



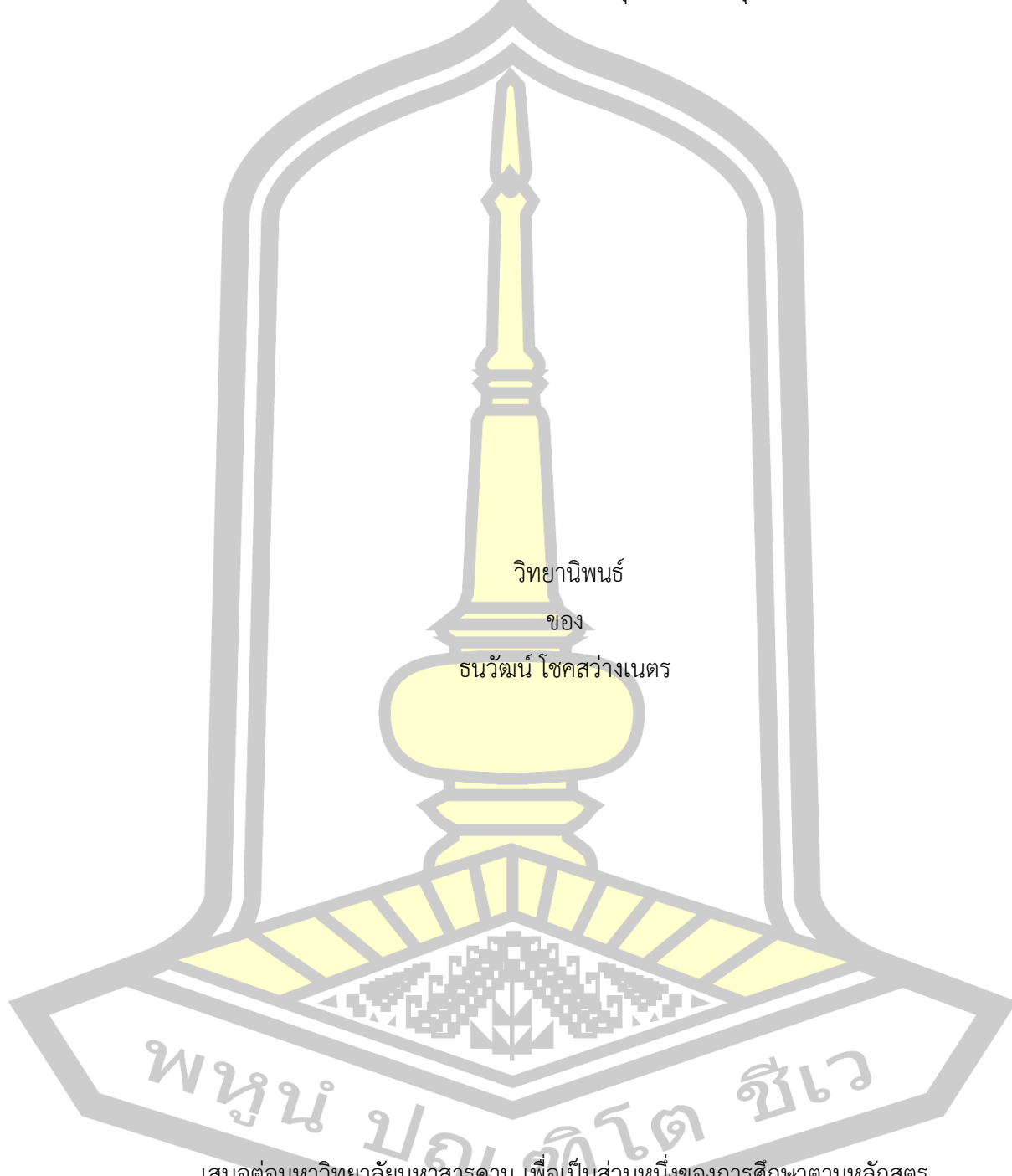
การทำนายการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดย
แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้

วิทยานิพนธ์
ของ
ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มิถุนายน 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การทำนายการขยายตัวเนื่องจากซีลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดย
แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้



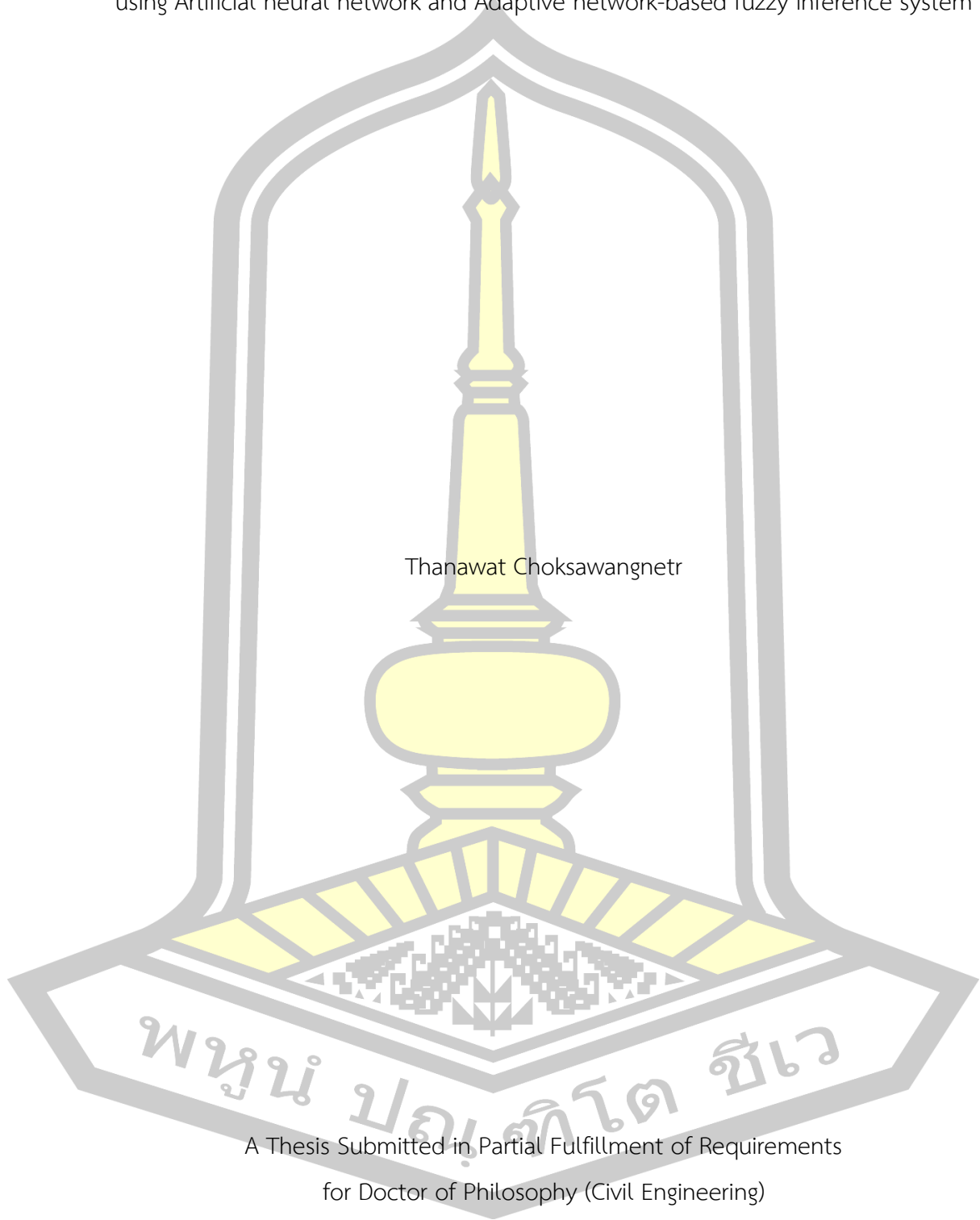
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Prediction of expansion due to sulfate of fly ash and ground bottom ash mortar
using Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system

Thanawat Choksawangnetr



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

June 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. วันชัย สะตะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เรืองรุชต์ ชีระโรจน์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อลงกรณ์ ละม่อม)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การทำนายการขยายตัวเนื่องจากข้อผิดพลาดของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา บดละเอียดโดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความ คลุมเครือแบบปรับตัวได้		
ผู้วิจัย	ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองรุทธิ์ ชีระโรจน์		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2563

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือเพื่อศึกษาการทำนายการขยายตัวเนื่องจากข้อผิดพลาดของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ โดยนำเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาบดให้มี 2 ขนาด จากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อหล่อมอร์ตาร์ด โดยแช่ตัวอย่างมอร์ตาร์ดทั้งหมดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการวัดค่าการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ดที่อายุต่างๆ และนำข้อมูลที่ได้มาทำนายการขยายตัวเนื่องจากข้อผิดพลาดโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ จากการทำนายของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้มีความแม่นยำในการทำนายการขยายตัวที่สูงมาก โดยมีค่าสถิติของค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์สูงกว่า 0.99 โดยแบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้มีผลการทำนายที่แม่นยำมากกว่าแบบจำลองแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเล็กน้อย จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้มีศักยภาพสูงมากในการใช้ทำนายการขยายตัวเนื่องจากข้อผิดพลาดของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด

คำสำคัญ : การขยายตัวของมอร์ตาร์ด, แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม, แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้

TITLE	Prediction of expansion due to sulfate of fly ash and ground bottom ash mortar using Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system		
AUTHOR	Thanawat Choksawangnetr		
ADVISORS	Associate Professor Raungrut Cheerarot , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2020

ABSTRACT

The objective of this thesis was to study the prediction of expansion due to sulfate of fly ash and ground bottom ash mortar using Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system. Bottom ash from Mae Moh power plant was ground to 2 sizes, then was used to replace Portland cement type I at the ratio of 0, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 percent by weight of binder to cast mortar bar. All samples of mortars were immersed in a solution of magnesium sulfate and sodium sulfate at concentrations of 2.5, 5.0, 7.5 and 10.0 by weight. Then the expansion of the mortar bars of different ages was used to predict sulfate expansion by using Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system. From the model predictions, Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system have very high accuracy in predicting the expansion. The statistical value of the absolute variance is greater than 0.99 and Adaptive network-based fuzzy inference system has a slightly more accurate prediction than the artificial neural network model. From the experiment, it can be concluded that the model of Artificial neural network and Adaptive network-based fuzzy inference system have very high potential for predicting the expansion due to sulfate of fly ash and ground bottom ash mortars.

Keyword : expansion of mortar, Artificial neural network, Adaptive network-based

fuzzy inference system



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เรือง
รุชดี ชีระโรจน์ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ได้ชี้แนวทางในการศึกษาวิจัย ให้ข้อคิด
คำแนะนำ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยชาญ โชติถนอม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์
ละม่อม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลาและให้เกียรติมาเป็น
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่ง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณและขอรำลึกในพระคุณของคุณพ่อและคุณแม่ และครอบครัว ที่ได้
คอยสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จ ณ โอกาสนี้
ด้วย

ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร

พูน ปณ ภิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แก่ล่อยและเก้กัันเตา	4
2.2 การทำล่ายคอนกรีตเนื่องจกสารละลายซัลเฟต.....	6
2.3 ปังจัยที่มีผลต่อการทำล่ายโดยสารละลายซัลเฟตและวิธีการป้องกัน	9
2.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	11
2.5 แบบจำลองระบบการอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	29
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	30

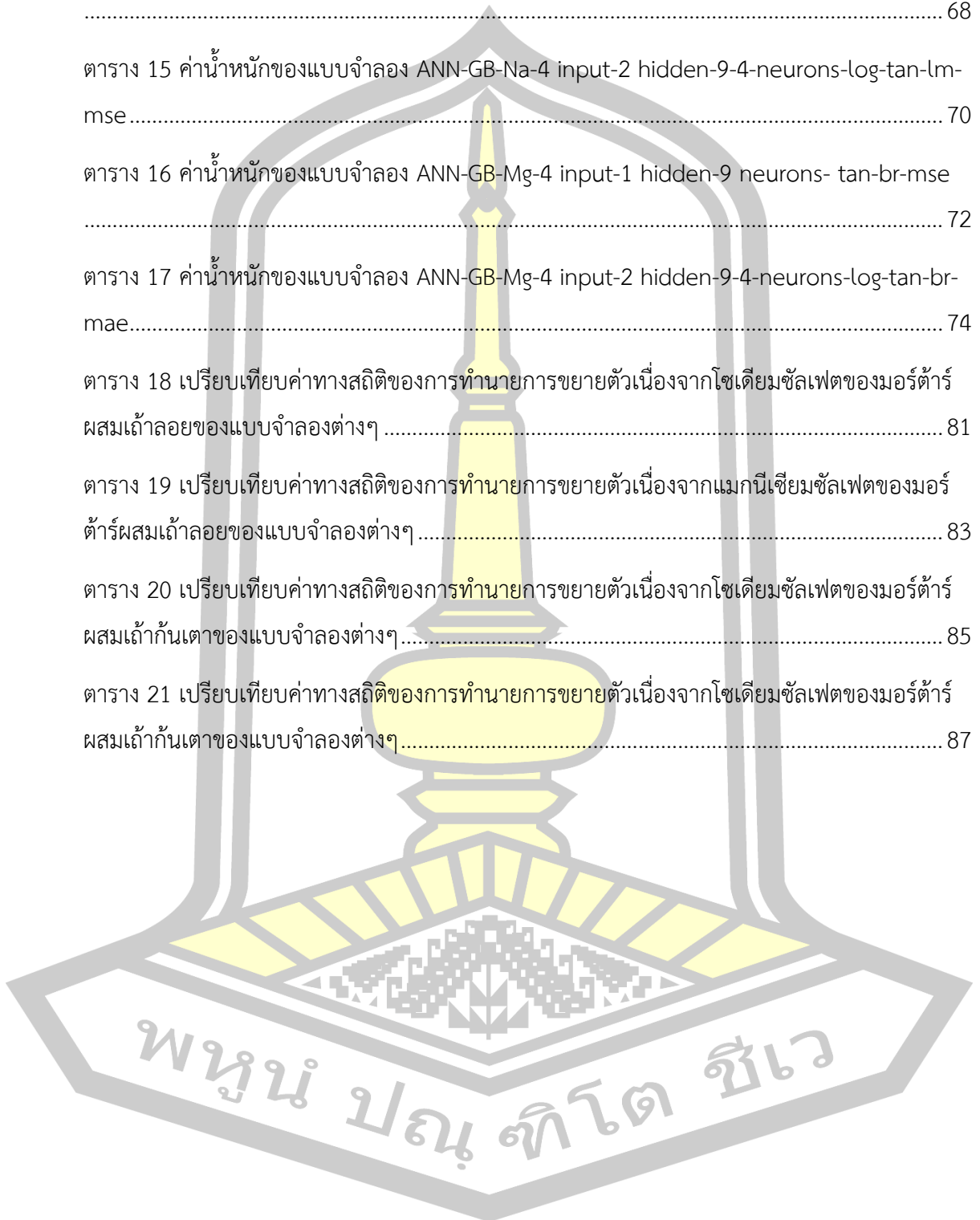
3.4 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	31
3.5 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้.....	34
3.6 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอย.....	36
3.7 ค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองการทำนาย.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	39
4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	39
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	44
4.3 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต.....	46
4.4 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอย.....	55
4.5 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	59
4.6 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้.....	76
4.7 การเปรียบเทียบผลการทำนายการขยายตัวของแบบจำลองต่างๆ.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	91
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	119

พูน ปณ ภัโต ชีเว

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 เกณฑ์กำหนดในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมพันธ์กับสารละลายซัลเฟต	10
ตาราง 2 รายการออกแบบของโครงข่ายประสาทเทียม	34
ตาราง 3 รายการออกแบบของแบบจำลองการอนุมานความคลุมเครือบนพื้นฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้	36
ตาราง 4 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ	40
ตาราง 5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	46
ตาราง 6 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR	56
ตาราง 7 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR	57
ตาราง 8 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR	58
ตาราง 9 ทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR	59
ตาราง 10 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Na-3 input-1 hidden -9 neurons-tan-lm-mse	60
ตาราง 11 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Na-3 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-mse	62
ตาราง 12 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Mg-3 input-1 hidden-9 neurons- tan-br-mse	64
ตาราง 13 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Mg-3 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-sse	66

ตาราง 14 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Na-4 input-1 hidden-9 neurons- log-lm-mae	68
ตาราง 15 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Na-4 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-mse	70
ตาราง 16 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Mg-4 input-1 hidden-9 neurons- tan-br-mse	72
ตาราง 17 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Mg-4 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-br-mae.....	74
ตาราง 18 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยของแบบจำลองต่างๆ	81
ตาราง 19 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยของแบบจำลองต่างๆ.....	83
ตาราง 20 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดแก้วของแบบจำลองต่างๆ.....	85
ตาราง 21 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดแก้วของแบบจำลองต่างๆ.....	87



สารบัญภาพประกอบ

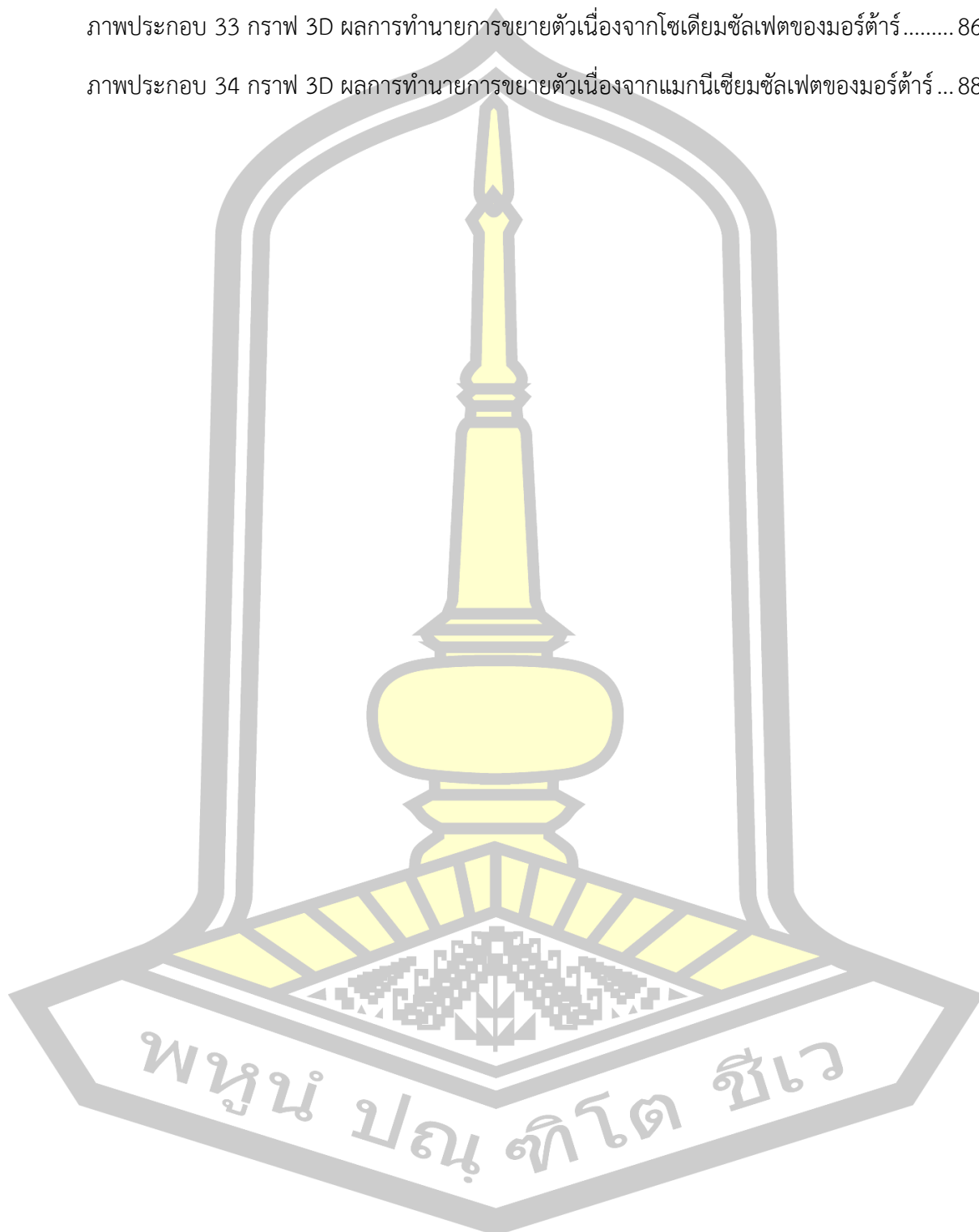
	หน้า
ภาพประกอบ 1 แผนผังโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซปตรอน.....	13
ภาพประกอบ 2 แผนผังโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Backpropagation.....	16
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบความคลุมเครือ	18
ภาพประกอบ 4 ระบบการอนุมานของฟัซซีลอจิกโดยวิธีของ Sugeno	19
ภาพประกอบ 5 โครงสร้างพื้นฐานของแบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้	21
ภาพประกอบ 6 แผนผังการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม	32
ภาพประกอบ 7 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังขยาย 1000 เท่า.....	41
ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังขยาย 2000 เท่า.....	42
ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าลอย (FA).....	42
ภาพประกอบ 10 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าก้นเตา ก่อนอบ (OB).....	43
ภาพประกอบ 11 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าก้นเตา บดละเอียดขนาดใหญ่ (LB).....	43
ภาพประกอบ 12 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าก้นเตา บดละเอียดขนาดเล็ก (SB).....	44
ภาพประกอบ 13 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอย (ก)-(ข).....	48
ภาพประกอบ 14 การขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอย (ก)-(ข).....	49
ภาพประกอบ 15 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าก้นเตา 6.3 ไมครอน (ก)-(ข).....	52
ภาพประกอบ 16 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าก้นเตา 22.2 ไมครอน (ก)-(ข).....	53
ภาพประกอบ 17 การขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าก้นเตา 6.3 ไมครอน	54

ภาพประกอบ 18 การขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทา 22.2 ไมครอน (ก)-(ข).....	55
ภาพประกอบ 19 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน	61
ภาพประกอบ 20 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน	63
ภาพประกอบ 21 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน	65
ภาพประกอบ 22 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน	67
ภาพประกอบ 23 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน	69
ภาพประกอบ 24 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน	71
ภาพประกอบ 25 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน	73
ภาพประกอบ 26 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน	75
ภาพประกอบ 27 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANFIS	77
ภาพประกอบ 28 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมอร์ต้าผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANFIS.....	78
ภาพประกอบ 29 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANFIS.....	79
ภาพประกอบ 30 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมอร์ต้าผสมเถ้ากันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANFIS	80
ภาพประกอบ 31 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้า.....	82

ภาพประกอบ 32 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์... 84

ภาพประกอบ 33 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์..... 86

ภาพประกอบ 34 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์... 88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารประกอบของซัลเฟตนั้นเป็นอันตรายต่อคอนกรีตเพราะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวเป็นผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังลดลง โดยสารประกอบของซัลเฟตที่พบบ่อยๆมักจะละลายอยู่ในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณริมทะเล หรือดินเค็ม ดินกร่อย โดยเฉพาะดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งซัลเฟตที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือของโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือ แมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากนี้อาจพบซัลเฟตในน้ำเสียจากบ้านเรือนหรือแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติด้วย สำหรับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นสารละลายที่เกิดจากเกลือซัลเฟตที่สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยทำให้เกิดการขยายตัวของเพสต์ก่อน จากนั้นเกิดการกัดกร่อนที่ผิวหน้าและหลุดร่อนออกไป สำหรับลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีตที่กัดกร่อนโดยสารละลายซัลเฟตมักจะเริ่มกัดกร่อนที่บริเวณตรงขอบและมุมของคอนกรีตก่อน ตามด้วยเกิดรอยแตกกว้างและพองตัวของคอนกรีตเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งทำให้โครงสร้างของคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ต้องการ และหากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อคอนกรีตหลุดร่อนไปจะทำให้เหล็กเกิดการเป็นสนิมได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานเป็นทางเลือกที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำมาใช้ทดแทนบางส่วน of ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต เนื่องจากวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวให้ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้ราคาของคอนกรีตถูกลง สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้ในคอนกรีตได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาฟูมและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัสดุเหล่านี้ในช่วงก่อนหน้านี้เป็นเพียงของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อะไรได้ อีกทั้งก่อให้เกิดการทำลายสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการทิ้งของเสียเหล่านี้ในปริมาณที่มาก แต่เมื่อสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ทำให้ของเสียเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากจากโรงงานอุตสาหกรรมเพราะสามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุและลดค่าใช้จ่ายในการจัดทิ้งอีกทั้งส่งผลให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์ที่ได้จากเหมืองในบริเวณนั้นเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตซึ่งก่อให้เกิดเถ้าถ่านหินที่เกิดจากการเผาถ่านหิน ซึ่งพบว่ามีเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาถ่านหินทั้งหมดประมาณ 3 ล้านตันต่อปี โดยแบ่งเป็นเถ้าลอยประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้น

เตาประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด โดยเถ้าลอยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตโดยจะมีผู้รับซื้อถึงที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อใช้ในงานคอนกรีตผสมเสร็จ แต่เถ้าก้นเตาซึ่งเกิดจากเถ้าลอยหลอมเหลวจับตัวกันเป็นก้อนตกลงสู่ก้นเตานั้น พบว่ายังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเพราะด้วยลักษณะที่มีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยมากหากนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดต่ำลงหรือหากนำมาใช้แทนที่ทรายจะเกิดการดูดน้ำที่มากกว่าทำให้กำลังอัดต่ำลงเช่นกัน (Ghafoori และคณะ, 1998) แต่มีงานวิจัยหลายงานที่พัฒนาเถ้าก้นเตาด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงใกล้เคียงเถ้าลอยพบว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้ (Inthata, Kowtanapanich, & Cheerarot, 2013; Jaturapitakkul & Cheerarot, 2003; ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์ จตุพล ตั้งภาสิต และเรืองรุทธิ์ ชีระโรจน์, 2549)

ระบบปัญญาประดิษฐ์ ได้แก่ แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network : ANN) และแบบจำลองระบบการอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ (Adaptive network-based fuzzy inference system : ANFIS) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ในการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถโดดเด่นในการทำนายค่าผลลัพธ์การทดลองได้แม่นยำมาก ซึ่ง ANN มีความสามารถในการเรียนรู้และฝึกฝนชุดข้อมูลได้ ดังนั้นยังมีชุดข้อมูลยิ่งมากจะทำให้การเรียนรู้ยิ่งดีขึ้น ส่วน ANFIS นั้นเป็นแบบจำลองที่นำจุดเด่นของทั้ง ANN และแบบจำลองแบบระบบการอนุมานความคลุมเครือมาผสมเข้าด้วยกันจึงจัดได้ว่าเป็นระบบปัญญาเชิงประดิษฐ์แบบผสมที่ประสิทธิภาพสูง ซึ่งในกระบวนการดำเนินการของระบบปัญญาประดิษฐ์ แม้ว่าจะมีชุดข้อมูลที่ซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่มากหรือไม่เพียงพอ แบบจำลองก็ยังมีความสามารถทำนายผลได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ในการทำนายการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำที่สูงสำหรับการทำนายผล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ในการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมและโซเดียมซิลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตานำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำเถ้าก้นเตามาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงด้วยเครื่องบดแบบตกระทาบ เพื่อให้มีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 และช่วงร้อยละ 30-35 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยนั้นนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพ

1.3.2 ทำการหล่อตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ เซนติเมตร แล้วนำเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้งสองขนาดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมและโซเดียมซิลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นวัดความยาวของแท่งตัวอย่างที่อายุต่างๆ เพื่อหาค่าการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

1.3.3 นำข้อมูลตัวแปรนำเข้าและส่งออกมาสังเคราะห์กับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองระบบการอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version R2013a

พูน ปณ จิต ชีเว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

เถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง ที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยคุณภาพของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิการเผา ระยะเวลาการเผา และรูปแบบในการเผา ดังนั้นความสม่ำเสมอด้านคุณภาพของเถ้าลอยจึงถูกจำกัดจากแหล่งผลิตแต่ละแหล่ง ซึ่งตาม มาตรฐาน ASTM C618 (2015) ได้จำแนกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภทตาม ได้แก่ ประเภท C และ ประเภท F

2.1.1 เถ้าลอยประเภท C เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และ อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภท ลิกไนต์ และ ซับบิทูมินัส นอกจากนี้จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งเรียกว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง (High-calcium fly ash) ซึ่งมีสมบัติของสารซีเมนต์และปอซโซลานในตัวเอง ดังนั้นกำลังรับแรงอัดช่วงต้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้แทนที่ปูนซีเมนต์จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์กับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาได้สารซีเมนต์ที่แข็งตัวได้นั่นเอง สำหรับปริมาณซัลเฟตไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 5 เนื่องจากปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอยมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัดและมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนของสารซัลเฟตได้

2.1.2. เถ้าลอยประเภท F เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกอนออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และ อะลูมินาออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก โดยส่วนมากเกิดจากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซต์ และ บิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (Low-calcium fly ash) ซึ่งหมายถึงเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำนั่นเอง ทำให้มีสมบัติการเป็นสารซีเมนต์อยู่น้อยหรือแทบจะไม่มี แต่ยังคงมีสมบัติของวัสดุปอซโซลานอยู่ เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการรับแรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้แทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่หลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงปลายของคอนกรีตที่ได้รับการผสมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาได้ สำหรับปริมาณซัลเฟตไตรออกไซด์กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 5 เช่นเดียวกับเถ้าลอยประเภท C

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต ทำให้ได้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินและเถ้าลอยจะถูกพัดออกมาตามลมร้อน จากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic precipitator) จะรวบรวมเถ้าลอยเพื่อเก็บไว้ในไซโล แต่ในบางกรณีที่มีความร้อนสูงมากจนทำให้เถ้าลอยเกิดการหลอมเหลวและบางส่วนจับตัวกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักรวมและตกลงสู่กันเตาจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา สำหรับเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยลักษณะทางกายภาพทั่วไปของเถ้าลอยแม่เมาะพบว่า มีทรงกลมขนาดเล็กผิวเรียบ สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้โดยตรง ส่งผลในทางบวกต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตดังนี้ เพิ่มความสามารถในการเท เพิ่มความทึบแน่นให้คอนกรีต เพิ่มความสามารถรับแรงอัดที่อายุช่วงปลายให้สูงขึ้น เพิ่มความคงทนของคอนกรีตต่อภาวะสิ่งแวดล้อมที่มาระทบ ลดการหดตัวและการขยายตัว ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาปูนซีเมนต์และน้ำ ลดการแตกร้าวในคอนกรีต เป็นต้น

สำหรับการใช้เถ้าลอยแม่เมาะในงานคอนกรีตมักใช้ในรูปแบบของสารผสมเพิ่ม (Mineral admixture) เพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์และปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kiattikomol et al., 2001) พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปางมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 618 สำหรับการใชเถ้าก้นเตานั้นงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และคณะ (2003) ได้ทำการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 7 ไมครอนแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์และคอนกรีตพบว่าเถ้าก้นเตาบดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้ เนื่องจากมีดัชนีกำลังผ่านมาตรฐาน ASTM C 618 และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากแหล่งเดียวกันมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์ (2551) ได้พบว่าเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะมีระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ใกล้เคียงกันเมื่อทั้งคู่มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน อ่อนทิวา บุญเรือง (2552) พบว่าการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะช่วยลดผลกระทบจากสารละลายซัลเฟตต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ โดยการใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานซัลเฟตเพิ่มขึ้น สมชาย อินทะตา (2551) Inthata และ Cheerarat (2013) พบว่าการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะช่วยลดผลกระทบจากแทรกซึมของคลอไรด์ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการใช้การใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น

2.2 การทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นสารละลายที่สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ ลักษณะของคอนกรีตที่กัดกร่อนโดยสารละลายซัลเฟตจะเริ่มกัดกร่อนที่บริเวณขอบและมุมก่อน ตามด้วยเกิดรอยแตกร้าวและพองตัวของคอนกรีตเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายซัลเฟตกับผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งทำให้โครงสร้างของคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ต้องการ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบบ่อยในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โดยเกลือซัลเฟตที่พบบ่อยอยู่ในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณริมทะเล หรือ ในดินทั่วไปที่มีลักษณะเป็นดินเค็ม โดยเฉพาะดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งเกลือซัลเฟตที่พบบ่อยที่สุดมักจะเป็นเกลือ โซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือ แมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือ ตามแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติด้วย ส่วนแคลเซียมซัลเฟตจากภายนอกจะมีผลกระทบค่อนข้างน้อยเนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก แต่แคลเซียมซัลเฟตที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อใช้ช่วงเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตจากภายนอกได้

2.2.1. กลไกของการทำลายโดยซัลเฟต

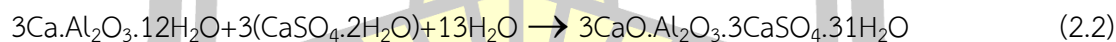
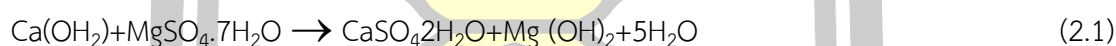
ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือ แคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงมักใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) แทน เมื่อสารทั้งสองปรากฏอยู่ในดิน น้ำทะเล น้ำเสีย ก็มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจกลไกการทำลายโดยซัลเฟต เพื่อที่จะได้ป้องกันโครงสร้างคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมที่อันตรายดังกล่าว พฤติกรรมการกัดกร่อนเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ การกัดกร่อนของซัลเฟตอลูมินต์ ซึ่งเกิดจากการที่อนุเล็กๆ ของซัลโฟลูมินเนตเปลี่ยนสภาพเป็นอนุใหญ่ (Ettringite) หรือ Calcium Sulphoaluminate ทำให้เกิดการขยายตัวภายในสูงมากและการกัดกร่อนของยิปซัมซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) กับ ซัลเฟตไอออนเป็นยิปซัม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเช่นกัน การขยายตัวนี้จะทำให้หน่วยแรงภายในสูงมากดันให้เนื้อคอนกรีตหลุดร่อนออกมาได้ โดยขบวนการกัดกร่อนของซัลเฟตเริ่มจากการแตกตัวของซัลเฟตไอออนและซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient (K_p)) และ ความสามารถซึมผ่านได้ของซัลเฟตไอออน (K_d) โดยการเกิดยิปซัม จะถูกควบคุมโดยปริมาณไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของซัลเฟต และการกัด

ก่อนเนื่องจากซัลโฟลูมินเนตและมีผลทำให้ค่าการซึมผ่าน (Kp) ของคอนกรีตสูงขึ้น ทำให้เมื่อระยะเวลาผ่านไป การกัดกร่อนของซัลเฟตยิ่งรุนแรงขึ้น

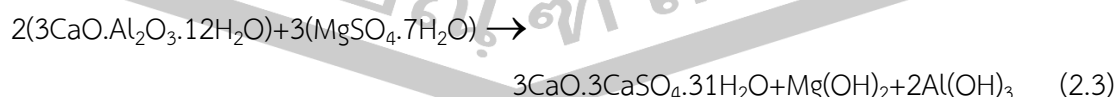
2.2.2 ปฏิกริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับซีเมนต์เพสต์

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, C-S-H) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารประสาน โดยมีประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH) ซึ่งมีประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบที่เป็นด่างทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย นอกจากนี้การให้กำลังยังค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แต่มีคุณสมบัติช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ แต่ถ้านำวัสดุปอซโซลานผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต สารประกอบซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) อันเป็นสารประกอบอย่างหนึ่งในวัสดุปอซโซลาน โดยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมินาไฮเดรต (C-A-H)

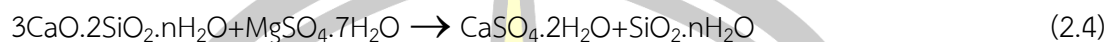
ปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับซีเมนต์เพสต์เริ่มจากแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์ คือ แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และน้ำ (H_2O) ดังสมการ (2.1) และยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับแคลเซียมอะลูมินาไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ได้ผลิตภัณฑ์ Ettringite ดังสมการ (2.2)



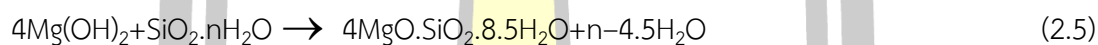
ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) กับแคลเซียมอะลูมินาไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ได้ผลิตภัณฑ์ Ettringite ($3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และน้ำ (H_2O) ดังสมการ (2.3)



แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ได้ผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการ (2.4)



แคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ในสมการที่ (2.4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ดังได้แสดงไว้แล้วในสมการที่ (2.2) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสมการ (2.3) หรือ (2.4) สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากสมการ (2.4) ได้ผลิตภัณฑ์ คือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$) มีลักษณะเป็นสารที่มีความอ่อนนุ่มสีขาวและมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ดังสมการ (2.5)

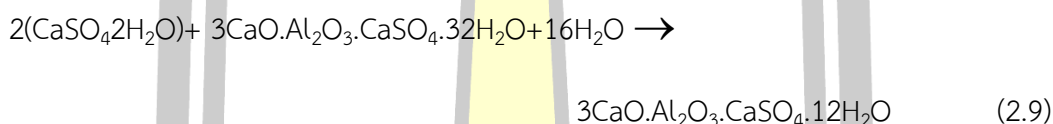
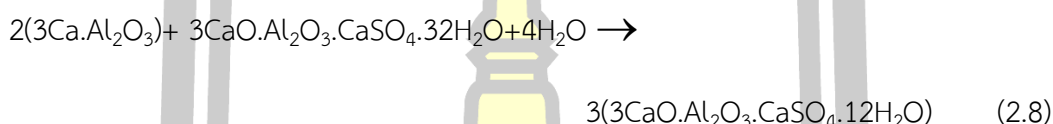
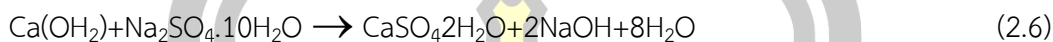


Ettringite ที่มีอยู่ใหญ่หรือแคลเซียมซัลโฟลูมินเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากสมการ (2.2) และ Ettringite ที่ได้จากสมการ (2.3) มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและมีการขยายตัวมากกว่าสารเดิมคือ แคลเซียมอลูมินไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ถ้ามิได้จำกัดปริมาณของ C_3A ในปูนซีเมนต์ไว้ การขยายตัวอาจทำให้คอนกรีตแตกเสียหายได้ โดยแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต ในสมการ (2.1) จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากการขยายตัวนี้จะทำให้คอนกรีตแตกได้ ส่วนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยามีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำมาก

2.2.2 ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับซีเมนต์เพสต์

กลไกของการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตเริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ (2.6) โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ส่งผลให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัวซึ่งมีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และเอททริงไกต์ ($3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น สารยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่ได้จากสมการ (2.6) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอะลูมิน

ไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), โมโนซัลเฟต และ/หรือ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังสมการ (2.7) ถึง (2.9) เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วเอททริงไต์จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก ดังนั้นในน้ำหนักที่เท่ากันย่อมมีปริมาตรมากกว่า จึงทำให้เกิดการขยายตัว ซึ่งผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตและวิธีการป้องกัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟตและวิธีป้องกันสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

1) ชนิดของสารละลายซัลเฟต สารละลายซัลเฟตที่มีผลต่อการทำลายของคอนกรีตคือ โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยโซเดียมซัลเฟตสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้สองตัว ดังนั้นจึงส่งผลต่อการขยายตัวได้มากกว่าแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยาได้ แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตที่มีลักษณะเป็นสารที่มีความอ่อนนุ่มสีขาว ดังนั้นจึงส่งผลต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตได้มากกว่าโซเดียมซัลเฟต (Al-Amoudi et al., 1995; Santhanam et al., 2006)

2) ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต การทำลายจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต กล่าวคือถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมีการทำลายที่รุนแรงมากขึ้น ซึ่งในช่วงระยะเวลาแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อัตราการขยายตัวในช่วงระยะเวลาที่สองอัตราการขยายตัวจะแปรผันตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (Santhanam et al., 2006)

3) การทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้สารละลายซัลเฟตซึมสามารถผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ความรุนแรงลดลง โดยคอนกรีตมีความทึบน้ำสูงมักมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ และมีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีความละเอียดมาก (Khatri et al., 1997) โดย ว.ส.ท. ได้มีเกณฑ์กำหนดในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับสารละลายซัลเฟตออกเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 เกณฑ์กำหนดในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต

สภาวะการสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต	ปริมาณซัลเฟต (SO_4) ที่ละลายน้ำได้ในดิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซัลเฟต (SO_4) ในน้ำ (หนึ่งในล้านส่วน)	ประเภทของปูนซีเมนต์	คอนกรีตมวลรวมปกติ	คอนกรีตมวลรวมเบา
				ค่าสูงสุดของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก*	ค่าต่ำสุดของกำลังอัด* (กก./ cm^2)
น้อยมาก	0.00-0.10	0-150	-	-	-
ปานกลาง ⁺	0.10-0.20	150-1,500	II, I**	0.5	250
รุนแรง	0.20-2.00	1,500-10,000	V	0.45	300
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	V ผสมวัสดุปอซโซลาน ⁺⁺	0.45	300

