การประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต

สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า[1*] อัศนัย ทาเภา[1]
เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์[2] และ อลงกรณ์ ละม่อม[3]
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

บทคัดย่อ

ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (HCA) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฮิวริสติค โดยอาศัยหลักการคำนวณคล้ายกับการปีนภูเขาของนักปีนเขา ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานที่เรียบง่ายและสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ต้องการหาค่าความเหมาะสม ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ HCA เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันในงานคอนกรีตสำหรับการออกแบบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน จากการศึกษาพบว่าฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดได้สะดวกรวดเร็ว ซึ่งช่วยให้ประหยัดเวลาในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่ได้ต้นทุนราคาต่ำที่สุด

คำสำคัญ : ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม / ค่าที่เหมาะสม / เถ้าก้นเตาบดละเอียด

* *Corresponding author: E-mail: w_sathitphong@hotmail.com*
1 *นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*
2 *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*
3 *อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

An Application of Hill Climbing Algorithm for Optimal Ratio of Ground Bottom Ash in Concrete

Sathitphong Wongsa-nga[1*], Assanai Tapown[1], Raungrut Cheerarot[2], and Alongkorn Lamom[3]

Mahasarakham University, Khamrieng, Kuntharawichai, Mahasarakham 44150, Thailand

Abstract

Hill Climbing Algorithm (HCA) is a heuristic optimization based on the searching style of a hill climber. HCA is a simple technique and can find the optimum solution. In this study, HCA is applied to develop for determining the optimum mix proportion of ground bottom ash with different particle sizes in concrete. Compressive strengths of concrete were determined at the ages of 7, 28, 90, and 180 days. From the result, the HCA can be used to determine mix proportion of concrete containing ground bottom ash. Furthermore, it can save time to design the mix proportion of concrete and obtain the minimum cost.

Keywords : Hill Climbing Algorithm / Optimization / Ground Bottom Ash

* *Corresponding author: E-mail: w_sathitpong@hotmail.com*

1 *Graduate Student, Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

2 *Assistant Professor, Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

3 *Lecturer, Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

ในการแก้ปัญหาสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ทั่วๆ ไปเหมาะสำหรับปัญหาที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมีข้อจำกัดและกฎเกณฑ์ในการหาคำตอบที่ตายตัว เมื่อนำไปแก้ไขปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น ต้องใช้ระยะเวลาและความสามารถในการแก้ปัญหาที่นานขึ้นเป็นทวีคูณ โดย Goldberg [1] ได้กล่าวถึงการหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาต่างๆ โดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 วิธี คือ 1. วิธี Calculation ทำได้โดยการหาเกรเดียนของฟังก์ชันแล้วให้เท่ากับศูนย์ 2. วิธี Enumerative Schemes เป็นวิธีการที่จะหาคำตอบได้จากจุดทุกจุดใน Schemes Space และ 3. วิธี Random Search Algorithm เป็นวิธีการที่มีพื้นฐานของการสุ่มเลือกในตอนต้นของกระบวนการ หลังจากนั้นจะมีกระบวนการซึ่งเป็นแนวทางที่ทำให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบของปัญหา ซึ่งวิธีการนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบและวิธีการใหม่ๆ เช่น ซิมูเลตเต็ดแอนเนียลลิง (Simulated annealing: SA), ทาบูเสิร์ช (Taboo serch: TS), นิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural network: NN), เจนเนติคอัลกอริทึม (Genetic algorithm: GA), รวมไปถึง แอนท์โคโลนีออพติไมเซชัน (Ant colony optimization: ACO) [2] และอีกวิธีหนึ่งคือ ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมตามวิธีการทางฮิวริสติค ซึ่งมีหลักการทำงานที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมอื่นๆ ในการหาค่าที่เหมาะสมได้

ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งหลายงานวิจัยได้มีการพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการบดให้มีขนาดเล็กลง [3] และได้นำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผสมคอนกรีตเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ลงแต่ยังคงคุณภาพของคอนกรีตได้เท่าเดิมหรือดีกว่าเดิม โดยเฉพาะเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยพัฒนาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต เช่น การพัฒนาด้านกำลังอัด [4] ในประเทศไทยเทคนิคหรือวิธีการออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มเพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดยังไม่สะดวกและมีความยุ่งยากอยู่มาก สำหรับวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมจะเป็นตัวช่วยในการคำนวณหาจุดที่เหมาะสมของปัญหาซึ่งจะช่วยประหยัดเวลา อีกทั้งยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตอย่างจริงจัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 15-2547

2) เถ้าก้นเตาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาปรับปรุงคุณภาพให้มีอนุภาคขนาดเล็กลง 3 ขนาด คือ เถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (LB, Large size bottom ash) ขนาดกลาง (MB, Medium size bottom ash) และขนาดเล็ก (SB, small size bottom ash)

