

## ค่าตัวคูณประสิทธิผลและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต

### The efficiency factor and optimum usage of ground bottom ash in concrete

ไพฑูรย์ นาสง และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์

Phaithun Nasaeng and Raungrut Cheerarot

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลจามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

โทร 081-5559481 โทรสาร 043-754316 E-mail: raungrut@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าตัวคูณประสิทธิผลและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต โดยออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.48, 0.62 และ 0.80 จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.3 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 180 วัน เพื่อประมาณค่าตัวคูณประสิทธิผลโดยประยุกต์ใช้สมการของ Papadakis ส่วนปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถหาได้จากค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตจากผลการศึกษาพบว่าค่าตัวคูณประสิทธิผลของเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.75 – 0.54, 1.86 – 0.62 และ 2.12 – 0.69 สำหรับที่อายุ 7, 28 และ 180 วัน ตามลำดับ และปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 180 วัน คือการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48

#### Abstract

This research was to study the efficiency factor and optimum usage of ground bottom ash in concrete. Concretes were designed water – binder ratio at 0.48, 0.62, and 0.80. Ground bottom ash with median particle size of 6.3  $\mu\text{m}$  was used to replace Portland cement at the rate of 10, 20, 30, 40, and 50% by weight of binder. Compressive strengths of concrete were test at the age of 7, 28, and 180 days to determine the

efficiency factor of ground bottom ash by Papadakis equation while the maximum compressive strength showed the optimum usage of ground bottom ash in concrete. From the result, it was found that the efficiency factor of ground bottom ash decrease with increasing water to binder ratio and percentage replacement. The efficiency factor ranged from 1.75 – 0.54, 1.86 – 0.62, and 2.12 – 0.69, for the ages of 7, 28, and 180 day, respectively. The optimum usage of ground bottom ash which gave the maximum compressive strength at 180 days is cement replacement at 28% by weight for water – binder ratio at the rate of 0.48.

#### 1. บทนำ

ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ทำให้มีผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ซึ่งในแต่ละปีมีเถ้าเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม แนวทางในการแก้ปัญหาที่วิธีหนึ่งคือ การใช้เถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุป่อโซลานในงานคอนกรีต จากการศึกษาที่ผ่านมา [1] พบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตได้ในหลายๆ ด้านเช่น เพิ่มกำลังอัดช่วงอายุปลาย ช่วยอุดช่องว่างเล็กๆ และเพิ่มความคงทน ในส่วนของเถ้าก้นเตาเนื่องจากรูปร่างที่พรุนและมีขนาดใหญ่ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานไม่ว่าจะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์หรือแทนที่มวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต ต่อมาได้มีการพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงพบว่าเถ้าก้นเตาบดเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุป่อโซลานทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลัง

อัตรารีดขึ้นเช่นเดียวกับการใช้ถั่วลันเตา [2-3] จากเหตุผลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าถั่วลันเตาที่มีความละเอียดมากมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนในงานคอนกรีตได้

ในการออกแบบคอนกรีตที่ผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนมีหลายวิธี และวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการออกแบบตามมาตรฐานของยุโรป ซึ่งเสนอให้ใช้ค่าตัวคูณประสิทธิภาพหรือที่เรียกสั้นๆ ว่าค่าแฟกเตอร์ k เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็ว [4] ซึ่งค่าแฟกเตอร์ k ของวัสดุพอลิโพรพิลีนนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์อย่างหนึ่งที่บ่งบอกประสิทธิภาพของวัสดุพอลิโพรพิลีนในการเป็นวัสดุประสานเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ โดยหากมีค่าแฟกเตอร์  $k = 1.00$  หมายความว่าวัสดุพอลิโพรพิลีนนั้นมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุประสานเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ สำหรับวัสดุพอลิโพรพิลีนที่มีคุณภาพสูงจะให้ค่าแฟกเตอร์ k สูงกว่า 1.00 [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมา Smith [6] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าแฟกเตอร์ k ของถั่วลันเตาจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนกับคอนกรีตควบคุมที่มีค่ากำลังอัดเท่ากัน ดังสมการที่ (1)

$$\frac{W}{C} = \frac{W/C'}{1 + (kF/C')} \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณวัสดุประสาน, C' คือ ปริมาณปูนซีเมนต์, W คือ ปริมาณน้ำ, k คือ ค่าตัวคูณประสิทธิภาพ และ F คือ ปริมาณถั่วลันเตา ต่อมา Papadakis และคณะ [7-8] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่าแฟกเตอร์ k ของวัสดุพอลิโพรพิลีนโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression และได้เสนอแบบจำลอง ดังสมการที่ (2)

$$f_c = K \left( \frac{1}{W/(C'+kP)} - a \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีต, P คือ ปริมาณวัสดุพอลิโพรพิลีน, K คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของปูนซีเมนต์ และ a คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอายุของการบ่ม จากผลการศึกษาพบว่าค่าแฟกเตอร์ k มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต โดยแบบจำลองสามารถประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ

ดังนั้นในการศึกษารังนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าตัวคูณประสิทธิภาพโดยประยุกต์ใช้สมการของ Papadakis และปริมาณที่เหมาะสมของถั่วลันเตาละเอียดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมถั่วลันเตาละเอียด

## 2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และถั่วลันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง จากนั้นนำมาปรับปรุงคุณภาพถั่วลันเตาโดยการบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มีค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 3.1 และมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว โมดูลัสความละเอียดมีค่าเท่ากับ 7.2

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดลอง

ออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48, 0.62 และ 0.80 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตควบคุมที่ 10 - 12 ซม. จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลันเตาละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก การหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมงจึงทำการถอดแบบและนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 180 วัน โดยอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงดังในตารางที่ 2

## 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

### 3.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2 พบว่าคอนกรีตผสมถั่วลันเตาละเอียดในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน เนื่องจากการแทนที่ในปริมาณที่ต่ำประกอบด้วยถั่ว

กันแต่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็ว [9] ใน ส่วนของปริมาณการแทนที่ร้อยละ 20 ถึง 50 กำลังอัดมีค่า ลดลงโดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 77 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับที่อายุ 180 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 40 มีค่าสูงกว่า คอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจาก ปฏิกิริยาปอซโซลาน โดย  $Ca(OH)_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินา ออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานได้มากขึ้นทำให้ได้ปริมาณ สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานเพิ่มสูงขึ้นเป็นผล ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น [10-11] จากผลการทดสอบ กำลังอัดเห็นได้ว่าถ้ากันตราบละเอียดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ ปอซโซลานที่ดี

**3.2 การหาค่าตัวคูณประสิทธิผลของเถ้าก้นเตาละเอียด**

ในการประมาณหาค่าแฟกเตอร์  $k$  ใช้ข้อมูลอัตราส่วนผสมและ ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต ผสมเถ้าก้นเตาละเอียดในตาราง 2 โดยกำลังอัดของ คอนกรีตควบคุมสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ได้จาก การทดลอง [7-8] ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$f_c = K \left( \frac{1}{W/C} - a \right) \tag{3}$$

- เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (ksc)
- $W$  คือ ปริมาณน้ำ ( $kg/m^3$ )
- $C$  คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ( $kg/m^3$ )
- $K$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ (ksc)
- $a$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเวลาและการบ่ม

ในกรณีของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาละเอียด สามารถประมาณค่ากำลังอัดได้จากสมการที่ (4)

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ ประสาน

Type	Portland cement	Ground Bottom ash
Chemical composition (%)		
SiO <sub>2</sub>	20.62	46.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.22	22.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	10.64
CaO	65.00	11.48
MgO	0.91	3.47
K <sub>2</sub> O	0.07	3.47
Na <sub>2</sub> O	0.50	0.07
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	0.07
SO <sub>3</sub>	2.70	1.52
LOI	1.13	2.72
Specific gravity	3.14	2.82
Retained on Sieve No. 325 (%)	12.5	4.9
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3240	6355
Median particle Size (micron)	13.0	6.3

$$f_{GB} = K \left( \frac{1}{W/(C'+kGB)} - a \right) \tag{4}$$

เมื่อ  $f_{GB}$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาละเอียด (ksc)

$GB$  คือ ปริมาณเถ้าก้นเตาละเอียด ( $kg/m^3$ )

$C'$  คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา ละเอียด ( $kg/m^3$ )

$k$  คือ ค่าตัวคูณประสิทธิผลของเถ้าก้นเตาละเอียด

การหาค่าแฟกเตอร์  $k$  ของเถ้าก้นเตาละเอียดนั้นได้ ใช้หลักการเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างคอนกรีตผสมเถ้าก้น เตาละเอียด กับคอนกรีตควบคุม ภายใต้สมมุติฐานว่า คอนกรีตได้รับการเทเข้าแบบกระทุ้งแน่น และบ่มอย่างถูกวิธี ซึ่งค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเวลาและการบ่มมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อนำ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีต

Concrete	Mix proportion (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	Compressive strength (ksc) - Percentage		
	Water	Cement	GB	Sand	Stone		Compressive strength (%)		
							7-day	28-day	180-day
CC-0.48	195	406	0	667	1024	12.0	344 - (100)	447 - (100)	577 - (100)
10GB-0.48	195	365	41	664	1020	11.5	370 - (108)	486 - (109)	642 - (111)
20GB-0.48	195	325	81	662	1016	12.0	351 - (102)	476 - (106)	649 - (113)
30GB-0.48	195	284	122	659	1012	11.0	346 - (101)	459 - (103)	642 - (111)
40GB-0.48	195	244	162	656	1008	10.5	320 - (93)	433 - (97)	586 - (102)
50GB-0.48	195	203	203	654	1004	12.0	275 - (80)	381 - (85)	532 - (92)
CC-0.62	195	315	0	740	1024	11.0	274 - (100)	360 - (100)	449 - (100)
10GB-0.62	195	284	32	738	1021	10.5	282 - (103)	378 - (105)	492 - (110)
20GB-0.62	195	252	63	736	1018	10.0	275 - (100)	367 - (102)	480 - (107)
30GB-0.62	195	221	95	733	1015	12.0	270 - (99)	363 - (101)	471 - (105)
40GB-0.62	195	189	126	731	1012	12.0	250 - (91)	337 - (94)	440 - (98)
50GB-0.62	195	158	158	729	1009	11.5	215 - (78)	296 - (82)	385 - (86)
CC-0.80	195	244	0	798	1024	10.5	163 - (100)	246 - (100)	312 - (100)
10GB-0.80	195	220	24	796	1022	11.5	165 - (101)	257 - (104)	334 - (107)
20GB-0.80	195	195	49	794	1020	10.0	160 - (98)	246 - (100)	324 - (104)
30GB-0.80	195	171	73	793	1017	11.0	165 - (101)	250 - (102)	322 - (103)
40GB-0.80	195	146	98	791	1016	10.5	143 - (88)	224 - (91)	295 - (95)
50GB-0.80	195	122	122	790	1013	10.0	125 - (77)	199 - (81)	263 - (84)

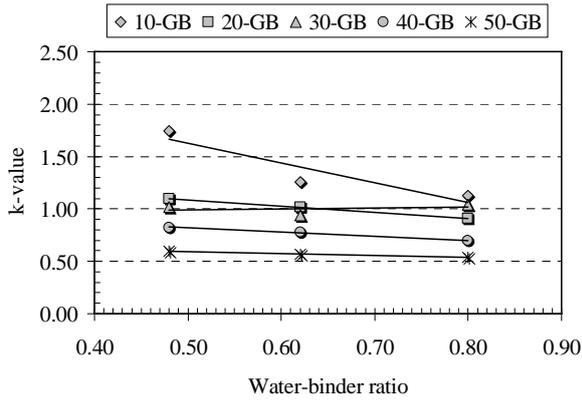
สมการที่ (4) ทหารด้วยสมการที่ (3) จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัด ( $R_f$ ) และปริมาณส่วนผสมดังสมการที่ (5)

$$R_f = \frac{f_{GB}}{f_c} = \frac{C'+kGB}{C} \quad (5)$$

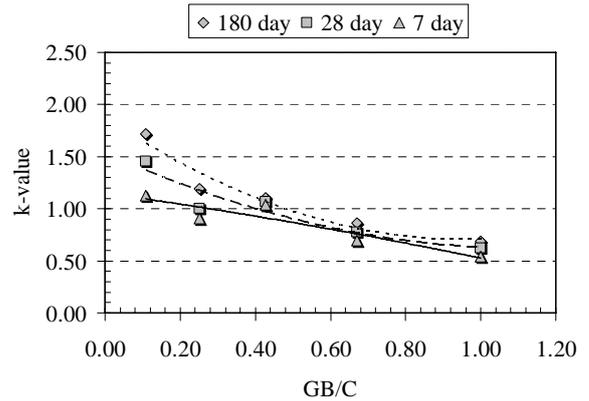
จากสมการที่ (5) สามารถหาค่าแฟกเตอร์  $k$  ได้ดังนี้คือ

$$k = \frac{R_f C - C'}{GB} \quad (6)$$

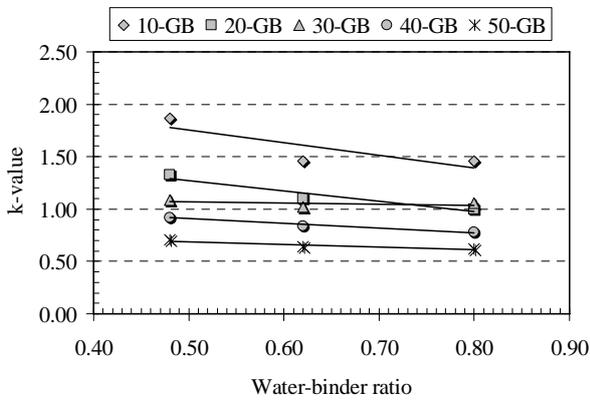
จากรูปที่ 1 แสดงค่าแฟกเตอร์  $k$  ของเอ้ากันเตาบดละเอียด พบว่าค่าแฟกเตอร์  $k$  มีค่าลดลงเมื่ออัตราน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bijen และ Van selst [12] และจากรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอ้ากันเตาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์กับค่าแฟกเตอร์  $k$  พบว่าเมื่ออายุเพิ่มขึ้นค่าแฟกเตอร์  $k$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเอ้ากันเตาบดละเอียดสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ในงานคอนกรีต [13-15] โดยเมื่อออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.48 – 0.80 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเอ้ากันเตาบดละเอียดในอัตราส่วน



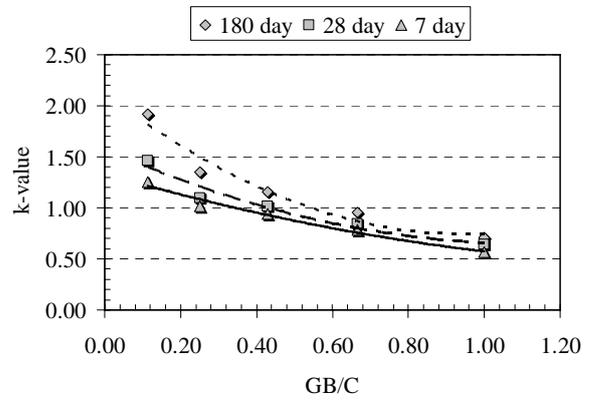
a) 7 - day



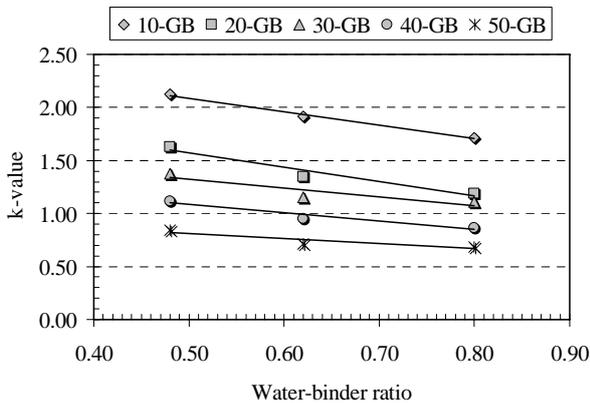
a) 7 - day



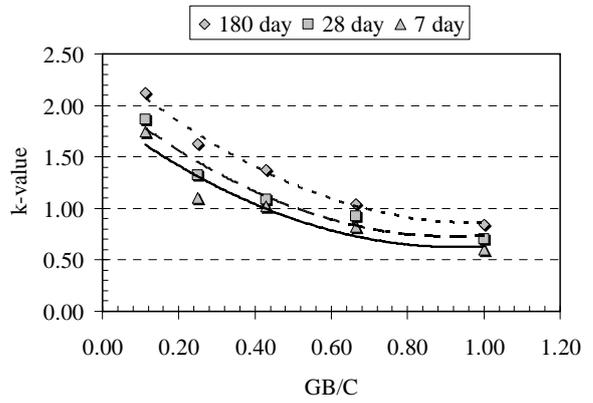
b) 28 - day



b) 28 - day



c) 180 - day



c) 180 - day

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับค่าแฟกเตอร์ k

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแก็กกันเทาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์กับค่าแฟกเตอร์ k

ร้อยละ 10 – 50 ค่าแฟกเตอร์ k ของเก้าอี้กันเตาบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วง 1.75 – 0.54, 1.86 – 0.62 และ 2.12 – 0.69 สำหรับที่อายุ 7, 28 และ 180 วันตามลำดับ

**3.3 แนวทางการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเก้าอี้กันเตาบดละเอียดโดยใช้ค่าตัวคูณประสิทธิผล**

การผลิตคอนกรีตโดยทั่วไปวัสดุประสานที่ใช้มีเพียงปูนซีเมนต์เท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ แต่สำหรับคอนกรีตผสมวัสดุปอชโซลานค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุสารซีเมนต์ประสิทธิผล (W/C<sub>eq</sub>) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกค่ากำลังอัดซึ่งสารซีเมนต์ประสิทธิผล (C<sub>eq</sub>) สามารถหาได้จากสมการที่ (7) [7,16]

$$C_{eq} = C + kP \tag{7}$$

เมื่อ C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (kg/m<sup>3</sup>) และ P คือ ปริมาณวัสดุปอชโซลาน (kg/m<sup>3</sup>) และ k คือ ค่าตัวคูณประสิทธิผล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการออกแบบคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานตามมาตรฐานของอังกฤษหรือของยุโรป [1,7] แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ k เฉลี่ยโดยมีค่าแตกต่างกันตามอายุการออกแบบของคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้แนะนำให้ใช้ค่า

แฟกเตอร์ k ที่ขึ้นอยู่กับแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

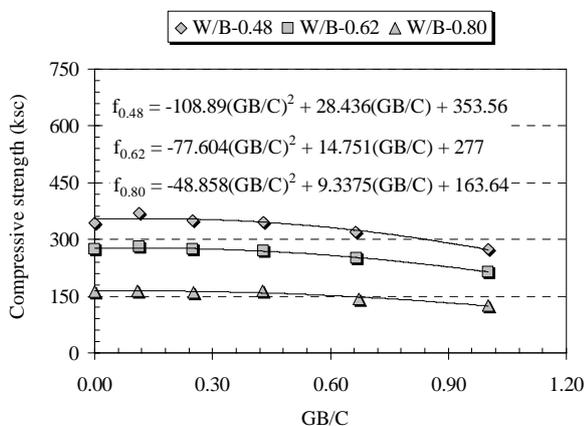
**3.4 ปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเก้าอี้กันเตาบดละเอียด**

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเก้าอี้กันเตาบดละเอียดจากค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต เพราะกำลังอัดถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของคอนกรีต โดยสามารถนำค่ากำลังอัดไปใช้งานได้โดยตรง อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกคุณสมบัติด้านอื่นๆ ได้ จากรูปที่ 3 – 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนเก้าอี้กันเตาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์พบว่าเส้นแนวโน้มกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เก้าอี้กันเตาบดละเอียดจนถึงจุดสูงสุดหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงเนื่องจากปริมาณ Ca(OH)<sub>2</sub> ไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยาปอชโซลาน

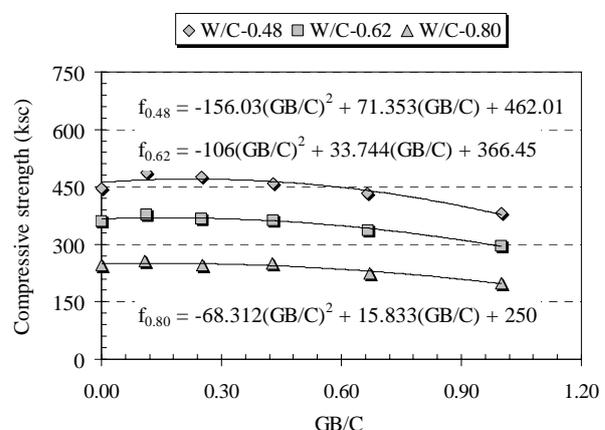
ปริมาณการใช้ที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดสามารถหาได้จากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองของเส้นแนวโน้มกำลังอัดที่ได้จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าอี้กันเตาบดละเอียดที่อัตราส่วนแตกต่างกันซึ่งอยู่ในรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$f_c = x(GB/C)^2 + y(GB/C) + z \tag{8}$$

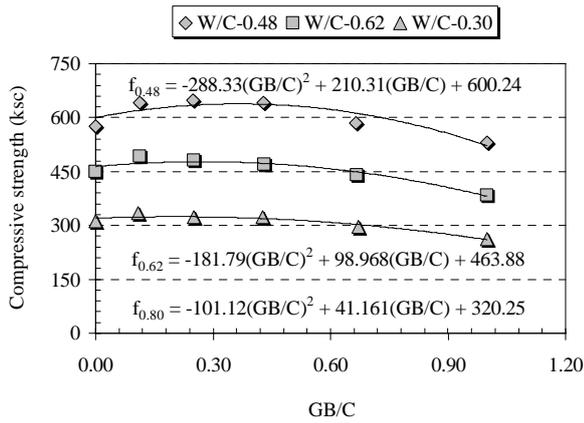
เมื่อ GB คือ ปริมาณเก้าอี้กันเตาบดละเอียด



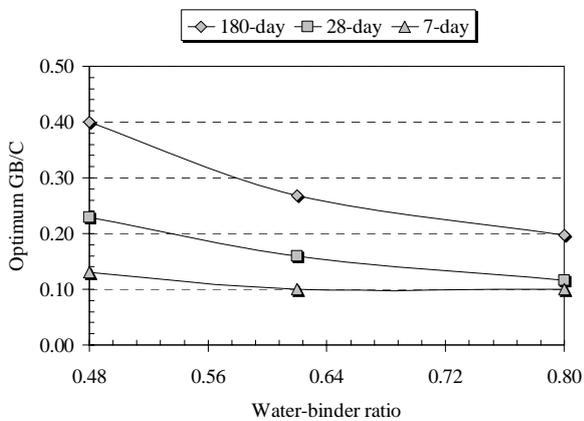
รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน



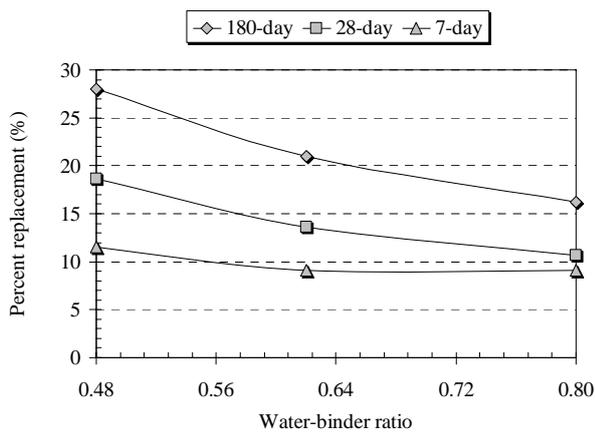
รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 180 วัน



รูปที่ 6 อัตราส่วนเถ้ากั้นเตาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



รูปที่ 7 ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์  
x, y และ z คือ ค่าคงที่

ค่าปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ โพลีโนเมียลกำลังสอง โดยค่า GB/C ที่ได้เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมของเถ้ากั้นเตาบดละเอียด ซึ่งค่าคงที่ต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3 – 5 และอัตราส่วนเถ้ากั้นเตาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 6 โดยเมื่อปรับอัตราส่วนเถ้ากั้นเตาบดละเอียดต่อปูนซีเมนต์เป็นร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าการออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 สามารถแทนที่ได้ร้อยละ 11.5, 18.6 และ 28 ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.62 สามารถแทนที่ได้ร้อยละ 9.1, 13.6 และ 21 และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.80 สามารถแทนที่ได้ร้อยละ 9.1, 10.7 และ 16.2 สำหรับที่อายุ 7, 28 และ 180 วันตามลำดับตามแสดงในรูปที่ 7

#### 4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าค่าตัวคูณประสิทธิภาพหรือค่าแฟกเตอร์ k ของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของผลการทดสอบกำลังอัดและอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าค่าแฟกเตอร์ k มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.48 – 0.80 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 – 50 ค่าแฟกเตอร์ k ของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วง 1.75 – 0.54, 1.86 – 0.62 และ 2.12 – 0.69 สำหรับที่อายุ 7, 28 และ 180 วันตามลำดับ ในส่วนของปริมาณการใช้ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต ซึ่งที่อายุ 180 วัน เมื่อออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 จะมีปริมาณการใช้เถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นปริมาณการใช้เถ้ากั้นเตา

บดละเอียดที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.80 จะมีปริมาณการใช้เถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่เหมาะสมคือร้อยละ 16.2 โดยน้ำหนัก

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต”, สมาคมคอนกรีตไทย (สคท.) พ.ศ. 2551 หน้า 303
- [2] เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล “การใช้เถ้ากั้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลาน”, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ฉบับที่ 2 ปีที่ 14 พ.ศ. 2546 หน้า 1-7
- [3] ไกรวุฒิ ดันติสุขารมย์, จตุพล ตั้งปกาศิต และเรืองรุชดี ชีระโรจน์. “ผลการอัดตัวของอนุภาคและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด”, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ฉบับที่ 1 ปีที่ 17 พ.ศ. 2549 หน้า 52-59
- [4] ปัญญา คำมะนิศย์ และปริญญา จินดาประเสริฐ “การหาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลของเถ้าลอยแม่เมาะ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9 พ.ศ. 2547 หน้า MAT 77-82
- [5] H.S. Wong and H.A. Razak, “Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 696 – 702.
- [6] I.A. Smith, “The design of fly ash concretes”, Proc.-Inst., Civ. Eng., Lond., Vol.36, 1967, pp. 770 – 789.
- [7] V.G. Papadakis and S. Tsimas, “Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 1525–1532.

- [8] V.G. Papadakis, S. Antiohos, S. Tsimas, “Supplementary cementing materials in concrete Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 1533–1538.
- [9] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij and S. Chutubtim, “A study of ground coarse fly ashes with different finesses from various sources as pozzolanic materials”, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, 2001, pp. 335 – 343.
- [10] B.Y. Pekmezci and S. Akyuz, “Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 2175 – 2179.
- [11] A. Oner, S. Akyuz and R. Yildiz, “An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1165 – 1171.
- [12] J. Bijen and R.V. selst, “Cement equivalence factor for fly ash”, Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, pp. 1029 – 1039.
- [13] K.G. Babu “Efficiency of fly ash in concrete with age”, Cement and Concrete Research, Vol. 26, 1996, pp. 465 – 474.
- [14] K.G. Babu and V.S.R. Kumar, “Efficiency of GGBS in concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1031 – 1036.
- [15] K.G. Babu and P.V.S. Prakash, “Efficiency of silica fume in concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, 1995, pp. 1273 – 1283.
- [16] V.G. Papadakis and S. Tsimas, “Greek supplementary cementing materials and their incorporation in concrete”, Cement & Concrete Composites, Vol. 27, 2005, pp. 223 – 230.