

# การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE

A STUDY TO DETERMINE OPTIMAL THICKNESS FOR REINFORCED CONCRETE FLAT SLAB USING 3D PLATE FINITE ELEMENT USING CSI SAFE PROGRAM

## ยอดพล ผลสงเคราะห์

นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
Email : yod.civil@hotmail.co.th

## ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตร สุจินดา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
Email : chatr.su@spu.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ให้ราคาต่ำก่อสร้างรวมต่ำสุด โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE V12 ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ มีกรณีศึกษา 3 กรณีคือ (1) กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) สี่เหลี่ยมผืนผ้าแปรเปลี่ยนอัตราส่วนช่วงเสา ด้านสั้นต่อด้านยาว 0.50 และ 0.75 (3) กรณีซิกแซก มีระยะเยื้อง 1 และ 2 เมตร น้ำหนักบรรทุกจร 200 300 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ระยะช่วงเสาด้านยาว 5 6.5 และ 8 เมตร และกำลังอัดประลัยคอนกรีต 320 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดลองออกแบบพบว่า เหล็กเสริมข้อ้อยที่ใช้ในการออกแบบมีปริมาณตั้งแต่ 5.29 จนถึง 35.39 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จากการศึกษาได้สมการทำนายที่มี  $R^2 = 0.74$  ถึง  $0.97$  และมีความคลาดเคลื่อนของการทำนายความหนา -1.27 ถึง 1.50 ซม

**คำสำคัญ :** ความหนาที่เหมาะสม พื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก วิเคราะห์ไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ

## ABSTRACT

This research is to study the optimal thicknesses determination for reinforced concrete flat slabs that give the lowest total construction cost. CSI SAFE V12 program based on three-dimensional plate finite element analyses were used. There are three studied column layouts including (1) square, (2) rectangular with varying short to long span ratios between 0.50 and 0.75, and (3) zigzag patterns with 1 and 2 m eccentricities. The studied floor live loads are 200, 300 and 400 kg/cm<sup>2</sup>. The span lengths are 5, 6.5 and 8 m with 320 and 400 kg/cm<sup>2</sup> ultimate compressive strength concrete. From the trial designs, it was found that the iron bars used are varied from 5.29 to 35.39 kg/m<sup>2</sup> and the prediction equations with  $R^2 = 0.74$  to  $0.97$  and regression residuals being between -1.27 to 1.5 cm. for thickness of concrete slabs.

**KEYWORDS :** optimal thickness, reinforced concrete flat slab, three dimensional plate finite element analyses

## ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ข้อได้เปรียบของแผ่นพื้นไร้คานเมื่อเทียบกับพื้นที่รองรับด้วยคานคือ ความสูงระหว่างชั้นที่น้อยกว่า อีกทั้งยังสามารถติดตั้งแบบหล่อได้สะดวกรวดเร็ว และระบบพื้นไร้คานมีท้องพื้นราบเรียบทำให้สะดวกต่อการติดตั้งท่อต่างๆ ได้ง่ายสะดวกกว่าระบบพื้นคาน จึงเป็นที่นิยมสำหรับอาคารทั่วไป มาตรฐาน ACI 318-99 (ACI Committee 318, 1999) ได้เสนอวิธีการออกแบบของระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง ไว้ในข้อที่ 13.6 และ 13.7 คือ (1) วิธีคำนวณออกแบบโดยตรง Direct Design Method (DDM) และ (2) วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า Equivalent Frame Method (EFM) ซึ่งวิธี DDM มีข้อจำกัดในเรื่องของตำแหน่งของเสาจึงไม่เป็นที่นิยมใช้หลักการของวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า Equivalent Frame Method (EFM) เป็นการมองโครงสร้างระบบพื้นที่เป็นสามมิติ ให้เป็นโครงข้อแข็งที่รับแรงในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์โครงข้อแข็งในทิศทางใดทิศทางหนึ่งก็เปรียบเสมือนว่าเป็นการมองโครงสร้างที่มีการถ่ายแรงในสามมิติให้เหลือเป็นการถ่ายแรงในสองมิติ แต่สำหรับอาคารที่มีลักษณะของเสาที่ไม่เป็นระเบียบในแนวที่ตั้งฉากกันจะทำให้ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนผิดเพี้ยนไปจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้างเมื่อเทียบกับวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ Finite Element Method (ฉัตร สุจินดา, 2551, 2552 และ 2556) ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมที่ช่วยวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นไร้คานซึ่งใช้วิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ เท่าที่ผู้ศึกษาได้ทราบมามีอยู่ 3 โปรแกรม คือ (1) Adapt Builder V8 (Adapt Corporation, 2001) (2) RAM Concept V8i Release 3.3 (Bentley Software, 2001) และ (3) CSI SAFE V12 (Computer and Structure Inc, 2009) โปรแกรมเหล่านี้ใช้วิธีอีลีเมนต์แบบแผ่น ซึ่งให้คำตอบของหน่วยแรงที่เกิดจากการกระจายของแรงในทั้งสองทิศทางซึ่งวิธีนี้เป็นการมองโครงสร้างในแบบสามมิติ ซึ่ง ธนัญกร ต่อศิริสกุลวงศ์และฉัตร สุจินดา (2556) ได้ใช้โปรแกรม CSI SAFE V12 ส่วน พัทธนันท์ มณีชนพันธ์และฉัตร สุจินดา (2556) ได้ใช้โปรแกรม RAM Concept V8i ศึกษาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง แต่ยังไม่มียุติใช้โปรแกรมที่ได้กล่าวมานี้ศึกษาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงตามราคาวัสดุในประเทศไทยแต่อย่างไร