3) ทรายแม่น้ำ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.10

4) หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.20

โดยสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	Specic gravity	Median particle size, d_{50} (micron)	Retained on a sieve No. 325 (%)
Cement	3.14	11.3	13.2
SB	2.82	6.3	4.9
MB	2.79	13.6	18.3
LB	2.77	22.2	33.6

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Type	Chemical composition (%)									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Mn_2O_3	SO_3	LOI[a]
Portland cement	20.62	5.22	3.10	65.00	0.91	0.07	0.50	0.76	2.70	1.13
Ground bottom ash	46.02	22.31	10.64	11.48	3.47	3.47	0.07	0.07	1.52	2.72

[a]Loss On Ignition

2.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดลอง

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีต โดยควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ 10-12 ซม. หล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและนำไปบ่มในน้ำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

W/B	Water (kg/m^3)	Binder (kg/m^3)	Ground bottom ash (%)	Sand	Stone	$B^1:FA^2:CA^3$
0.43	195	454	0 – 50%	628	1024	1:1.38:2.26
0.48	195	406	0 – 50%	667	1024	1:1.64:2.52
0.55	195	355	0 – 50%	708	1024	1:1.99:2.88
0.62	195	315	0 – 50%	740	1024	1:2.35:3.25
0.70	195	279	0 – 50%	770	1024	1:2.76:3.67
0.80	195	279	0 – 50%	798	1024	1:3.27:4.20

B = วัสดุประสาน, FA = มวลรวมละเอียด (ทราย), CA = มวลรวมหยาบ (หิน)

2.3 การสังเคราะห์แบบจำลองทำนายกำลังอัดด้วยวิธีถดถอยพหุคูณ

เพื่อให้ได้สมการที่สามารถจำลองเหตุการณ์จริงได้จึงนำข้อมูลอัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากผลการทดลองจำนวน 756 ตัวอย่างมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ของข้อมูลในรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสองแบบหลายตัวแปรดังแสดงในสมการที่ (1) โดยจากข้อมูลอัตราส่วนผสมและผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดได้กำหนดตัวแปรนำเข้าทั้งหมด 4 ตัวแปร ดังนี้

X_1 คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.43-0.80

X_2 คือ ปริมาณการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียด (PR) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก

X_3 คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (PS) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 6.3 -22.2 ไมครอน

X_4 คือ อายุของคอนกรีต (AC) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7-180 วัน

และในส่วนของตัวแปรออกหรือผลลัพธ์ได้แก่

CS คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน

$$CS = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ii} X_i^2 + \sum a_{ij} X_i X_j \quad \textbf{(1)}$$

เมื่อ a_i คือ ค่าคงที่ โดยที่ i และ j = 1, 2, 3, ... , 4

จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ด้วยโปรแกรม SPSS Vesion 19 โดยใช้วิธี Multiple Nonlinear Regressions เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายหรือพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำโดยตรวจสอบจากค่าเบี่ยงเบน

ของความผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Bias Deviation, MBD) ค่าเบี่ยงเบนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Deviation, RMSD) และค่ากำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุ (Multiple Correlation Coefficient, R^2)

2.4 ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีตที่ให้ราคาต้นทุนต่ำสุดในครั้งนี้คือ ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการค้นหาและแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบในรูปแบบค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ทฤษฎีนี้ได้นำเสนอครั้งแรกโดยเพริล [5-6] ในปี ค.ศ. 1984 โดยพัฒนาและจำลองมาจากวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการพิจารณาการปีนภูเขาของนักปีนเขาเพื่อไปถึงยอดภูเขาเร็วที่สุด เริ่มจากกำหนดว่ายอดภูเขาอยู่ตำแหน่งใดแล้วพยายามไปจุดนั้นให้ได้ และหลีกเลี่ยงทิศทางที่จะทำให้ห่างจากยอดเขาทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไปถึงยอดเขา [7] โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. การสร้างสถานะเริ่มต้น โดยการสุ่มตัวแปรออกแบบของปัญหาที่กำหนดไว้เพื่อสร้างเป็นคำตอบแรกสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบในการคัดคำตอบก่อนเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม

2. การสร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปรของปัญหาจากสถานะเดิมเล็กน้อยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสถานะเริ่มต้น

3. การตรวจสอบสถานะ เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบสถานะของคำตอบระหว่างสถานะใหม่กับสถานะเดิม ซึ่งถ้าหากสถานะไหนดีกว่าก็จะถูกกำหนดเป็นสถานะปัจจุบันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบครั้งต่อไป จนกว่าไม่พบสถานะที่ดีกว่าเดิม

4. ตรวจสอบสถานะเป้าหมาย ซึ่งมีลักษณะคำตอบที่เป็นไปตามสมการเป้าหมายที่กำหนดไว้

5. ทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 4 จนกว่าจะได้คำตอบที่ตรงตามสถานะเป้าหมายหรือการเข้าสู่เงื่อนไขของการหยุดคำตอบ

2.4.1 ราคาส่วนผสมของคอนกรีต

ในตารางที่ 4 แสดงราคาส่วนผสมของคอนกรีตเบื้องต้นสำหรับใช้ในการคำนวณราคาต้นทุนของคอนกรีต ซึ่งราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามราคาที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา โดยเป็นไปตามกลไกของตลาด ส่วนราคาของเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบและมองเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของราคาคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดได้จากการคำนวณอย่างคร่าวๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาที่ได้จากเครื่องบดแบบตกกระทบที่ใช้ในการทดลอง สำหรับราคานี้อาจมีต้นทุนสูงกว่าความเป็นจริง แต่เนื่องจากเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่ใช้ประกอบในงานวิจัยจึงมีขอบเขตของการใช้งานค่อนข้างเล็ก แต่หากเลือกใช้ในขอบเขตงานที่ใหญ่มากๆ จะทำให้ราคาถูกลงกว่าเดิม

ตารางที่ 4 ราคาส่วนผสมของคอนกรีต

Mix proportion of concrete	Cost (Baht/kg)
Portland cement	2.25
Water	0.01
Coarse aggregate (Stone)	0.25
Fine aggregate (Sand)	0.15
Ground bottom ash (6.3-22.2 micron)	$0.005(PS)^2-0.235(PS)+3.787$

หมายเหตุ : ราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน

PS คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

2.4.2 ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาในงานคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต โดยกำหนดผลรวมราคาส่วนผสมของคอนกรีตต้นทุนต่ำสุดให้เป็นสมการเป้าหมายดังแสดงในสมการที่ (2)

สมการเป้าหมาย $$f(x) = \text{Min Cost } \{C_C W_C + C_{GB} W_{GB} + C_{FA} W_{FA} + C_{CA} W_{CA} + C_W W_W\} \quad \textbf{(2)}$$

เมื่อ Min Cost คือ ราคาต้นทุนต่ำสุดของคอนกรีตต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร (บาท)

C_C คือ ราคาของปูนซีเมนต์ (บาท)

W_C คือ น้ำหนักของปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)

C_{GB} คือ ราคาของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (บาท)

W_{GB} คือ น้ำหนักของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (กิโลกรัม)

C_{FA} คือ ราคาของทราย (บาท)

W_{FA} คือ น้ำหนักของทราย (กิโลกรัม)

C_{CA} คือ ราคาของหิน (บาท)

W_{CA} คือ น้ำหนักของหิน (กิโลกรัม)

C_W คือ ราคาของน้ำในส่วนผสม (บาท)

W_W คือ น้ำหนักของน้ำในส่วนผสม (กิโลกรัม)

2.4.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมในการเขียนฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