* ในกรณีที่ต้องการคอนกรีตที่ซึมผ่านได้น้อยหรือเพื่อป้องกันสนิมในเหล็กเสริม ให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า หรือกำลังอัดที่สูงกว่า

** ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ชนิดพิเศษซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง

+ น้ำทะเล

++ วัสดุปอซโซลานที่นำมาผสมกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ต้องตรวจสอบก่อนว่าสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะรุนแรงได้จริง

4) ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF น้อยจะมีแนวโน้มที่จะต้านทานการทำลายของสารละลายซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และ

ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3S ต่อ C_2S ต่ำก็จะมีความต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น โดยปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้ในการต้านทานซัลเฟตคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ขึ้น (Prusinski และ Carrasquillo, 2000)

5) ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตจากภายนอกจะเริ่มทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อน ดังนั้นถ้าสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตได้ก็จะช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย สำหรับวิธีการลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตอาจทำได้โดยการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงบดละเอียด ซิลิกาฟูม แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพราะวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง (Irassar & Batic, 1989; Nasser & Lai, 1990)

6) ปัจจัยอื่นๆ เช่น การบ่ม อุณหภูมิ ซึ่งคอนกรีตที่มีการบ่มที่ดีในระยะเวลาที่เหมาะสมจะทำให้มีค่าซึมผ่านของน้ำที่ต่ำเป็นผลให้การกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟตลดลง สำหรับอุณหภูมิพบว่า การกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Santhanam et al., 2006)

2.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs) คือ ระบบการคำนวณแบบหนึ่งที่สร้างขึ้นจากหน่วยประมวลผลจำนวนมาก โดยเชื่อมโยงเข้าด้วยกันอย่างหนาแน่น และประมวลผลข้อมูลสารสนเทศโดยการตอบสนองต่อข้อมูลจากภายนอกในสถานะที่ไม่คงตัว ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการเลียนแบบลักษณะการทำงานของเครือข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์นั่นเอง

2.4.1 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมอาจจะไม่เหมือนเครือข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ทั้งหมดแต่ก็มีส่วนคล้ายสมองของมนุษย์ ในส่วนของการรวมกลุ่มแบบขนานของหน่วยประมวลผลย่อย ๆ และการเชื่อมโยงเข้าด้วยกัน เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเรียนรู้ โดยทั่วไปโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

2.4.1.1 ข้อมูลนำเข้า (Inputs) เป็นการรับส่วนของข้อมูลดิบที่จะถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม โดยการจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์

2.4.1.2 ค่าน้ำหนัก (Weight) เป็นตัวเลขที่คูณเพื่อปรับค่าของข้อมูลนำเข้า ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด

2.4.1.3 ฟังก์ชันผลรวม (Sum function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณผลรวมของค่าน้ำหนักและข้อมูลนำเข้า โดยส่งต่อไปยังฟังก์ชันกระตุ้น

2.4.1.4 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการส่งผ่านค่าผลรวมของน้ำหนักใหม่ในแต่ละชั้น โดยแต่ละฟังก์ชันจะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกันไป

2.4.1.5 ข้อมูลส่งออก (Output layer) ข้อมูลที่แสดงผลลัพธ์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการทำงานของค่าน้ำหนัก และฟังก์ชันต่างๆ จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนมีความผิดพลาดเป็นที่ยอมรับได้

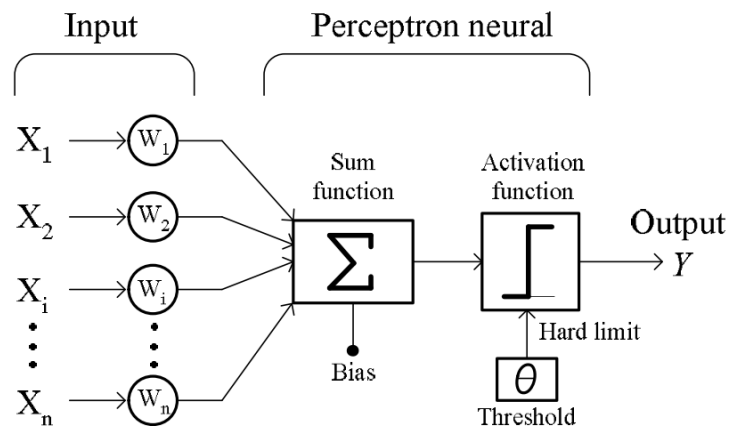
2.4.2 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้จากประสบการณ์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของคำตอบให้ดีขึ้น โดยนิวรอล (เซลล์ฝกฝน) จะถูกเชื่อมโยงกับค่าน้ำหนัก (Weight) สัญญาณผ่าน ข้อมูลจากนิวรอลหนึ่งไปยังอีกนิวรอลหนึ่ง ซึ่งในแต่ละนิวรอลจะรับสัญญาณข้อมูลนำเข้าที่ผ่านการเชื่อมโยงกับค่าน้ำหนัก และทำการคำนวณผลรวมของค่าน้ำหนักของการส่งผ่าน ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่าที่จุดตรวจสอบ (Threshold Value) นั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ (Activation Function) ซึ่งมีอยู่หลายชนิดแต่จากการทดสอบพบว่า ในแต่ละฟังก์ชันจะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกันไปมีเพียง 5 ชนิดที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานมากที่สุด กล่าวได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถปรับข้อมูลให้วนซ้ำได้ โดยเชื่อมโยงผ่านค่าน้ำหนักเพื่อลดความแตกต่างระหว่าง ข้อมูลที่แท้จริง (Actual output) และข้อมูลเป้าหมาย (Target output) ให้มีค่าน้อยที่สุด จึงจะสามารถส่งข้อมูลออกไปยังนิวรอลตัวอื่นได้ เมื่อนำนิวรอลแต่ละหน่วยมาต่อกันเพื่อให้ทำงานร่วมกันในทางตรรกยะแล้ว การทำงานก็จะเหมือนกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสมองมนุษย์เพียงแต่ในคอมพิวเตอร์จะเป็นเพียงตัวเลขเท่านั้น

2.4.3 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้คือ

2.4.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single-layer Neural Network) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซปตรอนชนิดที่ง่ายที่สุด โดยมีโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว การทำงานของเพอร์เซปตรอนมีพื้นฐานการพัฒนามาจากแบบจำลองของ McCulloch และ Pitts โดยแบบจำลองประกอบด้วย ชั้นนำเข้า ชั้นเพอร์เซปตรอน และชั้นส่งออกหรือชั้นแสดงผลลัพธ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 1

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 1 แผนผังโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซปตรอน

จากภาพประกอบ 1 พบว่าเมื่อมีการรับข้อมูลชั้นนำเข้า ค่าน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกสุ่มเลือกค่าใดๆ และเชื่อมโยงเข้ากับข้อมูลนำเข้าที่มีลักษณะเช่นเดียวกัน จากนั้นได้ผลรวมของค่าน้ำหนักส่งผ่านไปยังฟังก์ชันกระตุ้น ซึ่งทำการประเมินผลลัพธ์เปรียบเทียบกับค่าที่จุดตรวจสอบเพื่อปรับค่าหาขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ ก่อนส่งผ่านข้อมูลไปยังชั้นส่งออก (Y_p) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.10) ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความแตกต่าง (Bias) กันมาก ดังนั้นต้องมีการกำหนดการเรียนรู้หรืออัลกอริทึมให้กับเครือข่าย เพื่อเป็นการปรับแต่ง ค่าน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.11)

$$Y(p) = \text{Step or Sign} \left[\sum_{i=1}^n W_i(p) * X_i(p) - \theta \right] \quad (2.10)$$

$$W_i(p+1) = W_i(p) + [\alpha \cdot X_i(p) \cdot e(p)] \quad (2.11)$$

โดยที่ W_i = ค่าน้ำหนักที่ชั้นนำเข้าของนิวรัล i

X_i = ข้อมูลนำเข้าของนิวรัล i

θ = ค่าที่จุดตรวจสอบที่นิวรัลนั้น

p = การเรียนรู้รอบที่

α = อัตราการเรียนรู้

e = ค่าคลาดเคลื่อน

หากผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่แท้จริงกับข้อมูลเป้าหมายต่องมีการปรับปรุงน้ำหนักใหม่ โดยทำซ้ำตามสมการ (2.10) จนกระทั่งผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์หรือมีความผิดพลาดน้อยที่สุด

2.4.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer neural networks) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีเพอร์เซปตรอนหลายชั้นแบบป้อนไปหน้า (Feed-forward) โดยข้อมูลที่ประมวลผลในเครือข่ายจะถูกส่งไปในทิศทางเดียว จากชั้นนำเข้าส่งต่อไปข้างหน้าจนถึงชั้นส่งออก โดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล โดยอาจจะมีหนึ่งชั้นซ่อนหรือมากกว่าก็ได้ โดยส่วนมากนิยมใช้อัลกอริทึมเรียนรู้ในรูปแบบของการปรับค่าการเคลื่อนลงตามความชัน (Gradient descent) แบบส่งค่าย้อนกลับ (Backpropagation) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นประกอบไปด้วย ชั้นนำเข้าที่รับ ข้อมูลเข้ามาชั้นซ่อนที่ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Sigmoid ตามด้วยชั้นส่งออกที่มีการประมวลผลที่ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้นและในแต่ละชั้นมีการเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น นั้นหมายถึงทุกๆ นิวรอนในแต่ละชั้นมีการเชื่อมโยงกับนิวรอนอื่น ๆ ของในชั้นถัดไป ขบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายแบบหลายชั้นมีการพิจารณาที่ชั้นแสดงผลลัพธ์ หากมีความคลาดเคลื่อนต้องมีการปรับแก้ค่าน้ำหนักใหม่ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่แท้จริงกับข้อมูลเป้าหมาย

2.4.4 โดยแนวคิดของการเรียนรู้ของ Backpropagation มีอยู่ 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่แรก เป็นการส่งข้อมูลจากชั้นนำเข้า ส่งผ่านไปข้างหน้าจนกระทั่งถึงชั้นส่งออก ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นประมวลผล ทำให้แสดงผลข้อมูลออกมา ดังในภาพประกอบ 2 โดยกำหนดให้ i, j และ k หมายถึง นิวรอนในชั้นนำเข้า ชั้นซ่อน และชั้นส่งออก ตามลำดับ และให้ n, m และ l หมายถึง จำนวนขอมูลนำเข้า ของนิวรอน i, j และ k ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.12) – (2.13)

ในชั้นซ่อน :

$$Y_j(p) = \text{Sigmoid} \left[\sum_{i=1}^n w_{ij}(p) * X_i(p) - \theta_j \right] \quad (2.12)$$

ในชั้นส่งออก :

$$Y_k(p) = \text{Sigmoid} \left[\sum_{j=1}^m w_{jk}(p) * X_j(p) - \theta_k \right] \quad (2.13)$$

โดยที่ W_{ij} และ W_{jk} หมายถึง ค่าน้ำหนักที่ชั้นนำเขาระหว่างนิวรอน $i - j$ และ $j - k$ ตามลำดับ ส่วน X_{jk} หมายถึง ค่าที่ชั้นนำเขาของนิวรอน $j - k$

ขั้นตอนที่สอง เป็นการหา Error gradient ในแต่ละค่าน้ำหนักที่ได้จากฟังก์ชัน กระตุ้น และค่าความคลาดเคลื่อนตลอดโครงข่าย เพื่อเป็นการปรับแก้ค่าน้ำหนักใหม่ โดยส่งข้อมูลย้อนกลับจากชั้นส่งออกไปยังชั้นซ่อน และชั้นนำเขา ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.14) – (2.17)

ในชั้นส่งออก :

$$\delta_k(p) = Y_k(p) \cdot [1 - Y_k(p)] \cdot e_k(p) \quad (2.14)$$

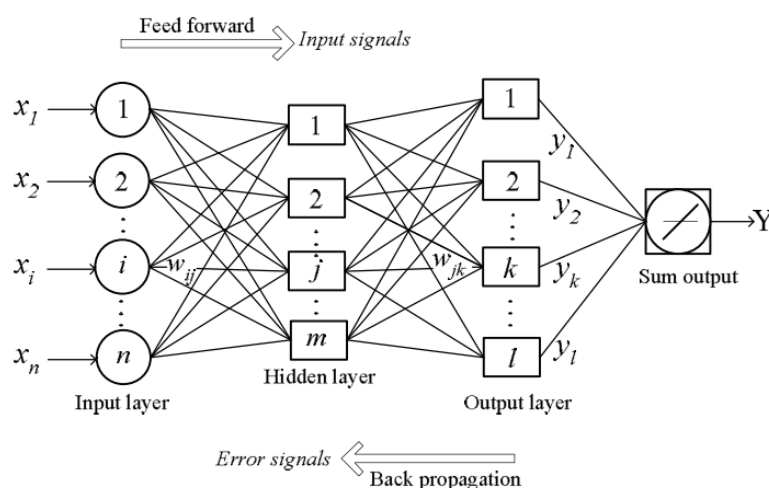
$$W_{jk}(p+1) = W_{jk}(p) + [\alpha \cdot Y_j(p) \cdot \delta_k(p)] \quad (2.15)$$

ในชั้นซ่อน :

$$\delta_j(p) = Y_j(p) \cdot [1 - Y_j(p)] \cdot \sum_{k=1}^1 \delta_k(p) \cdot W_{jk}(p) \quad (2.16)$$

$$W_{ij}(p+1) = W_{ij}(p) + [\alpha \cdot X_i(p) \cdot \delta_j(p)] \quad (2.17)$$

โดยที่ $\delta_k(p)$ หมายถึง ค่า Error gradient ของนิวรอน k ที่ชั้นส่งออกในรอบการเรียนรู้ที่ p โดย Y_j และ Y_k หมายถึง ข้อมูลในชั้นส่งออกของนิวรอน j และ k ตามลำดับ ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ต้องฝึกฝนปรับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่แท้จริงกับข้อมูลเป้าหมาย จนกระทั่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์เป็นที่น่าพอใจ หรือจนกระทั่งครบรอบการเรียนรู้ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นสามารถไขแฉปัญหาสำหรับโจทย์ที่ต้องการเรียนรู้จดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ความสัมพันธ์ของข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออก ทั้งในสมการเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น อีกทั้งยังสามารถประมาณค่าของฟังก์ชันที่จำกัดจำนวนต่าง ๆ ที่ไม่มีความต่อเนื่องอย่างไม่มีหลักเกณฑ์ เพียงแต่กำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนให้เพียงพอ



ภาพประกอบ 2 แผนผังโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Backpropagation

2.4.5 การเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของเครื่องคอมพิวเตอร์ คือ เทคนิคหรืออัลกอริทึมซึ่งสอนให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งได้เหมือนกับมนุษย์กระทำ โดยประเภทของการเรียนรู้ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เรียนรู้จากประสบการณ์ (Experience based learning) สอนให้จดจำเลียนแบบโดยการกำหนดค่าไว้แล้วประเมินว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า เรียนรู้จากตัวอย่าง (Example based learning) สอนโดยการให้ตัวอย่างที่ถูกและตัวอย่างที่ผิด และเรียนรู้จากความคล้ายคลึง (Analogy based learning) สอนโดยการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของปัญหา สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมสามารถ แบ่งการเรียนรู้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.4.5.1 การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised learning)

เป็นการเรียนรู้แบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายปรับตัว ชุดข้อมูลที่ให้สอนโครงข่ายจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูกต้องโครงข่ายก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

2.4.5.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการสอน (Unsupervised learning)

เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้แนะนำไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด โครงข่ายจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตนเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้โครงข่ายจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้

2.5 แบบจำลองระบบการอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้

แบบจำลองระบบการอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ (Adaptive network-based fuzzy inference system; ANFIS) เป็นส่วนหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่อยู่ในภาคของปัญญาเชิงคำนวณแบบผสม (Hybrid computational intelligence) กล่าวคือปัญญาเชิงคำนวณแบบผสมเป็นการรวมกันอย่างน้อยสองชนิดของแบบจำลอง (Model) หรืออัลกอริทึม (Algorithm) หรือระบบ (System) เข้าไว้ด้วยกัน การผสมผสานของระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system; ES) ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic; FL) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network; ANN) และการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary computation; EC) รวมไปถึงการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic search) และเขาวนปัญญาเชิงเคลื่อนที่เป็นกลุ่ม (Swarm intelligence; SI) ถือเป็นหลักการของการคำนวณแบบละมุน (Soft computing) ซึ่งเป็นฐานการพัฒนาระบบชาญฉลาดแบบไฮบริด (Hybrid intelligent system) ที่สามารถทำงานอย่างเป็นเหตุเป็นผลและเรียนรู้ได้ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่แน่นอนหรือไม่ชัดเจนแม่นยำ ความต้องการของระบบที่สามารถรองรับข้อมูลที่ไม่แน่นอน ไม่แม่นยำชัดเจน หรือไม่สมบูรณ์นี้ได้สืบเนื่องมาจากแนวการทำงานหรือแนวความคิดของมนุษย์นั่นเอง ในชีวิตประจำวันมนุษย์เราใช้ข้อมูลแบบละมุนอยู่ตลอดเวลา ข้อมูลที่ซึ่งแทนด้วยภาษาในการสื่อสาร ไม่ได้ใช้ข้อมูลเชิงตัวเลข อวัยวะรับสัมผัสทั้งหลายทำงานกับข้อมูลแบบละมุน สมมติและทำงานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่แน่นอน ไม่ใช่ตัวเลข แต่มนุษย์ก็มีความสามารถในการจัดการข้อมูลต่างๆ และทำการตัดสินใจได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล โดยไม่ได้ใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขแต่อย่างใด การคำนวณแบบละมุนถือเป็นการจำลองระบบการคิดของมนุษย์นั่นเอง

2.5.1 แบบจำลองความคลุมเครือ (Fuzzy Model)

ในปี ค.ศ. 1965 Zadeh ได้คิดค้นทฤษฎีระบบความคลุมเครือขึ้น ซึ่งเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่า ทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งที่มีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน (Uncertain) อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (Fuzzy) ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป ซึ่งเซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนเช่นนี้เรียกว่าฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

2.5.1.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับตรรกะแบบคลุมเครือ

ตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้ความยืดหยุ่นได้และใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิถีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ โดยตรรกะแบบฟัซซีมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าของความ

จริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น

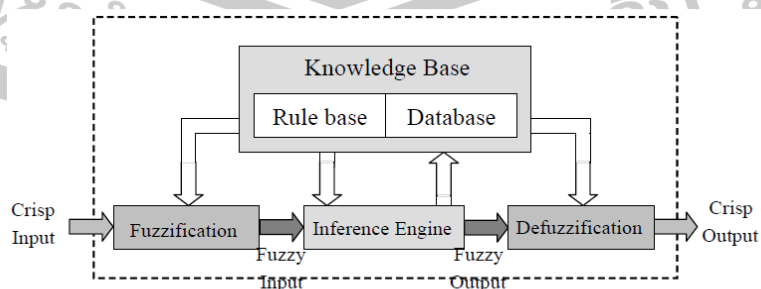
2.5.1.2 เซตความคลุมเครือ

เซตความคลุมเครือ (Fuzzy set) เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีเซตความคลุมเครือจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยเซตความคลุมเครือย่อย (Fuzzy subset) มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 เซตความคลุมเครือจะมีขอบเขตแบบฟัซซีไม่ใช่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดแต่จะมีค่าน้อยๆระหว่าง 0 ถึง 1

2.5.1.3 ระบบการประมวลผลแบบตรรกะแบบคลุมเครือ

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบตรรกะแบบคลุมเครือ ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification), กฎของฟัซซี (Fuzzy base rule), หน่วยประมวลผลลัพธ์ (Inference engine) และกระบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) แสดงดังภาพประกอบ 3

1. ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นกระบวนการจัดการกับข้อมูลเข้า โดยกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอนและคลุมเครือ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ซึ่งในปัจจุบันมีรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้เลือกใช้หลายชนิด อาทิเช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันระฆังคว่ำ ฟังก์ชันเกาส์เซียน ฟังก์ชันตัวเอสและฟังก์ชันตัวแซด แต่ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์แบบจำลองมี 3 ชนิด ได้แก่ ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันเกาส์เซียน และฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูเนื่องจากมีวิธีการคำนวณที่ง่ายต่อการเข้าใจและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่ แต่ในบางกรณีต้องเลือกให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลด้วย เช่น แนวโน้มของชุดข้อมูลอาจมีลักษณะโค้งพาราโบลาซึ่งเหมาะสมกับฟังก์ชันเกาส์เซียน

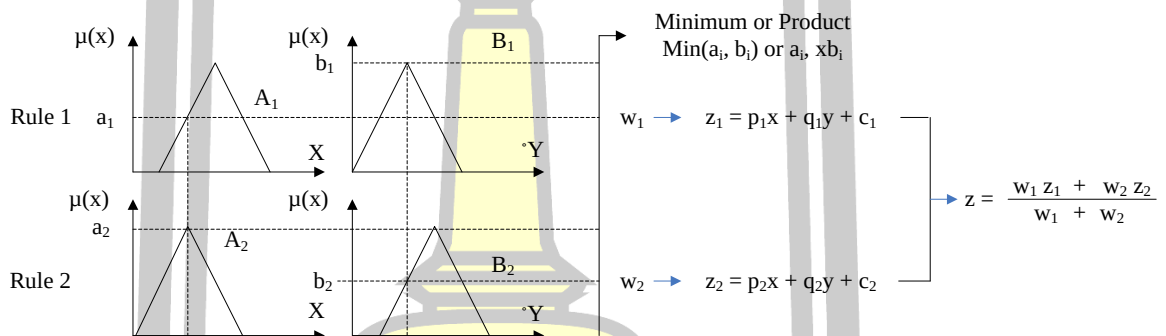


ภาพประกอบ 3 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบความคลุมเครือ

2. กฎของฟัซซี (Fuzzy base rule) จะประกอบไปด้วยกฎต่าง ๆ ที่บ่งบอกความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้าและผลลัพธ์ โดยในปัจจุบันมีวิทยาการตรรกะแบบคลุมเครือจำนวนมาก แต่ที่นิยมและการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดได้แก่ กฎฟัซซีแบบถ้า-แล้ว (Fuzzy If-then rule) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ระบบ Mamdani ซึ่งมีความเหมาะสมต่องานระบบควบคุม และระบบกฎ Sugeno ซึ่งเป็นวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย โดยตัวอย่างของกฎแบบ Sugeno จะแสดงในสมการ (2.18)-(2.19) ภาพประกอบ 4

$$\text{Rule 1 : If } x \text{ is } A_1 \text{ AND } y \text{ is } B_1, \text{ Then } Z_1 = p_1x + q_1y + c_1 \quad (2.18)$$

$$\text{Rule 2 : If } x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2, \text{ Then } Z_2 = p_2x + q_2y + c_2 \quad (2.19)$$



ภาพประกอบ 4 ระบบการอนุมานของฟัซซีลอจิกโดยวิธีของ Sugeno

3. หน่วยประมวลผลผลลัพธ์ (Fuzzy output engine) ทำหน้าที่จัดการกับกฎของฟัซซีทั้งหมดที่สร้างขึ้นและแปลงผลจากตัวแปรเข้าเพื่อแสดงผลลัพธ์ที่เป็นตัวแปรสัญลักษณ์ วิธีการที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ วิธีแบบ Min และวิธีแบบ Prod

4. กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) จะทำหน้าที่แปลงผลตัวแปรที่อยู่ในรูปแบบสัญลักษณ์ที่ส่งมาจากหน่วยประมวลผลผลลัพธ์ให้อยู่ในตัวแปรเชิงตัวเลข ในกระบวนการดีฟัซซิฟิเคชันมีวิธีการแปลงผลอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of gravity : COG) วิธีคำนวณน้ำหนักเฉลี่ย (Wtaver) และวิธีน้ำหนักรวม (Wtsum) เป็นต้น

2.5.1.4 วิธีการอนุมานของแบบจำลองตรรกะแบบคลุมเครือระบบกฎแบบ Sugeno

วิธีการอนุมานของแบบจำลองตรรกะแบบคลุมเครือเป็นการคำนวณหาค่าผลลัพธ์โดยใช้วิธีการกราฟิก ซึ่งสามารถอธิบายวิธีการอนุมานหาค่าผลลัพธ์ของแบบจำลองตรรกะแบบคลุมเครือระบบกฎแบบ Sugeno โดยโครงสร้างพื้นฐานที่มีตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปร โดยที่ตัวแปรนำเข้า X มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 3 เซต และตัวแปรนำเข้า Y มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 2 เซต ซึ่ง

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมดเป็นรูปสามเหลี่ยมและมีกฎทั้งหมด 3 กฎ โดยขั้นตอนการอนุมานมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Fuzzification เมื่อมีข้อมูลนำเข้าของตัวแปร X และ Y คือ x_1 และ y_1 แบบจำลองจะทำการหาระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 Rule Evaluation เป็นการอนุมานหาค่า z จากกฎของฟัซซีที่สร้างขึ้น ซึ่งกฎของแบบจำลองฟัซซีลอจิกระบบกฎแบบ Sugeno เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดและง่ายต่อการคำนวณคือ Zero-Order Sugeno Fuzzy Model โดยจะยกตัวอย่างทั้งหมด 3 กฎ ตามสมการที่ (2.20)-(2.22)

$$\text{Rule 1 : IF } x \text{ is } A_3 \text{ OR } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } z \text{ is } k_1 \quad (2.20)$$

$$\text{Rule 2 : IF } x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2 \text{ THEN } z \text{ is } k_2 \quad (2.21)$$

$$\text{Rule 3 : IF } x \text{ is } A_1 \text{ THEN } z \text{ is } k_3 \quad (2.22)$$

ในการอนุมานการดำเนินการทางฟัซซีเซตคือ Or และ And โดยที่ Or จะเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นสูงสุดจากตัวแปรนำเข้าทั้งหมดเพื่อมาคูณกับค่าคงที่หรือค่าเป้าหมายของกฎ ในส่วนของ And จะเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นต่ำสุดมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นผลลัพธ์จากการอนุมานของกฎทั้ง 3 กฎ ตามสมการ (2.23)-(2.25)

$$\text{Rule 1 : IF } x \text{ is } A_3(0.0) \text{ OR } y \text{ is } B_1(0.37) \text{ THEN } z \text{ is } k_1(0.37) \quad (2.23)$$

$$\text{Rule 2 : IF } x \text{ is } A_2(0.87) \text{ AND } y \text{ is } B_2(0.68) \text{ THEN } z \text{ is } k_2(0.68) \quad (2.24)$$

$$\text{Rule 3 : IF } x \text{ is } A_1(0.18) \text{ THEN } z \text{ is } k_3(0.18) \quad (2.25)$$

ขั้นตอนที่ 3 Aggregation of the rule output เป็นการหาผลรวมของผลลัพธ์จากการอนุมานของกฎทั้งหมดหรือผลรวมของผลคูณระหว่างระดับความเป็นสมาชิกจากการอนุมานกับค่าคงที่ของกฎแต่ละกฎดังสมการ (2.26)

$$\Sigma \text{Rule} = \mu(k_1) \times k_1 + \mu(k_2) \times k_1 + \mu(k_3) \times k_3 \quad (2.26)$$

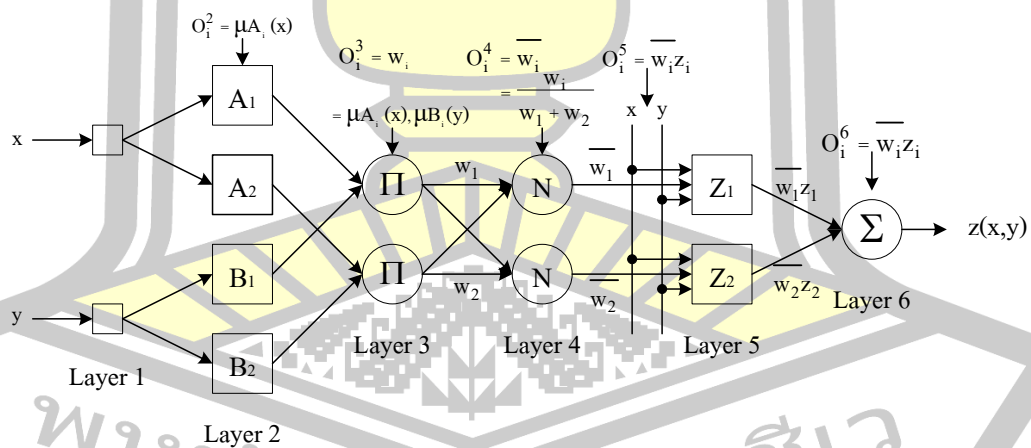
เมื่อ $\mu(k)$ คือ ระดับความเป็นสมาชิกจากการอนุมาน
 k คือ ค่าคงที่ของกฎ

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการที่เป็น Output ของตรรกะแบบคลุมเครือโดยการแปลงผลการตัดสินใจที่เป็นปริมาณที่ไม่แน่นอนให้เป็นตัวเลข ในโปรแกรม MATLAB และเครื่องมือชื่อว่า Fuzzy logic toolbox มีให้เลือกใช้ทั้งหมด 2 วิธี คือ Weighted average (Wtaver) และ Weighted Sum (Wtsum) โดยวิธีที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ วิธี Weighted average (Wtaver) โดยจะอยู่ในรูปสมการทั่วไป ดังสมการ (2.27)

$$Wtaver = \frac{\mu(k_1) \times k_1 + \mu(k_2) \times k_2 + \dots + \mu(k_n) \times k_n}{\mu(k_1) + \mu(k_2) + \dots + \mu(k_n)} \quad (2.27)$$

2.5.1.5 แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้ (ANFIS) เป็นวิธีการปรับการเรียนรู้ได้ของระบบความคลุมเครือ ซึ่งเรียนรู้ได้รวดเร็วเมื่อกำหนดกฎของความคลุมเครือที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองความคลุมเครือระบบกฎแบบ Sugeno แบบจำลอง ANFIS เป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้เพื่อทำการปรับรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรออก โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณ ขั้นตอนการคำนวณและโครงสร้างพื้นฐานของ ANFIS แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 โครงสร้างพื้นฐานของแบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

ขั้นตอนการคำนวณและโครงสร้างพื้นฐานของแบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้เริ่มจาก

ชั้นที่ 1 (Layer 1) คือ ชั้นของข้อมูลนำเข้า (Input layer) โดยแต่ละโหนดในชั้นนี้จะทำหน้าที่นำส่งสัญญาณจากภายนอกเพื่อเข้าสู่ชั้นถัดไป

ชั้นที่ 2 (Layer 2) คือ ชั้นของฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) ซึ่งเป็นการแปลงค่าข้อมูลนำเข้าที่อยู่ในรูปปกติ (Crisp Input) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าระดับฟังก์ชันสมาชิก (Membership function grad, μ) ซึ่งสามารถคำนวณผลลัพธ์ (O_i^2) เพื่อส่งไปในชั้นต่อไปได้จากสมการของรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกที่เลือกใช้ โดยรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกที่นิยมปัจจุบัน ได้แก่

1. ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular membership function) ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ a , b , c เมื่อ a_i , b_i , c_i คือ ค่าที่กำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและ x คือ ข้อมูลนำเข้า ดังสมการที่ (2.28)

$$O_i^2 = \mu A_i(x) = \begin{cases} 0 & x < a_i \\ (x - a_i)/(b_i - a_i) & a_i \leq x \leq b_i \\ (c_i - x)/(c_i - b_i) & b_i \leq x \leq c_i \\ 0 & x > c_i \end{cases} \quad (2.28)$$

2. ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function) โดยฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ คือ a , b , c , d เมื่อ a_i , b_i , c_i , d_i คือ ค่าที่กำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและ x คือ ข้อมูลนำเข้า ดังสมการ (2.29)

$$O_i^2 = \mu A_i(x) = \begin{cases} 0 & x < a_i \\ (x - a_i)/(b_i - a_i) & a_i \leq x \leq b_i \\ 1 & b_i \leq x \leq c_i \\ (d_i - x)/(d_i - c_i) & c_i \leq x \leq d_i \\ 0 & x \geq d_i \end{cases} \quad (2.29)$$

3. ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function) ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์ คือ เมื่อ m_i คือ ค่ากลางของความกว้างฐานฟังก์ชัน (Center), σ_i คือ ค่าความกว้างฐาน ดังสมการ (2.30)

$$O_i^2 = \mu A_i(x) = \exp \left(- \frac{\left(x - m_i^2 \right)^2}{\sigma_i^2} \right) \quad (2.30)$$

ชั้นที่ 3 (Layer 3) คือ ชั้นของกฎของฟัซซี โดยในแต่ละโหนดของชั้นนี้มีลักษณะเป็นกฎของฟัซซีแบบ Single Sugeno-type ซึ่งในแต่ละโหนดของชั้นนี้จะรับข้อมูลนำเข้าที่มาจากชั้นที่ 2 และสามารถหาผลลัพท์ (O_i^3) เพื่อส่งต่อไปในชั้นต่อไปได้ดังสมการ (2.31)

$$O_i^3 = w_i = \mu A_i(x) \times \mu B_i(x), \quad i = 1, 2 \quad (2.31)$$

ชั้นที่ 4 (Layer 4) คือ ชั้นค่าถ่วงน้ำหนัก (w) หรือเรียกว่า ค่าระดับความเป็นจริงของกฎฟัซซี (Firing strength) โดยแต่ละโหนดในชั้นนี้จะเชื่อมต่อกับกฎแต่ละกฎในชั้นที่ 3 และคำนวณค่าระดับความเป็นจริงของกฎฟัซซีของกฎ ซึ่งผลลัพท์ (O_i^4) ของชั้นที่ 4 เพื่อส่งต่อไปในชั้นต่อไปสามารถหาได้ดังสมการ (2.32)

$$O_i^4 = \overline{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_t} \quad i = 1, 2 \quad (2.32)$$

ชั้นที่ 5 (Layer 5) คือ ชั้นของ Output membership ซึ่งโหนดในชั้นนี้จะคำนวณหาข้อมูลออกของแต่ละกฎ (O_i^5) โดยใช้สมการเชิงเส้นแสดงดังสมการ (2.33)

$$O_i^5 = \overline{w}_i z_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i y + c_i), \quad i = 1, 2 \quad (2.33)$$

ชั้นที่ 6 (Layer 6) คือ ชั้นของ Defuzzification layer โหนดในชั้นนี้จะคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบ (O_i^6) โดยรวมเอาต์พุตที่ได้จาก layer 5 ดังสมการ (2.34) และ (2.35)

$$Z(x, y) = \frac{w_1(x, y)z_1(x, y) + w_2(x, y)z_2(x, y)}{w_1(x, y) + w_2(x, y)} = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (2.34)$$

$$O_i^6 = Z(x, y) = \sum_i \frac{w_i z_i}{\sum_i w_i} = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (2.35)$$

โดยค่า I จะขึ้นอยู่กับจำนวนเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎที่สร้างขึ้น ใน ส่วนของกระบวนการเรียนรู้ของ Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) มีทั้งหมด 2 วิธี คือ การเรียนรู้โดยวิธีการกระจายแบบย้อนกลับ (Back propagation algorithm) และการเรียนรู้โดยวิธี Hybrid ซึ่งในวิธีแรกได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา สำหรับวิธี Hybrid เป็นการนำวิธีการกระจายแบบย้อนกลับและวิธี Least squares มารวมเข้าด้วยกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้คอนกรีตเกิดกัดกร่อนจากซัลเฟตไอออนแพร่กระจายเข้าในคอนกรีตผ่านโพรงในคอนกรีต ทำให้เกิดปฏิกิริยาซัลเฟตไอออนกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมอลูมิเนต โมโนซัลโฟลูมิเนต ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิด แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Ettringite) และ ยิปซัม ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแล้วเกิดการแตกร้าวและกำลังลดลง จากงานวิจัยที่ผ่านมา Cohen และ Mather (1991) พบว่าการก่อตัวขึ้นของ Ettringite เป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว โดยเฉพาะ Ettringite ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูงๆ สามารถทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้มากและรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้การซึมผ่านของซัลเฟตในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งและเปียกสลับกันจะมีผลต่อคอนกรีตอย่างมาก สำหรับคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายซัลเฟตเมื่อเกิดการตกผลึกของเกลือซัลเฟตในรูพรุนของคอนกรีต ผลึกเกลือจะทำลายก่อให้เกิดการร่อนของผิวหน้าคอนกรีตและคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพลง โดยปัจจัยที่ผลคือของความชื้น และ อุณหภูมิ (Haynes et al., 1996; Hime & Mather, 1999; Novak & Colville, 1989)

วิธีการป้องกันการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟตที่นิยมกันมี 3 แนวทางคือ 1) ใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต 2) ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นสารผสมเพิ่ม 3) ใช้คอนกรีตที่บ่มน้ำ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ที่ต่ำ เช่น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มี C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มี C_3A ไม่เกินร้อยละ 8 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 สามารถช่วยให้คอนกรีตต้านทานสารละลายซัลเฟตได้มากขึ้น (Prusinski และ Carrasquillo, 2000) แต่ในบางท้องที่การหาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และ 5 อาจมีข้อจำกัด ดังนั้นการเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซ

ลานในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุง และซิลิกาฟูม นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ACI 225 ยังระบุด้วยว่า หากต้องการคอนกรีตที่ต้านทานซัลเฟตได้ดีควรมีเถ้าลอยในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 (Irassar & Batic, 1989; Mehta & Gjorv, 1974; Nasser & Lai, 1990; Kazuyuki Torii & Kawamura, 1994)

การทึบน้ำของคอนกรีตสามารถหาได้จากค่าการซึมผ่านของคอนกรีตซึ่งการเลือกใช้วัสดุปอซโซลานเป็นสารผสมเพิ่มก็เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตมีการทึบน้ำที่ดีขึ้น จากงานวิจัยของ Hughes (1985) พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น โดยทำการซึมผ่านของคอนกรีต และ รูพรุนในเนื้อคอนกรีต โดยแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา กับปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 เป็นเวลา 12 สัปดาห์ สรุปได้ว่าขนาดรูพรุนในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต กล่าวคือแท่งตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยลดการกัดกร่อนได้ดีกว่าแท่งตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาล้วนและความสามารถในการต้านทานซัลเฟตขึ้นอยู่กับรูพรุนในเนื้อคอนกรีตซึ่งเชื่อมโยงกับการซึมผ่านได้ของสารละลายซัลเฟตในคอนกรีต นอกจากนี้ Khatri และ Sirivivatnanon (1997) ได้ศึกษาค่าซึมผ่านได้ของสารละลายซัลเฟตที่ส่งผลต่อค่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนผสม 5 ตัวอย่างคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันสูง ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 7 และปูนซีเมนต์ที่มีตะกรัน พบว่าค่าการซึมผ่านได้และองค์ประกอบเคมีของส่วนผสมเกี่ยวข้องกับการขยายตัวของคอนกรีต

ในปัจจุบันได้มีหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาของพฤติกรรมของการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เช่น Santanum และคณะ (2006) พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตสูงกว่าแมกนีเซียมซัลเฟตเมื่ออายุมากขึ้น โดยการขยายตัวของมอร์ตาร์แบ่งออกเป็น 2 ช่วงระยะเวลา ช่วงระยะเวลาแรกการขยายตัวของ มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายทั้งสองชนิดมีลักษณะคล้ายกันคือมีการขยายตัวน้อยมาก หลังจากนั้น มอร์ตาร์ที่แช่ในโซเดียมซัลเฟตจะเพิ่มอย่างมากในช่วงระยะเวลาที่สอง ส่วนมอร์ตาร์ที่แช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่สูงขึ้น ซึ่งในช่วงระยะเวลาแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อัตราการขยายตัวในช่วงระยะเวลาที่สองอัตราการขยายตัวจะแปรผันตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น Hekal และคณะ (2002) ได้

กล่าวว่าการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อซีเมนต์ เมื่อนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งวัฏจักรเปียกสลับแห้งจะนำตัวอย่างขึ้นมาสลับเปียกและแห้งทุก ๆ 10 วัน พบว่าการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตที่ 60 องศาเซลเซียสภายใต้วัฏจักรเปียกสลับแห้ง สามารถพิจารณาเป็นวิธีการเร่งการทำลายของซัลเฟตได้ เนื่องจากการลดลงของกำลังอัดของ ตัวอย่าง Santhanam และคณะ (2006) ได้ศึกษาความแตกต่างของการทำลายของซัลเฟตในน้ำ ทะเลและน้ำใต้ดินต่อมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าการขยายตัวและการสูญเสีย กำลังของตัวอย่างในน้ำใต้ดินสูงกว่าในน้ำทะเล

