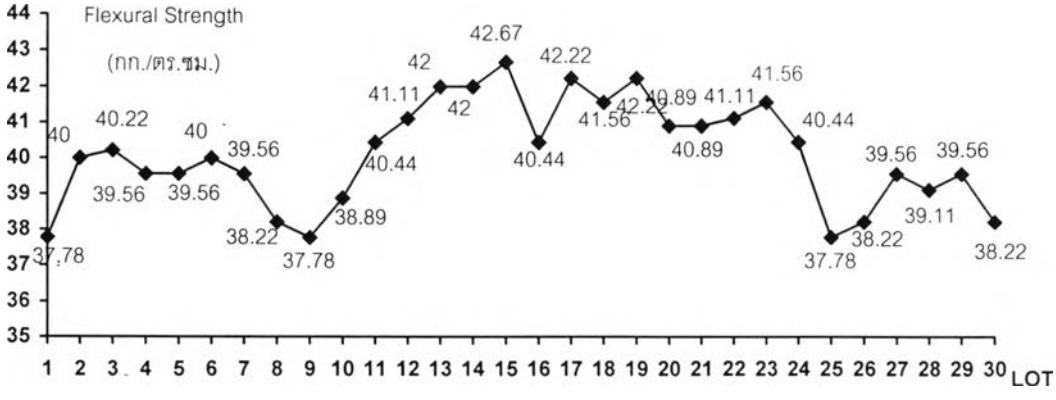
บทที่ 4
การดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในการวิจัยครั้งนี้ จะเริ่มจากการสำรวจสภาพปัจจุบันของการผลิตกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา รวมทั้งระดับคุณภาพของกระเบื้องในส่วนของความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง โดยกระเบื้องชนิดที่จะทำการศึกษา เป็นกระเบื้องรูปลอนโค้งใหญ่ ซึ่งปัจจุบันวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ โดยมีสัดส่วนของวัถตุดิบในการผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 3.8 มีน้ำหนักกระเบื้องเท่ากับ 4.0 กิโลกรัมต่อแผ่น จากการเก็บข้อมูลกระเบื้องที่ทำการผลิตในปัจจุบัน พบว่ามีค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง ทดสอบ ณ กระเบื้องมีอายุ 7 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 181 กก.หรือมีค่า Flexural Strength เท่ากับ 40.22 กก./ตร.ซม. (กระเบื้องมีค่าความกว้างเท่ากับ 33 ซม. มีระยะ span ในการทดสอบเท่ากับ 33 ซม. และความหนาของกระเบื้องเท่ากับ 1.5 ซม.) โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงกดเท่ากับ 6.55 หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Flexural Strength เท่ากับ 1.45 โดยมีรายละเอียดค่าแรงกดตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่า Flexural Strength กระเบื้อง ระหว่างเดือน มิย.-กย. 2542

ในปัจจุบันมาตรฐานค่า Flexural Strength ของกระเบื้องต้องไม่น้อยกว่า 40 กก./ตร.ซม. จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ามีบางส่วนที่อยู่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ในขณะที่อีกบางส่วนมีค่าที่เกินมาตรฐาน

ซึ่งการจะแก้ปัญหากรณีที่กระเบื้องมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่ามาตรฐาน สามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรก คือ การลดความไม่สม่ำเสมอของค่าความแข็งแรง หรือการลดค่า SD ของค่าความแข็งแรง สาเหตุของความไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดเนื่องจากความผันผวนหรือความไม่สม่ำเสมอของการควบคุมกระบวนการ ความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของกระเบื้อง หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดในการทำงานของพนักงาน (Human Error) อีกวิธีหนึ่งคือการยกระดับของค่าเฉลี่ยให้เพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้ค่าที่เกิดขึ้นภายใต้ความไม่สม่ำเสมอ (ค่า SD) มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งแนวทางของวิธีนี้คือการปรับระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรง เช่น ปัจจัยด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ปัจจัยทางด้านการผลิต เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้ จะมุ่งเน้นที่การยกระดับค่าเฉลี่ยของค่า Flexural Strength เพื่อให้ได้ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้น สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยการปรับปัจจัยทางด้านวัตถุดิบ ซึ่งจากค่าเฉลี่ยที่ได้เท่ากับ 40.22 กก./ตร.ซม. และค่า SD เท่ากับ 1.45 ดังนั้นการกำหนดเกณฑ์เฉลี่ยใหม่ จะคำนวณจากค่าที่ยอมรับได้หรือค่ามาตรฐาน บวกกับ 3 เท่าของ SD (ยอมได้มีโอกาสเกิดของเสีย 0.15%) เมื่อคำนวณจะได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40 + 3(1.45) เท่ากับ 44.35 กก./ตร.ซม. ซึ่งจะใช้เป็นเป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพให้ได้ค่าความแข็งแรงตามเป้าหมายใหม่

ในส่วนของต้นทุนวัตถุดิบ ปัจจุบันทำการผลิตที่สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.8 ต่อ 1 โดยมีต้นทุนในการผลิตในส่วนของวัตถุดิบเฉลี่ยเท่ากับ 1.9257 บาทต่อแผ่น ดังนั้นเงื่อนไขในการศึกษาครั้งนี้ ต้นทุนวัตถุดิบที่เกิดขึ้นภายหลังจากการปรับปรุง จะต้องไม่เกินจากต้นทุนก่อนการปรับปรุง หรือไม่เกิน 1.9257 บาทต่อแผ่น

4.1 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

ในขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้ จะมุ่งเน้นในการปรับสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต รวมทั้งการทดลองเพิ่มวัตถุดิบใหม่ในกระเบื้อง เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของกระเบื้อง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กำหนดคุณสมบัติของกระเบื้องคือค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง ที่กระเบื้องอายุ 7 วัน รวมทั้งมีเป้าหมายในการศึกษาหาแนวทางในการลดต้นทุนในการผลิตลงด้วย

ปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะประกอบด้วย

1. อัตราส่วนปริมาณทรายต่อปูนซีเมนต์ กำหนดให้เป็นตัวแปร A
2. ปริมาณของเถ้าลอย (หน่วยเป็นกิโลกรัม) ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. กำหนดให้เป็นตัวแปร B
3. ปริมาณของ Superplasticizer (หน่วยเป็นลิตร) ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. กำหนดให้เป็นตัวแปร C

อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ (A) หมายถึงสัดส่วนของปริมาณทรายที่ใช้ในการผลิตกระเบื้อง 1 แผ่น ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิตกระเบื้อง 1 แผ่น โดยปริมาณวัตถุดิบทั้งสองประเภทมีหน่วยเป็นกิโลกรัม

ปริมาณของเถ้าลอย (B) หมายถึง ปริมาณของเถ้าลอยหรือ Fly Ash ที่ใช้โดยน้ำหนักมีหน่วยเป็นกิโลกรัม ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. โดยเถ้าลอยที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะนำมาจากแหล่งแม่เมาะ

ปริมาณ Superplasticizer ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (C) หมายถึง ปริมาณของ Superplasticizer ที่ใช้ โดยมีหน่วยเป็นลิตร เทียบกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ 100 กก. โดย Superplasticizer ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะเป็นสารลดปริมาณน้ำในกลุ่มสารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Type F) ตามมาตรฐาน ASTM C-494 มีคุณสมบัติละลายได้ในน้ำ (Water Soluble) และส่วนผสมพื้นฐานเป็นสารโพลีเมอร์ซัลโฟเนต (Sulphonated Polymer) โดยเป็นชนิด Category A ประเภท Sulphonated melamine-formaldehyde condensates

ในแต่ละปัจจัยได้มีการกำหนดระดับในการศึกษาไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

ปัจจัย	จำนวนระดับ	รายละเอียดของปัจจัย		
		1	2	3
A	3	3.6	3.8	4.0
B	3	0	10	0
C	3	0	0.67	0

การกำหนดระดับของปัจจัย A หรืออัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ จะเริ่มจากการกำหนดเบื้องต้นที่ระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เท่ากับ 3.8 จากนั้นทำการปรับอัตราส่วนในทิศทางเพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับเป็น 4.0 (เพิ่มปริมาณทราย) และ 3.6 (ลดปริมาณทราย) เพื่อหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ ต่อค่าความแข็งแรงของกระเบื้อง

ในปัจจัย B หรือปริมาณของเถ้าลอย ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. จะเริ่มจากการกำหนดสภาพเดิมก่อนการศึกษา คือไม่มีการใช้เถ้าลอยหรือที่ระดับเท่ากับ 0 % และจากการทบทวนเอกสารพบว่า ในการศึกษาส่วนใหญ่จะกำหนดปริมาณการใช้ไว้ที่ระดับเท่ากับ 20 % หรือ 20 กก. ต่อการใช้ปูนซีเมนต์ 100 กก. ดังนั้นในระดับปัจจัยที่ 3 จะกำหนดให้แบ่งครึ่งระหว่างระดับที่ 1 และระดับที่ 2 คือมีค่าระดับเท่ากับ 10 % หรือ 10 กก. ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ 100 กก.

ในส่วนของปัจจัย C หรือปริมาณของ Superplasticizer หน่วยเป็นลิตรต่อปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ 100 กก. จากเอกสารทางเทคนิคของ Superplasticizer ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ระบุว่าการใช้ปริมาณที่เกิน 1.5 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก. จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านความแข็งแรงของส่วนผสม ดังนั้นจึงกำหนดระดับของปัจจัยที่ 0 (สภาพก่อนการศึกษา) และ 1.5 ลิตรต่อปริมาณปูนซีเมนต์ 100 กก. ในระดับที่ 3 จากการพิจารณาในการนำไปทดลองทำก้อนตัวอย่าง การใช้ปริมาณที่ครึ่งหนึ่งของระดับ 1.5 จะใช้ปริมาณของ Superplasticizer เท่ากับ 2.25 ลิตร (เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองต่อตัวอย่างเท่ากับ 200 กรัม) ซึ่งเป็นปริมาณที่ตวงได้ยาก โอกาสผิดพลาดมีสูง ดังนั้นจึงกำหนดให้ปริมาณ Superplasticizer ในการทดลองในระดับที่ 3 เท่ากับ 2.0 ลิตร หรือคิดเป็น 0.67 ลิตรต่อปริมาณปูนซีเมนต์ 100 กก.

โดยกำหนดจุดวัด หรือค่าผลลัพท์จากการทดลองเป็นค่าความแข็งแรงของกระเบื้อง ซึ่งวัดจากค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง ที่อายุ 7 วัน กำหนดให้เป็นตัวแปร Y ดังนั้นจะสามารถเขียนเป็นองค์ประกอบของปัจจัยในการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.2 และในการทดลองครั้งนี้ได้กำหนดให้จำนวนซ้ำในการทดลองแต่ละกลุ่มการทดลองเท่ากับ 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของปัจจัยในการทดลอง

ปริมาณ Fly Ash (B)	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (A)								
	3.6			3.8			4.0		
	ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)		
	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5
0	Y1	Y4	Y7	Y10	Y13	Y16	Y19	Y22	Y25
10	Y2	Y5	Y8	Y11	Y14	Y17	Y20	Y23	Y26
20	Y3	Y6	Y9	Y12	Y15	Y18	Y21	Y24	Y27

4.2 รูปแบบการทดลอง

ในการกำหนดรูปแบบในการทดลองของการศึกษาครั้งนี้ จากองค์ประกอบของปัจจัยที่กำหนดขึ้น ก่อนที่จะทำการกำหนดรูปแบบการศึกษาในสายการผลิตจริง จะทำการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในชิ้นงานตัวอย่าง ที่สามารถอธิบายถึงสภาพของการผลิตจริงได้ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการศึกษาด้วย การหาส่วนผสมที่เหมาะสมภายใต้ตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณ Fly Ash และ ปริมาณ Superplasticizer โดยแนวทางในการศึกษาจะดำเนินการโดยการจัดทำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่าง แล้วจึงทำการวัดค่า Bending Strength เปรียบเทียบแต่ละสูตรที่กำหนดไว้ ในการทำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่าง จะผสมส่วนผสมตามสูตรที่กำหนดในตารางที่ 4.3

แล้วอัดขึ้นรูปภายใต้แรงกดอัดที่คงที่ เท่ากับ 10 กก. เขย่าขึ้นรูปเป็นระยะเวลา 3 นาที จนเป็นก้อนมอร์ตาร์สี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 5 ซม. สูง 1 ซม. และยาว 15 ซม. มีค่า density ของก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างเท่ากับ 6.13 กรัม/ซม.^{3} โดยกำหนดให้ทำสูตรละ 3 ตัวอย่าง (จำนวนในการซ้ำ) จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาทำการทดสอบหา Bending Strength ที่ระยะ span เท่ากับ 12 ซม. แล้วนำค่าทั้งหมดมาคำนวณหาค่า Flexural Strength ต่อไป

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผสมของวัตถุดิบในการทำก้อนมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์		ทราย	เถ้าลอย (Fly Ash)		Superplasticizer	
	สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปริมาณทราย (กรัม)	ปริมาณ Fly Ash (กก.ต่อปูน 100 กก.)	ปริมาณ Fly Ash (กรัม)	ปริมาณ Super-plasticizer (ลิตรต่อปูน 100 กก.)	ปริมาณ Super-plasticizer (ลิตร)
Y1	3.6	300	1080	0	0	0	0
Y2	3.6	300	1080	10	30	0	0
Y3	3.6	300	1080	20	60	0	0
Y4	3.6	300	1080	0	0	0.67	2
Y5	3.6	300	1080	10	30	0.67	2
Y6	3.6	300	1080	20	60	0.67	2
Y7	3.6	300	1080	0	0	1.5	4.5
Y8	3.6	300	1080	10	30	1.5	4.5
Y9	3.6	300	1080	20	60	1.5	4.5
Y10	3.8	300	1140	0	0	0	0
Y11	3.8	300	1140	10	30	0	0
Y12	3.8	300	1140	20	60	0	0
Y13	3.8	300	1140	0	0	0.67	2
Y14	3.8	300	1140	10	30	0.67	2
Y15	3.8	300	1140	20	60	0.67	2
Y16	3.8	300	1140	0	0	1.5	4.5
Y17	3.8	300	1140	10	30	1.5	4.5
Y18	3.8	300	1140	20	60	1.5	4.5
Y19	4.0	300	1200	0	0	0	0
Y20	4.0	300	1200	10	30	0	0
Y21	4.0	300	1200	20	60	0	0
Y22	4.0	300	1200	0	0	0.67	2
Y23	4.0	300	1200	10	30	0.67	2
Y24	4.0	300	1200	20	60	0.67	2
Y25	4.0	300	1200	0	0	1.5	4.5
Y26	4.0	300	1200	10	30	1.5	4.5
Y27	4.0	300	1200	20	60	1.5	4.5

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากรูปแบบการทดลองตามที่กำหนดในตารางที่ 4.3 นำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างในแต่ละสูตร ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างสูตรละ 3 ตัวอย่าง มาทำการทดสอบหาค่า Flexural Strength ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยมีหน่วยการวัดเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำหนดให้จำนวนซ้ำในการทดลองเท่ากับ 2 ได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ Flexural Strength ชิ้นงานตัวอย่าง ครั้งที่ 1

(กก./ตร.ซม.)

ปริมาณ Fly Ash (B)	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (A)								
	3.6			3.8			4.0		
	ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)		
	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5
0	78.5	79.5	85.6	76.4	75.4	83.6	67.3	63.2	81.5
	77.5	78.5	81.5	75.4	75.4	79.5	59.1	69.3	79.5
	73.4	76.4	87.6	69.3	71.3	85.6	65.2	63.2	75.4
10	73.4	75.4	78.5	67.3	72.4	74.4	59.1	63.2	69.3
	65.2	77.5	79.5	61.1	75.4	81.5	63.2	63.2	65.2
	68.3	75.4	83.6	65.2	71.3	79.5	66.2	67.3	71.3
20	64.2	66.2	69.2	61.1	63.2	67.3	54.0	64.2	69.3
	65.2	67.3	69.3	63.2	63.2	63.2	57.1	66.2	70.3
	64.2	69.3	68.3	60.1	65.2	69.3	57.1	62.2	63.2

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Flexural Strength ชิ้นงานตัวอย่าง ครั้งที่ 2

(กก./ตร.ซม.)

ปริมาณ Fly Ash (B)	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (A)								
	3.6			3.8			4.0		
	ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)		
	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5
0	77.5	79.5	83.6	68.3	71.3	81.5	65.2	69.3	75.4
	75.4	77.5	83.6	73.4	71.3	79.5	66.2	69.3	74.4
	71.3	80.5	85.6	72.4	73.4	79.5	65.2	69.3	71.3
10	71.3	74.4	81.5	68.3	69.3	73.4	63.2	65.2	69.3
	69.3	73.4	82.5	66.2	71.3	76.4	65.2	65.2	68.3
	72.4	72.3	78.5	66.2	71.3	75.4	62.2	67.3	69.3
20	66.2	69.3	75.4	62.2	66.2	69.3	59.1	61.1	66.2
	66.2	68.3	77.5	64.2	68.3	73.4	58.1	63.2	62.2
	69.3	69.3	73.4	61.1	63.2	71.3	61.1	63.2	66.2

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบหลักต่อการทดลอง จากตารางเป็นการคำนวณหาค่าผลรวมของค่าทดสอบของการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ค่าผลรวมของค่าที่ทดสอบในแต่ละสูตรการทดลอง

(กก./ตร.ซม.)

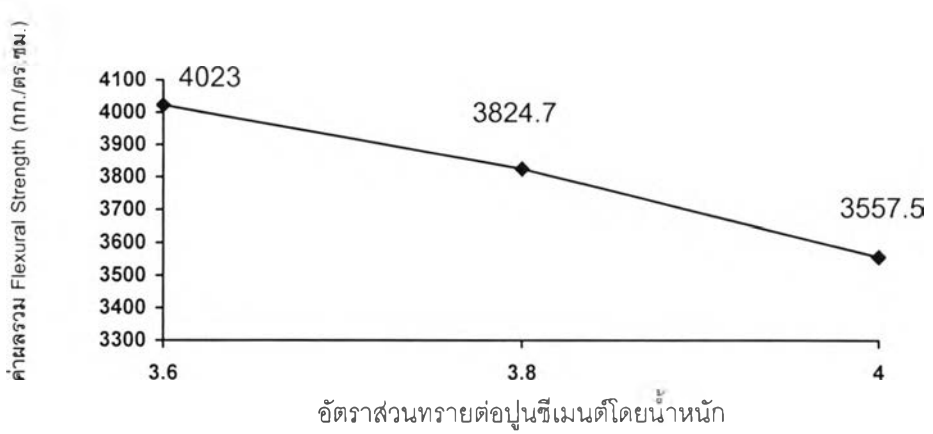
ปริมาณ Fly Ash (B)	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (A)								
	3.6			3.8			4.0		
	ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)			ปริมาณ Superplasticizer (C)		
	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5	0	0.67	1.5
0	453.6	471.9	507.6	435.2	438.3	489.3	388.4	403.7	457.7
10	419.9	447.5	484.2	394.5	431.2	460.7	379.2	391.4	412.8
20	395.5	409.8	433.2	372.0	389.4	413.8	346.6	380.2	397.5
$Y_{i.k.}$	1269.1	1329.2	1425.1	1201.8	1258.9	1363.9	1114.2	1175.3	1268.1
$Y_{i...}$	4023.4			3824.7			3557.5		
$Y_{....}$	11405.6								

สามารถเขียนเป็นตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

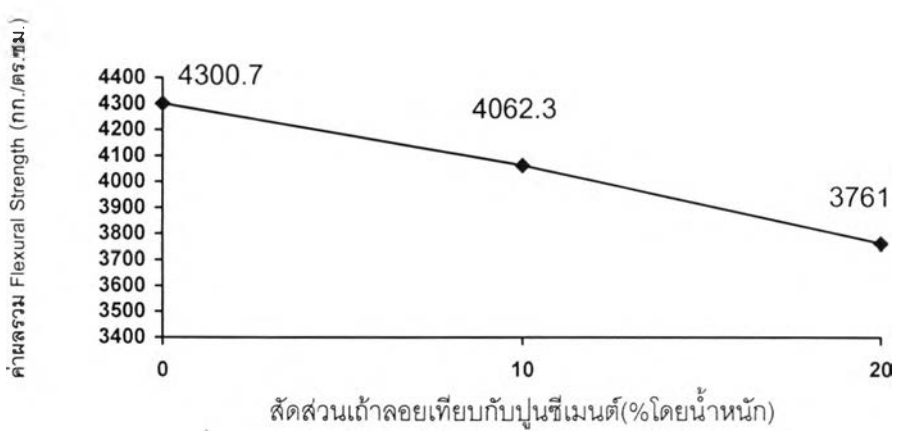
Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
Sand : Cement Ratio (A)	198.57	2	92.28	143.74
Fly Ash (B)	235.17	2	117.59	183.14
Superplasticizer (C)	206.42	2	103.21	160.81
AB	3.567	4	0.891	1.39
AC	9.07	4	2.267	3.53
BC	0.20	4	0.05	0.079
ABC	15.49	8	1.93	3.02
Error	86.64	135	0.642	
Total	755.15	161		

จากนั้น ทำการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย A โดยการนำค่าผลกระทบของความต้านทานแรงกดตามขวาง มาเปรียบเทียบภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่า A จะได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าค่า A มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของชิ้นงานตัวอย่าง มีการปรับตัวลดลง



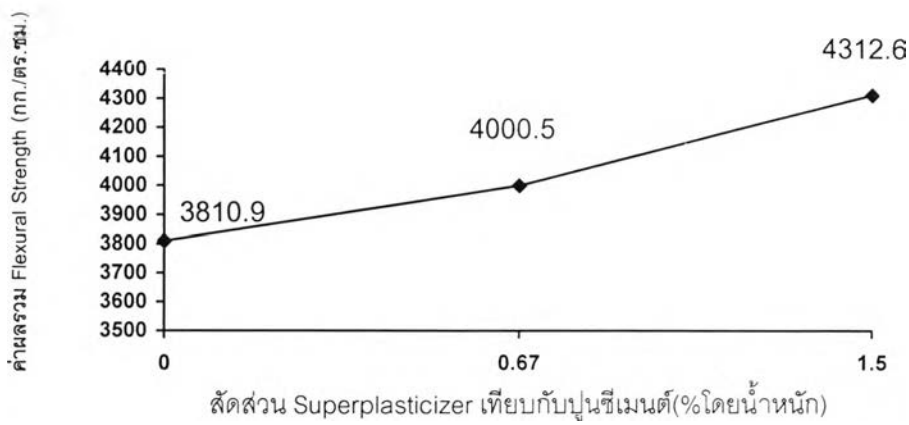
รูปที่ 4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A

ในส่วนของผลกระทบจากปัจจัย B หรือปริมาณของเถ้าลอย จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าถ้า B เพิ่มสูงขึ้น หรือการใส่เถ้าลอยในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Flexural Strtength ของชิ้นงานลดน้อยลง



รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย B

ในขณะที่ถ้าเติม Superplasticizer เพิ่มสูงขึ้น หรือมีการปรับค่า C เพิ่มสูงขึ้น จากรูปที่ 4.4 จะส่งผลให้ค่า Flexural Strength ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย C

4.4 การวิเคราะห์ผลจากการทดลองในสายการผลิตจริง

จากผลการทดลองในชิ้นงานตัวอย่าง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทั้ง 3 ประเภท ได้ทำการคัดเลือกรูปแบบการผสมจำนวน 7 สูตร เพื่อทำการผลิตในสายการผลิตจริง เป็นการยืนยันผลว่ามีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่างหรือไม่ โดยกำหนดให้

สูตร 1 จะเป็นการกำหนดให้อัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ หรือปัจจัย A มีค่าเท่ากับ 3.8 ซึ่งเท่ากับสัดส่วนที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องปัจจุบัน ส่วนปัจจัย B หรือปริมาณเถ้าลอย กำหนดให้เท่ากับ 0 และปัจจัย C หรือปริมาณของ Superplasticizer ที่ใส่ในส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 0 ด้วย ดังนั้น สูตร 1 จึงเป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องตามปกติ

สูตร 2 และสูตร 3 จะทำการปรับปัจจัย A หรืออัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ ลดลงจาก 3.8 เป็น 3.6 และเพิ่มขึ้นจาก 3.8 เป็น 4.0 หมายถึงการลดและเพิ่มปริมาณของทราย โดยยังคงปริมาณของปูนซีเมนต์ให้เท่าเดิม ส่วนปริมาณของเถ้าลอย (ปัจจัย B) และ Superplasticizer (ปัจจัย C) กำหนดให้เท่ากับ 0

สูตร 4 และสูตร 5 จะยังคงใช้ขนาดของอัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.8 เหมือนกับสูตร 1 ในขณะที่ปริมาณของ Superplasticizer กำหนดให้เท่ากับ 0 ส่วนปัจจัย B หรือปริมาณของเถ้าลอย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 % และ20 % โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ (จากการทดลองในชิ้นงานตัวอย่าง การใส่เถ้าลอยในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของกระเบื้องลดต่ำลง)

สูตร 6 และสูตร 7 จะเป็นการกำหนดอัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับสูตร 1 คือเท่ากับ 3.8 แต่ทำการเพิ่มปริมาณของ Superplasticizer หรือปัจจัย C ในส่วนผสม โดยเพิ่มเป็น 0.67

และ 1.5 ลิตรต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ 100 กก. ตามลำดับ (จากการทดลองในชิ้นงานตัวอย่าง การใส่ Superplasticizer จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระเบื้องเพิ่มสูงขึ้น) ในขณะที่ปัจจัย B หรือปริมาณของเถ้าลอยในส่วนผสม ยังคงกำหนดให้เท่ากับ 0

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการทดลองนี้ สูตร 2 และสูตร 3 จะเป็นการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย A ในสูตร 4 และสูตร 5 จะเป็นการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย B และในสูตร 6 และสูตร 7 จะเป็นการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย C เปรียบเทียบกับสภาพการผลิตปกติปัจจุบัน หรือสูตร 1 ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนของวัตถุดิบในการทดลองในสายการผลิต

สูตร	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีมนต์	ปริมาณ Fly Ash (%)	ปริมาณ Superplasticizer (%)
1	3.8	0	0
2	3.6	0	0
3	4.0	0	0
4	3.8	10	0
5	3.8	20	0
6	3.8	0	0.67
7	3.8	0	1.50

จากนั้นทำการทดลองในสายการผลิตกระเบื้องจริง โดยทำการผลิตสูตรละ 80 แผ่น และทำการสุ่มกระเบื้องจำนวน 3 แผ่น มาทำการทดสอบความต้านทานแรงกดตามขวางของ กระเบื้อง ณ อายุ 7 วัน จากนั้นทำการคำนวณหาค่า Flexural Strength โดยคำนวณจากสูตร

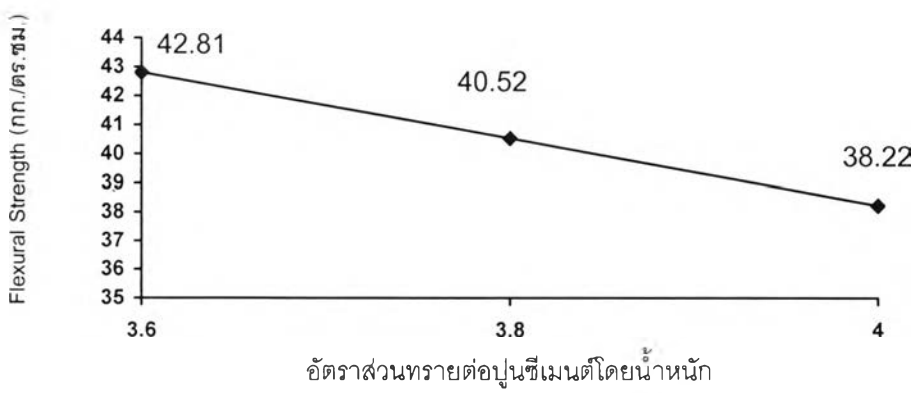
$$FT = \frac{3FL}{2wh^2} \qquad (4.1)$$

โดยกระเบื้องที่ผลิตมีขนาดความกว้าง (w) เท่ากับ 33 ซม. ความหนา (h) เท่ากับ 1.5 ซม. และระยะ span ของการทดสอบ (L) เท่ากับ 33 ซม. ความยาวคานที่กดกระเบื้องเท่ากับ 37 ซม. จากนั้นทำการกดกระเบื้องจนหัก จะได้ค่าของแรงที่กดหน่วยเป็นกิโลกรัม แล้วนำค่ามาคำนวณหาค่า Flexural Strength ตัวอย่างในกระเบื้องสูตรที่ 1 แผ่นที่ 1 วัดค่าแรงกดที่ทำมห้กระเบื้องแตกได้เท่ากับ 180 กก. นำมาแทนค่าในสูตร จะได้ $F = (3)(180)(33)/(2)(33)(1.5)^2 = 40.0$ จากนั้นทำการทดสอบในสูตรอื่นๆ ต่อไป ซึ่งจะได้ผลการทดสอบและปริมาณของวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ในตารางที่ 4.9

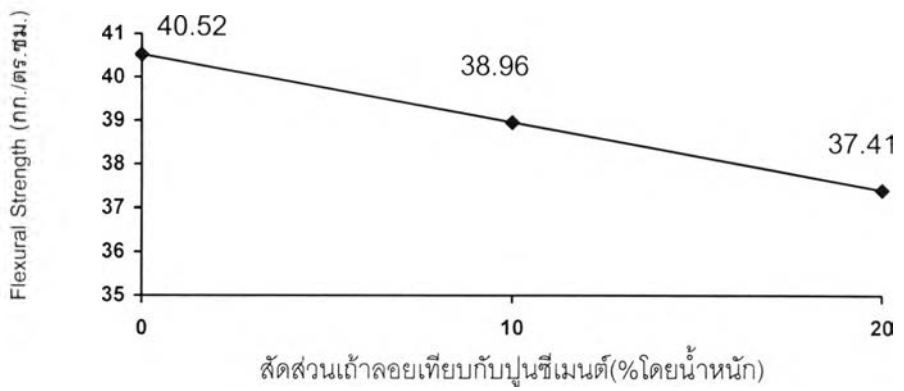
ตารางที่ 4.9 ปริมาณวัตถุดิบและผลทดสอบความต้านทานแรงกดตามขวางในสายการผลิตจริง

สูตร	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก.)	ปริมาณทราย (กก.)	ปริมาณ FlyAsh (กก.)	ปริมาณ Superplasticizer (ลิตร)	ค่า Flexural Strength (กก./ตร.ซม.)			
					แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	100	380	0	0	40.0	38.89	42.67	40.52
2	100	360	0	0	43.33	41.11	44.0	42.81
3	100	400	0	0	37.78	39.56	37.33	38.22
4	100	380	10	0	38.44	40.0	38.44	38.96
5	100	380	20	0	38.22	37.33	36.67	37.41
6	100	380	0	0.67	43.78	44.44	46.22	44.81
7	100	380	0	1.5	48.89	49.55	52.44	50.29

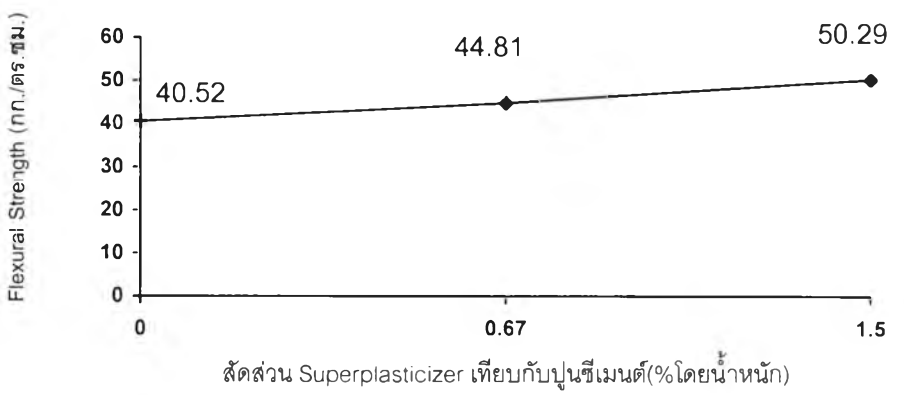
จากข้อมูลค่า Flexural Strength ที่ได้จะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่าค่า Flexural Strength ที่ได้จากการทดลองก้อนชิ้นงานตัวอย่าง จากการทดลอง ค่า Flexural Strength เฉลี่ยเท่ากับ 70.4 กก./ตร.ซม. เมื่อทำการผลิตในสายการผลิต จะได้ค่า Flexural Strength เฉลี่ย (จากตารางที่ 4.9) เท่ากับ 41.86 กก./ตร.ซม. ที่เป็นเช่นนี้ ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากค่า Density ที่แตกต่างกัน ค่า Density ของชิ้นงานที่ทดลองใน Lab มีค่าเท่ากับ 6.13 กรัม/ซม.^{3} ในขณะที่กระเบื้องที่ผลิตในสายการผลิต มีค่า Density เท่ากับ 2.85 กรัม/ตร.ซม.^{3} จึงส่งผลให้ค่า Flexural Strength ที่ได้จากการผลิตจริง น้อยกว่าที่ได้ใน Lab และจากค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้องที่ได้จากการทดลองในสายการผลิตจริง สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับค่า Flexural Strength ได้ดังรูป



รูปที่ 4.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.6 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเถ้าลอย



รูปที่ 4.7 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Superplasticizer

จะเห็นได้ว่า จากรูปที่ 4.5,4.6 และ 4.7 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง ในการทดลองในสายการผลิตจริง จะมีความสัมพันธ์เหมือนกับความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในการทดลองด้วยก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่าง

จากผลการทดลองในสายการผลิตจริง นำค่ามาทำการวิเคราะห์ Regression เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวที่กำหนดไว้ ในการวิเคราะห์สมการ กำหนดให้

Z	=	ค่า Flexural Strength (กก./ตร.ซม.)
A	=	อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์
B	=	ปริมาณ FlyAsh (% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์)
C	=	ปริมาณ Superplasticizer (% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์)

จากข้อมูลสามารถเขียนเป็นสมการถดถอยได้

$$Z = 84.111 - 11.475A - 0.155B + 6.506C \quad (4.2)$$

โดยมี ค่า R-Square เท่ากับ 0.998
ค่า R-Square Adjusted เท่ากับ 0.996

จากสมการสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ (ปัจจัย A) จะส่งผลให้ค่า Flexural Strength ปรับตัวลดลง เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของปัจจัย A เป็นลบ ในทำนองเดียวกันกับปัจจัย B การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่า Flexural Strength ลดลง เพราะสัมประสิทธิ์ของปัจจัย B เป็นลบ แต่ถ้าปัจจัย C หรือปริมาณของ Superplasticizer ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่า Flexural Strength เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งทั้งหมดสอดคล้องกับผลกระทบที่เกิดจากการทดลองในชิ้นงานตัวอย่าง โดยที่ความสัมพันธ์ของปัจจัยหรือตัวแปรต่อค่าที่ต้องการสอดคล้องกัน

4.5 การศึกษาผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต

จากสมการ 4.2 ที่ได้ในข้อ 4.4 จะสามารถกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะให้ได้ค่า Flexural Strength ตามที่ต้องการ ซึ่งจากความต้องการค่า Flexural Strength ที่เท่ากัน เมื่อใช้สมการดังกล่าว จะได้สัดส่วนของวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดได้หลายสูตร ซึ่งแม้ว่าแต่ละสูตรจะให้ค่า Flexural Strength ที่เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตที่เกิดขึ้น จะพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในการพิจารณาเลือกสูตรของวัตถุดิบที่จะใช้ในการผลิต จำเป็นจะต้องพิจารณาที่ต้นทุนที่จะใช้ให้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาต้นทุนของวัตถุดิบแยกแต่ละประเภท จะได้ข้อมูลตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วย

รายการวัตถุดิบ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย
ปูนซีเมนต์	ตัน	1900
ทราย	ตัน	110
เถ้าลอย	ตัน	400
Superplasticizer	ลิตร	15

ในการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมที่มีต้นทุนน้อยที่สุด จะใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ในการวิเคราะห์ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MIN \quad y = 1.9x_1 + 0.11x_2 + 0.4x_3 + 15x_4 \qquad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้

y แทนต้นทุนวัตถุดิบของกระเบื้องต่อ 1 แผ่น (บาท)
x_1 แทนปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต่อกระเบื้อง 1 แผ่น (กก.)
x_2 แทนปริมาณทรายที่ใช้ต่อกระเบื้อง 1 แผ่น (กก.)
x_3 แทนปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ต่อกระเบื้อง 1 แผ่น (กก.)
x_4 แทนปริมาณ Superplasticizer ต่อกระเบื้อง 1 แผ่น (ลิตร)

โดยมีสมการเงื่อนไข (constraint) ประกอบด้วย

1. สมการเงื่อนไขความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้องจากส่วนผสมวัตถุดิบที่กำหนดให้ ถ้ากำหนดให้ค่า Flexural Strength ที่ต้องการต้องมากกว่า หรือเท่ากับ 44.35 กก./ตร.ซม. จะสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$84.111 - 11.475A - 0.155B + 6.506C > 44.35$$

โดยที่ A สัดส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ $= x_2/x_1$
B สัดส่วนร้อยละของปริมาณเถ้าลอยเทียบต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ $= x_3 \times 100 / x1$
C สัดส่วนปริมาณ Superplasticizer หน่วยเป็นลิตร ต่อร้อยกิโลกรัมของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ $= x_4 \times 100 / x1$

ดังนั้นจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$39.761x_1 - 11.475x_2 - 15.5x_3 + 650.6x_4 > 0$$

2. จากเงื่อนไขที่ระบุในเอกสารทางเทคนิคของ Superplasticizer ระบุไว้ในการใช้งานที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 1.5 ลิตรต่อการใช้ปูนซีเมนต์ 100 กก. ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$0 < C < 1.5$$

$$0 < x_4/x_1 \times 100 < 1.5$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$x_4 > 0 \qquad (4.4)$$

$$1.5x_1 - 100x_4 > 0 \qquad (4.5)$$

3. เงื่อนไขทางด้านน้ำหนักของกระเบื้องต่อแผ่นที่ต้องการ ตามมาตรฐานกระเบื้อง 1 แผ่น จะมีน้ำหนักเท่ากับ 4.0 กก. ดังนั้นจะสามารถเขียนเป็นสมการผลรวมของน้ำหนักวัตถุดิบกับน้ำหนักกระเบื้องได้

$$x_1 + x_2 + x_3 > 4.0 \qquad (4.6)$$

ในส่วนของ x_4 ไม่ได้นำมาพิจารณาในสมการ เนื่องจากเป็นของเหลว ซึ่งจะทำปฏิกริยาในระหว่างการขึ้นรูปกระเบื้อง

ดังนั้นจะสามารถสรุปสมการข้อจำกัดได้ดังนี้

$$39.761x_1 - 11.475x_2 - 15.5x_3 + 650.6x_4 > 0$$

$$x_4 > 0$$

$$1.5x_1 - 100x_4 > 0$$

$$x_1 + x_2 + x_3 > 4.0$$

$$x_1 , x_2 , x_3 > 0$$

เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาคำตอบ จะได้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในแต่ละตัวดังนี้

x_1 = 0.752

x_2 = 3.248

x_3 = 0.000

x_4 = 0.0112

y = 1.9563

ผลลัพธ์ที่ได้ หมายความว่า ถ้าต้องการให้กระเบื้องมีค่า Flexural Strength ไม่น้อยกว่า 44.35 กก./ตร.ซม. กระเบื้อง 1 แผ่นจะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 0.752 กก. และปริมาณทราย 3.248 กก. และปริมาณ Superplasticizer เท่ากับ 0.0112 ลิตร โดยไม่ต้องเติมเถ้าลอย ซึ่งจะทำให้กระเบื้องดังกล่าวมีต้นทุนต่ำสุดเท่ากับ 1.9563 บาทต่อแผ่น เมื่อเทียบกับต้นทุนก่อนการปรับปรุงงานครั้งนี้ จะเห็นได้ว่า มีต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้น 0.0306 บาทต่อแผ่น

ในกรณีที่มีความต้องการความแข็งแรงหรือความต้านทานแรงกดตามขวาง เพิ่มสูงขึ้นที่ระดับต่างๆ กัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นตามความต้องการของลูกค้า หรือตามความจำเป็นในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมที่ให้ต้นทุนน้อยที่สุด โดยที่มีระดับ Flexural Strength ตั้งแต่ 40 กก./ตร.ซม.เป็นต้นไปจนถึง 56 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นค่าความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้อง เท่ากับ 252 กก. จากการคำนวณตามสมการโปรแกรมเชิงเส้นที่กำหนดไว้ ได้ข้อสรุปตามตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาณวัตถุดิบที่ต้นทุนที่น้อยที่สุด

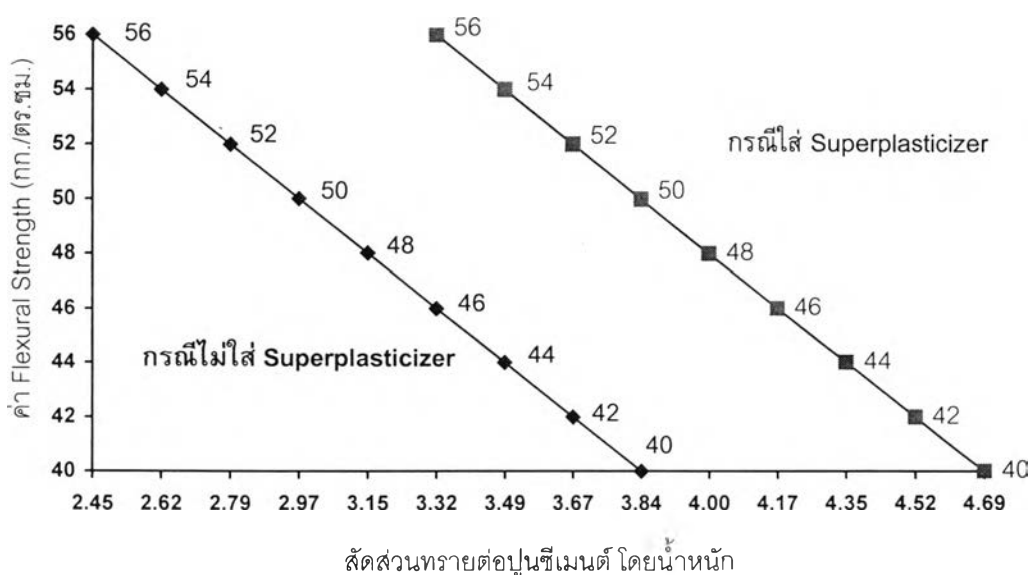
Flexural Strength (กก./ตร.ซม.)	ต้นทุนที่น้อยที่สุด (y) (บาท)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (x_1) (กก.)	ปริมาณทราย (x_2) (กก.)	สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์	ปริมาณเถ้าลอย (x_3) (กก.)	ปริมาณ Superplasticizer (x_4) (ลิตร)
40	1.8554	0.702	3.298	4.69	0	0.0105
42	1.9000	0.724	3.276	4.52	0	0.0108
44	1.9477	0.748	3.252	4.35	0	0.0112
46	1.9985	0.773	3.227	4.17	0	0.0116
48	2.0528	0.800	3.200	4.0	0	0.0120
50	2.1111	0.829	3.171	3.82	0	0.0124
52	2.1738	0.860	3.140	3.65	0	0.0129
54	2.2413	0.894	3.106	3.47	0	0.0134
56	2.3140	0.930	3.070	3.30	0	0.0139

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ที่ความต้องการค่า Flexural Strength ตั้งแต่ 40 กก./ตร.ซม. ขึ้นไป โครงสร้างของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะต้องเพิ่ม Superplasticizer ในส่วนผสมด้วย นอกเหนือจากการใช้ปูนซีเมนต์และทราย จะใช้ต้นทุนที่น้อยที่สุด ซึ่งในกรณีดังกล่าว การใช้เฉพาะปูนซีเมนต์และทรายในการผลิต เพื่อให้ได้ค่า Flexural Strength มากกว่า 40 กก./ตร.ซม. ขึ้นไป ก็สามารถทำได้ แต่จะใช้ต้นทุนรวมวัตถุดิบที่สูงกว่า โดยมีต้นทุนแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปริมาณส่วนผสมวัตถุดิบและต้นทุน (กรณีไม่ใช้ Superplasticizer)

ค่าความต้านทานแรงกดตามขวางที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)	ต้นทุนที่น้อยที่สุด (y) (บาท)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (x_1) (กก.)	ปริมาณทราย (x_2) (กก.)	สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์	ปริมาณเถ้าลอย (x_3) (กก.)	ปริมาณ Superplasticizer (x_4) (ลิตร)
40	1.9181	0.826	3.174	3.84	0	0
42	1.9732	0.856	3.144	3.67	0	0
44	2.0327	0.889	3.111	3.49	0	0
46	2.0969	0.925	3.075	3.32	0	0
48	2.1665	0.964	3.036	3.15	0	0
50	2.2423	1.007	2.993	2.97	0	0
52	2.3250	1.053	2.947	2.79	0	0
54	2.4156	1.104	2.896	2.62	0	0
56	2.5150	1.159	2.841	2.45	0	0

จากข้อมูลในตารางที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นได้ว่า Flexural Strength ตั้งแต่ 40 กก./ตร.ซม. ขึ้นไป การใส่ Superplasticizer ในส่วนผสม จะมีผลทำให้การใช้สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ใช้ปูนซีเมนต์น้อยลง เมื่อเทียบกับการใส่ Superplasticizer ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ ทั้ง 2 กรณี

ถ้าเปรียบเทียบต้นทุนของวัตถุดิบในกรณีที่ใส่และไม่ใส่ Superplasticizer จะเห็นได้ว่า การใส่ Superplasticizer ในวัตถุดิบจะช่วยให้ต้นทุนที่จะใช้ลดน้อยลง แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบต้นทุนกรณีใส่และไม่ใส่ Superplasticizer

Flexural Strength (กก./ตร.ซม.)	ต้นทุนวัตถุดิบ กรณีใส่ Superplasticizer (บาท/แผ่น)	ต้นทุนวัตถุดิบ กรณีไม่ใส่ Superplasticizer (บาท/แผ่น)	% แตกต่าง
40	1.8554	1.9181	3.26
42	1.9000	1.9732	3.71
44	1.9477	2.0327	4.18
46	1.9985	2.0969	4.69
48	2.0528	2.1665	5.25
50	2.1111	2.2423	5.85
52	2.1738	2.3250	6.50
54	2.2413	2.4156	7.21
56	2.3140	2.5150	7.99

ในขณะที่เถ้าลอย จากสมการ 4.1 จะพบว่าการเติมเถ้าลอยลงไป จะส่งผลให้ความต้านทานแรงกดตามขวางของกระเบื้องลดลง อีกทั้งต้นทุนเมื่อเปรียบเทียบกับทรายก็สูงกว่า ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ในส่วนของต้นทุนวัตถุดิบภายใต้ความแข็งแรงที่ต้องการ จึงไม่มีการเติมเถ้าลอยลงไปในส่วนผสม