การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF CONCRETE REINFORCEMENT RIGID VIERENDEEL BEAMS BEHAVIOUR BY USING FINITE ELEMENT METHOD

ปริยานุช ใหม่จันทร์[1] อานนท์พร สุวรรณพลาย[2] และ อาทิตย์ เพชรศศิธร[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: Nui3875@gmail.com.*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษา พฤติกรรมกำลังรับแรงดัด และทำนายการแอ่นตัวของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล เปรียบเทียบพฤติกรรมเมื่อแบ่งช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานต่างกัน เพื่อหาความเหมาะสมของลักษณะชิ้นส่วนที่เหมาะสมของคานโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี “ไฟไนต์เอลิเมนต์” โดยโปรแกรม SAP2000V.21 สร้างแบบจำลอง คานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล กว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. ทั้งหมด 5 รูปแบบดังนี้ 1.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 1 ช่อง, 2.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 2 ช่อง, 3.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 3 ช่อง, 4.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 6 ช่อง, 5.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 12 ช่อง ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งประกอบด้วย คอร์ดบน-ล่าง ขนาด 2000x1000 มม. ชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานขนาด 900x1350 มม. กำหนด คานเป็นส่วนหนึ่งขององค์อาคารโรงพยาบาล น้ำหนักบรรทุกคงที่(DL) 2400 กก./ลบ.ม. น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม(SDL) 400 กก./ตร.ม. น้ำหนักบรรทุกจร(LL) 400 กก./ตร.ม. ตัวคูณแรงรวม 1.4DL+1.4SDL+1.7LL (ตามมาตรฐาน ACI 9.2.1) ออกแบบตามมาตรฐาน วสท. ACI 318-14 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางผู้เขียนพบว่าช่วงความเหมาะสมของรูปแบบช่องเปิด สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เวียร์เรนเดล ขนาดกว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. คือช่วงระหว่างรูปแบบที่ 3 – รูปแบบที่ 4 ทั้งสองรูปแบบการเสียรูปมีค่าระหว่าง 2.24-1.30 เซนติเมตร ส่วนรูปแบบที่5 คานช่องว่าง 12 ค่าการเสียรูปเพียง 0.96 เซนติเมตร แต่ผลของการมีชิ้นส่วนในแนวตั้งเยอะเกินไป จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองและเป็นการเพิ่มมูลค่างานก่อสร้าง ในขณะที่ค่าการเสียรูปแตกต่างกันเพียง 1.28 เซนติเมตร

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็ง, กำลังรับแรงดัด, คอร์ดบน-ล่าง, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This article aims to study the behaviors of flexural strength and predict deflection of structure of concrete reinforcement rigid vierendeel beams. Behaviors were compared when dividing different spaces among all vertical parts of beam in order to find appropriateness of concrete reinforcement rigid vierendeel beams. The results were analyzed by using “Finite Element Method” via SAP2000V.21. To conduct this research, concrete reinforcement rigid vierendeel beams were modeled with the width of 2000 mm., the depth of 5250 mm., and the length of 24450 mm. in 5 formats as follows: 1) In the event that there was 1 panel of space among vertical parts of beam; 2) In the event that there were 2 panels of space among vertical parts of beam; 3) In the event that there were 3 panels of space among vertical parts of beam; 4) In the event that there were 6 panels of space among vertical parts of beam; 5) In the event that there were 12 panels of space among vertical parts of beam. Each part of rigid vierendeel beam consisted of upper-lower chords with the size of 2000x1000 mm. and vertical part of beam with the size of 900x1350 mm. Beams were defined as a part of a hospital building with Dead Load (DL) of 2400 kg./cubic meter, Superimposed Dead Load (SDL) of 400 kg./square meter, Live Load (LL) of 400 kg./square meter, and total stress factor of 1.4DL+1.4SDL+1.7LL (based on ACI 9.2.1) Standard. They were designed under ACI 318-14 Standard. The results of comparison on behavior revealed that suitable range of open panel formats for concrete reinforcement rigid vierendeel beams with the width of 2000 mm., the depth of 5250 mm., and the length of 24450 mm. was the range from Format 3 – 4. Deformation of both patterns was ranged between 2.24-1.30

centimeters. For Format 5 with 12 panels of space, deformation was only 0.96 centimeters. However, too many vertical parts may be wasted and may increase constructional cost while the difference of deformation was only 1.28 centimeters.

