การพยากรณ์สัดส่วนปริมาณน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ในพื้นโพสเทนชั่น เพื่อการวางแผนผลิตหลัก

บดินทร์ อัฑฒ์วงศ์ไพศาล* และ โอพาร กิตติธีรพรชัย

บทคัดย่อ

การขยายตัวของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศและระยะเวลาก่อสร้างที่จำกัดทำให้ความต้องการใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงระบบโพสเทนชั่นเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ แต่ด้วยลักษณะการผลิตตามแบบทางวิศวกรรม หรือ engineering-to-order ทำให้พื้นโพสเทนชั่นในแต่ละโครงการมีความแตกต่างในด้านคุณสมบัติการรับแรงและจำนวนลวดอัดแรงที่ต้องใช้ ส่งผลให้โรงงานผลิตลวดอัดแรงไม่สามารถวางแผนการผลิตได้อย่างแม่นยำเนื่องจากไม่ทราบน้ำหนักลวดอัดแรงจนกระทั่งการออกแบบเสร็จสิ้น ปัญหาดังกล่าวนอกเหนือจากส่งผลให้เกิดการขาดประสิทธิภาพด้านการใช้แรงงานและเครื่องจักรในโรงงานผลิตลวดอัดแรงแล้ว ยังเป็นสาเหตุที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนการผลิตบ่อยครั้ง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการไหลของข้อมูลตั้งแต่ปิดการขายจนเริ่มการผลิตลวดอัดแรงและประยุกต์หลักการพยากรณ์เพื่อจัดทำการวางแผนการผลิตหลัก แบบพยากรณ์น้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ที่นำเสนอเป็นสมการความสัมพันธ์เชิงถดถอยแบบเชิงเส้นโดยอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมที่ทราบล่วงหน้าก่อนการออกแบบเป็นปัจจัย จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่สัมพันธ์กับน้ำหนักลวดที่ใช้คือ ระยะห่างของเสา ขนาดของคานโพสเทนชั่น ความหนาของพื้น และ น้ำหนักการรับแรงของพื้น เมื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลอีกชุดพบว่าแบบจำลองให้ค่าร้อยละเฉลี่ยของความผิดพลาดจากการพยากรณ์ (MAPE) ของน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ 8.6

คำสำคัญ : พื้นโพสเทนชั่น, สมการความสัมพันธ์เชิงถดถอยแบบเชิงเส้น, แผนผลิตหลัก, การผลิตตามแบบทางวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: unseentuy@yahoo.com รับเมื่อ 10 เมษายน 2556 ตอบรับเมื่อ 24 เมษายน 2557

Forecasting ratio of post-tension strands to area for master production schedule

Bodin Atthavongpisarn* and Oran Kittithreerapronchai

Abstract

The growth of Thailand's real estate and the limit of construction time need to use post-tensioning prestress concrete slab, especially in a large construction project. Because of its nature of engineering-to-order, specifications of a post-tension slab in each project are different. As a result, a factory manufacturing strand for a post-tension slab meet production planning problem whereas weight of strand used in each project cannot be determined until a design process is completed. This problem is not only inefficiency of workforce and under-utilization of machines in the factory, but also causes changes in the production plan. Therefore, we studied the information flows after the sale completion to the beginning of production and applied principles of forecasting to estimate quantities of stand for developing master production schedule. This proposed forecasting is a linear regression model using engineering information available before the design stage as factors to predict ratio of stand to area. The analysis of regression model shows that the main regression factors are maximum column span, size of band beam, slab thickness, and super imposed dead loads. The validation of model using a different data shows that Mean Average Percentage Error (MAPE) are 8.6 in terms of ratio of strand to area.

Keywords : Post-tension floor, Linear regression, Master production schedule, Engineering to order

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

* Corresponding author, E-mail: unseentuy@yahoo.com Received 10 April 2013, Accepted 24 April 2014

1. บทนำ

การขยายตัวของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศและระยะเวลาก่อสร้างที่จำกัดทำให้ผู้รับเหมาก่อสร้างจำเป็นต้องปรับตัวเลือกใช้เทคนิคและเทคโนโลยีที่ช่วยลดระยะเวลาการก่อสร้าง ทางเลือกหนึ่งในการลดเวลาการก่อสร้างพื้นอาคารโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ คือพื้นโพสเทนชั่นซึ่งเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete Slab) ชนิดหนึ่งที่รวมข้อดีของโครงสร้างเหล็ก (Steel Structure) และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structure) เข้าด้วยกัน โดยพื้นโพสเทนชั่นใช้คอนกรีตเป็นโครงสร้างหลักทำให้ต้นทุนของวัตถุดิบถูกกว่าและทนต่อความร้อนได้มากกว่าโครงสร้างเหล็ก นอกจากนี้โครงสร้างพื้นโพสเทนชั่นมีน้ำหนักเบากว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างที่สั้นกว่าเพียง 7-10 วันต่อชั้น ลักษณะโดดเด่นที่สำคัญของพื้นโพสเทนชั่นคือสามารถลดความลึกของคานได้ทำให้เพิ่มพื้นที่ใช้สอยของอาคาร อุปสรรคสำคัญในการผลิตพื้นโพสเทนชั่นคือการเตรียมลวดอัดแรงซึ่งแตกต่างกันตามคุณสมบัติการรับแรงสำหรับอาคารอาทิเช่น ปริมาณลวดอัดแรง ระยะห่างของลวด และแนวการวางลวดอัดแรง ซึ่งจำเป็นต้องให้วิศวกรผู้ที่เชี่ยวชาญเป็นผู้ออกแบบและกำหนด

เนื่องจากวัตถุประสงค์และลักษณะการใช้งานของแต่ละโครงการแตกต่างกันทำให้การผลิตลวดอัดแรงเป็นลักษณะการผลิตตามแบบทางวิศวกรรม หรือ engineering-to-order กล่าวคือแม้ว่าพื้นโพสเทนชั่นในแต่ละโครงการจะมีลักษณะทางเรขาคณิตที่คล้ายคลึงกันหากมีความแตกต่างในด้านคุณสมบัติการรับแรงแตกต่างกันทางด้านลักษณะการใช้งานเช่น พื้นที่อยู่อาศัย และพื้นที่จอดรถในอาคารชุดขนาดใหญ่ จำนวนลวดอัดแรงที่ต้องใช้ก็จะมีความแตกต่างกันเช่นกัน ปัจจัยเหล่านี้ ส่งให้โรงงานผลิตลวดอัดแรงไม่สามารถวางแผนการผลิตได้เนื่องจากไม่ทราบน้ำหนักลวดอัดแรงจนกระทั่งจะมีการออกแบบโดยวิศวกรเสร็จสิ้น ปัญหาดังกล่าวนอกเหนือจากส่งผลให้เกิดขาดประสิทธิภาพด้านการใช้แรงงานและเครื่องจักรในโรงงานผลิตลวดอัดแรงแล้ว ยังเป็นสาเหตุที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนการผลิตบ่อยครั้งเนื่องจากโรงงานผลิตไม่มีการวางแผนการผลิตล่วงหน้า ทำให้ตัวแทนขายจองลวดอัดแรงโดยไม่คำนึงถึงความสามารถในการผลิตและลำดับความสำคัญ

งานวิจัยฉบับนี้มีเป้าหมายเพื่อออกแบบแผนผลิตหลักระดับรายสัปดาห์ซึ่งช่วยลดการเปลี่ยนการผลิตโดยอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมที่ทราบก่อนการออกแบบในการคำนวณปริมาณลวดอัดแรงที่ใช้จากแบบพยากรณ์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับบทความนี้จะประกอบด้วย 2 เรื่อง คือ คอนกรีตอัดแรงระบบโพสเทนชั่น และ การพยากรณ์ แต่จากการศึกษาพบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบทความนี้มีน้อยมาก ผู้วิจัยจึงมิได้นำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวมาแสดงในบทความฉบับนี้

2.1 คอนกรีตอัดแรงระบบโพสเทนชั่น (Post-Tensioning concrete)

การอัดแรงในคอนกรีต เป็นการให้แรงโดยการดึงลวดอัดแรง (Strand) ซึ่งเป็นเหล็กที่มีกำลังสูงผ่านหน้าตัดคอนกรีตในขณะที่ยังไม่ได้รับแรงกระทำจากภายนอก ทำให้เกิดหน่วยแรงตามแนวแกนลวดอัดแรง

และหน่วยแรงเนื่องจากการเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรง ซึ่งหน่วยแรงดังกล่าวทำให้สามารถออกแบบพื้นให้มีความหนาน้อยกว่าการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป หรือแม้กระทั่งออกแบบให้เป็นแผ่นพื้นไร้คานได้หากมีรูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสม

คอนกรีตอัดแรงระบบโพสเทนชั่น เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดอัดแรงภายหลังการเทคอนกรีต ซึ่งเป็นลักษณะการก่อสร้างแบบเทคอนกรีตในที่ ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านสถาปัตยกรรมได้ดี และสามารถออกแบบในพื้นที่มีรูปร่างต่างๆได้

2.2 การพยากรณ์

การพยากรณ์ (Forecasting) เป็นการนำประสบการณ์หรือข้อมูลในอดีตมาทำนายอนาคต โดยอาจอาศัยประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญหรืออาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ มักใช้ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์ในการวางแผนต่างๆ เช่น การวางแผนกำลังการผลิต การวางแผนในการจัดสรรวัตถุดิบ หรือใช้ในการวางแผนกำลังคน

การพยากรณ์ที่ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มักจะนำข้อมูลในอดีตมาพิจารณาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อสิ่งที่ผู้ศึกษาต้องการ หากปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อมูลเกี่ยวข้องกับเวลาเป็นหลัก เช่น มีลักษณะเป็นฤดูกาล หรือมีลักษณะเป็นวัฏจักร มักจะใช้วิธีการพยากรณ์โดยใช้รูปแบบอนุกรมเวลา (Time Series Models) แต่หากเมื่อมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อข้อมูล มักจะใช้วิธีการพยากรณ์โดยใช้รูปแบบปัจจัยสาเหตุ (Associative Models) ซึ่งเชื่อว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตามจะสามารถหาความสัมพันธ์และเขียนความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ได้

การวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ เป็นการพิจารณาว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากสถานการณ์จริงมากน้อยเพียงใด โดยมีวิธีวัดความคลาดเคลื่อนหลายวิธี ซึ่งการหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมในการวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ โดยสามารถหาได้จาก

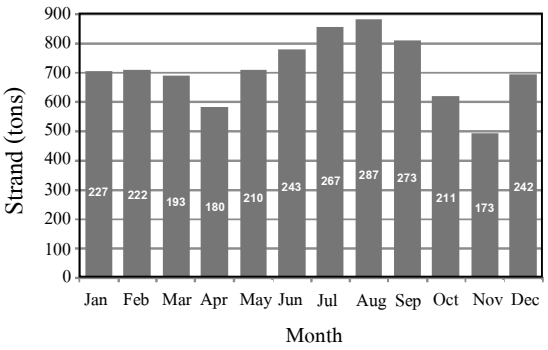
$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{\text{ค่าจริง} - \text{ค่าจากการพยากรณ์}}{\text{ค่าจริง}} \right|}{\text{จำนวนชุดข้อมูล}} \times 100\% \quad (1)$$

3. บริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จและผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปรายใหญ่ในประเทศ ให้บริการครบวงจรอาทิเช่น บริการส่งคอนกรีตผสมเสร็จรูปด้วยรถโม่ขนาดใหญ่และขนาดเล็กไปยังโครงการ ให้คำปรึกษาข้อมูลทางด้านคอนกรีต การนำคอนกรีตมาแปรรูปให้เป็นคอนกรีตสำเร็จรูป รวมถึงการออกแบบและติดตั้งพื้นอัดแรงระบบโพสเทนชั่นอีกด้วย

สำนักงานใหญ่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร แบ่งหน้าที่ของแผนกและส่วนตามลักษณะทางงานวิศวกรรมที่รับผิดชอบ หนึ่งในนี้คือส่วนออกแบบและติดตั้งพื้นโพสเทนชั่น ซึ่งจะดูแลลูกค้าตั้งแต่การออกแบบพื้น การจัดทำ SHOP DRAWING มีโรงงานสำหรับการผลิตลวดอัดแรงให้มีความยาวตามที่วิศวกรออกแบบ รวมทั้งมีการบริการติดตั้งวัสดุอุปกรณ์พื้นโพสเทนชั่นตามหน่วยงานก่อสร้าง มีจำนวนวิศวกรที่ทำหน้าที่ออกแบบ

และจัดทำ SHOP DRAWING ทั้งหมด 4 คนแบ่งหน้าที่ออกแบบพื้นโพสเทนชั่นโดยแบ่งความรับผิดชอบตามภูมิภาคได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ภูมิภาคละ 1 คน สำหรับพื้นที่ในเขตกรุงเทพและปริมณฑล วิศวกรทั้งหมดจะช่วยกันออกแบบเนื่องจากมีงานก่อสร้างขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ในปี 2554 แผนกพื้นโพสเทนชั่นมีโครงการออกแบบทั้งสิ้น 2,728 โครงการซึ่งมีการปริมาณการใช้ลวดอัดแรงและจำนวนโครงการในแต่ละเดือนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงปริมาณน้ำหนักลวดอัดแรงที่ทำการผลิตและจำนวนโครงการในแต่ละเดือน ในปีพ.ศ. 2554

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าปริมาณลวดอัดแรงที่ดำเนินการผลิตในแต่ละเดือนไม่เท่ากัน ตามพฤติกรรมการดำเนินงานของหน่วยงานก่อสร้าง เช่น ในเดือนเมษายนจะมีการผลิตลวดอัดแรงน้อย เนื่องจากมีวันหยุดในเทศกาลสงกรานต์ ซึ่งค่าเฉลี่ยของการผลิตลวดอัดแรงในปี พ.ศ. 2554 คือ ประมาณ 730 ตัน ต่อ เดือน ซึ่งกำลังการผลิตในปีพ.ศ. 2554 คือ 30 ตัน ต่อวัน หรือประมาณ 900 ตัน ต่อ เดือน

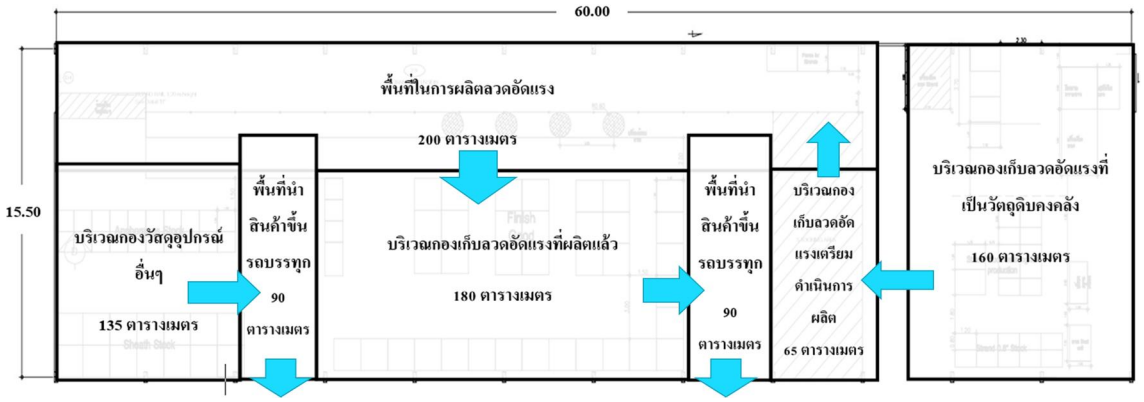
การผลิตลวดอัดแรงจะผลิตตามใบสั่งผลิตที่ทางวิศวกรได้ออกแบบแล้ว โดย 1 ใบสั่งผลิตต่อ 1 ชั้นโซนของการก่อสร้าง ซึ่งในแต่ละชั้นโซนมีการกระจายของน้ำหนักลวดอัดแรงที่ต้องนำมาใช้ผลิตตั้งแต่ 200 กิโลกรัมต่อชั้นโซน จนถึง 13,200 กิโลกรัมต่อชั้นโซน โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3,100 กิโลกรัมต่อชั้นโซน (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ออกแบบตามกฎหมาย)

3.1 โรงงานผลิตลวดอัดแรง

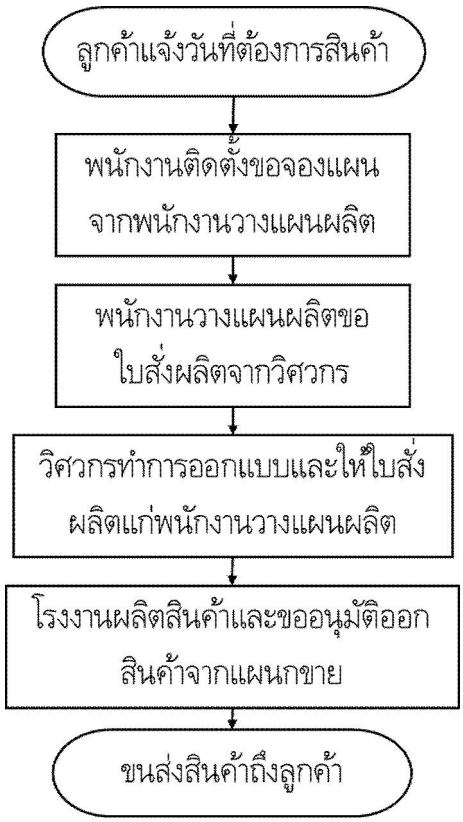
โรงงานผลิตลวดอัดแรงของบริษัทกรณีศึกษาตั้งอยู่บริเวณภาคกลางมีพื้นที่ประมาณ 930 ตารางเมตร ตั้งอยู่ในใกล้เคียงกับสำนักงานใหญ่ มีการจัดผังและการแบ่งพื้นที่ของโรงงานดังรูปที่ 2 โดยการผลิตของโรงงานคือการตัดลวดอัดแรงตามความยาวต่างๆ ดัดบาร์แชร์ และจัดวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ มีพนักงานผลิตทั้งหมดประมาณ 30 คน

3.2 การไหลของข้อมูลการผลิต

เนื่องจากโรงงานของบริษัทกรณีศึกษามีวิธีการผลิตตามแบบทางวิศวกรรม ซึ่งการไหลของข้อมูลที่ใช้ในการผลิตจะเริ่มจากพนักงานบริการติดตั้งรับแจ้งวันที่ต้องการสินค้าจากลูกค้าและแจ้งชั้นโซนที่ต้องการสินค้าให้กับโรงงานเพื่อวางแผนผลิต จากนั้นพนักงานวางแผนผลิตจึงขอใบสั่งผลิตจากวิศวกร ซึ่งจะต้องรอให้วิศวกรออกแบบสินค้าให้เรียบร้อยก่อนจึงจะได้ข้อมูลปริมาณน้ำหนักลวดอัดแรงที่จะใช้ผลิตสำหรับชั้นโซนนั้นๆ และได้ใบสั่งผลิต หลังจากนั้นโรงงานจึงจะสามารถผลิตสินค้าและขออนุมัติออกสินค้าออกจากโรงงานจากแผนกขาย เมื่อได้รับอนุมัติจึงดำเนินการขนส่งสินค้าถึงลูกค้า



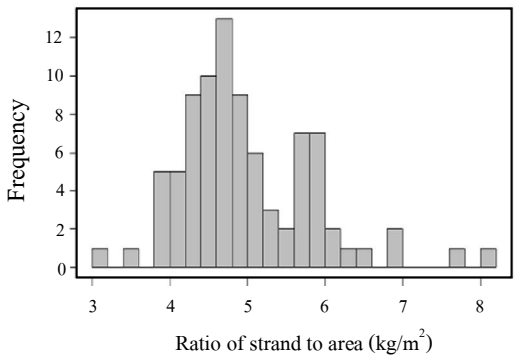
รูปที่ 2 แสดงผังโรงงานและการแบ่งพื้นที่



รูปที่ 3 แสดงการไหลของข้อมูลเพื่อใช้ในการผลิต

4. ข้อมูลเกี่ยวกับสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่

เนื่องจากแต่ละงานก่อสร้างแต่ละชั้นโซนมีพื้นที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบพยากรณ์จึงพิจารณาสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ (Ratio of Strand to Area) เป็นตัวตอบสนอง (Response) โดยการประมาณปริมาณลวดอัดแรงสำหรับพื้นโพสเทนชั่นเป็นผลคูณของสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ที่ได้จากแบบพยากรณ์และพื้นที่ ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลระหว่างวันที่ 25 มกราคม 2556 ถึงวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2556 จำนวนทั้งสิ้น 85 โครงการซึ่งมีการกระจายของสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ดังรูปที่ 4



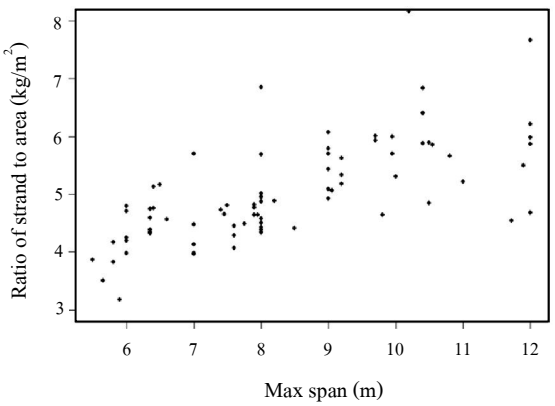
รูปที่ 4 แสดงการกระจายของสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่

จากการกระจายความถี่ในรูปที่ 4 พบว่าโครงการส่วนใหญ่มีสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ระหว่าง 4.0 ถึง 6.0

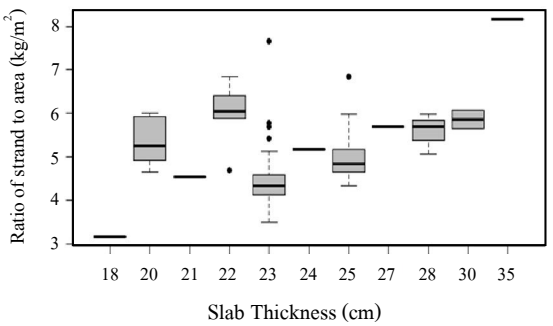
ทางผู้วิจัยได้พิจารณาปัจจัยประกอบที่คาดว่าอาจจะส่งผลต่อสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักสถิต (Super Imposed Dead Load : SDL) เป็นความสามารถในการรับน้ำหนักที่ไม่มีการเคลื่อนที่นอกเหนือจากน้ำหนักของพื้นเอง เช่น น้ำหนักกระเบื้อง น้ำหนักกำแพง
2. ความสามารถในการรับน้ำหนักจร (Live Load : LL) เป็นความสามารถในการรับน้ำหนักวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ได้ เช่น น้ำหนักของคน น้ำหนักรถ
3. ระยะห่างระหว่างช่วงเสา (Span) เป็นระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของเสาต้นหนึ่งไปยังกึ่งกลางเสาอีกต้นหนึ่ง
4. ความหนาพื้น (Thickness)
5. การลดระดับของพื้น (Depress) จะเป็นการต่างระดับของผิวบนของพื้น เช่น การลดระดับพื้นเพื่อใช้เป็นห้องน้ำ
6. ความลึกของคานกว้าง (Band Beam) เป็นความลึกที่วัดรวมความหนาของพื้น โดยคานกว้างจะมีหน้าที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของพื้น
7. ความลึกของแป้นหัวเสา (Drop Panel) เป็นความลึกที่วัดรวมความหนาของพื้น โดยแป้นหัวเสาจะมีหน้าที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของพื้น แต่ในกรณีที่แป้นหัวเสามีความลึกเท่ากับคานกว้าง แป้นหัวเสาจะมีความสามารถในการช่วยเสริมความแข็งแรงของพื้นได้น้อยกว่าคานกว้าง
8. วิศวกรผู้ออกแบบ (Engineer)

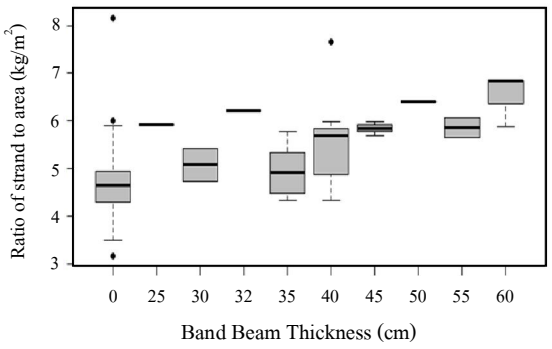
และได้นำข้อมูลจากปัจจัยประกอบร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ one-way ANOVA ดังรูปที่ 5-9 และตารางที่ 1



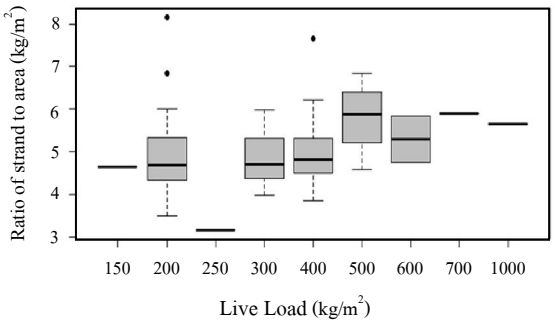
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างเสาที่มากที่สุด (Max Span) กับสัดส่วนของน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ (Ratio of Strand to Area)



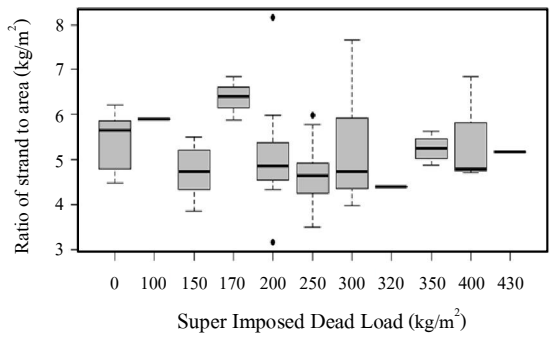
รูปที่ 6 กราฟแสดงแนวโน้มและการกระจายข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาพื้นกับสัดส่วนของลวดอัดแรงต่อพื้นที่ จากจำนวนข้อมูลตัวอย่าง 171 ชุด



รูปที่ 7 กราฟแสดงแนวโน้มและการกระจายข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคานกว้างกับสัดส่วนของลวดอัดแรงต่อพื้นที่ จากจำนวนข้อมูลตัวอย่าง 171 ชุด



รูปที่ 8 กราฟแสดงแนวโน้มและการกระจายข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจร กับสัดส่วนของลวดอัดแรงต่อพื้นที่ จากจำนวนข้อมูลตัวอย่าง 171 ชุด



รูปที่ 9 กราฟแสดงแนวโน้มและการกระจายข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสถิต กับสัดส่วนของลวดอัดแรงต่อพื้นที่ จากจำนวนข้อมูลตัวอย่าง 171 ชุด

จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่า ระยะห่างสูงสุดระหว่างช่วงเสา และความหนาพื้นเป็นปัจจัยแปรผันตรงกับสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่กล่าวคือชั้นโซนที่มีสัดส่วนน้ำหนักลวดต่อพื้นที่น้อยส่วนใหญ่คือชั้นโซนที่มีระยะห่างระหว่างช่วงเสาน้อยกว่า 6 เมตร ในขณะที่ชั้นโซนที่มีสัดส่วนน้ำหนักลวดต่อพื้นที่มากคือชั้นโซนที่มีระยะห่างระหว่างช่วงเสามากกว่า 10 เมตร หรือมีความหนาพื้นมากกว่า 25 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการออกแบบทางวิศวกรรมที่ว่า โครงสร้างพื้นที่มีระยะห่างช่วงเสาที่มากควรจะออกแบบให้มีความหนาพื้นมากกว่าโครงสร้างพื้นที่มีระยะห่างช่วงเสาน้อย และพื้นอัดแรงที่มีความหนามากจะใช้ปริมาณลวดอัดแรงขั้นต่ำมากกว่าพื้นที่มีความหนาน้อย

รูปที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นว่าขนาดของคานกว้างซึ่งเป็นการเสริมความแข็งแกร่งให้กับพื้นมีความสำคัญต่อสัดส่วนน้ำหนักลวดต่อพื้นที่มากกว่าน้ำหนักจร เนื่องจากแนวโน้มความสัมพันธ์ของน้ำหนักจรกับสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ค่อนข้างคงที่ เป็นที่น่าสนใจว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสถิตไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนน้ำหนักลวดต่อพื้นที่ โดยผู้วิจัยได้สอบถามผู้ออกแบบแล้วพบว่า เป็นไปได้ว่าโดยปกติน้ำหนักสถิตจะถูกพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นการออกแบบ ซึ่งจะออกแบบให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นโดยการเพิ่มความหนาของพื้นหรือขนาดของคานกว้าง เป็นต้น นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูลไม่พบว่าการลดระดับ และความลึกของแป้นหัวเสา น้ำหนักสถิต และวิศวกรผู้ออกแบบ มีผลต่อน้ำหนักลวดต่อพื้นที่

ตารางที่ 1 ค่าสถิติจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย one-way analysis of variance

	DF	SSE	MSE	F Value	p value	
Span	1	28.906	28.906	117.744	0.0000	**
Engineer	4	1.191	0.298	1.213	0.3127	
BandBeam	1	3.609	3.609	14.699	0.0003	***
DropPanel	1	0.675	0.675	2.751	0.1015	
SlabThk	1	7.127	7.127	29.031	0.0000	***
LL	1	2.057	2.057	8.380	0.0050	**
SDL	1	0.091	0.091	0.372	0.5437	
Depress	1	0.652	0.652	2.655	0.1074	
Residuals	74	18.167	0.245			

จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่คือ ระยะห่างระหว่างเสา ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจร ความหนาพื้น และ ความลึกของคานกว้าง

5. แบบพยากรณ์สัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่

5.1 แบบพยากรณ์

ด้วยวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่ามีค่าสถิติที่เกี่ยวข้องด้วยค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสถิติที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสมการถดถ้อยเชิงเส้นของสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่จากผลของ one-way ANOVA

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
Span	0.288	0.033768	8.535	6.06E-13
BandBeam	0.013	0.003027	4.293	4.80E-05
SlabThk	0.081	0.014372	5.625	2.50E-07
LL	0.002	0.000629	3.362	0.00118

หรือ สมการเพื่อใช้พยากรณ์สัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่คือ

$$\text{Ratio} = 0.288\,\text{Span} + 0.013\,\text{BandBeam} + 0.081\,\text{SlabThk} + 0.002\,\text{LL} \quad (2)$$

โดยที่ Ratio = สัดส่วนน้ำหนักของลวดอัดแรงต่อพื้นที่แผ่นพื้น (kg/m^2)

Span = ระยะห่างของเสา วัดจากศูนย์กลางเสา (m)

BandBeam = ความลึกของคานกว้าง (cm)

SlabThk = ความหนาของแผ่นพื้น (cm)

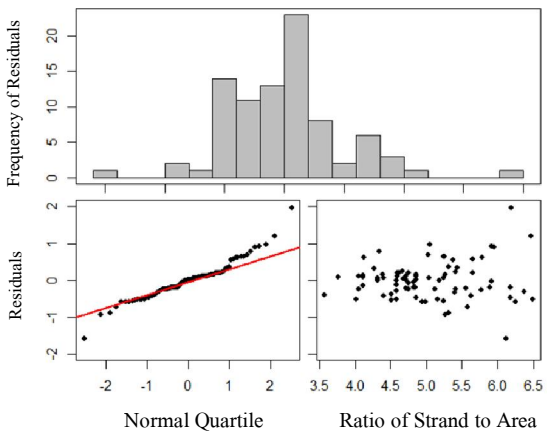
LL = น้ำหนักบรรทุกจร (kg/m^2)

จากสมการที่ (2) จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างช่วงเสาเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่มากที่สุด การที่เสริมความแข็งแรงของพื้นด้วยความหนาพื้นและความลึกของคานกว้างนั้นจะส่งผลต่อ

สัดส่วนของน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ขั้นต่ำที่ต้องเสริมเข้าไปในพื้น และถ้าหากพื้นดังกล่าวรับน้ำหนักบรรทุกสถิตมากขึ้นก็จะต้องมีการออกแบบให้มีสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่มากขึ้นด้วย ซึ่งผลจากแบบพยากรณ์นั้นสอดคล้องกับหลักการออกแบบทางวิศวกรรม

เป็นที่น่าสนใจว่าสมการที่ (2) เป็นแบบพยากรณ์โดยไม่มีค่าคงที่ แต่หากใช้แบบพยากรณ์ที่มีค่าคงที่ความสามารถในการพยากรณเชิงเส้นจะลดลง กล่าวคือค่า R^2_{adj} จะลดลงจาก 0.9898 เป็น 0.6422

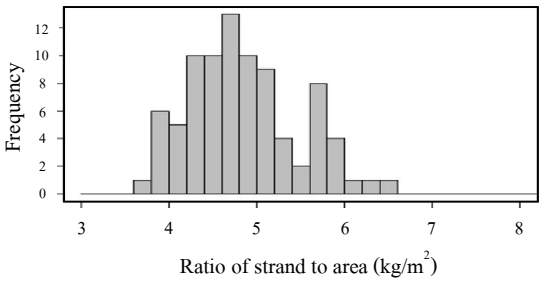
หากพิจารณาความถี่ของการกระจายของเศษเหลือ (Residuals) และ ค่าของเศษเหลือ เมื่อเทียบค่าพยากรณ์หรือสัดส่วนน้ำหนักลวดต่อแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 10 วิเคราะห์ค่า Residuals ของแบบพยากรณ์พบว่าค่าจากแบบพยากรณ์ให้ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง ±1 ของสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่ และในช่วงที่สัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่มากกว่า 6.0 มีแนวโน้มลู่ออก หรือความผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่มีค่ามาก



รูปที่ 10 แสดงการวิเคราะห์ของเศษเหลือและค่าพยากรณ์

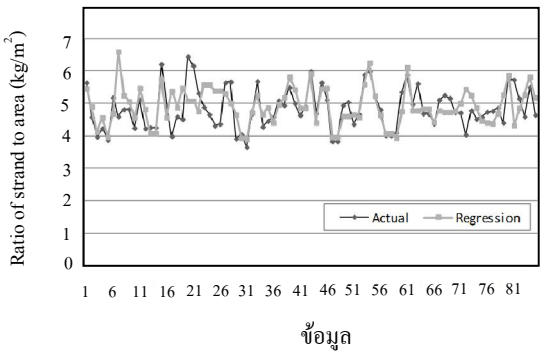
5.2 การทดสอบแบบพยากรณ์

ทดสอบแบบพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลการออกแบบหนึ่งชุดซึ่งมีการกระจายดังรูปที่ 11



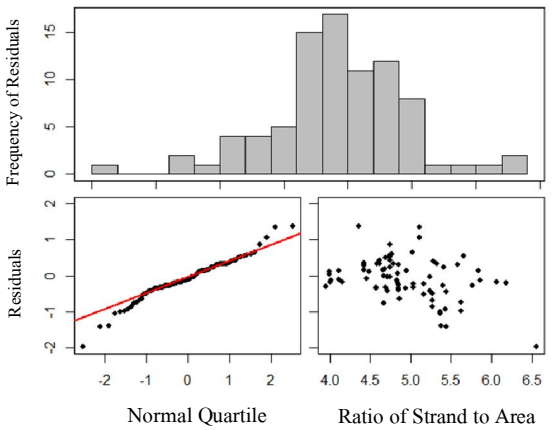
รูปที่ 11 แสดงการกระจายของสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่ของข้อมูลทดสอบ

หากเปรียบเทียบค่าสัดส่วนน้ำหนักลวดอัดแรงต่อพื้นที่และค่าพยากรณ์จากสมการที่ (1) ได้แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่และค่าจากแบบพยากรณ์ของข้อมูลทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ทำการทดสอบและค่าจากแบบพยากรณ์ โดยใช้ค่า Mean Absolute Percentage Error (MAPE) ได้ 8.6 เมื่อวิเคราะห์ Residuals จากการใช้สมการที่ (1) ในการพยากรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงการวิเคราะห์ของเศษเหลือ และค่าพยากรณ์ของข้อมูลทดสอบ

จากรูปที่ 13 หากพิจารณาความถี่ของการกระจายของ เศษเหลือ และเศษเหลือ เมื่อเทียบค่าพยากรณ์ของข้อมูลทดสอบ วิเคราะห์ค่า Residuals ของแบบพยากรณ์ พบว่าค่าจากแบบพยากรณ์ให้ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง ±1 ของสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่ และแบบพยากรณ์จะแม่นยำเมื่อสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่อยู่ในช่วง 4.0-5.0 มากกว่าสัดส่วนที่มีค่าในช่วง 5.0 ขึ้นไป

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยสรุปได้ว่า สามารถพยากรณ์สัดส่วนปริมาณลวดอัดแรงต่อพื้นที่ โดยใช้แบบพยากรณ์ที่ได้จากการวิจัยซึ่งจำเป็นต้องทราบเพียงข้อมูลเบื้องต้นก่อนการออกแบบคือ ระยะห่างระหว่างเสา, ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสถิต, ความหนาพื้น และ ความลึกของคานกว้าง ซึ่งเมื่อได้นำแบบพยากรณ์มาทดสอบพบว่ามีค่า Mean Absolute Percentage Error (MAPE) เท่ากับ 8.6

ในขั้นตอนการวิจัยพบว่าขนาดความลึกของคานกว้างที่เก็บข้อมูลนั้นมีความลึกสูงสุดที่ 60 ซม. เท่านั้น ซึ่งในความจริงแล้ว อาจมีความลึกที่มากกว่า 60 ซม. ได้ ซึ่งหากมีการเก็บข้อมูลในส่วนนี้เพิ่มเติมอาจทำให้ข้อมูลในช่วงสัดส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่มากกว่า 6.0 ขึ้นไป อาจมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] PTI, “Post-Tensioning Manual (6th ed.)”, Post-Tensioning Institute, 2006.

[2] N. Puntharathorn, “Design of Prestress Concrete”, Library Nine Publishing, 1997. (in Thai)

[3] Ramkhamhaeng University, “Business Forecasting”, Available: e-book.ram.edu/e-book/c/CT487/CT487-10.pdf, 10 November 2012. (in Thai)

[4] J.W.M. Bertrand, and D.R. Muntslag, "Production control in engineer-to-order firms.", International Journal of Production Economics, 30-31, 1993, pp 3-22.

[5] ACI 318-89, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete”, Detroit, American Concrete Institute, 1989.

[6] EIT 1009-34, “Standard for Prestress Concrete”, 1994. (in Thai)