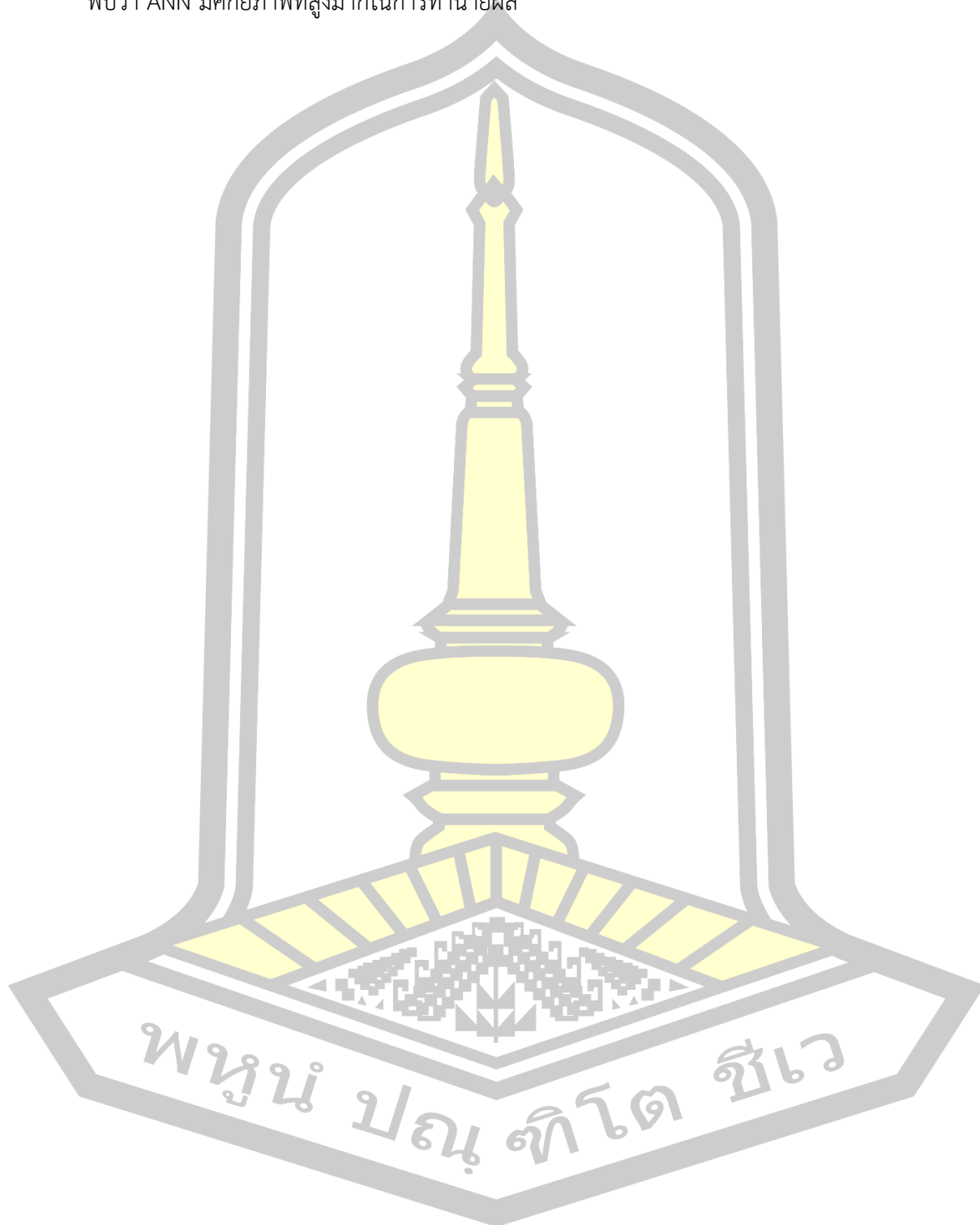
ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขยายตัวของคอนกรีตจากสารละลายซัลเฟตได้มีหลายงานวิจัย ได้นำเสนอแบบจำลองเพื่อทำนายผลการขยายตัวเช่น Kurtis และ คณะ (2000) ได้ทำนายการ ขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต โดยสมการประมาณค่า โดยในงานวิจัยนี้ใช้อัตรา ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่มี C_3A น้อยกว่าร้อยละ 8 และ C_3A มากกว่าร้อยละ 10 ควบคุมค่า W/C ซึ่ง ผลงานวิจัยได้สมการ Empirical Models มา 2 สมการ เพื่อหาค่าการขยายตัวของคอนกรีตของ C_3A น้อยกว่าร้อยละ 8 และ C_3A มากกว่าร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าค่า C_3A และ W/C มีผลต่อการขยายตัว เนื่องจากซัลเฟตด้วย ต่อมา Ramyar และ Inan (2007) ได้แสดงสมการการประมาณค่าการ ขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยพิจารณาจากองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์, ปริมาณของ แร่ผสมเพิ่ม และ ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต ตามสมการ (2.36)

$$E = \frac{A^{-0.1227} S^{0.3995} C^{0.5698}}{(100 + K)^{1.0631}} \quad (2.36)$$

- เมื่อ
- E คือ ค่าการขยายตัวที่อายุ 15 สัปดาห์ (%)
 - A คือ ปริมาณ C_3A (%)
 - S คือ อัตรา C_3S / C_2S ในซีเมนต์
 - C คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต (%)
 - K คือ ระดับการแทนที่ของแร่ผสมเพิ่ม (%)

Inana และคณะ (2007) ได้เสนอการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้เฉพาะ ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานโดย ANFIS ซึ่งใช้ตัวแปรคือปริมาณ C_3A อัตราส่วน C_3S/C_2S ความ เข้มข้นของสารละลายซัลเฟต และระดับการแทนที่ด้วยสารผสมเพิ่ม จากงานวิจัยพบว่า ANFIS มี ศักยภาพสูงกว่าแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ส่วนการทำนายผลด้วยแบบจำลองถดถอย เชิงเส้นและไม่เชิงเส้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกันแต่แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นนั้นจะง่ายกว่า ต่อมา

Ahamed และ คณะ (2014) ได้นำเสนอ ANN เพื่อทำนายกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ ซึ่งพบว่า ANN มีศักยภาพที่สูงมากในการทำนายผล



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ
- 3.4 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
- 3.5 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้
- 3.6 ค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองการทำนาย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก.15-2547

3.1.2 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

ใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจาก โรงผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยสามารถนำไปใช้ได้เลยโดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพ แต่เถ้าก้นเตาต้องนำมาปรับปรุงคุณภาพก่อนเนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่และมีสภาพชื้น เพราะในกระบวนการทิ้งเถ้าก้นเตาจะมีการป้องกันการกระจายฝุ่น โดยการพ่นน้ำให้เปียกจึงทำให้เถ้าก้นเตามีความชื้นอยู่มาก ดังนั้นก่อนนำมาทดลองจึงต้องนำเถ้าก้นเตามาอบเพื่อลดความชื้นให้น้อยกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 618 จากนั้นนำเถ้าก้นเตามาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 เพื่อแยกเถ้าก้นเตาที่จับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ออกไป แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบตกระทาบ จนให้มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 2 ขนาด คือเถ้าก้นเตาขนาดใหญ่ใช้ตัวย่อ LB (Large bottom ash) และเถ้าก้นเตาขนาดเล็กใช้ตัวย่อ SB (Small bottom ash) โดยใช้ปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เป็นเกณฑ์ในการกำหนดขนาดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยนำส่วนที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาใช้เลย ซึ่งมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 ใช้ตัวย่อ FA (Fly ash)

3.1.3 ททราย

ใช้ทรายแม่น้ำ โดยนำมาล้างเอาส่วนที่เป็นดินหรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนสะอาด จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ไปบดให้แห้งสำหรับใช้ทดลอง

3.1.4 น้ำ

ใช้น้ำประปาในการผสมมอร์ตาร์และผสมสารละลายซัลเฟต

3.1.5 สารเคมี

ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนัก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องบดแบบตกรกระทบ

3.2.2 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.3 ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

3.2.4 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน

3.2.5 ตู้อบ

3.2.6 ชุดทดลองหาการไหลแผ่

3.2.7 เครื่องผสมมอร์ตาร์

3.2.8 แบบหล่อมอร์ตาร์

3.2.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.10 ถังบ่มตัวอย่างมอร์ตาร์

3.2.11 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.2.12 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.2.13 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

3.2.14 เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด

1. หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7

2. หน่วยความจำแรม DDR3 8 GB

3. อุปกรณ์อื่นๆ: จอภาพ, แป้นพิมพ์, เมาส์, เครื่องพิมพ์, ฮาร์ดดิสก์

3.1.16 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1. ระบบปฏิบัติการวินโดวส์

2. โปรแกรม MATLAB R2013a

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุ

1. ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเอร์ (Le chatelier flask) บรรจุน้ำมันก๊าด จากนั้นใส่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย หรือเถ้าก้นเตาบดละเอียดลงในขวด ซึ่งจะใช้หลักการคำนวณโดยอาศัย การแทนที่ของตัวอย่างวัสดุในน้ำมันก๊าด โดยความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุได้จากน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุหารด้วยปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมันก๊าด ซึ่งความหนาแน่นที่ได้จะมีหน่วยเป็น ก./ซม.³

2. ความละเอียดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 430 ซึ่งใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร) ร่อนตัวอย่างผ่านน้ำแล้วนำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปอบให้แห้งและชั่งน้ำหนัก โดยค่าร้อยละน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 หาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงต่อน้ำหนักทั้งหมด

3. ภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาก่อนบด และที่บดละเอียดแล้ว ทำการถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

4. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

โดยใช้เครื่อง Laser particle size analyzer

5. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ซึ่งอยู่ในรูปองค์ประกอบของออกไซด์

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์และทดสอบกำลังอัด

1. ส่วนผสมของมอร์ตาร์และการทดสอบ

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $25 \times 25 \times 285$ มม.³ โดยมีอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมีค่าเท่ากับค่าความชื้นเหลือของมอร์ตาร์มาตรฐาน (มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว) ที่มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 และทุกอัตราส่วนผสมที่เหลือจะใช้ค่าน้ำต่อวัสดุ

ประสานเท่ากับมอร์ตาร์มาตรฐาน เพื่อป้องกันกำลังอัดแตกต่างกันเนื่องจากการใช้น้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน นำเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้งสองขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนัก และวัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ทุก 1 เดือน

2. สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

C หมายถึง มอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวในส่วนผสมของมอร์ตาร์

LB (Large bottom ash) หมายถึง เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 โดยน้ำหนัก

SB (Small bottom ash) หมายถึง เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็กที่มีปริมาณอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

FA (Fly ash) หมายถึง เถ้าลอยที่มีปริมาณอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 โดยน้ำหนัก

ส่วนตัวเลขหลังสัญลักษณ์ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 หมายถึง ร้อยละอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาบดละเอียด

Na (Na_2SO_4) หมายถึง สารละลายโซเดียมซัลเฟต

Mg (MgSO_4) หมายถึง สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวเลขหลังสัญลักษณ์ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

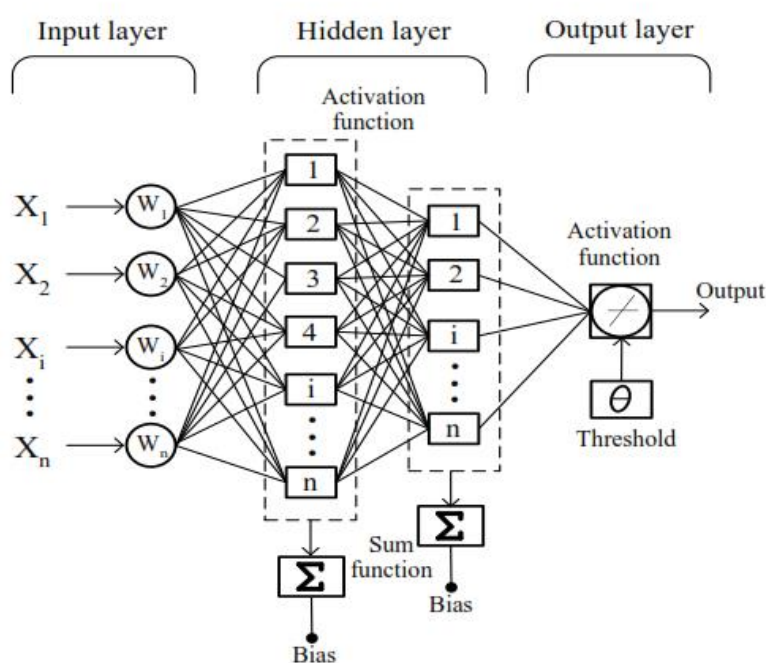
3.4 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Neural network toolbox ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม MATLAB Version (R2013a) โดยใช้การเขียนคำสั่งช่วยในการสังเคราะห์แบบจำลองในการเรียนรู้และการทดสอบของชุดข้อมูล เพื่อทำนายผลการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 การจัดข้อมูลนำเข้า (Input variable) ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์เป็นการเตรียมข้อมูลตัวแปรสำหรับข้อมูลนำเข้าและข้อมูลเป้าหมายหรือผลลัพธ์การทดลอง (Output variable)

สำหรับที่ใช้ในการฝึกฝนและการทดสอบแบบจำลอง โดยมีตัวแปรคือ ชนิดของวัสดุพอลิโซลัน ความละเอียดของวัสดุพอลิโซลัน อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ ชนิดของสารละลายซัลเฟต ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต อายุทดสอบ รวมทั้งหมด 6 ตัวแปร

3.4.2 การออกแบบสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย 3 ชั้น ได้แก่ชั้นนำเข้า, ชั้นซ่อนและชั้นส่งออก (ชั้นแสดงผลลัพธ์การทำงาน) ดังแสดงใน ภาพประกอบ 6 ซึ่งต้องมีการกำหนดจำนวนของตัวแปรสำหรับข้อมูลนำเข้า ข้อมูลส่งออกและจำนวนของชั้นซ่อน โดยในแต่ละชั้นซ่อนต้องกำหนดจำนวนนิวรอล (เซลล์ฝึกฝน)



ภาพประกอบ 6 แผนผังการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

3.4.3 เลือกฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการส่งผ่านค่าน้ำหนักในแต่ละชั้น ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกันไปในแต่ละฟังก์ชัน ส่วนใหญ่ฟังก์ชันที่มีการนิยมนำมาใช้กันมาก มีอยู่ 5 ชนิด ได้แก่ Hard limit function (Step), Symmetric hard limit function (Sign), Linear function, Log-sigmoid function และ Tan- sigmoid function อย่างไรก็ตามในแต่ละชั้นซ่อน และในชั้นส่งออก จะต้องเลือกฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด

3.4.4 เลือกอัลกอริทึม (Algorithm) เป็นการกำหนดขั้นตอนวิธีการแก้ไขปัญหาใดปัญหาหนึ่งอย่างเป็นขั้นตอนและชัดเจน โดยแต่ละอัลกอริทึมจะมีความเหมาะสมกับปัญหาต่างชนิดกันขั้นตอนเทคนิคที่ทำให้รวดเร็วในการเรียนรู้และความแม่นยำในผลลัพธ์การทำงาน ขึ้นอยู่กับ

อัลกอริทึมและการเลือกฟังก์ชันซึ่งจะทำให้การปรับค่าน้ำหนัก (Weight) และผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน (Bias) มีการเปลี่ยนแปลงและลู่เข้าหาเป้าหมายของผลลัพธ์ โดยทั่วไปขั้นตอนจะประกอบด้วยวิธีการที่ต้องทำแบบวนซ้ำ (Iterate) หรือเวียนเกิด (Recursive) โดยใช้ตรรกะ (Logic) และ/หรือในการเปรียบเทียบ (Comparison) ในขั้นตอนต่าง ๆ จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทำงาน

3.4.5 กำหนดขอบเขตของการเรียนรู้ ซึ่งในการเรียนรู้ของแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 5 ค่าที่สำคัญดังต่อไปนี้ คือ

1. อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งในแต่ละค่านั้นไม่ได้บอกความหมายว่าน้อยกว่า หรือมากกว่า โดยแต่ละค่านั้นจะแสดงถึงความเหมาะสมในแต่ละชุดข้อมูลแตกต่างกันไป

2. ค่าคงที่ของโมเมนตัม (Momentum constant) เป็นการปรับค่าในรูปแบบของการเคลื่อนลงตามความชัน (Gradient descent) โดยค่าคงที่ของโมเมนตัมอยู่ระหว่าง 0 และ 1 หากไม่มีการเคลื่อนลงตามความชันเลยไปจนถึงมีการลู่เข้าของความชันในจำนวนมาก

3. ฟังก์ชันการปฏิบัติงานของโครงข่ายประสาทเทียม (Network performance function) เป็นกระบวนการวัดค่าผลรวมของการปรับค่าน้ำหนัก และผลลัพธ์ที่แตกต่างกันของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

4. จำนวนรอบมากสุดในการเรียนรู้ (Maximum training epochs)

5. ค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมาย (Error goal)

ในข้อ 4 และข้อ 5 ระบบของโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการหยุดเรียนรู้ ก็ต่อเมื่ออยู่ในเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งของข้อ 4 และ 5 ที่ได้กำหนดไว้

จากที่กล่าวมาข้างต้น การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จึงจำเป็นต้องมีการตั้งคุณสมบัติในการฝึกฝนการเรียนรู้ของแบบจำลอง โดยขั้นตอนการทำงานของกระบวนการเรียนรู้จะทดลองใช้ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการส่งผ่านค่าน้ำหนักในแต่ละชั้น และอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลอง โดยทำการสลับสับเปลี่ยนไปให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ซึ่งนั่นคือแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุดในการมาใช้งาน ดังแสดงในตาราง 2 ซึ่งมีรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ

ตาราง 2 รายการออกแบบของโครงข่ายประสาทเทียม

Item	Description	Quantity	Unit
1	Number of Input Layer	3 and 4	neuron
2	Number of Output Layer	1	neuron
3	Number of Hidden Layer	1 and 2	layer
4	Number of Neurons in the Hidden Layer		
	- First Hidden Layer	4, 5, 6, 7, 8, 9	neuron
	- Second Hidden Layer	2, 4	neuron
5	Activation Function of Hidden Layer	Log and Tan sigmoid	function
6	Activation Function of Output Layer	linear	function
7	Learning Algorithm	lm, bfg, rp, scg, br	algorithm
8	Network's Performance Function	mae, mse, sse	function
9	Learning Epochs	10000	cycle
10	Error Goal then Stopped	0.000001	

3.5 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Toolbox ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม MATLAB Version (R2013a) โดยการเขียนคำสั่งให้ช่วยในการสังเคราะห์สำหรับการเรียนรู้และการทดสอบของแบบจำลอง เพื่อทำนายทำนายการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบาดละเอียด ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 กำหนดตัวแปรนำเข้า (Input variable) และตัวแปรเป้าหมายหรือตัวแปรผลลัพธ์ (Output variable) เตรียมข้อมูลเหมือนเช่นเดียวกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.5.2 เลือกรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรส่งออก โดยตัวแปรฟังก์ชันมีหลายชนิด อาทิเช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม, ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู, ฟังก์ชันเกาส์เซียน, ฟังก์ชันระฆังคว่ำ, ฟังก์ชันตัวเอส และฟังก์ชันตัวแซด เป็นต้น

3.5.3 กำหนดระดับความเป็นสมาชิก (Degree of membership) ของซับเซตความคลุมเครือ (Fuzzy subset) ต่างๆ ของตัวแปรนำเข้า ซึ่งแต่ละตัวแปรนำเข้าสามารถกำหนดระดับความเป็นสมาชิกแต่ละตัวได้หลายระดับตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไปเช่น 5 ระดับ น้อยที่สุด, น้อย, ปานกลาง, มาก, มากที่สุด เป็นต้น ซึ่งการกำหนดระดับขึ้นอยู่กับข้อมูลตัวแปรนำเข้าว่ามีระดับการกระจายตัวมากน้อยเท่าไร

3.5.4 สร้างระบบกฎและวิธีการประมวลผลของความคลุมเครือ ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ แบบระบบกฎความคลุมเครือชนิด TSK (Takagi-Sugeno-Kang) และชนิด Mamdani

3.5.5 สำหรับวิธีการประมวลผลของฟัซซีมีให้เลือกใช้ทั้งหมด 2 วิธี คือ Minimization (Min) และ Product (Prod)

3.5.6 วิธีการหาค่าความคลุมเครือให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) ของชนิด Mamadani คือ วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of gravity : COG) และของชนิด TSK มีให้เลือกใช้ทั้งหมด 2 วิธี คือ Weighted average (Wtaver) และ Weighted sum (Wtsum)

3.5.7 ใช้แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้ (ANFIS) เพื่อช่วยให้แบบจำลองความคลุมเครือมีความสามารถในการเรียนรู้จากข้อมูลภายนอก โดยมีกระบวนการเรียนรู้ด้วยวิธี Hybrid ซึ่งเป็นการนำวิธีการกระจายแบบย้อนกลับและวิธี Least squares มารวมเข้าด้วยกัน ซึ่ง ANFIS เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB โดยวิธีการใช้งานมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการป้อนข้อมูลชุดที่ใช้สำหรับกระบวนการเรียนรู้เข้าในชุดเครื่องมือ ANFIS

ขั้นตอนที่ 2 โหลดไฟล์แบบจำลองความคลุมเครือเข้าสู่ชุดเครื่องมือ ANFIS

ขั้นตอนที่ 3 เลือกกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และวิธีการเรียนรู้ของแบบจำลอง ซึ่งการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธี Hybrid และวิธี Backpropagation

ขั้นตอนที่ 4 เริ่มกระบวนการเรียนรู้โดยเครื่องมือ ANFIS ทำการคำนวณจนกว่าจะครบตามจำนวนรอบและค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมายที่กำหนดไว้

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองจะทำการโหลดข้อมูลเพื่อทำการทดสอบแบบจำลอง โดยทำการป้อนข้อมูลตัวแปรนำเข้าของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง จากนั้นทดสอบแบบจำลองโดยการทำนายผลลัพธ์จากข้อมูลตัวแปรนำเข้า เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วจะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การทดลองและทำการบันทึกไฟล์แบบจำลองความคลุมเครือเพื่อนำไปใช้งาน

ลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาของการสังเคราะห์แบบจำลองการอนุมานความคลุมเครือบนพื้นฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้ จำเป็นต้องเขียนคำสั่งในโครงสร้างพื้นฐาน TSK จากนั้นจึงเลือกแบบจำลอง

ANFIS ช่วยในการเรียนรู้ โดยรายละเอียดของแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้งาน ได้แสดงในตาราง 3 ซึ่งมีรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ตาราง 3 รายการออกแบบของแบบจำลองการอนุมานความคลุมเครือบนพื้นฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้

Item	Description	Quantity	Unit
1	Membership function	tri, trap, pi, gauss, gbell	function
2	Degree of membership	2, 3, 4	number
3	Fuzzy rule type	Takagi-Sugeno-Kang (TSK)	Type
4	Fuzzy Output Engine	min and prod	Method
5	Defuzzification	Wtaver and Wtsum	Method
6	Learning Algorithm	Hybrid and Backpropagation	Method
7	Error Tolerance	0.000001	-
8	Epochs	3	cycle

3.6 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

หลังจากได้แบบจำลองจากการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองการอนุมานความคลุมเครือบนพื้นฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้ แล้วจะนำมาแบบเทียบกับแบบจำลองการถดถอยที่ได้จากการสังเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม SPSS 16 การสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองการถดถอยในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้สมการถดถอยพหุคูณหลายตัวแปรของแบบเชิงเส้น (Multiple linear regression, MLR) และแบบไม่เชิงเส้นชนิดโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Multiple second order polynomial regression, MSPR) ในการสร้างสมการสำหรับการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยมีตัวแปรนำเข้าประกอบด้วย ร้อยละการแทนที่ (PR) ร้อยละความเข้มข้น (C) ขนาดอนุภาค (PS) และอายุของมอร์ตาร์ (AC) และมีตัวแปรส่งออกคือ การขยายตัวของมอร์ตาร์ (EXP) ซึ่งแบบจำลองการถดถอยมีดังนี้

3.6.1 การถดถอยเชิงเส้นพหุนาม

$$EXP = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 \quad (3.1)$$

3.6.2 การถดถอยฟังก์ชันโพลิโนเมียลพหุนามอันดับสอง

$$EXP = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{44}X_4^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{14}X_1X_4 + a_{23}X_2X_3 + a_{24}X_2X_4 + a_{34}X_3X_4 \quad (3.2)$$

เมื่อ a_i คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
 X_1 คือ ร้อยละการแทนที่ (PR)
 X_2 คือ ร้อยละความเข้มข้น (C)
 X_3 คือ ขนาดอนุภาค (PS)
 X_4 คือ อายุของมอร์ตาร์ (AC)

3.7 ค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองการทำนาย

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการประกอบการพิจารณาของค่าความคลาดเคลื่อน ความแม่นยำของการทำนายผล และค่าความแปรปรวนระหว่างข้อมูลแต่ละชุด ซึ่งค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้อยู่ 3 ค่า ได้แก่

3.5.1 ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์ (Absolute fraction of variance, R^2) เป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ และชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ โดยแสดงอยู่ในรูปค่าสัมบูรณ์ของสัดส่วนทศนิยมของค่าความแปรปรวนรวมทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_j (P_j - T_j)^2}{\sum_j (T_j)^2} \quad (3.3)$$

3.5.2 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) เป็นการประเมินค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่เป็นตัวแปรต้น (ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง) และตัวแปรตาม (ชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายผล) โดยหน่วยที่ได้จะเป็นหน่วยเดียวกันกับตัวแปรต้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (P_j - T_j)^2} \quad (3.4)$$

3.5.3 ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (Mean absolute percentage Error, MAPE) เป็นการประเมินค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่เป็นตัวแปรต้น และตัวแปรตาม โดยหน่วยที่ได้จะอยู่ในรูปของร้อยละ ดังนั้นจึงสามารถค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่ไม่จำเป็นต้องมีหน่วยเหมือนกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_j \left(\frac{T_j - P_j}{T_j} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ

- P = ค่าที่ได้จากการทำนายผลในชุดข้อมูล j
- T = ค่าที่ได้จากการทดลองในชุดข้อมูล j
- n = จำนวนชุดของข้อมูล

พหุ ประสิทธิภาพ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติต่างๆ ของวัสดุประสานที่ใช้ในการทดลอง เช่น สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ภาพถ่ายขยายกำลังสูง องค์ประกอบทางเคมี โดยมีลำดับเสนอผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

- 4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ
- 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ
- 4.3 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต
- 4.4 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอย
- 4.5 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
- 4.6 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้
- 4.7 การเปรียบเทียบผลการทำนายการขยายตัวของแบบจำลองต่างๆ

4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการใช้ตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง โดยค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าดังตาราง 4 โดยค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.13, และ 2.17 ตามลำดับ ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็ก (SB) และขนาดใหญ่ (LB) มีค่าเท่ากับ 2.78 และ 2.70 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาโดยบดให้มีความละเอียดขึ้นส่งผลให้มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตาก่อนบดละเอียดมีลักษณะภายในที่กลวง มีความเป็นรูพรุนสูง เมื่อนำไปบดให้มีความละเอียดมากขึ้น อนุภาคของเถ้าก้นเตาเกิดการแตกตัวทำให้เนื้อภายในที่กลวงและรูพรุนน้อยลง

4.1.2 ความละเอียดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียด

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้ง 2 ขนาด ถูกทดสอบความละเอียดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในการวัดค่าความละเอียด ซึ่งแสดงผลการ

ทดสอบ ดังตาราง 4 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยมีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าร้อยละ 13.2 และ 30.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ ส่วนเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็ก (SB) และขนาดใหญ่ (LB) มีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 4.9 และ 33.6 โดยน้ำหนักตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดค่า การทดสอบหาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าลอยไว้ว่าค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้ของปริมาณวัสดุค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาทั้ง 2 ขนาด มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

4.1.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

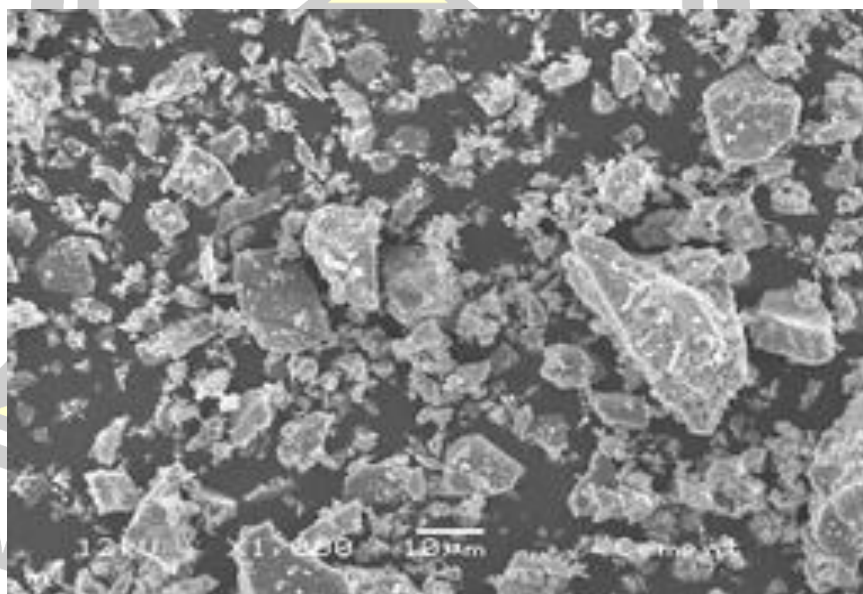
จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง LS particle size analyzer ได้ผลการทดสอบขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้ง 2 ขนาด แสดงไว้ในตาราง 4 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 11.2 และ 18.0 ไมโครเมตรตามลำดับ ส่วนเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็ก (SB) และเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (LB) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.3 และ 22.2 ไมโครเมตรตามลำดับ จากข้อมูลขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้ง 2 ขนาดนั้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณการค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในช่วงน้อยกว่าร้อยละ 5 และช่วงร้อยละ 30-35 โดยน้ำหนักนั้น ทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของขนาดเล็กและขนาดใหญ่แตกต่างกับประมาณ 3 เท่าตัว

ตาราง 4 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

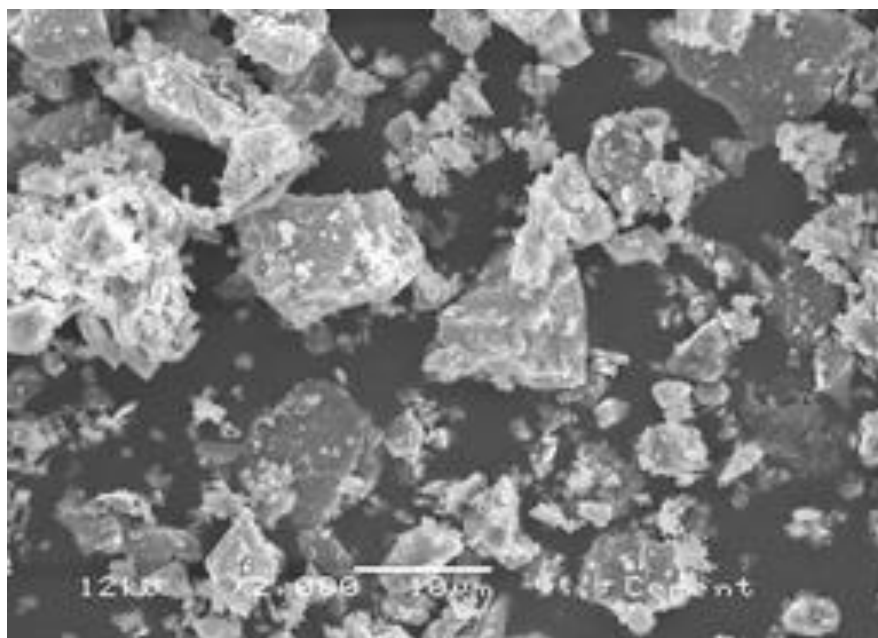
Sample	Specific Gravity	Retained on Sieve	Median Particle Size
		No. 325 (%)	d ₅₀ (micron)
Cement	3.13	13.2	11.2
FA	2.17	30.5	18.0
LB	2.70	33.6	22.2
SB	2.78	4.9	6.3

4.1.4 ภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบาดละเอียด

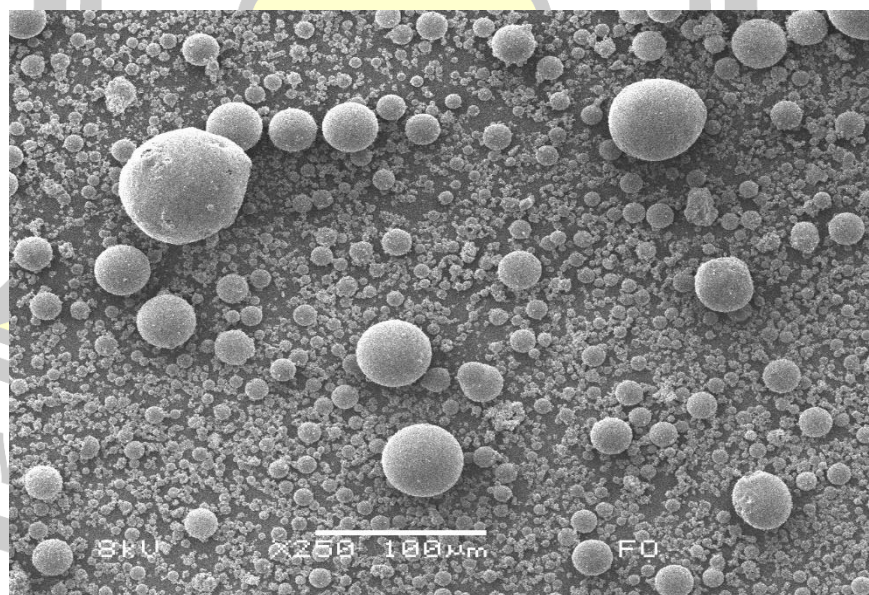
ทำการถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม พื้นผิวค่อนข้างเรียบ เนื้อแน่นและไม่มีรูพรุน ดังแสดงในภาพประกอบ 7 และ 8 ส่วนภาพขยายกำลังสูงของเถ้าลอยแสดงในภาพประกอบ 9 พบว่ามีลักษณะอนุภาคทรงกลมตัน เนื้อแน่น บางส่วนมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระบ้างเล็กน้อย ภาพประกอบ 10 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าก้นเตาก่อนบด (OB) พบว่าเถ้าก้นเตาก่อนบดมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ลักษณะเหมือนวัตถุทรงกลมยึดติดกัน ผิวโดยส่วนใหญ่ขรุขระ มีรูพรุนสูง ส่วนภาพประกอบ 11 และ 12 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าก้นเตาบาดละเอียดขนาดใหญ่ (LB) และขนาดเล็ก (SB) ตามลำดับ โดยเมื่อบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงนั้น รูปร่างวัสดุมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมอย่างเห็นได้ชัดเจนขึ้นและพื้นผิวภายนอกเรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าก้นเตาก่อนบด ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมเห็นได้ว่าเถ้าก้นเตาบาดละเอียดทั้ง 2 ขนาดมีเนื้อแน่นหรือความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่มีรูพรุนปรากฏให้เห็น



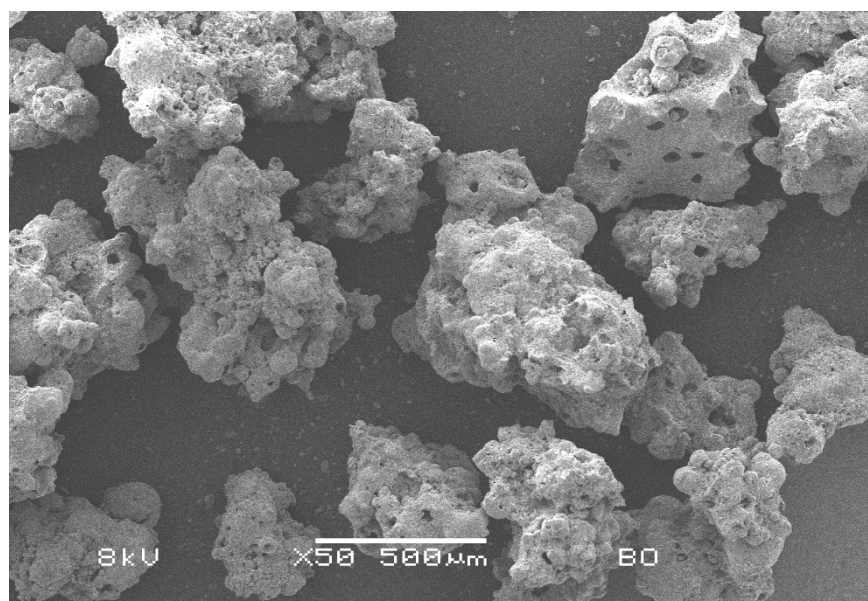
ภาพประกอบ 7 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังขยาย 1000 เท่า



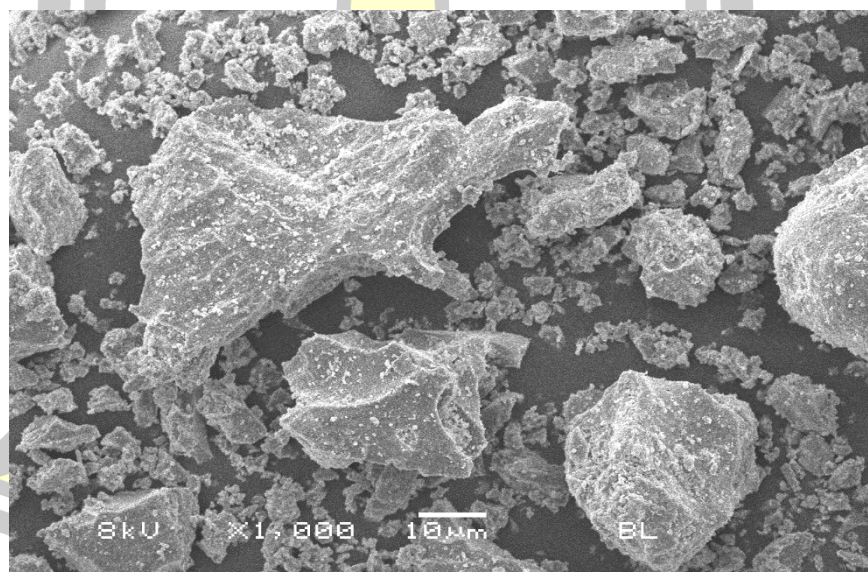
ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังขยาย 2000 เท่า



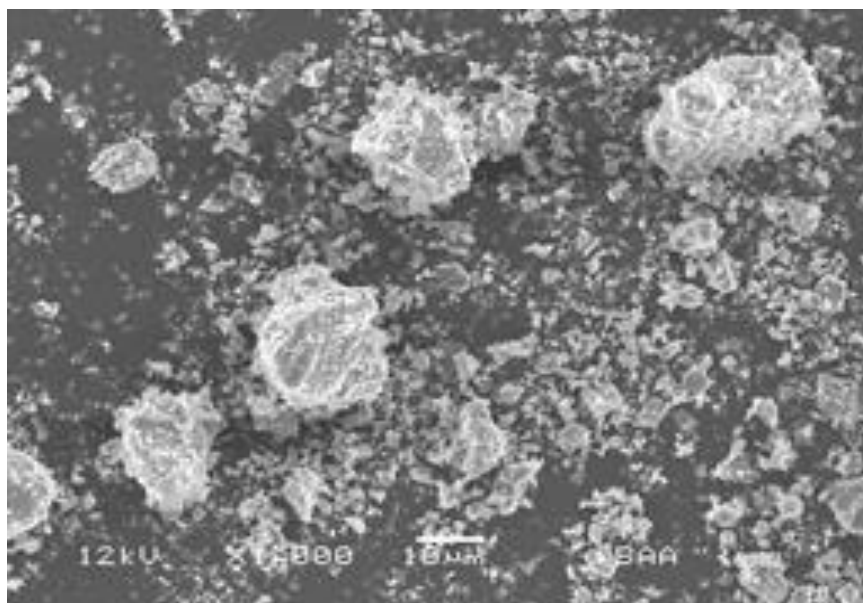
ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าลอย (FA)



ภาพประกอบ 10 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเปลือกไข่ก่อนบด (OB)



ภาพประกอบ 11 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเปลือกไข่บดละเอียดขนาดใหญ่ (LB)



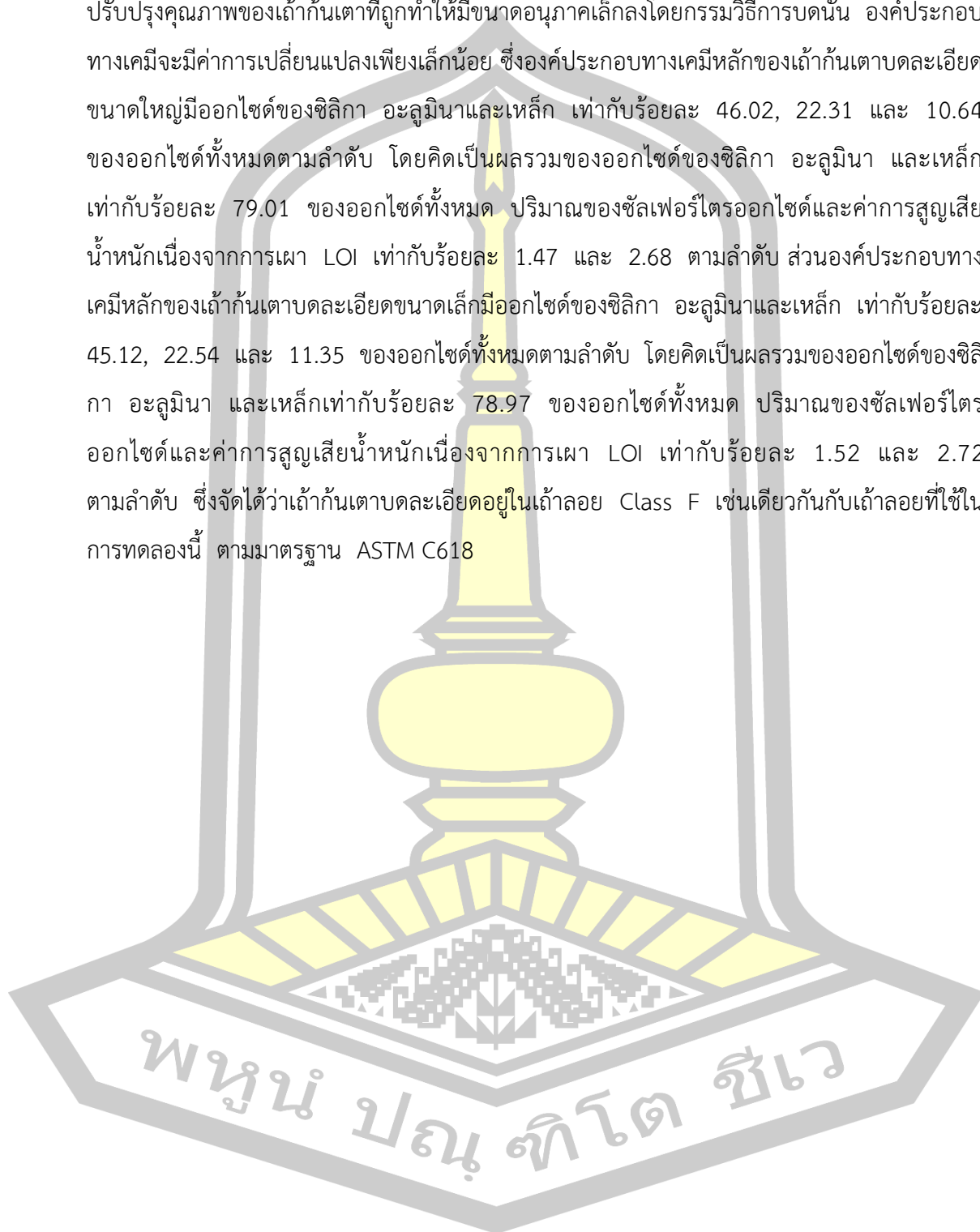
ภาพประกอบ 12 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็ก (SB)

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer ในการทดสอบ ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียด แสดงในตาราง 5 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีค่าสูงถึงร้อยละ 65.00 และมีองค์ประกอบรอง คือ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) อยู่ปริมาณร้อยละ 20.62, 5.22 และ 3.10 ตามลำดับ และมีปริมาณ C_3A ร้อยละ 8.60

เถ้าลอยมีปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก เท่ากับร้อยละ 49.83, 25.25 และ 10.33 ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI เท่ากับร้อยละ 1.77 และ 0.85 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจัดอยู่ในเถ้าลอย Class F โดยมีปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI ไม่เกินร้อยละ 5 และร้อยละ 12 โดยน้ำหนักตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C618

ในส่วนของการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาบาดละเอียด พบว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาที่ถูกทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงโดยกรรมวิธีการบดนั้น องค์ประกอบทางเคมีจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าก้นเตาบาดละเอียดขนาดใหญ่มีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก เท่ากับร้อยละ 46.02, 22.31 และ 10.64 ของออกไซด์ทั้งหมดตามลำดับ โดยคิดเป็นผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก เท่ากับร้อยละ 79.01 ของออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณของซิลเฟอร์ไตรออกไซด์และค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI เท่ากับร้อยละ 1.47 และ 2.68 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าก้นเตาบาดละเอียดขนาดเล็กมีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก เท่ากับร้อยละ 45.12, 22.54 และ 11.35 ของออกไซด์ทั้งหมดตามลำดับ โดยคิดเป็นผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กเท่ากับร้อยละ 78.97 ของออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณของซิลเฟอร์ไตรออกไซด์และค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา LOI เท่ากับร้อยละ 1.52 และ 2.72 ตามลำดับ ซึ่งจัดได้ว่าเถ้าก้นเตาบาดละเอียดอยู่ในเถ้าลอย Class F เช่นเดียวกันกับเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองนี้ ตามมาตรฐาน ASTM C618



ตาราง 5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

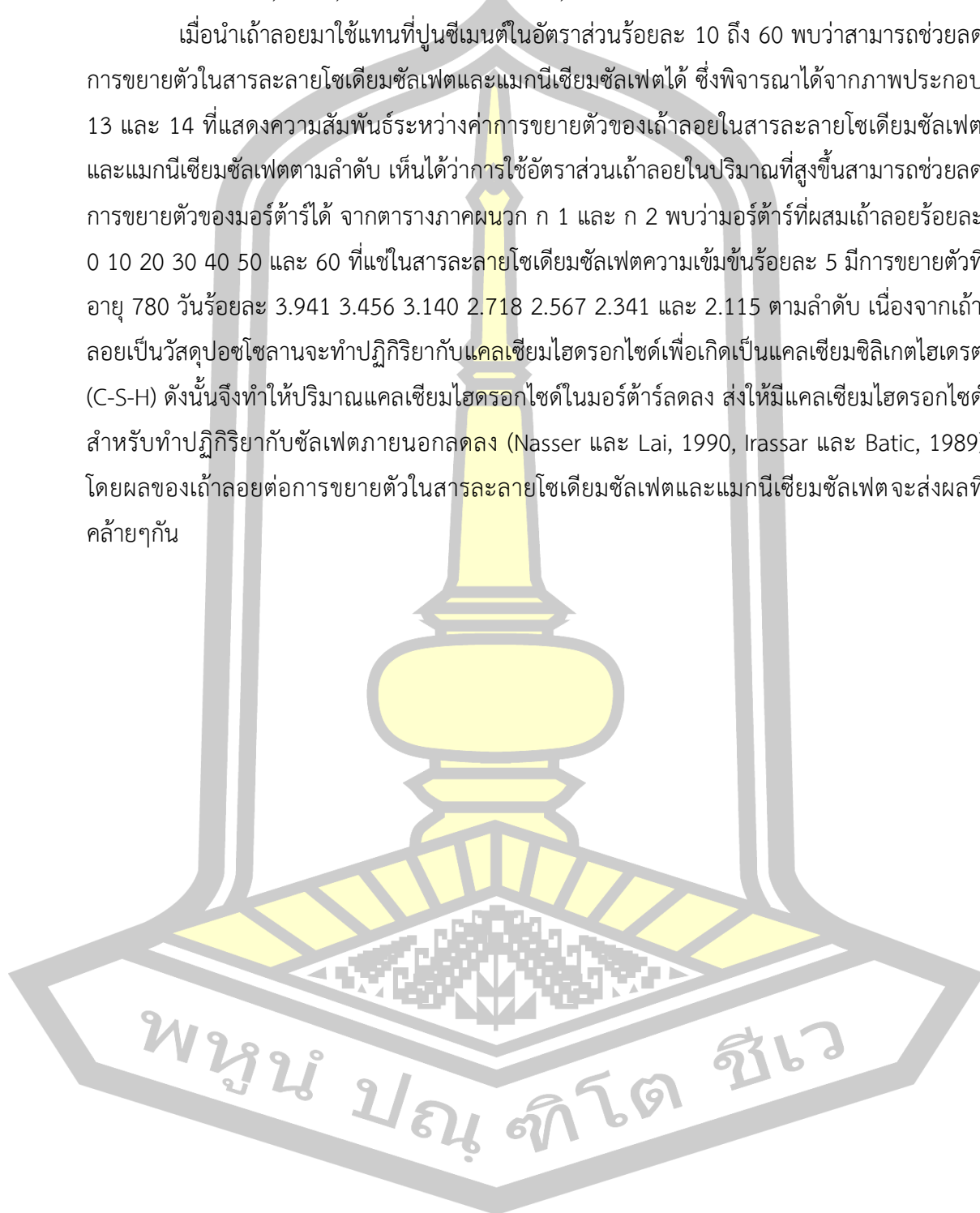
Chemical Composition (%)	Portland Cement Type I (C)	Fly Ash (FA)	Large Size Ground Bottom Ash (LB)	Small Size Ground Bottom Ash (SB)
SiO ₂	20.62	49.83	45.12	46.02
Al ₂ O ₃	5.22	25.25	22.54	22.31
Fe ₂ O ₃	3.10	10.33	11.35	10.64
CaO	65.00	7.76	11.83	11.48
MgO	0.91	2.73	3.45	3.47
Na ₂ O	0.50	0.08	0.07	0.07
K ₂ O	0.07	2.92	2.42	2.38
SO ₃	2.70	1.77	1.47	1.52
LOI	1.33	0.85	2.68	2.72
C ₃ A	8.60	-	-	-

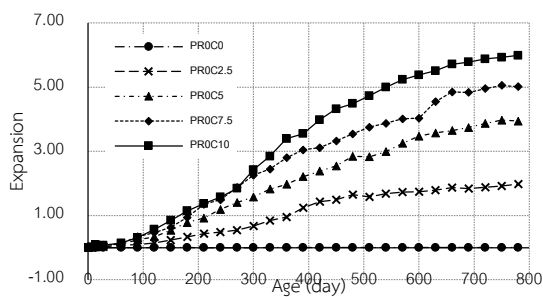
4.3 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

จากตารางภาคผนวก ก 1 และ ก 2 พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมวัสดุปอซโซลานที่แช่ในน้ำเปล่า จะมีการหดตัวและขยายตัวน้อยมากตลอดอายุการทดสอบ แต่เมื่อนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าจะมีการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงต้นอัตราการขยายตัวของมอร์ตาร์จะเริ่มจากช้าๆก่อนจะเริ่มขยายตัวอย่างรวดเร็วในอายุปลาย โดยเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 780 วันมีการขยายตัวร้อยละ 1.980 3.941 5.014 และ 5.985 ที่ความเข้มข้น 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น และเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเดียวกันพบว่าการขยายตัวร้อยละ 1.638 3.540 4.778 และ 5.525 ที่ความเข้มข้น 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 ตามลำดับ เห็นได้ว่าสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีผลต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์มากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากโซเดียมซัลเฟตสามารถแตก

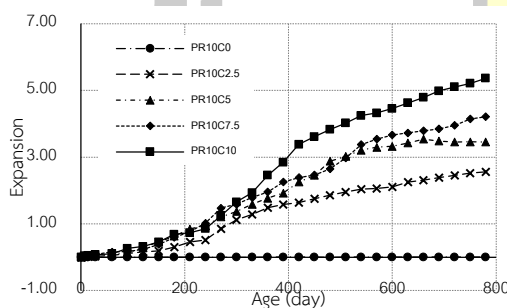
ตัวเป็นอออนได้ถึงสองตัวส่วนแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถแตกตัวเป็นอออนได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น (Amoudi และคณะ, 1995, Santanum และคณะ, 2002)

เมื่อนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าสามารถช่วยลดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตได้ ซึ่งพิจารณาได้จากภาพประกอบ 13 และ 14 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวของเถ้าลอยในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นสามารถช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ จากตารางภาคผนวก ก 1 และ ก 2 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 10 20 30 40 50 และ 60 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 มีการขยายตัวที่อายุ 780 วันร้อยละ 3.941 3.456 3.140 2.718 2.567 2.341 และ 2.115 ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในมอร์ตาร์ลดลง ส่งผลให้มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับทำปฏิกิริยากับซัลเฟตภายนอกลดลง (Nasser และ Lai, 1990, Irassar และ Batic, 1989) โดยผลของเถ้าลอยต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตจะส่งผลที่คล้ายๆกัน

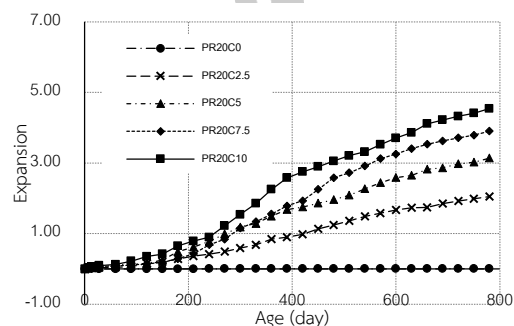




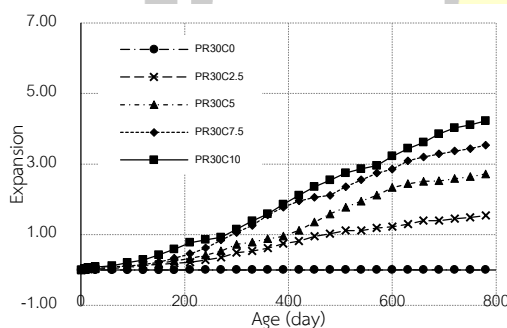
(ก) มอร์ต้ารควบคุม



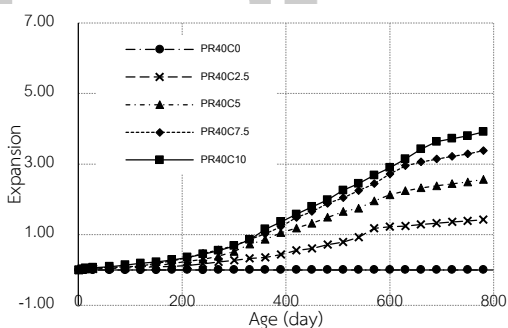
(ข) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10



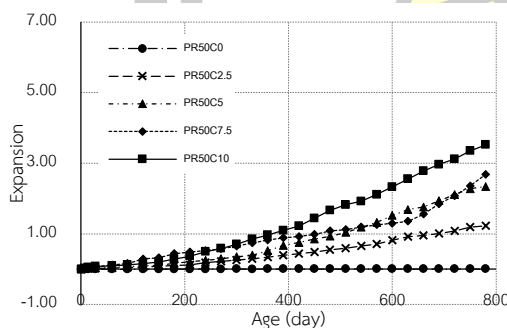
(ค) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



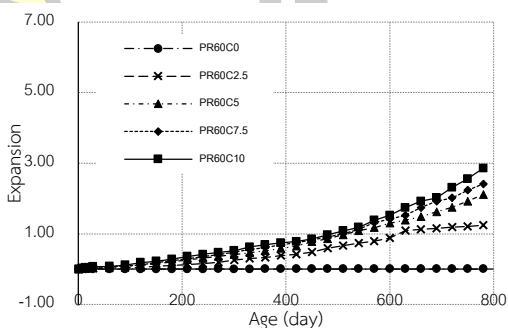
(ง) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40

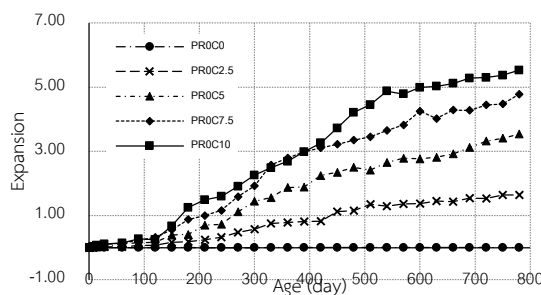


(ฉ) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

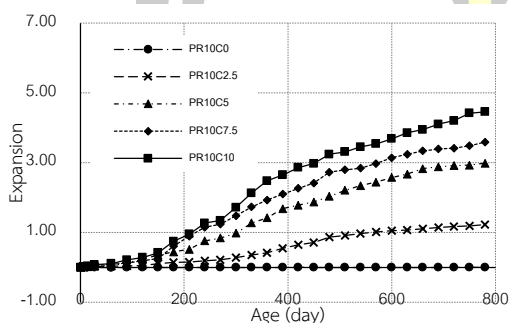


(ช) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60

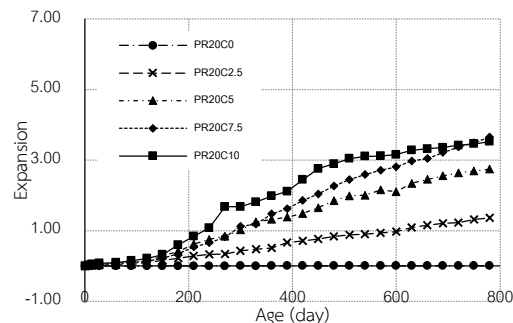
ภาพประกอบ 13 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอย (ก)-(ช)



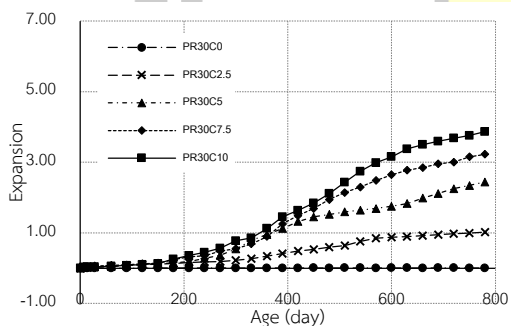
(ก) มอร์ตาร์ควบคุม



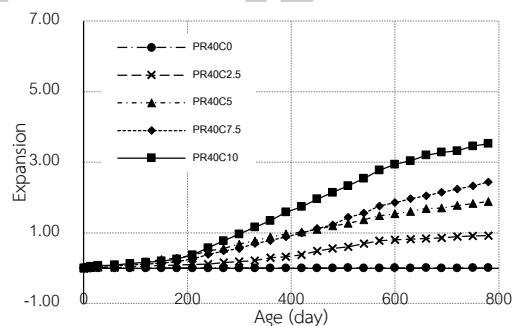
(ข) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10



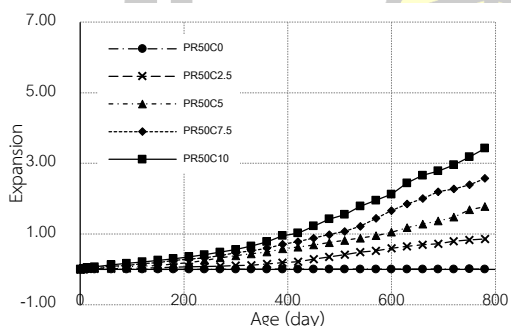
(ค) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



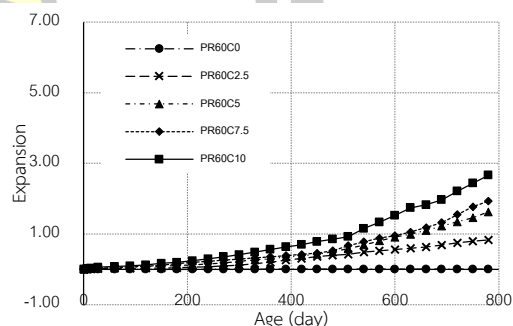
(ง) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40



(ฉ) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50



(ช) แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60

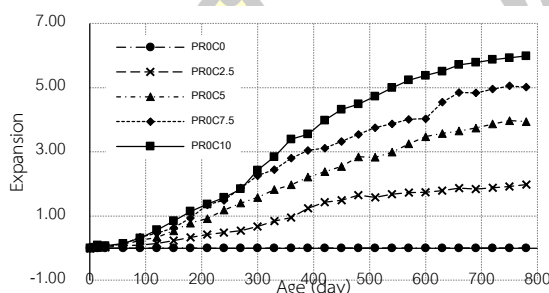
ภาพประกอบ 14 การขยายตัวเนื่องจากเมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอย (ก)-(ช)

จากตารางภาคผนวก ก 3-ก 4 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (22.2 ไมครอน) ที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 มีการขยายตัวที่อายุ 780 วันเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เท่ากับร้อยละ 1.352 3.287 3.950 และ 4.904 ตามลำดับ และเมื่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นเดียวกันจะมีอัตราการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 2.811 3.802 4.632 และ 5.898 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อสารละลายซัลเฟตซัลเฟตมีความเข้มข้นมากขึ้น มอร์ตาร์จะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และการใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีผลต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์มากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และเมื่อใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 พบว่ามอร์ตาร์จะมีการขยายตัวลดลง โดยเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีอัตราการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 1.124 2.688 3.548 4.254 และเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีอัตราการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 1.699 2.990 3.892 4.649 และหากเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 60 พบว่ามอร์ตาร์จะมีการขยายตัวน้อยที่สุด โดยเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีอัตราการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.912 1.791 2.126 2.632 และเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีอัตราการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 1.372 2.327 2.657 2.789 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 จะให้ผลดีต่อการต้านทานซัลเฟตดีที่สุด อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่สูงจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

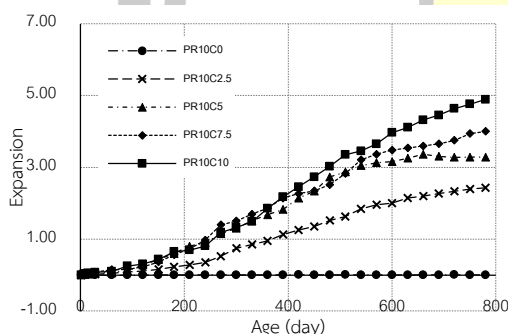
เมื่อทำการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดอนุภาค 6.3 ไมครอนพบว่าที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 มีการขยายตัวที่อายุ 780 วันเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เท่ากับร้อยละ 1.168 2.839 3.412 และ 4.235 โดยเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่กว่า (การขยายตัวร้อยละ 1.352 3.287 3.950 และ 4.904 ตามลำดับ) และเถ้าลอยที่เงื่อนไขเดียวกัน (การขยายตัวร้อยละ 1.229 2.988 3.591 และ 4.458 ตามลำดับ) พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็กที่สุดจะให้ค่าการขยายตัวลดลง เนื่องจากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปริมาณ C_3A ให้น้อยลง จากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาที่บ่มน้ำมากขึ้นจึงทำให้มีการต้านทานซัลเฟตที่สูงขึ้น

จากภาพประกอบ 15 ถึง 18 สังเกตได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดเล็ก (6.3 ไมครอน) และขนาดใหญ่ (22.2 ไมครอน) สามารถช่วยลดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตได้เช่นเดียวกับการใช้เถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถลดการขยายตัวได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อ่อนทิศา บุญเรือง (2552) ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะช่วยลดผลกระทบจากสารละลาย

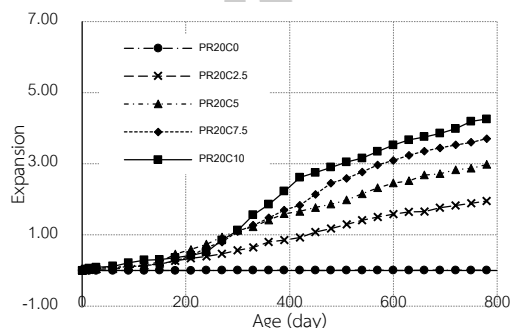
ซัลเฟตต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ โดยใช้ปริมาณของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น จะทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานซัลเฟตเพิ่มขึ้น และมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Inthata และ Cheerarot (2014) ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากแหล่งเดียวกับที่ทดลองคือนำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นได้



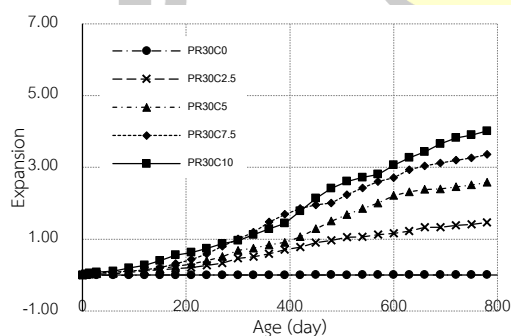
(ก) มอร์ตาร์ควบคุม



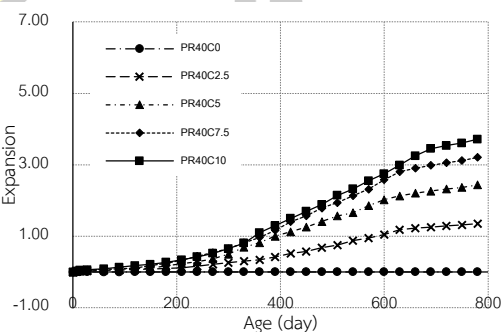
(ข) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10



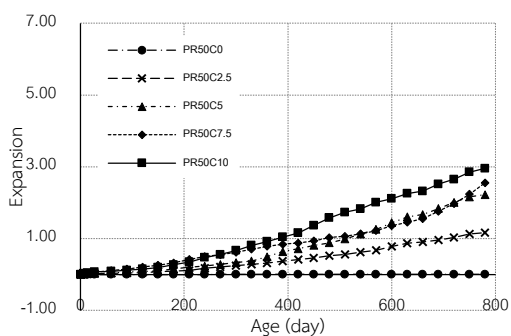
(ค) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 20



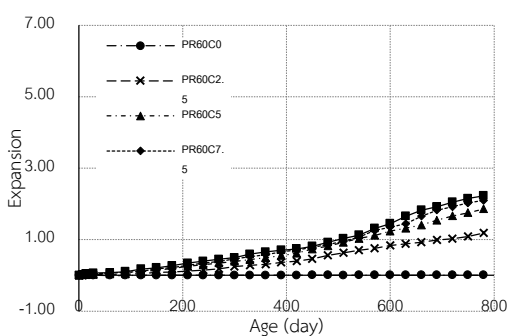
(ง) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 40



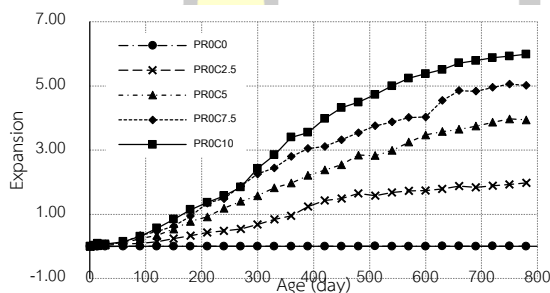
(ฉ) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 50



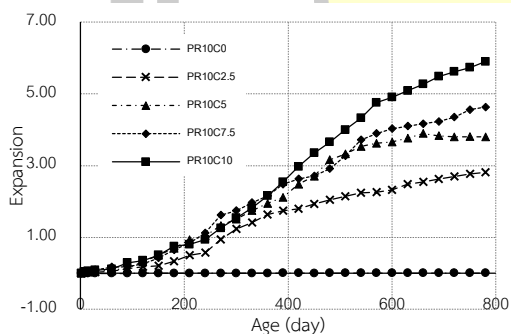
(ช) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 60

ภาพประกอบ 15 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้านเตา 6.3 ไมครอน (ก)-

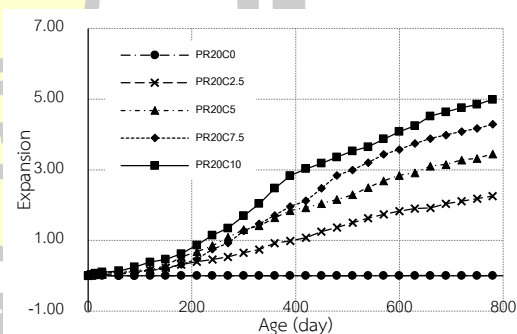
(ข)



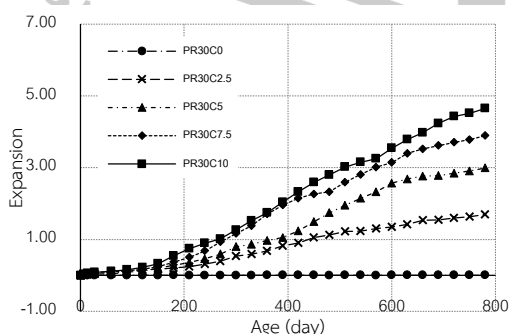
(ก) มอร์ต้าควบคุม



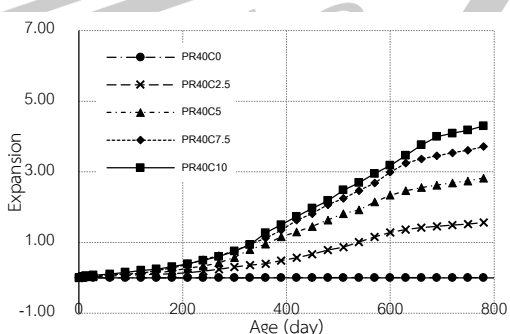
(ข) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 10



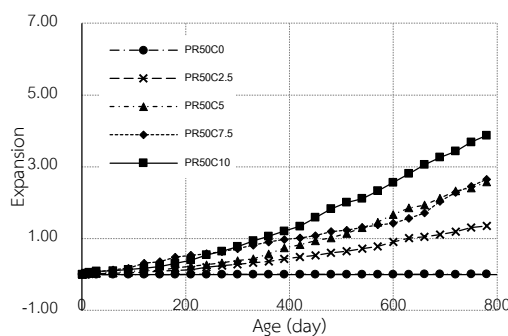
(ค) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 20



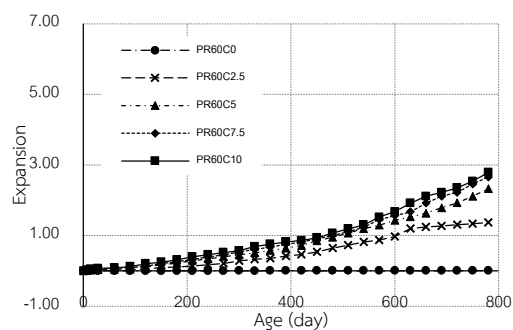
(ง) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 40



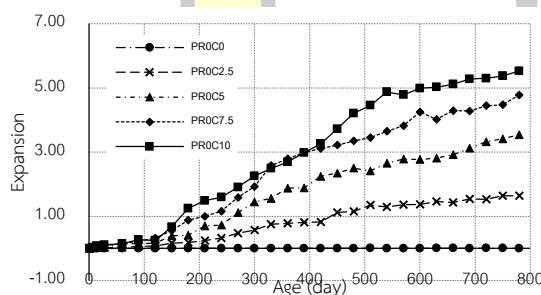
(ฉ) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 50



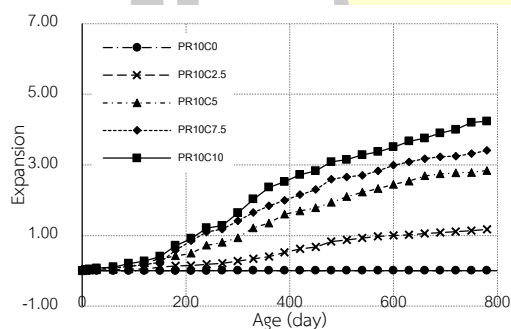
(ช) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 60

ภาพประกอบ 16 การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าก้นเตา 22.2 ไมครอน (ก)-

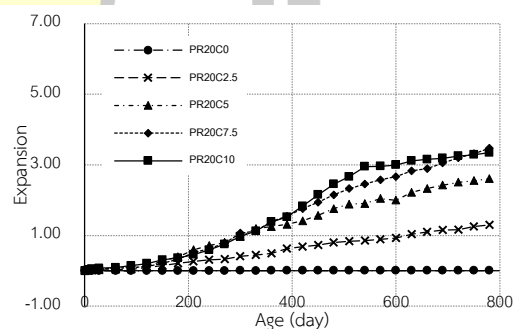
(ข)



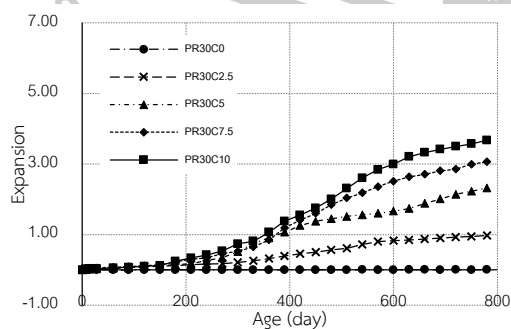
(ก) มอร์ต้าควบคุม



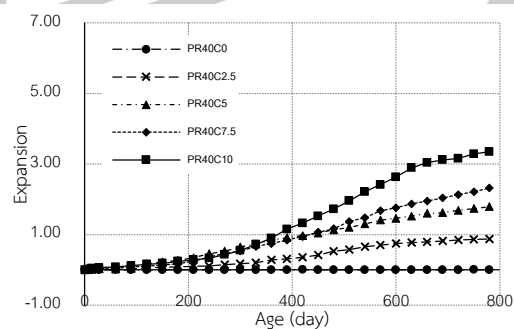
(ข) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10



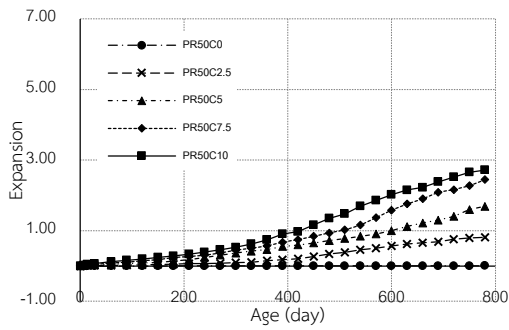
(ค) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 20



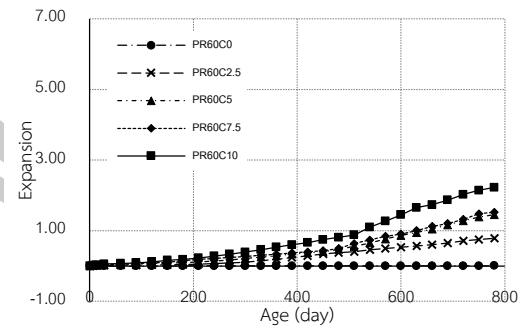
(ง) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 40

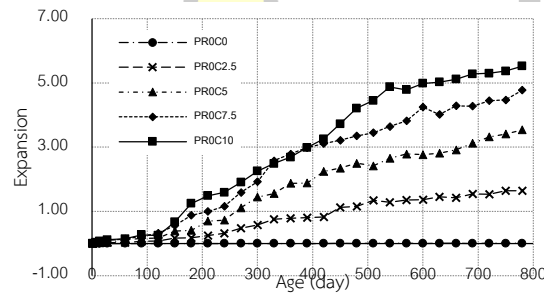


(ฉ) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 50

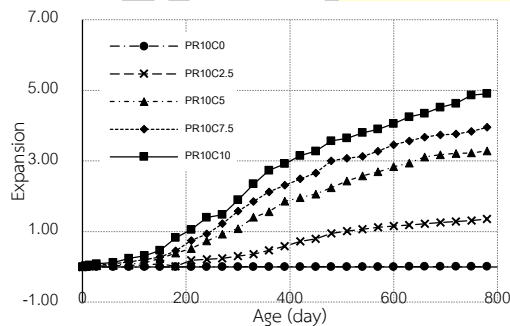


(ช) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 60

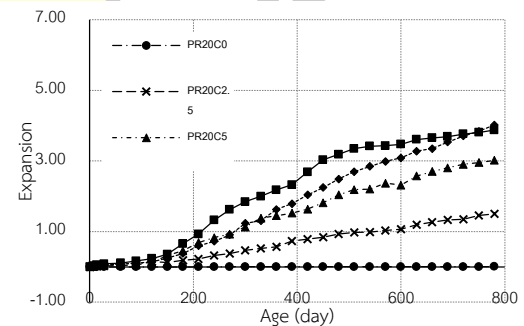
ภาพประกอบ 17 การขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมแก้วกันตา 6.3 ไมครอน
(ก)-(ข)



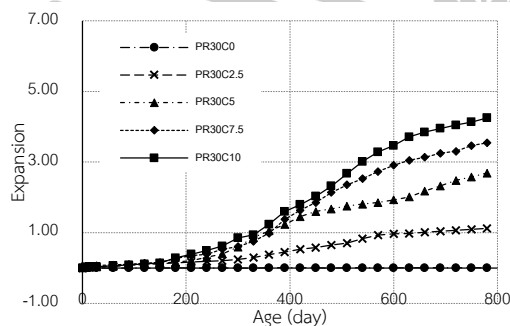
(ก) มอร์ต้าควบคุม



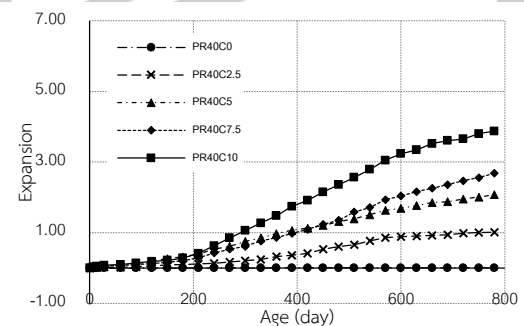
(ข) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 10



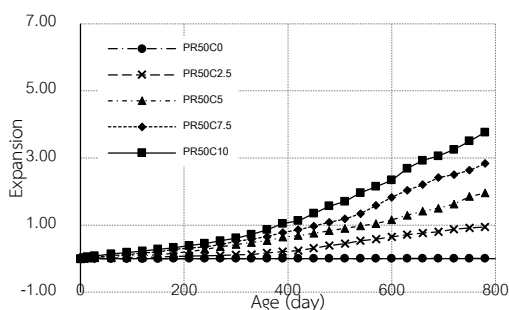
(ค) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 20



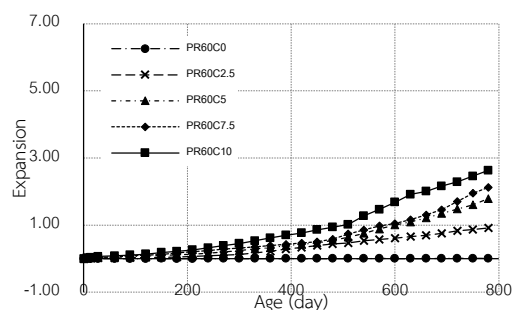
(ง) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 30



(จ) แทนที่ด้วยแก้วกันตาร้อยละ 40



(จ) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 50



(ข) แทนที่ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 60

ภาพประกอบ 18 การขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้านเตา 22.2 ไมครอน

(ก)-(ข)

4.4 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

การสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองการถดถอยในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้สมการถดถอยพหุคูณหลายตัวแปรของแบบเชิงเส้น (Multiple linear regression, MLR) และแบบไม่เชิงเส้นชนิดพหุนามอันดับสอง (Multiple second order polynomial regression, MSPR) ในการสร้างสมการสำหรับการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้านเตาลอยและเถ้านเตาบดละเอียด โดยมีตัวแปรนำเข้าประกอบด้วย ร้อยละการแทนที่ (PR) ร้อยละความเข้มข้น (C) ขนาดอนุภาค (PS) และอายุของมอร์ต้า (AC) และมีตัวแปรส่งออกคือ การขยายตัวของมอร์ต้า (EXP) ซึ่งแบบจำลองการถดถอยมีดังนี้

4.4.1 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้านเตาลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

สมการในการทำนายขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้านเตาลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แล้วดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติแสดงดังตาราง 6 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง MLR-FA-Na มีค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.8589, 7320.38, 0.690 และ 0.8486, 6913.89, 0.642 ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง MSPR-FA-Na มีค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.9778, 2092.53, 0.282 และ 0.9738, 1446.23, 0.271 ตามลำดับ จากค่าสถิติพบว่าแบบจำลอง MSPR-FA-Na มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง MLR-FA-Na ซึ่งสอดคล้องกับงานที่ผ่านมาของ Inthata และคณะ (2013)

$$\text{MLR-FA-Na} = -0.55043212 - 0.019310998 \cdot \text{PR} + 0.186019367 \cdot \text{C} + 0.003544645 \cdot \text{AC} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{MSPR-FA-Na} = & -0.528416783 + 0.009782093 \cdot \text{PR} + 0.193163195 \cdot \text{C} + 0.001362534 \cdot \text{AC} + \\ & 0.000103015 \cdot \text{PR}^2 - 0.012496117 \cdot \text{C}^2 + 0.000000902 \cdot \text{AC}^2 \\ & - 0.003362231 \cdot \text{PR} \cdot \text{C} - 0.0000497 \cdot \text{PR} \cdot \text{AC} + 0.000588422 \cdot \text{C} \cdot \text{AC} \quad (4.2) \end{aligned}$$

ตาราง 6 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย โดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

Model	Training data			Testing data		
	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE
MLR-FA-Na	0.8589	7320.38	0.690	0.8486	6913.89	0.642
MSPR-FA-Na	0.9778	2092.53	0.282	0.9738	1446.23	0.271

4.4.2 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

สมการในการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย โดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แล้วตั้งสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติแสดงดังตาราง 7 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง MLR-FA-Mg มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.8518, 6474.95, 0.628 และ 0.8407, 6460.18, 0.556 ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง MSPR-FA-Mg มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.9779, 1763.21, 0.251 และ 0.9764, 1412.17, 0.218 ตามลำดับ จากค่าสถิติพบว่าแบบจำลอง MSPR-FA-Mg มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง MLR-FA-Mg

$$\text{MLR-FA-Mg} = -0.537448546 - 0.016944508 \cdot \text{PR} + 0.175387199 \cdot \text{C} + 0.002977127 \cdot \text{AC} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{MSPR-FA-Mg} = & -0.418940466 + 0.008841791*PR + 0.124889168*C + 0.000953365*AC \\ & + 0.0000971507*PR^2 - 0.005960341*C^2 + 0.000000714*AC^2 \\ & - 0.003146363*PR*C - 0.0000433 *PR*AC + 0.00054842*C*AC \quad (4.4) \end{aligned}$$