Keywords: Concrete reinforcement rigid vierendeel beams, Flexural strength, Upper-lower chords, Finite Element

1. คำนำ

ระบบโครงสร้าง เวียร์เรนเดล ชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก เริ่มเข้ามามีบทบาทและพบเห็นมากขึ้นในประเทศไทย อาจเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว ให้ความสำคัญกับความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม และคำนึงถึงลักษณะการใช้งานสำหรับงานระบบประกอบอาคาร ในอดีตที่ผ่านมา โครงสร้าง เวียร์เรนเดล ถูกสร้างจากเหล็กรูปพรรณ ซึ่งพัฒนามาจากแนวคิดของการออกแบบ โครงถักเหล็กรูปพรรณ แต่โครงสร้างระบบเวียร์เรนเดล ได้ตัดชิ้นส่วนประกอบในแนวทแยงออกไป และออกแบบให้รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนเป็นแบบโครงข้อแข็ง โดยวิธีการเชื่อม เพื่อทำให้การส่งถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนมีความต่อเนื่อง แต่ข้อผิดพลาดที่ทำให้ความล้มเหลวของโครงสร้างดังกล่าวกลับมาจากฝีมือในการเชื่อมของแรงงาน และคุณภาพของตัววัสดุที่ใช้ก่อสร้างเอง แม้ต่อมาได้พัฒนาในเรื่องของการเชื่อม แต่ก็เป็นเรื่องยากที่จะควบคุมในกระบวนการในการทำงานให้สมบูรณ์ทั้งหมดได้

ผู้จัดทำงานวิจัยเล่มนี้เล็งเห็นความสำคัญของโครงสร้างที่ควรคำนึงถึงการใช้งานเป็นหลัก เล็งเห็นถึงปัญญาหาทางด้านการเดินท่องานระบบที่มีระยะระหว่างช่วงชั้นไม่เพียงพอ(ดังตัวอย่างในรูปที่1) ทำให้ต้องมาเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างในภายหลัง จึงได้ทำงานวิจัย “การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล ด้วนระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานในแต่ละจำนวนช่องว่าง เพื่อให้นำมาซึ่งโครงสร้างที่เหมาะสมแก่การใช้งาน

รูปที่ 1 ตัวอย่างแนวท่องานระบบวิ่งผ่านคานคอนกรีต

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างที่มีความน่าเชื่อถือรองจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ยังคงมีต้นทุนที่สูง อีกทั้งยังต้องการแรงงานสำหรับการจัดทำแบบจำลองตามจำนวนที่ต้องการ ทางผู้จัดทำวิจัยเล่มนี้จึงใช้วิธีการศึกษา พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเวียร์เรนเดล โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาระยะของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานที่เหมาะสมที่สุด รวมถึงเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดัดและแรงเฉือนของคานในแต่ละกรณีการแบ่งช่องว่าง และศึกษาการเสริมกำลังการรับแรงบริเวณจุดต่อ เพื่อสามารถต้านทานโมเมนต์ดัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพียงพอ ตามหลักการที่ถูกต้องสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาความเหมาะสมของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเวียร์เรนเดล เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เมื่อช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนมีความแตกต่างกันในแต่ละกรณี

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

สมมติฐานน้ำหนักบรรทุก คานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล เป็นองค์อาคารของ โครงสร้าง อาคารโรงพยาบาลขนาดโครงสร้างคอร์ดบน-ล่าง ขนาด 2000x1000 มม.ชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานขนาด 900x1350 มม.เพื่อหาความเหมาะสมของช่องว่างในคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเวียร์เรนเดล และเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เมื่อช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานมีความแตกต่างกันในแต่ละกรณี

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาความเหมาะสมของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเวียร์เรนเดล พร้อมทั้งแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างในแต่ละกรณีศึกษาได้

2. วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กในระบบ เวียร์เรนเดล มีปรากฏให้เห็นมากขึ้นในประเทศไทย เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ให้ความสำคัญกับความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรมและคำนึงถึงการใช้งาน เมื่อโครงสร้างเวียร์เรนเดลไม่มีชิ้นส่วนในแนวทแยง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญบริเวณจุดต่อของ เสา กับคอร์ดบน-ล่าง ในระบบ ระยะล้วงเหล็กระหว่างเสา-คาน มีผลต่อการนิยามลักษณะของจุดต่อเชื่อม ว่าจะเป็นข้อต่อหมุด(Hinged joint) หรือ ข้อต่อแบบยึดแน่น(Rigid joint) หากบริเวณจุดต่อเสา-คาน ไม่พิจารณาให้มีระยะล้วงเหล็ก ให้นิยามรอยต่อว่าเป็น Hinged joint แต่หากพิจารณาให้บริเวณจุดต่อเสา-คาน มีระยะล้วงเหล็กเพื่อให้จุดเชื่อมต่อมีความสามารถในการต้านทานแรงดัดให้นิยามรอยต่อว่าเป็น Rigid joint ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาก่อนหน้าสำหรับโครงสร้างรูปแบบเวียร์เรนเดล

The Vierendeel (ผู้แต่ง: David J. Wickersheimer) ข้อมูลจากวารสารสมาคมประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรม เผยแพร่โดย University of California Press วันที่ 10/07/2013 ผู้เขียนต้องการอธิบายให้เห็นถึงการใช้งานโครงสร้าง เวียร์เรนเดลที่มีความนิยมมากขึ้น เวียร์เรนเดลถ่ายแรงจากคอร์ดโดยโมเมนต์ดัดที่บริเวณข้อต่อ แสดงตามรูปที่2

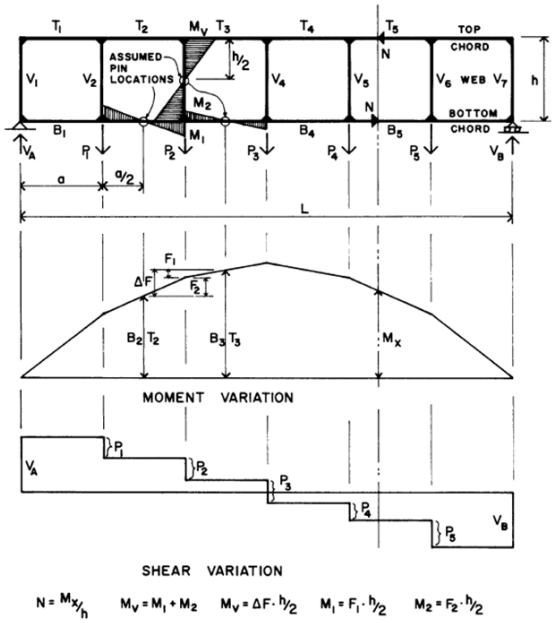


Fig. 1. Vierendeel analysis (author).

รูปที่ 2 เวียร์เรนเดลถ่ายแรงจากคอร์ดโดยโมเมนต์ดัดที่บริเวณข้อต่อ
(ที่มา The Vierendeel, 1976)

การพัฒนาโครงสร้างเวียร์เรนเดลในช่วงต้น ต้นกำเนิดโครงสร้างเวียร์เรนเดล เกิดจากวิศวกรชาวเบลเยียม ที่ชื่อว่า อาร์เธอ เวียร์เรนเดล จากนั้นเข้าได้เป็นศาสตราจารย์ที่มหาวิทยาลัยของลูแวน ได้ถ่ายทอดความคิดและทฤษฎีของตัวเองผ่านหนังสือ Longerons en Treillis ในปี ค.ศ.1896 ในเวลานั้นโครงสร้างเหล็ก จำเป็นต้องใช้แผ่นเพลทขนาดใหญ่เพื่อรองรับแนวหมุดย้ำ ชิ้นส่วนโครงสร้างมีขนาดใหญ่และไม่ค่อยได้ทำเส้นกึ่งกลางของชิ้นส่วนให้มารวมกันที่จุดต่อ สิ่งเหล่านี้นำไปสู่ข้อผิดพลาดในด้านการรับกำลัง ซึ่งมีค่าคาดเคลื่อนประมาณ 15% เมื่อเปรียบเทียบรายการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดค่าในภาคสนาม นำมาสู่การเสนอโครงถักสี่เหลี่ยมข้อต่อแข็งแกร่ง (rigid jointed) ช่วยแก้ปัญหาการเยื้องศูนย์กลางของชิ้นส่วน ทำให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์มากขึ้น แม้จะได้รับการยอมรับในระดับท้องถิ่น แต่สำนักงานวิศวกรก็มีข้อโต้แย้ง เนื่องจากมีลักษณะที่ไม่แน่นอนสูงของระบบที่ต้องใช้การคำนวณที่ยากลำบาก ความรู้สึกเช่นนี้ถูกกำจัดภายหลังโดยนักวิชาการที่ให้การสนับสนุนทฤษฎีของเวียร์เรนเดล

การลดลงของโครงสร้างเวียร์เรนเดล รอยแตกและรอยแยกออกของโครงสร้างส่วนใหญ่เกิดจากความรู้ที่ไม่เพียงพอเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม ผลงานที่ไม่ดี และคุณภาพเหล็กต่ำ ทำให้เกิดคำถามในระบบเวียร์เรนเดล ระบบโครงสร้างเวียร์เรนเดลที่มีรอยเชื่อม แม้จะได้รับการออกแบบอย่างเพียงพอ แต่ก็มีความอ่อนไหวต่ออิทธิพลภายนอก เช่น ความเย็น ความร้อน การสั่นสะเทือน และแรงกระแทก สะพาน เวียร์เรนเดล ส่วนใหญ่ในประเทศเบลเยียม มีอายุการใช้งานเพียงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากถูกรุกรานจากเยอรมนี ภายหลังจากสงครามโลก บทบาทของเฟรมเวียร์เรนเดลในเบลเยียม ก็ลดน้อยลง และความสวยงามทางด้านภูมิทัศน์ได้ถูกนิยามใหม่ด้วยโครงสร้างโค้งธนูที่เรียวขึ้น และแผ่นสะพานที่ไม่สร้างความรำคาญ อีกทั้งความต้องการในประเทศอื่น ๆนั้นได้รับการจัดการอย่างสวยงามด้วยระบบกันสะเทือนและระบบเคเบิลที่พัฒนาขึ้นใหม่นั้นพบได้ในประเทศเยอรมนี และในขณะเดียวกันฝรั่งเศสก็ได้รับความสนใจจากโครงสร้างอื่นที่น่าสนใจนั่นคือคอนกรีตอัดแรง

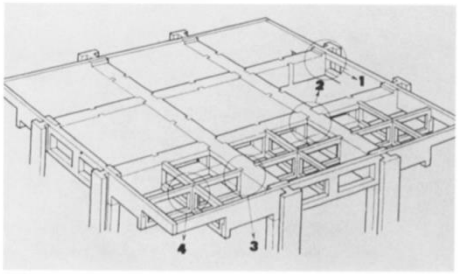


Fig. 6. Philadelphia, Medical Research Laboratory, University of Pennsylvania, L. Kahn, 1959. Structural framing (*Architectural Record*, September 1959).