งานวิจัยนี้จึงนำโปรแกรม CSI SAFE V12 ซึ่งเป็นหนึ่งในโปรแกรมที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์มาใช้สำหรับวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงตามราคาวัสดุในประเทศไทย (สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2558) และนำผลตัวอย่างของการศึกษาซึ่งมีกรณีศึกษาต่างๆ มาให้เป็นแนวทางเบื้องต้น สำหรับผู้ที่ จะออกแบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กนำไปใช้

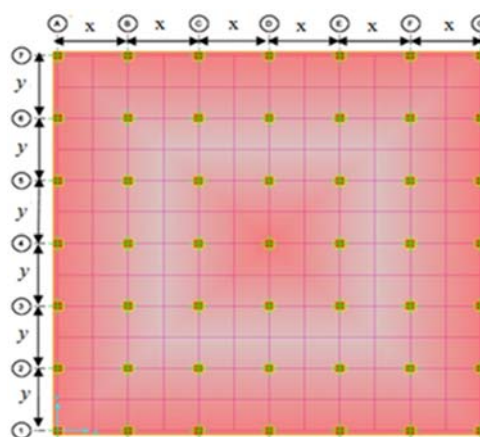
## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ประมาณความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมทางด้านโครงสร้างและประหยัดในเรื่องของราคาสำหรับผู้ออกแบบ และใช้เป็นแนวทางในการประมาณราคาสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

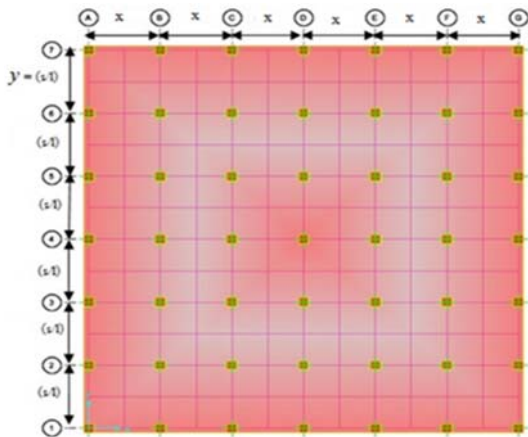
## ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และออกแบบตามมาตรฐานออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 318-99 ซึ่งกำหนดค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว 1.4 น้ำหนักบรรทุกจร 1.7 ใช้ตัวคูณลดกำลังสำหรับโมเมนต์ดัด 0.9 และแรงเฉือน 0.85 ซึ่งตรงกับค่าที่แนะนำในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2538)