ตาราง 7 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแก้าลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

Model	Training data			Testing data		
	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE
MLR-FA-Mg	0.8518	6474.95	0.628	0.8407	6460.18	0.556
MSPR-FA-Mg	0.9779	1763.21	0.251	0.9764	1412.17	0.218

4.4.3 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแก้ากันเทาโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

สมการในการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแก้ากันเทาโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แล้วดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติแสดงดังตาราง 8 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง MLR-GB-Na มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.8560, 6938.54, 0.705 และ 0.8510, 7477.04, 0.639 ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง MSPR-GB-Na มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.9752, 1784.82, 0.285 และ 0.9740, 1549.17, 0.272 ตามลำดับ จากค่าสถิติพบว่าแบบจำลอง MSPR-GB-Na มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง MLR-GB-Na

$$\begin{aligned} \text{MLR-GB-Na} = & -0.629018486 - 0.016890581*PR + 0.173936923*C + 0.006536237*PS \\ & + 0.003008934*AC \quad (4.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MSPR-GB-Na} = & -281638.4096 + 0.010837632*PR + 0.182399262*C - 57390.83046*PS \\
 & + 0.000890593*AC + 0.00008199*PR^2 - 0.013932582*C^2 \\
 & + 2013.713637*PS^2 + 0.00000107*AC^2 - 0.003306677*PR*C \\
 & + 0.00000101*PR*PS - 0.00004946*PR*AC + 0.001437187*C*PS \\
 & + 0.000595305*C*AC + 0.0000257*PS*AC
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ตาราง 8 ค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตา โดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

Model	Training data			Testing data		
	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE
MLR-GB-Na	0.8560	6938.54	0.705	0.8510	7477.04	0.639
MSPR-GB-Na	0.9752	1784.82	0.285	0.9740	1549.17	0.272

4.4.4 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากเมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาโดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

สมการในการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาแต่ละเอียง โดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แล้วตั้งสมการที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติแสดงดังตาราง 9 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง MLR-GB-Mg มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.8472, 6162.22, 0.641 และ 0.8493, 6654.83, 0.569 ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง MSPR-GB-Mg มีค่าสถิติ R², MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.9766, 1641.83, 0.259 และ 0.9777, 1469.86, 0.225 ตามลำดับ จากค่าสถิติพบว่าแบบจำลอง MSPR-GB-Mg มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง MLR-GB-Mg

$$\begin{aligned}
 \text{MLR-GB-Mg} = & -0.629018486 - 0.016890581*PR + 0.173936923*C + 0.006536237*PS \\
 & + 0.003008934*AC
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 \text{MSPR-GB-Mg} = & 110773.8279 + 0.009145715 \cdot \text{PR} + 0.110344062 \cdot \text{C} - 22573.03052 \cdot \text{PS} \\
 & + 0.000582718 \cdot \text{AC} + 0.0000949 \cdot \text{PR}^2 - 0.006548155 \cdot \text{C}^2 \\
 & + 792.0358464 \cdot \text{PS}^2 + 0.000000867 \cdot \text{AC}^2 - 0.003156168 \cdot \text{PR} \cdot \text{C} \\
 & + 0.00002351 \cdot \text{PR} \cdot \text{PS} - 0.00004454 \cdot \text{PR} \cdot \text{AC} + 0.001422578 \cdot \text{C} \cdot \text{PS} \\
 & + 0.00055247 \cdot \text{C} \cdot \text{AC} + 0.00002180 \cdot \text{PS} \cdot \text{AC}
 \end{aligned} \quad (4.8)$$

ตาราง 9 ทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้ากันตา โดยการสังเคราะห์แบบจำลอง MLR และ MSPR

Model	Training data			Testing data		
	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE
MLR-GB-Mg	0.8472	6162.22	0.641	0.8493	6654.83	0.569
MSPR-GB-Mg	0.9766	1641.83	0.259	0.9777	1469.86	0.225

4.5 การสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือพฤติกรรมของชุดข้อมูลที่นำมาสังเคราะห์ ซึ่งในการเลือกใช้แบบจำลองแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จะเลือกจากค่าสถิติของค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์ (R²) (หากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมทำนายได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) และร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดรูปแบบโครงสร้างการสังเคราะห์ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมไว้ดังนี้ กำหนดจำนวนชั้นซ่อนคือ 1 และ 2 ชั้นซ่อน, จำนวนนิวรอนใน 1 ชั้นซ่อนจะกำหนดไว้ตั้งแต่ 4-9 นิวรอน โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 นิวรอนของการสังเคราะห์ครั้งต่อไปเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งจะกำหนดให้มีจำนวนนิวรอนเท่ากับ 2 และ 4 นิวรอน ในส่วนของอัลกอริทึมการเรียนรู้จะใช้อัลกอริทึม br lm rp และ scg โดยกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ในแต่ละชั้นซ่อน 2 ประเภทประกอบด้วย Log-sigmoid function และ Tan- sigmoid function ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น (Linear function) เฉพาะชั้นส่งออกเท่านั้น โดยฟังก์ชัน mae mse และ sse ถูกใช้ฟังก์ชันการปฏิบัติงานของแบบจำลอง ANN กระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองจะหยุดทำงานเมื่อจำนวนรอบการเรียนรู้เท่ากับ 10000 รอบ หรือค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมายน้อยกว่า 1.0×10^{-6} ซึ่งการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียม

ซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

4.5.1 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

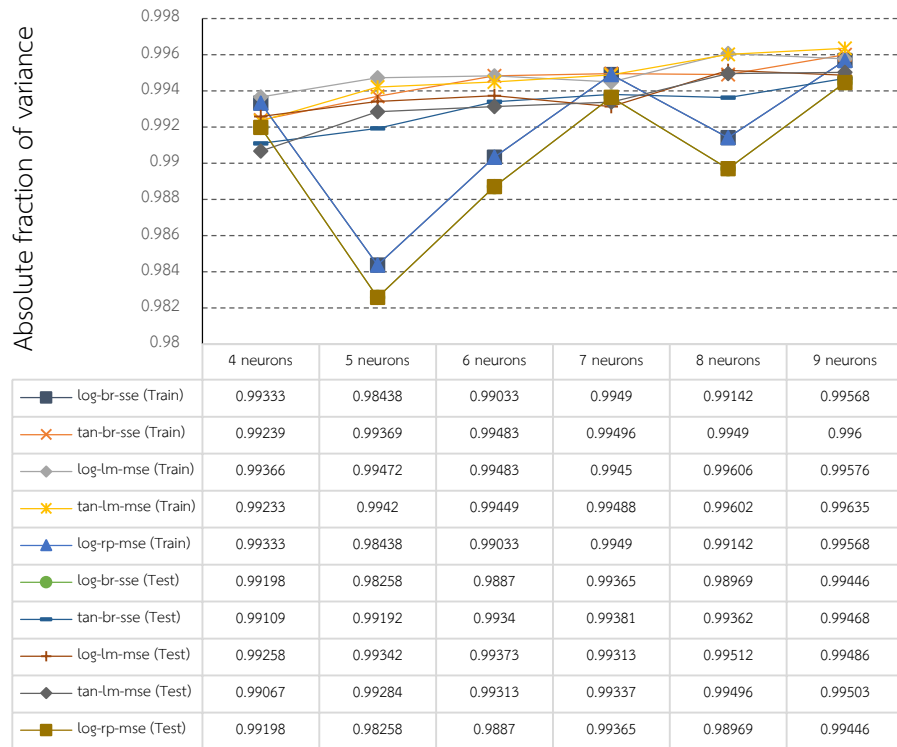
ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอน ฟังก์ชันกระตุ้น tan-sigmoid อัลกอริทึมการเรียนรู้ lm และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mse ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 19 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99635, 296.10, 0.113 และ 0.99503, 193.66, 0.117 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 10 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.9 -4.10 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น AC คืออายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$X(i) = (a_{1_1}(i) \times PR) + (a_{1_2}(i) \times C) + (a_{1_3}(i) \times AC) + bh(i) \quad (4.9)$$

$$Exp = \sum_{i=1}^n \left(y(i) \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x(i)}} \right) \right) + bo \quad (4.10)$$

ตาราง 10 ค่าน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Na-3 input-1 hidden -9 neurons-tan-lm-mse

i	1 st Hidden layer				Output layer	
	Weight values			Bias values	Weight values	Bias values
	a_{1_1}	a_{1_2}	a_{1_3}	bh	y	bo
1	0.00786	0.30620	-0.00235	1.36806	1.69087	373.6704
2	-0.00862	0.14262	-0.00622	-0.52400	76.9542	
3	0.01458	-0.05913	-0.00307	0.64511	3.87317	
4	0.00602	-0.13170	-0.00243	1.16611	-1.87222	
5	-1.06184	4.42923	0.00237	8.83302	0.15031	
6	-0.01116	0.07274	0.00048	-3.76847	375.431	
7	1.25777	4.38013	-0.00248	-11.03231	0.21619	
8	0.01569	0.00272	-0.00308	0.61143	-3.24305	
9	-0.00863	0.14255	-0.00614	-0.53045	-78.1538	



ภาพประกอบ 19 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสม
 แก้วลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน

สำหรับผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของ
 โครงสร้างแบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนในชั้นซ่อนแรก และ 4
 นิวรอนในชั้นซ่อนที่สอง โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนแรกและชั้นซ่อนที่สอง คือ log-sigmoid และ
 tan-sigmoid ตามลำดับ อัลกอริทึมการเรียนรู้ lm และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mse ให้ค่าความ
 แปรปรวนสมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 20 โดยค่าสถิติ R^2 ,
 MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99908, 26.22209, 0.057
 และ 0.99886, 22.74370, 0.057 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 11 และ
 สามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดได้ดังสมการ 4.11 - 4.13 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C
 คือ อัตราความเข้มข้น AC คืออายุของมอร์ตาร์ด และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ดที่ทำนายได้

$$x1(i1) = (a1_1(i1) \times PR) + (a1_2(i1) \times C) + (a1_3(i1) \times AC) + bh1(i1) \quad (4.11)$$

$$x2(i2) = \sum_{i=1}^9 \left(a2_i \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x1(i1)}} \right) \right) + bh2 \quad (4.12)$$

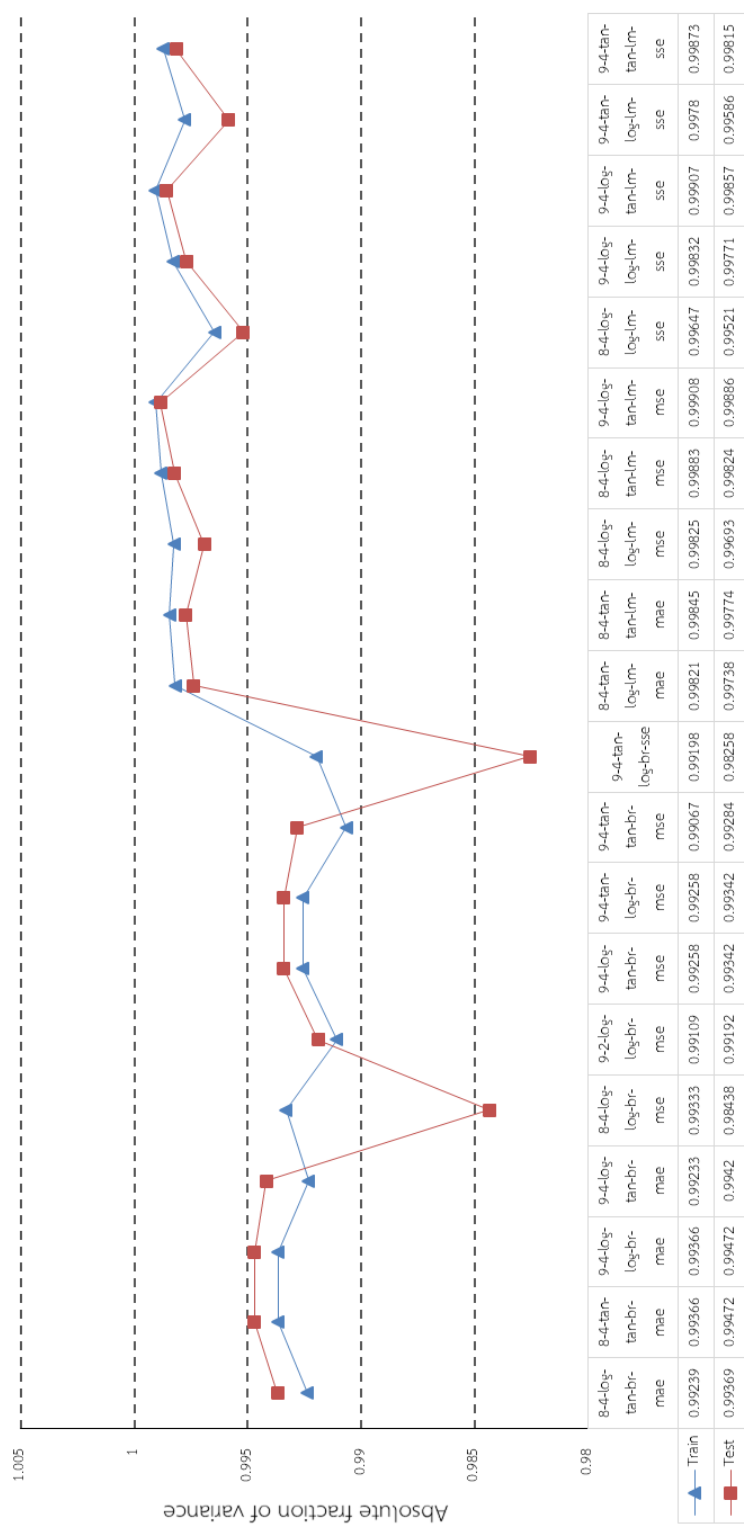
$$Exp = \sum_{i2=1}^4 \left(y(i2) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x2(i2))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.13)$$

ตาราง 11 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Na-3 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-mse

i1	1 st Hidden layer			
	Weight values			Bias bh1
	a1 ₁	a1 ₂	a1 ₃	
1	0.35757	0.25701	-0.02211	-24.2734
2	-0.14552	-0.78402	-0.00638	11.1083
3	0.28222	-0.55831	-0.00105	-13.0105
4	-0.04281	8.33935	-0.00028	-15.5515
5	-0.86881	1.45453	-0.00400	34.9977
6	0.01509	0.61295	0.00301	-6.8543
7	-0.05420	-0.11768	0.00489	1.4236
8	-0.90098	1.37996	0.00212	-6.5565
9	0.01284	-0.01077	0.00464	6.0879

i2	2 nd Hidden layer										Output layer	
	Weight values									Bias bh2	Weight y	Bias bo
	a2 ₁	a2 ₂	a2 ₃	a2 ₄	a2 ₅	a2 ₆	a2 ₇	a2 ₈	a2 ₉			
1	-8.5113	5.2592	44.470	0.1182	3.3451	-0.0618	0.3628	2.0732	-923.42	919.787	1.02914	9.75766
2	-3.0533	-0.8902	-0.2487	3.2958	0.4243	-0.0272	1.2690	0.6796	835.55	-840.083	3.51153	
3	2.0111	1.3301	1.5171	-5.3930	-0.3565	2.3998	-1.8147	1.1118	-370.18	376.422	1.20938	
4	3.4792	1.3332	-5.0142	30.768	-1.1775	0.9496	2.1463	-4.1008	442.24	-476.069	8.48260	

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 20 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลเฟตของมอร์ต้าผสม
 แก้วลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน

4.5.2 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

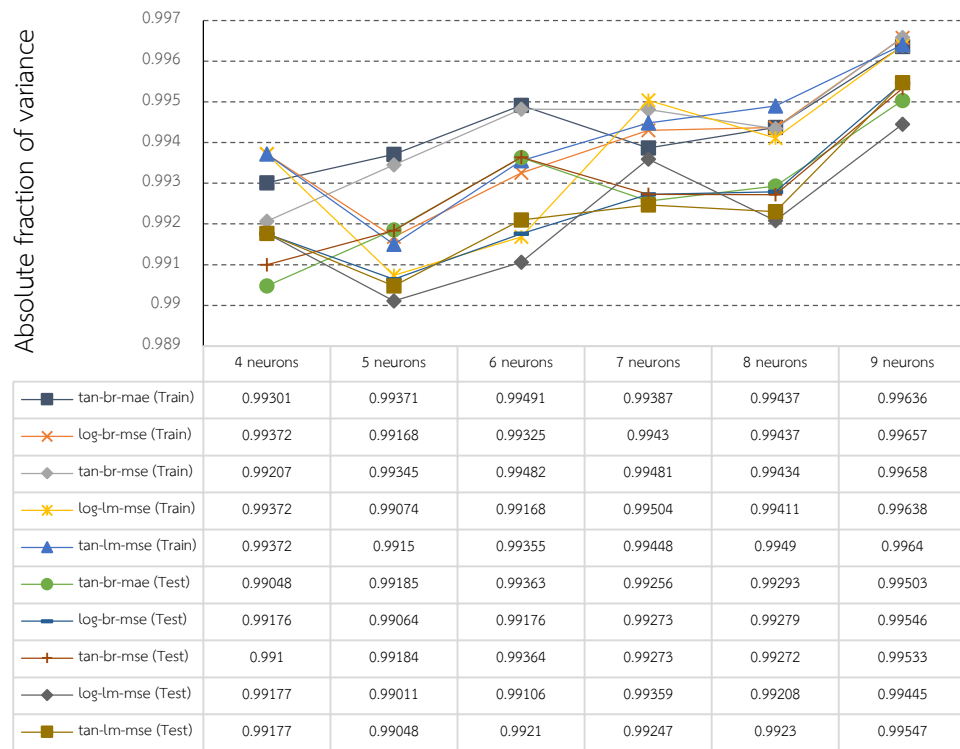
ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนและฟังก์ชันกระตุ้น tan-sigmoid อัลกอริทึมการเรียนรู้ br และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mse ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 21 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99658, 281.33208, 0.098 และ 0.99533, 176.95446, 0.094 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 12 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.14 -4.15 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น AC คือ อายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$X(i) = (a_{1_1}(i) \times PR) + (a_{1_2}(i) \times C) + (a_{1_3}(i) \times AC) + bh(i) \quad (4.14)$$

$$Exp = \sum_{i=1}^n \left(y(i) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x(i))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.15)$$

ตาราง 12 ค่าน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Mg-3 input-1 hidden-9 neurons- tan-br-mse

i	1 st Hidden layer				Output layer	
	Weight values			Bias values	Weight values	Bias values
	a_{1_1}	a_{1_2}	a_{1_3}	bh	y	bo
1	0.110095	-0.32095	-0.00317	4.2829	-1.79427	-0.971730882
2	0.007304	0.47636	-0.00079	0.073956	2.96099	
3	-0.09772	0.380333	0.0043	-5.0901	-1.24592	
4	-0.02125	-0.0381	0.003395	-0.2045	1.540153	
5	0.026672	-0.03084	-0.00479	0.454857	0.820239	
6	-0.00946	-1.22124	0.000528	0.603022	1.336995	
7	-0.02116	0.102944	-0.00682	-0.68349	1.849125	
8	-0.01971	0.111398	-0.00285	-1.05804	-4.31951	
9	-0.02159	0.199103	0.001541	-1.96271	1.780203	



ภาพประกอบ 21 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสที่เชื่อมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน

สำหรับผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนในชั้นซ่อนแรก และ 4 นิวรอนในชั้นซ่อนที่สอง โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนแรกและชั้นซ่อนที่สอง คือ log-sigmoid และ tan-sigmoid ตามลำดับ อัลกอริทึมการเรียนรู้ lm และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน sse ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 22 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99911, 43.5270, 0.050 และ 0.99907, 37.6593, 0.043 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 13 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.16 -4.18 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น AC คืออายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$x1(i1) = (a1_1(i1) \times PR) + (a1_2(i1) \times C) + (a1_3(i1) \times AC) + bh1(i1) \quad (4.16)$$

$$x2(i2) = \sum_{i=1}^9 \left(a2_i \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x1(i1)}} \right) \right) + bh2 \quad (4.17)$$

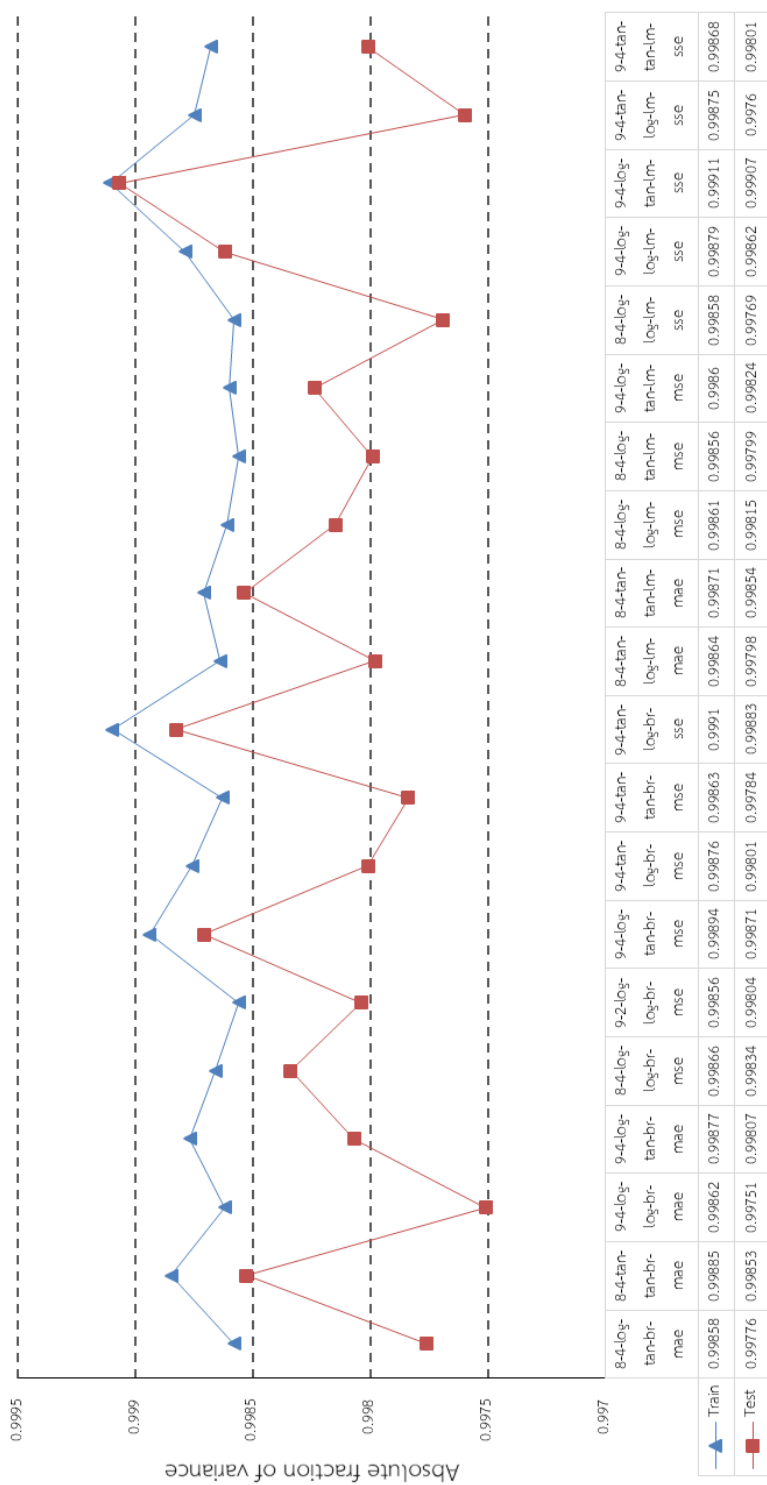
$$Exp = \sum_{i2=1}^4 \left(y(i2) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x2(i2))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.18)$$

ตาราง 13 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-FA-Mg-3 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-sse

i1	1 st Hidden layer			
	Weight values			Bias bh1
	a1 ₁	a1 ₂	a1 ₃	
1	-0.109614	0.885895	0.004766	-5.5135
2	0.010931	-0.070702	0.005787	3.7320
3	-0.604108	-0.309585	0.009904	18.6113
4	0.041033	-0.036325	0.004195	-4.8879
5	0.027005	-1.188663	0.000298	0.7716
6	0.070747	-0.228158	-0.002086	1.2863
7	0.236064	-0.734369	-0.003509	7.2019
8	-0.892631	-9.802628	-0.003137	29.0139
9	-0.400063	-0.365195	0.006382	12.2152

i2	2 nd Hidden layer										Output layer	
	Weight values									Bias bh2	Weight y	Bias bo
	a2 ₁	a2 ₂	a2 ₃	a2 ₄	a2 ₅	a2 ₆	a2 ₇	a2 ₈	a2 ₉			
1	0.8051	82.817	1.8200	-0.1540	-5.2727	5.1301	-0.3448	2.0685	-2.2492	-89.865	-297.516	11.14837
2	-0.4226	-72.982	0.0669	-0.1239	3.7971	1.1955	0.6789	-0.4034	1.0794	71.571	-7.225	
3	3.9083	-169.13	0.3720	-2.5656	4.9348	2.3105	6.8169	205.07	-0.2947	159.351	-0.585	
4	-0.4708	80.596	-0.1404	-0.2864	-2.7551	-5.5338	-0.9899	0.1640	-3.3169	-74.573	-3.358	

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 22 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเกตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน

4.5.3 การทำนายการขยายตัวของเนื้อจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันเตาโดยการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนและฟังก์ชันกระตุ้น log-sigmoid อัลกอริทึมการเรียนรู้ lm และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mae ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 23 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99539, 409.0339, 0.128 และ 0.9943, 453.4197, 0.125 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 14 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.19 -4.20 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น PS คือ ขนาดของอนุภาค AC คืออายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$X(i) = (a_{1_1}(i) \times PR) + (a_{1_2}(i) \times C) + (a_{1_3}(i) \times PS) + (a_{1_4}(i) \times AC) + bh(i) \quad (4.19)$$

$$Exp = \sum_{i=1}^n \left(y(i) \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x(i)}} \right) \right) + bo \quad (4.20)$$

ตาราง 14 ค่าน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Na-4 input-1 hidden-9 neurons- log-lm-mae

i	1 st Hidden layer					Output layer	
	Weight values				Bias values	Weight values	Bias values
	a_{1_1}	a_{1_2}	a_{1_3}	a_{1_4}	bh	y	bo
1	-0.0036181	0.6522343	-0.0060476	0.005961	-0.6190261	-2.6627983	-8.894771088
2	0.0079659	0.2716929	-0.0032335	-0.0005151	2.0287887	26.110447	
3	-0.019576	0.1007597	0.0049327	0.0069223	-1.3534922	-8.8141512	
4	0.1081851	-0.3345874	0.0121774	0.0024943	-3.9441971	-0.7026723	
5	0.0318993	-0.2192378	-0.109562	-0.0030678	5.9453851	-2.892005	
6	-0.2568048	1.4591	-0.7686157	0.0106962	-1.8171066	0.3205984	
7	0.4269701	-0.651069	0.3204102	-0.0060379	6.2129029	-1.3800418	
8	-0.0506155	-0.1220704	0.0091417	0.0064304	-0.6561398	2.5659245	
9	0.0087279	-0.0391304	-0.0028095	-0.0064948	1.3286058	-10.218023	



ภาพประกอบ 23 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสม
 แก้วกันเตาโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน

สำหรับผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของ
 โครงสร้างแบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนในชั้นซ่อนแรก และ 4
 นิวรอนในชั้นซ่อนที่สอง โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนแรกและชั้นซ่อนที่สอง คือ log-sigmoid และ
 tan-sigmoid ตามลำดับ อัลกอริทึมการเรียนรู้ lm และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mse ให้ค่าความ
 แปรปรวนสมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 24 โดยค่าสถิติ R^2 ,
 MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99877, 118.0974, 0.066
 และ 0.99831, 113.9935, 0.068 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 15 และ
 สามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดได้ดังสมการ 4.21 – 4.23 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C
 คือ อัตราความเข้มข้น PS คือขนาดของอนุภาค AC คืออายุของมอร์ตาร์ด และ Exp คือค่าการขยายตัว
 ของมอร์ตาร์ดที่ทำนายได้

$$x1(i1) = (a1_1(i1) \times PR) + (a1_2(i1) \times C) + (a1_3(i1) \times PS) + (a1_4(i1) \times AC) + bh1(i1) \quad (4.21)$$

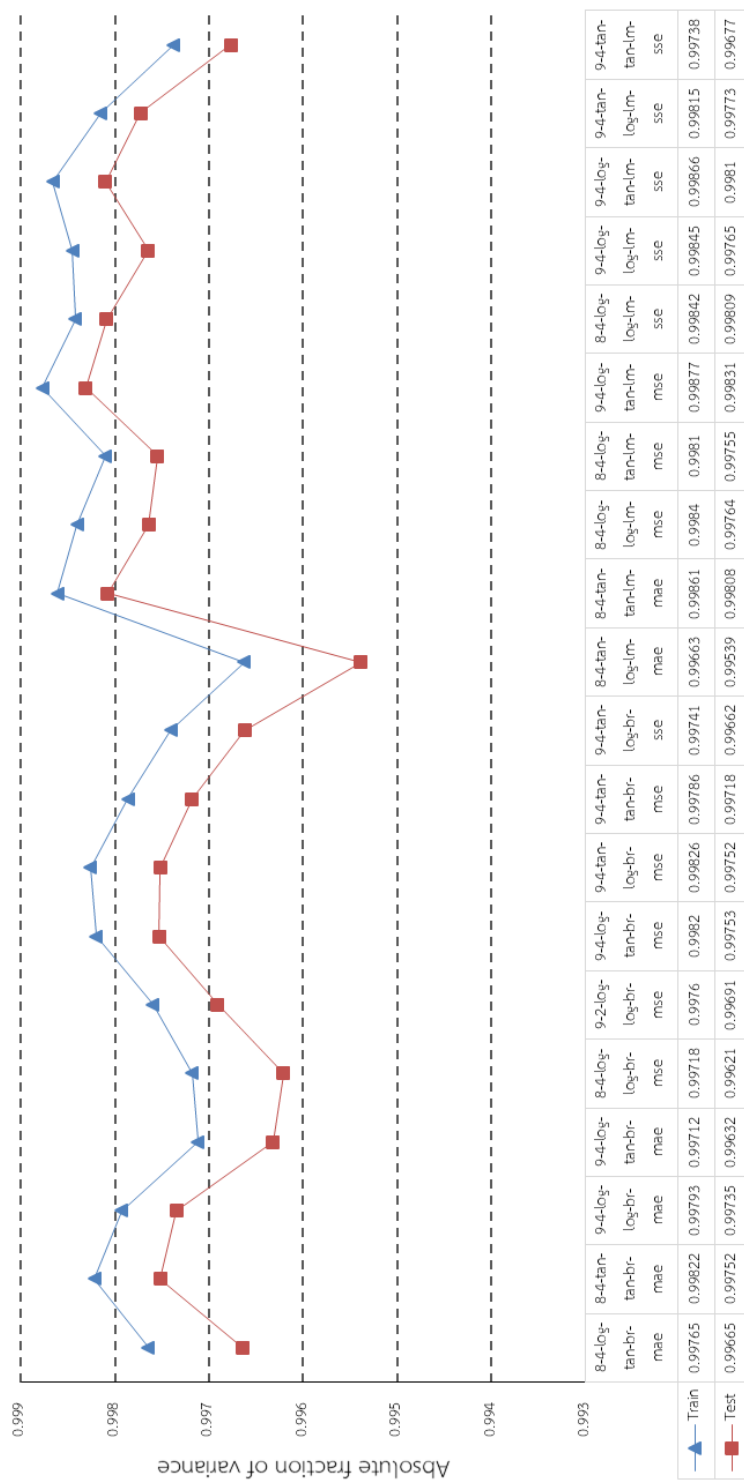
$$x2(i2) = \sum_{i=1}^9 \left(a2_i \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x1(i1)}} \right) \right) + bh2 \quad (4.22)$$

$$Exp = \sum_{i2=1}^4 \left(y(i2) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x2(i2))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.23)$$

ตาราง 15 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Na-4 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-lm-mse

i1	1 st Hidden layer				
	Weight values				Bias bh1
	a1 ₁	a1 ₂	a1 ₃	a1 ₄	
1	1.16421	-1.56228	3.19676	0.00756	-19.1913
2	1.46423	-3.24807	0.01123	0.01157	-58.4246
3	0.05418	0.44780	-0.13872	0.00006	-1.5048
4	0.03380	0.08176	-0.00082	-0.00089	-0.4943
5	-0.01439	-1.34345	-0.01004	0.00176	-1.8040
6	-0.03515	-0.11220	-0.00089	0.00178	-0.0127
7	0.05526	0.08491	0.00264	0.00393	1.8903
8	-0.04159	-0.09216	0.00007	-0.00018	1.8144
9	-2.68212	5.23919	0.01867	0.00189	-16.7137

i2	2 nd Hidden layer										Output layer	
	Weight values									Bias bh2	Weight y	Bias bo
	a2 ₁	a2 ₂	a2 ₃	a2 ₄	a2 ₅	a2 ₆	a2 ₇	a2 ₈	a2 ₉			
1	-1.97087	-0.74349	0.33325	-47.4604	-9.52239	-22.8907	39.2408	-18.5285	-5.55467	8.0458	23.572	3.91943
2	-13.5449	-13.3645	-58.8747	76.1277	4.99475	-9.23191	-4.22831	-13.6324	-1.11034	29.4798	0.0522	
3	2.13934	0.89268	-0.31616	46.4086	9.41722	22.3755	39.8965	18.2575	5.35006	-6.5322	23.900	
4	-0.25629	-40.4138	0.09948	-54.9582	-46.0781	-27.0358	22.8630	-21.9508	0.55978	29.5573	4.3213	



ภาพประกอบ 24 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสม
 แก้วกันเทาโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน

4.5.4 การทำนายการขยายตัวของแมงกานีสซึมซับของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันเตาโดยการสังเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 7 นิวรอนและฟังก์ชันกระตุ้น tan-sigmoid อัลกอริทึมการเรียนรู้ br และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mse ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 25 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99596, 451.6229, 0.107 และ 0.99449, 425.6460, 0.110 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 16 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.24 – 4.25 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น PS คือ ขนาดของอนุภาค AC คืออายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$X(i) = (a_{1_1}(i) \times PR) + (a_{1_2}(i) \times C) + (a_{1_3}(i) \times PS) + (a_{1_4}(i) \times AC) + bh(i) \quad (4.24)$$

$$Exp = \sum_{i=1}^n \left(y(i) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x(i))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.25)$$

ตาราง 16 ค่าน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Mg-4 input-1 hidden-9 neurons- tan-br-mse

i	1 st Hidden layer					Output layer	
	Weight values				Bias values	Weight values	Bias values
	a_{1_1}	a_{1_2}	a_{1_3}	a_{1_4}	bh	y	bo
1	-0.0187539	0.1093781	0.0061461	0.0022433	-1.9915035	4.311667	1.41557251
2	-0.0237375	0.2011245	-0.0048031	-0.0015495	0.7057812	0.7607617	
3	-0.1227434	0.305141	-0.0145185	-0.0006283	-2.3362978	2.1184913	
4	0.1295568	-0.3528648	0.0047617	0.0021122	2.7355207	2.0920917	
5	0.0048983	-0.0396627	-0.0007391	0.0035148	-0.4941938	2.1016105	
6	-0.008209	-0.2512272	0.0099608	0.0013677	1.0888456	1.1005824	
7	0.005778	0.0052913	-0.0009332	-0.0038089	0.1786616	1.9871678	
8	0.0263635	-0.0379703	-0.002211	0.0027846	1.8584995	2.7830225	
9	0.0087924	0.4027325	-0.0128131	0.0010786	-1.8663785	0.5895847	



ภาพประกอบ 25 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันเตาโดยใช้แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน

สำหรับผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน พบว่าจำนวนนิวรอนเท่ากับ 9 นิวรอนในชั้นซ่อนแรก และ 4 นิวรอนในชั้นซ่อนที่สอง โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนแรกและชั้นซ่อนที่สอง คือ log-sigmoid และ tan-sigmoid ตามลำดับ อัลกอริทึมการเรียนรู้ br และฟังก์ชันการปฏิบัติงาน mae ให้ค่าความแปรปรวนสมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 26 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99841, 99.0982, 0.067 และ 0.99761, 105.1000, 0.072 ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักของแบบจำลองแสดงดังตาราง 17 และสามารถทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดังสมการ 4.27 – 4.28 เมื่อ PR คือร้อยละการแทนที่ C คือ อัตราความเข้มข้น PS คือขนาดของอนุภาค AC คืออายุของมอร์ตาร์ และ Exp คือค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ทำนายได้

$$x1(i1) = (a1_1(i1) \times PR) + (a1_2(i1) \times C) + (a1_3(i1) \times PS) + (a1_4(i1) \times AC) + bh1(i1) \quad (4.26)$$

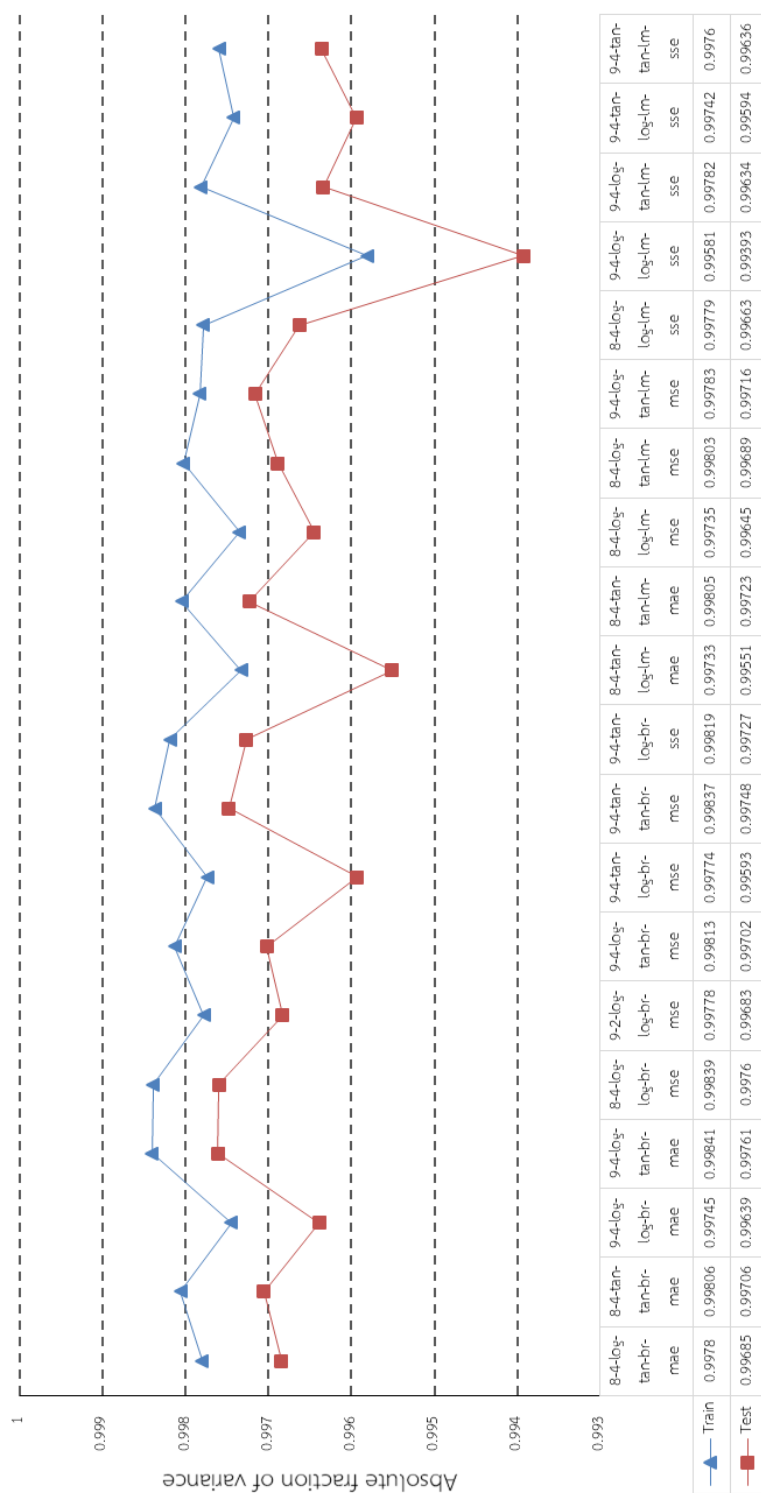
$$x2(i2) = \sum_{i=1}^9 \left(a2_i \times \left(\frac{1}{1 + e^{-x1(i1)}} \right) \right) + bh2 \quad (4.27)$$

$$Exp = \sum_{i2=1}^4 \left(y(i2) \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2(x2(i2))}} - 1 \right) \right) + bo \quad (4.28)$$