รูปที่ 3 โครงสร้างเวียร์เรนเดลถูกสร้างเป็นกริดแบบสองทิศทางสำหรับห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ที่มหาวิทยาลัยเพนซิลเวเนีย
(ที่มา The Vierendeel, 1976)

ความจำเป็นในการออกแบบเพื่อความจำเป็นต่องานระบบประกอบอาคารมีมากขึ้น หลุยส์ คาห์น ได้ทำการออกแบบเพื่อรองรับระบบเชิงกลโดยโครงสร้างเวียร์เรนเดลถูกสร้างเป็นกริดแบบสองทิศทางสำหรับห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ที่มหาวิทยาลัยเพนซิลเวเนียแสดงตาม รูปที่3. โดยโครงสร้างเป็นระบบคอนกรีตสำเร็จรูปเทคนิคการอัดแรงช่วยให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างมีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น

TRUCTURAL MODELLING OF VIERENDEEL BEAMS WITH SEMI-RIGID JOINTS (แบบจำลองโครงสร้างคานเวียร์เรนเดลข้อต่อกึ่งแข็ง)โดย Alexandre Almeida Del Savio, Luiz Fernando Martha,Sebastiao Arthur Lopes de Andrade,Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco,Luciano Rodrigues Ornelas de Lima ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างมหาวิทยาลัยแห่งรัฐรีโอเดจาเนโร,บราซิลในปี2005 จุดประสงค์หลักของบทความนี้คือเพื่อแสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ระบบคานแบบ Vierendeel อิทธิพลของข้อต่อกึ่งแข็งในโครงสร้างและการกระจัดเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทแรงภายในโครงสร้างของระบบ จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้านี้ คือให้เห็นถึงข้อดีของการใช้การแก้ปัญหาโดยใช้configuration กึ่งแข็งแบบสมบูรณ์เทียบกับ configuration แบบอื่น เมื่อเปรียบเทียบสมมุติฐานแบบกึ่งแข็งกับสมมุติฐานแบบแข็งวิธีกึ่งแข็งแสดงให้เห็นถึงแรงเหมือนกันกับในระบบแข็ง

แต่ก็มีความพอใจในระดับของแรงที่ยอมรับได้และมีความแข็งดี ที่ต่ำกว่าสมมติฐานแบบแข็งแสดงตามรูปที่4. ผลที่ตามมาของการแก้ปัญหาโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่ประหยัดมากขึ้นเนื่องจากข้อต่อกึ่งแข็งมีราคาถูกและโครงสร้างมีน้ำหนักเบา

Table 3 – Comparison: displacements in node 3.

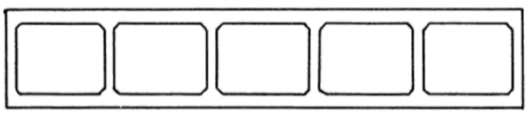
Displac.	Rigid	Hinge	Semi-Rigid (partial)	Semi-Rigid (hinge)	Semi-Rigid (full)
d_x (mm)	0.7939	0.4132	0.7301	0.4132	0.8084
d_y (mm)	-18.7200	-93.5000	-33.3000	-198.5000	-45.1500
r_z (rad)	-0.0003	-0.0010	-0.0004	-0.0010	-0.0003

Table 4 – Comparison: forces and moments in element 12.

Internal Forces	Rigid	Hinge	Semi-Rigid (partial)	Semi-Rigid (hinge)	Semi-Rigid (full)
N_9 (kN)	-86.80	0.00	-72.00	0.00	-88.20
N_{10} (kN)	-86.60	0.00	-72.00	0.00	-88.20
Q_9 (kN)	-30.00	-60.00	-38.10	-60.00	-30.00
Q_{10} (kN)	-30.00	-60.00	-38.10	-60.00	-30.00
M_9 (kNm)	46.60	180.00	74.30	180.00	45.90
M_{10} (kNm)	-43.40	0.00	-40.10	0.00	-44.10

รูปที่ 4 ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของโหนด3 และแรงกับโมเมนต์ในชิ้นส่วนที่12 (ที่มา Structural modelling of Vierendeel beams with semi-rigid joints, 2005)

Design of Vierendeel Thusses โดย Richard Denis Pearson คณะวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต Rolla, Missouri ปี1959 งานวิจัยนี้กล่าวถึงโครงถักเวียร์เรนเดลหรือโครงถักชนิดโครงข้อแข็ง ผู้ริเริ่มใช้งานคือศาสตราจารย์อาร์เธอ เวียร์เรนเดล วิศวกรชาวเบลเยียม โครงเวียร์เรนเดลชิ้นส่วนในแนวทแยง นั่นทำให้ราคาในการก่อสร้างลดลงถึง20-30% ข้อดีของโครงข้อแข็งคือรายละเอียดง่ายขึ้น และราคาถูกลง ในกรณีโครงข้อแข็งความแข็งแรงของข้อต่อทำโดยการเชื่อมอย่างเต็มพื้นที่ โครงสร้างเวียร์เรนเดลยังไม่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อโต้แย้งกันอย่างแพร่หลายในเรื่องการก่อสร้างและความซับซ้อนของการวิเคราะห์ที่ยังขาดการยอมรับ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงต้องการอธิบายรายละเอียดการวิเคราะห์และแนะนำวิธีการออกแบบ