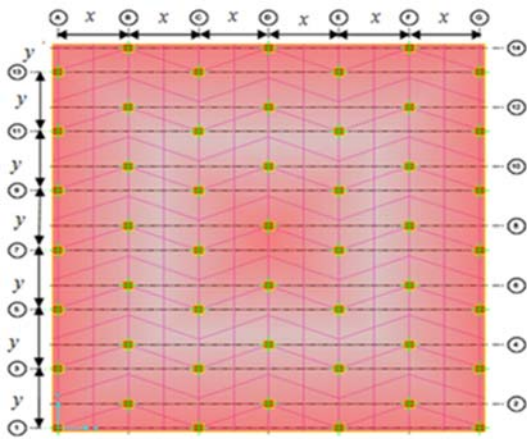
2. ลักษณะและรูปแบบแผ่นพื้นที่ศึกษามี 3 กรณีคือ (1) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) สี่เหลี่ยมผืนผ้า และ (3) พื้นซิกแซก ซึ่งพิจารณาเฉพาะกรณีไม่มีผนังรับแรงเฉือน โครงสร้างบันไดหรือช่องเปิดในพื้นที่



ภาพที่ 1 กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ภาพที่ 2 กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ภาพที่ 3 กรณีซิกแซก

3. ระยะช่วงเสาที่ศึกษาคือ 5 ถึง 8 เมตร ขึ้นอยู่กับกรณีของแผ่นพื้นที่ศึกษา
4. ศึกษาเฉพาะแผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ แนวตั้ง ไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกกระทำด้านข้าง
5. ศึกษาน้ำหนักบรรทุกทุกจร (LL) ที่ศึกษาคือ 200 300 และ 400 กก./ม.<sup>2</sup> กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน ศึกษากรณีของ ( $f_c'$ ) 320 และ 400 กก./ซม.<sup>2</sup> และปัจจัยที่กำหนดรูปทรงของแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว ( $s/l$ ) 0.5 และ 0.75 และพื้นซิกแซก ระยะเยื้อง  $y'=1.0$  และ 2.0 เมตร
6. ศึกษาพื้นกรณีที่มีแป้นหัวเสาและไม่มีแป้นหัวเสา

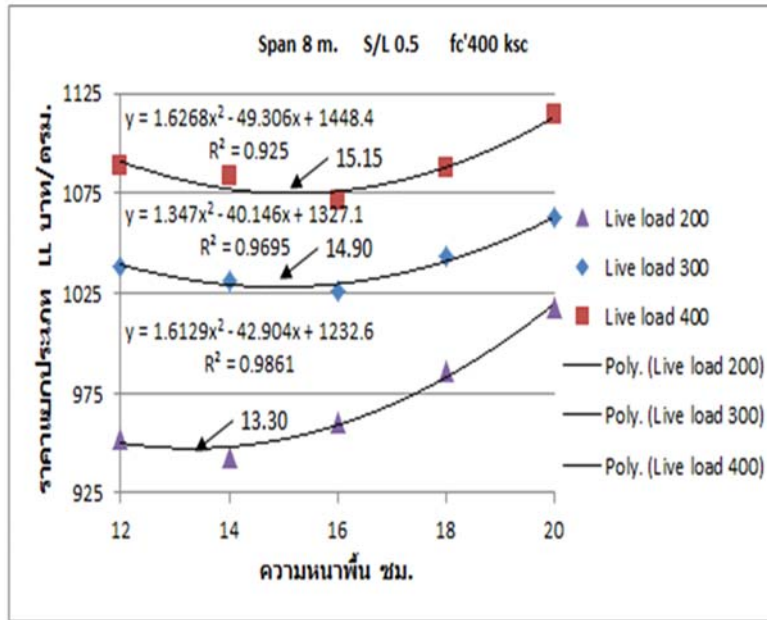
7. กำหนดให้ความหนาที่เหมาะสมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวม (ราคาวัสดุคอนกรีต เหล็กเส้น แบบหล่อ รวมถึงค่าแรง) ต่อดารางเมตรต่ำสุด โดยออกแบบตามข้อกำหนดทุกข้อในมาตรฐานออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 318-99

### ระเบียบวิธีวิจัย

1. วิเคราะห์ ออกแบบ และเขียนรายละเอียดของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยโปรแกรม CSI SAFE V12 โดยได้กำหนดตัวแปรต้นต่างๆ อันได้แก่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของช่วงเสา และน้ำหนักบรรทุกทุกจร ซึ่งเป็นตัวแปรต้นในการออกแบบ และทดลองกำหนดความหนาของแผ่นพื้นที่แตกต่างกัน
2. คำนวณค่าวัสดุก่อสร้าง และค่าแรง จากปริมาณวัสดุที่ได้จากการออกแบบในแต่ละกรณีโดยใช้ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย
3. คำนวณหาค่าของความหนาที่เหมาะสม ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำที่สุด โดยอาศัยการคำนวณสมการถดถอยระหว่างค่าก่อสร้างและความหนา ซึ่งมีความชันเท่ากับศูนย์
4. นำผลจากการคำนวณหาความหนาที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3. มาใช้กำหนดสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อใช้เป็นสูตรอย่างง่ายสำหรับการออกแบบเบื้องต้น

### ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมและเป็นแนวทางในการออกแบบขั้นต้น (Preliminary Design) จากผลของการทดลองออกแบบสำหรับแต่ละกรณีศึกษานำราคาค่าก่อสร้างรวมต่อดารางเมตร นำมาเขียนกราฟ ตัวอย่างเช่น ในกรณีควบคุมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างในภาพที่ 4

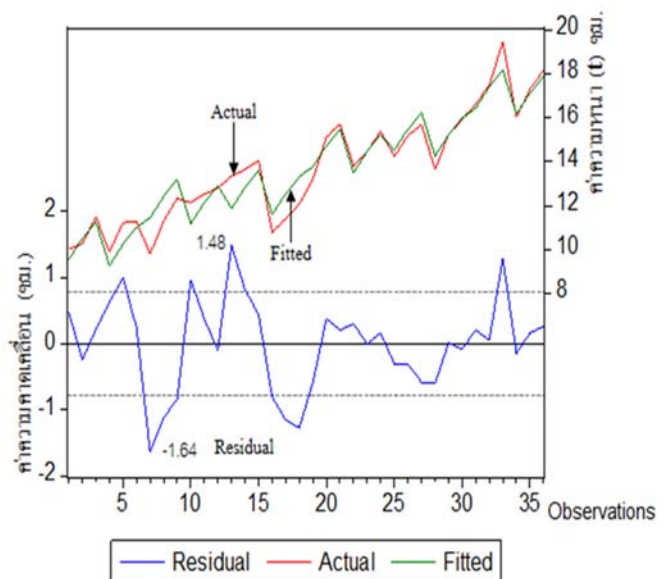


ภาพที่ 4 กราฟค่าก่อสร้างโดยรวมต่อตารางเมตรแยกตามประเภทน้ำหนักบรรทุกจร WLL สำหรับ  $fc' = 400$  กก./ $cm^2$  กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าช่วงเสาด้านยาว 8 เมตร  $s/l=0.50$

จากภาพที่ 4 เมื่อนำค่าสมการที่ได้จากเส้นกราฟกรณีน้ำหนักบรรทุกจร  $LL=200$   $300$  และ  $400$  กก./ $cm^2$  นำมาหาความหนาที่เหมาะสมที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุดคือ จุดที่จะได้ความหนาที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 13.30 และ 15.15 ซม. ตามลำดับ เส้นกราฟค่าก่อสร้างรวมเมื่อความหนาของแผ่นพื้นน้อยจะมีราคาต่อพื้นที่มากและเมื่อเพิ่มความหนาในช่วงกลางๆ ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปอีกค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากค่าก่อสร้างรวม ของราคาคอนกรีต เหล็กเส้น และแบบหล่อ

ค่าความหนาที่เหมาะสมจากการออกแบบ (Actual) ค่าความหนาจากสมการ (Fitted) และค่าส่วนที่เหลืออยู่จากที่ทำนายได้ (Residual) กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Eviews 5.1 (Quantitative Micro Software, 2005) จะสังเกตเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง -1.64 ถึง 1.48 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่า 0.919 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และได้สมการทำนายความหนาที่เหมาะสม จากการทำสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) ดังสมการ

$$t = -(3.437 \cdot 10^{-3} \cdot fc') + (1.456 \cdot 10^{-2} \cdot WLL) - (9.875 \cdot 10^{-6} \cdot W_{LL}^2) + (0.716 \cdot L) + 7.277 \cdot 10^{-2} \cdot L^2 + (7.615 \cdot s/l) - 1.089$$



ภาพที่ 5 กราฟแสดงค่าความหนาที่เหมาะสม (ซม.) จากการออกแบบ (Actual) ค่าความหนาจากสมการ (Fitted) และค่าส่วนที่เหลืออยู่จากที่ทำนายได้ (Residual) กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตารางที่ 1 สมการถดถอยเพื่อทำนายความหนาของแผ่นพื้น

กรณี	สมการทำนายความหนา (t)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	$t = (8.282 \cdot L) - (0.560 \cdot L^2) + 5.508 \cdot 10^{-3} \cdot W_{LL} + (2.583 \cdot 10^{-6} \cdot W_{LL}^2) - (2.694 \cdot 10^{-3} \cdot f_c') - 15.126$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	$t = -(3.437 \cdot 10^{-3} \cdot f_c') + (1.456 \cdot 10^{-2} \cdot W_{LL}) - (9.875 \cdot 10^{-6} \cdot W_{LL}^2) + (0.716 \cdot L) + 7.277 \cdot 10^{-2} \cdot L^2 + (7.615 \cdot s/l) - 1.089$
ซิกแซก	$t = (0.820 \cdot L) - (9.259 \cdot 10^{-3} \cdot L^2) + (1.598 \cdot 10^{-2} \cdot W_{LL}) - (1.545 \cdot 10^{-5} \cdot W_{LL}^2) + (0.103 \cdot y') - (6.583 \cdot 10^{-3} \cdot f_c') + 7.893$

- เมื่อ t = ความหนาของแผ่นพื้น (ซม.)  
 f'c = กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ซม.<sup>2</sup>)  
 W<sub>LL</sub> = น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม.<sup>2</sup>)  
 s/l = อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว  
 L = ช่วงความยาวเสา (ม.)  
 y' = ระยะเยื้อง Zigzag, (ม.)

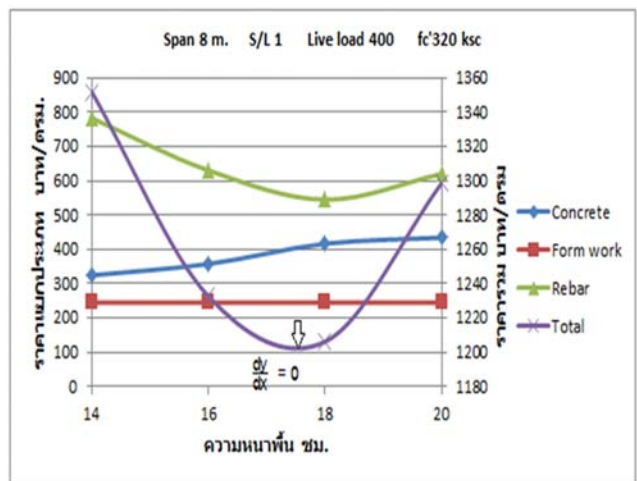
ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและค่าส่วนที่เหลืออยู่จากที่ทำนายได้

กรณี	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ	ค่าส่วนที่เหลืออยู่จากที่ทำนายได้ (ซม.)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	0.976	-0.47 ถึง 0.42
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	0.919	-1.64 ถึง 1.48
ซิกแซก	0.743	-1.27 ถึง 1.50

จากความหนาทุกกรณีศึกษา ได้นำมาหาสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) จะได้สมการสำหรับทั้ง 3 กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าส่วนที่เหลืออยู่จากที่ทำนายได้ (Residual) ดังแสดงในตารางที่ 2

### อภิปรายผล

จากผลของการทดลองออกแบบแบบแผ่นพื้นที่มีความหนาต่างๆ กัน เช่น ตัวอย่างกรณี สี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่วงเสา 8 เมตร กำลังอัดประลัยคอนกรีต f'c 320 กก./ซม.<sup>2</sup> น้ำหนักบรรทุกจร WLL 400 กก./ม.<sup>2</sup> นำมาเขียนกราฟระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมกับความหนาของแผ่นพื้นต่างๆ กัน และกราฟระหว่างราคาวัสดุรวมค่าแรง แยกประเภทกับความหนาของแผ่นพื้นต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 6 (สำหรับกรณีอื่นๆ มีลักษณะคล้ายกัน)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวม ราคาวัสดุ (รวมค่าแรง) แยกประเภทกับความหนาของแผ่นพื้น

จากภาพที่ 6 จะสังเกตได้ว่า ที่ความหนา 14 ซม. และ 16 ซม. เส้นกราฟแสดงสัญลักษณ์แทนเหล็ก (Rebar) มีราคาเหล็กเส้นต่อตารางเมตรสูงกว่าที่ความหนา 18 ซม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงนี้ ความหนาคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเหล็กเสริมลดลง ส่วนที่ความหนา 18 ซม. หรือมากกว่ามีแนวโน้มของปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น

จากกราฟค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่ ที่ความหนาน้อย จะมีราคารวมต่อพื้นที่มาก เมื่อเพิ่มความหนาในช่วงกลางๆ ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปอีก ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าก่อสร้างรวมเป็นผลรวมของราคาคอนกรีต เหล็กเส้น และแบบหล่อ ซึ่งราคาของคอนกรีต มีแนวโน้มโดยรวมที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้นสังเกต ได้จากเส้นกราฟแทนสัญลักษณ์คอนกรีต (Concrete) ส่วนราคาแบบหล่อ (Formwork) นั้นคงที่สำหรับทุกความหนา จึงทำให้ราคารวมต่ำสุดเมื่อความหนาของแผ่นพื้นมีค่าอยู่ในช่วงกลางๆ ซึ่งเมื่อหาสมการถดถอยของราคารวม ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของแผ่นพื้น แล้วนำมาแก้สมการของความหนาที่ทำให้ความชัน (Slope) เป็นศูนย์ จะได้ความหนาที่ทำให้ราคาต่ำสุดรวมต่ำสุดซึ่งเป็นความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมที่สุด

## สรุป

จากการศึกษาหาความหนาที่เหมาะสมของแผ่นพื้น ไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 กรณีตามภาพที่ 1 ถึง 3 พบว่า

1. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีผลต่อสมการทำนาย ซึ่งทำให้ได้ความหนาพื้นแตกต่างกันกรณีพื้นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยค่าเฉลี่ยจากทุกช่วงเสา ของ  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> ให้ความหนาที่เหมาะสมมากกว่า  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> อยู่ 1.42% ส่วนกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าทุกช่วงเสาของ  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> ให้ความหนาที่เหมาะสมมากกว่าของ  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> อยู่ 1.98% และกรณีพื้นซิกแซกของ  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> ให้ความหนามากกว่าของ  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> อยู่ 3.71%

2. ปริมาณเหล็กเสริมในแผ่นพื้น ที่มีแป้นหัวเสามีปริมาณต่ำกว่าแผ่นพื้นที่ไม่มีแป้นหัวเสา เช่น กรณีพื้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสช่วงเสา 6.5 ม. ที่ความหนา 14 ซม.  $W_{LU} 400$  กก./ม.<sup>2</sup> กรณี  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> เสริมแป้นหัวเสามีน้ำหนักปริมาณเหล็กเสริม 20.83 กก./ม.<sup>2</sup> ส่วนน้ำหนักบรทุกจร (LL) ที่เท่ากัน

กรณี  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> ไม่มีแป้นหัวเสา มีน้ำหนักเหล็กเสริม 22.26 กก./ม.<sup>2</sup>

3. หัวเสาดันที่มักจะต้องมีแป้นหัวเสา คือ เสาดันที่มีเส้นรอบรูปรอบหัวเสาที่ไว้รับแรงเฉือนน้อย เช่น เสามุม หรือ เสาริมอาคาร ส่วนกรณีที่ต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่หัวเสา คือ กรณีของแผ่นพื้นที่มี น้ำหนักบรทุกจร (LL) สูง และมีช่วงเสาห่างมาก

4. สำหรับแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กรณี  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> มีปริมาณเหล็กเสริมต่อตารางเมตรเฉลี่ยมากกว่ากรณี  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> อยู่ 1.00% แผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรณี  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> มีปริมาณเหล็กเสริมต่อตารางเมตรเฉลี่ยมากกว่ากรณี  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> อยู่ 2.66% ส่วนแผ่นพื้นซิกแซก กรณี  $fc' 320$  กก./ซม.<sup>2</sup> มีปริมาณเหล็กเสริมต่อตารางเมตรเฉลี่ยมากกว่ากรณี  $fc' 400$  กก./ซม.<sup>2</sup> 7.91%

## ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้กำหนดขอบเขตลักษณะรูปทรงของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีและมาตรฐาน การวิเคราะห์ ออกแบบ น้ำหนักบรทุกตายตัว และน้ำหนักบรทุกจรไว้อย่างจำกัด โดยได้มองว่าข้อจำกัดที่ได้ศึกษานี้ครอบคลุมกับลักษณะของอาคารหลายประเภทโดยส่วนใหญ่ อาจมีผลกระทบอื่นที่มีผลต่อระบบโครงสร้างของแผ่นพื้น ทั้งที่เป็นปัจจัยในเชิงคุณภาพและในเชิงปริมาณ ซึ่งอาจจะขยายขอบเขตการศึกษาออกไปให้กว้างกว่านี้ได้ ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกรณีที่แตกต่างกันจากกรณีศึกษาที่มีอยู่เช่น

1. เปรียบเทียบกรณีที่มีคานรัศรอบริมนอกของแผ่นพื้น
2. เปรียบเทียบผลของการออกแบบระหว่างแผ่นพื้น ไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง โดยศึกษาว่ากรณีใดควรใช้เป็นแบบคอนกรีตเสริมเหล็กหรือควรที่จะเปลี่ยนมาใช้คอนกรีตอัดแรงเพื่อให้ได้ราคาต่อตารางเมตรที่ต่ำกว่า (โดยยึดตามราคาวัสดุของประเทศไทย)
3. เพิ่มกรณีศึกษาของแผ่นพื้นไร้คานที่มีผนังรับแรงเฉือนและช่องเปิดในลักษณะต่างๆ
4. ศึกษาเปรียบเทียบกรณีมีแป้นหัวเสาและไม่มีแป้นหัวเสา
5. ศึกษากรณีของช่วงเสา แตกต่างกันผสมกันอยู่ในแผ่นพื้นเดียวกัน

6. ศึกษาผลกระทบของแรงกระทำด้านข้างของอาคาร เช่น แรงลม และแรงแผ่นดินไหว ที่มีต่อการออกแบบและราคาค่าก่อสร้าง
7. ศึกษาผลกระทบของขนาดเสา

## เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธาประจำปี 2537-2538.

2538. **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38.** กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ฉัตร สุจินดา. 2551. "การเปรียบเทียบผลการออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติและวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ" ในรายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. STR-010.

\_\_\_\_\_. 2552. "การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ทูลิเทียมในพื้นไร้คานคอนกรีต อัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติและวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ" ในรายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. STR-50467.

ธัญกร ต่อศิริสกุลวงศ์ และฉัตร สุจินดา. 2556. "ความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงคอนกรีตอัดแรง โดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติโดยใช้โปรแกรม CSI Safe." **วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 5: 39-46.

พัทธนันท์ มณีชนพันธ์ และฉัตร สุจินดา. 2556. "การศึกษาหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ โดยใช้โปรแกรม RAM Concept" **วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 5: 88-99.

สมชาย ตงอารมณ์ และฉัตร สุจินดา. 2553. "การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบแผ่นสามมิติ". ในรายงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5. STR-03.

สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. 2558. **ดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง.** กรุงเทพฯ: สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า.

ACI Committee 318. 1999. Building code requirements for structural concrete (ACI318-99) and commentary (ACI318R-99). Farmington Hill, MI: American Concrete Institute.

Adapt Corporation. 2010. **Adapt Builder V8.0 Program.** Redwood City, CA : Adapt Corporation.

Bentley Software. 2009. **RAM Concept V8i Release 3.1 Program.** West Carlsbad, CA : Bentley.

Computers and Structures Inc. 2009. **CSI SAFE V12 Program.** Berkeley, CA : USA.



**>> ยอดพล ผลสงเคราะห์**

สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาโท (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา พ.ศ. 2555 จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม และระดับปริญญาตรี (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา พ.ศ. 2550 จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกรโครงการ บริษัท RF&ZT JOINT VENTURE



**>> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตร สุจินดา**

สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาเอก (Ph.D., Doctoral of Philosophy) สาขา Civil Engineer พ.ศ. 2543 จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งจอร์เจีย (Georgia Institute of Technology) GIT ระดับปริญญาโท (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา พ.ศ. 2534 จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และระดับปริญญาตรี (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ พ.ศ. 2532 จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม