



การพยากรณ์กำลังรับแรงกระทำของปอซโซลานคอนกรีตด้วยแบบจำลองฟัซซีลอจิก

Forecasting the Impact Strength of the Pozzolan Concrete with Adaptive
Fuzzy Logic models

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพยากรณ์กำลังรับแรงกระทำของปอซโซลานคอนกรีตด้วยแบบจำลองฟัซซีลอจิก

Forecasting the Impact Strength of the Pozzolan Concrete with Adaptive Fuzzy Logic models

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

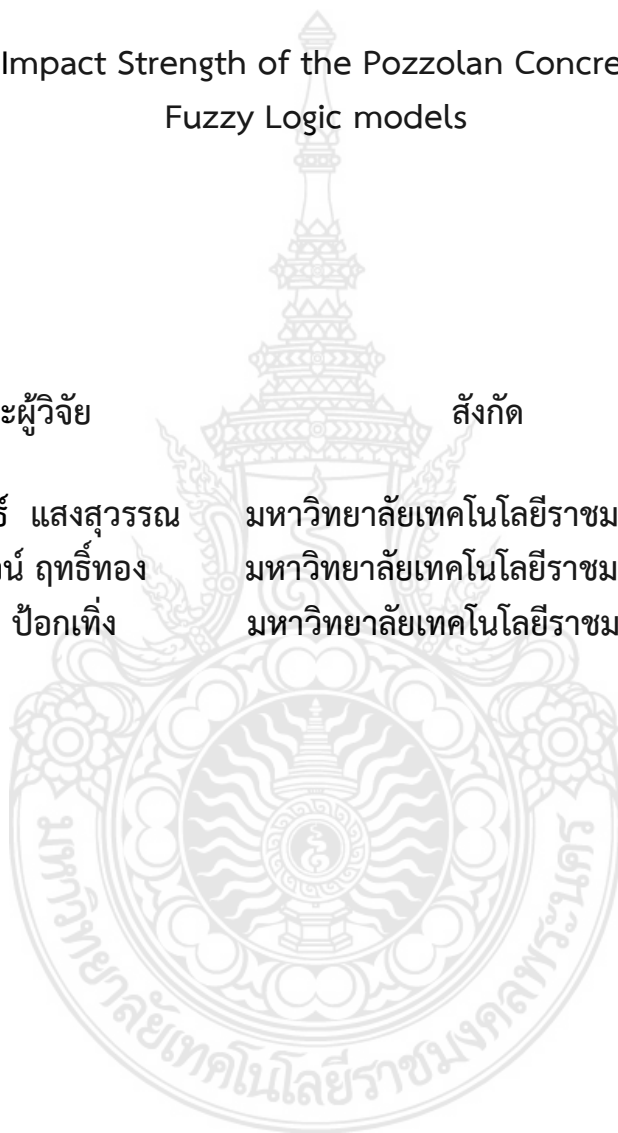
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผศ.ดร.วิโรจน์ ฤทธิ์ทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดร.สิงห์แก้ว ป็อกเทิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร





การพยากรณ์กำลังรับแรงกระทำของปอซโซลานคอนกรีตด้วยแบบจำลองฟัซซีลอจิก

Forecasting the Impact Strength of the Pozzolan Concrete with Adaptive Fuzzy Logic models

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พยากรณ์กำลังรับแรงกระทำของปอซโซลานคอนกรีตด้วยแบบจำลองฟัซซีลอจิก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาศักยภาพของคอนกรีตเชิงกลของปอซโซลานคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวและเถ้าลอยสำหรับกำลังอัด กำลังดัดและการรับแรงกระแทก โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยพิจารณาออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยและดินขาว 3 แบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/d) เท่ากับ 0.38, 0.55 และ 0.8 ตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 และแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนผสมทั้ง 3 แบบด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักควบคุม (w/b) ให้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอยและดินขาวและควบคุมค่าให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม. โดยหล่อเป็นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x20 เซนติเมตร ตัวอย่างแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และตัวอย่างแบบคานขนาด 10x10x35 เซนติเมตร หลังจากนั้นบ่มคอนกรีตในน้ำ 28 วัน และนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงกระแทก กำลังรับแรงดัด จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ขึ้นไป และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว ร้อยละ 15 จะมีค่ากำลังอัดที่สูงสุดจากนั้นค่ากำลังอัดจะลดลง กำลังดัดของคอนกรีตมวลเบา มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 สูงสุด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวจะให้กำลังดัดสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 กำลังดัด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10 เป็นค่าแรงดัดที่มากที่สุดและเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 กำลังกระแทกของคอนกรีตมีค่ามากที่สุดและสุดท้ายแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 แต่เมื่อคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและดินขาวจะได้ค่าแรงกระแทกที่ต่ำลง การใช้แบบจำลองฟิชเชิลอจิกเพื่อการพยากรณ์แรงอัด โดยใช้ผลจากการทดสอบเป็นกรณีศึกษาตัวอย่างรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกได้จากการกราฟของข้อมูลผลการทดสอบแรงอัด แรงดัด แรงกระแทกในอดีต ซึ่งพบว่ารูปแบบสามเหลี่ยม โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น (ต่ำ ปานกลาง และสูง) มีรูปแบบที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองฟิชเชิลอจิก สามารถใช้ทำนายให้เห็นแนวโน้มได้ดี

Abstract

This objective research to study the possibility of used properties pozzolan material for concrete cement the ternary blend by fly ash, metakaolin and silica powder by replacement cement partially on the strength for Flexural and impact by replace Portland cement. Consideration of concrete by varying the ratio there are three values are (w/d) of 0.38, 0.55 and 0.8 follow on standards ACI 211.1-91 and variable amounts of replacement cement some. The ternary blend of the fly ash, metakaolin and silica powder of percentage 0, 15, 20 and 25 and by weight of cement. and the control specimens (w/b) without contain fly ash, kaolin and silica powder, the slump test in the range of 3-5 cm and the use super plasticizer to control the slump test of concrete. By casting specimens of cylindrical diameter 10x20 cm cube 10x10x10 cm and the beam size 10x10x35 cm, after curing 28 days and test compressive, tensile and flexural strength of concrete, all specimens The results showed that The increase will help improve the quality of the concrete physical properties 35 percent up on the cement with clay, 15 percent will have the strength to most of the compression is reduced. The increased of compressive and Tension strength as the percentage decrease when replacing cement with fly ash, 35 percent up on replacing cement with clay to pull the maximum percentage of 10 bending when replacing cement with clay at a ratio of 10 percent is paid bending. The maximum value of fly ash, the flexural increased replace cement in the ratio of 50 per cent are increased the concrete with the most and the last place of cement. As a result of the porosity of the concrete with lower amounts of tightness concrete has increased. Fuzzy logic model is presented for predicting the strength for Flexural and impact by replace Portland cement. The result of the study from experimental case, the graph of membership function are present (low, medium and high). The results showed that the model Fuzzy Logic. Can be used fuzzy logics to predict as well.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการนำวัสดุพอลิไซลิกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและสิ่งเคราะห์นำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต เพื่อลดพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตซีเมนต์ การพยากรณ์กำลังรับแรงกระทำของพอลิไซลิกคอนกรีตด้วยแบบจำลองพีชชีลอจิกนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอและพัฒนาให้บรรลุวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี และต้องขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้อย่างดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์ในด้านการใช้ห้องทดลองปฏิบัติการ รวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

นายจักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ
ตุลาคม 2559



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ (ต่อ)	จ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญภาพ (ต่อ)	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ทฤษฎีสมมติฐานหรือกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีสมมติฐานหรือกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	4
2.2 วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน	4
2.3 แบบจำลองฟิชชีลอจิก	10
2.4 ฟิชชีลอจิก	11
2.5 ระบบนิเวศฟิชชี	13
บทที่ 3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	21
3.2 วิธีการดำเนินงาน	21
3.3 วิธีการทดสอบ	23
3.4 การวิเคราะห์ด้วยฟิชชีลอจิก	26
3.5 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟิชชีลอจิก	27
3.6 การทำนายค่าแรงอัดด้วยประมวลผลแบบฟิชชีลอจิก	32
3.7 การทำนายค่าแรงตัดด้วยประมวลผลแบบฟิชชีลอจิก	35

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การทำงานแบบจำลองฟuzzyลอจิก	11
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟuzzy	12
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้	13
ภาพที่ 2.4 การรับแรงกระทกของคอนกรีตผสมเ้าลอย	18
ภาพที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงกระทก	24
ภาพที่ 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดุดกลืนพลังงานจากการทดสอบแรงกระทก	25
ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงผลของปริมาณของคาร์บอนที่มีต่อวิธีการทดสอบ mpact energy	26
ภาพที่ 3.4 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของเปอร์เซ็นต์ปอซโซลาน	27
ภาพที่ 3.5 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของภูมิภาคส่วนผสมของคอนกรีต	28
ภาพที่ 3.6 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำออกของแรงกระทก	28
ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟuzzy	29
ภาพที่ 3.8 ภาพแสดงกฎของฟuzzyที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูป If Then	30
ภาพที่ 3.9 ภาพ Surface กฎของฟuzzyด้านข้าง	30
ภาพที่ 3.10 ภาพ Surface กฎของฟuzzyด้านบน	31
ภาพที่ 3.11 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification เพื่อทำนายแรงกระทก	31
ภาพที่ 3.12 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำออกของแรงอัด	32
ภาพที่ 3.13 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟuzzyของแรงอัด	33
ภาพที่ 3.14 ภาพแสดงกฎของฟuzzyที่ของแรงอัด	33
ภาพที่ 3.15 ภาพ Surface กฎฟuzzyของแรงอัด	34
ภาพที่ 3.16 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification	34
ภาพที่ 3.17 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำออกของแรงอัด	35
ภาพที่ 3.18 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟuzzyของแรงดัด	36
ภาพที่ 3.19 ภาพแสดงกฎของฟuzzyที่ของแรงดัด	36
ภาพที่ 3.20 ภาพ Surface กฎฟuzzyของแรงดัด	37
ภาพที่ 3.21 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification เพื่อทำนายแรงดัด	37
ภาพที่ 4.1 ภาพผลลัพธ์ที่ได้กำลังอัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน	39
ภาพที่ 4.2 ภาพผลลัพธ์ที่ได้กำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน	41
ภาพที่ 4.3 ภาพผลลัพธ์ที่ได้พลังงานกระทกที่อายุการบ่มที่ 28 วัน	42
ภาพที่ 4.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยฟuzzy (wb=0.38)	44
ภาพที่ 4.5 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงดัดด้วยฟuzzy (wb=0.38)	45
ภาพที่ 4.6 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระทกด้วยฟuzzy (wb=0.38)	45
ภาพที่ 4.7 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยฟuzzy (wb=0.55)	46

ภาพที่ 4.8 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงตัดด้วยฟuzzy (wb=0.55)	46
---	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.9 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระแทกด้วยฟuzzy (wb=0.55)	47
ภาพที่ 4.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยฟuzzy (wb=0.80)	47
ภาพที่ 4.11 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงตัดด้วยฟuzzy (wb=0.80)	48
ภาพที่ 4.12 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระแทกด้วยฟuzzy (wb=0.80)	48
ภาพที่ 4.13 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงอัดด้วยฟuzzy	49
ภาพที่ 4.14 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงตัดด้วยฟuzzy	49
ภาพที่ 4.15 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงกระแทกด้วยฟuzzy	50



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ย	8
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a	9
ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.80)	22
ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.55)	22
ตารางที่ 3.3 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.38)	23
ตารางที่ 3.4 การเทียบค่าข้อมูลนำเข้าของเปอร์เซ็นต์ปอซโซลาน	27
ตารางที่ 3.5 การเทียบค่าข้อมูลนำเข้าของปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต	28
ตารางที่ 3.6 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟิซซี แรงกระแทก	28
ตารางที่ 3.7 กฎของฟิซซีของแรงกระแทก	29
ตารางที่ 3.8 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟิซซีของแรงอัด	32
ตารางที่ 3.9 กฎของฟิซซีของแรงอัด	33
ตารางที่ 3.10 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟิซซีของแรงดัด	35
ตารางที่ 3.11 กฎของฟิซซีของแรงดัด	36
ตารางที่ 4.1 กำลังอัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน	39
ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน	40
ตารางที่ 4.3 พลังงานกระแทกที่อายุการบ่มที่ 28 วัน	41
ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยฟิซซีลอจิก ที่ ค่า wb = 0.38	43
ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยฟิซซีลอจิก ที่ ค่า wb = 0.55	43
ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยฟิซซีลอจิก ที่ ค่า wb = 0.80	44

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันงานคอนกรีตสมัยใหม่ที่มีกำลังและความทนทานสูงมีบทบาทในงานคอนกรีตมากขึ้นการใช้สารผสมเพิ่มชนิดปอซโซลานเช่นเถ้าลอยและดินขาวในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นและมีโครงสร้างภายในที่แน่นขึ้นโดยสารผสมเพิ่มทั้งสองชนิดที่กล่าวมาเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเช่นโรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณวันละหลายหมื่นตันในการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้ได้เถ้าลอยลิกไนต์ที่มีคุณภาพที่ค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (by product) ดังนั้นปริมาณและราคาของสารผสมเพิ่มดังกล่าวจึงขึ้นกับกลไกการผลิตทางอุตสาหกรรม ดินขาว (Metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่ง ได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเช่นเดียวกับเถ้าลอย ในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวธรรมชาติหลายแห่ง แต่การใช้งานส่วนใหญ่มักจะอยู่ในอุตสาหกรรมเซรามิก ข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับการนำดินขาวมาใช้ในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อยซึ่งแตกต่างจากกรณีของเถ้าลอยที่ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายและนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไป วัสดุปอซโซลานดินขาวและเถ้าลอยโดยทั่วไปมีคุณลักษณะที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆให้ดีขึ้นได้ จึงได้มีการนำเอาดินขาวและเถ้าลอยไปใช้ในงานหลายๆด้าน เช่นการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตกำลังสูง (High Strength concrete) การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตให้ความร้อนต่ำ (Low heat concrete) และงานคอนกรีตคุณภาพสูงที่สามารถไหลเข้าแบบเองโดยไม่ต้องอาศัยการสั่นสะเทือน (self-compacting concrete, SCC)

ดังนั้นจากคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตที่มีดินขาวและเถ้าลอยเป็นส่วนผสมดังที่ได้กล่าวมาประกอบกับในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) จึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ลดน้อยลงโดยให้ความสนใจในการศึกษาทำวิจัยโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรมเกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ ในการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการรับแรงกระแทกของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านของกำลังรับแรงกระแทก กำลังอัด และกำลังดัด ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงสำหรับรับแรงกระแทกได้ดีและเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของปอซโซลานคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวและเถ้าลอยสำหรับกำลังอัด กำลังดัดและการรับแรงกระแทก



2. หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กำลังค้ำและการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Adaptive Fuzzy Logic Models เพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต

1.3 ขอบเขต

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงค้ำ กำลังค้ำ และการรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต
2. ออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยและดินขาว 3 แบบให้มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/d) เท่ากับ 0.55, 0.40 และ 0.32 ตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete”
3. แทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนผสมทั้ง 3 แบบด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 30 และ 45 โดยน้ำหนัก
4. ควบคุม (w/b) ให้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอยและดินขาวและควบคุมค่า Slump ให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม.
5. แบบจำลองที่นำมาสร้างเป็นแบบจำลองโพลีโนเมียลกำลังสองหลายตัวแปร

1.4 ทฤษฎีสมมติฐานหรือกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าแล้วคอนกรีตมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งได้จากการใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 - 1600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารประกอบหลักทางเคมีเช่น ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่ง จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและจากธรรมชาติ มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้และที่ใช้กันมากได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Metha,1977)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาวัสดุประสานประเภทปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพถึงพฤติกรรมการรับแรงกระแทก แรงค้ำ ลักษณะสมบัติ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว ความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตในด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเป็นที่ทราบกันดีอยู่



แล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งมีผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความพยายามจะใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ให้น้อยลง และได้พยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์โดยใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักให้มีประสิทธิภาพที่สม่ำเสมอสำหรับนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีวัสดุปอซโซลานผสมในโครงสร้างคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้งานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีต ตลอดจนการใช้เถ้าลอย (Fly ash) และดินขาว (Meta kaolin) ที่มีอยู่ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งนี้ได้เสนอขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีตและผลการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต การนำเอาพีซีซีลอจิก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในระบบปัญญาประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์แบบจำลองทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต ตัวแปรนำเข้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B), ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ (POR), และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (COS) โดยมีตัวแปรออกหรือผลลัพธ์คือ ค่ากำลังรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต (IPS) จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนผสมและผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 21 ตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเรียนรู้ของแบบจำลอง จากนั้นจะนำข้อมูลอัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 7 ตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง



ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีสัมพัทธ์ฐานหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าแล้ววาคอนกรีตมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งได้จากการใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1400-1600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารประกอบหลักทางเคมีเช่น ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่งจะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมีผลทำให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและจากธรรมชาติ มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้และที่ใช้กันมากได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash)ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Metha,1977)

2.2 วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน

1. วัสดุดินขาว

ดินขาว ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($Al_2SiO_5(OH)_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีผลึกเป็นลักษณะเป็นอัญรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุหลักของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะแปรผันที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru,2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild,1996) นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จิรวัดน์, 2546)



สำหรับในประเทศไทยมีรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดยอนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และ ลำปาง โดยนำดินขาวดิบมาเผาในช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผา คือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดปราจีนบุรี ให้ค่าดัชนีกำลังสูงสุดร้อยละ 131 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ(จิรวัดน์,2546) นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผา คือ 800 องศาเซลเซียส (จิรวัดน์, 2546)

1.1 ปฏิกริยาปอซโซลานิก

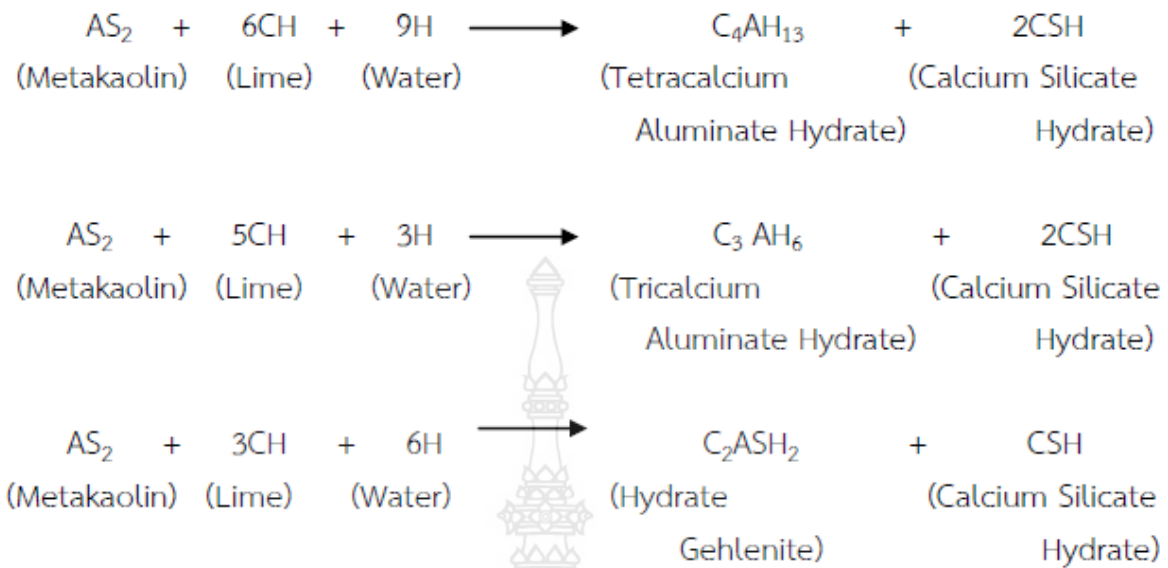
ปฏิกริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำ ปฏิกริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนต

ไฮเดรทในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ (Mindess, 1981)



Murat (1983) ศึกษาการเกิดปฏิกริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยผสมดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส กับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดสารประกอบ C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_2ASH_8 และ CSH ซึ่งชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นโดยสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้





ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยน เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นสมบัติต้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น มีรายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวเฉพาะของดินขาวและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Oriol and Pera, 1995; Wild and Khatib, 1997; Kostuch et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 - 40 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมด ภายในเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995) ผลการศึกษาของ Wild et al. (1997) พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวเฉพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม เป็น 15,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม จะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่าพื้นที่ผิวเฉพาะที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดในระยะยาว (90 วัน)

1.2 ผลกระทบของดินขาวต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังอัดที่ระดับหนึ่งแต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานร่วมผสมในคอนกรีตทั้งโดยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือวิธีผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต (Addition Method) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานนั้นๆ (ธีรราช และชัย, 2543) Wild et al. (1996) ศึกษาผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1 - 90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุด คือ



ร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของ Microfiller Effect ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวลงในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิเนียมไฮดรอกไซด์ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 - 14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม Curcio et al. (1998) ทำการศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ในปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่เท่ากัน และพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้งโดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง 28 วันแรก แต่ในระยะยาว (90 - 180 วัน) ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและจากการวิเคราะห์ Differential Thermal Analysis (DTA) หาปริมาณซิลิเนียมไฮดรอกไซด์พบว่าดินขาวที่ใช้การทดลองมีความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกับซิลิกาฟุ้ง Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของคอนกรีตปกติ และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาว จากการทดลองพบว่าการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่ช่วงอายุเริ่มต้นจะช้า แต่ในระยะยาวการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นโดย คอนกรีตที่ผสมดินขาวจะให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 25 นอกจากนี้คอนกรีตผสมดินขาวที่บ่มใน อุณหภูมิสูงจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงต้นเร็วขึ้น แต่ในระยะยาวอุณหภูมิไม่มีผลต่อการพัฒนากำลัง ต้านทานแรงอัด Sayamipuk (2000) ได้ศึกษาดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองในประเทศไทย โดยนำดินขาว ดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการทดลองมอร์ต้าผสมดินขาวแทนที่ ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้ นอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ เกิดขึ้นอนุภาคของดินขาวยังมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าเนื่องจากผลของ Microfiller Effect และจากการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในปริมาณที่เท่ากันโดยมีอัตราส่วนผสม ของน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันคือ 0.40 และ 0.50 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.40 จะสูงกว่า 0.50 เนื่องจากอนุภาคของ ดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าและช่วย ปรับปรุงในส่วนของ Interfacial Zone นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของมอร์ต้าผสม ดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่า ใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่าการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบาย ได้ว่าเป็นผลจากดินขาวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุเริ่มต้นซึ่ง สอดคล้องกับการศึกษาอื่น (Wild et al., 1996; จิรวัดน์, 2546)

2. วัสดุเถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วย ตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทาหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา และอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น



คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเถ้าลอยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่ใช้, ความละเอียดของถ่านหินที่บดก่อนเข้าเตาเผา, อุณหภูมิและความร้อนจากการเผา

2.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂), อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃), คัลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในช่วงประมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยและขบวนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอยของต่างประเทศความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือปริมาณคัลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจะอยู่ระหว่าง 9-17 % ในขณะที่เถ้าลอยส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะมี CaO อยู่ระหว่าง 2-7 % เท่านั้นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะในรอบ 10 ปีล่าสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณ องค์ประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก(ระหว่างปี พ.ศ.2533-2542)

Chemical composition	Average Value in Percentages (year)										ASTM-C618-94a
	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	requirement for Fly ash Class C
SiO ₂	37.8	42.8	40.3	43.1	52.8	40.6	40.6	41.5	37.3	47.2	} Min. SUM = 50
Al ₂ O ₃	20.5	23.3	24.0	20.2	18.0	22.8	23.6	28.1	22.3	22.1	
Fe ₂ O ₃	14.2	14.0	15.0	13.2	8.5	12.8	13.0	12.3	14.4	9.1	
CaO	17.4	10.5	11.2	13.0	13.3	14.4	13.0	10.0	11.4	9.4	
SO ₃	3.9	3.9	3.1	2.6	2.8	2.8	2.4	2.0	2.5	1.7	Max. = 5.0
MgO	3.3	2.4	2.8	2.7	1.4	2.5	2.5	1.2	2.7	3.3	Max. = 5.0
Na ₂ O	0.9	0.8	1.0	1.3	0.9	0.7	1.2	0.6	1.1	1.3	
K ₂ O	2.1	2.3	2.6	2.4	2.0	2.4	3.0	3.3	2.7	2.5	
Loss on	0.8	0.7	0.5	0.6	0.3	0.9	0.7	0.8	0.1	0.1	Max. = 6.0

ที่มา: ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ 2543 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย น. 7-19. ใน เอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักรวมเบาได้อาจพบในลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม สีของเถ้าลอยส่วนมากมีสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาล และสีเทาถึงดำ ขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.150 มิลลิเมตร) จากจุดเด่นของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลม หลังจากทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย



ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้คอนกรีตไหลได้ดี และเนื้อคอนกรีตแน่นทึบ

2.3 ประเภทของเถ้าลอย

สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a ได้กำหนดผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวต้องมีค่าอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับดังตารางที่ 3 ทั้งนี้การกำหนดดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างเพียงพอและยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วยและยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวในการเกิด Sulfate Attack ร้อยละของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) กำหนดไว้ไม่เกิน 1.5% ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวจากผลของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาในมวลรวมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวดัชนีกำลังเป็นค่าที่บ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยเปรียบเทียบกำลังอัดเป็นร้อยละของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วันกับมอร์ตาร์ถ้ามีค่าสูงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งกำหนดไว้อย่างน้อยร้อยละ 75

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), max %	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง, min %	75.0	75.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

2.4 ปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเคมี 2 ขั้นตอนด้วยกันโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยสารประกอบ C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท



(3CaO.2SiO2.3H2O :C3S2H3) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2 : CH) ปฏิกริยาดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ที่มา : A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc. New York.

สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นรู้น มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมีความเหนียว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสต์ มีคุณสมบัติเป็นต่าง ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้น โดยหลักๆแล้วจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาออกไซด์ (SiO2 : S) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอีก ดังนี้



ที่มา : Richard Helmuth. 1987. Fly ash in cement and concrete. Portland cement association, Skokie.

เอกสิทธิ์และวิศว (2542) พบว่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาอันสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยโดยซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย 15% จะมี CSH มากกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา 5% ที่อายุ 28 วันและ 10%ที่อายุ 56วัน CSHจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง Helmuth(1987) พบว่าเมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นช่องว่างใน CSH จะเล็กลง ความหนาของชั้นเถ้าลอยลดลงตามปฏิกิริยาปอซโซลานเกิด CSH มากขึ้น กำลังจึงมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์คือ

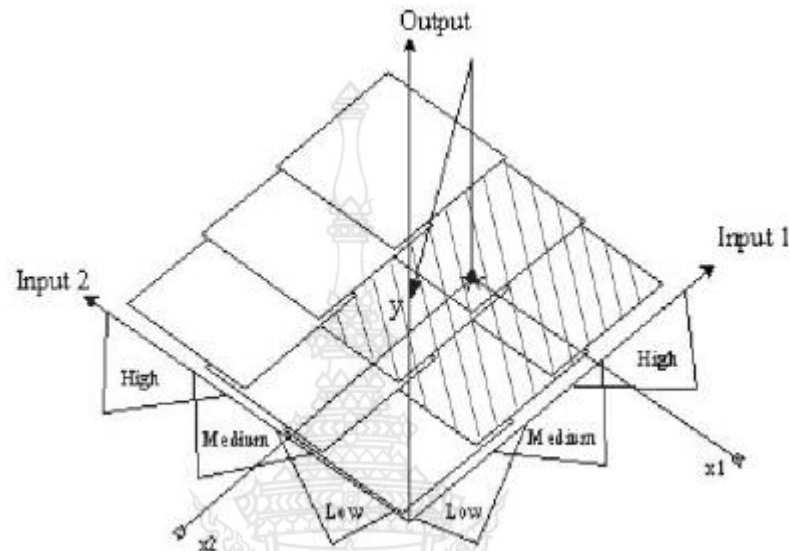
1. เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้ากว่า (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดหรือพื้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลาน) ทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำกว่า และมีการพัฒนากำลังช้ากว่า
2. เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ Ca(OH)2 ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาที่ผลิต Ca(OH)2 ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต้องรอให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นก่อน
3. ทำให้มีตัวเชื่อมประสานมากขึ้นซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทาน การต้านทานการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2.3 แบบจำลองฟัซซีลอจิก

แบบจำลองฟัซซีลอจิกทำงานบนค่าของฟังก์ชันในสมาชิก (Membership Function) ของฟัซซีเซต ซึ่งสร้างในช่วงข้อมูลนำเข้า ค่าฟังก์ชันสมาชิกอาจจะถูกแทนด้วยภาษาธรรมชาติ เช่น “ต่ำ” “ปานกลาง” “สูง” ในส่วนของผลการคำนวณก็จะทำงานบนฟังก์ชันสมาชิกเช่นเดียวกัน แบบจำลองจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้า และผลการคำนวณโดยการใชกฎของฟัซซี ดังตัวอย่างเช่น If Input1 is Low and Input 2 is High then Output is Medium. เนื่องจากค่าฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต ที่เป็นภาษา ธรรมชาติจะเหลื่อมกัน ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงไม่สามารถกำหนดค่าได้ชัดเจน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยกฎของฟัซซี



ซึ่ง รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของแบบจำลองฟัซซีลอจิก ในสถานการณ์ที่มีตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปร และตัวแปรผลการคำนวณ 1 ตัวแปร เมื่อเวกเตอร์ของตัวแปรนำเข้าถูกป้อนเข้าไปในแบบจำลองค่าฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรนำเข้าจะถูกกำหนด ตัวอย่างเช่น X_1 เป็นสมาชิกของ High และ Medium ในขณะที่ X_2 เป็นสมาชิกของ Low และ Medium กรณีนี้ทำให้มีการใช้กฎของฟัซซี 4 กฎจากทั้งหมด 9 กฎ ซึ่งแสดงโดยพื้นที่แรเงาในรูปที่ 1



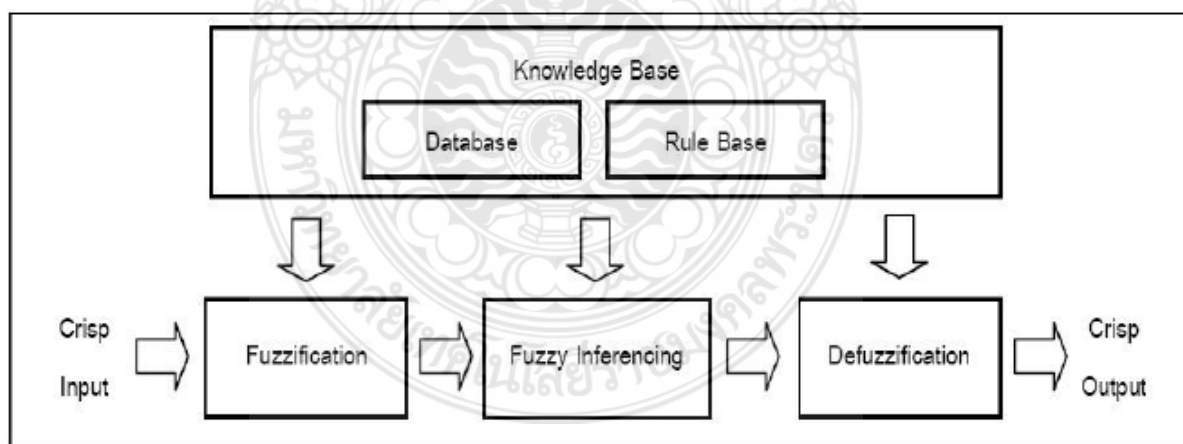
ภาพที่ 2.1 การทำงานแบบจำลองฟัซซีลอจิก

ภายหลังจากการกำหนดค่าฟังก์ชันสมาชิกของข้อมูลนำเข้าแบบจำลองจะทำการประยุกต์ใช้ Fuzzy Operator (And , Or) เพื่อป้องกันความสัมพันธ์ของข้อมูลนำเข้าแต่ละตัว จากนั้นจึงทำการหาค่าฟังก์ชันสมาชิกของผลการคำนวณ โดยการใช้ Implication Operator ใน Inference Engine ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟัซซีแต่ละกฎ (Zadeh Max – Min Implication Operator, Mamdani Min Implication Operator และ Lasso Product Implication Operator) ในขั้นตอนถัดมาเป็นการรวมกฎของฟัซซีที่เป็นไปได้ (Aggregate the Output) แล้วจึงทำการแปลงค่าจากฟังก์ชันสมาชิกของผลการคำนวณไปเป็นค่าทางกายภาพ (Defuzafication) ในทางปฏิบัติการหากฎของฟัซซีสำหรับแบบจำลองฟัซซีลอจิก โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ หาจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ และจากผลของความสัมพันธ์ของข้อมูลในอดีต ในกรณีที่ปัญหาต่างๆ กฎของฟัซซีอาจจะสามารถคำนวณจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญได้ อย่างไรก็ตามในปัญหาที่ยาก และสลับซับซ้อน เช่น กรณีของการพยากรณ์น้ำท่วม ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหากฎของฟัซซีจากความสัมพันธ์ของข้อมูลในอดีตที่ผ่านมา

2.4 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic, FL)



ฟuzzyลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือ (FL) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความคลุมเครือ ไม่ชัดเจน คล้ายกับตรรกะทางความคิดของมนุษย์ คิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ที่อาศัยฟuzzyเซต (Fuzzy Set) เพื่อสื่อถึงความไม่แน่นอน (L. A. Sadeh, 1965) โดยในฟuzzyเซตนี้จะกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งแตกต่างจากเซตแบบฉบับ (Classical Set) ที่มีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกเพียงสองค่าเท่านั้นคือ 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิก และ 1 หมายถึงเป็นสมาชิก การกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่สนใจนั้นอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันซิกมอยด์ ฟังก์ชันเกาส์เซียน เป็นต้น การเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะขึ้นอยู่กับข้อมูลของตัวแปรนั้นๆ นอกจากนี้ ฟuzzyเซตยังใช้กับตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic Variables) เพื่อแสดงคุณภาพหรือปริมาณได้อีกด้วย (พยุง มีสัจ, 2551) โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟuzzy แสดงดังรูปที่ 2 โดยการทำงานของระบบฟuzzy มี 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การแปลงค่าของข้อมูลนำเข้าเป็นค่าฟuzzyนำเข้า (Fuzzification) เป็นการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้า (Crisp Input) โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ขั้นตอนที่ 2 การอนุมานหรือตีความ (Fuzzy Inferencing) เป็นการนำค่าฟuzzyนำเข้าไปตีความหรืออนุมานผ่านกฎฟuzzyที่ตั้งขึ้นมาและได้ผลลัพธ์เป็นค่าฟuzzyส่งออก โดยกฎฟuzzyที่นิยมใช้คือ กฎฟuzzyแบบ ถ้า-แล้ว (Fuzzy If-Then Rule) ที่อาศัยหลักการของเหตุและผล และในขั้นตอนสุดท้าย การนำค่าฟuzzyให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นการนำค่าฟuzzyส่งออกมาแปลงเป็นค่าปกติ (Crisp Output) ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีถ่วงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการทำงานของ FL คล้ายกับ ANN ในการประมาณค่าความสัมพันธ์ ต่างกันตรงที่ FL ไม่ได้ใช้การเรียนรู้ แต่อาศัยองค์ความรู้ที่อยู่ในฐานความรู้ (Knowledge Base)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟuzzy

FL ถูกนำไปใช้ในการพยากรณ์เนื่องจากมีจุดเด่นตรงที่มีตรรกะการใช้เหตุผลเหมือนมนุษย์และใช้ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญมากกว่าการใช้ทฤษฎี นอกจากนี้ยังสามารถรองรับกับพฤติกรรมแบบพลวัต (Dynamic Behaviors) รวมถึงความไม่แน่นอนได้ด้วย เช่น มีการนำ FL ไปใช้พยากรณ์การใช้พลังงานใน

ระบบการผลิตที่จะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลง (H.C.W.Lau,et.al ,2008) ผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยในการวางแผนที่เหมาะสมเพื่อรักษาประสิทธิภาพการผลิตให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ หรือการใช้ FL ในการพยากรณ์ยอดขายในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มที่ความต้องการของลูกค้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยที่ยอดขายเป็นแบบฤดูกาลและมีช่วงอายุของสินค้าสั้น (S. Thomassey, 2010) แต่ทั้งนี้ FL เองก็มีข้อจำกัดในการใช้เช่นกัน กล่าวคือ FL เป็นการประมาณโดยใช้ตรรกะภายใต้ความไม่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง นอกจากนี้ การที่ FL ไม่มีความสามารถในการเรียนรู้ด้วยตัวเอง จึงไม่สามารถใช้หาคำตอบของปัญหาที่ไม่มีใครรู้คำตอบ ดังนั้นผู้เชี่ยวชาญจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการตั้งกฎฟัซซีในฐานความรู้ หากไม่สามารถหาผู้เชี่ยวชาญมาช่วยได้ก็ไม่สามารถใช้ FL ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 ระบบนิวโรฟัซซี (Neuro-Fuzzy System)

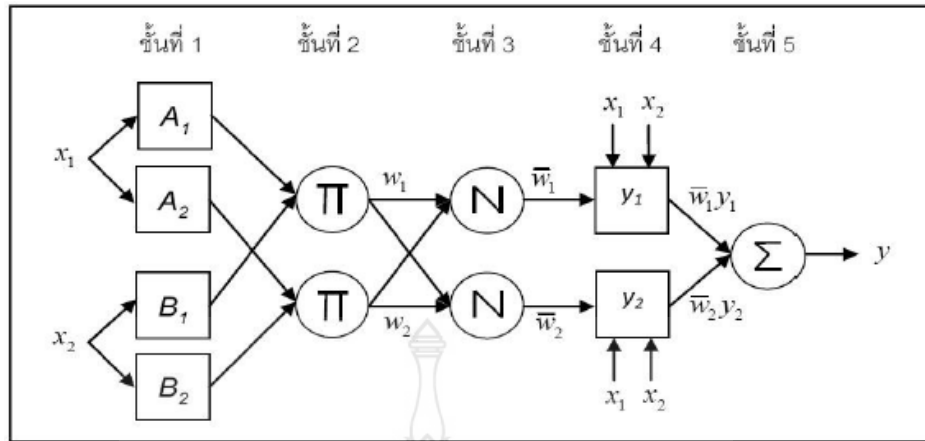
วิธีต่างๆทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไปต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ไม่มีวิธีใดที่จะดีกว่าวิธีอื่นในหลายๆด้าน ยกตัวอย่างเช่น ANN มีข้อดีตรงที่มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำรูปแบบต่างๆได้ และยังสามารถปรับแต่งความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในโครงข่ายได้ แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลของการตัดสินใจได้ ในขณะที่ FL มีจุดเด่นตรงที่มีการใช้เหตุผลในเชิงตรรกะเหมือนความคิดของมนุษย์ สามารถอธิบายการตัดสินใจได้จากกฎฟัซซีและสามารถใช้กับข้อมูลที่คลุมเครือได้ แต่ข้อเสียของ FL อยู่ตรงที่ไม่สามารถเรียนรู้และปรับแต่งกฎต่างๆด้วยตัวเอง ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีความรู้มากำหนดโครงสร้างและกฎให้ ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยสนใจนำวิธีต่างๆมาผสมกันเป็นระบบผสม (Hybrid System) เพื่อนำข้อดีของแต่ละวิธีมารวมกันและขจัดข้อจำกัดของแต่ละวิธีออกไป หนึ่งในระบบผสมดังกล่าวได้แก่ การนำ ANN ผสมกับ FL ได้เป็น ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟัซซี หรือ ระบบนิวโรฟัซซี ซึ่งระบบนิวโรฟัซซีที่เป็นที่นิยมได้แก่ ระบบ อนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems, ANFIS) ที่เสนอโดย (J.-S. R. Jang, 1993) ในปี ค.ศ. 1993 และมีโครงสร้างพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีที่มีข้อมูลนำเข้า 2 ตัว คือ x_1 และ x_2 และมีข้อมูลออกเพียงตัวเดียว คือ y และมีกฎฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno-Kang (TSK) จำนวน 2 กฎ ดังนี้

กฎข้อที่ 1: ถ้า x_1 คือ A_1 และ x_2 คือ B_1 แล้ว $y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

กฎข้อที่ 2: ถ้า x_1 คือ A_2 และ x_2 คือ B_2 แล้ว $y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

โดยที่ A_1 A_2 B_1 และ B_2 เป็นฟัซซีเซตของพจน์ภาษา เช่น เล็ก กลาง ใหญ่ ส่วน p_1 p_2 q_1 q_2 r_1 และ r_2 เป็นพารามิเตอร์ของข้อตามของกฎฟัซซี โหนดรูปสี่เหลี่ยมแสดงถึงโหนดที่มีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ในขณะที่โหนดรูปวงกลมแสดงถึงโหนดที่ไม่สามารถปรับค่าของพารามิเตอร์ได้





ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟซซีแบบปรับตัวได้

โครงสร้างของ ANFIS แบ่งออกเป็น 5 ชั้น ได้แก่

ชั้นที่ 1 ทำหน้าที่แปลงข้อมูลนำเข้าเป็นค่าฟัซซีโดยการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจเป็นฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำหรือฟังก์ชันอื่น ๆ ที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ เช่น ฟังก์ชัน สามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู และโหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ สามารถปรับค่าได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในโหนดนี้หมายถึงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เรียกว่า พารามิเตอร์ของข้อตั้ง (Premise Parameters)

ชั้นที่ 2 ทำหน้าที่คูณสัญญาณที่ส่งมาจากชั้นที่ 1 เข้าด้วยกันโดยใช้ T-norm Operator และส่งออกไปยัง ชั้นที่ 3 ซึ่งจำนวนโหนดในชั้นนี้มีจำนวนเท่ากับจำนวนของกฎฟัซซีและสัญญาณที่ส่งออกไป (w) เป็น Firing Strength ของกฎแต่ละข้อ โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับ ค่าพารามิเตอร์ได้

ชั้นที่ 3 ทำหน้าที่ปรับค่า Firing Strength ให้มีผลรวมจากกฎทุกข้อมีค่าเป็นหนึ่ง โดยการหารค่า Firing Strength ด้วยผลรวมของ Firing Strength จากกฎทุกข้อ ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า Normalized Firing Strength (w) โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

ชั้นที่ 4 ทำหน้าที่คำนวณผลลัพธ์จากข้อตามของกฎฟัซซี โดยได้ผลลัพธ์เป็น $w_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i)$ สำหรับกฎ ข้อที่ i โหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงว่าพารามิเตอร์ของโหนดนี้ (p_i , q_i และ r_i) สามารถปรับค่าได้ พารามิเตอร์เหล่านี้เรียกว่า พารามิเตอร์ของข้อตาม (Consequent Parameters)

ชั้นที่ 5 ทำหน้าที่รวมสัญญาณจากทุกโหนดของชั้นที่ 4 เข้าด้วยกัน โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

การเรียนรู้ของ ANFIS จะใช้ขั้นตอนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid Learning Algorithm) จากวัฏจักรการเรียนรู้แบบสองทาง โดยในการคำนวณไปข้างหน้า (Forward Pass) จะปรับค่าพารามิเตอร์ของข้อตามโดยใช้วิธีการประเมินกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Estimate) ในขณะที่การคำนวณย้อนหลัง (Backward Pass) จะใช้วิธีปรับตามความลาดชัน (Gradient Descent) สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของข้อตั้ง การใช้ ANFIS ในการพยากรณ์เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติในการเรียนรู้และการใช้เหตุผลทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น เช่น การใช้ ANFIS ในการพยากรณ์การใช้พลังงานของ