(a) Parallel chord

รูปที่ 5 โครงถักเวียร์เรนเดลลักษณะกรอบสี่เหลี่ยมสัดส่วนปกติ (ที่มา Design of Vierendeel Trusses, 1959)

การวิเคราะห์โครงถักเวียร์เรนเดลในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประมาณหลายวิธี ทำให้แก้ปัญหาได้ง่ายขึ้น โดยการสมมติตำแหน่งการดัดกลับของชิ้นส่วนในแนวตั้งตรวจสอบโดยชุดรูปภาพความยืดหยุ่น ผลของสมติฐานเหล่านี้คือการลดจำนวนสมการสำหรับการแก้ปัญหา วิธีข้างต้นไม่สนใจการเสียรูปตามแนวแกน มีการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นว่าขนาดความเค้นโดยตรงไม่ได้รับผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดในขณะที่คอร์ดสูงสุดเกิดข้อผิดพลาดประมาณ5% เป็นผลจากการละเลยการเสียรูปตามแนวแกน สำหรับโครงถักเวียร์เรนเดลลักษณะกรอบสี่เหลี่ยมสัดส่วนปกติแสดงตามรูปที่5. วิธีการกระจายโมเมนต์(The moment distribution method) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เพราะจำนวนสมการที่ต้องหาพร้อมกัน ลดลงตามชิ้นส่วนประกอบของโครงถัก สมมติฐานไม่พิจารณาการเสียรูปตามแนวแกนและสันนิษฐานว่าน้ำหนักกระทำที่เฉพาะตามความยาวของชิ้นส่วนเท่านั้น วิธีการกระจายโมเมนต์หรือวิธีอื่น ๆที่ไม่พิจารณาการเสียรูปตามแนวแกน จะไม่สามารถใช้ได้กับโครงถักเวียร์เรนเดลชนิดที่ไม่ใช่สี่เหลี่ยมได้ การแก้ปัญหาในปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการหาค่าได้ทำให้แก้สมการได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น

3. วิธีการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ศึกษาทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเสา-คาน คอนกรีตเสริมเหล็ก พฤติกรรมการวิบัติ พฤติกรรมของจุดต่อเสา-คาน และระเบียบวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งความเป็นมาของคานระบบ เวียร์เรนเดล การพัฒนาระบบคานเวียร์เรนเดล และยังรวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจุดต่อ เสา-คาน คอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็ง แบบเวียร์เรนเดล กว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. ทั้งหมด 5 รูปแบบ และเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานแต่ละรูปแบบจำนวนช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้ง โดยโปรแกรม SAP2000V.21

3.2 รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง

3.2.1 รูปแบบ

วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี “ไฟไนต์เอลิเมนต์” โดยโปรแกรม SAP2000V.21 สร้างแบบจำลอง คานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล กว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. แบ่งกรณีศึกษาดังนี้

1.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 1 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 24450 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ)

2.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 2 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 12225 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ)

3.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 3 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 8150 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ)

4.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 6 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 4075 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ)

5.กรณีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 12 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 2037.50 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ)

3.2.2 ขนาดชิ้นส่วนของโมเดล

1.คอร์ดบน-ล่าง ขนาด 2000x1000 มม.

2.ชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานขนาด 900x1350 มม.

3.2.3 น้ำหนักบรรทุก

กำหนดสมมติฐานน้ำหนักบรรทุกของโมเดล คานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งแบบเวียร์เรนเดล เป็นองค์อาคารของ โครงสร้าง อาคารโรงพยาบาล

กำหนด

1.น้ำหนักบรรทุกคงที่(Dead load) = 2400 กก./ลบ.ม.

2.น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม(Super Dead load) = 400 กก./ตร.ม.

3.น้ำหนักบรรทุกจร(Live load) = 400 กก./ตร.ม.

3.3 แรงรวม

แรงรวม แทนด้วยสัญลักษณ์ U_i แรงรวม หมายถึง ผลลัพธ์ของแรงทุกกรณีที่ถูกคูณด้วยตัวคูณแรง(Load factor)แล้ว

ใช้กรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร (ACI 9.2.1:9-1)

$$U_i=1.4DL+1.4SDL+1.7LL \quad (1)$$

โดย DL = น้ำหนักบรรทุกคงที่(Dead Load)

LL = น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

SDL = น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Super Dead Load)