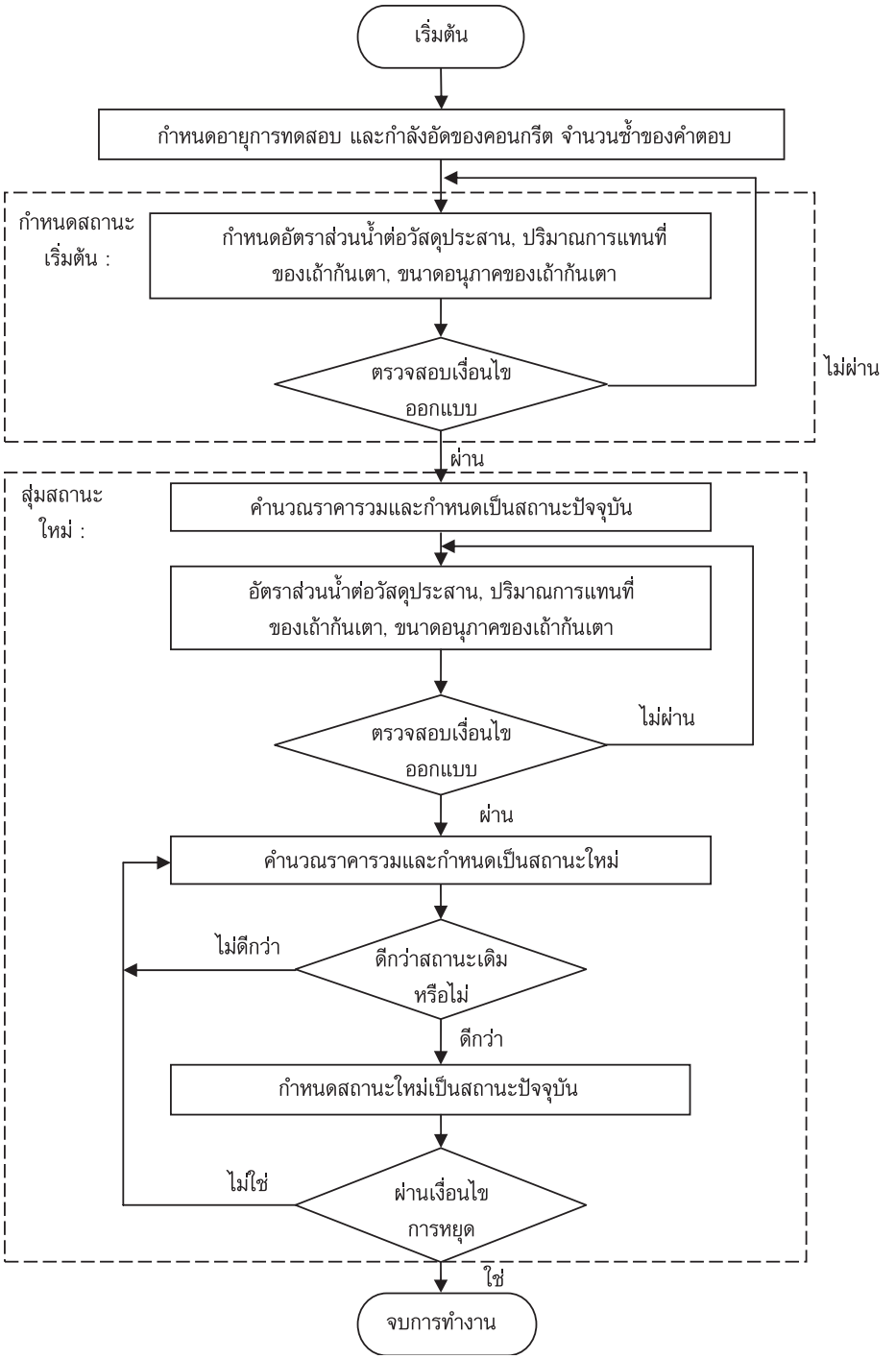
ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic version 6.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีชุดคำสั่งและเครื่องมือต่างๆ ที่เรียกกันว่า คอนโทรล (Controls) โดยเน้นการออกแบบหน้าจอแบบกราฟฟิกหรือที่เรียกว่า Graphic User Interface (GUI) มาช่วยในการพัฒนาในการเขียนขั้นตอนการทำงานของฮิลไคลมิงอัลกอริทึม โดยหลักการทำงานเริ่มต้นของอัลกอริทึมเป็นการกำหนดอายุการทดสอบและกำลังอัดของคอนกรีตและเงื่อนไขการหยุดของคำตอบ สำหรับการทำงานมี 2 ขั้นตอนหลักคือ การสร้างคำตอบเริ่มต้นและการสร้างคำตอบใหม่เพื่อเปรียบเทียบในการหาคำตอบที่เหมาะสมกว่า โดยแสดงผังขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 1 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การสร้างคำตอบเริ่มต้น ขั้นตอนนี้เป็นการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมดเพื่อให้ได้กำลังอัดตามเป้าหมาย หลังจากนั้นจะตรวจสอบกับเงื่อนไขการออกแบบโดยให้มีกำลังอัดตรงตามเป้าหมายและมีราคาต้นทุนของอัตราส่วนผสมของคอนกรีตต่ำสุด และกำหนดผลของคำตอบที่ได้เป็นสถานะปัจจุบัน

2. การสุ่มสร้างสถานะ เป็นขั้นตอนการสุ่มปรับตัวแปรของปัญหาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยน้ำหนัก (PR) และขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (PS) จากสถานะเดิมเล็กน้อยเพื่อให้ได้สถานะคำตอบใหม่ที่ดีกว่า หลังจากนั้นนำเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณหากำลังอัดและทำการตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบแล้วคำนวณราคาต้นทุนของคอนกรีต

3. เงื่อนไขการออกแบบ เป็นการคำนวณหากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการสุ่มตัวแปรการออกแบบต่างๆ ในแต่ละรอบของการสุ่มให้ได้กำลังอัดตามที่ระบุไว้ ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

4. การตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด เป็นการนับจำนวนซ้ำของคำตอบ ซึ่งเมื่อคำตอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือให้ค่าซ้ำกันของคำตอบครบจำนวน 3 ครั้ง



รูปที่ 1 ผังแสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดลองจากแบบจำลองด้วยวิธีถดถอยพหุคูณ (Regression)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสองแบบหลายตัวแปร ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ด้วยวิธี Multiple Nonlinear Regressions จะได้รูปแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานแสดงดังสมการที่ (3)-(6)

$$CS_7 = 67.07-1902.68(W/B)-28.17(PR)+38.98(PS)+88.3(AC)+978.7(W/B)^2 -0.03(PR)^2+0.04(PS)^2+9.04(AC)^2+3.39(W/B)*(PR)+4.81(W/B)*(PS)-11.53(W/B)\ *(AC) -0.09(PR)*(PS)+3.86(PR)\ *(AC)-6.34(PS)\ *(AC) \quad (3)$$

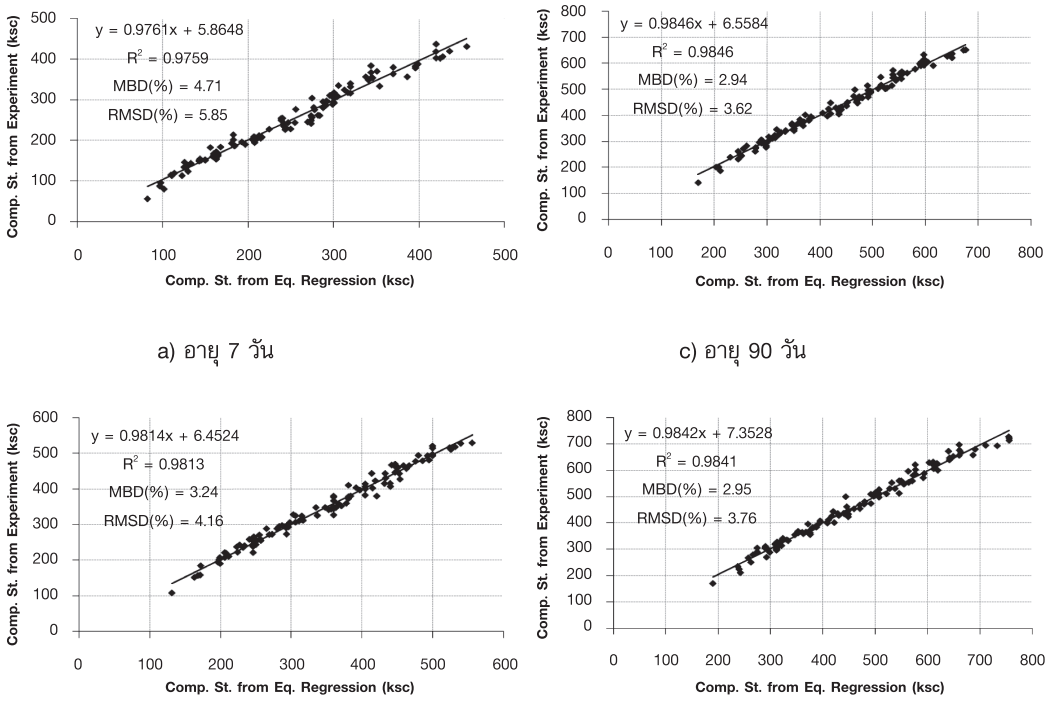
$$CS_{28} = 356.1-933.67(W/B)+7.01(PR)-5.12(PS)+14.01(AC)+843.05(W/B)^2 -0.05(PR)^2-0.07(PS)^2+0.49(AC)^2+0.3(W/B)*(PR)-0.05(W/B)*(PS)-30.35(W/B)\ *(AC) -0.07(PR)*(PS)-0.19(PR)\ *(AC)+0.21(PS)\ *(AC) \quad (4)$$

$$CS_{90} = 671.8-1129.01(W/B)+23.8(PR)+29.01(PS)-2.9(AC)+889.4(W/B)^2 -0.08(PR)^2-0.05(PS)^2+0.12(AC)^2+0.81(W/B)*(PR)+2.58(W/B)*(PS)-10.02(W/B)\ *(AC) -0.09(PR)*(PS)-0.23(PR)\ *(AC)-0.37(PS)\ *(AC) \quad (5)$$

$$CS_{180} = 473.76-1313.3(W/B)-33.62(PR)-21.05(PS)+3.47(AC)+1413.66(W/B)^2 -0.1(PR)^2+0.04(PS)^2+0.02(AC)^2+0.94(W/B)*(PR)+5.63(W/B)*(PS)-8.45(W/B)\ *(AC) -0.09(PR)*(PS)+0.21(PR)\ *(AC)+0.08(PS)\ *(AC) \quad (6)$$

เมื่อ CS_7 คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่อายุ 7 วัน
CS_{28} คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่อายุ 28 วัน
CS_{90} คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่อายุ 90 วัน
CS_{180} คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่อายุ 180 วัน
W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าอยู่ในช่วง 0.43-0.80
PR คือ ปริมาณการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก
PS คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วง 6.3-22.2 ไมครอน

สำหรับในรูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน โดยเปรียบเทียบผลการประมาณค่ากำลังอัดที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาถึงค่าสถิติตามเกณฑ์ทั่วไปค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ระดับดี คือมีค่า (Mean Bias Deviation, MBD) น้อยกว่าร้อยละ 10 และมีค่า (Multiple Correlation Coefficient, R^2) สูงกว่า 0.97 ทุกอายุการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งถือว่ามีค่าความแม่นยำที่สูงเพราะมีค่าใกล้เคียง 1.00 สำหรับค่า RMSD แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนรากกำลังสองเฉลี่ยของข้อมูลใช้สำหรับเปรียบเทียบว่าค่าต่างๆ ในเซตข้อมูลกระจายตัวออกไปมากน้อยเท่าใด หากข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยมาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะมีค่าน้อย ซึ่งในการทดลองนี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับดี

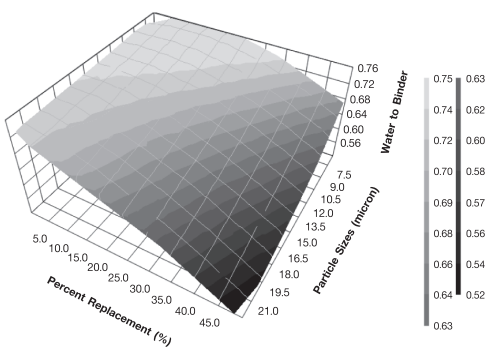


รูปที่ 2 ค่ากำลังอัดที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลอง

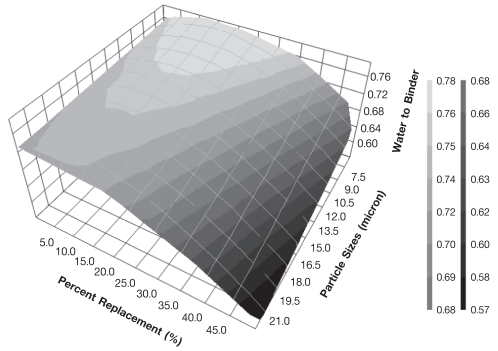
3.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

3.2.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

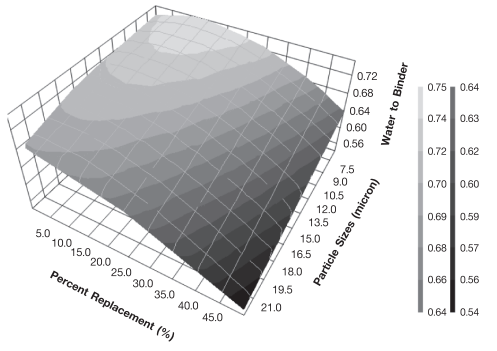
สำหรับการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยวิธีทั่วไปจำเป็นที่จะต้องปรับส่วนผสมใหม่หากส่วนผสมที่ทดลองผสมไม่เป็นไปตามที่ต้องการ [3] อีกทั้งยังทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาในการที่จะคำนวณออกแบบหรือทดลองส่วนผสมใหม่ ดังนั้นหากได้อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่แน่นอนย่อมทำให้เกิดความมั่นใจว่าจะได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการโดยในรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ขนาดอนุภาคและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดสำหรับการออกแบบกำลังอัดที่ 180, 280, 320 และ 420 กก./ซม.^{2} ที่อายุทดสอบ 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ โดยจากการสุ่มคัดเลือกคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบตามกำลังอัดเป้าหมาย 500 คำตอบเมื่อใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3)-(6) โดยนำมาแสดงผลในลักษณะคำตอบระนาบพื้นที่ผิวของอัตราส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งผู้ออกแบบสามารถกำหนดหรือเลือกออกแบบตามความเหมาะสมและความต้องการได้ จึงช่วยลดระยะเวลาของการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสามารถแสดงราคาต้นทุนที่เหมาะสมของในแต่ละอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้



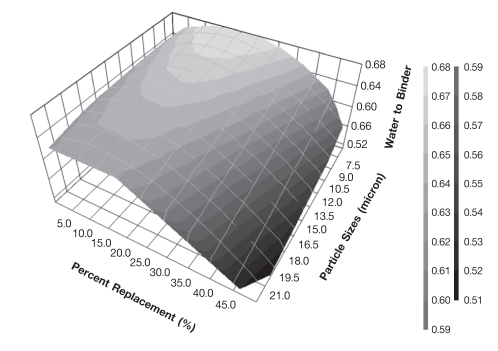
a) ออกแบบกำลังอัดที่ 180 กก./ซม.^{2} อายุ 7 วัน



c) ออกแบบกำลังอัดที่ 320 กก./ซม.^{2} อายุ 90 วัน



b) ออกแบบกำลังอัดที่ 280 กก./ซม.^{2} อายุ 28 วัน

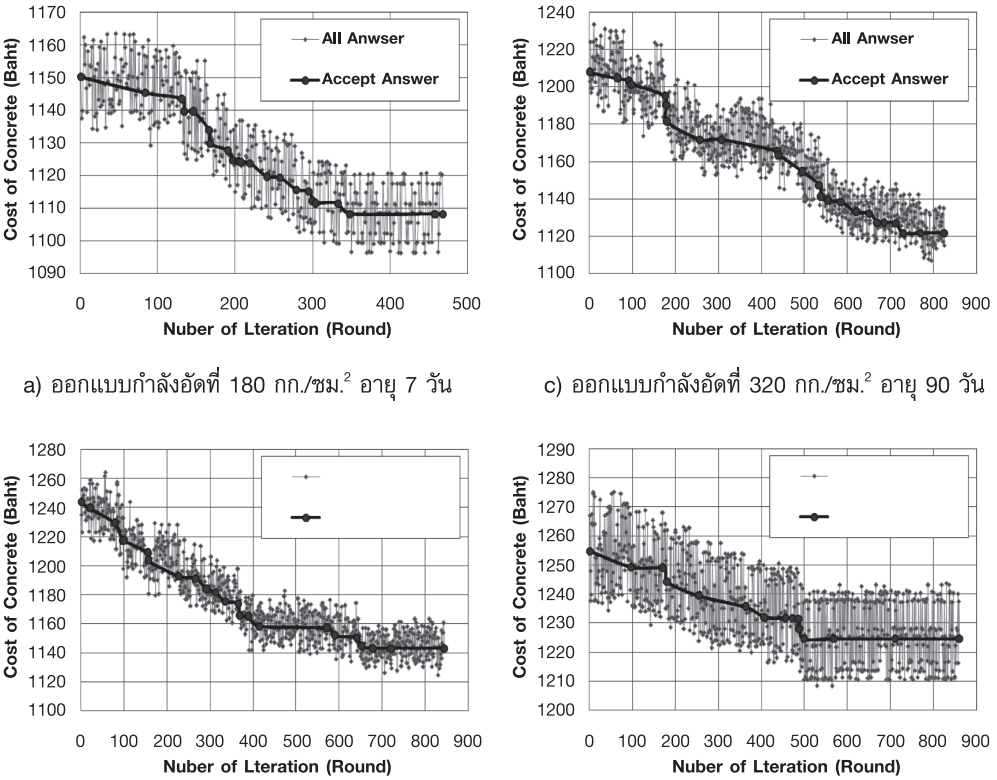


d) ออกแบบกำลังอัดที่ 420 กก./ซม.^{2} อายุ 180 วัน

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานขนาดอนุภาค
และปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

3.2.2 การลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

ในรูปที่ 4 แสดงกราฟข้อมูลการลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างราคาต้นทุนของคอนกรีตและจำนวนรอบของคำตอบ โดยแสดงในลักษณะคำตอบที่มีอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้ตามกำลังอัดเป้าหมาย (คำตอบที่ผ่านเงื่อนไข) และอัตราส่วนผสมของคอนกรีตไม่ได้ตามกำลังอัดเป้าหมาย (คำตอบที่ไม่ผ่านเงื่อนไข) โดยจากกราฟจะเริ่มค้นหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตจากราคาต้นทุนสูงสุดไปสู่ราคาที่มีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ 180, 280, 320 และ 420 กก./ซม.^{2} พบว่าที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ มีราคาต้นทุนของคอนกรีตจากสูงสุดจนถึงราคาต่ำสุดอยู่ในช่วง 1,150.1 ถึง 1,108.3, 1,243.8 ถึง 1,143.2, 1,207.7 ถึง 1,121.7 และ 1,254.7 ถึง 1,224.6 บาท ตามลำดับ โดยมีจำนวนรอบการค้นหาคำตอบเท่ากับ 468, 844, 826 และ 861 รอบ ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเท่ากับ 4, 7, 7 และ 8 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษา พบว่าฮิลไคลมิงอัลกอริทึมมีความรวดเร็วในการหาคำตอบดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวิธีทั่วไป



a) ออกแบบกำลังอัดที่ 180 กก./ซม.^{2} อายุ 7 วัน

c) ออกแบบกำลังอัดที่ 320 กก./ซม.^{2} อายุ 90 วัน

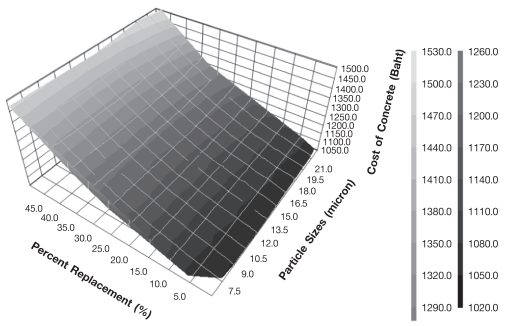
b) ออกแบบกำลังอัดที่ 280 กก./ซม.^{2} อายุ 28 วัน

d) ออกแบบกำลังอัดที่ 420 กก./ซม.^{2} อายุ 180 วัน

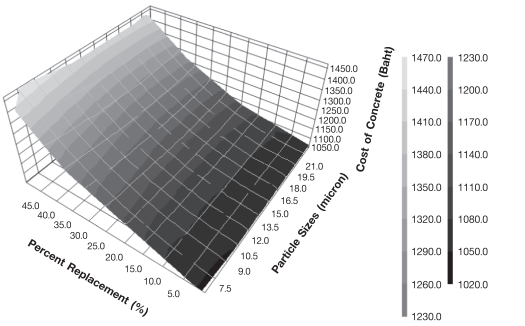
รูปที่ 4 การลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

3.2.3 ราคาต้นทุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

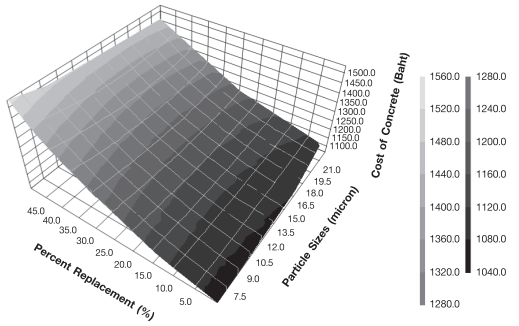
ในรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาต้นทุนของคอนกรีต ขนาดอนุภาคและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดพบว่าจากการใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสำหรับหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดและให้ราคาต้นทุนต่ำสุด เมื่อออกแบบกำลังอัดที่ 180 กก./ซม.^{2} สำหรับอายุ 7 วัน มีราคาต้นทุนของคอนกรีตต่ำสุดที่ 1,108.3 บ./ม.^{3} เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.71 โดยมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 8.9 และมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 22.1 ไมครอน สำหรับกำลังอัดที่ 280 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน มีราคาต้นทุนของคอนกรีตต่ำสุดที่ 1,143.2 บ./ม.^{3} เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.73 โดยมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 16.4 และมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 11.4 ไมครอน สำหรับกำลังอัดที่ 320 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 90 วัน มีราคาต้นทุนของคอนกรีตต่ำสุดที่ 1,121.7 บ./ม.^{3} เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.74 โดยมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 20.1 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 16.8 ไมครอน และสำหรับกำลังอัดที่ 420 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 180 วัน มีราคาต้นทุนของคอนกรีตต่ำสุดที่ 1,224.6 บ./ม.^{3} เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.63 โดยมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 19.1 และมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 22.2 ไมครอน ซึ่งหากต้องการอัตราส่วนผสมในปริมาณร้อยละหรือขนาดอนุภาคที่แตกต่างจากผลการทดลองนี้ก็สามารถทำได้โดยการลากเส้นกราฟความสัมพันธ์ของราคาต้นทุนของคอนกรีต ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณร้อยละการแทนที่และขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาบดละเอียด อีกทั้งยังทำให้ง่ายและรวดเร็วในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสามารถรู้ราคาต้นทุนของคอนกรีตก่อนการออกแบบได้ด้วย



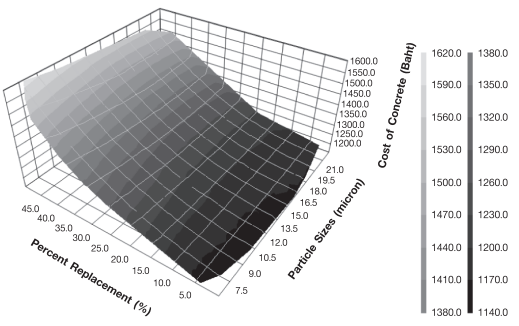
a) ออกแบบกำลังอัดที่ 180 กก./ซม.^{2} อายุ 7 วัน



c) ออกแบบกำลังอัดที่ 320 กก./ซม.^{2} อายุ 90 วัน



b) ออกแบบกำลังอัดที่ 280 กก./ซม.^{2} อายุ 28 วัน



d) ออกแบบกำลังอัดที่ 420 กก./ซม.^{2} อายุ 180 วัน

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาต้นทุนของคอนกรีต ขนาดอนุภาค และปริมาณแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

4. สรุปผลการวิจัย

สำหรับการประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีตสำหรับราคาต้นทุนต่ำสุด พบว่ามีประสิทธิภาพในแง่ของการประหยัดระยะเวลาในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้ดีกว่าวิธีทั่วไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สามารถคัดเลือกอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาต้นทุนต่ำสุดและได้กำลังอัดตามเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นฮิลไคลมิงอัลกอริทึมจึงมีความเหมาะสมสำหรับการหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังถือเป็นเครื่องมือในการค้นหาคำตอบที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพสูงเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมายและทุกคำตอบที่ได้นั้นสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการทดลองในรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสองแบบหลายตัวแปรโดยการวิเคราะห์หาค่าคงที่ด้วยวิธี Multiple Nonlinear Regressions แล้วตรวจสอบความแม่นยำของข้อมูลด้วยค่าทางสถิติโดยมีค่า R^2 สูงกว่า 0.97 ทุกอายุการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithm in search optimization and machine learning. New york : Addison-Wesley.

2. Pongcharoen, P., Stewardson, D. J., Hicks,

C. and Braiden, P. M., 2001. “Applying designed experiments to optimise the performance of Genetic Algorithms used for scheduling complex products in the capital goods industry”, Journal of Applied Statistics, 28(3), pp. 441-455.

3. Jaturapitakkul, C., Cheerarot, R., 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, No. 1, 2003, pp. 48-53.

4. Chindaprasirt, P., Jaturapitukkul, C., 2008. Cement Pozzolan and Concrete 5th. Thailand Concrete Association. (In Thai)

5. Johnson, A.W., Jacobson S.H., 2002. A class of convergent generalized hill climbing algorithms. Applied Mathematics and Computation, 125(3), 359-373

6. Sirinaovakul, B., 2007, Artificial Intelligence 1st ed., Bangkok : Top publishing. (In Thai)

7. Cano, A., Manual G., Serafin M., Joaquin A. 2007. Hill climbing and branch and bound Algorithms for exact and approximate, International Journal of Approximate Reasoning, 44(3), 261-280.