

# การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธี ไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ

## A STUDY TO DETERMINE OPTIMAL THICKNESS FOR POST-TENSIONED CONCRETE FLAT SLAB USING 3D PLATE FINITE ELEMENT

สมชาย ตงอารมณ์ (Somchai Tongarporn)<sup>1</sup>

ฉัตร สุจินดา (Chatr Suchinda)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม somchai\_1009@hotmail.com

<sup>2</sup>อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม chatr.su@spu.ac.th

**บทคัดย่อ :** บทความนี้นำเสนอการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง โดยอาศัยข้อมูลราคาต่อหน่วยของวัสดุคอนกรีต ลวดอัดแรง เหล็กเส้น แบบหล่อ และค่าแรงในประเทศไทย เพื่อนำมาทดลองออกแบบแผ่นพื้นที่ความหนา กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกจรต่างๆกัน โดยใช้โปรแกรม RAM Concept ซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ มีกรณีศึกษาสำหรับการจัดเรียงตำแหน่งของเสาในพื้นที่ทั้งหมด 6 กรณีคือ (1) กรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) สี่เหลี่ยมผืนผ้าแปรเปลี่ยนอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (3) พื้นยื่น (4) ซิกแซก (5) พื้นเอียง และ (6) ส่วนโค้ง จากนั้นได้นำผลของการออกแบบไปหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายความหนาที่เหมาะสม ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด เพื่อช่วยให้นักวิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปประมาณราคา และเป็นแนวทางในการออกแบบ จากการศึกษาในครั้งนี้ได้สมการทำนาย ซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.933 ถึง 0.996

**ABSTRACT:** The paper presents a study to determine optimal thicknesses for post-tensioned concrete flat slabs based on construction costs in Thailand including concrete, prestress cables, rebars, formworks and labors. The trial designs were performed for various parameters including thicknesses, concrete strengths and live loads. RAM Concept program based on 3-dimensional plate finite element analyses were used. There are six studied column layouts including (1) The Square control case (2) Rectangular varying short to long span ratios (3) Cantilever (4) Zigzag (5) Skew and (6) Curve. The results from the designs were used to determine the equations to predict optimum slab thicknesses which give the lowest total construction cost. This guideline could help engineers and other interested parties for preliminary design and the construction cost estimation. From this study, the predicting equations have correlation coefficient  $r^2$  the between 0.933 and 0.996.

**KEYWORDS:** Design guidelines, Post-Tensioned Flat Slabs, Plate Bending Finite Element Analyses

### 1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบพื้นไร้คานเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอาคารขนาดกลางและใหญ่ทั่วไป พื้นไร้คานเหล่านี้มักใช้ระบบคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านราคาค่าก่อสร้าง ที่ต่ำกว่า และยังสามารถออกแบบให้มีระยะห่างจากเสาถึงเสาได้มากกว่าระบบคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา อีกทั้งระบบพื้นไร้คานมีความ

ลึกลงกว่าระบบพื้นรองรับด้วยคาน และยังสามารถลดความซับซ้อนของรูปทรงของแบบหล่อได้อีกด้วย แต่ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบระบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง มีความซับซ้อนมากกว่าระบบพื้นรองรับด้วยคานอยู่มาก

อาคารขนาดกลางและใหญ่เหล่านี้มักก่อสร้างในที่ดินที่มีรูปทรงไม่ใช่สี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่สถาปนิกผู้ออกแบบอาคาร

ต้องการใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพและต้องการจัดสรรประเภทของการใช้งานของพื้นที่ในส่วนต่าง ๆ ให้เหมาะสมมากที่สุด จึงอาจจำเป็นต้องจัดตำแหน่งของเสาในลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบในแนวที่ตั้งฉากกัน การจัดตำแหน่งของเสาดังกล่าวจะทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างในแบบสองมิติได้คำตอบที่ผิดเพี้ยนไปจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง [1],[2] ยิ่งตำแหน่งการจัดวางของเสาแตกต่างไปจากแนวที่ตั้งฉากกันอย่างเป็นระเบียบเท่าใดก็ยิ่งจะทำให้ผลของการวิเคราะห์ที่ผิดเพี้ยนมากขึ้นเท่านั้น

