโดยลักษณะของตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่มคือ

1.1 คอนกรีต การผสมคอนกรีตใช้วิธีการออกแบบโดยใช้วิธีของ ACI 211-91[7] เป็นพื้นฐานในการออกแบบ โดยมีตัวแปรในการผสมดังนี้

a.) ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 15, 30, 45และ 60

b.) Slump มี 2 ช่วงคือ 8-10 ซม.

c.) ขนาดโตสุดของหิน 3/8”

d.) W/C คือ0.35, 0.45, 0.55,0.65 และ 0.75

e.) ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28วัน

ทำการผสมคอนกรีตตามตัวแปรข้างต้น โดยทำการทดสอบให้ได้ค่าต่าง ๆ ดังระบุเสียก่อนจึงจะหล่อตัวอย่างและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนครบอายุ นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและคำนวณ ตามสูตร $\sigma = \frac{P}{A}$ เมื่อทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำผลการทดสอบไปคำนวณ วิเคราะห์ผล และสร้างแผนภูมิ หาค่าดัชนีกำลังและหาค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ η ต่อไป

1.2 มอร์ต้าร์ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M [10]

a.) ปริมาณเถ้าลอยและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ0, 15, 30, 45และ 60

b.) ค่าการไหลร้อยละ 110 ±5

c.) ทดสอบกำลังอัดที่แนะนำโดยASTM C 109/C 109M [10]

d.) ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28วัน

จากตัวแปรดังกล่าวข้างต้นทำการผสมมอร์ต้าร์ให้ได้ค่าการไหลร้อยละ 110±5 และนำไปหล่อตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M [10] ระยะเวลาการทดสอบ28วันในน้ำเมื่อครบอายุการทดสอบแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดจากสูตร $\sigma = \frac{P}{A}$ ต่อไปแล้วนำไปคำนวณค่า ดัชนีกำลัง หลังจากนั้นจึงนำไปคำนวณและวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่า หาค่าประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ η

6. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอเสนอผลการศึกษากล่าวถึงผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ตามการทดสอบดังนี้

6.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติจำเพาะของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยที่ใช้จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์และคอนกรีตในด้านต่างๆ รวมทั้งการพัฒนากำลังอัด ดังนั้น จึงได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพในด้านต่างๆ ของวัสดุที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติดังที่กล่าวมา

6.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา พบว่าเถ้าลอยที่นำมาทดสอบมีสีเทา มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ก่อนนำผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เพื่อคัดเอาส่วนหยาบ ๆ ทิ้งไปและนำมาเทียบสีกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีสีเทาอ่อน ทำให้เห็นถึงสีที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์มาก ดังแสดงในรูปที่ 5

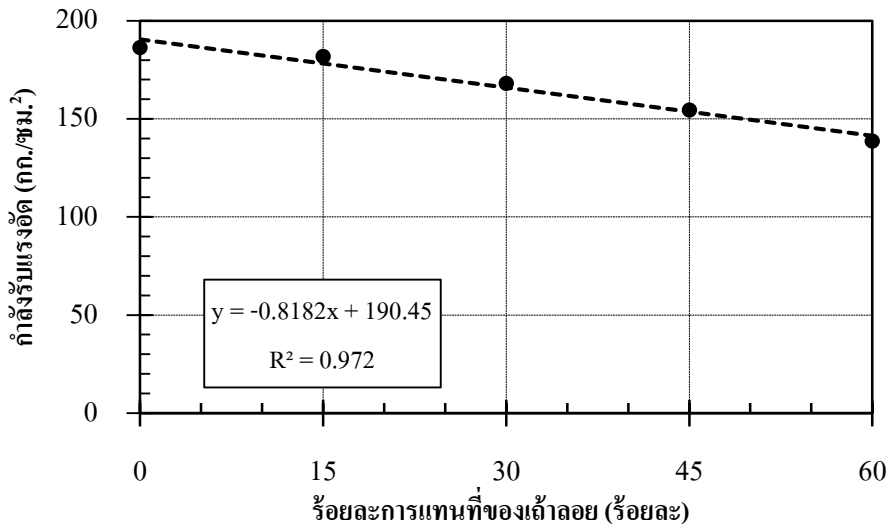
6.1.2 ความถ่วงจำเพาะ ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่า 3.11 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์, เถ้าลอยเท่ากับ 2.04 ค่าเฉลี่ยทรายมีค่าเท่ากับ 2.61 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.8 และร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 2.00 และหินมีค่า 2.70 และร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 2.00

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 เถ้าลอย

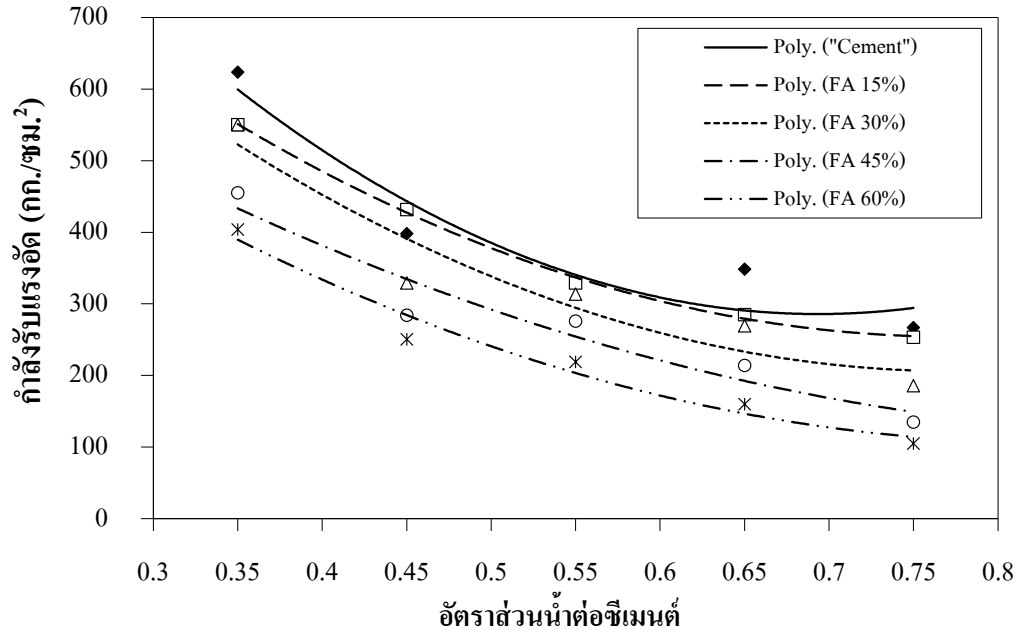
รูปที่ 5 ลักษณะของเถ้าลอยบางส่วนที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

6.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นโดยควบคุมการไหลตามมาตรฐาน ASTM C 109/C109M [11] ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่แทนปูนซีเมนต์ เมื่อแทนที่มากขึ้นกำลังรับแรงอัดก็จะลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ร้อยละการแทนที่ต่างๆ ของเถ้าลอย

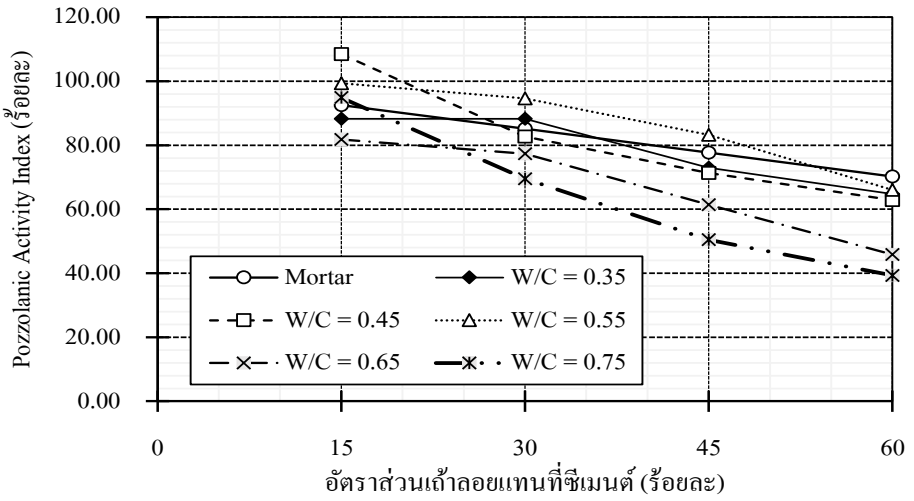


รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ร้อยละการแทนต่างๆ ของเถ้าลอย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเช่นเดียวกับมอร์ต้าร์ เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนั้นแล้วกำลังของคอนกรีตก็จะมีค่าลดลงตามปริมาณอัตราส่วน W/C ที่เพิ่มขึ้นด้วยตารางที่ 1 ผลการการเปรียบเทียบค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

ตารางที่ 1 ผลการการเปรียบเทียบค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

W/C	ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ (ร้อยละ)			
	15	30	45	60
มอร์ต้าร์	92.57	85.13	77.70	70.26
0.35	88.24	88.24	72.96	64.78
0.45	108.46	82.75	71.36	62.90
0.55	99.40	94.67	83.30	66.10
0.65	81.82	77.32	61.44	45.84
0.75	94.88	69.54	50.44	39.33
$\bar{X}$	94.56	82.50	67.90	55.79
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.23	9.69	12.46	12.33



รูปที่ 8 ผลการทดสอบค่า Pozzolanic Activity Index ในมอร์ต้าร์และคอนกรีต

6.3ผลการทดสอบดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

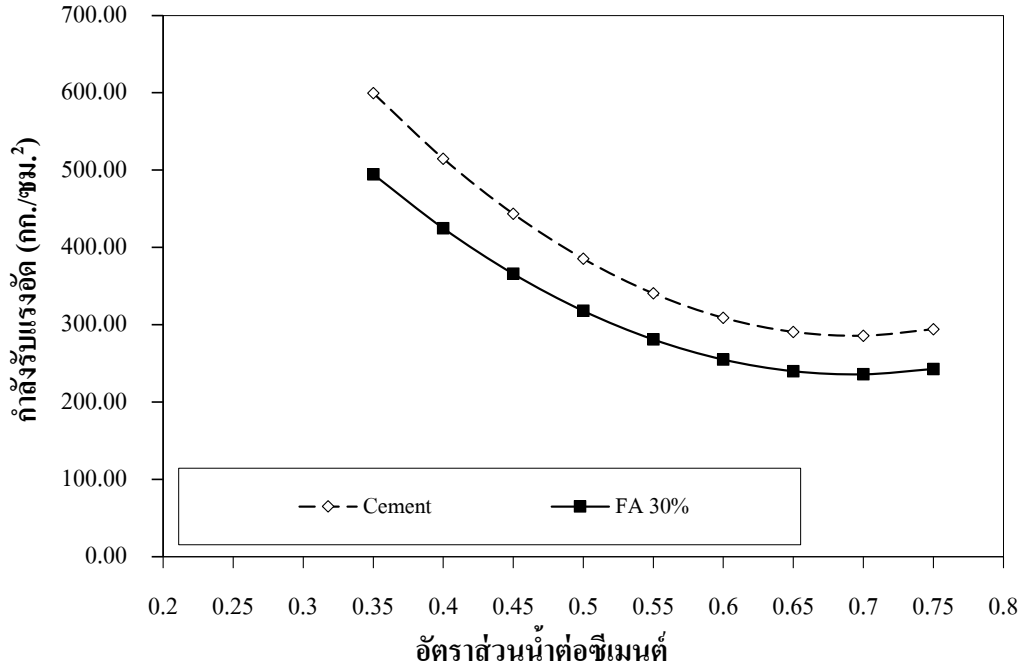
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ซึ่งส่งผลต่อค่าดัชนีกำลังโดยตรง โดยจะพบว่าค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 8 แสดงผลของดัชนีกำลังทั้งมอร์ต้าร์และคอนกรีต พบว่าแนวโน้มของค่าดัชนีกำลังจะมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลงในส่วนผสมค่าดัชนีกำลังจะมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย พบว่าที่ส่วนผสมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 15 และ W/C = 0.45 มีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 100 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับกำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีตมาตรฐาน

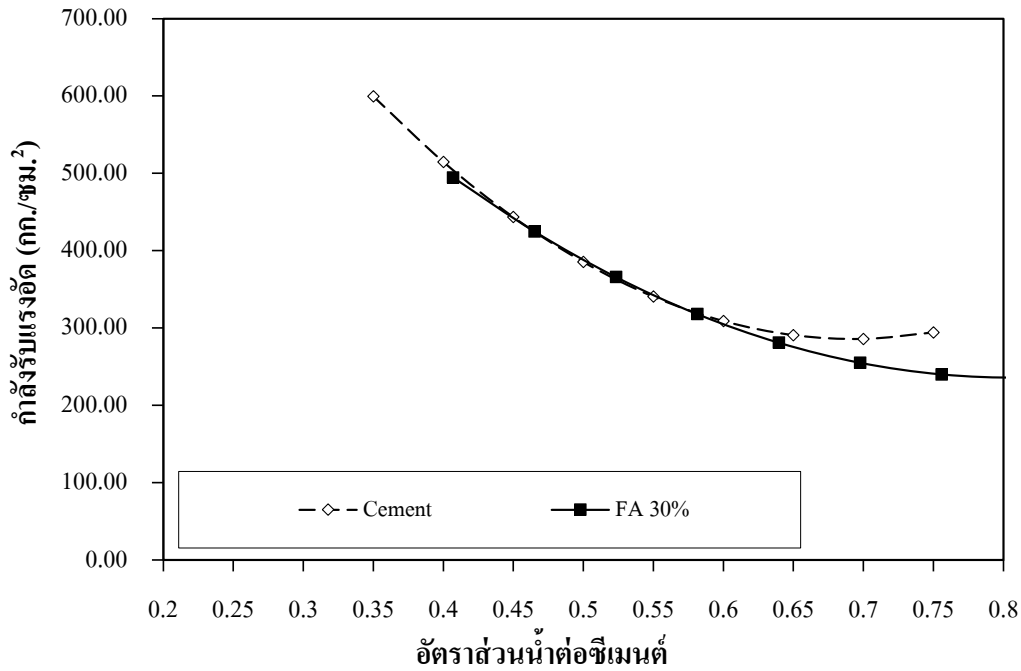
เมื่อพิจารณาภาพรวมทั้งหมดทั้งมอร์ต้าร์และคอนกรีตให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ใกล้เคียงกันในแต่ละกลุ่มของเถ้าลอยโดยมีเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงร้อยละ 9.69-12.46

6.4ผลการทดสอบหาค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์ของคอนกรีต

จากรูปที่ 7 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดและค่าอัตราส่วน W/C ต่าง ๆ ในขั้นตอนนี้ทำการหาค่า η โดยนำแผนภูมิในรูปที่ 7 มาทำการลบเส้นในแผนภูมิให้เหลือเพียง 2 เส้นคือเส้นที่เป็นซีเมนต์ควบคุมและเส้นปริมาณเถ้าลอยที่ต้องการหาค่า η แสดงในรูปที่ 9 โดยสมมุติค่า η ในสมการ (2) เมื่อแทนค่า η ลงในสมการที่ 2 เส้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละต่าง ๆ จะเลื่อนไปทางขวาเข้าหาเส้นซีเมนต์ควบคุมจนใกล้เคียงที่จะทับกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในการทดสอบได้ทำการแทนค่า η เท่ากับ 0.86 เส้นของเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 จะเลื่อนไปทางด้านขวาทับกับเส้นซีเมนต์ควบคุมดังแสดงในรูปที่ 10 กระบวนการนี้เป็นการประมาณการหาค่า η ของเถ้าลอยและค่า η ใช้ในสำหรับสมการนี้จะใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในการทำปฏิกิริยา (reactivity coefficient) ที่อัตราส่วนร้อยละนั้นๆ ของเถ้าลอยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ค่าของ η จะลดลงตามปริมาณร้อยละของเถ้าลอยที่แทนที่เพิ่มเข้าไปในปูนซีเมนต์



รูปที่ 9 แผนภูมิแสดงเส้นแผนภูมิที่ใช้ในการหาค่า η ที่เถ้าลอยร้อยละ 30



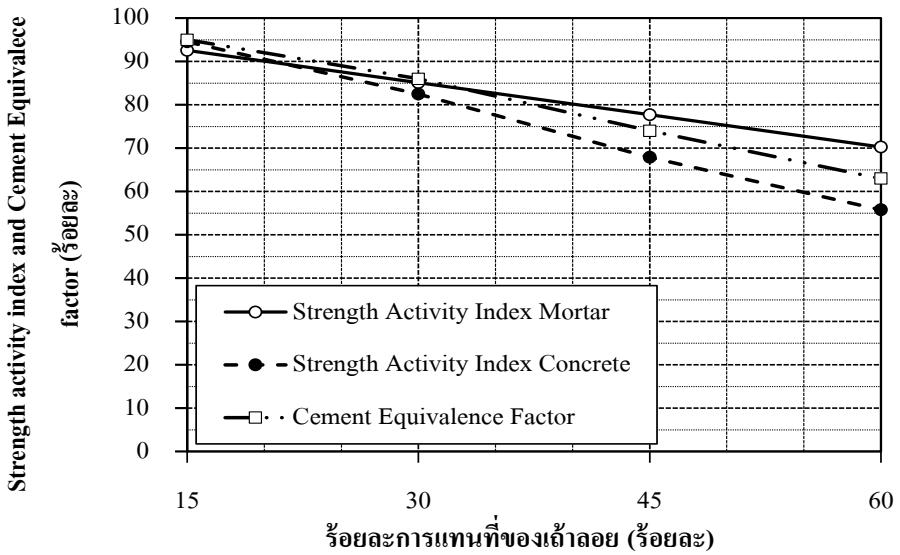
รูปที่ 10 แผนภูมิแสดงการเคลื่อนที่ของเส้นเมื่อปรับค่า η = 0.86 ที่เถ้าลอยร้อยละ 30

ตารางที่ 2 ผลการหาค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์

ค่า	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอย (ร้อยละ)			
	15	30	45	60
η	0.95	0.86	0.74	0.63

6.6 ความสำพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกำลังและค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์

จากผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีกำลังและค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกันที่ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 30 แต่จะสังเกตจากแผนภูมิในรูปที่ 11 และตารางที่ 3 ว่าค่าของดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์และคอนกรีตมีความแตกต่างกันไม่มากนักแต่เมื่อผสมเถ้าลอยในคอนกรีตมากขึ้น และมีค่า W/C เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วน W/C ทำให้เกิดความแตกต่างของค่ากำลังอัด ซึ่งเป็นผลโดยตรงกับค่าดัชนีกำลังซึ่งแตกต่างจากมอร์ต้าร์ซึ่งควบคุมด้วยอัตราการไหลเพียงค่าเดียว



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ปริมาณเถ้าและค่าดัชนีกำลัง ค่าตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์

ตารางที่ 3 ผลการการเปรียบเทียบค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์

ค่า (ร้อยละ)	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอย (ร้อยละ)			
	15	30	45	60
Strength Activity Index Mortar	92.57	85.13	77.70	70.26
Strength Activity Index Concrete	94.56	82.50	67.90	55.79
Cement Equivalence Factor (η)	95	86	74	63

5. สรุปผล

จากการทดสอบทั้งหมดสรุปได้ว่าค่าดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งในการหาค่าประสิทธิผลเทียบกับซีเมนต์นั้นจะต้องใช้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นการไม่สะดวกและสิ้นเปลืองเป็นอย่างมาก ส่วนการทดสอบค่าดัชนีกำลังเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ทั้งยังเป็นวิธีการที่สะดวกและเข้าใจได้ง่าย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการนำค่าตัวแปรนี้ไปใช้ในการออกแบบคอนกรีตและเสนอเพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบวัสดุปอซโซลานเพื่อที่จะนำไปใช้ในการผสมคอนกรีตต่อไป

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ ซึ่งแสดงออกให้เห็นจากกำลังรับแรงอัด และทดลองผสมเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงทุกส่วนผสม ซึ่งมีผลมาจากเถ้าลอยซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยากับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เต็มที่ อาจต้องทำการศึกษาต่อไปว่าเถ้าลอยนี้มีลักษณะเป็นผลึกหรือไม่ แม้ส่วนประกอบทางเคมีจะมีส่วนประกอบของออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดก็ตาม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอย่างสูงต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ภายใต้โครงการทุนวิจัยประจำปี 2556 ที่สนับสนุนเงินทุนและมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์สนับสนุนสถานที่ทำการทดสอบและเวลา สำหรับการวิจัยในครั้งนี้และท้ายที่สุดผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และ รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ทำให้ผู้เขียนรู้จักกับดัชนีกำลังและตัวแปรประสิทธิผลเทียบเท่าซีเมนต์และนำความรู้ไปพัฒนาการใช้วัสดุปอซโซลานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Coprocem. (2015, Jan. 11). “Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production” [Online].Available:http://www.coprocem.com/Guidelines/thai/full-version/002-chapter-1-6.pdf(in Thai)

[2] P.Chindaprasirt, Fly Ash in Concrete, Sustainable Infrastructure Research and Development Center Department of Civil Engineering Khon Kaen University, 2010(in Thai).

[3] ASTM Standard Specification for Coal Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM C618-98-1999.

[4] ASTM The Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement, ASTM C 311-98b - 1999.

[5] P. Khammathit, “Evaluation of Effciency Factor of Mae Moh Fly Ash”, M.S. Thesis, Khon Kaen University, 2014 (in Thai).

[6] W. Ken Day, Concrete Mix Design, Quality Control, and Specification, E&FN SPON, 1995.

[7] P. Chindaprasirt and C Jaturapitakkul, Cement, Pozzolan and Concrete, Thailand Concrete Assocoation, 2010 (in Thai).

[8] S. Boonlualoah, “Mix design of mae moh fly ash concrete,” M.S. Thesis, Kasetsart University,2001.

[9] A. Sompornsoem, “Parameter of fly ash concrete mix design,” M.S. Thesis, Kasetsart University, 2001.

[10] ASTM Standard Test Method for Slump of Hydraulic-CementConcrete, ASTMC143/C143M-98-1999.

[11] ASTM Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, C 109/C 109M-1999.

[12] ASTM Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 39-96-1999.

ประวัติผู้ประพันธ์

สำเนียง องสุพันธ์กุล : ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (โครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ งานวิจัยที่สนใจได้แก่วัสดุงานวิศวกรรมโยธา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว