The Proceedings of the 58th Annual Conference

KASETSART UNIVERSITY

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58
วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

Proceedings No. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

"นวัตกรรม สร้างสรรค์ไทย
เพื่อเป้าหมายในการพัฒนาอย่างยั่งยืน"
"Inno-creative Thailand for Sustainable Development Goals (SDGs)"

สาขาวิทยาศาสตร์
Science
สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Engineering and Architecture
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Agro-Industry
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources and Environment

ต้นทุนที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามการออกแบบเบื้องต้น

Cost Optimization of the Reinforced Concrete Columns according to Preliminary Design

ไพจิตร ผาวัน[1] **วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์**[1*] และ ศิรินภาพร เกตุพันธ์[2]

Paijit Pawan[1], **Warisara Lertpaitoonpan**[1*] and Sirinapaporn Ketphan[2]

บทคัดย่อ

การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในงานออกแบบโครงสร้าง เพราะเสาต้องรับน้ำหนักจากคาน พื้นและผนัง หากการออกแบบคำนึงถึงทางเลือกทุกทางที่เป็นไปได้ ก็จะได้ระบบโครงสร้างที่ประหยัด บทความนี้จึงเสนอแนวคิดการออกแบบร่างทางเลือกหน้าตัดเสา และคาน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยและประหยัดเป็นหลักในการพิจารณา ด้วยการวางตำแหน่งเสาที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบ คือ (1) วางตำแหน่งเสาตรงตามแบบสถาปัตย์ (2) วางคานแนวตั้ง และเพิ่มเสาตามการวางแนวคาน แต่ยังคงรูปแบบความต้องการของสถาปัตย์ (3) วางตำแหน่งเสาตามแบบสถาปัตย์ และเพิ่มคานฝากแนวนอนตามหลักวิศวกรรม พบว่า การวางตำแหน่งเสาตามรูปแบบที่ 2 มีราคาต่ำที่สุด คือ ราคา 803 บาทต่อเมตร โดยมีขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25x25 ตารางซนติเมตร และหน้าตัดคานที่ 25x60 ตารางซนติเมตร ที่ราคา 930 บาทต่อเมตร จึงเป็นวิธีที่ควรแนะนำให้วิศวกรรุ่นใหม่นำไปใช้ในการออกแบบ

ABSTRACT

The design of reinforced concrete columns is a very important part of structural design because the columns must support the weight of beams, floors and walls. If the design considers all options, it will result in economical structural systems. This article therefore introduces alternative draft design methods, By considering the positioning of the columns, 3 possible layout patterns were created, which are; (1) positioning the columns to exactly as the architecture (2) Vertical beams. And add columns according to the beam orientation but still the architecture needs of the architecture (3) Position the pole according to the architecture add horizontal beams according to engineering. Found that the positioning of the pillars in the form 2 is the lowest price is 803 baht per meter, with a minimum cross section of 25 x 25 square meters. And the cross-section at 25 x 60 square meters at 930 baht per meter. It showed is a method that new engineers should be guided to use in preliminary design.

Key words: cost optimization, preliminary concrete column design, working stress design

* Corresponding author; email address: **warisara.le@spu.ac.th**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Civil Engineering and Urban Development, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok, Thailand 10900

[2] นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

[2] Graduate student, Department of Civil Engineering and Urban Development, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok

คำนำ

การออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากเป็นการกำหนดตำแหน่ง และรูปแบบโครงสร้างให้สอดคล้องกับความต้องการที่กำหนดโดยแบบสถาปัตยกรรม ซึ่งคำนึงถึงความสวยงามและประโยชน์ใช้สอยเป็นหลัก ในการออกแบบเบื้องต้นที่ดีควรเริ่มจากวางแนวความคิดตามขั้นตอนเป็นอันดับแรก คือ การออกแบบร่างทางเลือก (Schematic Design) (Carter and Bouassida, 2013) ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างอาคาร ได้แก่พื้น คาน เสา และฐานราก เพื่อให้มีจำนวนทางเลือกหลากหลายทางเลือก เหมาะสม (Optimization) กับรูปแบบสถาปัตยกรรม ดังนั้นการออกแบบร่างทางเลือกที่ดี จึงควรพิจารณาทางเลือก กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และวางผังโครงสร้างอย่างง่าย (Lay-out Plan) ให้สอดคล้องกันระหว่างแบบสถาปัตยกรรม และแบบวิศวกรรมโครงสร้าง จากนั้นเข้าสู่การออกแบบรายละเอียด (Detail Design) (Dantzing, 1963, Estrada et al. 2006) ตัวอย่างแสดง (Figure 1(a), 1(b))

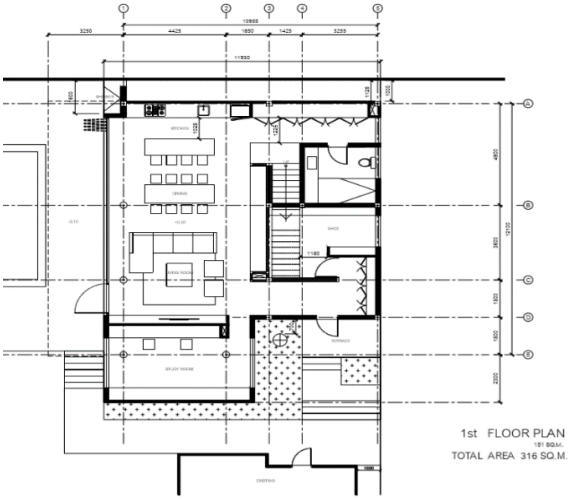

Figure 1 Architectural plan (a)

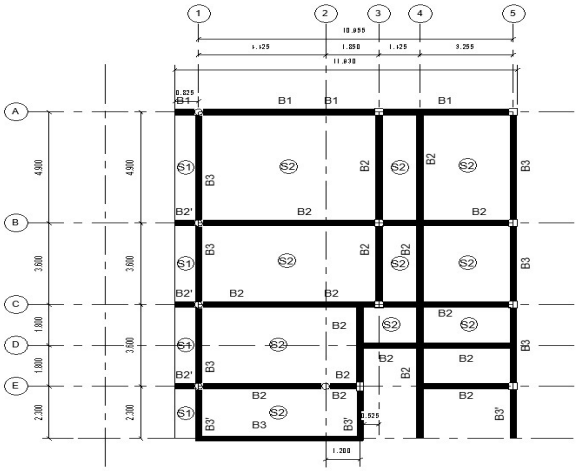

Figure 1 Structural plan (b).

วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง (Designer) มักจะออกแบบร่าง (Estrada *et al.* 2006) เพียงรูปแบบเดียวแล้วกำหนดขนาดหน้าตัด โดยไม่ได้มีทางเลือกอื่นมาเปรียบเทียบ ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบโครงสร้างอาคารไม่ประหยัดและไม่ปลอดภัย ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่นักออกแบบโครงสร้างจะต้องพิจารณาแบบร่างทางเลือกหลายๆ ทางเลือก ซึ่งขั้นตอนการออกแบบร่างทางเลือกจะต้องปรับผลการออกแบบด้วยการลดขนาดหรือเพิ่มขนาดโครงสร้าง แต่ไม่สามารถกล่าวได้ว่าผลการออกแบบสุดท้ายมีความประหยัดที่สุด (Muhammad) เพราะไม่มีการพิจารณาราคาวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโครงสร้าง (Mccormac, 1993, Qi and Mimura, 2002) เพื่อลดข้อด้อยจากกระบวนการการออกแบบ วิศวกรผู้ออกแบบควรพิจารณาแบบร่างทางเลือกให้หลากหลายเพื่อพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุด ดังนั้นบทความนี้จึงได้พัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย โดยพิจารณาแนวคานร่วมด้วย ซึ่งออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ตามมาตรฐาน ACI 318-14

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เป็นมาตรฐานกลางในการออกแบบของวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความมั่นคงแข็งแรง และปลอดภัย โดยจะกล่าวถึงเนื้อหาที่สำคัญ 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์โครงสร้าง และการคำนวณออกแบบ

การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และแรงบิด สำหรับนำไปใช้งานในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงอีลาสติก (Elastic analysis) กรณีที่เป็นโครงสร้างแบบดีเทอร์มิเนท (Determinate Structure) สามารถวิเคราะห์หาแรงต่างๆ ได้ด้วยสมการสมดุล สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนท (Indeterminate Structure) ที่เป็นพื้นหรือคานต่อเนื่องที่มีหน้าตัดคงที่ และมีช่วงตั้งแต่สองช่วงขึ้นไป มีความต่างของความยาวช่วงที่ติดกันไม่เกินร้อยละ 20 น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสม่ำเสมอเต็มทุกช่วงตลอดความยาวของโครงสร้าง และมีน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ไม่เกินสามเท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) หากไม่คำนวณหาโมเมนต์และแรงเฉือนโดยการวิเคราะห์อย่างละเอียด มาตรฐาน ACI 318-14 ให้ใช้สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์และแรงเฉือนได้ดังนี้ (Table 1)

Table 1 Coefficient of Moment and Shear (ACI 318-14).

Moment	Location	Condition	Coefficient of Moment
Positive	End span	Discontinuous end integral with support	$(1/14)\ wL^2$
		Discontinuous end unrestrained	$(1/11)\ wL^2$
	Interior Span	All	$(1/16)\ wL^2$
Negative	Interior face of exterior support	Member built integrally with supporting spandrel	$(1/24)\ wL^2$
		Member built integrally with supporting column	$(1/16)\ wL^2$
	Exterior face of first interior support	Two spans	$(1/9)\ wL^2$
		More than two spans	$(1/10)\ wL^2$
	Face of other supports	All	$(1/11)\ wL^2$
	Face of all support satisfying (a) or (b)	(a) Slab with span not exceeding 10 ft (b) Beam where ratio of sum of column stiffnesses to beam stiffness exceeds 8 at each end of span	$(1/12)\ wL^2$

การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การคำนวณออกแบบโครงสร้าง คือ ขั้นตอนการเลือกใช้วัสดุ และเลือกขนาดหน้าตัดของส่วนประกอบต่างๆ ทางโครงสร้าง เพื่อให้องค์อาคารมีเสถียรภาพมั่นคง และใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) จะใช้หน่วยแรงไม่เกินกว่าค่าพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ หน่วยแรงของวัสดุที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกขณะใช้งาน (Working stress) ไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress) เป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบ เช่น หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ที่ผิวของคอนกรีต : $fc = 0.45\ fc'$ และ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR24 : $fs = 0.5\ fy$ เป็นต้น สำหรับกรณีเสาสั้น แบบเสาปลอกเดี่ยว รับแรงตามแนวแกนอย่างเดียว ดังสมการ (1)

$$P = 0.85\ (0.25fc'\ (Ag - Ast) + fs\ Ast) \quad (1)$$

การพัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย

ขั้นตอนการพัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย มีขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง จากแบบสถาปัตยกรรม (Figure 2) ดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งของเสาตามกริดไลน์ (Grid line) ในแบบสถาปัตยกรรม

2. พิจารณาเงื่อนไขการใช้งานของพื้นที่ตามแบบสถาปัตยกรรม

3. พิจารณาเงื่อนไขทางวิศวกรรม เช่น การวางตำแหน่งเสาต้องคำนึงถึงประโยชน์การใช้สอย ร่วมกับความสามารถรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สอย หากวางเสาถี่มากก็จะทำให้หน้าตัดโครงสร้างที่รับพื้นที่และคานเล็กลงได้ หรือหากต้องการห้องกว้าง ต้องลดจำนวนเสาและต้องเพิ่มความห่างของช่วงเสา ซึ่งจะประหยัดจำนวนเสา แต่ขนาดหน้าตัดของคานจะเพิ่มขึ้น

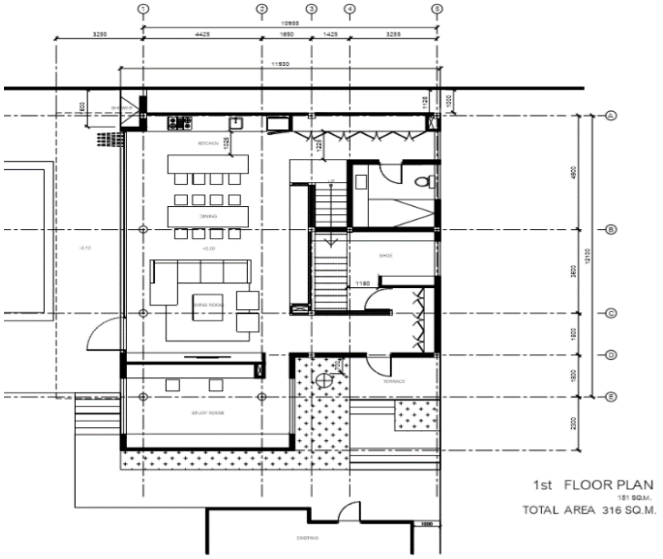

Figure 2 The 1st floor architectural plan.

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 1 วางตำแหน่งเสาตรงตามแบบสถาปัตยกรรม (Figure 3)

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 2 วางคานแนวตั้งระหว่าง Grid line ที่ 1 และ 3 และเพิ่มเสาตามการวางแนวคาน ยังคงรูปแบบความต้องการของสถาปัตยกรรมเช่นกัน (Figure 4)

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 3 วางตำแหน่งเสาตามแบบสถาปัตยกรรม เพิ่มคานฝากแนวนอน (Figure 5)

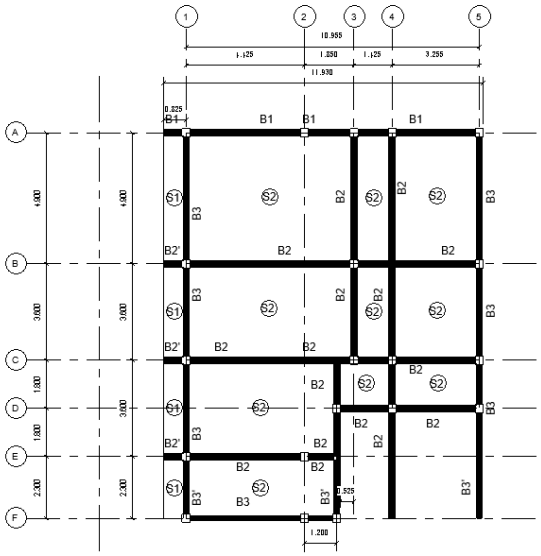

Figure 3 Columns layout pattern 1.

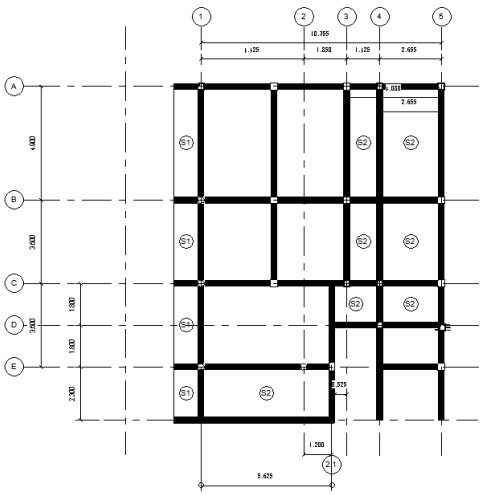

Figure 4 Columns layout pattern 2.

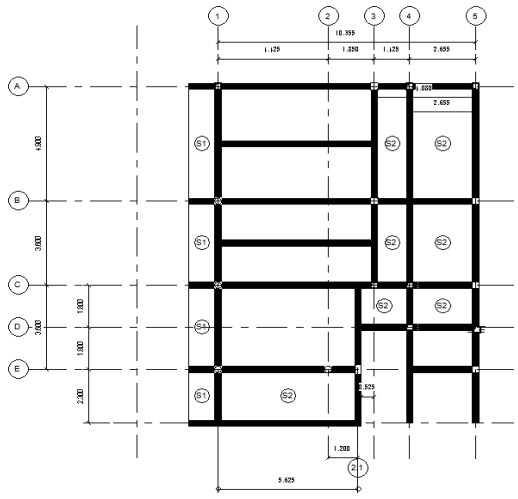

Figure 5 Columns layout pattern 3.

โดยในรูปแบบที่ 1-3 ต้องการเปรียบเทียบระยะในการวางเสา และคำนึงถึงคานว่ามีความปลอดภัยและมีความประหยัดมากกว่ากันหรือไม่

4. พัฒนาแบบจำลองการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย (Table 2- Table 3)

Table 2 Design beam and column.

Design	Section	Span (m)								
		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
EIT standard	D (cm)	30	35	40	45	50	50	60	60	70
	B (cm)	15	15	20	20	25	25	30	30	35
	H (cm)	15	15	20	20	25	25	30	35	35
Design beam	As (cm^2)	3	3	4	4	10	6	15	15	20
	As' (cm^2)	-2	-2	-4	-4	-7	-6	-11	-10	-16
Design column	Ast (cm^2)	9.69	9.69	5.02	5.02	-0.98	-0.98	-8.31	-12.31	-16.98

Table 3 Cost of beam and column.

Member	Structural work	Span (m)								
		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Beam	Concrete	0.045	0.053	0.080	0.090	0.125	0.125	0.180	0.180	0.245
	Formwork	0.75	0.85	1.00	1.10	1.25	1.25	1.50	1.50	1.75
	Rebar	1.04	1.54	-0.59	-0.24	2.71	-0.37	3.37	4.60	4.17
	Cost	502	584	639	721	970	862	1228	1271	1511
Column	Concrete	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06	0.09	0.11	0.12
	Formwork	0.60	0.60	0.80	0.80	1.00	1.00	1.20	1.30	1.40
	Rebar	9.69	9.69	5.02	5.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cost	684	684	656	656	625	625	780	860	945
	Total cost	1186	1268	1295	1377	1595	1487	2008	2131	2456

* cost shown in unit of THB per meter length of beam or column

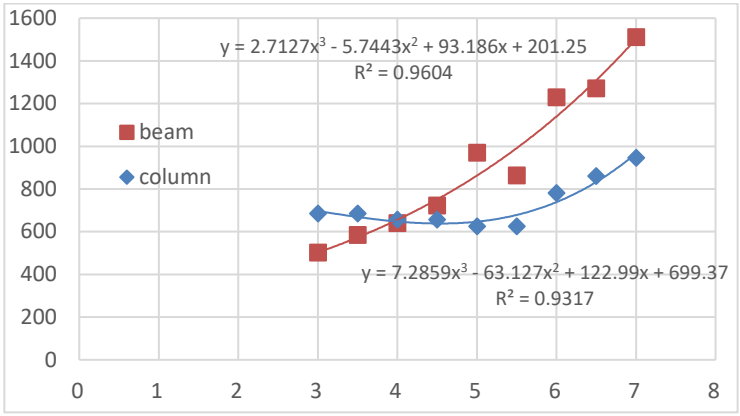

Figure 6 Columns-Beam Optimization Model.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากแบบจำลอง Columns-Beam Optimization Model (Figure 6) จะทราบว่าควรออกแบบเสาและคานโดยกำหนดช่วงระหว่างเสา (Span) ยาวเท่าไรจึงจะประหยัดที่สุด จากนั้นจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาและคาน พร้อมทั้งคำนวณราคาเหล็กเสริม คอนกรีต ไม้แบบ และราคารวมของแต่ละหน้าตัดของเสาและคานโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel (Table 4 – Table 9) โดยพิจารณาที่ Grid line B

เมื่อคำนวณราคาของเสาและคานแต่ละหน้าตัดจากการวางผังทั้ง 3 รูปแบบ พล็อตกราฟเพื่อแสดงราคาที่ถูกที่สุด (Figure 7) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ราคาในการวางแนวเสาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบนั้นจะแตกต่างกัน รูปแบบที่ 1 มีราคาสูงที่สุด เนื่องจากวางผังเสาในระยะห่างทำให้หน้าตัดของเสาและหน้าตัดคานสูงตามไปด้วย รูปแบบที่ 2 จะมีราคาถูกกว่ารูปแบบที่ 1และ3 ในการเพิ่มตำแหน่งเสาจะได้เสาที่หน้าตัดเล็กลงและมีพื้นที่รับผิดชอบน้อยลงทำให้คานจึงมีขนาดเล็กตาม รูปแบบที่ 3 จะมีราคาใกล้เคียงกับรูปแบบที่ 2 แต่ราคาเสาและคานสูงขึ้น ซึ่งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจเลือกได้ว่าจะวางผังเสาในรูปแบบใด (เช่น วางผังเสาในรูปแบบที่ 2 จะได้เสาขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25 ซม.× 25 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 803 บาทต่อเมตร และหน้าตัดคาน 25 ซม.x 60 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 930 บาทต่อเมตร) จะทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยยังคงมีความแข็งแรงปลอดภัยตามมาตรฐานวิศวกรรม

Table 4 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 1

Column section		DB16						Total cost
Width (B)	Length (H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
30	30	1.00	28,688	(8.87)	207	92.79	45	1034.36
30	35	0.86	33,469	(12.17)	241.5	92.79	52.5	1160.36
30	40	0.75	38,250	(15.48)	276	92.79	60	1286.36
30	45	0.67	43,031	(18.79)	310.5	92.79	67.5	1412.36
30	50	0.60	47,813	(22.10)	345	92.79	75	1538.36
30	55	0.55	52,594	(25.41)	379.5	92.79	82.5	1664.36
30	60	0.50	57,375	(28.72)	414	92.79	90	1790.36
30	65	0.46	62,156	(32.03)	448.5	92.79	97.5	1916.36
30	70	0.43	66,938	(35.34)	483	92.79	105	2042.36

Table 5 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 1.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)	(cm^2)	reinforcement	concrete	formwork	
30	60	0.50	17064	14095	25.27	456	414	330	1200
30	65	0.46	17254	16774	19.70	355	448.5	361	1165
30	70	0.43	17444	19686	17.84	322	483	395	1200

Table 6 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 2.

Column section			DB16					Total cost
Width (B)	Length(H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
25	25	1.00	19,922	0.00	143.75	92.79	31.25	803.36
25	30	0.83	23,906	(2.76)	172.5	92.79	37.5	908.36
25	35	0.71	27,891	(5.51)	201.25	92.79	43.75	1013.36
25	40	0.63	31,875	(8.27)	230	92.79	50	1118.36
25	45	0.56	35,859	(11.03)	258.75	92.79	56.25	1223.36
25	50	0.50	39,844	(13.79)	287.5	92.79	62.5	1328.36
25	55	0.45	43,828	(16.54)	316.25	92.79	68.75	1433.36
25	60	0.42	47,813	(19.30)	345	92.79	75	1538.36

Table 7 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 2.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As (cm^2)	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)		reinforcement	concrete	formwork	
25	50	0.50	11925	7863	26.53	478	287.5	250	1016
25	55	0.45	12084	9707	20.41	368	316.25	276	961
25	60	0.42	12242	11746	15.52	280	345	305	930
25	65	0.38	12400	13978	13.73	248	373.75	336	958
25	70	0.36	12559	16405	12.93	233	402.5	370	1006

Table 8 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 3.

Column section			DB16					Total cost
Width (B)	Length(H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
25	25	1.00	19,922	7.49	143.75	108.55	31.25	850.65
25	30	0.83	23,906	4.73	172.5	92.79	37.5	908.36
25	35	0.71	27,891	1.97	201.25	92.79	43.75	1013.36
25	40	0.63	31,875	(0.78)	230	92.79	50	1118.36
25	45	0.56	35,859	(3.54)	258.75	92.79	56.25	1223.36
25	50	0.50	39,844	(6.30)	287.5	92.79	62.5	1328.36
25	55	0.45	43,828	(9.06)	316.25	92.79	68.75	1433.36
25	60	0.42	47,813	(11.81)	345	92.79	75	1538.36

Table 9 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 3.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As (cm^2)	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)		reinforcement	concrete	formwork	
25	50	0.50	13847	7863	33.61	606	287.5	250	1144
25	55	0.45	13943	9707	26.32	475	316.25	276	1067
25	60	0.42	14039	11746	20.55	371	345	305	1021
25	65	0.38	14136	13978	15.81	285	373.75	336	995
25	70	0.36	14232	16405	14.57	263	402.5	370	1035

สรุป

เมื่อคำนวณราคาของเสาและคานแต่ละหน้าตัดจากการวางผังทั้ง 3 รูปแบบ พล็อตกราฟเพื่อแสดงราคาที่ถูกที่สุด (Figure 7) จะเห็นได้ว่า ราคาในการวางแนวเสาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบนั้นจะแตกต่างกัน โดย รูปแบบที่ 1 มีราคาสูงที่สุด เนื่องจากวางผังเสาในระยะห่าง ทำให้หน้าตัดของเสาและคานใหญ่ ส่วนรูปแบบที่ 2 จะมีราคาถูกกว่าอีกสองแบบเพราะเพิ่มเสาจึงมีหน้าตัดเสาเล็กลงและมีพื้นที่รับผิดชอบน้อยลง คานจึงมีขนาดเล็กตาม สำหรับรูปแบบที่ 3 จะมีราคาใกล้เคียงกับรูปแบบที่ 2 แต่ราคาเสาและคานสูงขึ้น ซึ่งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจเลือกได้ว่าจะวางผังเสาในรูปแบบใด (เช่น วางผังเสาในรูปแบบที่ 2 จะได้เสาขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25 ซม.× 25 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 803 บาทต่อเมตร และหน้าตัดคาน 25 ซม.x 60 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 930 บาทต่อเมตร) จะทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยยังคงมีความแข็งแรงปลอดภัยตามมาตรฐานวิศวกรรม

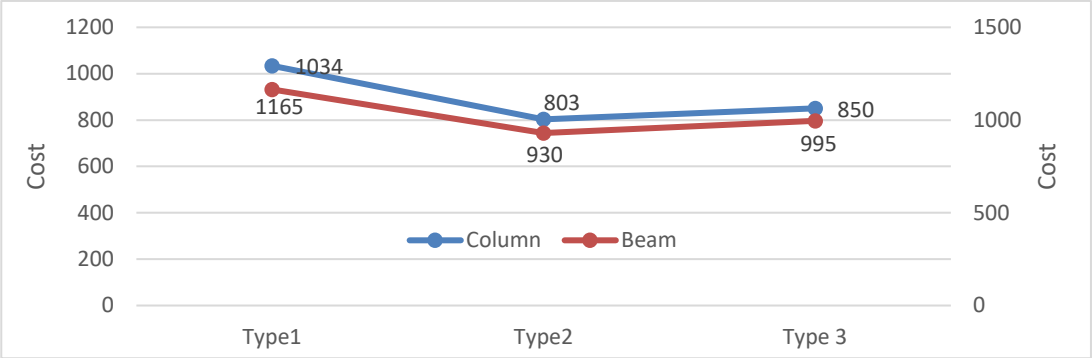

Figure 7 Graph between cost and cross section of column according to 3 layout patterns.

เอกสารอ้างอิง

Carter, J.P. and M. Bouassida. 2013. Optimization of design of column-reinforced foundations. **Journal of Structure Engineering** 14.

Dantzing, G.B. 1963. **Linear Programming and Extensions**, Princeton University Press, pp. 3-5

Estrada, H., J.J. Jimenez and F. Aguíñiga. 2006. **Cost Analysis in the Design of Open-Web Castellated Beams**, Architectural Engineering Conference (AEI), March 29-April 1, Nebraska, United States.

Muhammad, N.S. **Mining and Environment Eng.**, Department of Civil, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

Mccormac, J.C. 1993. **Design of Reinforced Concrete**, Harper-Collins College Publishers.

Qi, W. and Mimura, H. 2002. Streamline geometry optimization in beam-column connection, **Journal of Structural Engineering**, 128.

Rafig, M.Y. 1995. **Genetic Algorithms in Optimum Design, Capacity Check and Final Detailing of Reinforced Concrete Columns**. Transactions on the Built Environment, 13.

Soo, K.J., K.Y. Sik and L.S. Hee. 2008. **Structural Schematic Design of a Tall Building in Asan using the Diagrid System**. CTBUH 8th World Congress, March 3-5, Dubai, UAE.