Post-Tensioning Institute [3] มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับความหนาของแผ่นพื้น ซึ่งกำหนดไว้เป็นอัตราส่วนช่วงความยาว (span) ต่อความหนา ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่แนะนำ โดย Post-Tensioning Institute [3]

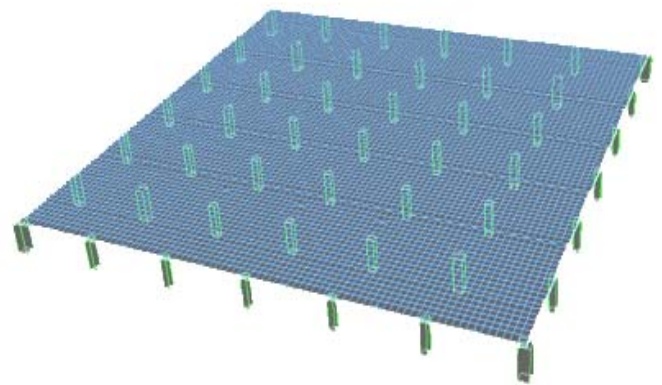
ชนิดของพื้น	ช่วงต่อเนื่อง		ช่วงเดี่ยว	
	หลังคา	พื้น	หลังคา	พื้น
พื้นทางเดี่ยว	50	45	45	40
พื้นสองทาง	45-48	40-45	-	-
พื้นสองทางแบบรังผึ้ง 1 x 1 ม	40	35	35	30
ความหนาของคานกว้าง	35	30	30	26
พื้นมีคานขอยรองรับทางเดี่ยว	42	38	38	35

ในตารางที่ 1 อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่ของ Post-Tensioning Institute [3] ได้มาจากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศสหรัฐอเมริกา และยังกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นช่วง เช่นสำหรับพื้นสองทางต่อเนื่องมีช่วง 40-45 เป็นต้น อีกทั้ง Post-Tensioning Institute [3] ไม่ได้ระบุปริมาณน้ำหนักบรรทุกของพื้นที่ ซึ่งแน่นอนว่าราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรง สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันก็ย่อมทำให้ความหนาที่เหมาะสมต่างกัน

ในปัจจุบันมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นไร้คานซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ (Finite Element Method) เช่น Adapt Builder [4] และ RAM Concept [5] โปรแกรมดังกล่าวใช้อีลีเมนต์แบบแผ่น (Plate Element) ซึ่งให้คำตอบของหน่วยแรงที่เกิดจากการกระจายของแรงทั้งสองทิศทาง ซึ่งวิธีนี้เป็นการมองโครงสร้างในแบบสามมิติโดยตรง และแน่นอนว่าจะให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างได้มากกว่าแบบสองมิติ

บทความนี้เป็นการนำโปรแกรม RAM Concept [5] มาทดลองออกแบบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม ที่ให้ราคาค่าก่อสร้างต่ำสุด โดยใช้ข้อมูลราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศไทย สำหรับการจัดวางเสาแบบที่แตกต่างไปจากแนวที่ตั้งฉากในลักษณะต่าง ๆ กัน และศึกษาปริมาณน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันด้วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณราคาและออกแบบเบื้องต้นต่อไป

การสร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับระบบพื้นไร้คานที่อีลีเมนต์แบบแผ่น (Plate Element) เป็นตัวแผ่นพื้น และใช้อีลีเมนต์โครงข้อแข็ง (Frame Element) เป็นเสา ดังภาพที่ 1



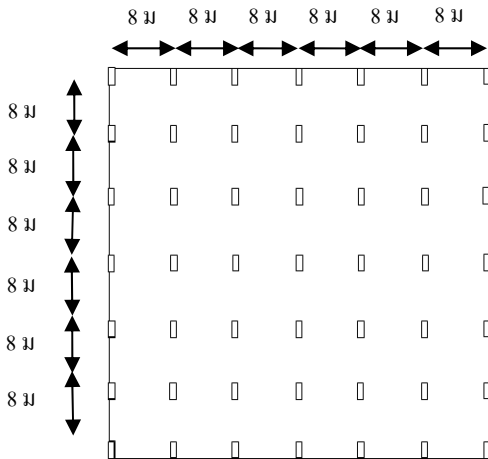
**ภาพที่ 1** แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงกรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในแต่ละกรณีศึกษา จะกำหนดความหนาของแผ่นพื้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกจรต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงวางลวดอัดแรงทางด้าน Band และ Uniform Direction โดยเริ่มต้นให้จำนวนลวดมีค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยในหน้าตัดคอนกรีตไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ระบุไว้ในข้อกำหนด 18.12.4 ของ ACI318-08 [6] คือ 8.8 กก/ซม<sup>2</sup> (125 *psi*) เสร็จแล้ววิเคราะห์ระบบโครงสร้างและตรวจสอบหน่วยแรงต่าง ๆ ที่หน้าตัดวิกฤตว่าผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่ หากไม่ผ่านผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเพิ่มจำนวนลวดอัดแรงในบริเวณที่เกี่ยวข้องที่ละเส้น แล้วทำการวิเคราะห์ตรวจสอบซ้ำจนกว่าจะได้หน่วยแรงที่หน้าตัดวิกฤตผ่านทั้งหมด โปรแกรมจะแสดงผลของปริมาณวัสดุและค่าแรง และราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรมาให้

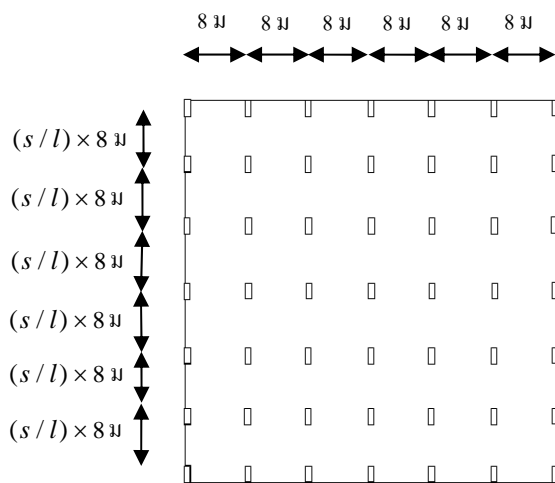
## 2. ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

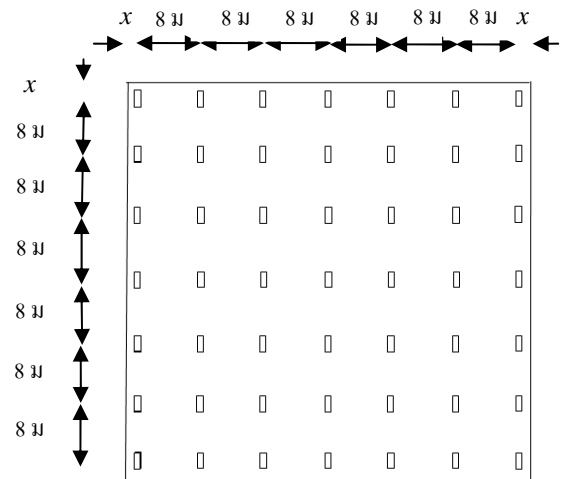
2.1 กำหนดรูปแบบการจัดเรียงของเสา ในการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ 6 กรณีคือ กรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้าแปรเปลี่ยนอัตราส่วนช่วงสั้นต่อช่วงยาว, พื้นยื่น, ชิกแซก, พื้นเอียง และส่วนโค้ง ดังแสดงภาพที่ 2 ถึง 7 ตามลำดับ



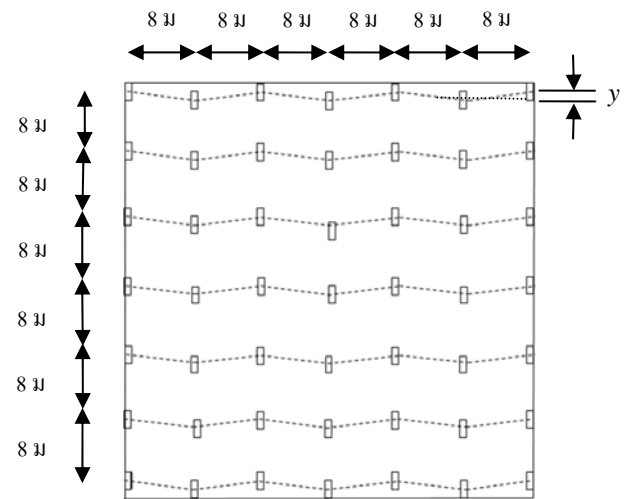
ภาพที่ 2 กรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส



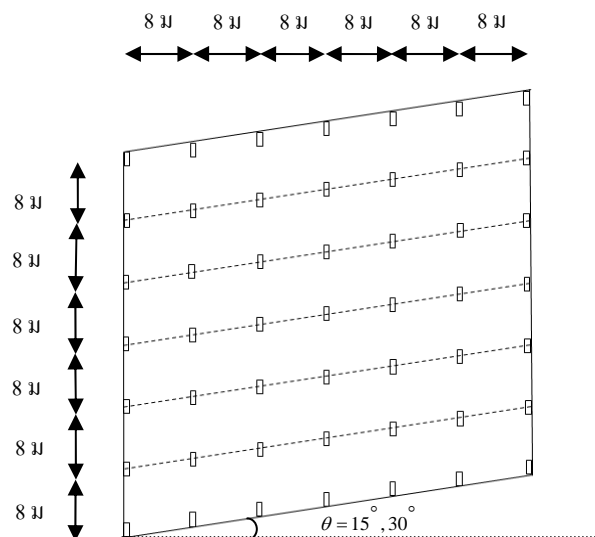
ภาพที่ 3 กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าแปรเปลี่ยนอัตราส่วนช่วงสั้นต่อช่วงยาว ( $s/l$ )



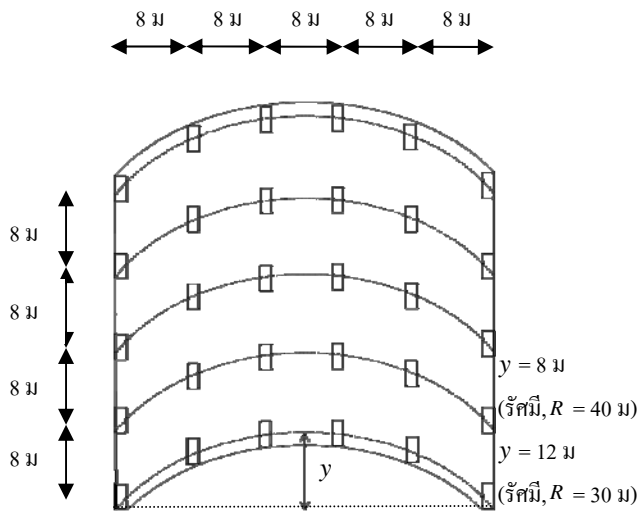
ภาพที่ 4 กรณีพื้นยื่น  $x = 1.0, 1.5, 2.0$  เมตร



ภาพที่ 5 กรณีชิกแซก  $y = 1.0, 2.0, 3.0$  เมตร



ภาพที่ 6 กรณีพื้นเอียง



ภาพที่ 7 กรณีส่วนโค้ง

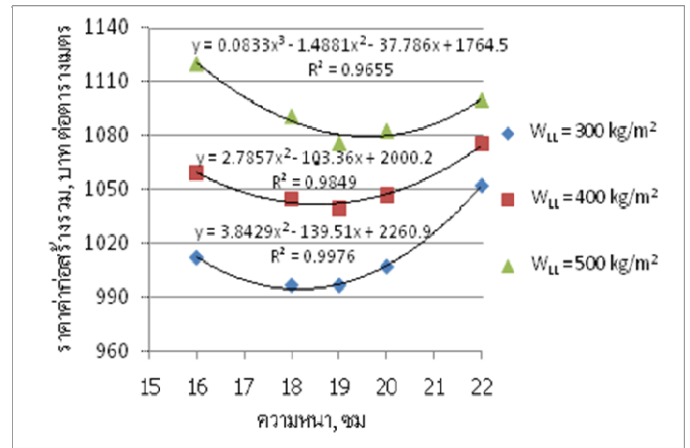
แผ่นพื้นทั้งหมดมีระยะจากกึ่งกลางเสาดึงถึงกึ่งกลางเสา (Span) คงที่คือ 8 เมตร (ใช้ระยะ Span สูงสุดที่แนะนำโดย Aalami) [7] เสาสูง 3 เมตร เสาและพื้นใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัย  $f'_c = 35Mpa$  (357 ksc) และ  $40Mpa$  (408 ksc) รับน้ำหนักตายตัวที่ไม่ใช่ น้ำหนักของตัวพื้นเอง (Super-Imposed Dead Load)  $W_{SDL} = 160 kg / m^2$  และรับน้ำหนักบรรทุกจร  $W_{LL} = 300, 400$  และ  $500 kg / m^2$

2.2 รวบรวมราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรงซึ่งเป็นข้อมูลในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรง

ประเภท	ราคาต่อหน่วย (บาท)		แหล่งที่มาของข้อมูล
	วัสดุ	ค่าแรง	
ลวดเกลียวอัดแรง (Low relaxation) 12.7 มม Grade 270	71 / กก	20 / กก	SCG
	68 / กก	20 / กก	PTE
	65 / กก	19 / กก	C-Post
คอนกรีตกำลังอัดประลัย 40 Mpa	2,070 / ม <sup>3</sup>	100 / ม <sup>3</sup>	สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้ากระทรวงพาณิชย์
	2,296 / ม <sup>3</sup>	100 / ม <sup>3</sup>	
เหล็กเส้น (SD-40)	18.7 / กก	2 / กก	
แบบหล่อ (เฉลี่ยการใช้งาน 3 ครั้ง)	125 / ม <sup>2</sup>	120 / ม <sup>2</sup>	

2.3 จากผลของการทดลองออกแบบสำหรับแต่ละกรณีศึกษานำราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร ที่ได้นำมาเขียนกราฟ เช่นในกรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรและความหนา กรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากกราฟในภาพที่ 8 แสดงราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร  $p$  และความหนาของแผ่นพื้น  $t$  ซึ่งใช้นำมาหาความหนาที่เหมาะสม (ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุด) คือจุดที่  $\frac{dp}{dt} = 0$  จะได้ความหนาที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาต่าง ๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงความหนาที่เหมาะสม

กรณี	กำลังประลัย ของคอนกรีต $f'_c$ , (Mpa)	น้ำหนัก บรรทุกจร $w_{LL}$ , (กก/ม <sup>2</sup> )	ความหนาที่ เหมาะสม $t$ , (ซม)	
1 ควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $s/l = 1.0$ )	35	300	18.61	
	35	400	19.03	
	35	500	19.69	
	40	300	18.15	
	40	400	18.55	
	40	500	19.62	
2 สี่เหลี่ยมผืนผ้า ( $s/l = 0.75$ )	35	300	17.25	
	35	400	17.84	
	35	500	18.46	
	40	300	17.07	
	40	400	17.56	
	40	500	17.87	
	สี่เหลี่ยมผืนผ้า $s/l = 0.50$	35	300	17.31
		35	400	17.78
		35	500	18.46
		40	300	17.31
		40	400	18.07
		40	500	18.46
3 พื้นยื่น	(X = 1.0 ม)	35	300	18.95
		35	400	19.51
		35	500	19.68
		40	300	18.68
		40	400	19.15
		40	500	19.30
	(X = 1.5 ม)	35	300	18.54
		35	400	19.30
		35	500	19.66
		40	300	18.12
		40	400	18.60
		40	500	18.91
พื้นยื่น (X = 2.0 ม)	35	300	18.35	
	35	400	18.85	
	35	500	19.17	
	40	300	18.12	
	40	400	18.50	
	40	500	18.85	

ตารางที่ 3 (ต่อ) แสดงความหนาที่เหมาะสม

กรณี	กำลังประลัย ของคอนกรีต $f'_c$ , (Mpa)	น้ำหนัก บรรทุกจร $w_{LL}$ , (กก/ม <sup>2</sup> )	ความหนาที่ เหมาะสม $t$ , (ซม)	
4	ซิกแซก ( $y = 1.0$ ม)	35	300	18.70
		35	400	18.75
		35	500	18.85
		40	300	18.17
		40	400	18.37
		40	500	18.51
	ซิกแซก ( $y = 2.0$ ม)	35	300	17.83
		35	400	18.88
		35	500	19.19
		40	300	18.31
		40	400	18.43
		40	500	19.00
	ซิกแซก ( $y = 3.0$ ม)	35	300	20.69
		35	400	20.83
		35	500	20.85
		40	300	20.55
		40	400	20.80
		40	500	20.96
5	พื้นเอียง ( $\theta = 15^\circ$ )	35	300	19.71
		35	400	19.94
		35	500	20.01
		40	300	19.61
		40	400	19.80
		40	500	19.99
	พื้นเอียง ( $\theta = 30^\circ$ )	35	300	22.51
		35	400	22.64
		35	500	22.76
		40	300	18.68
		40	400	19.15
		40	500	19.30
6	ส่วนโค้ง ( $R = 30$ ม)	35	300	22.34
		35	400	22.61
		35	500	22.79
		40	300	21.53
		40	400	22.20
		40	500	22.45
	ส่วนโค้ง ( $R = 40$ ม)	35	300	19.64
		35	400	20.19
		35	500	20.39
		40	300	19.28
		40	400	19.77
		40	500	20.21

2.4 จากข้อมูลในตารางที่ 3 นำมาหาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม Eview 5.1 [8] โดยกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นตัวแปรตาม ส่วนกำลังอัดประลัย น้ำหนักบรรทุกจร และพารามิเตอร์ของรูปทรง เช่น  $s/l$  สำหรับกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นตัวแปรต้น จะได้สมการถดถอยเพื่อทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4

เมื่อ

$t$  = ความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม, (ซม)

$f'_c$  = กำลังอัดประลัย, (Mpa)

$W_{LL}$  = น้ำหนักบรรทุกจร, ( $kg/m^2$ )

$s/l$  = อัตราส่วนช่วงสั้นต่อช่วงยาว

$x$  = ระยะยื่น, (เมตร)

$y$  = ระยะซิกแซก, (เมตร)

$\theta$  = มุมเฉียง, (องศา)

$R$  = รัศมีของส่วนโค้ง, (เมตร)

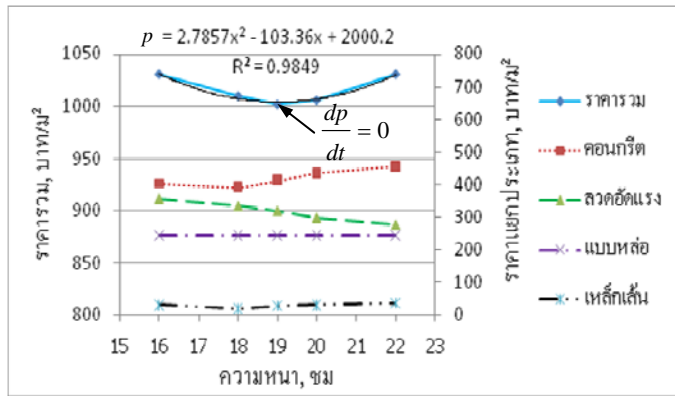
$r^2$  = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตารางที่ 4 สมการถดถอยเพื่อทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

กรณี	สมการทำนายความหนา	$r^2$	ความคลาดเคลื่อน (Residual), cm
1. ลวดคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส	$t = -0.068 f'_c + (2.25 \times 10^{-5} W_{LL}^2) - 0.01165 W_{LL} + 22.4$	0.933	-0.15 ถึง 0.15
2. สี่เหลี่ยมผืนผ้า	$t = -0.039 f'_c + (5 \times 10^{-6} W_{LL}^2) + 0.0017 W_{LL} + 6.56 (s/l)^2 - 7.3067 (s/l) + 19.6267$	0.941	-0.30 ถึง 0.30
3. พื้นยื่น	$t = -0.084 f'_c - (1.2417 \times 10^{-5} W_{LL}^2) + 0.0139 W_{LL} + 2283 x^2 - 1.4217 x + 19.9928$	0.934	-0.15 ถึง 0.25
4. ซิกแซก	$t = -0.033 f'_c - (4.25 \times 10^{-6} W_{LL}^2) + 0.0060 W_{LL} + 1.0625 y^2 - 3.1392 y + 20.17$	0.947	-0.60 ถึง 0.30
5. พื้นเฉียง	$t = -0.038 f'_c + 0.0019 W_{LL} + 0.1763 \theta + 17.8908$	0.996	-0.10 ถึง 0.10
6. ส่วนโค้ง	$t = -0.084 f'_c + 0.0038 W_{LL} - 0.2407 R + 31.165$	0.989	-0.20 ถึง 0.20

### 3. อภิปรายผลการศึกษา

ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมและราคาวัสดุและค่าแรงแยกประเภท สำหรับกรณีควบคุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส (สำหรับกรณีอื่น ๆ มีลักษณะคล้ายกัน)



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมและราคาวัสดุและค่าแรงแยกประเภท กับความหนาของแผ่นพื้น

3.1 จากเส้นกราฟของราคาคอนกรีตและเหล็กเส้นในภาพที่ 9 จะสังเกตได้ว่าที่ความหนา 16 ซม. ราคาเหล็กเส้นต่อตารางเมตรสูงกว่าที่ความหนา 18 ซม. เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณหัวเสาของกรณีความหนา 16 ซม. มีปริมาณหน่วยแรงเฉือนเฉาะทะลุ (Punching Shear) เกินกว่าที่จะเสริมเหล็กรับแรงเฉือนอย่างเดียวได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่ม Drop Panel และต้องเสริมเหล็กเส้นบริเวณ

นี้เพิ่มขึ้น ที่ความหนา 18 ซม. หรือมากกว่า มีแนวโน้มของปริมาณคอนกรีตและเหล็กเส้นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น

จากเส้นกราฟปริมาณลวดอัดแรงต่อตารางเมตร จะสังเกตได้ว่า ที่ความหนาน้อยจะมีปริมาณลวดอัดแรงมาก แต่เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้มากขึ้น ปริมาณลวดอัดแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนาของระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) จะมีค่าน้อยทำให้เกิดแรงยกตัวของลวดน้อย จึงต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากขึ้น นอกจากนี้ในระหว่างขั้นตอนออกแบบพบว่าที่ความหนา น้อยจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากกว่าปริมาณค่าสุด 8.8 กก/ซม<sup>2</sup> (125 psi) แต่ในกรณีความหนาสูงสุดของแต่ละกรณี ที่ศึกษามากจะไม่ต้องเพิ่มปริมาณลวดจากปริมาณค่าสุดเลย

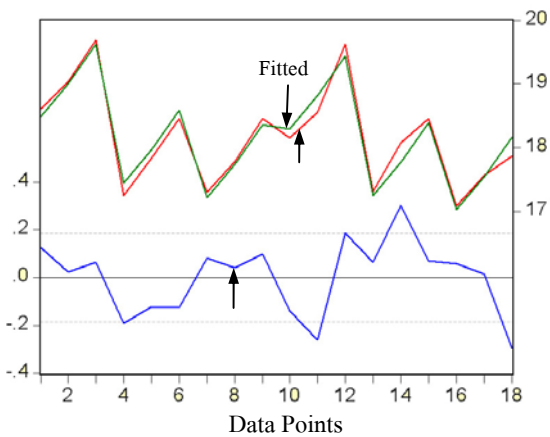
จากเส้นกราฟปริมาณแบบหล่อต่อตารางเมตร จะสังเกตได้ว่าปริมาณแบบหล่อต่อตารางเมตรมีค่าคงที่สำหรับทุกความหนา

ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรม RAM Concept ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณแบบหล่อด้านข้างซึ่งถือว่ามีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณแบบหล่อทั้งหมด

จากเส้นกราฟค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่ ที่ความหนาน้อยจะมีราคารวมต่อพื้นที่มาก เมื่อเพิ่มความหนาในช่วงกลาง ๆ ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปอีกค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าก่อสร้างรวมเป็นผลรวมของราคาคอนกรีต เหล็กเส้น ลวดอัดแรง และแบบหล่อ ซึ่งราคาของคอนกรีตและเหล็กเส้นมีแนวโน้มโดยรวมที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น (ยกเว้นกรณีความหนา 16 ซม.) แต่ราคาลวดอัดแรงมีแนวโน้มในทางตรงกันข้าม ส่วนราคาแบบหล่อนั้นคงที่สำหรับทุกความหนา จึงทำให้ราคารวมต่ำสุดเมื่อความหนาของแผ่นพื้นมีค่าอยู่ในช่วงกลาง ๆ ซึ่งหากหาสมการถดถอยของราคารวม  $p$  ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของแผ่นพื้น  $t$  แล้วนำมาหาความหนาทำให้  $\frac{dp}{dt} = 0$  จะได้เป็นความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมที่สุด ลักษณะกรณีศึกษาอื่นอีก 5 กรณี มีลักษณะที่คล้ายกันจึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ในบทความนี้

3.2 สมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมของกรณีศึกษา 6 กรณี ในตารางที่ 4 ใช้ตัวแปรต้น  $f'_c$  กำลังหนึ่งเพียงตัวเดียว ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อมูลของ  $f'_c$  มีเพียงสองค่าคือ 35 และ 40 Mpa แต่ใช้ตัวแปรต้น  $W_{LL}$  และพารามิเตอร์รูปทรงทั้งกำลังหนึ่งและกำลังสอง เนื่องจากข้อมูลของทั้งสองตัวแปรต้นมีสามค่าเช่น  $W_{LL}$  มีค่า 300, 400 และ 500 kg/m<sup>2</sup> เป็นต้น

สมการถดถอยของทั้ง 6 กรณี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r^2$  ระหว่าง 0.933 ถึง 0.996 ซึ่งแสดงว่าระดับความสัมพันธ์ของจุดข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นสมการถดถอย อยู่ในระดับที่ดีมาก



ภาพที่ 10 กราฟแสดงความหนาที่เหมาะสมที่ได้จากการ  
ออกแบบ (Actual), ที่ได้จากสมการทำนาย (Fitted) และ  
ความคลาดเคลื่อนของของค่าทั้งสอง (Residual)

3.3 กราฟเปรียบเทียบความหนาที่เหมาะสมของจุดข้อมูล (Actual) จากตารางที่ 3 และของที่ทำนายได้ (Fitted) จากสมการในตารางที่ 4 และความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) โดยใช้โปรแกรม EViews 5.1 [8] เช่นของกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้กราฟดังแสดงไว้ในภาพที่ 10

จากภาพที่ 10 จะให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) มีค่าคือในช่วง -0.30 ถึง 0.30 ซม ตารางที่ 4 ได้รวบรวมช่วงความคลาดเคลื่อน (Residual) ของทั้ง 6 กรณีที่ศึกษาเอาไว้

#### 4. สรุป

จากการศึกษาเพื่อที่จะหาความหนาที่เหมาะสมของพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุด สำหรับการจัดเรียงของเสาที่อยู่ในแนวตั้งฉาก และไม่อยู่ในแนวตั้งฉากที่แตกต่างกัน 6 กรณี โดยใช้ราคาวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย จะได้เป็นสมการอย่างง่าย ดังในตารางที่ 4 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.933 ถึง 0.996 และมีความคลาดเคลื่อน (Residual) อยู่ในช่วง -0.60 ถึง 0.30 ซม

สำหรับอาคารที่มีลักษณะการจัดเรียงของเสาแตกต่างกันออกไปจากกรณีที่ศึกษาดังกล่าว อาจจำเป็นต้องประมาณโดยเลือกใช้กรณีที่เกี่ยวข้องที่สุด

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ฉัตร สุจินดา, 2551. 14-16 พค. การเปรียบเทียบผลการออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงสร้างข้อแข็งเสมือนสองมิติ และวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์แบบแผ่นสามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช, พัทยา.
- [2] ฉัตร สุจินดา, 2552. 13-15 พค. การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ทูลิขุมิในพื้นที่ไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงสร้างข้อแข็งเสมือนสองมิติ และวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์แบบแผ่นสามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, สรุสัมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [3] The Post-Tensioning Institute, 1999. *Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors*, Phoenix, AZ.
- [4] ADAPT Corporation, โปรแกรม Adapt Builder.
- [5] RAM International, โปรแกรม RAM Concept Version 2.1
- [6] ACI Committee 318, 2008. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-08)*. Farmington Hill, MI.
- [7] Aalami, B. O., 1989. *Design of Post-Tensioned Floor Slabs*, June: 59-61.
- [8] Quantitative Micro Software, โปรแกรม EViews Version 5.1