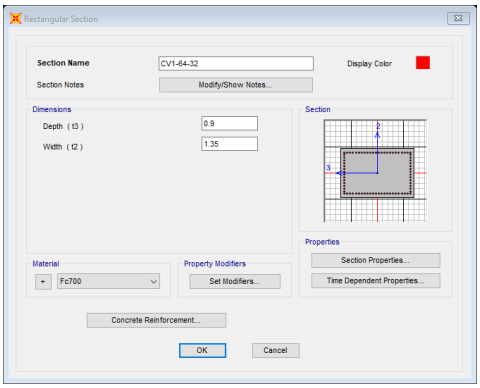
3.4 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรม

1.กำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดคอนกรีต 700 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับชิ้นส่วนแนวตั้งของคาน ดังรูปที่ 6

กำลังอัดคอนกรีต 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับคอร์ดบน-ล่างของคาน ดังรูปที่ 7

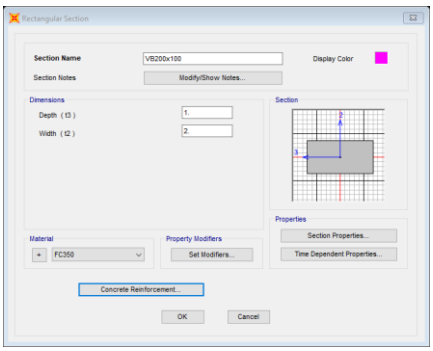
2.กำหนดคุณสมบัติเหล็กเส้นของทั้งองค์อาคารใช้เกรด SD50 กำลังคลากไม่น้อยกว่า 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



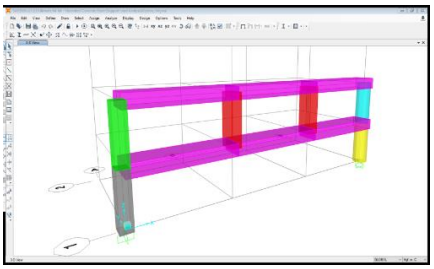
รูปที่ 6 ตัวอย่างการกำหนดหน้าตัดและคุณสมบัติของชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน

3.5 สร้างแบบจำลองและอ่านค่า

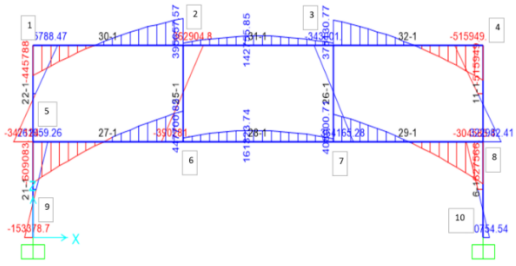
สร้างแบบจำลองในโปรแกรม SAP2000.21 ดังรูปที่ 8 และบันทึกค่าเมื่อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและใส่แรงที่กระทำกับคาน ลักษณะโมเมนต์ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 9 และลักษณะการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์แสดงดังรูปที่ 10



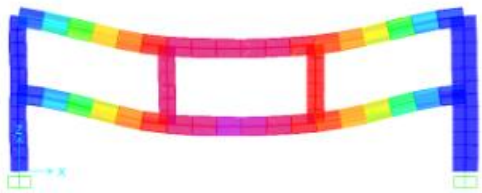
รูปที่ 7 ตัวอย่างการกำหนดหน้าตัดและคุณสมบัติของคอร์ดบน-ล่างของคาน



รูปที่ 8 ตัวอย่างคานเวียร์เรนเดลในโปรแกรม SAP2000.21



รูปที่ 9 ตัวอย่างลักษณะโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคานเวียร์เรนเดล



รูปที่ 10 ตัวอย่างการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์ดัด

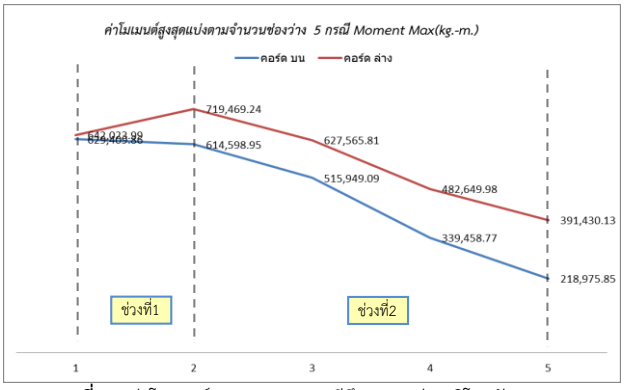
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมSAP2000V.21 ของโมเดล คานคอนกรีตเสริมเหล็กระบบเวียร์เรนเดล กว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. ทั้งหมด 5 รูปแบบ

1.กรณีที่1 ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 1 ช่อง
2.กรณีที่2 ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 2 ช่อง
3.กรณีที่3 ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 3 ช่อง
4.กรณีที่4 ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 6 ช่อง
5.กรณีที่5 ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 12 ช่อง

ตารางที่ 1 ค่าโมเมนต์สูงสุดของ 5 กรณีศึกษา (หน่วย กิโลกรัม-เมตร)

ตำแหน่ง	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3	กรณีศึกษาที่ 4	กรณีศึกษาที่ 5
คอร์ดบน	629409.86	614598.95	515949.09	339458.77	218975.85
คอร์ดล่าง	642023.99	719469.24	627565.81	482649.98	391430.13



รูปที่ 11 ค่าโมเมนต์สูงสุดของ 5 กรณีศึกษา (หน่วย กิโลกรัม-เมตร)

4.1 การดำเนินการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 5 กรณีศึกษา

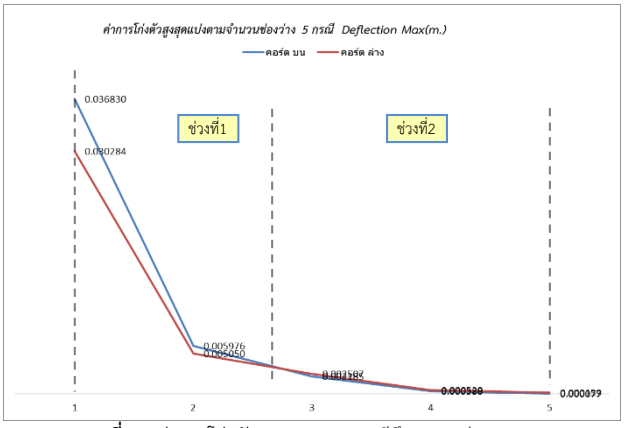
อธิบายโดยรูปที่11 กราฟแสดงค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างฐานรองรับกับคอร์ดบน-ล่าง เมื่อพิจารณาที่คอร์ดล่างสามารถแบ่งช่วงการเกิดโมเมนต์ได้ทั้งหมด 2 ช่วง

1) ช่วงที่โมเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เป็นช่วงที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีศึกษาที่1 กับกรณีศึกษาที่2 ค่าโมเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 642,023.99 กิโลกรัม-เมตร เป็น 719,469.24 กิโลกรัม-เมตร

2) ช่วงที่โมเมนต์มีแนวโน้มลดลง เป็นช่วงที่เกิดระหว่างกรณีศึกษาที่2 กับกรณีศึกษาที่5 ค่าโมเมนต์สูงสุดลดลงจาก 719,469.24 กิโลกรัม-เมตร เหลือเพียง 391,430.13 กิโลกรัม-เมตร ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นแปรผกผันกับจำนวนช่องว่างระหว่างชิ้นส่วน คือ โมเมนต์มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มชิ้นส่วนในแนวตั้ง และคอร์ดล่างรับโมเมนต์มากกว่าคอร์ดบนเสมอ

ตารางที่ 2 ค่าการโก่งตัวสูงสุดของ 5 กรณีศึกษา (หน่วยเมตร)

ตำแหน่ง	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3	กรณีศึกษาที่ 4	กรณีศึกษาที่ 5
คอร์ดบน	0.036830	0.005976	0.002185	0.000388	0.000077
คอร์ดล่าง	0.030284	0.005050	0.002507	0.000520	0.000159



รูปที่ 12 ค่าการโก่งตัวสูงสุดของ 5 กรณีศึกษา (หน่วยเมตร)

4.2 การดำเนินการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวสูงสุด 5 กรณีศึกษา

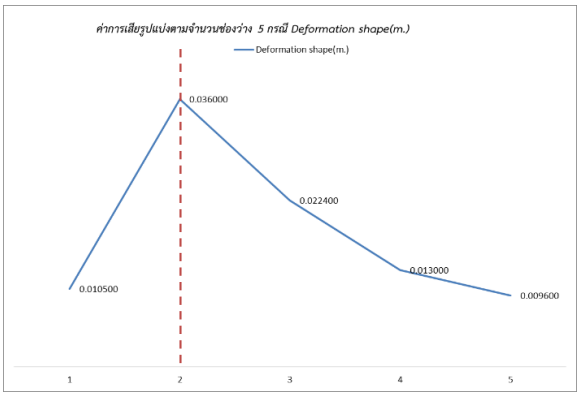
อธิบายโดยรูปที่12 กราฟแสดงค่าการโก่งตัวสูงสุดบริเวณกลางคานตามจำนวนช่องว่าง 5 กรณี สามารถแบ่งช่วงการเกิดการโก่งตัว ได้เป็น 2 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงที่การโก่งตัวคอร์ดบนสูงกว่าคอร์ดล่าง เป็นช่วงที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีศึกษาที่1 กับกรณีศึกษาที่2 ที่กรณีศึกษาที่1 คอร์ดบนมีการโก่งตัว 0.036830 เมตร(3.683 เซนติเมตร) คอร์ดล่างมีการโก่งตัว 0.030284 เมตร(3.028 เซนติเมตร) ที่กรณีศึกษาที่2 คอร์ดบนมีการโก่งตัว 0.005976 เมตร(ประมาณ 6 มิลลิเมตร) คอร์ดล่างมีการโก่งตัว 0.005050 เมตร (ประมาณ 5 มิลลิเมตร) เมื่อเปรียบเทียบ 2 กรณีศึกษาแรกพบว่า การโก่งตัวลดลงประมาณ 3 เซนติเมตรเมื่อเพิ่มชิ้นส่วนในแนวตั้งของคาน 1 ชิ้น

2) ช่วงที่การโก่งตัวคอร์ดบนต่ำกว่าคอร์ดล่าง เป็นช่วงที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีศึกษาที่3 ถึงกรณีศึกษาที่5 ค่าการโก่งตัวของคอร์ดล่างอยู่ในช่วง 2.5-0.16 มิลลิเมตร และการโก่งตัวของคอร์ดบนและคอร์ดล่างมีค่าต่ำมาก ค่าดังกล่าวน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3 ค่าการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์ดัดของ 5 กรณีศึกษา (หน่วยเมตร)

ตำแหน่ง	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3	กรณีศึกษาที่ 4	กรณีศึกษาที่ 5
คอร์ดบน-คอร์ดล่าง	0.010500	0.036000	0.022400	0.013000	0.009600



รูปที่ 13 ค่าการเสียรูปของ 5 กรณีศึกษา (หน่วยเมตร)

4.3 การดำเนินการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์ดัด 5 กรณีศึกษา

อธิบายโดยรูปที่13 กราฟแสดงค่าการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์ดัดตามจำนวนช่องว่าง 5 กรณี แสดงให้เห็นว่า หากผู้เขียนไม่ให้ความสนใจกรณีที่1 เนื่องจากกรณีที่1 ไม่มีชิ้นส่วนในแนวตั้ง(เสา) กรณีที่2 จะมีการเสียรูปสูงสุดประมาณ 3.60 เซนติเมตร และมีแนวโน้มการเสียรูปลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนในแนวตั้ง ช่วงกราฟกรณีที่3, 4 และกรณีที่5 การเสียรูปมีค่า 2.24 , 1.30 , 0.96 เซนติเมตรตามลำดับ

5. บทสรุป

ช่วงความเหมาะสมของรูปแบบช่องเปิด สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเวียร์เรนเดล ขนาดกว้าง 2000 มม. ลึก 5250 มม. ยาว 24450 มม. คือช่วงระหว่างกรณีที่ 3 – กรณีที่ 4 ในที่นี้กรณีที่3 คานช่องว่าง 3 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 8150 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ) และกรณีที่4 คานช่องว่าง 6 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 4075 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ) การเสียรูปมีค่าระหว่าง 2.24-1.30 เซนติเมตร ส่วนกรณีที่5 คานช่องว่าง 12 ช่อง (ขนาดช่องว่างกว้าง 2037.50 มม. วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางฐานรองรับ) ค่าการเสียรูปเพียง 0.96 เซนติเมตร แต่ผลของการมีชิ้นส่วนในแนวตั้งเยอะเกินไป จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองและเป็นการเพิ่มมูลค่างานก่อสร้าง ในขณะที่ค่าการเสียรูปแตกต่างกันเพียง 1.28 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของค่าการแอ่นตัวที่ยอมรับได้ ตามอัตราส่วนคาน ขนาดกว้าง 2000 ม.ม. ลึก 5250 ม.ม. ยาว 24450 ม.ม. ช่องเปิดที่สามารถนำมาพิจารณาออกแบบได้คือ 3 ช่อง , 4 ช่อง , 5 ช่อง , 6 ช่อง หากต้องการคำนวณหาช่องเปิดที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคานสามารถหาได้จาก 0.12- 0.25 คูณช่วงความยาวคาน หรือ 0.29 – 0.57 คูณพื้นที่หน้าตัดคาน ให้เลือกพิจารณาอย่างใดอย่างหนึ่ง ทั้งนี้ทั้งนั้น การพิจารณาดังกล่าวใช้พิจารณาสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีหน้าตัดเดียวกันตลอดช่วงความยาว มีขนาด คอร์ดบนล่างเท่ากัน และขนาดชิ้นส่วนในแนวตั้งของคานเท่ากัน

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับคำปรึกษาและการสนับสนุนที่ดียิ่งจาก ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร ทางผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งและรู้สึกขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำบทความเล่มนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ผู้ได้เขียนตำราเรียนทุกท่านที่ทำให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้อย่างมากมาย สุดท้ายขอขอบคุณบิดามารดาและครอบรัว ที่เป็นแรงพลักดันและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาที่ทำให้ข้าพเจ้าได้จัดทำบทความฉบับนี้บรรลุความสำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] David J. Wickersheimer (1976). The Vierendeel. Journal of the society of Architectural Histories, Vol.35, No.1 (Mar., 1976), pp54-60

[2] Alexandre Almeida Del Savio, Luiz Fernando Martha, Sebastiao Arthur Lopes de Andrade, Pedro Colmar Goncalves da Silva Vellasco, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (2005). Structural Modelling of Vierendeel Beems with Semi-Rigid joint, Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005 Brazilian Assoc. for Comp. Mechanics (ABMEC) & Latin American Assoc. of Comp. Methods in Engineering (AMC), Guarapari, Espírito Santo, Brazil, 19th – 21st October 2005

[3] Richard Denis Pearson (1976). Design of Vierendeel Trusses. Master of science in Civil Engineering Rolla, Missouri.

[4] กานต์ชนก มีนสุข, คณิศร ศลิษฏ์อรรถกร, ฉัตรบพิตร เปี่ยมสัมฤทธิ์ (2560). การศึกษาพฤติกรรมของ Vierendeel สำหรับคานลึก. ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.