อาคารในระหว่างการออกแบบอาคารขั้นต้น ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้เลือกระบบควบคุมที่เหมาะสมได้ (B. Bektas Ekici and U. T. Aksoy, 2011) ส่วนเรื่องข้อจำกัดของ ANFIS นั้น เวลาที่ ANFIS ใช้ในการเรียนรู้ เป็นสิ่งที่ผู้ใช้ ANFIS ต้องตระหนักถึง ปัญหานี้จะทวีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อใช้กับระบบที่มีพฤติกรรมแบบ พลวัตชนิดไม่เชิงเส้น (Non-linear Dynamic Behaviors) เพราะในระบบแบบนี้จะมีกฎฟuzzyแบบ ถ้า-แล้ว จำนวนมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการเรียนรู้เวลานานมากขึ้น จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานแบบทำงานทันที (Real-time Applications) แต่ก็มีวิธีที่จะช่วยจำกัดจำนวนของกฎฟuzzyได้โดยใช้การจัดกลุ่มข้อมูล (Data Clustering) เช่น การจัดกลุ่มแบบลบออก (Subtractive Clustering) (M. Askari and A. H. D. Markazi, 2012)

การศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรกโดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะ หลังมากขึ้น มีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อ เปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมี ส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดย ตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการ เชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และ ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้ แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้า ลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไป ปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับ งานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะ ยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจ ยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995) Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ Ca(OH)_2 และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮ เดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วน แคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเฟสที่ใช้เถ้าลอย ปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้า ทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง (solid-phase) และระดับของปฏิกิริยาไฮ เดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิจ (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวใน



เพสต์ ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการดูดตามช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับเถ้าลอย Sivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่า การก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ 7.5 ชั่วโมง ในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 3 ชั่วโมง Sivasundaram et al. (1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากเถ้าลอยบางชนิด และการหน่วงระยะเวลาก่อตัวนี้ยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้ Carette et al. (1995) ศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงเปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เพสต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเพสต์ของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยและอนุภาคของเถ้าลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเพสต์ให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (microaggregate) ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Zhang, 1995) Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการป่มแบบ adiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของเถ้าลอยยังเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและ Superplasticizer สามารถชะลอระยะเวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 15% ปรับปรุงคุณสมบัติทางการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากันเนื่องจากใน ความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า ประจิจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง 50% อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับโดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม ปริญาและอินทรัชย์ (2528) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นขัดขวางปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมี



รายงานว่เมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

1. กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ที่อายุแรกๆของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นน้อยกำลังอัดจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นส่วนใหญ่ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อยลง กำลังอัดจึงน้อยลงตามปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น Babu (1994) พบว่าสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกๆค่าที่อายุ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าลอย 15% จะไม่มีผลในการลดกำลังลงมากนักซึ่งอาจเนื่องมาจากว่าเถ้าลอยสามารถอุดช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ซึ่งกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงแรกๆ สามารถประเมินได้จากปริมาณของซีเมนต์เพียงอย่างเดียวโดยจะต้องมีการปรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เนื่องจากการที่น้ำทำให้เถ้าลอยเปียกด้วย เมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น CSH เพิ่มขึ้นอีกทำให้กำลังอัดเพิ่มมากกว่าคอนกรีตธรรมดาระยะเวลาที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยต้องรอ 1 ถึง 3 เดือน (Mokhtarzaden and French, 2000) นอกจากนี้ Helmut (1987) พบว่าการผสมเถ้าลอยจนถึง 20% จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 3-6 เดือนมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 30 และ 40% กำลังอัดจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าคอนกรีตจะมีอายุมากกว่า 28 วันแล้วก็ตาม (Wajdi, 1983) สำหรับการนำเถ้าลอยแม่เมาะมาใช้ในงานคอนกรีตนั้น สามารถนำเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 30 - 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งกำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงทัดเทียมหรือสูงยิ่งกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และที่ 91 วัน ยังเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 15-20% จากกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (สมชัย, 2542) นอกจากนั้น ประจิต (2526) พบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% สำหรับคอนกรีตอายุ 28 และ 45 วันตามลำดับ โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

2. กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังดึงของคอนกรีตนั้นเป็นกำลังดึงชนิดหนึ่ง ซึ่งกำลังดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมาก ถึงแม้ว่ากำลังดึงของคอนกรีตจะไม่ค่อยพิจารณาในการออกแบบ (เนื่องจากการสมมติให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้) แต่ก็มีความสำคัญเพราะการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ง่ายจากแรงดึง กำลังดึงของคอนกรีตโดยทั่วไปแบ่งตามการทดสอบได้ 3 ชนิดดังนี้

1. กำลังดึงโดยตรง (Uniaxial tensile strength) เป็นการทดสอบโดยให้แรงดึงโดยตรงกับชิ้นตัวอย่างคอนกรีต



2. กำลังดึงบนระนาบแตกร้า (Splitting tensile strength) การทดสอบนี้ใช้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนแล้วทดสอบโดยการให้แรงอัด

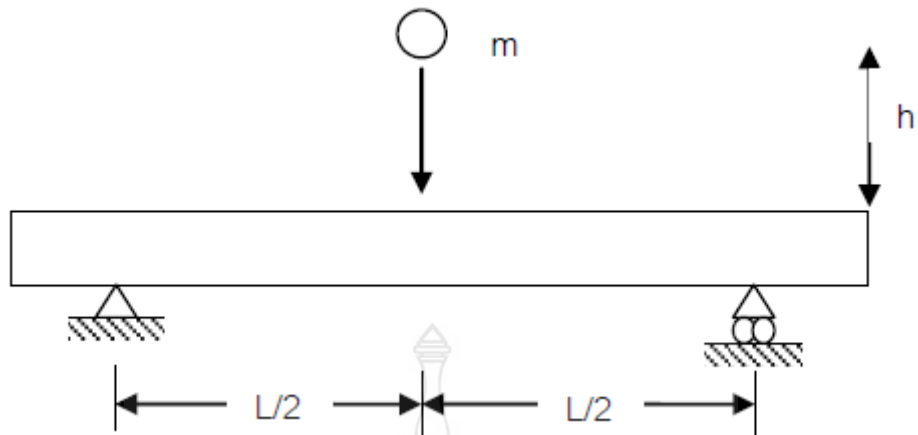
3. กำลังดัด (Flexural strength) เป็นการทดสอบคานคอนกรีตซึ่งจะหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตได้ในรูปของโมดูลัสแตกร้า วิธีการทดสอบทั้งสามนี้ให้ค่ากำลังที่ต่างกัน โดยกำลังดัดให้ค่าสูงสุดและกำลังดึงโดยตรงให้ค่าต่ำสุด เนื่องจากกำลังดัด และกำลังดึงบนระนาบแตกร้าจะเกี่ยวข้องกับการกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งไม่ใช่กำลังดึงที่แท้จริง Raphael (1984) พบว่ากำลังดัดมีค่ามากกว่ากำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต โดยกำลังดึงโดยตรงของคอนกรีตมีค่าประมาณ 3 ใน 4 ของกำลังดัด ผลของการใช้เกลือลอยต่อกำลังดึงขึ้นกับอายุของคอนกรีต โดยในระยะแรกการผสมเกลือลอย จะทำให้กำลังดึงลดลงและจะทำให้กำลังดึงสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น Wajdi (1983) พบว่าคอนกรีตผสมเกลือลอย 30 และ 40% กำลังดึง (Splitting Tensile Strength) จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเกลือลอยในระยะแรกและหลังจาก 28 วัน ส่วนในคอนกรีตผสมเกลือลอย 20% กำลังดึงในช่วงแรกจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเกลือลอย แต่ที่ 91 วันจะมีกำลังดึงสูงกว่ากำลังดึงของคอนกรีตไม่ผสมเกลือลอย ที่มีอายุ 28 วัน Kukubu (1975) พบว่าที่อายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเกลือลอย 25% จะมีกำลังดึง สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเกลือลอยที่กำลังอัดเดียวกัน L. Lam (1998) พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกลือลอย ในสัดส่วน 15 ถึง 25% จะให้ผลดีต่อกำลังดึงมากที่สุด และเมื่อผสมเกลือลอยมากขึ้นกำลังดึงที่อายุ 28 และ 56 วัน จะลดลงเล็กน้อย

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ อายุ กำลังอัด และชนิดของ มวลรวม คอนกรีตที่อายุช่วงแรก (หรือกำลังต่ำ) จะมีอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดสูง เมื่อคอนกรีตมี อายุมากขึ้น (หรือมีกำลังสูงขึ้น) อัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดจะลดลง เอกภพ (2541) พบว่าอัตราส่วน กำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงสุดในอายุช่วงแรกและมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น โดยในช่วงแรกกำลังดึงของคอนกรีตผสมเกลือลอยละเอียดมีค่าประมาณ 10% ของกำลังอัดและหลังจาก 7 วัน กำลังดึงจะมีค่าประมาณ 8 ถึง 9% ของกำลังอัด กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กัน คือเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น กำลังดัดก็จะสูง ขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเกลือลอยจะมีค่าสูงกว่า คอนกรีตธรรมดา แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นอัตราส่วนระหว่างกำลังดัดต่อกำลังอัดจะมีค่าลดลงทั้ง คอนกรีตผสมของเกลือลอยและคอนกรีตธรรมดา โดยกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมเกลือลอยและคอนกรีต ธรรมดาจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 13 ถึง 21 ของกำลังอัด (เจริญชาย และคณะ, 2540) แต่ Kasai (1983) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีต ไม่ได้ผลกระทบบจากเกลือลอยทั้ง class F และ class C

3. การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเกลือลอย

กำลังรับแรงกระแทกจะมีความสำคัญมากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำที่มีความเร็ว เช่น การตอกเสาเข็ม หรือการกระแทกเนื่องจากมวลวัตถุที่มีความเร็ว กำลังรับแรงกระแทก ของคอนกรีตโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก หรือจำนวนครั้งของการ กระแทก หรือการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก





ภาพที่ 2.4 การรับแรงกระทกของคอนกรีตผสมเ้าลอย

พลังงานความเครียด (Strain energy, U)

$$U = \frac{1}{2} P y \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทกกับการเอนตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน

$$P = \frac{48EI}{L^3} y \quad (2)$$

จากพลังงานความเครียดเท่ากับงานที่ทำโดยวัตถุมวล m จะได้

$$U = \frac{24EI}{L^3} y^2 \quad (3)$$

จากพลังงานความเครียดเท่ากับงานที่ทำโดยวัตถุมวล m จะได้

$$\frac{24EI}{L^3} y^2 = m(h+y) \quad (4)$$

แก้สมการ (4) จะได้ y จากนั้นนำค่า y แทนใน (2) จะได้แรงสถิตย์ (p) เทียบเท่าแรงกระทก ดังนั้นหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทก (σ) หาได้จาก

$$\sigma = \frac{MC}{I} = \frac{\left(\frac{PL}{4}\right)C}{I} \quad (5)$$

เมื่อ m คือน้ำหนักของวัตถุที่ปล่อยที่ความสูง h

h คือระยะที่ทำการปล่อยวัตถุ

L คือระยะระหว่างจุดรองรับ

E คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน



-
- I คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคาน
 - P คือแรงสถิตเทียบเท่าแรงกระทำ
 - y คือการแอนตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากแรงสถิต
 - M คือโมเมนต์คัดสูงสุด
 - C คือระยะจากแกนสะเทินถึงขอบของหน้าตัด

กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราการกระทำของแรงโดยกำลังของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการกระทำของแรงสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการกระทำของแรงช้าความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการคืบ (creep) เมื่อความเครียดถึงขีดจำกัดก็จะเกิดการวิบัติ แต่ที่อัตราการกระทำของแรงสูงจะได้รับผลจากการคืบน้อยลงกำลังจึงสูงกว่า ซึ่งผลของอัตราการกระทำของแรงจะมีผลต่อการดึงโดยตรงมากที่สุด มีผลต่อการคืบปานกลาง และมีผลต่อการอัดน้อยที่สุด (Suaris และ Shah, 1983) นอกจากนี้ Zielinski และ Reinhardt (1982) พบว่ากำลังรับแรงกระทำจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตเสมอ เนื่องจากคอนกรีต มีความสามารถในการดูดซับพลังงานความเครียดได้ดีกว่า โดยในการทดสอบกำลังดึง (Splitting tensile strength) จะเห็นว่าการเพิ่มความเร็วในการกระทำของแรงต่อคอนกรีต กำลังรับแรงกระทำจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตย์ประมาณ 80% Harris และคณะ (2000) พบว่าอัตราส่วนกำลังดึงแบบพลศาสตร์ต่อ กำลังดึงแบบสถิตย์ (Dynamic-static splitting tensile strength ratio) จะลดลงทีละน้อยเมื่อกำลัง ดึงมีค่าสูงขึ้น และอัตราส่วนนี้มีค่าตั้งแต่ 0.98 ถึง 1.73 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ซึ่งผลการทดสอบจะมี ความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อกำลังดึงสูงขึ้น Green (1964) พบว่าการทดสอบกำลังอัดแบบแรงกระทำจะมีการแปรปรวนของ ข้อมูลมากกว่าการทดสอบกำลังอัดแบบสถิต เพราะขณะเกิดแรงกระทำจะมีการกระจายของหน่วยแรง ไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น กำลังรับแรงกระทำยังขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตด้วย โดยความต้านทานต่อแรงกระทำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของมอร์ตาร์และความแข็งของมวลรวมหยาบ การใช้เถ้าลอยจะมี ผลกระทบความต้านทานต่อแรงกระทำทางอ้อมจากการมีผลต่อกำลังอัด (ACI 226, 1987) แต่ Welch และ Haisman (1969) พบว่ากำลังรับแรงกระทำมีความสัมพันธ์กับกำลังดึงของคอนกรีตมากกว่ากำลังรับแรงอัด ดังนั้นมวลรวมหยาบมีเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์จะสูงขึ้นทำให้สามารถรับแรงกระทำได้มาก



อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง UTM ทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต
2. เครื่อง Compression ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต
3. เครื่องทดสอบรับแรงกระแทกแบบลูกตุ้ม (pendulum)
4. แบบหล่อคอนกรีตตัวอย่าง ขนาด 7.5 x 7.5 x 7.5 เซนติเมตร และขนาด 3.8 x 7.5 x 30 เซนติเมตร
5. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดผสม 140-150 ลิตร เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
6. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)
7. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120 x 150 เซนติเมตร
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
9. เหล็กเส้นกลมRB 9 มม. และเหล็กข้ออ้อย DB12 มม.
10. ชุดทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต
11. โปรแกรมวิเคราะห์พีซี

3.2 วิธีการ

วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตตามวิธี ACI 211.1-91 ค่าการยุบตัว Slump Test 3-5 ซม. แทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนผสมทั้ง 3 แบบด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 0,15,20 และ 25 โดยน้ำหนัก และแก้ลดยในอัตราส่วนร้อยละ 0,15, 30 และ 45 โดยน้ำหนัก

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15
- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.30, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 4.00 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.65
- มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.34 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.00, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.70 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600 kg/m³
- น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต
- วัสดุปอซีโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาว)

3.2.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ทดสอบ



สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI 211.1-1 โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.43 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเท่ากับ 1 : 2.4 : 2.9 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. สรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.80), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacement cement	ปริมาณวัสดุประสาน	ปริมาณซีเมนต์	ปริมาณเถ้าลอย	ปริมาณดินขาว	หิน	ทราย	น้ำ
			(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	
OPC	0	-	261	-	-	721	1066	209
OPC+FA15	15	261	222	39	-	721	1066	209
OPC+FA45	30	261	183	78	-	721	1066	209
OPC+FA45	45	261	144	117	-	721	1066	209
OPC+MK15	15	261	222	-	219	721	1066	209
OPC+MK20	20	261	209	-	52	721	1066	209
OPC+MK25	25	261	196	-	65	721	1066	209

ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.55), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacement cement	ปริมาณวัสดุประสาน	ปริมาณซีเมนต์	ปริมาณเถ้าลอย	ปริมาณดินขาว	หิน	ทราย	น้ำ
			(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	
OPC	0	-	364	-	-	721	1066	209
OPC+FA15	15	364	309	55	-	721	1066	209
OPC+FA45	30	364	255	109	-	721	1066	209
OPC+FA45	45	364	200	164	-	721	1066	209
OPC+MK15	15	364	309	-	55	721	1066	209
OPC+MK20	20	364	291	-	73	721	1066	209
OPC+MK25	25	364	271	-	91	721	1066	209



ตารางที่ 3.3 ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.38), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacement cement	ปริมาณวัสดุประสาน	ปริมาณซีเมนต์	ปริมาณเถ้าลอย	ปริมาณดินขาว	หิน	ทราย	น้ำ
			(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	
OPC	0	-	568	-	-	721	1066	209
OPC+FA15	15	483	483	85	-	721	1066	209
OPC+FA45	30	483	398	170	-	721	1066	209
OPC+FA45	45	483	312	256	-	721	1066	209
OPC+MK15	15	483	483	-	85	721	1066	209
OPC+MK20	20	483	454	-	114	721	1066	209
OPC+MK25	25	483	426	-	142	721	1066	209

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตรวจสอบความยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C143-90a “Test method for slump of hydraulic cement concrete”

3.3.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : part 4 : 1970 “Methods of testing concrete for strength” โดยหล่อชิ้นตัวอย่างขนาด 3”x3”x3” ทำการบ่มชิ้นต่อเนื่องที่ 1,7 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังอัดโดยวางชิ้นตัวอย่างที่กึ่งกลางแท่นทดสอบให้แกนอยู่แนวศูนย์กลาง ของแท่นทดสอบให้แรงอัดด้วยอัตราสม่ำเสมอประมาณ 2.55 กก./ตร.ซม./วินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่า น้ำหนักที่ได้ หาค่ากำลังอัดของตัวอย่างจากการนำค่าน้ำหนักที่บันทึกได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

3.3.3 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)

ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : part 4 : 1970 โดยหล่อ ตัวอย่างหน้าตัดขนาด 1.5”x 3” ยาว 12” และจากนั้นบ่มชิ้นต่อเนื่องที่อายุ 7 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังดัด โดยวางตัวอย่างบนแท่นรองรับที่มีระยะระหว่างจุดรองรับ 20 ซม แล้วให้น้ำหนักกดลงบนจุดกึ่งกลาง ของช่วงคานด้วยอัตราประมาณ 0.27 กก./ตร.ซม./วินาที จนตัวอย่างวิบัติบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้แล้วหาค่า กำลังดัด (fb) ได้จาก

$$F_b = \frac{3pl}{2bd^2} \text{ กก./ตร.ซม.}$$

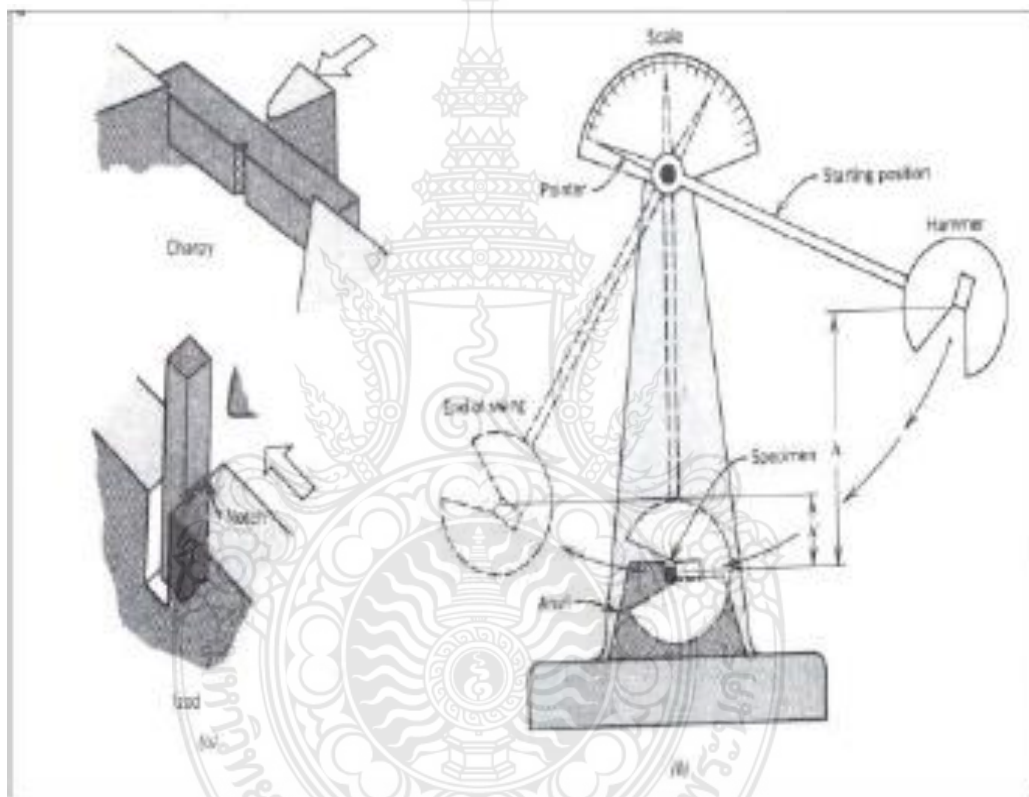
เมื่อ P = น้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อคาน (กก.)



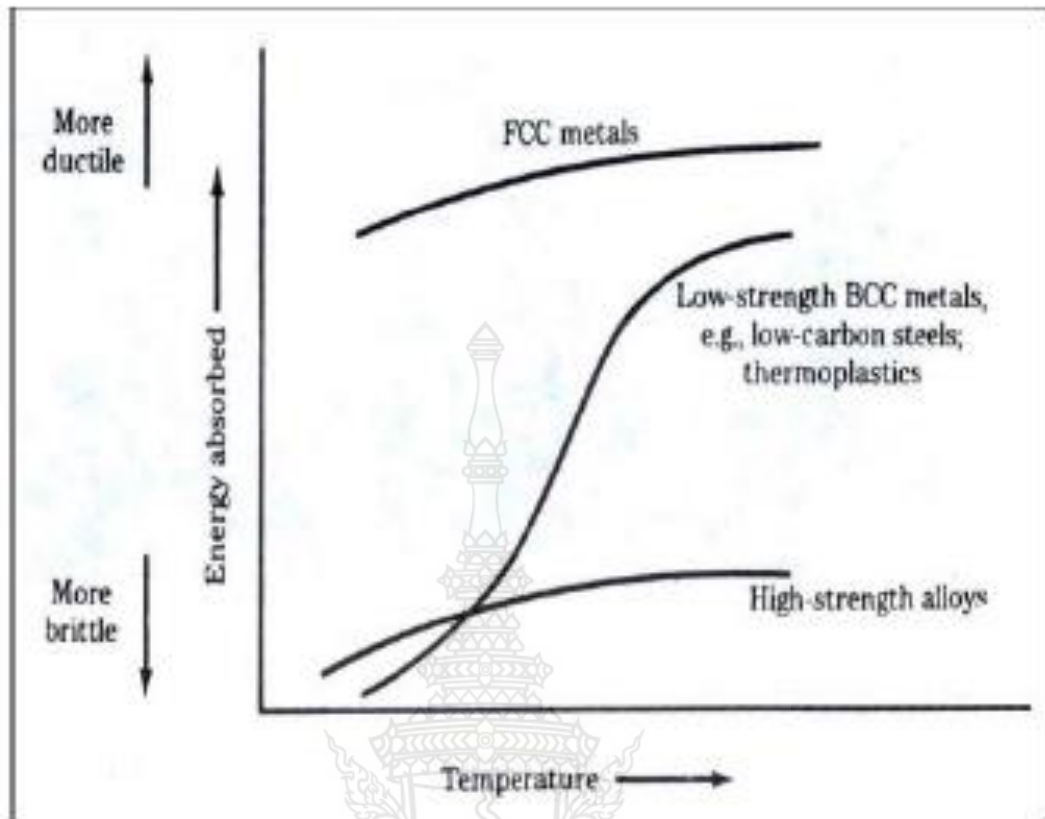
- b = ความกว้างของตัวอย่างที่วัดบริเวณรอยแตก (ซม.)
- d = ความลึกตัวอย่างที่วัดบริเวณรอยแตก (ซม.)
- L = ระยะระหว่างฐานรองรับของแท่นทดสอบ (ซม.)

3.3.4 การทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีต (Impact Strength)

ความแข็งแกร่งหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness) เป็นสมบัติของวัสดุอย่างหนึ่ง ที่เกี่ยวกับการดูดกลืนปริมาณพลังงานของวัสดุนั้นจะเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดก่อนจะเกิดการแตกหัก ซึ่ง นับว่ามีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม โดยพิจารณาจากความทนทานต่อแรงกระแทก (impact) โดยไม่เกิดการแตกหัก วิธีวัดความแข็งแกร่งของวัสดุที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง คือใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine) ดังภาพที่ 3.1

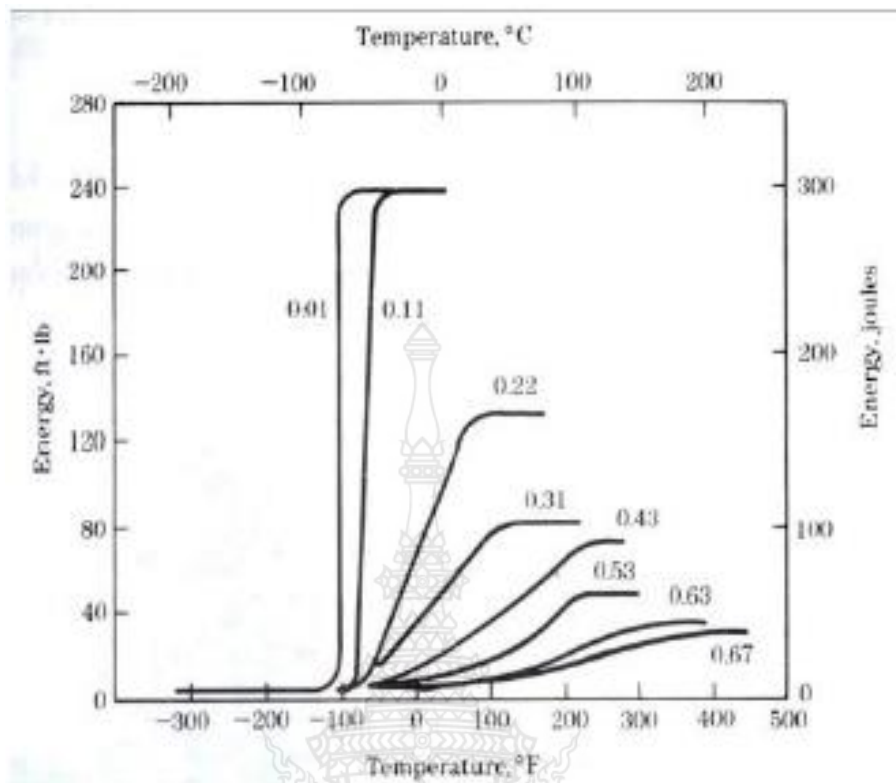


ภาพที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงกระแทก (a) แสดงตัวอย่างที่ใช้ Charpy and Izod test (b) แสดงภาพวาดของเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก



ภาพที่ 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดกลืนพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุบางชนิด

ภาพที่ 3.2 แสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดกลืนพลังงานของวัสดุบางชนิด Impact test นี้สามารถนำมาใช้ทดสอบหาช่วงของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสมบัติและพฤติกรรมของโลหะและ โลหะผสมจากอ่อน (ductile) ไปเป็นแข็งเปราะ นั่นคือ เหล็กอ่อนที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้ เหล็กแข็งมากขึ้น และดูดกลืนพลังงานน้อยลง ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนต่ำจะ ดูดกลืนพลังงานได้ดี คือ เป็นเหล็กที่อ่อนหรือเหนียวขึ้น แต่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่แคบ และเมื่อใช้อุณหภูมิ ต่ำการทดสอบ Fracture toughness ของโลหะและโลหะผสมได้มีการพัฒนาวิธีทดสอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ อีกดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงผลของปริมาณของคาร์บอนที่มีต่อวิธีการทดสอบ impact energy และ อุณหภูมิสำหรับเหล็กที่ทำให้ร้อนขึ้น

3.4 การวิเคราะห์ด้วยฟuzzyลอจิก

ฟuzzyลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้นำเอา ฟuzzyลอจิกข้อดีในเรื่องการมีเหตุผลเชิงตรรกะ เพื่อวิเคราะห์และทำนายโครงสร้างของระบบฟuzzyสามารถทำความเข้าใจได้เนื่องจากสามารถตีความให้ในรูปแบบ If-Then ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ และนอกจากนั้นฟuzzyลอจิกยังช่วยในการตัดสินใจที่คลุมเครือที่ยอมให้การตัดสินใจเป็นแบบส่วน ไม่ใช่ผิดหรือถูกเพียงสองสถานะ แต่จะเป็นดีกรีของความถูกหรือผิด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอยู่แล้ว โครงข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นด้านการเรียนรู้จากข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมมีการปรับแต่งความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในเครือข่ายที่มีการเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น มีการส่งผ่านข้อมูลที่จะประมวลผลจากอินพุตไปยังเอาต์พุตแบบขนาน การประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียมจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โครงข่ายประสาทเทียมก็มีจุดด้อยในด้านการตีความหาเหตุผล โครงข่ายประสาทเทียม ไม่สามารถให้เหตุผลได้ว่าเพราะเหตุใดจึงมีข้อสรุปออกมาดังที่ปรากฏที่เอาต์พุตของโครงข่าย จุดด้อยข้อนี้เป็นที่รู้จักกันคือกล่องดำจากข้อดีของฟuzzy ในด้านการให้เหตุผลเชิงมนุษย์และข้อดีโครงข่ายประสาทเทียมด้านการเรียนรู้จากข้อมูล เมื่อนำสองศาสตร์นี้มารวมกันจะกลายเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟuzzy ซึ่งเป็นระบบที่กระบวนการเรียนรู้ในตัวเอง และโครงสร้างของระบบสามารถตีความหมายและให้เหตุผลได้ เช่นเดียวกับระบบฟuzzy สำหรับข้อเสียของระบบฟuzzyก็คือ ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างซึ่งกฎและตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบเอง โครงสร้างของระบบจะถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในโดเมนที่กำลังพิจารณาร่วมกับ

นักเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ถ้าหากต้องการสร้างระบบเพื่อการวิเคราะห์โรคมะเร็ง แพทย์ผู้เชี่ยวชาญด้านโรคมะเร็งจะต้องเป็นผู้กำหนดกฎและตัวแปรต่าง ๆ ของระบบ และนอกจากนั้นแพทย์ผู้เชี่ยวชาญต้องตรวจสอบประเมินความถูกต้องของระบบ ซึ่งบ่อยครั้งในการสร้างระบบฟัซซีอาจไม่มีผู้เชี่ยวชาญในโดเมนดังกล่าว การสร้างระบบจึงอาจไม่สัมฤทธิ์ผล การที่ระบบฟัซซีไม่มีกระบวนการเรียนรู้ด้วยตนเองจึงถือเป็นข้อด้อย แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบันนักวิจัยได้มีการใส่กระบวนการเรียนรู้เข้าไปในระบบฟัซซีโดยอาศัยทฤษฎีการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

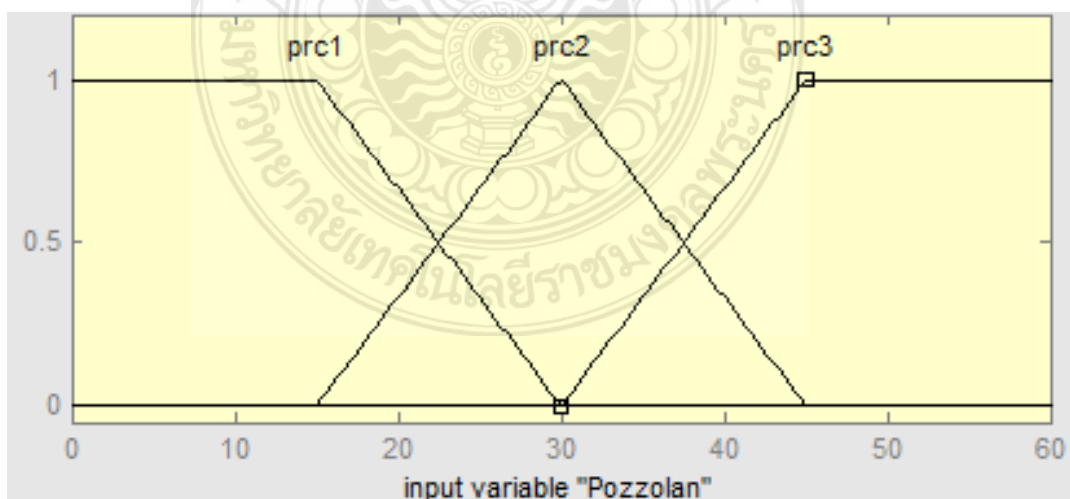
3.5 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนการประมวลผลวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการทนแรงกระแทก โดยวิธีการแบบฟัซซีลอจิก โดยทำการออกแบบงาน ที่มีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ส่วนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี เป็นการหาค่าข้อมูลนำเข้าของระบบ และหาช่วงข้อมูลนำเข้า โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หาช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ใส่ปอซโซลานแล้วมีผลต่อแรงกระแทก ขึ้นกับคุณลักษณะของส่วนผสมของอินพุต (Input) และความสำคัญต่อเอาต์พุต (Output) โดยมีของมูลนำเข้าเป็น เปอร์เซ็นต์ของปอซโซลาน (% pozzolan replacement cement) และปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต และกำหนดตัวแปรผลลัพธ์

ตารางที่ 3.4 การเทียบค่าข้อมูลนำเข้าของเปอร์เซ็นต์ปอซโซลาน

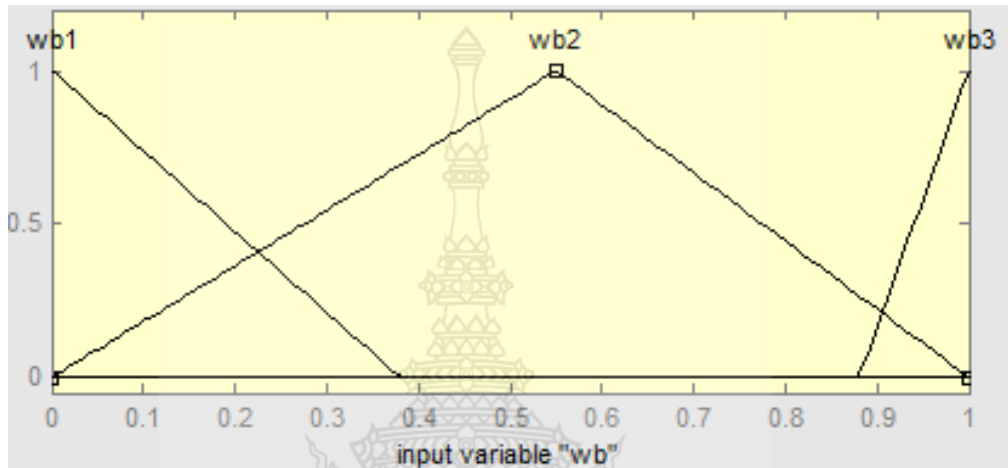
% pozzolan replacement cement	Quantized
prc>45	High
prc=30	Miduim
prc<15	Low



ภาพที่ 3.4 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของเปอร์เซ็นต์ปอซโซลาน

ตารางที่ 3.5 การเทียบค่าข้อมูลนำเข้าของปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

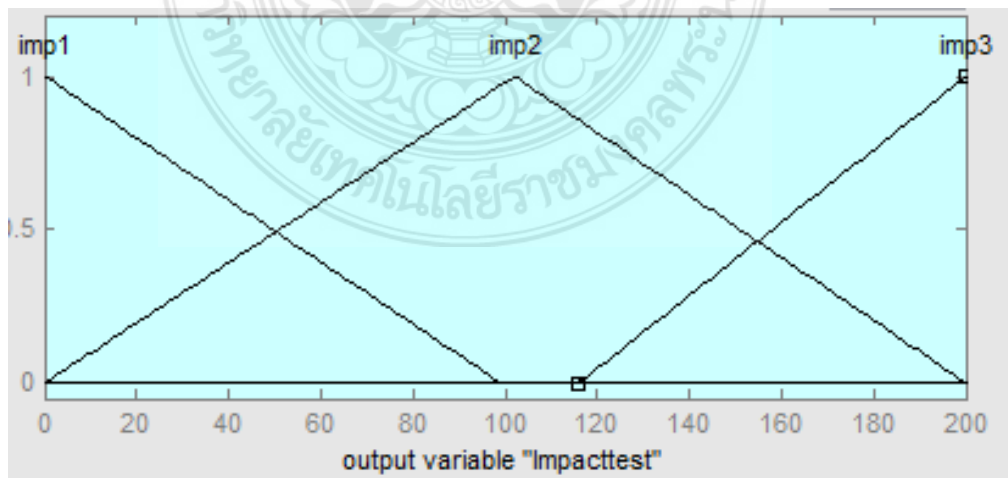
ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต	Quantized
$wb < 0.8$	High
$wb = 0.55$	Miduim
$wb > 0.38$	Low



ภาพที่ 3.5 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

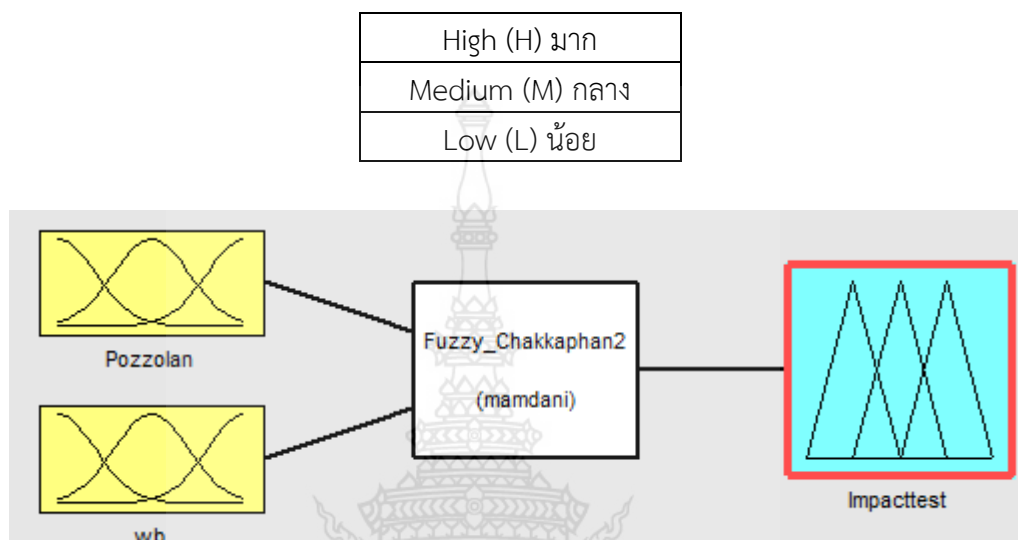
ตารางที่ 3.6 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟัซซี แรงกระแทก

แรงกระแทก (Impact test)	Assigned value
Impact test > 116	H
102	M
Impact test < 99	L



ภาพที่ 3.6 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำออกของแรงกระแทก

ขั้นตอนที่ 2 สร้างความสัมพันธ์กฎระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผลของผลการทดลอง โดยการเก็บข้อมูลในการทดสอบ 3 รูปแบบ โดยเขียนกฎการควบคุมระบบจากผลการทดลอง ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม การกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ



ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟัซซี

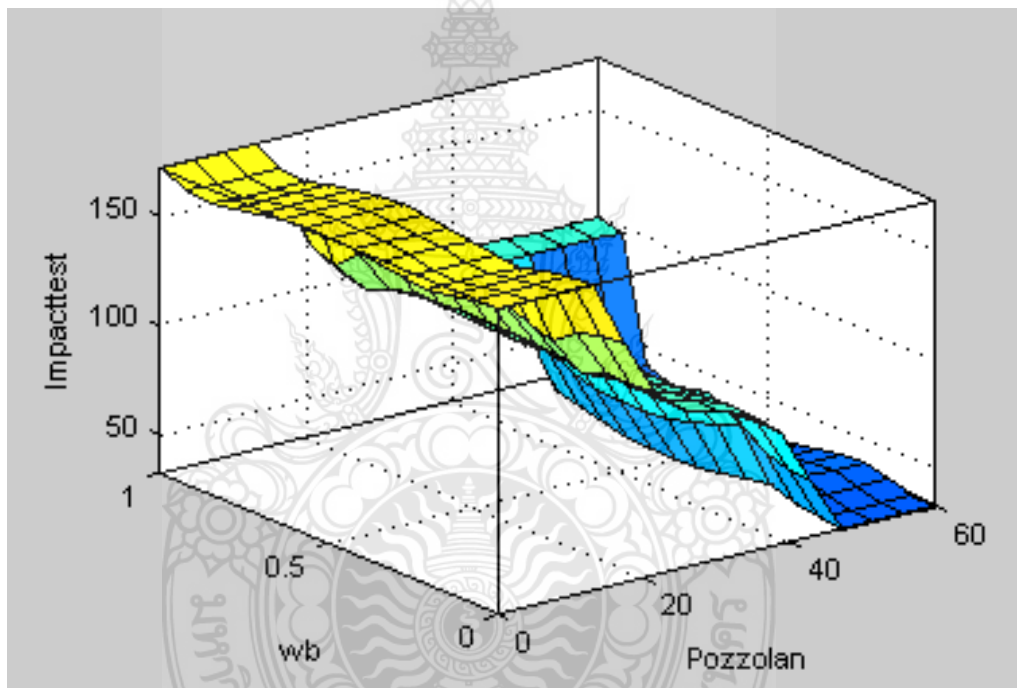
ขั้นตอนที่ 3 หาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้นจากการทดลองในบทที่ 4 ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยงานวิจัยนี้ได้ตั้งกฎตามการทดลองที่ได้ 9 ข้อ ดังตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 3.7 กฎของฟัซซีของแรงกระแทก

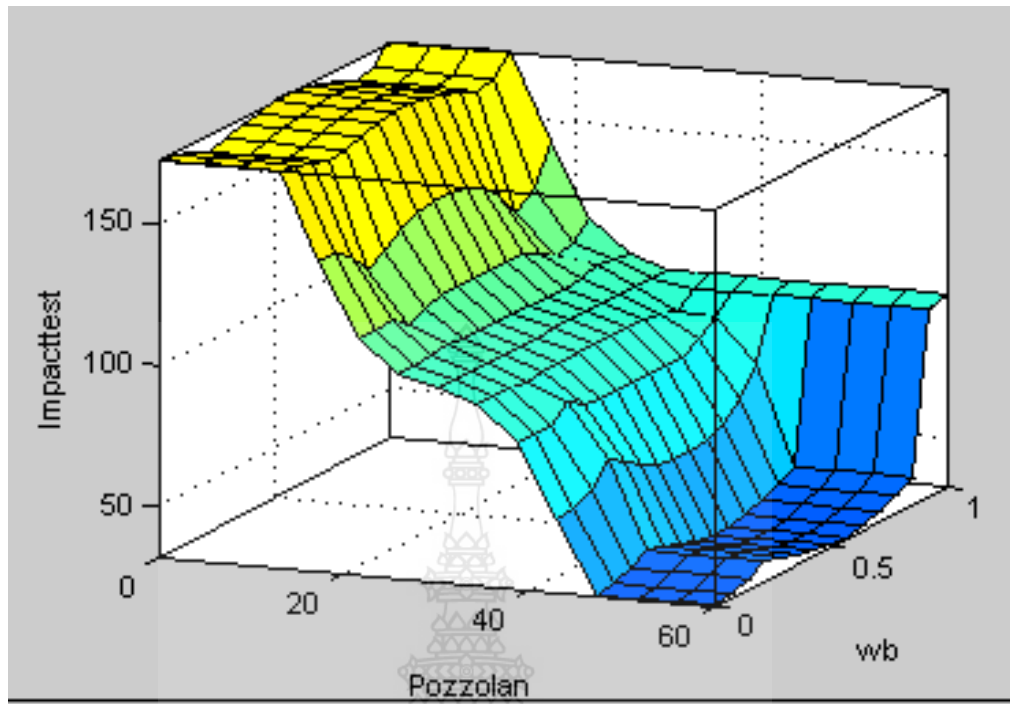
prc (Hor) wb (Ver)	H	M	L
H	Low	Medium	High
M	Low	Medium	High
L	Medium	Medium	High

1. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb1) then (Impacttest is imp3) (1)
2. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb2) then (Impacttest is imp3) (1)
3. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb3) then (Impacttest is imp3) (1)
4. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb1) then (Impacttest is imp2) (1)
5. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb2) then (Impacttest is imp2) (1)
6. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb3) then (Impacttest is imp2) (1)
7. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb1) then (Impacttest is imp1) (1)
8. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb2) then (Impacttest is imp1) (1)
9. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb3) then (Impacttest is imp2) (1)

ภาพที่ 3.8 ภาพแสดงกฎของฟัซซีที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูป If Then

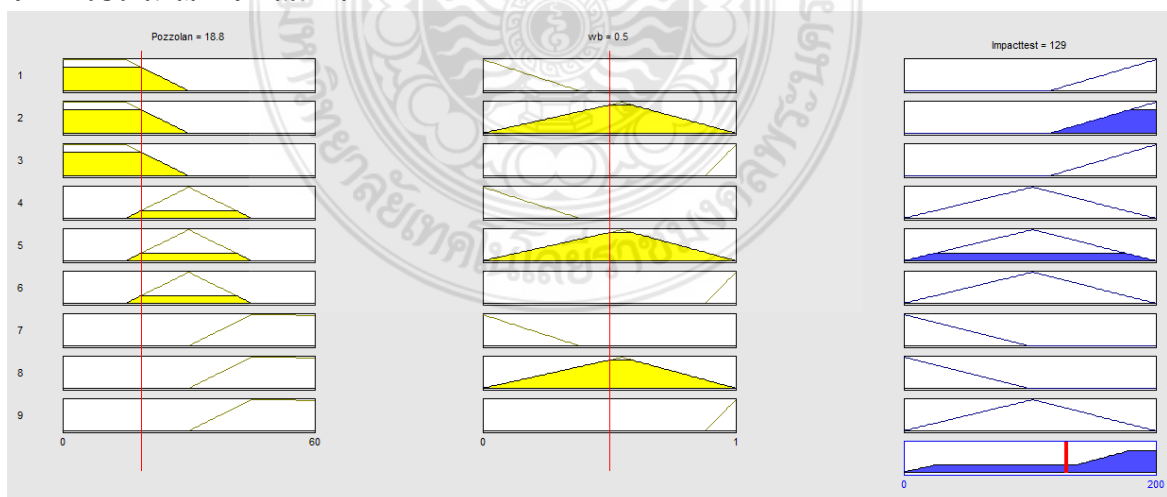


ภาพที่ 3.9 ภาพ Surface กฎของฟัซซีด้านข้าง



ภาพที่ 3.10 ภาพ Surface ภูมิของฟัซซีด้านหน้า

ขั้นตอนที่ 4 สรุปเหตุผลฟัซซี โดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตกลับมาให้เป็นเอาต์พุต และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity) โดยนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมวิธีการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) วิธีการที่เป็นเทคนิคการเลือกค่าสูงสุดหรือสรุปหาเหตุผลจากหลาย ๆ เซตมาเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบ และเลือกกระทำเพียงรูปแบบเดียว วิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการ



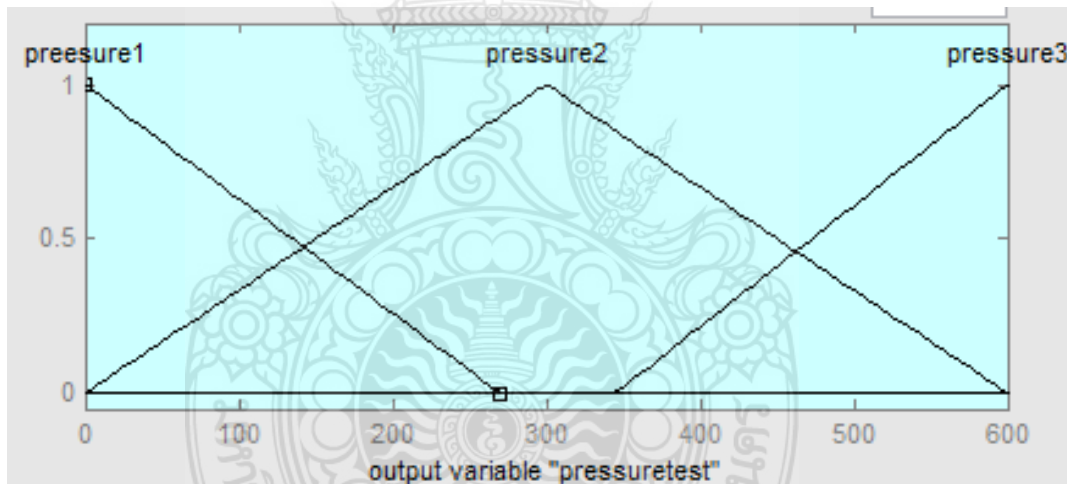
ภาพที่ 3.11 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification เพื่อทำนายแรงกระแทกของส่วนผสมปอซโซลาน

3.6 การทำนายค่าแรงอัดด้วยประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการทนแรงอัดนั้น โดยวิธีการแบบฟัซซีลอจิก โดยทำการออกแบบงาน โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ปอซโซลาน (prc) และสัดส่วนการผสม (wb) และทำการแปลงการอินพุตเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี เป็นการหาค่าข้อมูลนำเข้าของระบบ และหาช่วงข้อมูลนำเข้า โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หาช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ใส่ปอซโซลานแล้วมีผลต่อแรงอัด โดยใช้ตารางที่ 3.4 และ 3.5 จะทำการเพิ่มเติมเอาต์พุตของแรงอัดในการทำนายด้วยฟัซซีเพื่อดูความสอดคล้องของสัญญาณเอาต์พุตทั้ง 3 ดังกล่าว

ตารางที่ 3.8 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟัซซีของแรงอัด

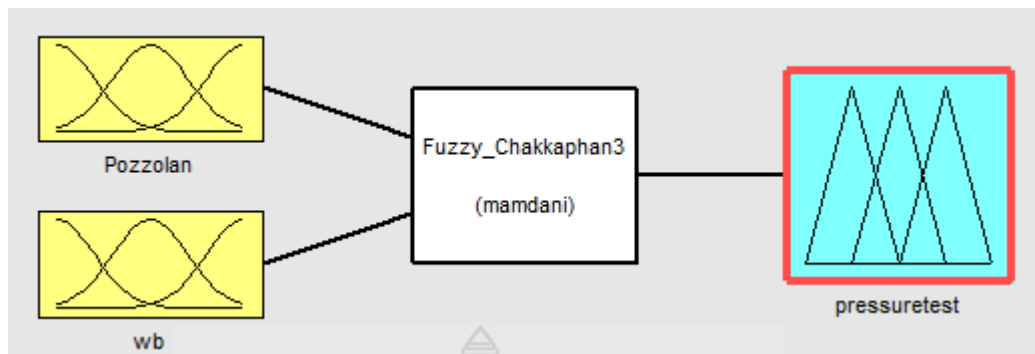
แรงกระแทก (Pressure test test)	Assigned value
Pressure test >345	H
300	M
Pressure test <270	L



ภาพที่ 3.12 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของแรงอัด (Pressure Test)

กฎการควบคุมระบบของแรงอัดจากผลการทดลองเพื่อการหาค่าการทำนายแรงอัดที่เหมาะสม การกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ยังคงใช้ 3 ระดับคือ

High (H) มาก
Medium (M) กลาง
Low (L) น้อย



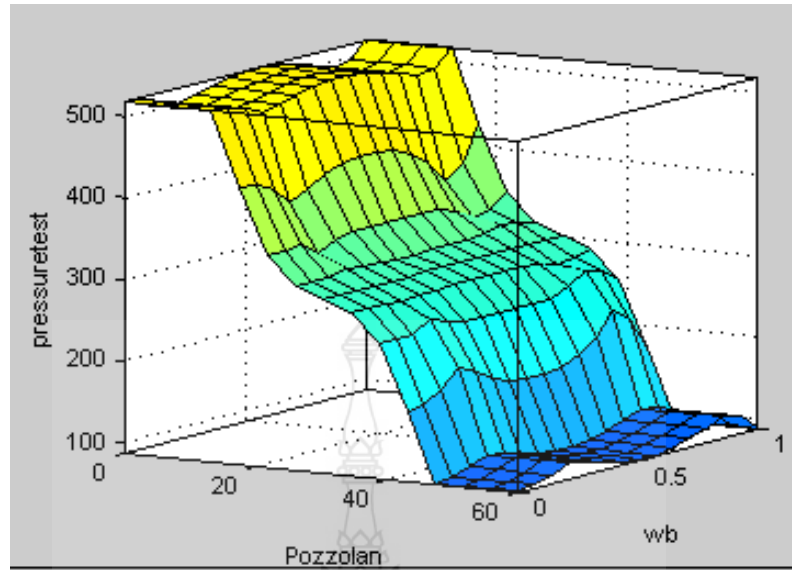
ภาพที่ 3.13 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟัซซีของแรงอัด

ตารางที่ 3.9 กฎของฟัซซีของแรงอัด

prc (Hor) wb (Ver)	H	M	L
H	Low	Medium	High
M	Low	Medium	High
L	Low	Medium	High

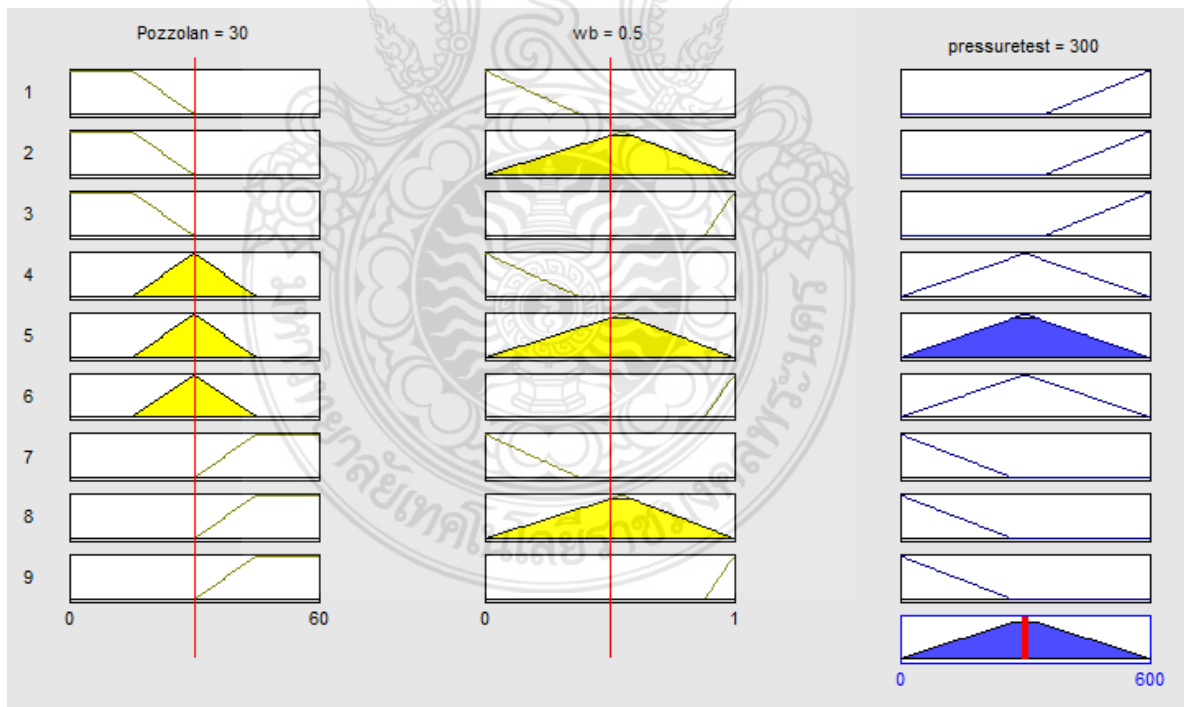
1. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb1) then (pressuretest is pressure3) (1)
2. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb2) then (pressuretest is pressure3) (1)
3. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb3) then (pressuretest is pressure3) (1)
4. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb1) then (pressuretest is pressure2) (1)
5. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb2) then (pressuretest is pressure2) (1)
6. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb3) then (pressuretest is pressure2) (1)
7. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb1) then (pressuretest is pressure1) (1)
8. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb2) then (pressuretest is pressure1) (1)
9. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb3) then (pressuretest is pressure1) (1)

ภาพที่ 3.14 ภาพแสดงกฎของฟัซซีที่ของแรงอัด



ภาพที่ 3.15 ภาพ Surface กราฟฟิซซีของแรงอัด

จุดศูนย์กลาง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการ



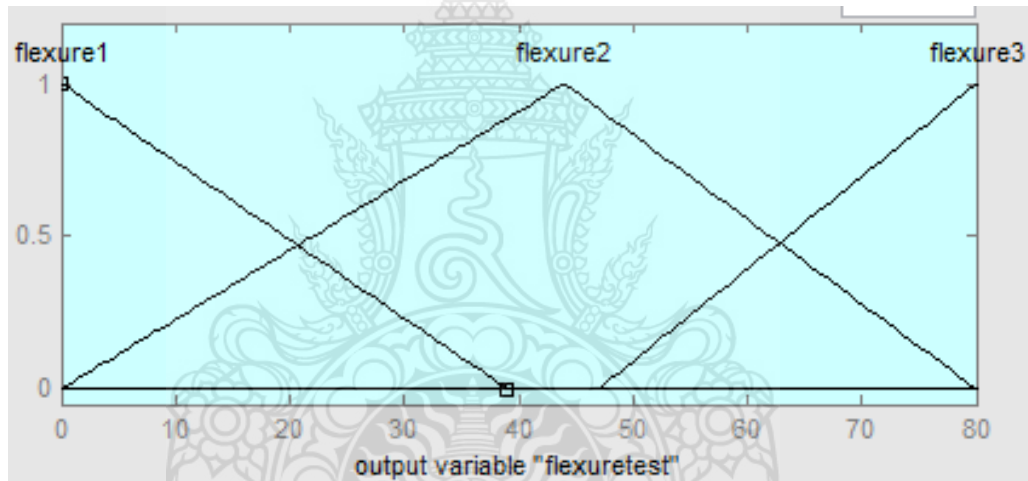
ภาพที่ 3.16 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification เพื่อทำนายแรงอัดของส่วนผสมปอซโซลาน

3.7 การทำนายค่าแรงตัดด้วยประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการทนแรงตัดนั้น ทำการแปลงการอินพุตเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี เป็นการหาค่าข้อมูลนำเข้าของระบบ และหาช่วงข้อมูลนำเข้า โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หาช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ใส่ป้อนโซลันแล้วมีผลต่อแรงอัด โดยใช้ตารางที่ 3.4 และ 3.5 จะทำการเพิ่มเติมเอาต์พุตของแรงตัดในการทำนายด้วยฟัซซีเพื่อดูความสอดคล้องของสัญญาณเอาต์พุตทั้ง 3 ดังกล่าว

ตารางที่ 3.10 การกำหนดตัวแปรผลลัพธ์ฟัซซีของแรงตัด

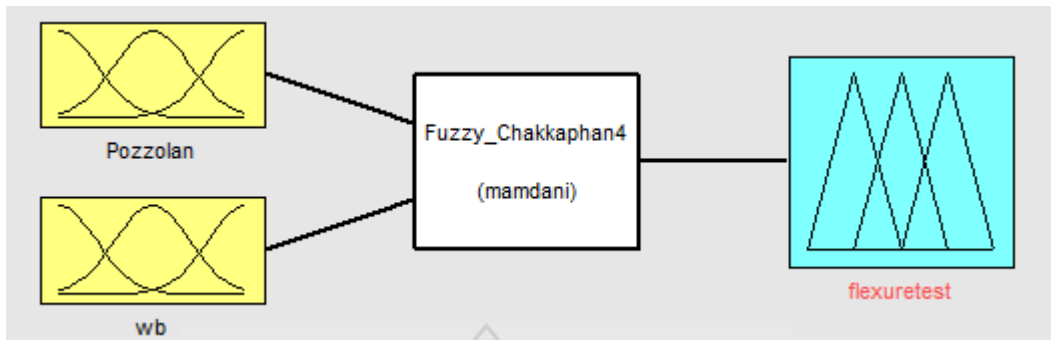
แรงกระแทก (Flexure test)	Assigned value
Flexure test >39	H
Flexure test 44	M
Flexure test <48	L



ภาพที่ 3.17 กราฟแสดงผลของปริมาณค่าข้อมูลนำเข้าของแรงอัด (Flexure Test)

กฎการควบคุมระบบของแรงตัดจากผลการทดลองเพื่อการหาค่าการทำนายแรงตัด การกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ยังคงใช้ 3 ระดับคือ

High (H) มาก
Medium (M) กลาง
Low (L) น้อย



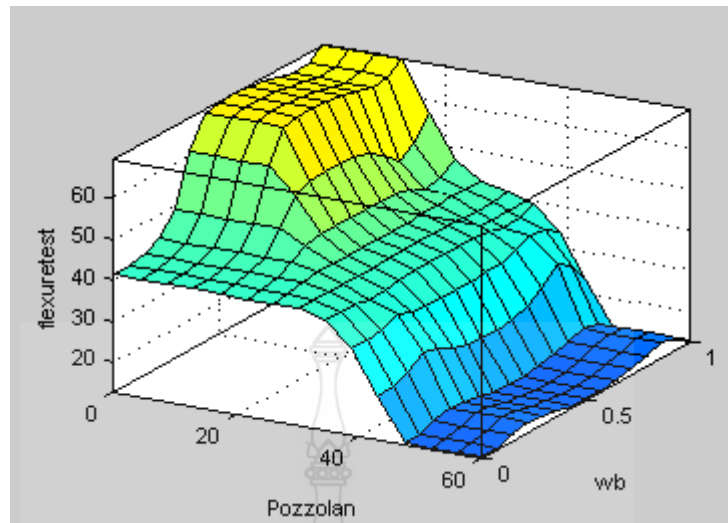
ภาพที่ 3.18 ภาพแสดงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบฟัซซีของแรงดัด

ตารางที่ 3.11 กฎของฟัซซีของแรงดัด

prc (Hor) wb (Ver)	H	M	L
H	Low	Medium	High
M	Low	Medium	High
L	Low	Medium	Medium

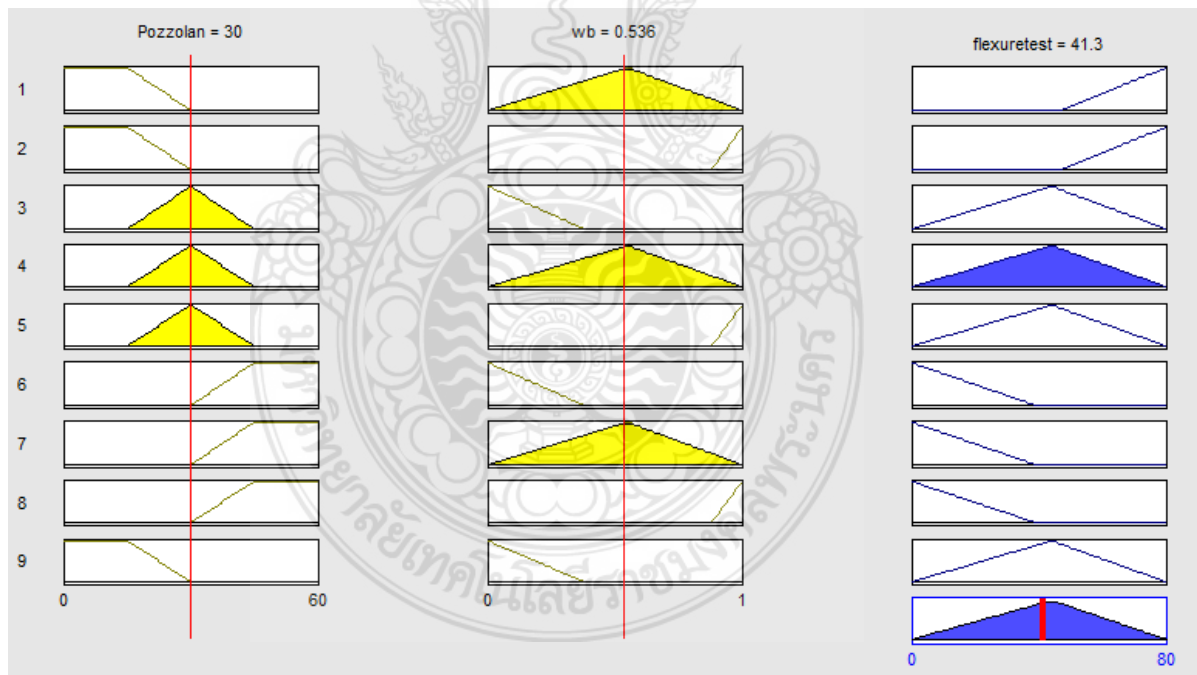
1. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb2) then (flexuretest is flexure3) (1)
2. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb3) then (flexuretest is flexure3) (1)
3. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb1) then (flexuretest is flexure2) (1)
4. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb2) then (flexuretest is flexure2) (1)
5. If (Pozzolan is prc2) and (wb is wb3) then (flexuretest is flexure2) (1)
6. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb1) then (flexuretest is flexure1) (1)
7. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb2) then (flexuretest is flexure1) (1)
8. If (Pozzolan is prc3) and (wb is wb3) then (flexuretest is flexure1) (1)
9. If (Pozzolan is prc1) and (wb is wb1) then (flexuretest is flexure2) (1)

ภาพที่ 3.19 ภาพแสดงกฎของฟัซซีที่ของแรงดัด



ภาพที่ 3.20 ภาพ Surface กราฟฟิซซีของแรงดัด

จุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางถ่วงโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการ



ภาพที่ 3.21 ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ Defuzzification เพื่อทำนายแรงดัด

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยและดินขาว ว่าจะมีผลต่อก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ การยุบตัว ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ การหดตัวและขยายขนาด ความต้านทานไฟฟ้า และกำลังอัดของคอนกรีต พร้อมทั้งผลการทดสอบองค์ประกอบแร่และโครงสร้างทางจุลภาค การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบช่วงเวลาที่แตกต่างกันที่สัมพันธ์กับร้อยละ ของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยและดินขาว วิเคราะห์ร้อยละเถ้าลอยและดินขาวที่เหมาะสมในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

4.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญของคอนกรีต เป็นตัวบอกลักษณะสมบัติอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี กำลังอัดเป็นตัวสำคัญที่ใช้ในการออกแบบก่อสร้าง แต่ในการตัดสินใจเลือกขนาดกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในงาน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำด้านราคา และปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตมวลเบามากขึ้น