ตาราง 17 คำนวณน้ำหนักของแบบจำลอง ANN-GB-Mg-4 input-2 hidden-9-4-neurons-log-tan-br-mae

i1	1 st Hidden layer				
	Weight values				Bias bh1
	a1 ₁	a1 ₂	a1 ₃	a1 ₄	
1	-0.01789	0.13792	0.01340	-0.01376	0.13268
2	0.05214	0.01536	-0.00668	-0.00720	0.29093
3	0.04008	-0.36523	-0.04563	-0.00206	4.26910
4	0.05579	0.35940	-0.02963	0.01694	-6.33359
5	0.22816	-0.48333	-0.01321	0.00011	2.22143
6	-0.17059	2.06601	-0.81289	0.00941	-6.77068
7	-0.48279	1.14460	0.03148	-0.00305	-2.43009
8	0.21764	0.64408	-0.01369	-0.00756	-11.65837
9	0.00885	-0.78358	-0.00833	-0.00115	4.35233

i2	2 nd Hidden layer										Output layer	
	Weight values									Bias bh2	Weight y	Bias bo
	a2 ₁	a2 ₂	a2 ₃	a2 ₄	a2 ₅	a2 ₆	a2 ₇	a2 ₈	a2 ₉			
1	-1.72801	-0.55840	-2.30567	0.47948	-7.66042	0.63543	-2.22054	-1.62814	6.10466	2.55143	4.46476	-5.18755
2	1.52633	0.83633	2.26361	-0.44721	4.63910	-0.42604	1.39329	1.01174	-5.43766	-0.38720	6.80095	
3	0.99170	-2.60613	0.15253	-2.63198	6.25927	0.08527	4.87864	3.36404	5.61181	-2.24583	7.16551	
4	1.20978	1.06104	1.32818	-0.34554	-0.18532	-0.09025	0.23061	0.13566	0.10434	-0.09286	-4.33161	



ภาพประกอบ 26 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาโดยใช้แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน

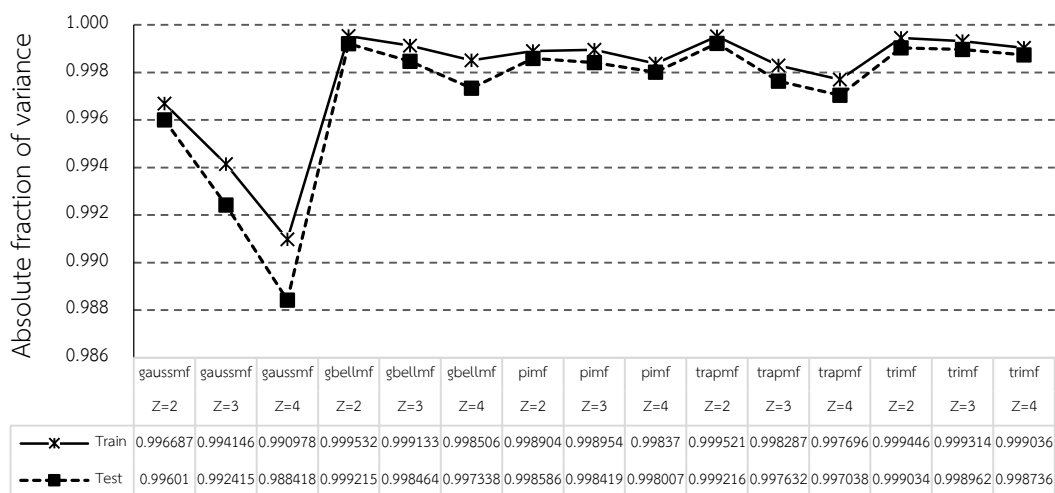
4.6 การสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

ในการสังเคราะห์แบบจำลอง ANFIS จะใช้ตัวแปรในการนำเข้าเหมือนกับ การสังเคราะห์แบบจำลอง ANN ซึ่งโครงสร้างการสังเคราะห์แบบจำลอง ANFIS มีการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมด 5 ฟังก์ชัน ประกอบด้วย ฟังก์ชันเกาส์เซียน (gaussmf) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (gbellmf) ฟังก์ชันตัวยูคว่ำ (pimf) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapmf) และฟังก์ชันสามเหลี่ยม (trimf) วิธีการเรียนรู้ของแบบจำลอง (Learning Algorithm) เลือกใช้วิธี Hybrid และ Backpropaga, สร้างระบบกฎและวิธีการประมวลผลของฟัซซีเป็นแบบระบบกฎฟัซซี (Fuzzy rule type) ชนิด TSK (Takagi-Sugeno-Kang) , จำนวนรอบการเรียนรู้ (Epochs) กำหนดให้เท่ากับ 3 รอบ, กำหนดจำนวนเท่าของฐานฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Z) เท่ากับ 2, 3 และ 4, กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมาย (Error Tolerance) เท่ากับ 0.000001 ซึ่งการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยแบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้มีดังนี้

4.6.1 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยโดยการสังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANFIS พบว่าฟังก์ชัน gbellmf ที่มีค่า $Z=2$ ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 27 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99953, 15.4953, 0.040 และ 0.99921, 20.3714, 0.046 ตามลำดับ

พหุ ประสิทธิภาพ

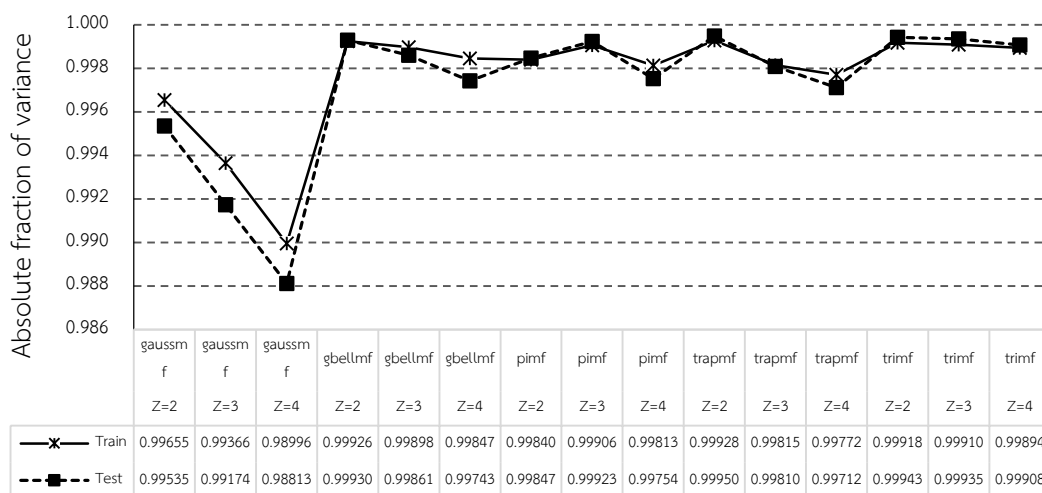


ภาพประกอบ 27 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลเฟตมอร์ตาร์ผสมเกล็ด
ลอยโดยใช้แบบจำลอง ANFIS

4.6.2 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอยโดยการ
สังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวได้

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้าง
แบบจำลอง ANFIS พบว่าฟังก์ชัน trapmf ที่ค่า $Z=2$ ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มาก
ที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 28 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุด
ข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99928, 24.2317, 0.045 และ 0.99950, 26.0977,
0.032 ตามลำดับ

พูน ปณ จิต ชเว

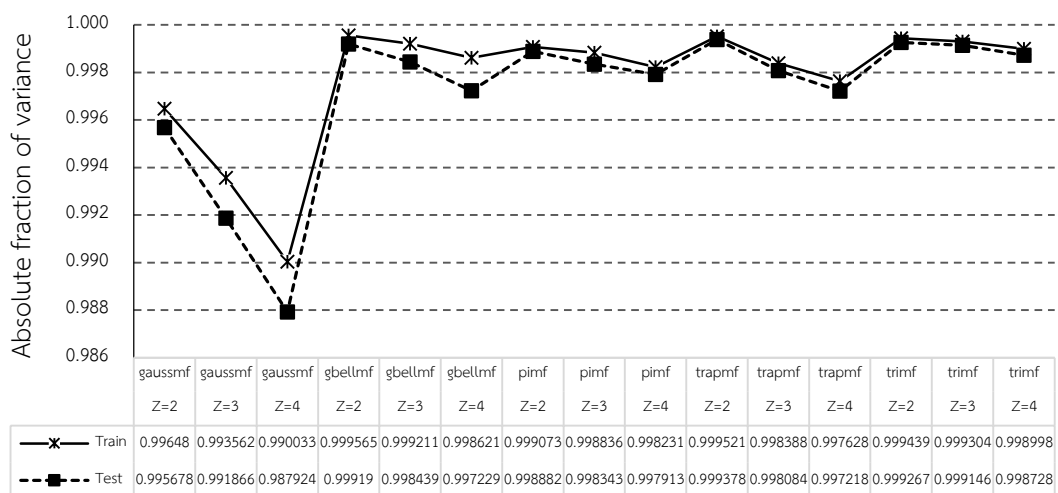


ภาพประกอบ 28 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมอร์ตาร์ทาร์ผสม
แก้ด้วยโดยใช้แบบจำลอง ANFIS

4.6.3 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ทาร์ผสมแก้กันเตาโดยการ
สังเคราะห์แบบจำลองระบบอนุमानความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้าง
แบบจำลอง ANFIS พบว่าฟังก์ชัน gbellmf ที่ค่า $Z=2$ ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มาก
ที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 29 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุด
ข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99956, 16.10689, 0.039 และ 0.99919, 22.0114,
0.047 ตามลำดับ

พูน ปณ จิต ชีเว

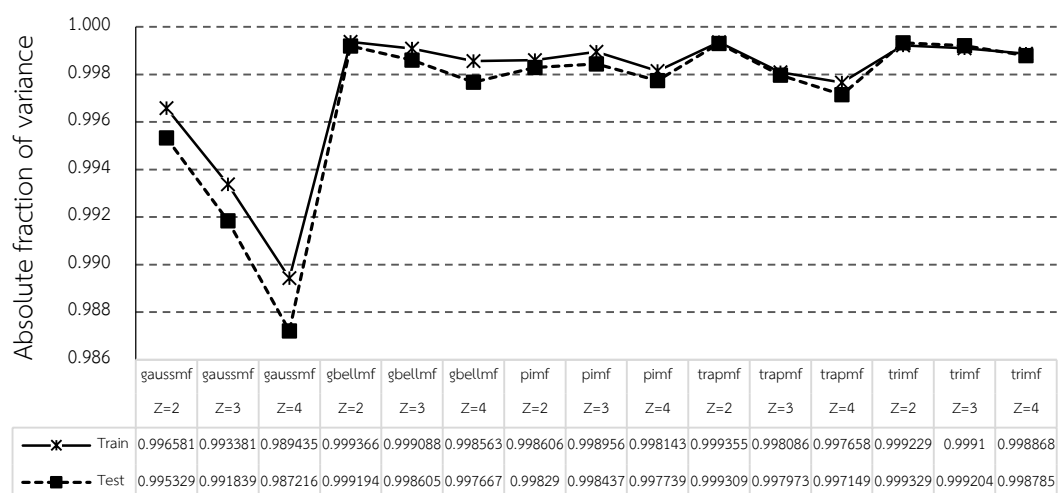


ภาพประกอบ 29 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเอ็กกันเตาโดยใช้แบบจำลอง ANFIS

4.6.4 การทำนายการขยายตัวเนื่องจากเมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเอ็กกันเตาโดยใช้แบบจำลองระบบอนุมานความคลุมเครือแบบปรับตัวตัวได้

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดของโครงสร้างแบบจำลอง ANFIS พบว่าฟังก์ชัน gbellmf ที่ค่า $Z=2$ ให้ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นดังภาพประกอบ 30 โดยค่าสถิติ R^2 , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการเรียนรู้และการทดสอบเท่ากับ 0.99937, 16.1582, 0.042 และ 0.99919, 22.8787, 0.042 ตามลำดับ

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 30 ค่าสถิติ R^2 ของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมอร์ตาร์ผสม
 แก้วกันตาโดยใช้แบบจำลอง ANFIS



4.7 การเปรียบเทียบผลการทำนายการขยายตัวของแบบจำลองต่างๆ

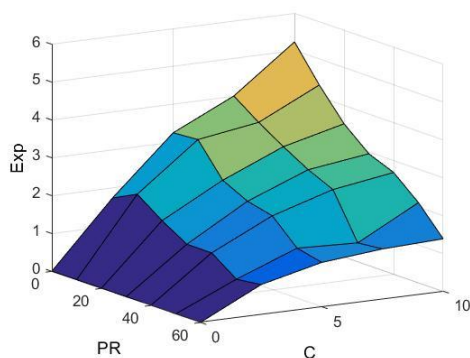
4.7.1 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด

จากข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยดังตาราง 18 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองต่างๆ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง ANFIS ฟังก์ชัน gbellmf ที่ค่า Z เท่ากับ 2 (ANFIS gbellmf Z=2) ให้ค่าสถิติ R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบบจำลอง ANFIS มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งผลการทำนายจะถูกแสดงผ่านกราฟ 3D โดยจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปรที่แสดงค่าในแกน x (PR) และ y (C) ส่วนแกน z เป็นตัวแปรค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ (Exp) ที่ได้จากการทดลองหรือผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 31 โดยกำหนดค่าตัวแปร AC=570 สำหรับเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟ 3D

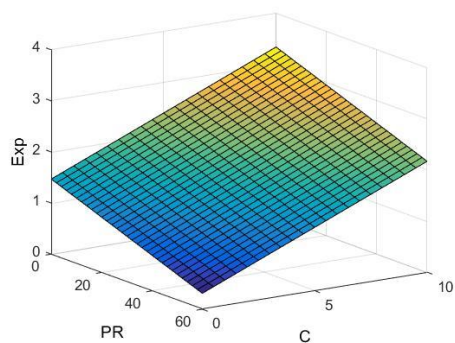
ภาพประกอบ 31 (ก)-(ฉ) แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการทำนายในแต่ละแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟ 3D พบว่าแบบจำลอง ANFIS ทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทางสถิติของแบบจำลอง ANFIS ที่มีผลการทำนายที่แม่นยำมากที่สุด

ตาราง 18 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยของแบบจำลองต่างๆ

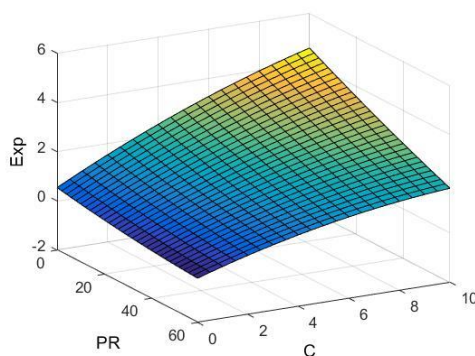
Model	Training data			Testing data		
	R^2	MAPE	RMSE	R^2	MAPE	RMSE
MLR	0.8472	6162.22	0.641	0.8493	6654.83	0.569
MSPR	0.9766	1641.83	0.259	0.9777	1469.86	0.225
ANN-1-hid-9-tan-lm-mse	0.9963	296.10	0.113	0.9950	193.66	0.117
ANN-2-hid-9-4-log-tan-lm-mse	0.9991	26.22	0.057	0.9987	22.74	0.057
ANFIS gbellmf Z=2	0.9995	15.50	0.040	0.9992	20.37	0.046



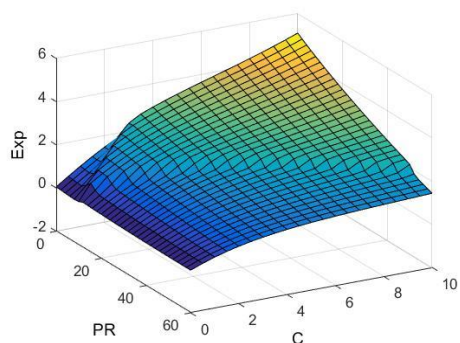
(ก) กราฟผลการทดลอง



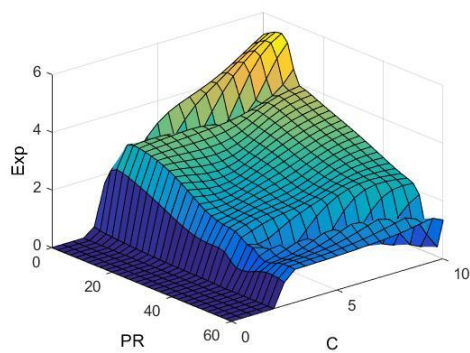
(ข) แบบจำลอง MLR



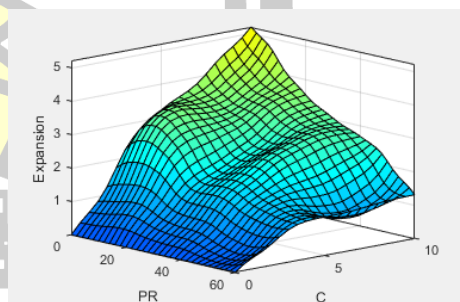
(ค) แบบจำลอง MSPR



(ง) แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน



(จ) แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน



(ฉ) แบบจำลอง ANFIS

ภาพประกอบ 31 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์
ผสมเถ้าลอยของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด (ก)-(ฉ)

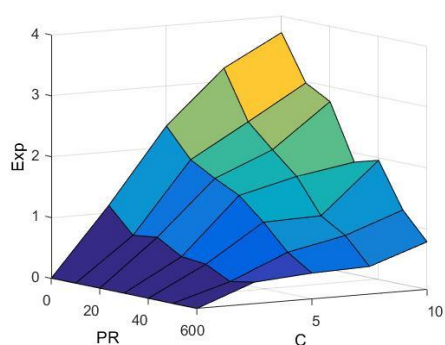
4.7.2 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ของมอร์ทัลผสมเถ้าลอยของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด

จากข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ของมอร์ทัลผสมเถ้าลอยดังตาราง 19 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองต่างๆ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง ANFIS ฟังก์ชัน trapmf ที่ค่า Z เท่ากับ 2 (ANFIS trapmf Z=2) ให้ค่าสถิติ R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบบจำลอง ANFIS มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งผลการทำนายจะถูกแสดงผ่านกราฟ 3D โดยจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปรที่แสดงค่าในแกน x (PR) และ y (C) ส่วนแกน z เป็นตัวแปรค่าการขยายตัวของมอร์ตา (Exp) ที่ได้จากการทดลองหรือผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 32 โดยกำหนดค่าตัวแปร AC=450 สำหรับเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟ 3D

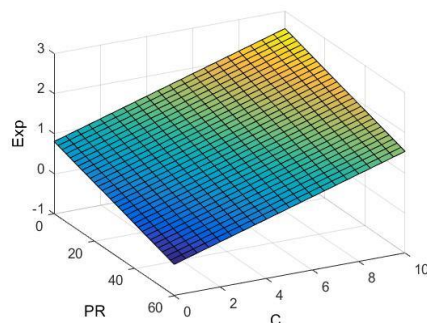
ภาพประกอบ 32 (ก)-(ฉ) แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการทำนายในแต่ละแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟ 3D พบว่าแบบจำลอง ANFIS ทำนายการขยายตัวของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ของมอร์ทัลผสมเถ้าลอย ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทางสถิติของแบบจำลอง ANFIS ที่มีผลการทำนายที่แม่นยำมากที่สุด

ตาราง 19 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ของมอร์ทัลผสมเถ้าลอยของแบบจำลองต่างๆ

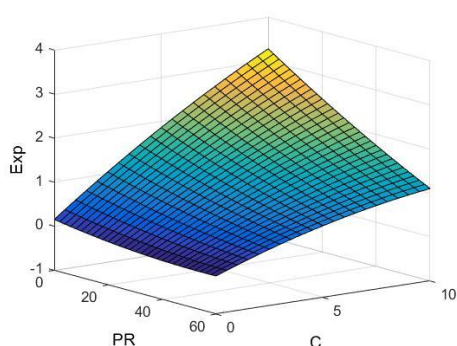
Model	Training data			Testing data		
	R^2	MAPE	RMSE	R^2	MAPE	RMSE
MLR	0.8518	6474.95	0.628	0.8407	6460.18	0.556
MSPR	0.9779	1763.21	0.251	0.9764	1412.17	0.218
ANN-1-hid-9-tan-br-mse	0.9966	281.33	0.098	0.9953	176.95	0.094
ANN-2-hid-9-4-log-tan-lm-sse	0.9991	43.53	0.050	0.9991	37.66	0.043
ANFIS trapmf Z=2	0.9993	24.23	0.045	0.9995	26.10	0.032



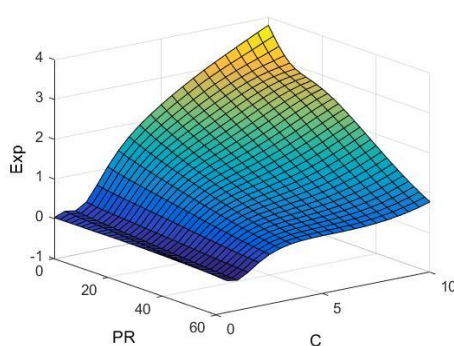
(ก) กราฟผลการทดลอง



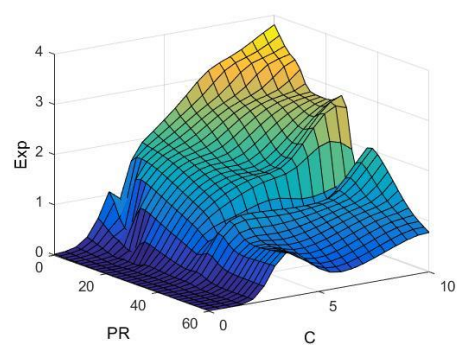
(ข) แบบจำลอง MLR



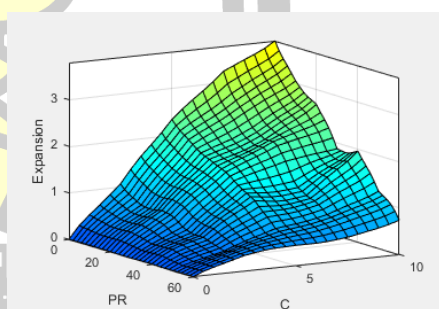
(ค) แบบจำลอง MSPR



(ง) แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน



(จ) แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน



(ฉ) แบบจำลอง ANFIS

ภาพประกอบ 32 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์
ผสมเถ้าลอยของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด (ก)-(ฉ)

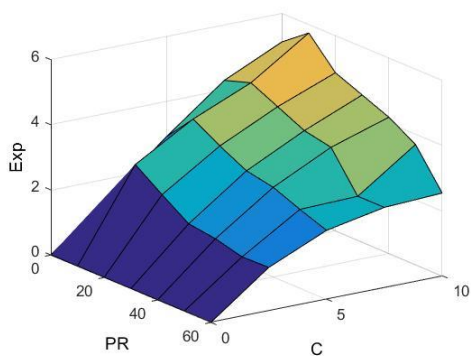
4.7.3 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด

จากข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าของแบบจำลองต่าง ๆ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง ANFIS ฟังก์ชัน gbellmf ที่ค่า Z เท่ากับ 2 (ANFIS gbellmf Z=2) ให้ค่าสถิติ R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบบจำลอง ANFIS มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งผลการทำนายจะถูกแสดงผ่านกราฟ 3D โดยจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปรที่แสดงค่าในแกน x (PR) และ y (C) ส่วนแกน z เป็นตัวแปรค่าการขยายตัวของมอร์ต้า (Exp) ที่ได้จากการทดลองหรือผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 33 โดยกำหนดค่าตัวแปร PS=22.2 AC=750 สำหรับเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟ 3D

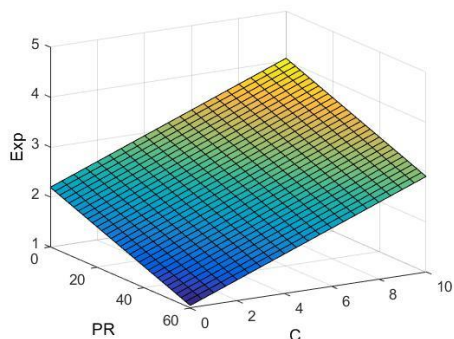
ภาพประกอบ 33 (ก)-(ฉ) แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการทำนายในแต่ละแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟ 3D พบว่าแบบจำลอง ANFIS ทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทางสถิติของแบบจำลอง ANFIS ที่มีผลการทำนายที่แม่นยำมากที่สุด

ตาราง 20 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าของแบบจำลองต่างๆ

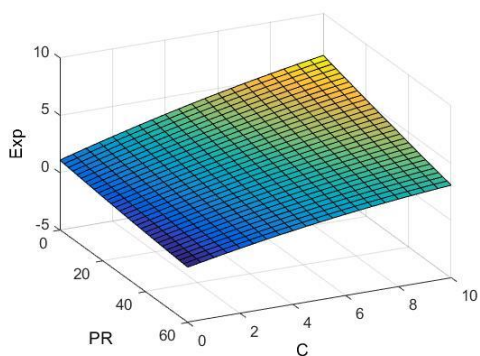
Model	Training data			Testing data		
	R^2	MAPE	RMSE	R^2	MAPE	RMSE
MLR	0.8560	6938.54	0.705	0.8510	7477.04	0.639
MSPR	0.9752	1784.82	0.285	0.9740	1549.17	0.272
ANN-1-hid-9-log-lm-mae	0.9954	409.03	0.128	0.9943	453.42	0.125
ANN-2-hid-9-4-log-tan-lm-mse	0.9988	118.10	0.066	0.9983	113.99	0.068
ANFIS gbellmf Z=2	0.9996	16.11	0.039	0.9992	22.01	0.047



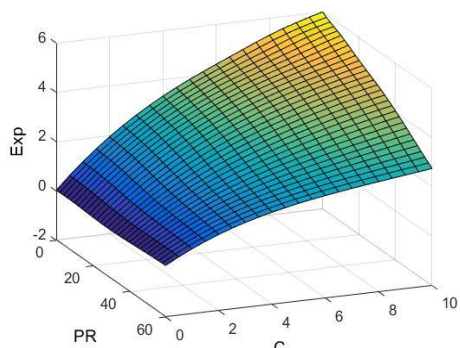
(ก) กราฟผลการทดลอง



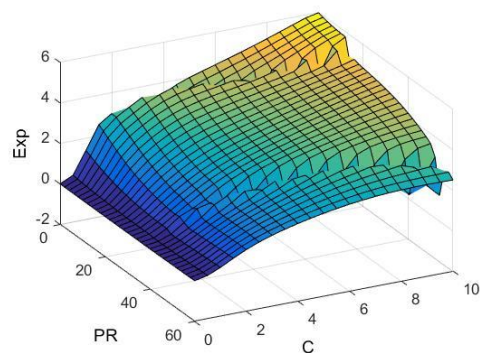
(ข) แบบจำลอง MLR



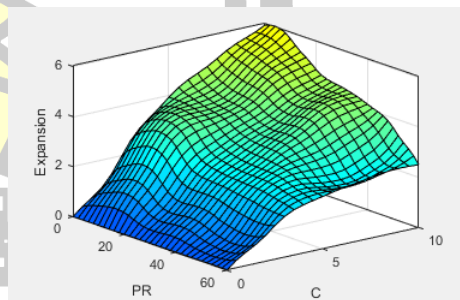
(ค) แบบจำลอง MSPR



(ง) แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน



(จ) แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน



(ฉ) แบบจำลอง ANFIS

ภาพประกอบ 33 กราฟ 3D ผลการทำการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแก้กันเทาของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด (ก)-(ฉ)

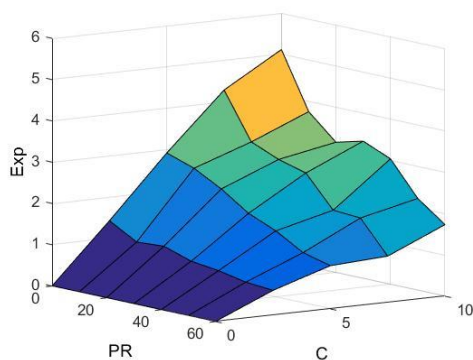
4.7.4 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสซึมซับของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด

จากข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสซึมซับของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอยดังตาราง 21 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองต่างๆ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง ANFIS ฟังก์ชัน gbellmf ที่ค่า Z เท่ากับ 2 (ANFIS gbellmf Z=2) ให้ค่าสถิติ R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบบจำลอง ANFIS มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งผลการทำนายจะถูกแสดงผ่านกราฟ 3D โดยจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปรที่แสดงค่าในแกน x (PR) และ y (C) ส่วนแกน z เป็นตัวแปรค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ท (Exp) ที่ได้จากการทดลองหรือผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 34 โดยกำหนดค่าตัวแปร PS=6.3 AC=660 สำหรับเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟ 3D

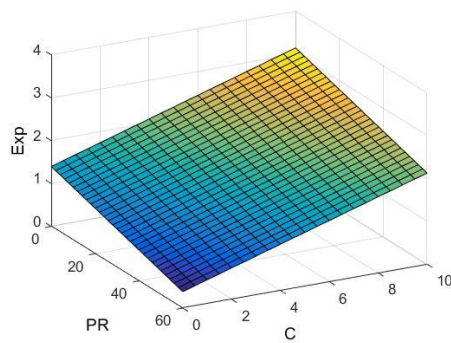
ภาพประกอบ 34 (ก)-(ฉ) แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการทำนายในแต่ละแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟ 3D พบว่าแบบจำลอง ANFIS ทำนายการขยายตัวของแมงกานีสซึมซับของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอย ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทางสถิติของแบบจำลอง ANFIS ที่มีผลการทำนายที่แม่นยำมากที่สุด

ตาราง 21 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการทำนายการขยายตัวของแมงกานีสซึมซับของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าของแบบจำลองต่างๆ

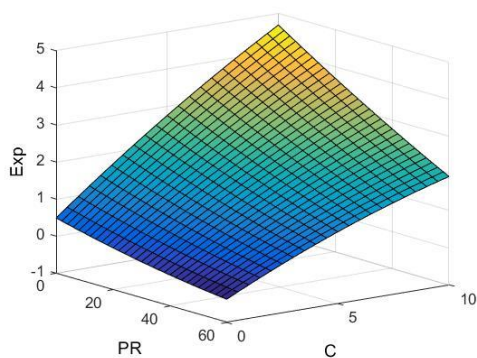
Model	Training data			Testing data		
	R^2	MAPE	RMSE	R^2	MAPE	RMSE
MLR	0.8472	6162.22	0.641	0.8493	6654.83	0.569
MSPR	0.9766	1641.83	0.259	0.9777	1469.86	0.225
ANN-1-hid-9-log-lm-mae	0.9960	451.62	0.107	0.9945	425.65	0.110
ANN-2-hid-9-4-log-tan-br-mae	0.9984	99.10	0.067	0.9976	105.10	0.072
ANFIS gbellmf Z=2	0.9994	16.16	0.042	0.9992	22.88	0.042



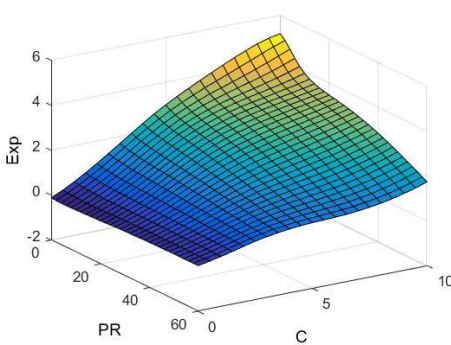
(ก) กราฟผลการทดลอง



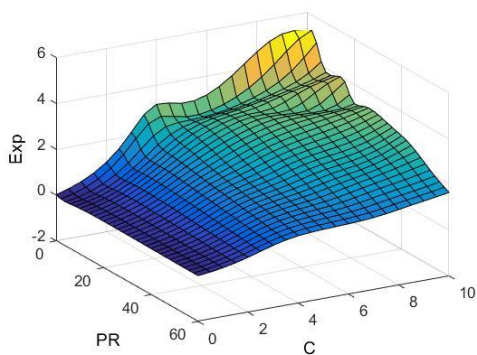
(ข) แบบจำลอง MLR



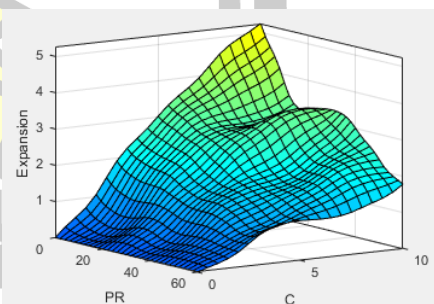
(ค) แบบจำลอง MSPR



(ง) แบบจำลอง ANN 1 ชั้นซ่อน



(จ) แบบจำลอง ANN 2 ชั้นซ่อน



(ฉ) แบบจำลอง ANFIS

ภาพประกอบ 34 กราฟ 3D ผลการทำนายการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแก้กันเทาของแบบจำลองที่ให้ค่าสถิติที่แม่นยำที่สุด (ก)-(ฉ)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองระบบอนุमानความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ในการทำนายการขยายตัวของแมกนีเซียมและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบาดละเอียด โดยตัวแปรร้อยละการแทนที่ (PR) มีค่าเท่ากับ 10 20 30 40 50 และ 60 ตัวแปรร้อยละความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต (C) มีค่าเท่ากับ 2.5 5 และ 10 ตัวแปรขนาดอนุภาค (PS) มีค่าเท่ากับ 6.3 และ 22.2 ไมครอน (ซึ่งใช้เฉพาะการทำนายการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบาดละเอียด) และตัวแปรอายุของมอร์ต้า (AC) มีค่าเท่ากับ 1-780 วัน ซึ่งในส่วนของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยโครงสร้างแบบจำลองชนิด 1 และ 2 ชั้นซ่อน ที่มีจำนวนนิวรอนเท่ากับ 4-9 นิวรอน ในแบบจำลองชนิด 1 ชั้นซ่อน สำหรับแบบจำลองชนิด 2 ชั้นซ่อน จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 เท่ากับ 8 และ 9 นิวรอน และมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 เท่ากับ 2 และ 4 นิวรอน ในส่วนของแบบจำลองระบบอนุमानความคลุมเครือแบบปรับตัวได้ มีการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมด 5 ฟังก์ชัน ประกอบด้วย ฟังก์ชันเกาส์เซียน (gaussmf) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (gbellmf) ฟังก์ชันตัวยูคว่ำ (pimf) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapmf) และฟังก์ชันสามเหลี่ยม (trimf) ซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การใช้เถ้าก้นเตาบาดละเอียดขนาดเล็ก (6.3 ไมครอน) และขนาดใหญ่ (22.2 ไมครอน) สามารถช่วยลดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตได้เช่นเดียวกับการใช้เถ้าลอย โดยเถ้าก้นเตาบาดละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถลดการขยายตัวได้มากกว่า

5.1.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองระบบอนุमानความคลุมเครือแบบปรับตัวได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายการขยายตัวของแมกนีเซียมและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบาดละเอียดได้อย่างดีละมีค่าความแม่นยำที่สูงมาก

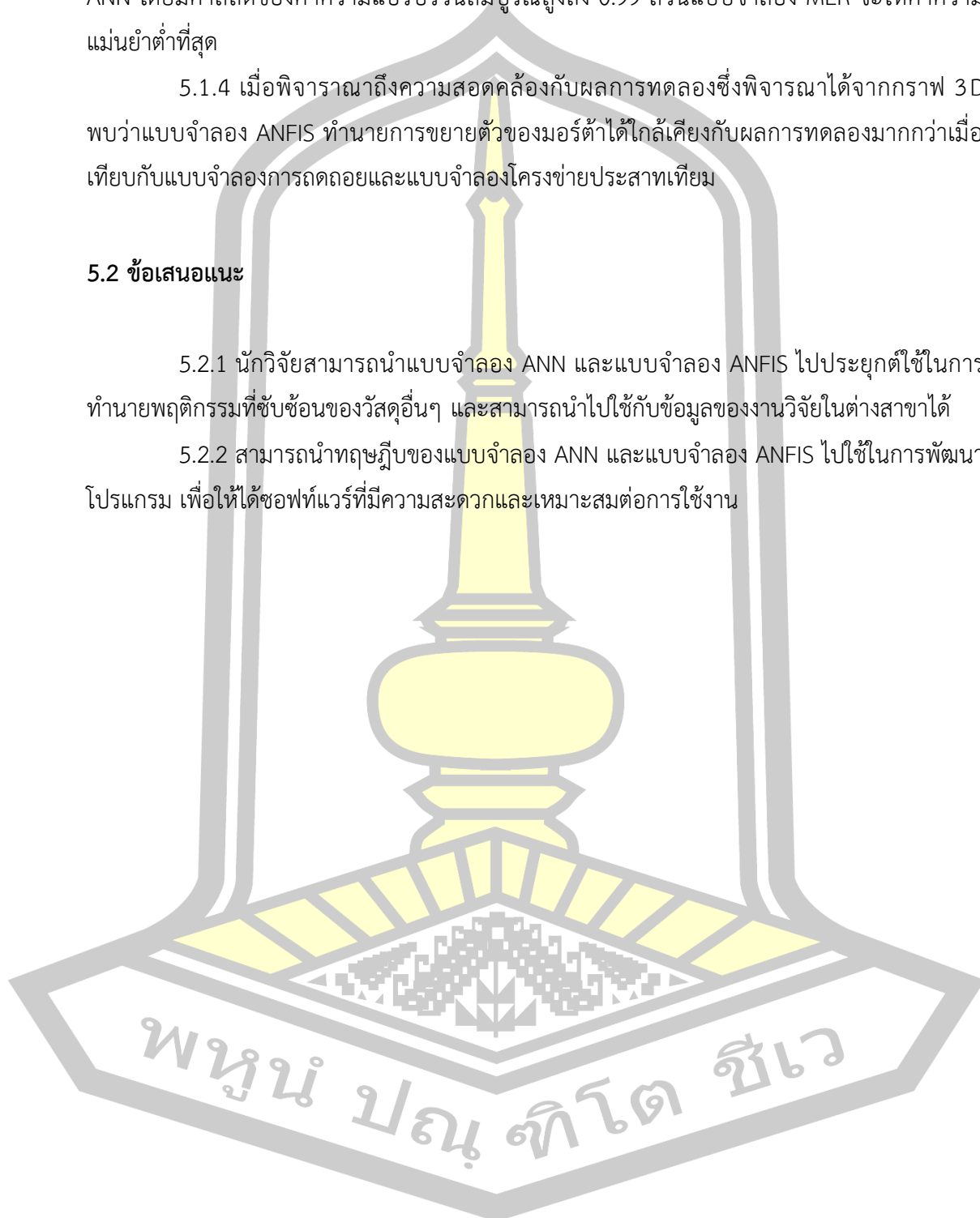
5.1.3 แบบจำลอง ANFIS มีผลการทำนายที่แม่นยำสูงที่สุดและใกล้เคียงกับแบบจำลอง ANN โดยมีค่าสถิติของค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์สูงถึง 0.99 ส่วนแบบจำลอง MLR จะให้ค่าความแม่นยำต่ำที่สุด

5.1.4 เมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งพิจารณาได้จากกราฟ 3D พบว่าแบบจำลอง ANFIS ทำนายการขยายตัวของมอร์ต้าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองการถดถอยและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นักวิจัยสามารถนำแบบจำลอง ANN และแบบจำลอง ANFIS ไปประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมที่ซับซ้อนของวัสดุอื่นๆ และสามารถนำไปใช้กับข้อมูลของงานวิจัยในต่างสาขาได้

5.2.2 สามารถนำทฤษฎีของแบบจำลอง ANN และแบบจำลอง ANFIS ไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรม เพื่อให้ได้ซอฟต์แวร์ที่มีความสะดวกและเหมาะสมต่อการใช้งาน



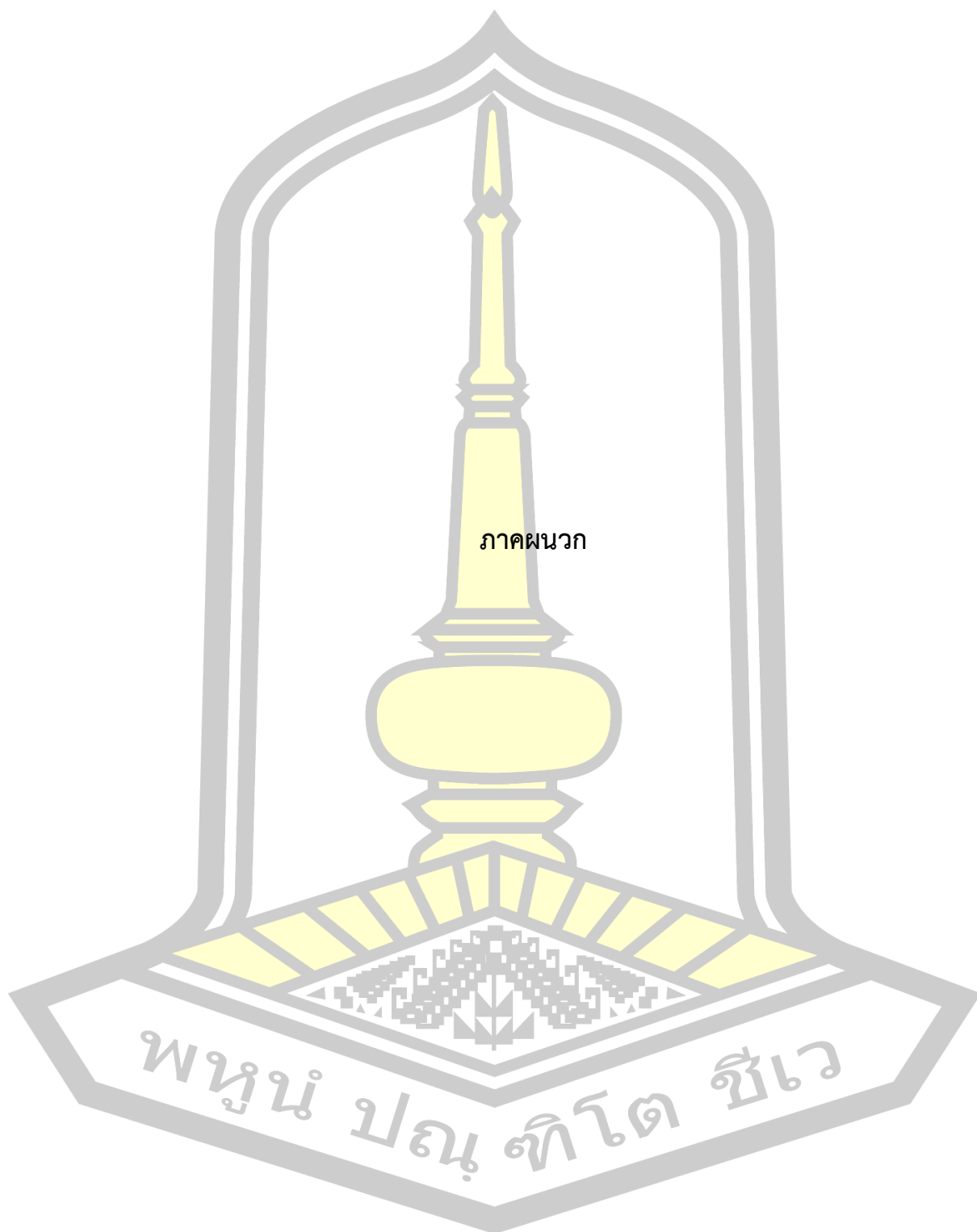
บรรณานุกรม

- Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., & Saadi, M. M. (1995). Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. *ACI Materials Journal*, 92(1), 15-24.
- American Society for Testing Materials. (2015). ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. In.
- Cheriaf, M., Rocha, J. C., & Pera, J. (1999). Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement and concrete research*, 29(9), 1387-1391.
- Cohen, M. D., & Mather, B. (1991). Sulfate attack on concrete: research needs. *Materials Journal*, 88(1), 62-69.
- Diab, A. M., Elyamany, H. E., Elmoaty, A. E. M. A., & Shalan, A. H. (2014). Prediction of concrete compressive strength due to long term sulfate attack using neural network. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 627-642.
- Haynes, H., O'Neill, R., & Mehta, P. K. (1996). Concrete deterioration from physical attack by salts. *Concrete International*, 18(1), 63-68.
- Hekal, E. E., Kishar, E., & Mostafa, H. (2002). Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1421-1427.
- Hime, W. G., & Mather, B. (1999). "Sulfate attack," or is it? *Cement and Concrete Research*, 29(5), 789-791.
- Hughes, D. (1985). Sulphate resistance of OPC, OPC/fly ash and SRPC pastes: pore structure and permeability. *Cement and Concrete Research*, 15(6), 1003-1012.
- Inthata, S., Kowtanapanich, W., & Cheerarot, R. (2013). Prediction of chloride permeability of concretes containing ground pozzolans by artificial neural networks. *Materials and structures*, 46(10), 1707-1721.
- Irassar, F., & Batic, O. (1989). Effects of low calcium fly ash on sulfate resistance of OPC cement. *Cement and Concrete Research*, 19(2), 194-202.
- Jaturapitakkul, C., & Cheerarot, R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanic

- material. *Journal of materials in civil engineering*, 15(1), 48-53.
- Kaewmanee, K., & Tangtermsirikul, S. (2006). *Use of bottom ash as a fine aggregate replacing material in concrete*, [in]. Paper presented at the Proceedings of the 2nd Annual Concrete Conference.
- Khatri, R., Sirivivatnanon, V., & Yang, J. (1997). Role of permeability in sulphate attack. *Cement and concrete research*, 27(8), 1179-1189.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., & Chutubtim, S. (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cement and concrete composites*, 23(4-5), 335-343.
- Kurama, H., & Kaya, M. (2008). Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Construction and building materials*, 22(9), 1922-1928.
- Lawrence, C. (1992). The influence of binder type on sulfate resistance. *Cement and Concrete Research*, 22(6), 1047-1058.
- Lea, F. M. (1940). The chemistry of cement and concrete.
- Mehta, P., & Gjörv, O. (1974). A new test for sulfate resistance of cements. *Journal of testing and evaluation*, 2(6), 510-515.
- Mehta, P., & Polivka, M. (1975). Sulfate Resistance of Expansive Cement Concretes. *Special Publication*, 47, 367-379.
- Nasser, K., & Lai, P. (1990). *Effect of Fly Ash on the Microstructure and Durability of Concrete*. Paper presented at the Serviceability and Durability of Construction Materials.
- Novak, G. A., & Colville, A. A. (1989). Efflorescent mineral assemblages associated with cracked and degraded residential concrete foundations in Southern California. *Cement and Concrete Research*, 19(1), 1-6.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M., Peris-Mora, E., & González-López, E. (1996). Mechanical treatment of fly ashes part II: Particle morphologies in ground fly ashes (GFA) and workability of GFA-cement mortars. *Cement and Concrete research*, 26(2), 225-235.
- Santhanam, M., Cohen, M., & Olek, J. (2006). Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(12), 2132-2137.