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย พบว่าแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 345 กก./ cm^2 และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 350 กก./ cm^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 35 ดังตารางที่ 4.1 เกิดจากปริมาณซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของเถ้าลอยมีปริมาณสูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Cement Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) เมื่ออัตราส่วนแทนที่เพิ่มมากขึ้นกำลังของคอนกรีตจะลดลง ดังรูปที่ 3.1 สอดคล้องกับผลการทดลองของ ดนุพลกับจิตติยุทธ (2548) นอกจากนี้ยังมีผลมาจากอัตราส่วนมวลรวมหินปัมมิชต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติกำลังคอนกรีตให้ต่ำลง (Gunduz, 2008b) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง

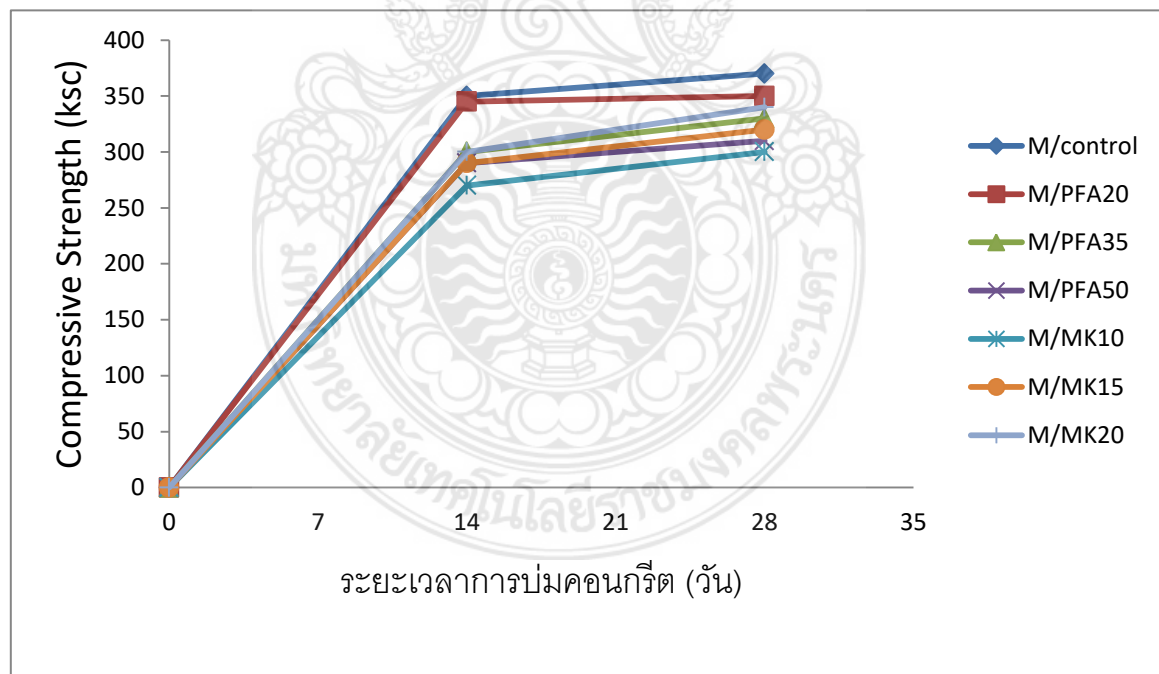
ในส่วนของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาว พบว่าเมื่อแทนที่ดินขาวร้อยละ 20 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 300 กก./ cm^2 และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 320 กก./ cm^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 และร้อยละ 20 กำลังอัดเริ่มมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่ออายุบ่ม 7 วัน และมากขึ้นที่อายุบ่ม 28 วัน ในขณะที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวร้อยละ 10 กำลังอัดมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุบ่ม ทั้งนี้



อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 15 เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม การแทนที่ด้วยส่วนผสมต่างๆ ยิ่งแทนที่เข้าไปมากจนเกินไป จะทำให้กำลังอัดลดลงมากขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดสอบของ บุรฉัตรและวีรากร (2544)

ตารางที่ 4.1 กำลังอัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน

ส่วนผสม	14 วัน	28 วัน
M/control	350	370
M/PFA20	345	350
M/PFA35	300	330
M/PFA50	290	310
M/MK10	270	300
M/MK15	290	320
M/MK20	300	340



ภาพที่ 4.1 ภาพผลลัพธ์ที่ได้กำลังอัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน

4.2 กำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต

การทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการทดสอบหากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตเพื่อหาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดัดสูงสุดที่กระทำต่อตัวอย่างคอนกรีต ณ จุดวิบัติหรือที่เรียกว่า ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตที่แทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยถ่านหิน พบว่าอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 14 วัน เท่ากับ 38.56 กก./ซม.² และ 28 วันค่าเท่ากับ 39.27 กก./ซม.² ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่มที่ 28 วัน และให้ค่ามากกว่าอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 และ 50 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากขึ้นและผ่านระยะเวลาบ่มน้ำที่นานจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลตรงข้ามกับคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ยังมีความแข็งแรงยังมีค่ากำลังรับแรงดัดที่น้อยลงทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของเถ้าลอยช่วยเพิ่มการยึดติดของเนื้อคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมวลเบาหินพิมมีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มมากขึ้น

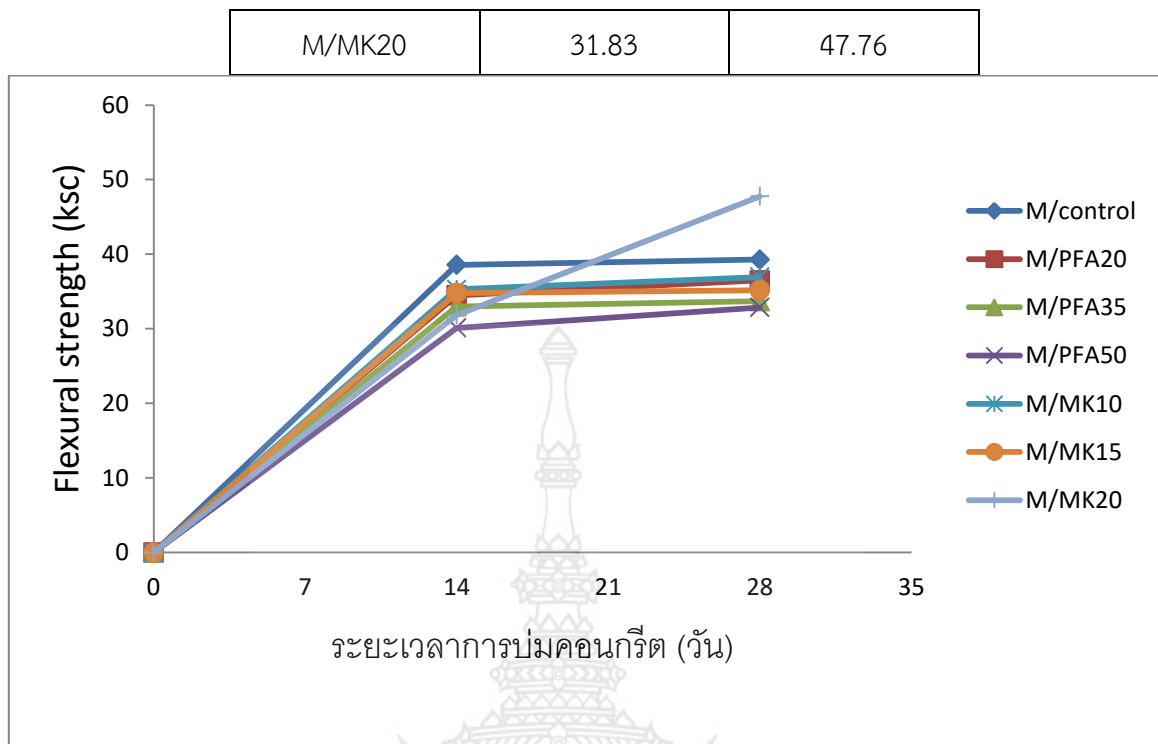
ส่วนของคอนกรีตมวลเบาหินพิมมีซแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 14 วัน เท่ากับ 31.83 กก./ซม.² และ 28 วันให้ค่า เท่ากับ 47.76 กก./ซม.² มีค่ามากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว ร้อยละ 10 และ 20 ทุกอัตราส่วน และยังมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม เป็นค่ากำลังรับแรงดัดที่มากสุดในการทดสอบนี้ เมื่อบ่มน้ำนานยิ่งขึ้นและเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่มากขึ้นก็จะมีค่ากำลังรับแรงดัดมากขึ้น ตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ผ่านระยะเวลาบ่มน้ำที่นานจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลตรงข้ามกับคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ยังมีความแข็งแรงยังมีค่ากำลังรับแรงดัดที่น้อยลงทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของเถ้าลอยช่วยเพิ่มการยึดติดของเนื้อคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมวลเบาหินพิมมีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน

ส่วนผสม	14 วัน	28 วัน
M/control	38.56	39.27
M/PFA20	34.50	36.48
M/PFA35	32.99	33.69
M/PFA50	30.12	32.87
M/MK10	35.28	36.93
M/MK15	34.80	35.17





ภาพที่ 4.2 ภาพผลลัพธ์ที่ได้กำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่มที่ 14 วันและ 28 วัน

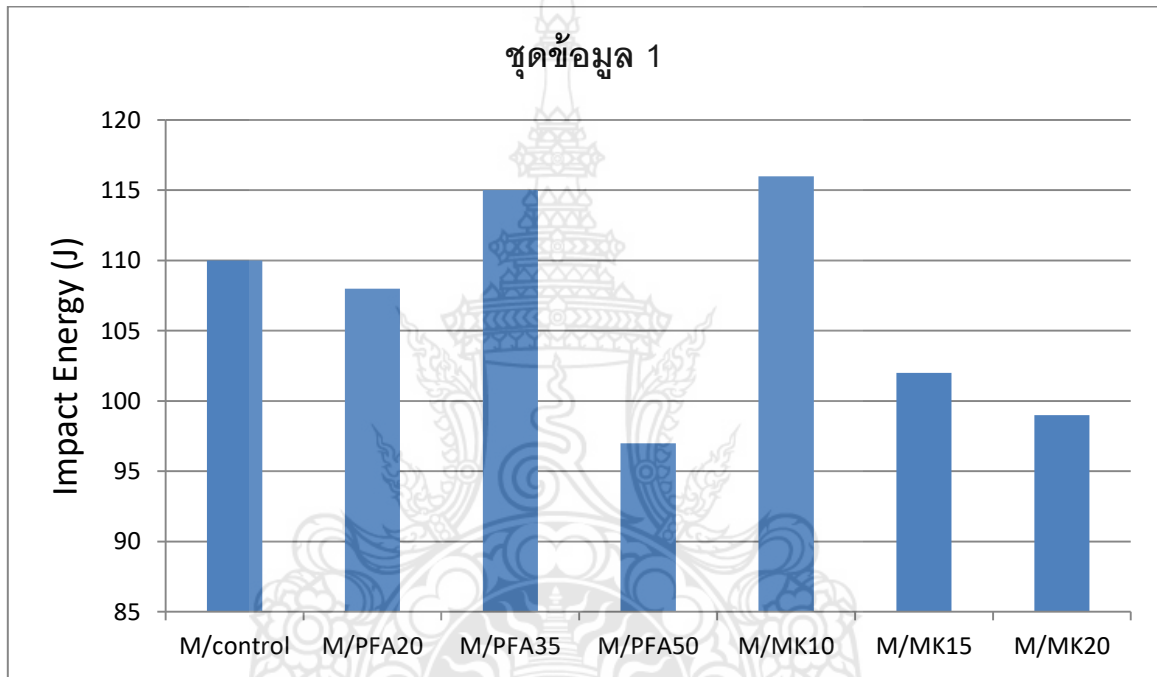
4.3 พลังงานกระแทก

จากการทดสอบหาค่าพลังงานกระแทกคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชโดยใช้การเหวี่ยงลูกตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมกระแทกกับคอนกรีตตัวอย่างพบว่า พลังงานที่ใช้กระแทกคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 มีค่าเท่ากับ 91 จูล ซึ่งมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีค่า เท่ากับ 83.33 จูล และมีค่าพลังงานกระแทกมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 50 มีค่าพลังงานกระแทก เท่ากับ 82 และ 60 จูล ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวพบว่าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวอัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่าพลังงานกระแทก เท่ากับ 66.33 จูล มีค่ามากกว่าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 15 และ 20 มีค่า เท่ากับ 50.33 และ 60.67 จูล ตามลำดับ แต่มีค่าพลังงานกระแทกที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ดังรูปที่ 3.4 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ 4.3 พลังงานกระแทกที่อายุการบ่มที่ 28 วัน

ส่วนผสม	พลังงานกระแทก (จูล)
M/control	110

M/PFA20	108
M/PFA35	115
M/PFA50	97
M/MK10	116
M/MK15	102
M/MK20	99



ภาพที่ 4.3 ภาพผลลัพธ์ที่ได้พลังงานกระแทกที่อายุการป่นที่ 28 วัน

4.4 การทำนายด้วยฟuzzyลอจิก

จากการทดสอบหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมโดยการนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อทำนายส่วนผสมสำหรับการผสมเพื่อให้ได้ กำจัดของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตและพลังงานกระแทก ดีที่สุด เอาต์พุตของฟuzzyจึงประกอบด้วยกำจัดของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตและพลังงานกระแทก ส่วนเอาต์พุตที่ได้จะเป็นส่วนผสมของปริมาณซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณดินขาว ปริมาณหิน และทราย โดยทำการใส่ค่าอินพุตส่วนผสม ส่วนกฎและวิธีการควบคุม (Rule base) ซึ่งได้จากการทำการทดลองการหาค่ากำจัดของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตและพลังงานกระแทก โดยผลที่ได้ดังตาราง 3.4-3.6

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยพีชชีลอจิก ที่ค่า $w_b = 0.38$

ที่	ปอชโซลาน (%prc)	ส่วนผสม (wb)	แรงอัด	แรงดัด	แรงกระแทก	หมายเหตุ
1	0	0.38	516	78.4	182	-
2	5	0.38	513	78.3	179	-
3	10	0.38	511	68.2	177	-
4	15	0.38	510	68.1	171	-
5	20	0.38	366	49.0	122	-
6	25	0.38	317	41.1	106	-
7	35	0.38	300	38.6	101	-
8	40	0.38	283	31.2	94.9	-
9	45	0.38	233	13.7	77.3	-
10	50	0.38	94.9	13.6	34.9	-
11	55	0.38	94.6	13.5	34.5	-
12	60	0.38	93.9	13.4	34.1	-

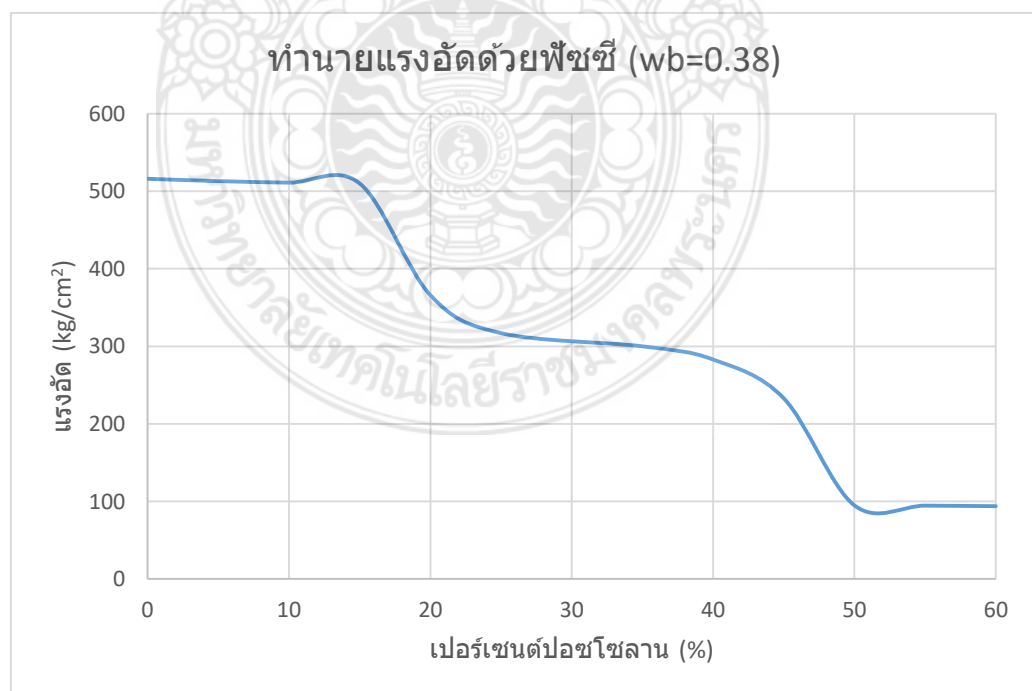
ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยพีชชีลอจิก ที่ค่า $w_b = 0.55$

ที่	ปอชโซลาน (%prc)	ส่วนผสม (wb)	แรงอัด	แรงดัด	แรงกระแทก	หมายเหตุ
1	0	0.55	521	89.3	179	-
2	5	0.55	519	89.2	176	-
3	10	0.55	518	69.1	174	-
4	15	0.55	517	69.1	173	-
5	20	0.55	336	49.0	122	-
6	25	0.55	317	43.1	106	-
7	35	0.55	300	41.3	94.9	-
8	40	0.55	283	31.2	77.3	-
9	45	0.55	233	12.7	32.3	-
10	50	0.55	88	12.6	32.2	-
11	55	0.55	83	12.5	31.9	-
12	60	0.55	82	12.4	31.5	-

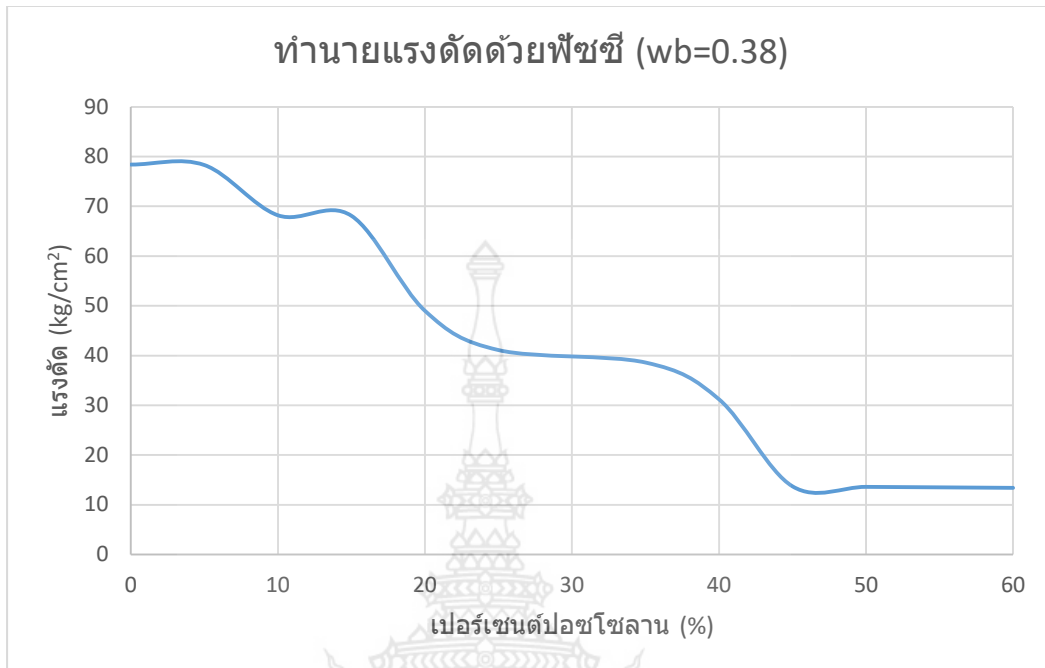


ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการทำนายแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกด้วยพีชชีลอจิก ที่ค่า $w_b = 0.80$

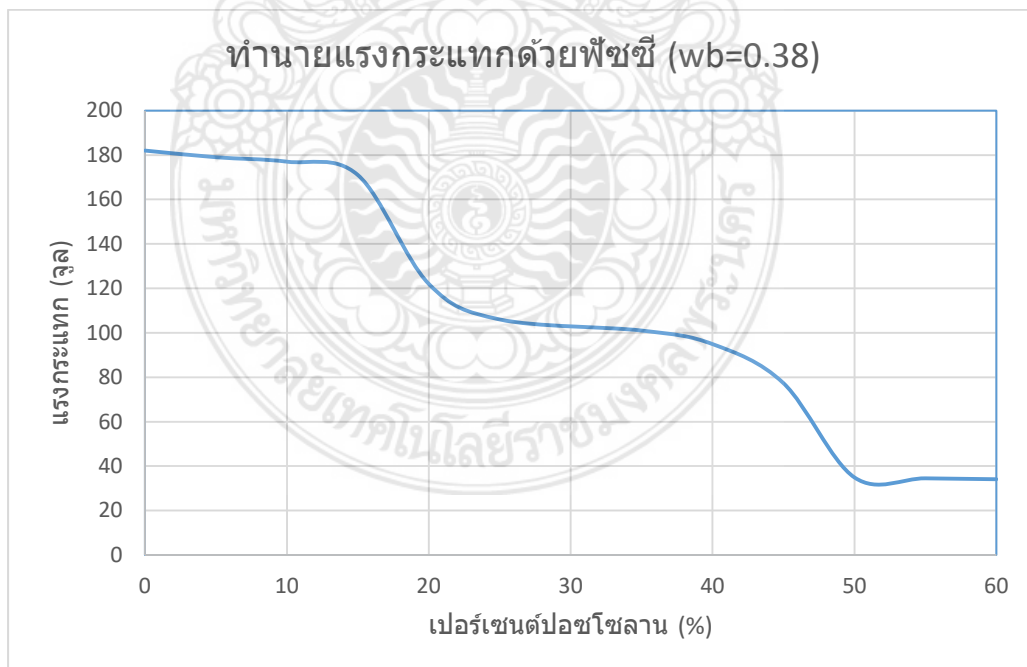
ที่	ปอชโซลาน (%prc)	ส่วนผสม (w_b)	แรงอัด	แรงดัด	แรงกระแทก	หมายเหตุ
1	0	0.80	503	87.3	173	-
2	5	0.80	503	84.2	171	-
3	10	0.80	501	62.1	168	-
4	15	0.80	500	60.3	167	-
5	20	0.80	343	46.0	114	-
6	25	0.80	321	43.3	107	-
7	35	0.80	300	40.8	100	-
8	40	0.80	279	37.7	93.2	-
9	45	0.80	256	34.4	85.4	-
10	50	0.80	106	15.4	39	-
11	55	0.80	107	15.5	38.8	-
12	60	0.80	107	14.4	38.5	-



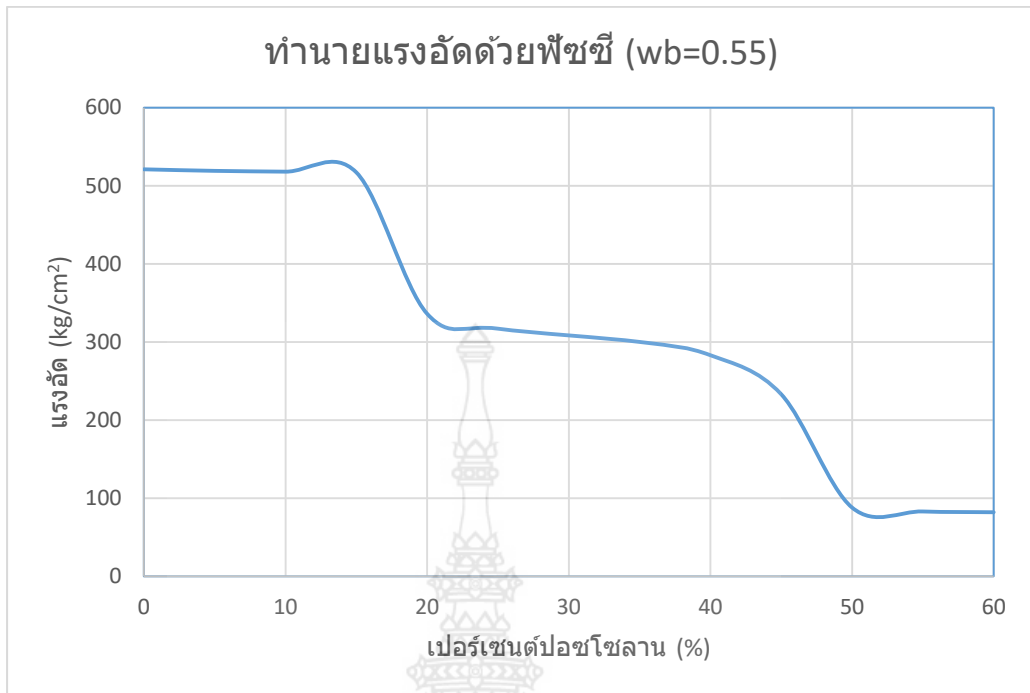
ภาพที่ 4.4 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยพีชชี ($w_b=0.38$)



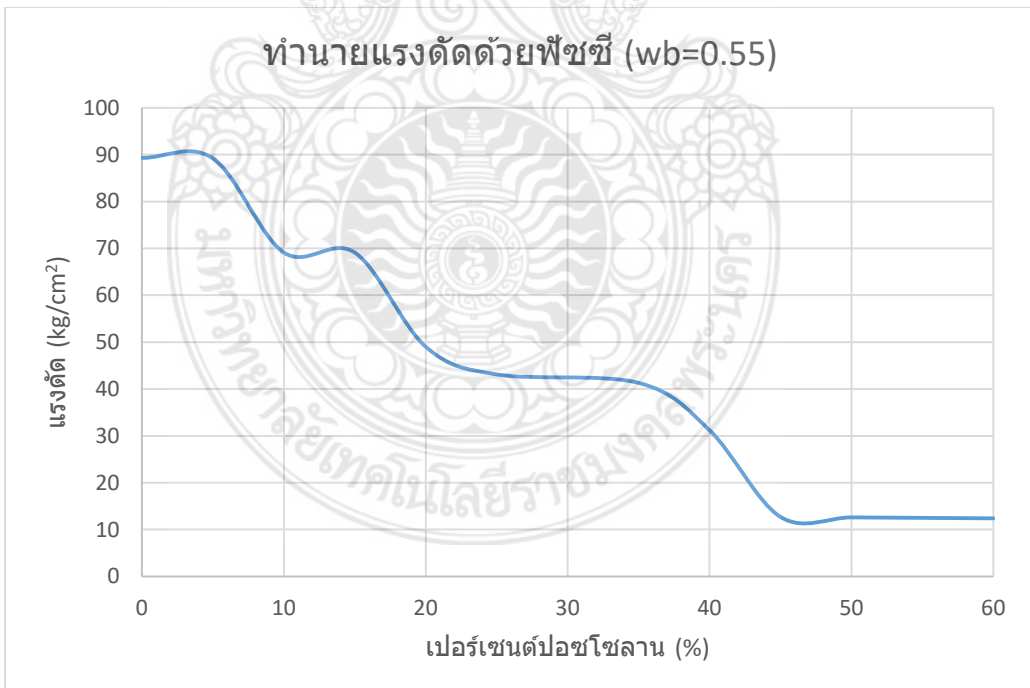
ภาพที่ 4.5 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงดัดด้วยพีชชี ($w_b=0.38$)



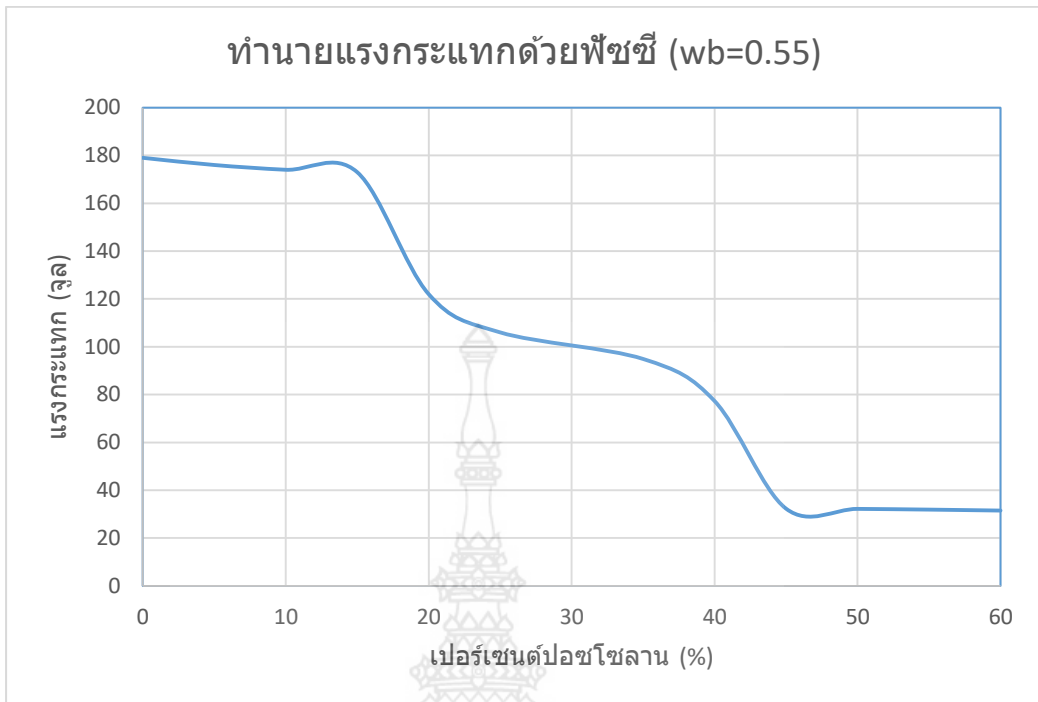
ภาพที่ 4.6 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระแทกด้วยพีชชี ($w_b=0.38$)



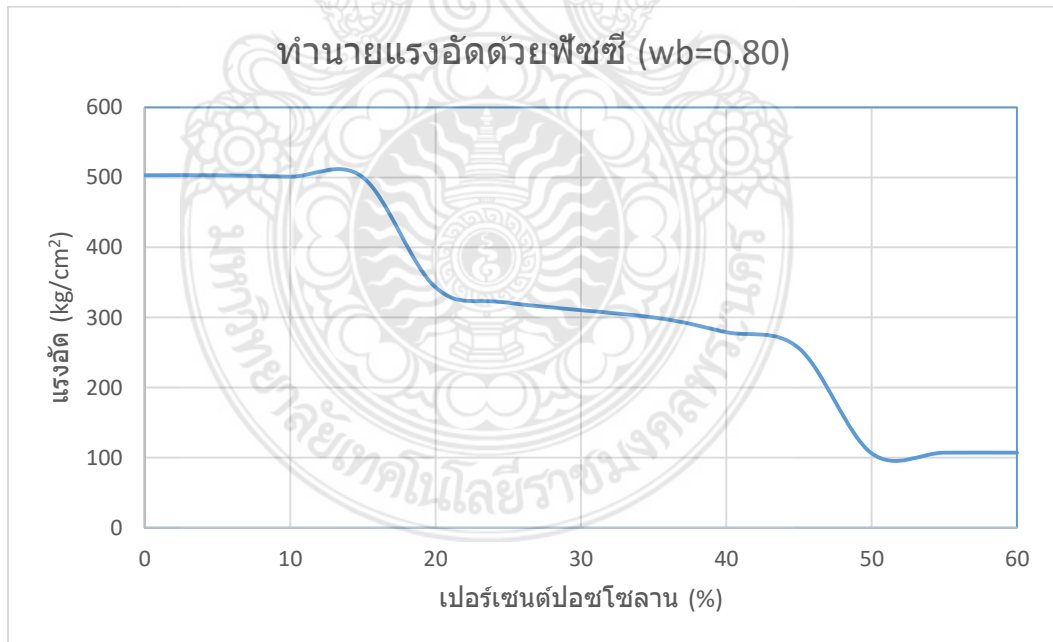
ภาพที่ 4.7 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยพีชชี (wb=0.55)



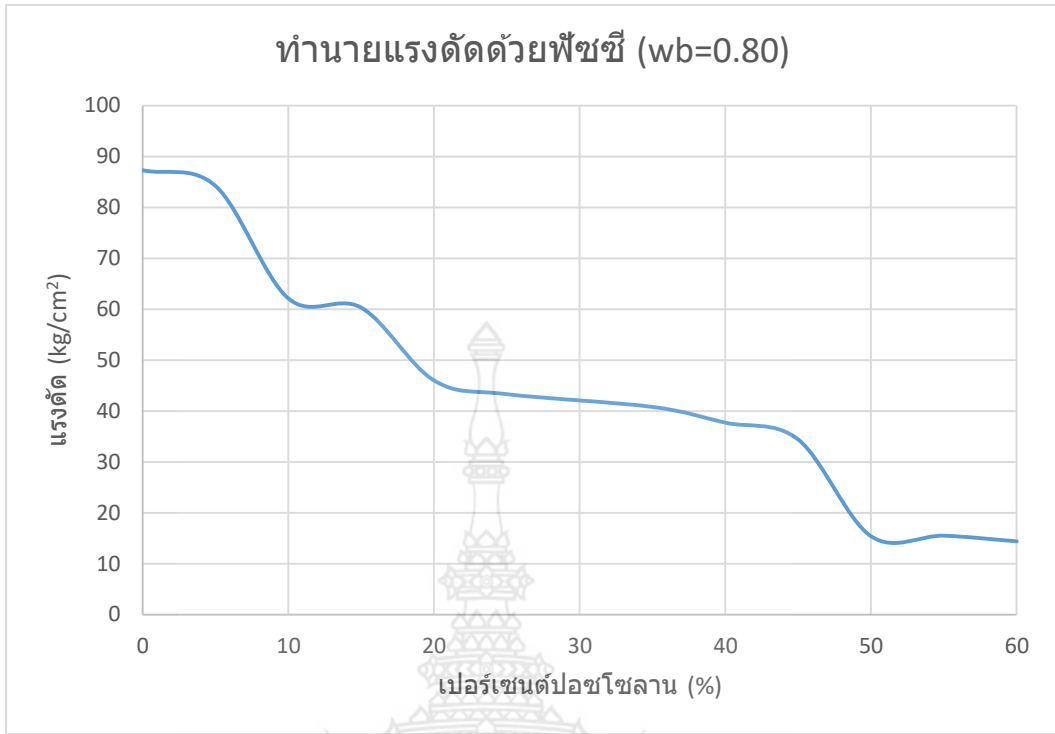
ภาพที่ 4.8 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงดัดด้วยพีชชี (wb=0.55)



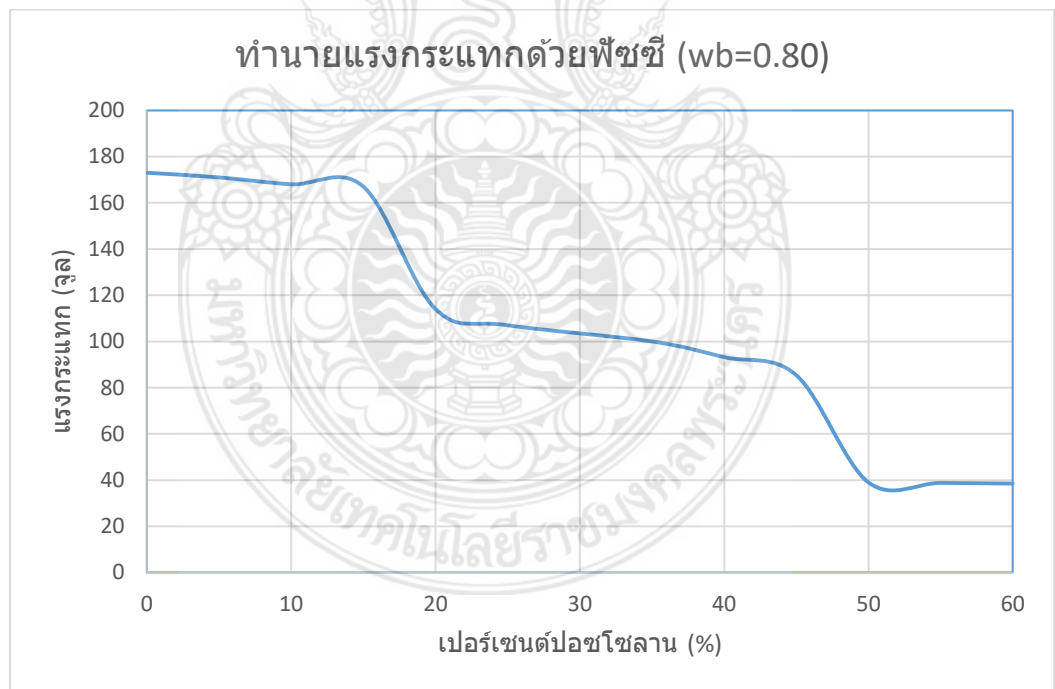
ภาพที่ 4.9 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระแทกด้วยพีชชี (wb=0.55)



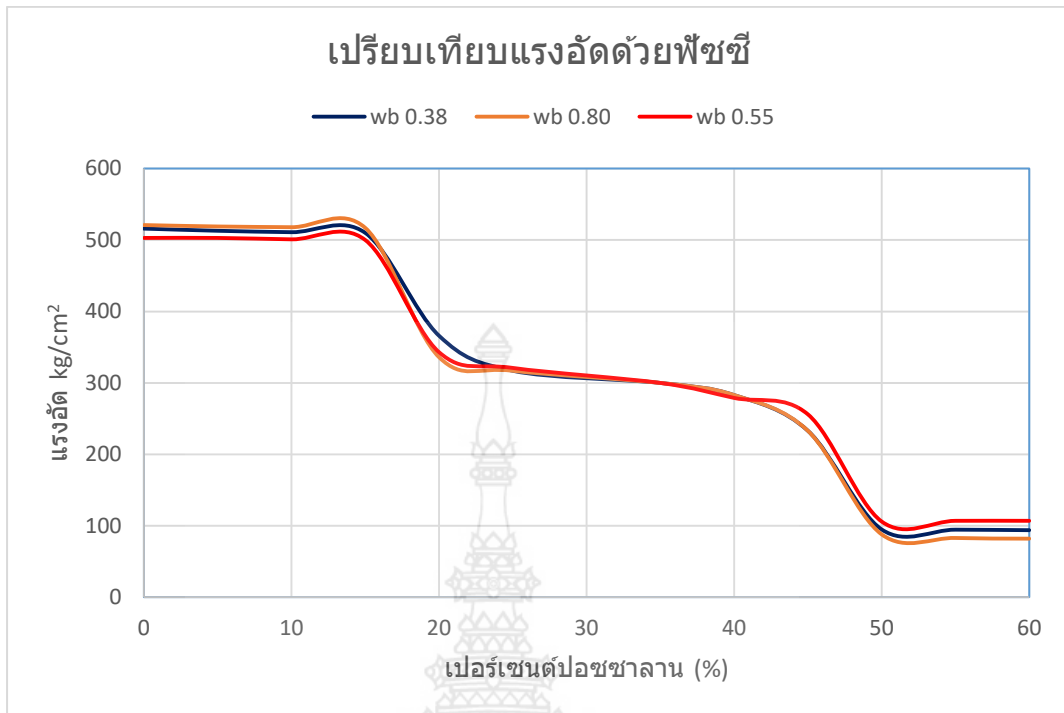
ภาพที่ 4.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงอัดด้วยพีชชี (wb=0.80)



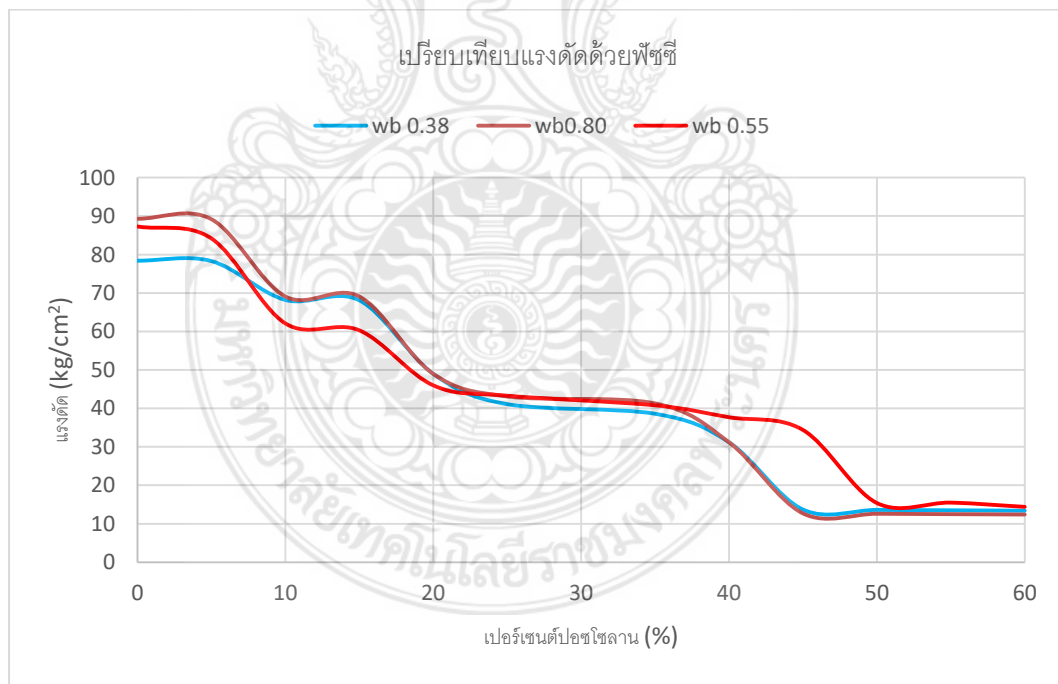
ภาพที่ 4.11 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงตัดด้วยพีชชี (wb=0.80)



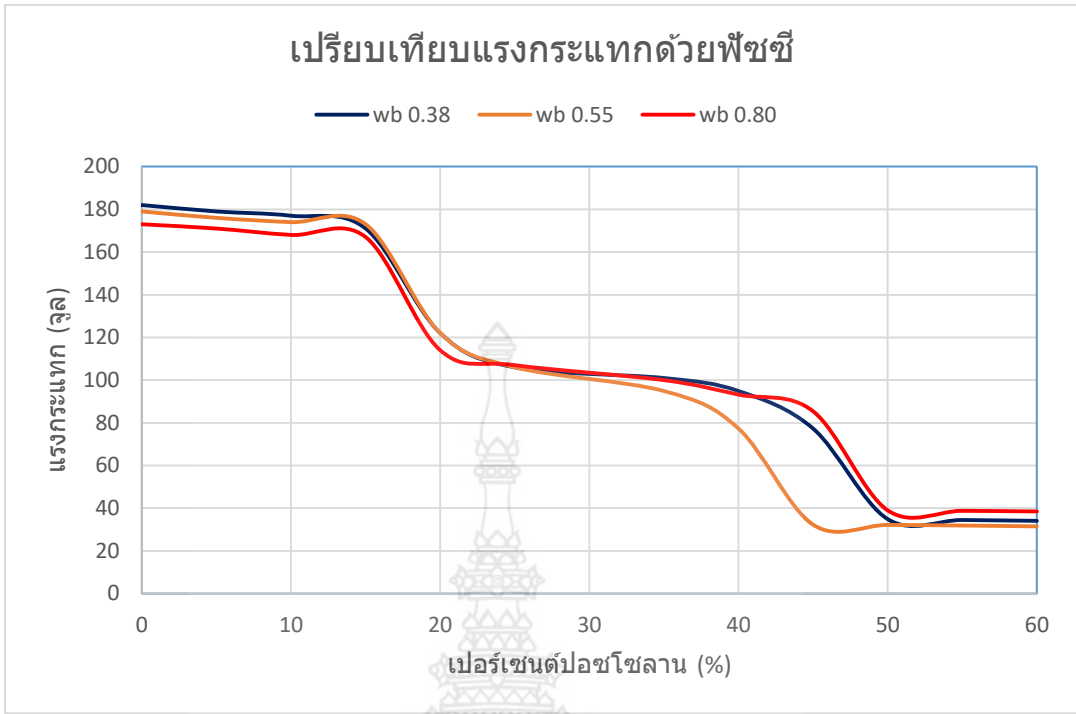
ภาพที่ 4.12 ภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำนายแรงกระแทกด้วยพีชชี (wb=0.80)



ภาพที่ 4.13 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงอัดด้วยพีซี



ภาพที่ 4.14 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงดัดด้วยพีซี



ภาพที่ 4.15 ภาพผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแรงกระแทกด้วยพีชชี



บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้คือกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ขึ้นไป และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว ร้อยละ 15 จะมีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดจากนั้นค่ากำลังอัดจะลดลง กำลังดึงของคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 สูงสุด และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวจะให้กำลังดึงสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 กำลังดัดของคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิชมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10 เป็นค่าแรงดัดที่มากสุดในการทดสอบนี้และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 กำลังกระแทกของคอนกรีตหินพัมมิชมีค่ามากสุดในการทดสอบนี้เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 แต่เมื่อคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและดินขาวจะได้ค่าแรงกระแทกที่ต่ำลง

ในส่วนการประยุกต์ใช้แบบจำลองฟuzzyลอจิกเพื่อการพยากรณ์แรงอัด โดยใช้ผลจากการทดสอบเปนครณีศึกษาตัวอย่าง รูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกได้จากกราฟความถี่ของข้อมูลผลการทดสอบแรงอัด แรงดัด แรงกระแทกในอดีต ซึ่งพบวารูปแบบสามเหลี่ยมโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น (ต่ำ ปานกลาง และสูง) มีรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองฟuzzyลอจิกให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบและสามารถทำให้เห็นแนวโน้มการผสมปอซโซลานลงในคอนกรีต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยคอนกรีตมวลรวมหินพัมมิช แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและดินขาว เป็นการศึกษาในระดับในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพิจารณาเพื่อผลิตคอนกรีตน้ำหนักเบาที่ใช้หินพัมมิชเป็นมวลรวมและแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและดินขาว ซึ่งอาจนำไปใช้งานจริงจะต้องพิจารณาถึงวิธีการดำเนินงาน สภาพหน้างานเพื่อทำการศึกษโดยอาศัยข้อมูลการทำงานจริงในสนามเป็นตัวเปรียบเทียบกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้การหากฎของฟuzzyที่เหมาะสมมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบกฎช่วยให้ถูกต้องเพิ่มขึ้น



บรรณานุกรม

- เจริญชาย ตั้งฉัตรแก้ว, ธีรยุทธ วิวัฒนา และไฟโรจน์ เทพเจริญนิรันดร์ 2540. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด, กำลังดึง และกำลังดัด ของคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียด.
- ปริญญาธิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จีงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณวานากิจ 2543. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย, น.7-19. ในเอกสารการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุใน คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต
- ประจิด จิรปภา, 2526. คอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าลอยแม่เกาะ, น. IV 144- 159. ในการประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น
- สมชัย กกกาแหง. 2542. การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, น. 65-79. ใน
- เอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, นนทบุรี
- พยุง มีสัจ, ระบบพีซีซีและโครงข่ายประสาทเทียม. เอกสารประกอบการสอน, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- เอกภพ อังศุวัฒนา, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ทิน เกตุรัตนบวร. 2541. การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เกาะในงานคอนกรีตกำลังสูง, น. 36-45. ในวารสาร กฝผ. 7, 2 (เม.ย.-มิ.ย.)
- เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล. 2542. ผลกระทบของซีเมนต์เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลกำลังอัดของคอนกรีต สมรรถนะสูง, น. 90-98. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้า ลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุในคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- A. J. Zielinski and H. W. Reinhardt. 1982. Impact stress-strain behavior in concrete intension, pp. 345. In A. M. Neville. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- ACI Committee 226. 1987. Use of Fly Ash in Concrete. ACI Materials J. 84 : 381-409
- ASTM C 618-94a. 1995. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture In Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02
- A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- A. Mokhtarzadeh and C. French. 2000. Mechanical properties of high-strength concrete with consideration for precast applications. ACI Materials J. 97, (2) : 136-147
- B. Bektas Ekici and U. T. Aksoy, "Prediction of building energy needs in early stage of design



-
- by using ANFIS,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 5352- 5358, May 2011.
- D. W. Harris, C. E. Mohorovic, and T. P. Dolen. 2000. Dynamic Properties of Mass Concrete Obtained from Dam Cores. *ACI Materials J.*, Vol. 97, No.3, pp.290-296.
- Ferdinand P. Beer. 1992. *Mechanics of materials*. McGRAW-HILL Inc, Singapore.
- G. B. Welch and B. Haisman. 1969. Fracture toughness measurements of concrete, pp.344. In A. M. Neville. *Properties of concrete*. John Wiley & Sons Inc, New York.
- H. Green. 1964. Impact strength of concrete, pp. 62-63. In P. Kumar Mehta. *Concrete : Structure, properties, and materials*. Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Helmuth, Richard. 1987. *Fly ash in cement and concrete*. Portland cement association, Skokie.
- J. M. Raphael. 1984. Tensile Strength of Concrete, pp. 596. In A. M. Neville. *Properties of Concrete*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- J.-S. R. Jang, “ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, May/June 1993.
- Kasai, Y. ET AL. 1983. Air permeability and carbonation of Blended cement mortars, pp. 62. In K. Wesche. *Fly ash In concrete: Properties and performance*. Chapman & Hall, London.
- K. Ganesh Babu.1994. Early strength behavior of fly ash concretes. *Cement and concrete research* 24 (2) : 277-284.
- L. Lam, Y.L. Wong, and C.S. Poon. 1998. Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. *Cement and concrete research* 28 (2) : 271-283
- Masatane Kokubu. 1975. *Studies on materials for concrete structures*. University of Tokyo.
- L. A. Sadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965.
- M. Askari and A. H. D. Markazi, “A new evolving compact optimised Takagi-Sugeno fuzzy model and its application to nonlinear system identification,” *International Journal of Systems Science*, vol. 43, no. 4, pp. 776-785, April 2012.
- H. C. W. Lau, E. N. M. Cheng, C. K. M. Lee, and G. T. S. Ho, “A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system,” *Expert Systems with Applications*, vol. 34, no. 3, pp. 1813-1824, April 2008.
- S. Thomassey, “Sales forecasts in clothing industry: The key success factor of the supply chain management,” *International Journal of Production Economics*, vol. 128, no. 2, pp. 470-483, 2010.



ภาคผนวก ก

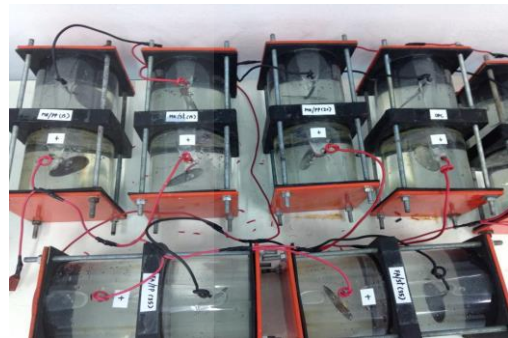
วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง





เครื่องทดสอบกำลังตัดและกำลังอัดของคอนกรีต





การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)



ตัดตัวอย่างคอนกรีตความหนา 1 นิ้วและทำการอุดรอยร้าวด้วยซิลิโคน



นำตัวอย่างไปประกอบในอุปกรณ์ในการทดลองที่เตรียมไว้และทำการเติมสารละลายในท่ออะคลิลิกและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์

ภาคผนวก ข

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การหาปริมาณการทดสอบแบบต่างๆ
และการทดสอบหาค่าลึงอัด ค้ำลึงดัด และแรงกระแทก)





การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดสอบและการเตรียมส่วนผสมโดยเตรียมตาม
น้ำหนักตามปฏิกาสส่วนผสมที่กำหนดไว้



การผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว

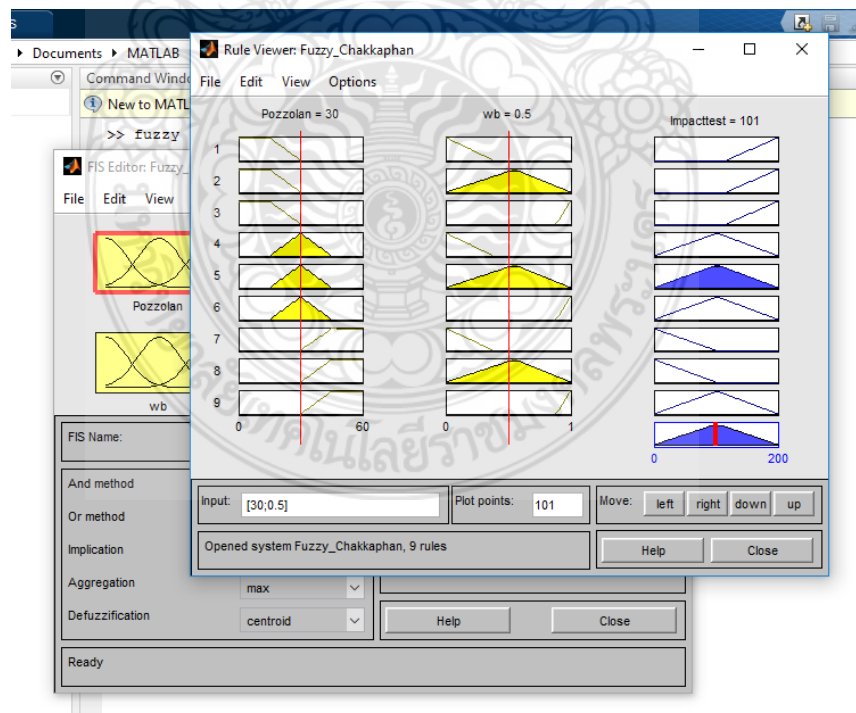
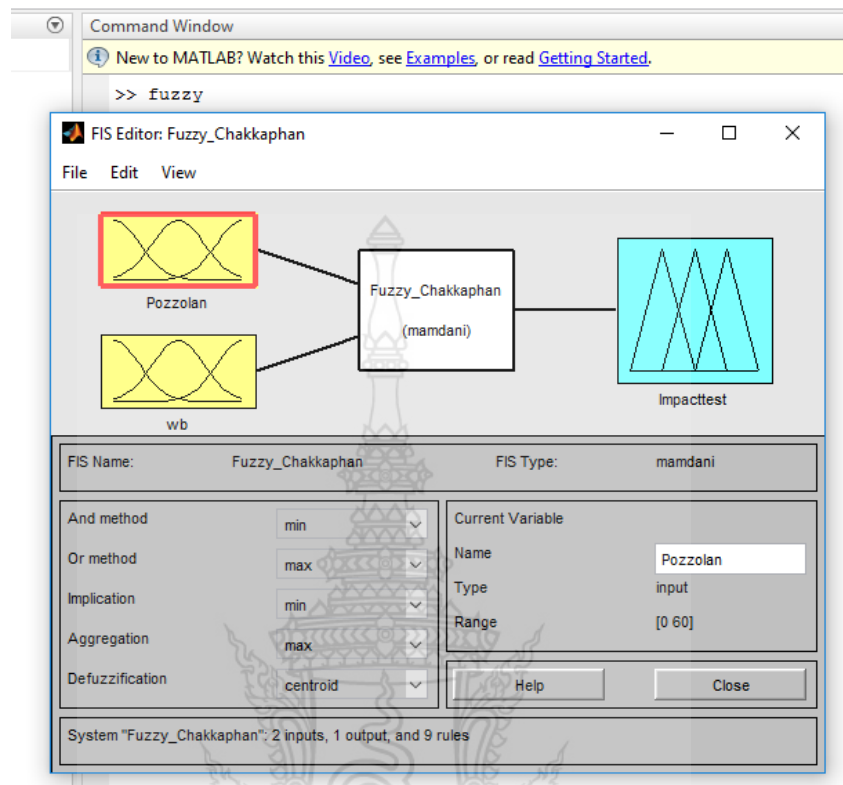


การผสมคอนกรีตและการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีต

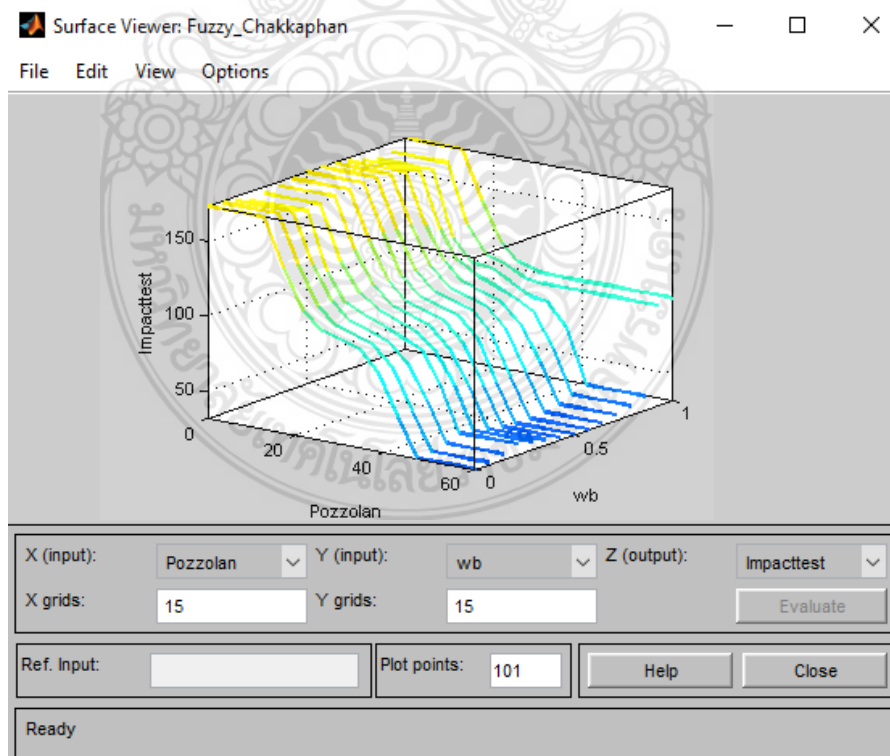
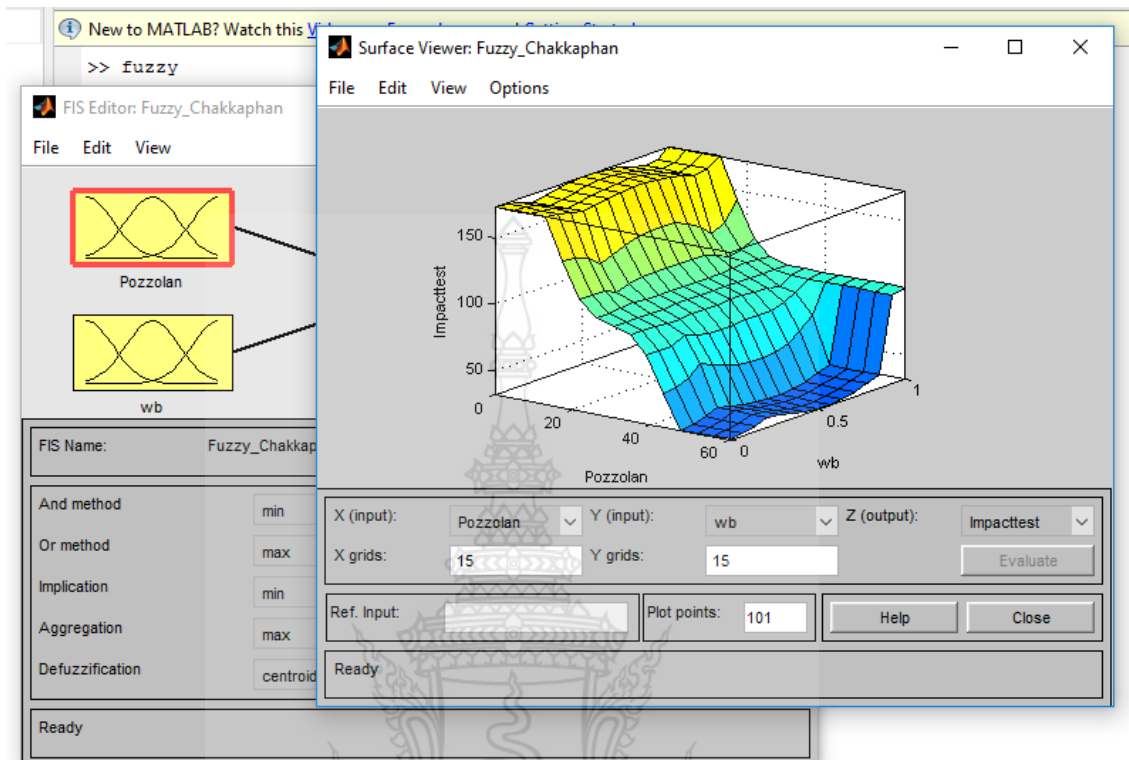
ภาคผนวก ค

โปรแกรมพีชชีลอจิก

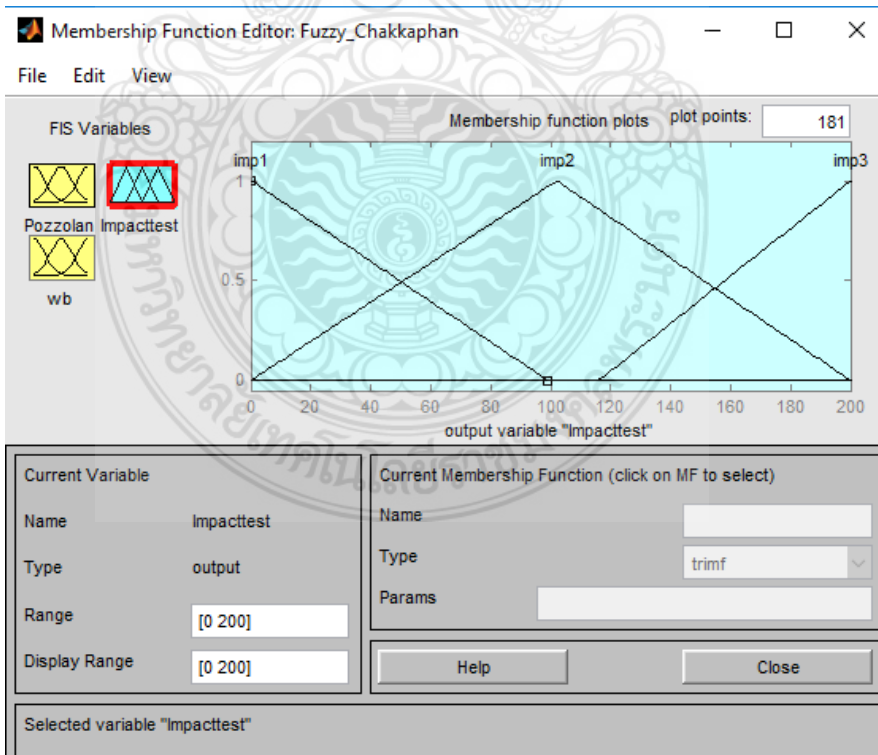
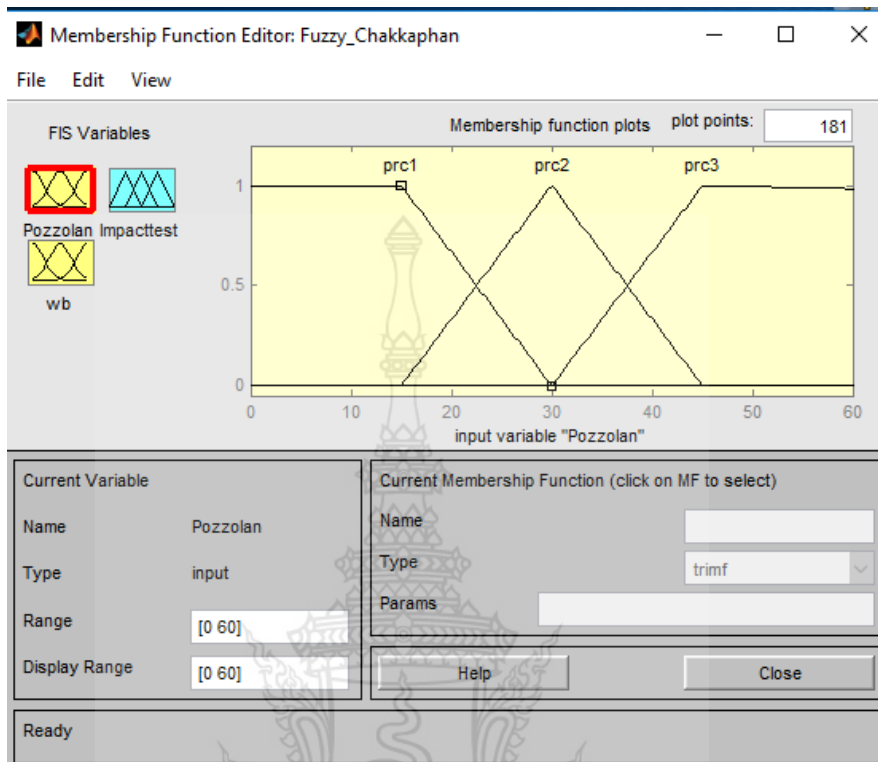




การใช้ software หาค่า Fuzzy logic 3 แแรง



การใช้ software ทาค่า Surface



Membership function

The image displays the MATLAB Fuzzy Logic Designer interface for a fuzzy logic model. It consists of several overlapping windows:

- Rule Editor:** Shows a rule chain where the fuzzy inference engine 'Fuzzy_Chakkaphan (mamdani)' receives inputs from membership functions 'Pozzolan' and 'wb'. The output is 'Impacttest'.
- Membership Function Editor:** Displays six membership functions for the input variable 'Pozzolan' (values: 45.4, 0.568, 32.4) and one for 'wb' (value: 5.4105662). The functions are labeled 1 through 6.
- Surface Viewer:** A 3D surface plot showing the output 'Impacttest' as a function of inputs 'Pozzolan' and 'wb'. The plot shows a surface that rises as both inputs increase. Parameters: X grids: 15, Y grids: 15, Plot points: 101.
- Membership Function Plots:** A 2D line plot showing three fuzzy membership functions: 'prc1', 'prc2', and 'prc3' against the input variable 'Pozzolan'. The plot points are 181.
- Current Membership Function Dialog:** A dialog box for editing the 'Pozzolan' membership function. It shows the current name 'Pozzolan', type 'input', and range '[0 60]'. The current function selected is 'trimf' with parameters '[-1e+04 15 30]'.

Fuzzy Logic Model