- Torii, K., & Kawamura, M. (1994). Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 24(2), 361-370.
- Torii, K., Taniguchi, K., & Kawamura, M. (1995). Sulfate resistance of high fly ash content concrete. *Cement and concrete research*, 25(4), 759-768.
- ไกรวุฒิ ดันติสุขารมย์ จตุพล ตั้งปภาศิต และเรืองรุชต์ ชีระโรจน์. (2549). ผลการอัดตัวของอนุภาคและอัตราการผลิตปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 17(1), 52 - 59.
- ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์. (2551). ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าก้นเตาโดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย. (วศ.ม. วิทยานิพนธ์), มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย.
- สมชาย อินทะตา และเรืองรุชต์ ชีระโรจน์. (2551). ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 19(2), 39 - 46.
- อ่อนทิวา ลาภบุญเรือง. (2552). ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด. (วศ.ม. วิทยานิพนธ์), มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.





ตาราง ก 1 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0135	0.0180	0.0110	0.0240	0.0020	0.0123	0.0224	0.0220	0.0365
14	-0.0010	0.0268	0.0220	0.0320	0.0855	0.0020	0.0180	0.0445	0.0578	0.0550
28	-0.0020	0.0300	0.0768	0.0570	0.0720	0.0010	0.0240	0.0668	0.0868	0.0780
60	0.0020	0.0731	0.1010	0.1240	0.1444	-0.0010	0.0550	0.0850	0.1575	0.1050
90	-0.0010	0.0972	0.2410	0.3410	0.3098	0.0000	0.1150	0.1210	0.1680	0.2633
120	0.0010	0.1450	0.3388	0.4668	0.5660	0.0010	0.1617	0.2947	0.2420	0.3210
150	0.0010	0.2396	0.5410	0.6296	0.8450	0.0010	0.1880	0.4550	0.3850	0.4580
180	0.0010	0.3362	0.7810	0.9420	1.1450	0.0030	0.3059	0.6320	0.5940	0.6840
210	0.0000	0.4291	0.9180	1.3480	1.3673	0.0010	0.4550	0.8480	0.7650	0.7320
240	-0.0010	0.4820	1.1870	1.4880	1.5740	0.0010	0.5189	0.9460	1.0240	0.8540
270	-0.0010	0.5470	1.4040	1.8740	1.8440	0.0020	0.8550	1.2110	1.4724	1.2450
300	0.0000	0.6780	1.5777	2.2570	2.4250	0.0010	1.1200	1.3726	1.5870	1.6540
330	0.0020	0.8440	1.8245	2.4450	2.8470	0.0020	1.2850	1.5873	1.7880	1.9320
360	0.0010	0.9540	1.9720	2.8008	3.3957	0.0030	1.4870	1.7683	1.9580	2.4550
390	0.0020	1.2440	2.2103	3.0459	3.5480	0.0040	1.5850	1.9230	2.2540	2.8440
420	0.0010	1.4320	2.3821	3.1140	3.9799	0.0050	1.6370	2.2540	2.3870	3.3829
450	0.0030	1.4870	2.5443	3.3240	4.3210	0.0030	1.7540	2.4560	2.4650	3.6132
480	0.0020	1.6470	2.8440	3.5440	4.4870	0.0020	1.8620	2.8770	2.6480	3.8265
510	0.0040	1.5780	2.8302	3.7540	4.7286	0.0040	1.9510	3.0210	2.9720	4.0193
540	0.0030	1.6840	2.9900	3.8740	4.9955	0.0030	2.0410	3.2110	3.3787	4.2462
570	0.0030	1.7320	3.2480	4.0140	5.2355	0.0020	2.0570	3.2940	3.5410	4.3220
600	0.0020	1.7440	3.4740	4.0320	5.3780	0.0040	2.1110	3.3250	3.6631	4.4550
630	0.0040	1.7890	3.5740	4.5432	5.5081	0.0030	2.2540	3.4240	3.7254	4.6220
660	0.0040	1.8740	3.6480	4.8510	5.7096	0.0030	2.3110	3.5410	3.7880	4.7880
690	0.0020	1.8395	3.7440	4.8341	5.7840	0.0030	2.3880	3.4820	3.8450	4.9817
720	0.0040	1.8850	3.8670	4.9535	5.8740	0.0040	2.4520	3.4550	3.9520	5.1047
750	0.0050	1.9239	3.9720	5.0559	5.9250	0.0050	2.5170	3.4590	4.1458	5.2103
780	0.0030	1.9798	3.9410	5.0140	5.9850	0.0040	2.5550	3.4560	4.2110	5.3616

ตาราง ก 1 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0020	0.0115	0.0196	0.0266	0.0309	-0.0010	0.0105	0.0185	0.0241	0.0288
14	0.0020	0.0228	0.0320	0.0529	0.0615	-0.0010	0.0209	0.0368	0.0479	0.0573
28	0.0010	0.0342	0.0480	0.0770	0.0924	-0.0020	0.0314	0.0553	0.0719	0.0859
60	-0.0010	0.0480	0.1059	0.0840	0.1250	-0.0010	0.0440	0.0770	0.0880	0.1150
90	-0.0020	0.0640	0.1409	0.1100	0.2230	-0.0010	0.0758	0.0850	0.1120	0.2076
120	0.0000	0.1510	0.1580	0.1420	0.3540	0.0000	0.1386	0.1050	0.1540	0.2870
150	0.0010	0.2036	0.2540	0.1850	0.4210	0.0010	0.1550	0.1890	0.2210	0.4250
180	0.0010	0.2857	0.4872	0.2890	0.6520	0.0010	0.1880	0.2560	0.3350	0.5890
210	0.0010	0.3648	0.6220	0.4250	0.7880	0.0020	0.2230	0.3250	0.4580	0.7750
240	0.0020	0.4210	0.7770	0.6850	0.8950	0.0030	0.2850	0.4230	0.6220	0.8570
270	0.0030	0.4880	0.9903	0.8420	1.2240	0.0030	0.3550	0.5410	0.8470	0.9230
300	0.0040	0.5950	1.1880	1.1540	1.5420	0.0040	0.4880	0.7250	1.0580	1.1500
330	0.0030	0.6780	1.2890	1.3358	1.8550	0.0040	0.5410	0.7880	1.2580	1.3850
360	0.0050	0.8440	1.4950	1.5540	2.2520	0.0030	0.6220	0.8850	1.5540	1.5850
390	0.0050	0.8990	1.6798	1.7880	2.5780	0.0040	0.7450	0.9580	1.7780	1.8570
420	0.0060	0.9780	1.7520	1.9320	2.7540	0.0050	0.8220	1.1250	1.9520	2.1140
450	0.0050	1.1341	1.8620	2.2510	2.8950	0.0060	0.9550	1.3560	2.0580	2.3550
480	0.0050	1.2410	1.9620	2.5850	3.0540	0.0050	1.0220	1.5840	2.1140	2.5440
510	0.0070	1.3650	2.0880	2.7250	3.2110	0.0060	1.1150	1.7750	2.3580	2.7450
540	0.0050	1.4850	2.2724	2.9140	3.3210	0.0060	1.1180	1.9510	2.5540	2.8650
570	0.0040	1.5840	2.4450	3.1250	3.5220	0.0050	1.1850	2.1150	2.7410	2.9560
600	0.0040	1.6670	2.5870	3.2550	3.7110	0.0060	1.2250	2.3340	2.8570	3.2240
630	0.0040	1.7330	2.6540	3.4074	3.8640	0.0070	1.2940	2.4410	3.0894	3.4420
660	0.0050	1.7450	2.8250	3.5321	4.1109	0.0050	1.3978	2.5120	3.2024	3.6150
690	0.0050	1.8560	2.8650	3.6256	4.2198	0.0070	1.4020	2.5257	3.2872	3.8520
720	0.0060	1.9210	2.9810	3.7151	4.3240	0.0060	1.4550	2.5881	3.3684	4.0237
750	0.0040	1.9880	3.0220	3.7919	4.4134	0.0050	1.4880	2.6416	3.4380	4.1069
780	0.0050	2.0540	3.1400	3.9021	4.5416	0.0050	1.5443	2.7183	3.5379	4.2262

ตาราง ก 1 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0097	0.0175	0.0230	0.0266	0.0010	0.0084	0.0160	0.0220	0.0266
14	0.0010	0.0193	0.0348	0.0330	0.0530	-0.0010	0.0166	0.0250	0.0437	0.0530
28	0.0000	0.0250	0.0522	0.0580	0.0650	-0.0010	0.0250	0.0360	0.0656	0.0795
60	-0.0010	0.0450	0.0770	0.0770	0.0940	-0.0020	0.0330	0.0450	0.1191	0.0940
90	-0.0010	0.0550	0.0820	0.0950	0.1420	-0.0020	0.0480	0.0770	0.1584	0.1250
120	-0.0010	0.0780	0.0950	0.1120	0.1880	0.0000	0.0550	0.0950	0.2894	0.1580
150	0.0010	0.0880	0.1180	0.1880	0.2240	0.0010	0.0840	0.1050	0.3240	0.2040
180	0.0020	0.1050	0.1830	0.2570	0.2840	-0.0010	0.1020	0.1680	0.4410	0.2850
210	0.0020	0.1270	0.2450	0.3540	0.3570	0.0000	0.1220	0.2110	0.4850	0.3660
240	0.0010	0.1740	0.3040	0.4650	0.4480	0.0010	0.1850	0.2480	0.5280	0.4950
270	0.0030	0.2240	0.3890	0.5720	0.5480	0.0020	0.2240	0.2950	0.5780	0.5870
300	0.0030	0.2780	0.5250	0.6880	0.6850	0.0030	0.2580	0.3520	0.6520	0.7050
330	0.0020	0.3240	0.7280	0.8620	0.8540	0.0020	0.2950	0.3950	0.7410	0.8520
360	0.0040	0.3580	0.8640	1.0240	1.1570	0.0040	0.3340	0.5210	0.8240	0.9680
390	0.0040	0.4410	1.0540	1.2280	1.3650	0.0050	0.3950	0.6720	0.8870	1.0980
420	0.0050	0.5520	1.1850	1.4850	1.5780	0.0030	0.4420	0.7540	0.9250	1.2210
450	0.0050	0.6080	1.3250	1.6520	1.7880	0.0030	0.4880	0.8540	0.9850	1.4420
480	0.0030	0.7140	1.4890	1.8850	1.9870	0.0040	0.5510	0.9280	1.0860	1.6630
510	0.0060	0.7890	1.6520	2.0450	2.2570	0.0050	0.5930	1.0410	1.1220	1.8250
540	0.0030	0.9250	1.7490	2.2480	2.4480	0.0050	0.6520	1.1850	1.1930	1.9220
570	0.0050	1.1831	1.9550	2.4420	2.6850	0.0060	0.7110	1.3250	1.2580	2.1150
600	0.0060	1.2239	2.1280	2.7210	2.8950	0.0040	0.8210	1.5210	1.2960	2.3320
630	0.0050	1.2447	2.2418	2.9531	3.1480	0.0030	0.9220	1.6880	1.3580	2.5540
660	0.0060	1.2903	2.3239	3.0611	3.4210	0.0050	0.9580	1.7580	1.5580	2.7820
690	0.0050	1.3245	2.3854	3.1422	3.6337	0.0060	1.0080	1.9350	1.8520	2.9661
720	0.0050	1.3572	2.4443	3.2198	3.7235	0.0060	1.0860	2.1150	2.0780	3.1210
750	0.0060	1.3852	2.4948	3.2863	3.8004	0.0070	1.1928	2.2747	2.3580	3.3520
780	0.0060	1.4255	2.5673	3.3818	3.9108	0.0060	1.2275	2.3408	2.6870	3.5240

ตาราง ก 1 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0085	0.0154	0.0206	0.0228					
14	0.0010	0.0120	0.0210	0.0350	0.0453					
28	0.0000	0.0254	0.0320	0.0450	0.0680					
60	-0.0010	0.0280	0.0836	0.0680	0.0780					
90	-0.0010	0.0350	0.0880	0.0880	0.1120					
120	0.0000	0.0480	0.1020	0.1210	0.1850					
150	0.0000	0.0850	0.1580	0.1880	0.2250					
180	0.0010	0.1010	0.1990	0.2350	0.2840					
210	0.0010	0.1280	0.2660	0.2950	0.3610					
240	0.0010	0.1580	0.3110	0.3580	0.4180					
270	0.0030	0.1920	0.3650	0.4120	0.4720					
300	0.0020	0.2540	0.4120	0.4850	0.5210					
330	0.0020	0.2980	0.4660	0.5520	0.6250					
360	0.0030	0.3250	0.5220	0.6120	0.6880					
390	0.0030	0.3850	0.5840	0.6880	0.7440					
420	0.0030	0.4210	0.6520	0.7480	0.7820					
450	0.0040	0.4880	0.7750	0.8250	0.8540					
480	0.0040	0.5910	0.8640	0.9110	0.9710					
510	0.0030	0.6620	0.9710	1.0040	1.0850					
540	0.0050	0.7410	1.0880	1.1250	1.1840					
570	0.0040	0.7950	1.1740	1.3220	1.3840					
600	0.0040	0.8850	1.3010	1.4210	1.5240					
630	0.0050	1.0892	1.3880	1.5220	1.7420					
660	0.0050	1.1290	1.4820	1.7440	1.9220					
690	0.0040	1.1589	1.6220	1.9220	2.0180					
720	0.0050	1.1875	1.7510	2.0180	2.3150					
750	0.0040	1.2121	1.9210	2.2350	2.5580					
780	0.0060	1.2473	2.1150	2.4150	2.8590					

ตาราง ก 2 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0100	0.0220	0.0210	0.0280	0.0020	0.0084	0.0180	0.0245	0.0240
14	-0.0010	0.0180	0.0180	0.0320	0.0749	0.0020	0.0167	0.0220	0.0350	0.0440
28	-0.0020	0.0281	0.0420	0.0936	0.1124	0.0010	0.0250	0.0480	0.0580	0.0780
60	0.0020	0.0280	0.1190	0.1400	0.1440	-0.0010	0.0320	0.0570	0.0870	0.1120
90	-0.0010	0.0678	0.1583	0.2261	0.2714	0.0000	0.0480	0.1298	0.1250	0.2171
120	0.0010	0.0780	0.1680	0.3210	0.2470	0.0010	0.0550	0.2371	0.1880	0.2870
150	0.0010	0.1671	0.3900	0.5571	0.6686	0.0010	0.1120	0.3570	0.2540	0.4240
180	0.0010	0.1800	0.4110	0.8770	1.2470	0.0030	0.1480	0.4450	0.6098	0.7505
210	0.0000	0.2440	0.6986	0.9980	1.4870	0.0010	0.1580	0.5210	0.8950	0.9581
240	-0.0010	0.3200	0.7260	1.1580	1.5912	0.0010	0.1890	0.7611	1.1550	1.2730
270	-0.0010	0.4767	1.1123	1.5890	1.9068	0.0020	0.2220	0.8450	1.2394	1.3440
300	0.0000	0.5772	1.4450	1.9240	2.2540	0.0010	0.2870	0.9840	1.4840	1.7230
330	0.0020	0.7550	1.5575	2.5770	2.4880	0.0020	0.3540	1.2772	1.7355	2.1360
360	0.0010	0.7850	1.8740	2.7880	2.6870	0.0030	0.4250	1.4227	1.9333	2.4850
390	0.0020	0.8087	1.8869	2.9880	2.9840	0.0040	0.5470	1.6870	2.1025	2.6540
420	0.0010	0.8220	2.2450	3.1110	3.2570	0.0050	0.6540	1.7850	2.2659	2.8650
450	0.0030	1.1210	2.3470	3.2180	3.7233	0.0030	0.7123	1.8760	2.4201	2.9786
480	0.0020	1.1540	2.5000	3.3480	4.2110	0.0020	0.8740	2.0400	2.7320	3.2440
510	0.0040	1.3480	2.4161	3.4515	4.4520	0.0040	0.9216	2.2120	2.7980	3.3134
540	0.0030	1.2870	2.6510	3.6464	4.8750	0.0030	0.9736	2.3440	2.8442	3.4550
570	0.0030	1.3580	2.7850	3.8215	4.7840	0.0020	1.0203	2.4480	2.9808	3.5440
600	0.0020	1.3680	2.7673	4.2500	4.9880	0.0040	1.0555	2.5780	3.1440	3.6880
630	0.0040	1.4550	2.8144	4.0205	5.0240	0.0030	1.0735	2.6740	3.2440	3.8597
660	0.0040	1.4280	2.9173	4.2880	5.1140	0.0030	1.1128	2.8320	3.3410	3.9520
690	0.0020	1.5440	3.1200	4.2780	5.2780	0.0030	1.1422	2.8880	3.3980	4.1069
720	0.0040	1.5320	3.3200	4.4450	5.2980	0.0040	1.1704	2.9210	3.4192	4.2083
750	0.0050	1.6410	3.4100	4.4743	5.3691	0.0050	1.1946	2.9320	3.4899	4.4210
780	0.0030	1.6380	3.5400	4.7777	5.5251	0.0040	1.2293	2.9880	3.5913	4.4580

ตาราง ก 2 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0020	0.0077	0.0167	0.0090	0.0256	-0.0010	0.0220	0.0149	0.0204	0.0264
14	0.0020	0.0110	0.0250	0.0210	0.0509	-0.0010	0.0138	0.0297	0.0405	0.0330
28	0.0010	0.0180	0.0498	0.0480	0.0764	-0.0020	0.0208	0.0446	0.0609	0.0350
60	-0.0010	0.0350	0.0680	0.0750	0.0980	-0.0010	0.0410	0.0540	0.0780	0.0570
90	-0.0020	0.0430	0.0840	0.0990	0.1520	-0.0010	0.0740	0.0660	0.0950	0.0770
120	0.0000	0.1016	0.1150	0.1280	0.2150	0.0000	0.0917	0.1010	0.1250	0.1050
150	0.0010	0.1550	0.2964	0.2250	0.3240	0.0010	0.1140	0.1250	0.1430	0.1280
180	0.0010	0.2210	0.4159	0.3450	0.5980	0.0010	0.1280	0.1540	0.2440	0.2580
210	0.0010	0.2840	0.6240	0.5420	0.8420	0.0020	0.1550	0.1880	0.3210	0.3550
240	0.0020	0.3262	0.7540	0.6580	1.0820	0.0030	0.1750	0.2780	0.3540	0.4480
270	0.0030	0.3420	0.8453	0.8220	1.6800	0.0030	0.1890	0.3650	0.4870	0.5650
300	0.0040	0.4280	1.0236	1.1220	1.6780	0.0040	0.2220	0.5420	0.5520	0.7740
330	0.0030	0.4750	1.2550	1.1890	1.8156	0.0040	0.2670	0.7880	0.6870	0.8550
360	0.0050	0.5140	1.3186	1.4770	1.9820	0.0030	0.3420	0.9550	0.8950	1.1250
390	0.0050	0.6631	1.3840	1.6250	2.1150	0.0040	0.4110	1.1220	1.2540	1.4550
420	0.0060	0.7146	1.4880	1.8540	2.4440	0.0050	0.4860	1.3220	1.4880	1.6330
450	0.0050	0.7633	1.6507	2.0440	2.7560	0.0060	0.5280	1.4550	1.6880	1.8450
480	0.0050	0.8420	1.8520	2.2630	2.8950	0.0050	0.5940	1.5220	1.9450	2.1110
510	0.0070	0.8850	1.9880	2.4506	3.0440	0.0060	0.6440	1.5960	2.1440	2.4320
540	0.0050	0.8970	2.0040	2.5889	3.1050	0.0060	0.7540	1.6440	2.2990	2.7410
570	0.0040	0.9401	2.1540	2.7133	3.1183	0.0050	0.8484	1.6880	2.4840	2.9880
600	0.0040	0.9725	2.1031	2.8068	3.1550	0.0060	0.8776	1.7550	2.6480	3.1540
630	0.0040	1.0880	2.3410	2.9770	3.2807	0.0070	0.8926	1.8320	2.7740	3.3772
660	0.0050	1.1550	2.4550	3.0450	3.3220	0.0050	0.9252	1.9838	2.8520	3.5008
690	0.0050	1.2110	2.5520	3.2140	3.3550	0.0070	0.9497	2.1150	2.9540	3.5935
720	0.0060	1.2280	2.6410	3.3690	3.4210	0.0060	0.9732	2.2540	3.0050	3.6822
750	0.0040	1.3220	2.6880	3.4880	3.4620	0.0050	0.9933	2.3440	3.1520	3.7584
780	0.0050	1.3680	2.7440	3.6540	3.5240	0.0050	1.0221	2.4440	3.2250	3.8676

ตาราง ก 2 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0064	0.0136	0.0188	0.0233	0.0010	0.0058	0.0136	0.0195	0.0233
14	0.0010	0.0127	0.0180	0.0374	0.0464	-0.0010	0.0116	0.0271	0.0280	0.0464
28	0.0000	0.0191	0.0350	0.0562	0.0697	-0.0010	0.0174	0.0406	0.0470	0.0697
60	-0.0010	0.0180	0.0738	0.0660	0.0880	-0.0020	0.0180	0.0580	0.0870	0.1265
90	-0.0010	0.0350	0.0981	0.0870	0.1280	-0.0020	0.0280	0.0750	0.1060	0.1682
120	-0.0010	0.0590	0.1793	0.1100	0.1680	0.0000	0.0350	0.0880	0.1570	0.2070
150	0.0010	0.0780	0.2418	0.1450	0.1980	0.0010	0.0470	0.1020	0.1840	0.2540
180	0.0020	0.0880	0.2840	0.1860	0.2570	-0.0010	0.0580	0.1480	0.2530	0.2990
210	0.0020	0.1050	0.3650	0.2580	0.3770	0.0000	0.0680	0.1880	0.2870	0.3520
240	0.0010	0.1180	0.4850	0.3880	0.5740	0.0010	0.0770	0.2540	0.3240	0.4120
270	0.0030	0.1580	0.5620	0.4870	0.7750	0.0020	0.0840	0.3250	0.3860	0.4850
300	0.0030	0.1890	0.6840	0.5580	0.9650	0.0030	0.1040	0.3850	0.4690	0.5560
330	0.0020	0.2180	0.7750	0.6980	1.1570	0.0020	0.1150	0.4420	0.5280	0.6580
360	0.0040	0.2980	0.8860	0.7850	1.3440	0.0040	0.1540	0.4880	0.5980	0.7820
390	0.0040	0.3250	0.9670	0.8890	1.5870	0.0050	0.1870	0.5820	0.7090	0.9520
420	0.0050	0.3780	1.0250	0.9950	1.7410	0.0030	0.2140	0.6280	0.7850	1.0250
450	0.0050	0.4870	1.0980	1.1250	1.9570	0.0030	0.2840	0.6880	0.8840	1.2250
480	0.0030	0.5540	1.1960	1.2280	2.1450	0.0040	0.3540	0.7580	0.9860	1.4230
510	0.0060	0.6030	1.2670	1.4410	2.3340	0.0050	0.4110	0.8210	1.0760	1.5520
540	0.0030	0.6960	1.3740	1.5580	2.5410	0.0050	0.4850	0.8860	1.2210	1.7850
570	0.0050	0.7796	1.4860	1.7620	2.7740	0.0060	0.5280	0.9520	1.4420	1.9540
600	0.0060	0.8065	1.5380	1.8560	2.9412	0.0040	0.5940	1.0520	1.6620	2.1250
630	0.0050	0.8202	1.6060	1.9680	3.0410	0.0030	0.6540	1.1780	1.8520	2.4420
660	0.0060	0.8350	1.6880	2.0540	3.2010	0.0050	0.6930	1.2840	2.0050	2.6620
690	0.0050	0.8590	1.7050	2.1470	3.2810	0.0060	0.7250	1.3680	2.1980	2.7830
720	0.0050	0.8943	1.7750	2.2450	3.3220	0.0060	0.7950	1.4780	2.2770	2.9550
750	0.0060	0.9127	1.8280	2.3310	3.4580	0.0070	0.8322	1.6850	2.3960	3.1840
780	0.0060	0.9220	1.8890	2.4420	3.5260	0.0060	0.8564	1.7780	2.5770	3.4256

ตาราง ก 2 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0056	0.0121	0.0160	0.0196					
14	0.0010	0.0112	0.0240	0.0250	0.0330					
28	0.0000	0.0169	0.0360	0.0340	0.0584					
60	-0.0010	0.0210	0.0480	0.0420	0.0770					
90	-0.0010	0.0280	0.0570	0.0740	0.0960					
120	0.0000	0.0320	0.0720	0.0920	0.1240					
150	0.0000	0.0380	0.0850	0.1120	0.1680					
180	0.0010	0.0450	0.1020	0.1580	0.1960					
210	0.0010	0.0580	0.1240	0.1950	0.2380					
240	0.0010	0.0740	0.1510	0.2210	0.2940					
270	0.0030	0.0950	0.1820	0.2580	0.3520					
300	0.0020	0.1120	0.2210	0.2850	0.4120					
330	0.0020	0.1580	0.2680	0.3210	0.4850					
360	0.0030	0.1980	0.2990	0.3520	0.5620					
390	0.0030	0.2580	0.3540	0.3880	0.6350					
420	0.0030	0.3020	0.3880	0.4210	0.6960					
450	0.0040	0.3580	0.4280	0.4580	0.7840					
480	0.0040	0.3950	0.4950	0.5250	0.8520					
510	0.0030	0.4280	0.5850	0.6722	0.9240					
540	0.0050	0.4850	0.6880	0.7780	1.1580					
570	0.0040	0.5210	0.8050	0.8860	1.3350					
600	0.0040	0.5580	0.9120	0.9540	1.5280					
630	0.0050	0.5980	0.9940	1.0580	1.7410					
660	0.0050	0.6350	1.1020	1.1840	1.8250					
690	0.0040	0.6870	1.2250	1.3250	1.9660					
720	0.0050	0.7520	1.3480	1.5520	2.2140					
750	0.0040	0.7920	1.4580	1.7710	2.4410					
780	0.0060	0.8288	1.6280	1.9330	2.6650					

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0135	0.0180	0.0110	0.0240	0.0020	0.0117	0.0213	0.0209	0.0347
14	-0.0010	0.0268	0.0220	0.0320	0.0855	0.0020	0.0171	0.0423	0.0549	0.0523
28	-0.0020	0.0300	0.0768	0.0570	0.0720	0.0010	0.0228	0.0635	0.0824	0.0741
60	0.0020	0.0731	0.1010	0.1240	0.1444	-0.0010	0.0523	0.0808	0.1496	0.0998
90	-0.0010	0.0972	0.2410	0.3410	0.3098	-0.0020	0.0820	0.1150	0.1596	0.2502
120	0.0010	0.1450	0.3388	0.4668	0.5660	0.0000	0.1120	0.2800	0.2299	0.3050
150	0.0010	0.2396	0.5410	0.6296	0.8450	0.0010	0.1540	0.4323	0.3658	0.4351
180	0.0010	0.3362	0.7810	0.9420	1.1450	0.0010	0.2250	0.6004	0.5643	0.6498
210	0.0000	0.4291	0.9180	1.3480	1.3673	0.0010	0.2850	0.8056	0.7268	0.6954
240	-0.0010	0.4820	1.1870	1.4880	1.5740	0.0020	0.3510	0.8987	0.9728	0.8113
270	-0.0010	0.5470	1.4040	1.8740	1.8440	0.0030	0.5210	1.1505	1.3987	1.1828
300	0.0000	0.6780	1.5777	2.2570	2.4250	0.0040	0.7450	1.3040	1.5077	1.3250
330	0.0020	0.8440	1.8245	2.4450	2.8470	0.0030	0.8540	1.5079	1.6986	1.4890
360	0.0010	0.9540	1.9720	2.8008	3.3957	0.0050	0.9520	1.6798	1.8601	1.8550
390	0.0020	1.2440	2.2103	3.0459	3.5480	0.0050	1.1250	1.8268	2.1413	2.1780
420	0.0010	1.4320	2.3821	3.1140	3.9799	0.0060	1.2540	2.1413	2.2677	2.4550
450	0.0030	1.4870	2.5443	3.3240	4.3210	0.0050	1.3520	2.3332	2.3418	2.7320
480	0.0020	1.6470	2.8440	3.5440	4.4870	0.0050	1.5220	2.7332	2.5156	3.0250
510	0.0040	1.5780	2.8302	3.7540	4.7286	0.0070	1.6280	2.8700	2.8234	3.3510
540	0.0030	1.6840	2.9900	3.8740	4.9955	0.0050	1.8440	3.0505	3.2098	3.4520
570	0.0030	1.7320	3.2480	4.0140	5.2355	0.0040	1.9542	3.1293	3.3640	3.6520
600	0.0020	1.7440	3.4740	4.0320	5.3780	0.0040	2.0055	3.1588	3.4799	3.9650
630	0.0040	1.7890	3.5740	4.5432	5.5081	0.0040	2.1413	3.2528	3.5391	4.1110
660	0.0040	1.8740	3.6480	4.8510	5.7096	0.0050	2.1955	3.3640	3.5986	4.3210
690	0.0020	1.8395	3.7440	4.8341	5.7840	0.0050	2.2686	3.3079	3.6528	4.4520
720	0.0040	1.8850	3.8670	4.9535	5.8740	0.0060	2.3294	3.2823	3.7544	4.6350
750	0.0050	1.9239	3.9720	5.0559	5.9250	0.0040	2.3912	3.2861	3.9385	4.7620
780	0.0030	1.9798	3.9410	5.0140	5.9850	0.0050	2.4273	3.2832	4.0005	4.8880

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age(day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micon									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0109	0.0186	0.0253	0.0294	0.0010	0.0100	0.0176	0.0229	0.0274
14	-0.0010	0.0217	0.0304	0.0502	0.0585	0.0010	0.0199	0.0350	0.0455	0.0544
28	-0.0010	0.0325	0.0456	0.0732	0.0877	0.0000	0.0298	0.0525	0.0683	0.0816
60	-0.0020	0.0456	0.1006	0.0798	0.1188	-0.0010	0.0418	0.0732	0.0836	0.1093
90	-0.0020	0.0608	0.1339	0.1045	0.2119	-0.0010	0.0721	0.0808	0.1064	0.1972
120	0.0000	0.1434	0.1501	0.1349	0.2890	0.0000	0.1316	0.0998	0.1463	0.2727
150	0.0010	0.1934	0.2413	0.1758	0.3020	0.0000	0.1473	0.1796	0.2100	0.4038
180	-0.0010	0.2714	0.4628	0.2746	0.3580	0.0010	0.1786	0.2432	0.3183	0.5596
210	0.0000	0.3465	0.5909	0.4038	0.4210	0.0010	0.2119	0.3088	0.4351	0.6320
240	0.0010	0.4000	0.7382	0.6508	0.5220	0.0010	0.2708	0.4019	0.5909	0.7410
270	0.0020	0.4636	0.9408	0.7999	0.8520	0.0030	0.3373	0.5140	0.8047	0.8769
300	0.0030	0.5653	1.1286	1.0963	1.1250	0.0020	0.4636	0.6888	1.0051	0.9580
330	0.0020	0.6441	1.2246	1.2690	1.5640	0.0020	0.5140	0.7486	1.1951	1.1250
360	0.0040	0.8018	1.4203	1.4763	1.8540	0.0030	0.5909	0.8408	1.4763	1.2860
390	0.0050	0.8541	1.5958	1.6986	2.2250	0.0030	0.7078	0.9101	1.6891	1.4420
420	0.0030	0.9291	1.6644	1.8354	2.6163	0.0030	0.7809	1.0688	1.8544	1.7850
450	0.0030	1.0774	1.7689	2.1385	2.7503	0.0040	0.9073	1.2882	1.9551	2.1370
480	0.0040	1.1790	1.8639	2.4558	2.9013	0.0040	0.9709	1.5048	2.0083	2.4168
510	0.0050	1.2968	1.9836	2.5888	3.0505	0.0030	1.0593	1.6863	2.2401	2.6078
540	0.0050	1.4108	2.1588	2.7683	3.1550	0.0050	1.0621	1.8535	2.4263	2.7218
570	0.0060	1.5048	2.3228	2.9688	3.3459	0.0040	1.1258	2.0093	2.6040	2.8082
600	0.0040	1.5837	2.4577	3.0923	3.5255	0.0040	1.1638	2.2173	2.7142	3.0628
630	0.0030	1.6464	2.5213	3.2370	3.6708	0.0050	1.2293	2.3190	2.9349	3.2699
660	0.0050	1.6578	2.6838	3.3555	3.7540	0.0050	1.3279	2.3864	3.0423	3.4343
690	0.0060	1.7632	2.7218	3.4443	3.8550	0.0040	1.3319	2.3994	3.1229	3.6594
720	0.0060	1.8250	2.8320	3.5294	3.9820	0.0050	1.3823	2.4587	3.2000	3.8225
750	0.0070	1.8886	2.8709	3.6023	4.1927	0.0040	1.4136	2.5095	3.2661	3.9016
780	0.0060	1.9513	2.9830	3.7070	4.2520	0.0060	1.4671	2.5824	3.3610	4.0149

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0020	0.0092	0.0166	0.0219	0.0253	0.0010	0.0079	0.0152	0.0209	0.0253
14	0.0020	0.0183	0.0330	0.0314	0.0503	0.0010	0.0158	0.0238	0.0415	0.0503
28	0.0010	0.0238	0.0496	0.0551	0.0618	0.0000	0.0237	0.0342	0.0623	0.0755
60	-0.0010	0.0428	0.0732	0.0732	0.0893	-0.0010	0.0314	0.0428	0.1131	0.0893
90	0.0000	0.0523	0.0779	0.0903	0.1349	-0.0010	0.0456	0.0732	0.1505	0.1188
120	0.0010	0.0741	0.0903	0.1064	0.1786	0.0000	0.0523	0.0903	0.2110	0.1501
150	0.0010	0.0836	0.1121	0.1786	0.2128	0.0000	0.0798	0.0998	0.2580	0.1938
180	0.0030	0.0998	0.1739	0.2442	0.2698	0.0010	0.0969	0.1596	0.3250	0.2708
210	0.0010	0.1207	0.2328	0.3363	0.3392	0.0010	0.1159	0.2005	0.4210	0.3477
240	0.0010	0.1653	0.2888	0.4418	0.4256	0.0010	0.1758	0.2356	0.5016	0.4703
270	0.0020	0.2128	0.3696	0.5434	0.5206	0.0030	0.2128	0.2803	0.5491	0.5577
300	0.0010	0.2641	0.4988	0.6536	0.6508	0.0020	0.2451	0.3344	0.6194	0.6698
330	0.0020	0.3078	0.6916	0.8189	0.8113	0.0020	0.2803	0.3753	0.7040	0.8094
360	0.0030	0.3401	0.8208	0.9728	1.0992	0.0030	0.3173	0.4950	0.7828	0.9196
390	0.0040	0.4190	1.0013	1.1666	1.2968	0.0030	0.3753	0.6384	0.8427	1.0431
420	0.0050	0.5244	1.1258	1.4108	1.4991	0.0030	0.4199	0.7163	0.8788	1.1600
450	0.0030	0.5776	1.2588	1.5694	1.6986	0.0040	0.4636	0.8113	0.9358	1.3699
480	0.0020	0.6783	1.4146	1.7908	1.8877	0.0040	0.5235	0.8816	1.0317	1.5799
510	0.0040	0.7496	1.5694	1.9428	2.1442	0.0030	0.5634	0.9890	1.0659	1.7338
540	0.0030	0.8788	1.6616	2.1356	2.3256	0.0050	0.6194	1.1258	1.1334	1.8259
570	0.0020	0.9520	1.8573	2.3199	2.5508	0.0040	0.6755	1.2588	1.2220	2.0093
600	0.0040	1.0520	2.0216	2.5850	2.7503	0.0040	0.7800	1.4450	1.3580	2.1140
630	0.0030	1.1825	2.1297	2.8054	2.9906	0.0050	0.8759	1.6036	1.4520	2.2580
660	0.0030	1.2258	2.2077	2.9081	3.2500	0.0050	0.9101	1.6701	1.5560	2.3250
690	0.0030	1.2582	2.2661	2.9851	3.4520	0.0040	0.9576	1.8383	1.7594	2.5210
720	0.0040	1.2893	2.3221	3.0588	3.5373	0.0050	1.0317	2.0093	1.9741	2.6540
750	0.0050	1.3160	2.3701	3.1220	3.6104	0.0040	1.1332	2.1610	2.2401	2.8520
780	0.0040	1.3542	2.4390	3.2127	3.7153	0.0060	1.1661	2.2238	2.5527	2.9540

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0081	0.0147	0.0195	0.0216					
14	0.0010	0.0114	0.0200	0.0333	0.0430					
28	0.0000	0.0241	0.0304	0.0428	0.0646					
60	-0.0010	0.0266	0.0795	0.0646	0.0741					
90	-0.0010	0.0333	0.0836	0.0836	0.1064					
120	0.0000	0.0456	0.0969	0.1150	0.1758					
150	0.0000	0.0808	0.1501	0.1786	0.2138					
180	0.0010	0.0960	0.1891	0.2233	0.2698					
210	0.0010	0.1216	0.2527	0.2803	0.3430					
240	0.0010	0.1501	0.2955	0.3401	0.3971					
270	0.0030	0.1824	0.3468	0.3914	0.4484					
300	0.0020	0.2413	0.3914	0.4608	0.4950					
330	0.0020	0.2831	0.4427	0.5244	0.5938					
360	0.0030	0.3088	0.4959	0.5814	0.6536					
390	0.0030	0.3658	0.5548	0.6536	0.7068					
420	0.0030	0.4000	0.6194	0.7106	0.7429					
450	0.0040	0.4636	0.7363	0.7838	0.8113					
480	0.0040	0.5615	0.8208	0.8655	0.9225					
510	0.0030	0.6289	0.9225	0.9538	1.0308					
540	0.0050	0.7040	1.0336	1.0688	1.1248					
570	0.0040	0.7553	1.1153	1.2559	1.3148					
600	0.0040	0.8408	1.2360	1.3500	1.4478					
630	0.0050	0.8850	1.3186	1.4459	1.6549					
660	0.0050	0.9250	1.4079	1.6568	1.8259					
690	0.0040	0.9850	1.5409	1.8259	1.9171					
720	0.0050	1.0250	1.6635	1.9171	2.0480					
750	0.0040	1.0890	1.7550	2.0250	2.1520					
780	0.0060	1.1849	1.8620	2.0980	2.2258					

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0135	0.0180	0.0110	0.0240	0.0000	0.0135	0.0246	0.0242	0.0402
14	-0.0010	0.0268	0.0220	0.0320	0.0855	-0.0010	0.0198	0.0489	0.0636	0.0605
28	-0.0020	0.0300	0.0768	0.0570	0.0720	-0.0020	0.0264	0.0735	0.0954	0.0858
60	0.0020	0.0731	0.1010	0.1240	0.1444	-0.0020	0.0605	0.0935	0.1733	0.1155
90	-0.0010	0.0972	0.2410	0.3410	0.3098	-0.0010	0.1265	0.1331	0.1848	0.2897
120	0.0010	0.1450	0.3388	0.4668	0.5660	0.0000	0.1778	0.3242	0.2662	0.3531
150	0.0010	0.2396	0.5410	0.6296	0.8450	0.0000	0.2068	0.5005	0.4235	0.5038
180	0.0010	0.3362	0.7810	0.9420	1.1450	0.0010	0.3365	0.6952	0.6534	0.7524
210	0.0000	0.4291	0.9180	1.3480	1.3673	0.0020	0.5005	0.9328	0.8415	0.8052
240	-0.0010	0.4820	1.1870	1.4880	1.5740	0.0030	0.5708	1.0406	1.1264	0.9394
270	-0.0010	0.5470	1.4040	1.8740	1.8440	0.0020	0.9405	1.3321	1.6196	1.2570
300	0.0000	0.6780	1.5777	2.2570	2.4250	0.0020	1.2320	1.5098	1.7457	1.5410
330	0.0020	0.8440	1.8245	2.4450	2.8470	0.0030	1.4135	1.7460	1.9668	1.8220
360	0.0010	0.9540	1.9720	2.8008	3.3957	0.0020	1.6357	1.9451	2.1538	2.1570
390	0.0020	1.2440	2.2103	3.0459	3.5480	0.0040	1.7435	2.1153	2.4794	2.5410
420	0.0010	1.4320	2.3821	3.1140	3.9799	0.0040	1.8007	2.4794	2.6257	2.9720
450	0.0030	1.4870	2.5443	3.3240	4.3210	0.0030	1.9294	2.7016	2.7115	3.3520
480	0.0020	1.6470	2.8440	3.5440	4.4870	0.0040	2.0482	3.1647	2.9128	3.6550
510	0.0040	1.5780	2.8302	3.7540	4.7286	0.0050	2.1461	3.3231	3.2692	3.9950
540	0.0030	1.6840	2.9900	3.8740	4.9955	0.0050	2.2451	3.5321	3.7166	4.3210
570	0.0030	1.7320	3.2480	4.0140	5.2355	0.0040	2.2627	3.6234	3.8951	4.7542
600	0.0020	1.7440	3.4740	4.0320	5.3780	0.0050	2.3221	3.6575	4.0294	4.9005
630	0.0040	1.7890	3.5740	4.5432	5.5081	0.0060	2.4794	3.7664	4.0979	5.0842
660	0.0040	1.8740	3.6480	4.8510	5.7096	0.0070	2.5421	3.8951	4.1668	5.2668
690	0.0020	1.8395	3.7440	4.8341	5.7840	0.0070	2.6268	3.8302	4.2295	5.4799
720	0.0040	1.8850	3.8670	4.9535	5.8740	0.0060	2.6972	3.8005	4.3472	5.6152
750	0.0050	1.9239	3.9720	5.0559	5.9250	0.0070	2.7687	3.8049	4.5604	5.7313
780	0.0030	1.9798	3.9410	5.0140	5.9850	0.0070	2.8105	3.8016	4.6321	5.8978

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0126	0.0215	0.0292	0.0340	0.0020	0.0116	0.0204	0.0265	0.0317
14	0.0010	0.0251	0.0352	0.0581	0.0677	0.0020	0.0230	0.0405	0.0527	0.0630
28	0.0000	0.0376	0.0528	0.0847	0.1016	0.0010	0.0345	0.0608	0.0791	0.0840
60	-0.0010	0.0528	0.1165	0.0924	0.1375	-0.0010	0.0484	0.0847	0.0968	0.1150
90	-0.0010	0.0704	0.1550	0.1210	0.2454	0.0000	0.0834	0.0935	0.1232	0.1580
120	0.0000	0.1661	0.1738	0.1562	0.3894	0.0010	0.1524	0.1155	0.1694	0.2210
150	0.0000	0.2240	0.2794	0.2035	0.4631	0.0010	0.1705	0.2079	0.2431	0.3250
180	0.0010	0.3143	0.5359	0.3179	0.6220	0.0030	0.2068	0.2816	0.3685	0.5440
210	0.0010	0.4012	0.6841	0.4675	0.8668	0.0010	0.2453	0.3575	0.5038	0.7450
240	0.0010	0.4631	0.8547	0.7535	1.1500	0.0010	0.3135	0.4653	0.6842	0.8950
270	0.0030	0.5368	1.0893	0.9262	1.3464	0.0020	0.3905	0.5951	0.9317	1.0153
300	0.0020	0.6545	1.3068	1.2694	1.6962	0.0010	0.5368	0.7975	1.1638	1.2650
330	0.0020	0.7458	1.4179	1.4694	2.0405	0.0020	0.5951	0.8668	1.3838	1.5235
360	0.0030	0.9284	1.6445	1.7094	2.4772	0.0030	0.6842	0.9735	1.7094	1.7435
390	0.0030	0.9889	1.8478	1.9668	2.8358	0.0040	0.8195	1.0538	1.9558	2.0427
420	0.0030	1.0758	1.9272	2.1252	3.0294	0.0050	0.9042	1.2375	2.1472	2.3254
450	0.0040	1.2475	2.0482	2.4761	3.1845	0.0030	1.0505	1.4916	2.2638	2.5905
480	0.0040	1.3651	2.1582	2.8435	3.3594	0.0020	1.1242	1.7424	2.3254	2.7984
510	0.0030	1.5015	2.2968	2.9975	3.5321	0.0040	1.2265	1.9525	2.5938	3.0195
540	0.0050	1.6335	2.4997	3.2054	3.6531	0.0030	1.2298	2.1461	2.8094	3.1515
570	0.0040	1.7424	2.6895	3.4375	3.8742	0.0020	1.3035	2.3265	3.0151	3.2516
600	0.0040	1.8337	2.8457	3.5805	4.0821	0.0040	1.3475	2.5674	3.1427	3.5464
630	0.0050	1.9063	2.9194	3.7481	4.2504	0.0030	1.4234	2.6851	3.3983	3.7862
660	0.0050	1.9195	3.1075	3.8853	4.5220	0.0030	1.5376	2.7632	3.5226	3.9765
690	0.0040	2.0416	3.1515	3.9882	4.6418	0.0030	1.5422	2.7783	3.6159	4.2372
720	0.0050	2.1131	3.2791	4.0866	4.7564	0.0040	1.6005	2.8469	3.7052	4.4261
750	0.0040	2.1868	3.3242	4.1711	4.8547	0.0050	1.6368	2.9058	3.7818	4.5176
780	0.0060	2.2594	3.4540	4.2923	4.9958	0.0040	1.6987	2.9902	3.8917	4.6489

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0107	0.0192	0.0253	0.0293	0.0000	0.0092	0.0175	0.0242	0.0293
14	0.0010	0.0212	0.0383	0.0363	0.0583	-0.0010	0.0183	0.0275	0.0481	0.0583
28	0.0000	0.0275	0.0574	0.0638	0.0715	-0.0020	0.0275	0.0396	0.0722	0.0875
60	-0.0010	0.0495	0.0847	0.0847	0.1034	-0.0020	0.0363	0.0495	0.1310	0.1034
90	-0.0010	0.0605	0.0902	0.1045	0.1562	-0.0010	0.0528	0.0847	0.1743	0.1375
120	0.0000	0.0858	0.1045	0.1232	0.2068	0.0000	0.0605	0.1045	0.3184	0.1738
150	0.0000	0.0968	0.1298	0.2068	0.2464	0.0000	0.0924	0.1155	0.3564	0.2244
180	0.0010	0.1155	0.2013	0.2827	0.3124	0.0010	0.1122	0.1848	0.4851	0.3135
210	0.0010	0.1397	0.2695	0.3894	0.3927	0.0020	0.1342	0.2321	0.5335	0.4026
240	0.0010	0.1914	0.3344	0.5115	0.4928	0.0030	0.2035	0.2728	0.5808	0.5445
270	0.0030	0.2464	0.4279	0.6292	0.6028	0.0020	0.2464	0.3245	0.6358	0.6457
300	0.0020	0.3058	0.5775	0.7568	0.7535	0.0020	0.2838	0.3872	0.7172	0.7755
330	0.0020	0.3564	0.8008	0.9482	0.9394	0.0030	0.3245	0.4345	0.8151	0.9372
360	0.0030	0.3938	0.9504	1.1264	1.2727	0.0020	0.3674	0.5731	0.9064	1.0648
390	0.0030	0.4851	1.1594	1.3508	1.5015	0.0040	0.4345	0.7392	0.9757	1.2078
420	0.0030	0.5680	1.3035	1.6335	1.7358	0.0040	0.4862	0.8294	1.0175	1.3431
450	0.0040	0.6688	1.4575	1.8172	1.9668	0.0030	0.5368	0.9394	1.0835	1.5862
480	0.0040	0.7854	1.6379	2.0735	2.1857	0.0040	0.6061	1.0208	1.1946	1.8293
510	0.0030	0.8679	1.8172	2.2495	2.4827	0.0050	0.6523	1.1451	1.2342	2.0075
540	0.0050	1.0175	1.9239	2.4728	2.6928	0.0050	0.7172	1.3035	1.3123	2.1142
570	0.0040	1.1580	2.1505	2.6862	2.9535	0.0040	0.7821	1.4575	1.3838	2.3265
600	0.0040	1.2850	2.3408	2.9931	3.1845	0.0050	0.9031	1.6731	1.4256	2.5652
630	0.0050	1.3692	2.4660	3.2484	3.4628	0.0060	1.0142	1.8568	1.5640	2.8094
660	0.0050	1.4193	2.5563	3.3672	3.7631	0.0070	1.0538	1.9338	1.7138	3.0602
690	0.0040	1.4569	2.6240	3.4564	3.9971	0.0070	1.1088	2.1285	2.0372	3.2627
720	0.0050	1.4929	2.6887	3.5417	4.0958	0.0060	1.1946	2.3265	2.2858	3.4331
750	0.0040	1.5238	2.7443	3.6150	4.1805	0.0070	1.3121	2.4120	2.4550	3.6872
780	0.0060	1.5680	2.8241	3.7200	4.3019	0.0070	1.3502	2.5749	2.6540	3.8764

ตาราง ก 3 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0093	0.0170	0.0226	0.0251					
14	-0.0010	0.0132	0.0231	0.0385	0.0498					
28	-0.0010	0.0279	0.0352	0.0495	0.0748					
60	-0.0020	0.0308	0.0920	0.0748	0.0858					
90	-0.0020	0.0385	0.0968	0.0968	0.1232					
120	0.0000	0.0528	0.1122	0.1331	0.2035					
150	0.0010	0.0935	0.1738	0.2068	0.2475					
180	-0.0010	0.1111	0.2189	0.2585	0.3124					
210	0.0000	0.1408	0.2926	0.3245	0.3971					
240	0.0010	0.1738	0.3421	0.3938	0.4598					
270	0.0020	0.2112	0.4015	0.4532	0.5192					
300	0.0030	0.2794	0.4532	0.5335	0.5731					
330	0.0020	0.3278	0.5126	0.6072	0.6875					
360	0.0040	0.3575	0.5742	0.6732	0.7568					
390	0.0050	0.4235	0.6424	0.7568	0.8184					
420	0.0030	0.4631	0.7172	0.8228	0.8602					
450	0.0030	0.5368	0.8525	0.9075	0.9394					
480	0.0040	0.6501	0.9504	1.0021	1.0681					
510	0.0050	0.7282	1.0681	1.1044	1.1935					
540	0.0050	0.8151	1.1968	1.2375	1.3024					
570	0.0060	0.8745	1.2914	1.4542	1.5224					
600	0.0040	0.9735	1.4311	1.5631	1.6764					
630	0.0030	1.1981	1.5268	1.6742	1.9162					
660	0.0050	1.2419	1.6302	1.9184	2.1142					
690	0.0060	1.2748	1.7842	2.1142	2.2198					
720	0.0060	1.3063	1.9261	2.2198	2.3540					
750	0.0070	1.3333	2.1131	2.4585	2.5410					
780	0.0060	1.3720	2.3265	2.6565	2.7890					

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0100	0.0220	0.0210	0.0280	0.0020	0.0080	0.0171	0.0232	0.0228
14	-0.0010	0.0180	0.0180	0.0320	0.0749	0.0020	0.0158	0.0209	0.0333	0.0418
28	-0.0020	0.0281	0.0420	0.0936	0.1124	0.0010	0.0237	0.0456	0.0551	0.0741
60	0.0020	0.0280	0.1190	0.1400	0.1440	-0.0010	0.0304	0.0542	0.0827	0.1064
90	-0.0010	0.0678	0.1583	0.2261	0.2714	-0.0020	0.0456	0.1233	0.1188	0.2062
120	0.0010	0.0780	0.1680	0.3210	0.2470	0.0000	0.0523	0.2253	0.1786	0.2727
150	0.0010	0.1671	0.3900	0.5571	0.6686	0.0010	0.1064	0.3392	0.2413	0.4028
180	0.0010	0.1800	0.4110	0.8770	1.2470	0.0010	0.1406	0.4228	0.5793	0.7130
210	0.0000	0.2440	0.6986	0.9980	1.4870	0.0010	0.1501	0.4950	0.8503	0.9102
240	-0.0010	0.3200	0.7260	1.1580	1.5912	0.0020	0.1796	0.7231	1.0973	1.2093
270	-0.0010	0.4767	1.1123	1.5890	1.9068	0.0030	0.2109	0.8028	1.1774	1.2768
300	0.0000	0.5772	1.4450	1.9240	2.2540	0.0040	0.2727	0.9348	1.4098	1.6369
330	0.0020	0.7550	1.5575	2.5770	2.4880	0.0030	0.3363	1.2133	1.6487	2.0292
360	0.0010	0.7850	1.8740	2.7880	2.6870	0.0050	0.4038	1.3516	1.8367	2.3608
390	0.0020	0.8087	1.8869	2.9880	2.9840	0.0050	0.5197	1.6027	1.9974	2.5213
420	0.0010	0.8220	2.2450	3.1110	3.2570	0.0060	0.6213	1.6958	2.1526	2.7218
450	0.0030	1.1210	2.3470	3.2180	3.7233	0.0050	0.6767	1.7822	2.2991	2.8297
480	0.0020	1.1540	2.5000	3.3480	4.2110	0.0050	0.8303	1.9380	2.5954	3.0818
510	0.0040	1.3480	2.4161	3.4515	4.4520	0.0070	0.8755	2.1014	2.6581	3.1478
540	0.0030	1.2870	2.6510	3.6464	4.8750	0.0050	0.9249	2.2268	2.7020	3.2823
570	0.0030	1.3580	2.7850	3.8215	4.7840	0.0040	0.9693	2.3256	2.8317	3.3668
600	0.0020	1.3680	2.7673	4.2500	4.9880	0.0040	1.0027	2.4491	2.9868	3.5036
630	0.0040	1.4550	2.8144	4.0205	5.0240	0.0040	1.0198	2.5403	3.0818	3.6667
660	0.0040	1.4280	2.9173	4.2880	5.1140	0.0050	1.0571	2.6904	3.1740	3.7544
690	0.0020	1.5440	3.1200	4.2780	5.2780	0.0050	1.0851	2.7436	3.2281	3.9015
720	0.0040	1.5320	3.3200	4.4450	5.2980	0.0060	1.1119	2.7750	3.2483	3.9979
750	0.0050	1.6410	3.4100	4.4743	5.3691	0.0040	1.1349	2.7854	3.3154	4.2000
780	0.0030	1.6380	3.5400	4.7777	5.5251	0.0050	1.1679	2.8386	3.4117	4.2351

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตา (ต่อ)

Age(day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micon									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0073	0.0159	0.0086	0.0243	0.0010	0.0209	0.0142	0.0194	0.0250
14	-0.0010	0.0105	0.0238	0.0200	0.0484	0.0010	0.0132	0.0282	0.0385	0.0314
28	-0.0010	0.0171	0.0473	0.0456	0.0726	0.0000	0.0197	0.0423	0.0578	0.0333
60	-0.0020	0.0333	0.0646	0.0713	0.0931	-0.0010	0.0390	0.0513	0.0741	0.0542
90	-0.0020	0.0409	0.0798	0.0941	0.1444	-0.0010	0.0703	0.0627	0.0903	0.0732
120	0.0000	0.0965	0.1093	0.1216	0.2043	0.0000	0.0871	0.0960	0.1188	0.0998
150	0.0010	0.1473	0.2816	0.2138	0.3078	0.0000	0.1083	0.1188	0.1359	0.1216
180	-0.0010	0.2100	0.3951	0.3278	0.3650	0.0010	0.1216	0.1463	0.2318	0.2451
210	0.0000	0.2698	0.5928	0.5149	0.4560	0.0010	0.1473	0.1786	0.3050	0.3373
240	0.0010	0.3099	0.7163	0.6251	0.5890	0.0010	0.1663	0.2641	0.3363	0.4256
270	0.0020	0.3249	0.8031	0.7809	0.7540	0.0030	0.1796	0.3468	0.4627	0.5368
300	0.0030	0.4066	0.9724	1.0659	0.9720	0.0020	0.2109	0.5149	0.5244	0.7353
330	0.0020	0.4513	1.1923	1.1296	1.1250	0.0020	0.2537	0.7486	0.6527	0.8123
360	0.0040	0.4883	1.2527	1.4032	1.3830	0.0030	0.3249	0.9073	0.8503	1.0688
390	0.0050	0.6299	1.3148	1.5438	1.5240	0.0030	0.3905	1.0659	1.1913	1.3823
420	0.0030	0.6789	1.4136	1.7613	1.8320	0.0030	0.4617	1.2559	1.4136	1.5514
450	0.0030	0.7251	1.5681	1.9418	2.1540	0.0040	0.5016	1.3823	1.6036	1.7528
480	0.0040	0.7999	1.7594	2.1499	2.4510	0.0040	0.5643	1.4459	1.8478	2.0055
510	0.0050	0.8408	1.8886	2.3280	2.6650	0.0030	0.6118	1.5162	2.0368	2.3104
540	0.0050	0.8522	1.9038	2.4595	2.9498	0.0050	0.7163	1.5618	2.1841	2.6040
570	0.0060	0.8931	2.0463	2.5776	2.9624	0.0040	0.8060	1.6036	2.3598	2.8386
600	0.0040	0.9239	1.9980	2.6665	2.9973	0.0040	0.8337	1.6673	2.5156	2.9963
630	0.0030	1.0336	2.2240	2.8282	3.1167	0.0050	0.8479	1.7404	2.6353	3.2084
660	0.0050	1.0973	2.3323	2.8928	3.1559	0.0050	0.8790	1.8846	2.7094	3.3258
690	0.0060	1.1505	2.4244	3.0533	3.1873	0.0040	0.9022	2.0093	2.8063	3.4138
720	0.0060	1.1666	2.5090	3.2006	3.2500	0.0050	0.9245	2.1413	2.8548	3.4981
750	0.0070	1.2559	2.5536	3.3136	3.2889	0.0040	0.9436	2.2268	2.9944	3.5705
780	0.0060	1.2996	2.6068	3.4713	3.3478	0.0060	0.9710	2.3218	3.0638	3.6742

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเกตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0020	0.0061	0.0129	0.0179	0.0222	0.0010	0.0055	0.0129	0.0185	0.0222
14	0.0020	0.0121	0.0171	0.0356	0.0441	0.0010	0.0110	0.0257	0.0266	0.0441
28	0.0010	0.0181	0.0333	0.0534	0.0662	0.0000	0.0165	0.0386	0.0447	0.0662
60	-0.0010	0.0171	0.0701	0.0627	0.0836	-0.0010	0.0171	0.0551	0.0827	0.1202
90	0.0000	0.0333	0.0932	0.0827	0.1216	-0.0010	0.0266	0.0713	0.1007	0.1598
120	0.0010	0.0561	0.1703	0.1045	0.1596	0.0000	0.0333	0.0836	0.1492	0.1967
150	0.0010	0.0741	0.2297	0.1378	0.1881	0.0000	0.0447	0.0969	0.1748	0.2413
180	0.0030	0.0836	0.2698	0.1767	0.2442	0.0010	0.0551	0.1406	0.2404	0.2841
210	0.0010	0.0998	0.3468	0.2451	0.2880	0.0010	0.0646	0.1786	0.2727	0.3344
240	0.0010	0.1121	0.4608	0.3686	0.3350	0.0010	0.0732	0.2413	0.3078	0.3914
270	0.0020	0.1501	0.5339	0.4627	0.4320	0.0030	0.0798	0.3088	0.3667	0.4608
300	0.0010	0.1796	0.6498	0.5301	0.5520	0.0020	0.0988	0.3658	0.4456	0.5282
330	0.0020	0.2071	0.7363	0.6631	0.7220	0.0020	0.1093	0.4199	0.5016	0.6251
360	0.0030	0.2831	0.8417	0.7458	0.9010	0.0030	0.1463	0.4636	0.5681	0.7429
390	0.0040	0.3088	0.9187	0.8446	1.1540	0.0030	0.1777	0.5529	0.6736	0.9044
420	0.0050	0.3591	0.9738	0.9453	1.3250	0.0030	0.2033	0.5966	0.7458	0.9738
450	0.0030	0.4210	1.0431	1.0688	1.5250	0.0040	0.2698	0.6536	0.8398	1.1638
480	0.0020	0.5263	1.1362	1.1666	1.7250	0.0040	0.3363	0.7201	0.9367	1.3519
510	0.0040	0.5729	1.2037	1.3690	1.9540	0.0030	0.3905	0.7800	1.0222	1.4744
540	0.0030	0.6612	1.3053	1.4801	2.2140	0.0050	0.4608	0.8417	1.1600	1.6958
570	0.0020	0.7020	1.4117	1.6739	2.4150	0.0040	0.5016	0.9044	1.3699	1.8563
600	0.0040	0.7520	1.4611	1.7632	2.6320	0.0040	0.5643	0.9994	1.5789	2.0188
630	0.0030	0.7792	1.5257	1.8696	2.8890	0.0050	0.6213	1.1191	1.7594	2.1540
660	0.0030	0.7933	1.6036	1.9513	3.0410	0.0050	0.6584	1.2198	1.9048	2.2250
690	0.0030	0.8161	1.6198	2.0397	3.1170	0.0040	0.6888	1.2996	2.0881	2.3850
720	0.0040	0.8495	1.6863	2.1328	3.1559	0.0050	0.7553	1.4041	2.1632	2.5210
750	0.0050	0.8671	1.7366	2.2145	3.2851	0.0040	0.7906	1.6008	2.2762	2.6550
780	0.0040	0.8759	1.7946	2.3199	3.3497	0.0060	0.8136	1.6891	2.4482	2.7210

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 6.3 micron									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0054	0.0115	0.0152	0.0186					
14	0.0010	0.0107	0.0228	0.0238	0.0314					
28	0.0000	0.0160	0.0342	0.0323	0.0555					
60	-0.0010	0.0200	0.0456	0.0399	0.0732					
90	-0.0010	0.0266	0.0542	0.0703	0.0912					
120	0.0000	0.0304	0.0684	0.0874	0.1178					
150	0.0000	0.0361	0.0808	0.1064	0.1596					
180	0.0010	0.0428	0.0969	0.1501	0.1862					
210	0.0010	0.0551	0.1178	0.1853	0.2261					
240	0.0010	0.0703	0.1435	0.2100	0.2793					
270	0.0030	0.0903	0.1729	0.2451	0.3344					
300	0.0020	0.1064	0.2100	0.2708	0.3914					
330	0.0020	0.1501	0.2546	0.3050	0.4608					
360	0.0030	0.1881	0.2841	0.3344	0.5339					
390	0.0030	0.2451	0.3363	0.3686	0.6033					
420	0.0030	0.2869	0.3686	0.4000	0.6612					
450	0.0040	0.3401	0.4066	0.4351	0.7448					
480	0.0040	0.3753	0.4703	0.4988	0.8094					
510	0.0030	0.4066	0.5558	0.6386	0.8778					
540	0.0050	0.4608	0.6536	0.7391	1.1001					
570	0.0040	0.4950	0.7648	0.8417	1.2683					
600	0.0040	0.5301	0.8664	0.9063	1.4516					
630	0.0050	0.5681	0.9443	1.0051	1.6540					
660	0.0050	0.6033	1.0469	1.1248	1.7338					
690	0.0040	0.6527	1.1638	1.2050	1.8677					
720	0.0050	0.7144	1.2806	1.3220	2.0250					
750	0.0040	0.7524	1.3851	1.4820	2.1440					
780	0.0060	0.7873	1.4520	1.5220	2.2230					

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR0C0	PR0C2.5	PR0C5	PR0C7.5	PR0C10	PR10C0	PR10C2.5	PR10C5	PR10C7.5	PR10C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0100	0.0220	0.0210	0.0280	0.0000	0.0100	0.0140	0.0220	0.0264
14	-0.0010	0.0180	0.0180	0.0320	0.0749	-0.0010	0.0150	0.0242	0.0350	0.0484
28	-0.0020	0.0281	0.0420	0.0936	0.1124	-0.0020	0.0220	0.0440	0.0540	0.0858
60	0.0020	0.0280	0.1190	0.1400	0.1440	-0.0020	0.0290	0.0520	0.0830	0.1232
90	-0.0010	0.0678	0.1583	0.2261	0.2714	-0.0010	0.0440	0.0740	0.1375	0.2388
120	0.0010	0.0780	0.1680	0.3210	0.2470	0.0000	0.0550	0.1100	0.2068	0.3157
150	0.0010	0.1671	0.3900	0.5571	0.6686	0.0000	0.0890	0.2410	0.2794	0.4664
180	0.0010	0.1800	0.4110	0.8770	1.2470	0.0010	0.0150	0.3870	0.4520	0.8255
210	0.0000	0.2440	0.6986	0.9980	1.4870	0.0020	0.1850	0.5210	0.7450	1.0539
240	-0.0010	0.3200	0.7260	1.1580	1.5912	0.0030	0.2140	0.7320	0.9320	1.4003
270	-0.0010	0.4767	1.1123	1.5890	1.9068	0.0020	0.2380	0.9295	1.2250	1.4784
300	0.0000	0.5772	1.4450	1.9240	2.2540	0.0020	0.3050	1.0824	1.5780	1.8953
330	0.0020	0.7550	1.5575	2.5770	2.4880	0.0030	0.3580	1.4049	1.8520	2.3496
360	0.0010	0.7850	1.8740	2.7880	2.6870	0.0020	0.4675	1.5650	2.1267	2.7335
390	0.0020	0.8087	1.8869	2.9880	2.9840	0.0040	0.5870	1.8557	2.3127	2.9194
420	0.0010	0.8220	2.2450	3.1110	3.2570	0.0040	0.7200	1.9635	2.4925	3.1515
450	0.0030	1.1210	2.3470	3.2180	3.7233	0.0030	0.7950	2.0636	2.6622	3.2765
480	0.0020	1.1540	2.5000	3.3480	4.2110	0.0040	0.9480	2.2440	3.0052	3.5684
510	0.0040	1.3480	2.4161	3.4515	4.4520	0.0050	1.0137	2.4332	3.0778	3.6448
540	0.0030	1.2870	2.6510	3.6464	4.8750	0.0050	1.0709	2.5784	3.1286	3.8005
570	0.0030	1.3580	2.7850	3.8215	4.7840	0.0040	1.1224	2.6928	3.2788	3.8984
600	0.0020	1.3680	2.7673	4.2500	4.9880	0.0050	1.1611	2.8358	3.4584	4.0568
630	0.0040	1.4550	2.8144	4.0205	5.0240	0.0060	1.1808	2.9414	3.5684	4.2456
660	0.0040	1.4280	2.9173	4.2880	5.1140	0.0070	1.2240	3.1152	3.6751	4.3472
690	0.0020	1.5440	3.1200	4.2780	5.2780	0.0070	1.2564	3.1768	3.7378	4.5176
720	0.0040	1.5320	3.3200	4.4450	5.2980	0.0060	1.2875	3.2131	3.7612	4.6291
750	0.0050	1.6410	3.4100	4.4743	5.3691	0.0070	1.3141	3.2252	3.8389	4.8631
780	0.0030	1.6380	3.5400	4.7777	5.5251	0.0070	1.3523	3.2868	3.9504	4.9038

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ต้าผสมแก้กันตะ (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR20C0	PR20C2.5	PR20C5	PR20C7.5	PR20C10	PR30C0	PR30C2.5	PR30C5	PR30C7.5	PR30C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0085	0.0184	0.0099	0.0282	0.0020	0.0242	0.0164	0.0224	0.0290
14	0.0010	0.0121	0.0275	0.0231	0.0560	0.0020	0.0152	0.0327	0.0446	0.0363
28	0.0000	0.0198	0.0548	0.0528	0.0840	0.0010	0.0229	0.0490	0.0669	0.0385
60	-0.0010	0.0385	0.0748	0.0825	0.1078	-0.0010	0.0451	0.0594	0.0858	0.0627
90	-0.0010	0.0473	0.0924	0.1089	0.1672	0.0000	0.0814	0.0726	0.1045	0.0847
120	0.0000	0.1520	0.1265	0.1408	0.2365	0.0010	0.1009	0.1111	0.1375	0.1155
150	0.0000	0.1240	0.3260	0.2475	0.3564	0.0010	0.1254	0.1375	0.1573	0.1408
180	0.0010	0.1890	0.4575	0.3795	0.6578	0.0030	0.1408	0.1694	0.2684	0.2838
210	0.0010	0.2250	0.6864	0.5962	0.9262	0.0010	0.1705	0.2068	0.3531	0.3905
240	0.0010	0.3240	0.8294	0.7238	1.3210	0.0010	0.1925	0.3058	0.3894	0.4928
270	0.0030	0.3762	0.9299	0.9042	1.6220	0.0020	0.2079	0.4015	0.5357	0.6215
300	0.0020	0.4708	1.1259	1.2342	1.8458	0.0010	0.2442	0.5962	0.6072	0.8514
330	0.0020	0.5225	1.3805	1.3079	1.9972	0.0020	0.2937	0.8668	0.7557	0.9405
360	0.0030	0.5654	1.4505	1.6247	2.1802	0.0030	0.3762	1.0505	0.9845	1.2375
390	0.0030	0.7294	1.5224	1.7875	2.3265	0.0040	0.4521	1.2342	1.3794	1.6005
420	0.0030	0.7861	1.6368	2.0394	2.6884	0.0050	0.5346	1.4542	1.6368	1.7963
450	0.0040	0.8396	1.8157	2.2484	3.0316	0.0030	0.5808	1.6005	1.8568	2.0295
480	0.0040	0.9262	2.0372	2.4893	3.1845	0.0020	0.6534	1.6742	2.1395	2.3221
510	0.0030	0.9735	2.1868	2.6956	3.3484	0.0040	0.7084	1.7556	2.3584	2.6752
540	0.0050	0.9867	2.2044	2.8478	3.4155	0.0030	0.8294	1.8084	2.5289	3.0151
570	0.0040	1.0341	2.3694	2.9846	3.4302	0.0020	0.9332	1.8568	2.7324	3.2868
600	0.0040	1.0697	2.3134	3.0875	3.4705	0.0040	0.9654	1.9305	2.9128	3.4694
630	0.0050	1.1968	2.5751	3.2747	3.6088	0.0030	0.9818	2.0152	3.0514	3.7149
660	0.0050	1.2705	2.7005	3.3495	3.6542	0.0030	1.0177	2.1822	3.1372	3.8509
690	0.0040	1.3321	2.8072	3.5354	3.6905	0.0030	1.0447	2.3265	3.2494	3.9529
720	0.0050	1.3508	2.9051	3.7059	3.7631	0.0040	1.0705	2.4794	3.3055	4.0505
750	0.0040	1.4542	2.9568	3.8368	3.8082	0.0050	1.0926	2.5784	3.4672	4.1342
780	0.0060	1.5048	3.0184	4.0194	3.8764	0.0040	1.1244	2.6884	3.5475	4.2543

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR40C0	PR40C2.5	PR40C5	PR40C7.5	PR40C10	PR50C0	PR50C2.5	PR50C5	PR50C7.5	PR50C10
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0010	0.0070	0.0150	0.0207	0.0257	0.0000	0.0064	0.0150	0.0214	0.0257
14	0.0010	0.0140	0.0198	0.0412	0.0510	-0.0010	0.0128	0.0298	0.0308	0.0510
28	0.0000	0.0210	0.0385	0.0618	0.0766	-0.0020	0.0192	0.0447	0.0517	0.0766
60	-0.0010	0.0198	0.0812	0.0726	0.0968	-0.0020	0.0198	0.0638	0.0957	0.1391
90	-0.0010	0.0385	0.1080	0.0957	0.1408	-0.0010	0.0308	0.0825	0.1166	0.1851
120	0.0000	0.0649	0.1972	0.1210	0.1848	0.0000	0.0385	0.0968	0.1727	0.2277
150	0.0000	0.0858	0.2660	0.1595	0.2178	0.0000	0.0517	0.1122	0.2024	0.2794
180	0.0010	0.0968	0.3124	0.2046	0.2827	0.0010	0.0638	0.1628	0.2783	0.3289
210	0.0010	0.1155	0.4015	0.2838	0.4147	0.0020	0.0748	0.2068	0.3157	0.3872
240	0.0010	0.1298	0.5335	0.4268	0.6314	0.0030	0.0847	0.2794	0.3564	0.4532
270	0.0030	0.1738	0.6182	0.5357	0.8525	0.0020	0.0924	0.3575	0.4246	0.5335
300	0.0020	0.2079	0.7524	0.6138	1.0615	0.0020	0.1144	0.4235	0.5159	0.6116
330	0.0020	0.2398	0.8525	0.7678	1.2727	0.0030	0.1265	0.4862	0.5808	0.7238
360	0.0030	0.3278	0.9746	0.8635	1.4784	0.0020	0.1694	0.5368	0.6578	0.8602
390	0.0030	0.3575	1.0637	0.9779	1.7457	0.0040	0.2057	0.6402	0.7799	1.0472
420	0.0030	0.4158	1.1275	1.0945	1.9151	0.0040	0.2354	0.6908	0.8635	1.1275
450	0.0040	0.5357	1.2078	1.2375	2.1527	0.0030	0.3124	0.7568	0.9724	1.3475
480	0.0040	0.6094	1.3156	1.3508	2.3595	0.0040	0.3894	0.8338	1.0846	1.5653
510	0.0030	0.6633	1.3937	1.5851	2.5674	0.0050	0.4521	0.9031	1.1836	1.7072
540	0.0050	0.7656	1.5114	1.7138	2.7951	0.0050	0.5335	0.9746	1.3431	1.9635
570	0.0040	0.8575	1.6346	1.9382	3.0514	0.0040	0.5808	1.0472	1.5862	2.1494
600	0.0040	0.8871	1.6918	2.0416	3.2353	0.0050	0.6534	1.1572	1.8282	2.3375
630	0.0050	0.9022	1.7666	2.1648	3.3451	0.0060	0.7194	1.2958	2.0372	2.6862
660	0.0050	0.9185	1.8568	2.2594	3.5211	0.0070	0.7623	1.4124	2.2055	2.9282
690	0.0040	0.9449	1.8755	2.3617	3.6091	0.0070	0.7975	1.5048	2.4178	3.0613
720	0.0050	0.9837	1.9525	2.4695	3.6542	0.0060	0.8745	1.6258	2.5047	3.2505
750	0.0040	1.0040	2.0108	2.5641	3.8038	0.0070	0.9154	1.8535	2.6356	3.5024
780	0.0060	1.0142	2.0779	2.6862	3.8786	0.0070	0.9420	1.9558	2.8347	3.7681

ตาราง ก 4 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้ากันตา (ต่อ)

Age (day)	Expansion (%)									
	Particle Size 22.2 micron									
	Mixture ID									
	PR60C0	PR60C2.5	PR60C5	PR60C7.5	PR60C10					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
7	0.0010	0.0062	0.0133	0.0176	0.0215					
14	-0.0010	0.0124	0.0264	0.0275	0.0363					
28	-0.0010	0.0185	0.0397	0.0374	0.0643					
60	-0.0020	0.0231	0.0528	0.0462	0.0847					
90	-0.0020	0.0308	0.0627	0.0814	0.1056					
120	0.0000	0.0352	0.0792	0.1012	0.1364					
150	0.0010	0.0418	0.0935	0.1232	0.1848					
180	-0.0010	0.0495	0.1122	0.1738	0.2156					
210	0.0000	0.0638	0.1364	0.2145	0.2618					
240	0.0010	0.0814	0.1661	0.2431	0.3234					
270	0.0020	0.1045	0.2002	0.2838	0.3872					
300	0.0030	0.1232	0.2431	0.3135	0.4532					
330	0.0020	0.1738	0.2948	0.3531	0.5335					
360	0.0040	0.2178	0.3289	0.3872	0.6182					
390	0.0050	0.2838	0.3894	0.4268	0.6985					
420	0.0030	0.3322	0.4268	0.4631	0.7656					
450	0.0030	0.3938	0.4708	0.5038	0.8624					
480	0.0040	0.4345	0.5445	0.5775	0.9372					
510	0.0050	0.4708	0.6435	0.7394	1.0164					
540	0.0050	0.5335	0.7568	0.8558	1.2738					
570	0.0060	0.5731	0.8855	0.9746	1.4685					
600	0.0040	0.6138	1.0032	1.0494	1.6808					
630	0.0030	0.6578	1.0934	1.1638	1.9151					
660	0.0050	0.6985	1.2122	1.3024	2.0075					
690	0.0060	0.7557	1.3475	1.4575	2.1626					
720	0.0060	0.8272	1.4828	1.7072	2.2850					
750	0.0070	0.8712	1.6038	1.9481	2.4580					
780	0.0060	0.9116	1.7908	2.1263	2.6320					

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร
วันเกิด	18 กันยายน 2521
สถานที่เกิด	อำเภอ สาทร์ กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	5/22 ซอย งามดูพลี ถนน พระราม4 ตำบล ทุ่งมหาเมฆ อำเภอ สาทร์ กรุงเทพมหานคร 10120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2544 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2547 Master of Construction Management THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES พ.ศ. 2563 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว