



หลังคาโดมตึกสตางค์ มงคลสุข: การวิเคราะห์แรงในโครงสร้าง

ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*Corresponding author; E-mail address: phanuwat.sur@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์แรงของหลังคาโดมตึกอาคารสตางค์ มงคลสุข เนื่องในวาระครบรอบ ๕๐ ปีของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และได้รับพระราชทานรางวัลอาคารอนุรักษ์ศิลปะสถาปัตยกรรมดีเด่นประจำปี ๒๕๕๙ จากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดยสมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้วิเคราะห์เชิงวิศวกรรมของแรง โมเมนต์ และการเคลื่อนตัวของหลังคาโดมคอนกรีตฐานสี่เหลี่ยม บนโครงสร้างเหล็ก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมชื่อ COMSOL multiphysics ได้จำลองเอลิเมนต์พื้นบาง สำหรับหลังคาโดมคอนกรีตเสริมเหล็ก และ เอลิเมนต์คาน สำหรับโครงสร้างเหล็ก ด้วยกรณีเสตติกส์และลิเนียร์อีลาสติคส์

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าของแรงที่กระจายไปตามท่อเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลังคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตร เป็นแรงดึง และแรงกด มีแรงดึงสูงสุด มีค่า ๑๗,๘๗๓ นิวตัน และแรงกดสูงสุด - ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน มีค่าแรงเฉือนและโมเมนต์น้อยมาก สรุปผลของจากรูปน้ำหนักของหลังคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตร ได้กระจายไปตามท่อเหล็กต่างๆ ที่มีอิทธิพลมากคือเป็นแรงดึง และแรงกด

ได้ยกกรณีการเคลื่อนตัวของอาคารของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ซึ่งสร้างแยกออกจากตึกใหญ่ เป็นอาคาร ขนาดพื้นที่ ๔๐ x ๔๐ ตารางเมตร มีค่าเคลื่อนตัวต่ำลงของหลังคาในแนวตั้ง มีค่า ระหว่าง -๐.๐๐๒๘ ถึง -๐.๐๐๓๖ เมตร แทบจะเป็นพื้นหลังคาที่ราบเรียบมาก มีความต่างระดับมากที่สุดเพียง ๐.๐๐๐๘ เมตร จากบริเวณขอบและกึ่งกลางหลังคา และค่าการเคลื่อนตัวต่ำลงของโครงสร้างเหล็กในแนวตั้ง มีค่า ระหว่าง -๐.๐๐๓๒๕ ถึง -๐.๐๐๓๘ เมตร และในลักษณะเดียวกัน หลังคาโดมคอนกรีตของตึกสตางค์ มงคลสุข ๑๕๐ x ๑๕๐ ตารางเมตร มีพฤติกรรมของการรับแรงและการเคลื่อนตัวเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: ตึกสตางค์ มงคลสุข / หลังคาโดมคอนกรีต / โครงสร้างเหล็กถัก / วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ / COMSOL

Abstract

This paper presents the stress analysis of the dome roof building, Satangmongkolsuk, in an occasion of the 50th

anniversary of the Faculty of Engineering. The building has awarded as the conservation building for art architecture of the Year in 2559 by HRH Princess Chakri Sirindhorn, under the Association of Siamese Architects under Royal Patronage. The analysis of axial forces, shear forces and the bending moment and the deformation of the dome roof with square concrete base and space frame structure are demonstrated. The simulation is carried on by Finite Element method, namely COMSOL multiphysics, with plate element for roof and beam element for steel pipe under the static and linear elastic model.

Results from the analysis showed that the load from self-weight of dome roof is distributed through the steel pipes. The weight of 173,830 N covering roof area 10 X 10 square meters is axially distributed in tension of 17,873 N and compression of -173,830 N. The shear force and bending moment are small. Prominent influence are axial forces, compression.

The case study has raised the deformation of the building of the Department of Mining Engineering. The building separated from the main building has roof area of 40 x 40 square meters. The vertical deformation of the roof is ranged from -0.0028 to -0.0036 m. The maximum different deformation is 0.0008 m from the edge of the roof and the center. Moreover, the vertical deformation of the space frame structure has ranged from -0.000325 to -0.0038 m. In the same behavior, the main dome roof building with area 150 x 150 square meters has the same axial force, shear force, bending moment and deformation.

Key words: Satang Mongkolsuk building / concrete dome roof / space frame structure / Finite element method / COMSOL

1. คำนำ

ตึกสตางค์ มงคลสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตั้งชื่อตามนามของ ศาสตราจารย์ ดร. สตางค์ มงคลสุข อธิการบดีท่านที่สอง และคณบดีท่านแรกเป็นผู้ร่วมก่อตั้งมหาวิทยาลัย ได้รับการออกแบบ และก่อสร้างโดยสถาปนิก คุณ

อมร ศรีวงศ์ และวิศวกรโครงสร้าง ดร. รชฎ กาญจนวานิชย์ สร้างเสร็จราวในปี ๒๕๑๓ เป็นอาคารประกอบด้วยโครงสร้างเหล็ก รั้วหน้าหลังคาคอนกรีต ขนาด ๑๕๐ x ๑๕๐ ตารางเมตร ซึ่งซ่อนอาคารภาควิชาต่างๆ ที่ซับซ้อนไว้ใต้หลังคา มีอาคารเรียน และหอคอยที่สร้างขึ้นเป็นที่สังฆญาณวิทยุ ดังรูปที่ 1.1 และ 1.2



รูปที่ 1.1 ตึกสตางค์ มงคลสุข



(ก) เสารั้วหน้าหนัก



(ข) โครงสร้างเหล็กถัก

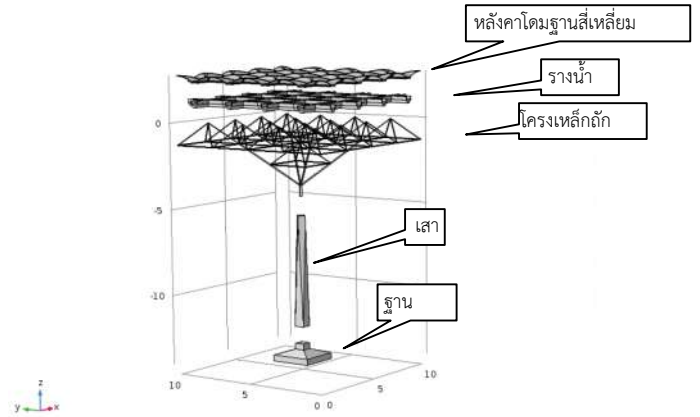
รูปที่ 1.2 (ก) เสารั้วหน้าหนัก (ข) โครงสร้างเหล็กถัก

เป็นอาคารสำหรับการศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อรองรับความต้องการของห้องเรียน ห้องปฏิบัติการ และกิจกรรมทั่วไป ได้รับการสร้างขึ้นได้เหมาะสมมากกับสภาพแวดล้อม ทั้งที่เป็นธรรมชาติดั้งเดิม และถูกดัดแปลงขึ้น ปรับรูปแบบ และวางอาคารตามแนว ชัน-ตกของพระอาทิตย์ ทิศทางลม และทิศทางน้ำในฤดูฝน ในปีนี้ได้รับพระราชทานรางวัลอาคารอนุรักษ์ศิลปสถาปัตยกรรมดีเด่นประจำปี ๒๕๕๙ จากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดยสมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์[1]

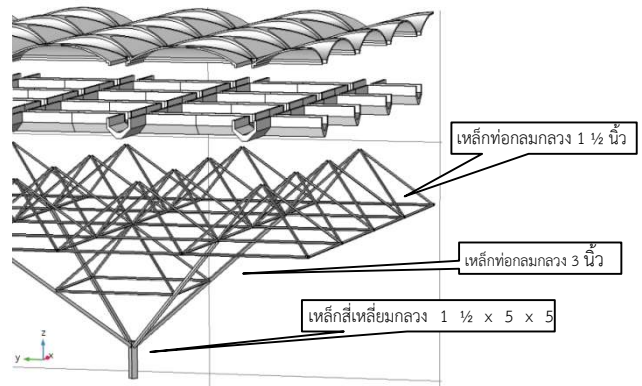
1.1 ส่วนประกอบหลังคา

เนื่องแต่ละต้นรั้วหน้าหนักโครงสร้างหลังคาเท่ากันคือพื้นที่ ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตร รูปที่ 1.2.1 แสดงองค์ประกอบของหลังคาขนาด ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตรต่อเสาหนึ่งต้น ส่วนบนสุดเป็นหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปโดมฐานสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง ยาว สูง ๒.๕ x ๒.๕ x ๐.๘๕ เมตร ทัดต่ำลงมาเป็น รางระบายน้ำ คอนกรีตเสริมเหล็ก ต่ำลงมาเป็นโครงสร้าง

ถัก ทำด้วยเหล็กท่อกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑.๕ และ ๓ นิ้ว และท่อนเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด ๕x ๕ นิ้วหนา .๒๕ นิ้ว มีขนาดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ๒.๕ x ๒.๕ ตารางเมตร สูง ๑.๒๕ เมตร ต่ำลงมาเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก หมายเหตุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงของท่อเหล็กกลมกลวง ๑.๕ นิ้ว คือ ๑.๙ นิ้วหนา .๑๕ นิ้ว



(ก) ส่วนประกอบของหลังคา



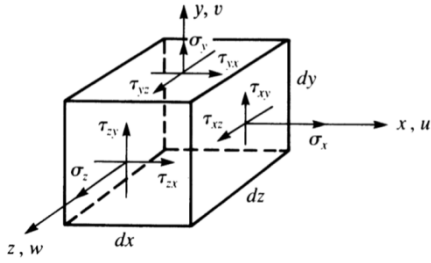
(ข) ภาพขยาย

รูปที่ 1.2.1 (ก) ส่วนประกอบของหลังคา ขนาด ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตรต่อเสาหนึ่งต้น(ข) ภาพขยาย

2. ทฤษฎี

สมการเชิงอนุพันธ์ความสมดุลของแรงในวัตถุของความเค้นและความเครียดใน สามมิติได้ตามรูปที่ ๒.๑ ดังนี้[2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X_b &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y_b &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z_b &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$



รูปที่ 2.1 Three-dimensional stress element

โดยที่ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ แทนความเค้น (stresses), $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$

แทนความเค้นเฉือน (shear stresses) และ X_b, Y_b, Z_b แทนแรงวัตถุต่อ

ปริมาตร (body forces) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

ความเครียดของวัตถุสามารถเขียนในรูปของค่าเคลื่อนตัวได้คือ

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

โดยที่ $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ แทนความเครียด (strains), $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$

แทนความเครียดเฉือน (shear strains) และ u, v, w แทนค่าเคลื่อน

ตัว (displacements) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงเส้นตรง

ทั่วไปคือ

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad \text{หรือ}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

โดยที่ E แทนค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of

elasticity) และ ν แทนค่าปัวส์ซอง (Poisson ratio) ส่วน

ความหมายของค่าบวกคือ ความเค้นดึง ความเค้นเฉือนทวน

เข็มนาฬิกา ค่าลบคือ ความเค้นกด ความเค้นเฉือนตามเข็มนาฬิกา

2.1 สมการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากวิธีการเลอว์จิน (Galerkin method) ด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก

เศษคงค้าง (weight residual method) สมการ (1) สามารถเขียนในรูป

สมการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$\int_V [B]^T [D][B] dV \{d\} = X \int_V [N]^T dV + T \int_A [N]^T dA + \{P_n\} \quad (5)$$

เมื่อค่า $[B]$ = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับค่าการ

เคลื่อนตัว, $[D]$ = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ

ความเครียด, $\{d\}$ = เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ, A = พื้นที่ของ

เอลิเมนต์, V = ปริมาตรของเอลิเมนต์, X = หน่วยแรงวัตถุต่อปริมาตร,

$[M]$ = เวกเตอร์ของฟังก์ชันการประมาณภายใน (shape function), T

= ความดันที่กระทำที่พื้นที่ผิว, $\{P_n\}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำ

ภายนอกที่จุดต่อ

หรือเขียนในสมการอย่างสั้นได้ดังนี้

$$[K]\{d\} = \{F\} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\} \quad (6)$$

เมื่อค่า

$[K]$ = เมตริกซ์ของความแข็งเกร็งรวม เท่ากับผลรวมของเมตริกซ์

ความแข็งเกร็งแต่ละเอลิเมนต์ย่อย $\sum [K]^e$

$\{d\}$ = เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ

$\{F\}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำรวมที่จุดต่อประกอบด้วยผลรวมของ

แรงดังนี้

$\{F_b\}$ = เวกเตอร์ของแรงรวมจากหน่วยแรงวัตถุต่อปริมาตรของ

แต่ละเอลิเมนต์ $\sum \{F_b\}^e$

$\{F_s\}$ = เวกเตอร์ของแรงจากความดันที่กระทำที่พื้นที่ผิวของแต่ละ

เอลิเมนต์ $\sum \{F_s\}^e$

$\{F_n\}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอกที่จุดต่อเท่ากับ

$\sum \{F_n\}^e$

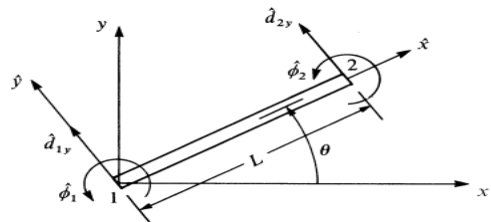
เมื่อแก้สมการ (6) ตามเงื่อนไขต่างๆ (boundary conditions) แล้ว

ทราบค่า $\{d\}$ ก็สามารรถคำนวณ ค่า ความเครียด ความเค้น หรือ แรง

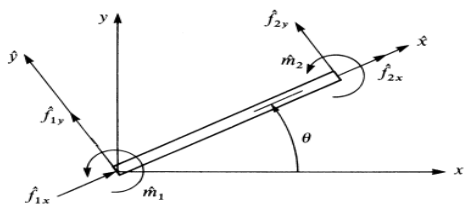
เฉือน โมเมนต์ ตลอดเอลิเมนต์ได้

2.2 กรณีโครงสร้างแฟรมของท่อเหล็ก

เอลิเมนต์ย่อยเป็นคาน (beam) ดังในรูปที่ 2.2



(ก) ค่าเคลื่อนตัว (local displacement) และมุมหมุน (rotation)



(ข) แรง (local forces) และโมเมนต์ (moment)

รูปที่ 2.2 คาน (Beam) เอลิเมนต์

สมการความสัมพันธ์ของแรงในคานท้อเหล็กสำหรับโลคอลมิติ (Local) คือ

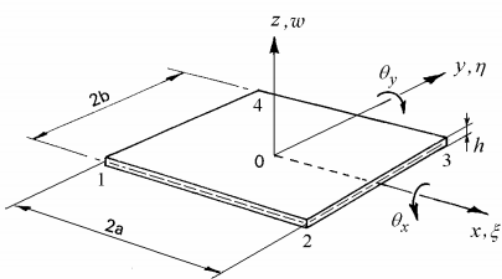
$$\{F\}^e = [K^e]\{d\}^e \text{ หรือ}$$

$$\begin{Bmatrix} \hat{f}_{1x} \\ \hat{f}_{1y} \\ \hat{m}_1 \\ \hat{f}_{2x} \\ \hat{f}_{2y} \\ \hat{m}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 12C_2 & 6C_2L & 0 & -12C_2 & 6C_2L \\ 0 & 6C_2L & 4C_2L^2 & 0 & -6C_2L & 2C_2L^2 \\ -C_1 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & -12C_2 & -6C_2L & 0 & 12C_2 & -6C_2L \\ 0 & 6C_2L & 2C_2L^2 & 0 & -6C_2L & 4C_2L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{d}_{1x} \\ \hat{d}_{1y} \\ \hat{\phi}_1 \\ \hat{d}_{2x} \\ \hat{d}_{2y} \\ \hat{\phi}_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

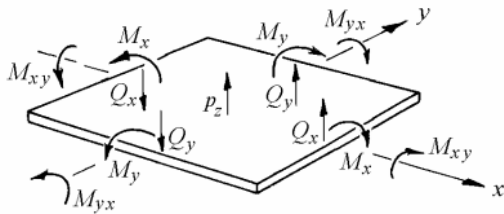
โดยที่ \hat{f}_{1x} , \hat{f}_{1y} , \hat{m}_1 และ \hat{f}_{2x} , \hat{f}_{2y} , \hat{m}_2 คือ แรงในแนวแกน x แกน y และโมเมนต์ ที่จุด 1 และ 2 ตามลำดับ \hat{d}_{1x} , \hat{d}_{1y} , $\hat{\phi}_1$ และ \hat{d}_{2x} , \hat{d}_{2y} , $\hat{\phi}_2$ คือ ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน x แกน y และมุมหมุน ที่จุด 1 และ 2 ตามลำดับ $C_1 = \frac{AE}{L}$ และ $C_2 = \frac{EI}{L^3}$ เมื่อ A แทนค่าพื้นที่หน้าตัดของท้อเหล็กกลม E แทนค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด

2.3 กรณีคานกริดเสริมเหล็กรูปโดมหลังคา

เอลิเมนต์ย่อยเป็นพื้นบาง (thin plate) [3] ดังในรูปที่ 2.3



(ก) ค่าการเคลื่อนตัว (displacement) และ มุมหมุน (rotation)



(ข) แรงเฉือน (shear force), โมเมนต์ (bending moment) และโมเมนต์บิด (twisting moment)

รูปที่ 2.3 เอลิเมนต์พื้นบาง

สมการความสัมพันธ์ของแรงในพื้นที่บางคานกริดโลคอลมิติ (Local) คือ $\{F\}^e = [K^e]\{d\}^e$ โดยมีค่าเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของพื้นบางดังนี้

$$[k^e] = \frac{Eh^3}{48(1-\nu^2)ab} \begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] & [k_{13}] & [k_{14}] \\ & [k_{22}] & [k_{23}] & [k_{24}] \\ & & [k_{33}] & [k_{34}] \\ \text{SYM} & & & [k_{44}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

เมื่อค่า

$$[k_{11}] = \begin{bmatrix} 4(\beta^2 + \alpha^2) + \frac{2}{5}(7-2\nu) & \{2\alpha^2 + \frac{1}{5}(1+4\nu)\}b & \{-2\beta^2 - \frac{1}{5}(1+4\nu)\}a \\ & \{\frac{4}{3}\alpha^2 + \frac{4}{15}(1-\nu)\}b^2 & -\nu ab \\ \text{SYM} & & \{\frac{4}{3}\beta^2 + \frac{4}{15}(1-\nu)\}a^2 \end{bmatrix}$$

$$[k_{12}] = \begin{bmatrix} -\{2(2\beta^2 - \alpha^2) + \frac{2}{5}(7-2\nu)\} & \{\alpha^2 - \frac{1}{5}(1+4\nu)\}b & -\{2\beta^2 + \frac{1}{5}(1-\nu)\}a \\ \{\alpha^2 - \frac{1}{5}(1+4\nu)\}b & \{\frac{2}{3}\alpha^2 - \frac{4}{15}(1-\nu)\}b^2 & 0 \\ \{2\beta^2 + \frac{1}{5}(1-\nu)\}a & 0 & \{\frac{2}{3}\beta^2 - \frac{1}{15}(1-\nu)\}a^2 \end{bmatrix}$$

$$[k_{13}] = \begin{bmatrix} -\{2(\beta^2 + \alpha^2) + \frac{2}{5}(7-2\nu)\} & \{\alpha^2 - \frac{1}{5}(1-\nu)\}b & \{-\beta^2 + \frac{1}{5}(1-\nu)\}a \\ \{-\alpha^2 + \frac{1}{5}(1-\nu)\}b & \{\frac{1}{3}\alpha^2 + \frac{1}{15}(1-\nu)\}b^2 & 0 \\ \{\beta^2 - \frac{1}{5}(1-\nu)\}a & 0 & \{\frac{1}{3}\beta^2 + \frac{1}{15}(1-\nu)\}a^2 \end{bmatrix}$$

$$[k_{41}] = \begin{bmatrix} 2(\beta^2 - 2\alpha^2) - \frac{2}{5}(7-2\nu) & \{2\alpha^2 + \frac{1}{5}(1-\nu)\}b & \{-\beta^2 + \frac{1}{5}(1+4\nu)\}a \\ \{-2\alpha^2 - \frac{1}{5}(1-\nu)\}b & \{\frac{2}{3}\alpha^2 - \frac{1}{15}(1-\nu)\}b^2 & 0 \\ \{-\beta^2 + \frac{1}{5}(1+4\nu)\}a & 0 & \{\frac{2}{3}\beta^2 - \frac{4}{15}(1-\nu)\}a^2 \end{bmatrix}$$

$$[k_{22}] = [I_3]^T [k_{11}] [I_3], [k_{23}] = [I_3]^T [k_{14}] [I_3], [k_{24}] = [I_3]^T [k_{23}] [I_3], \\ [k_{33}] = [I_1]^T [k_{11}] [I_1], [k_{34}] = [I_1]^T [k_{12}] [I_1], \\ [k_{44}] = [I_2]^T [k_{11}] [I_2], \quad (9)$$

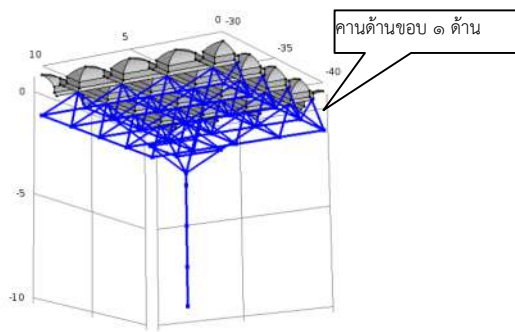
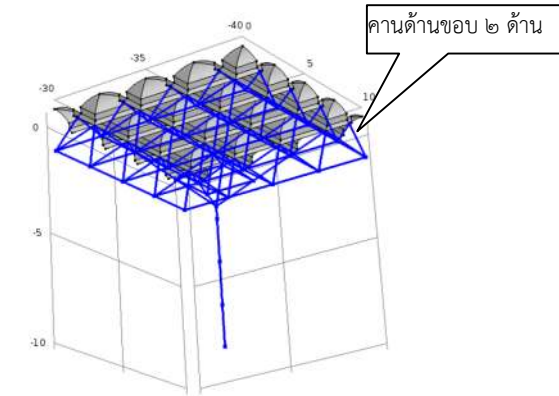
$$\text{และ } \alpha = \frac{a}{b}, \quad \beta = \frac{b}{a}.$$

$$[I_1] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [I_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [I_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

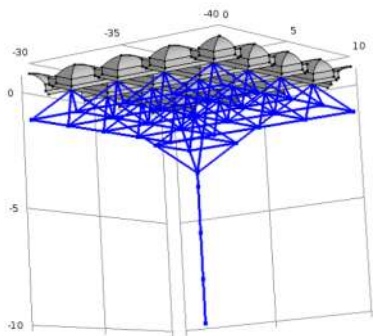
3. วิธีวิเคราะห์

การศึกษานี้ได้จำลองหลังคาตางค์ มงคลสุขด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมชื่อ COMSOL multiphysics โดยจำลองหลังคาโดมคานกริดด้วยเอลิเมนต์พื้นบาง และโครงสร้างเหล็กกับเสาคานกริด ด้วยเอลิเมนต์คานมี ๓ แบบ ที่ต่างกันเนื่องจากแต่ละต้นรับน้ำหนักโครงสร้างหลังคาเท่ากันคือพื้นที่ ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตรคือ (๑) เสาที่รับน้ำหนักบริเวณ มุมขอบ (๒) เสาที่รับน้ำหนักบริเวณขอบด้านข้าง และ (๓) เสา

ที่รับน้ำหนักภายใน แต่ละเสารับน้ำหนัก พื้นที่หลังคา ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตร ต่างกันที่เสาที่รับน้ำหนักบริเวณขอบจะมีคานเพิ่มเติมดังรูปที่ 3.1

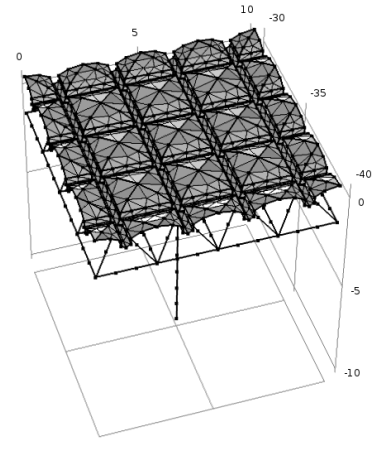


(ก) เสาที่รับน้ำหนักบริเวณ มุมขอบ (ข) เสาที่รับน้ำหนักบริเวณขอบด้านข้าง



(ค) เสาที่รับน้ำหนักภายใน
รูปที่ 3.1 จำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 3.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ ๑,๘๙๒ สำหรับหลังคาโถม และ ๓๔๘ คานสำหรับโครงสร้างเหล็กและเสาคอนกรีต ของเสาที่รับน้ำหนักภายใน และจำลองโดยสมมาตรกับเสาต้นถัดไปทั้งสี่ด้าน



รูปที่ 3.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์

ขบวนการจำลองเพื่ออธิบายการถ่ายเทน้ำหนัก จากคานคาโถม ลงสู่โครงสร้างเหล็ก และลงสู่เสา เนื่องจากน้ำหนักหลังคา และอธิบายการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ค่าคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ ๑ ใช้ในการจำลองด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงเส้นตรง (linear elastic model)

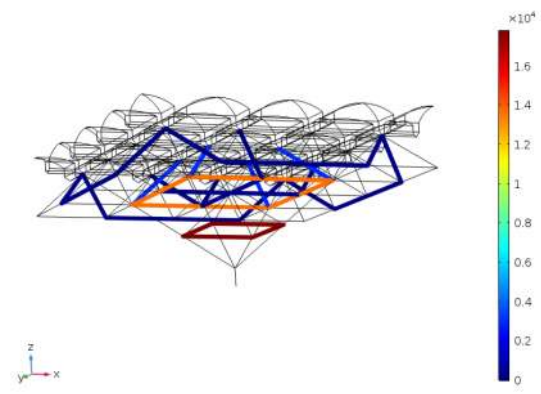
ตารางที่ ๑ คุณสมบัติของวัสดุ

รายการ	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อเมตร ^๓)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (กิโลนิวตันต่อเมตร ^๒)	โมเมนต์ ออฟ อินเนอร์เซีย (เมตร ^๔)	ค่าปัวส์ซง
คอนกรีตเสริมเหล็ก				
-หลังคา	๒,๓๐๐	๒๕,๐๐๐,๐๐๐		๐.๒
-รางระบายน้ำ	๒,๓๐๐	๒๕,๐๐๐,๐๐๐		๐.๒
-เสาคอนกรีต	๒,๓๐๐	๒๕,๐๐๐,๐๐๐		๐.๒
.๓๐ x .๓๐ เมตร			๐.๐๐๐๖๗๕	
.๔๐ x .๔๐ เมตร			๐.๐๐๒๑๓๓	
.๕๐ x .๕๐ เมตร			๐.๐๐๕๒๐๘	
เหล็ก				๐.๓
-ท่อกลมกลวง	๗,๘๕๐	๒๐๐,๐๐๐,๐๐๐		
๑.๕ นิ้ว			๒.๖๔๗๓๔๐-๗	
๓ นิ้ว			๒.๕๔๗๒๘๐-๖	
-เหล็กสี่เหลี่ยมกลวง 1/4" x 5" x 5"	๗,๘๕๐	๒๐๐,๐๐๐,๐๐๐		๑.๑๑๕๒๑๐-๕

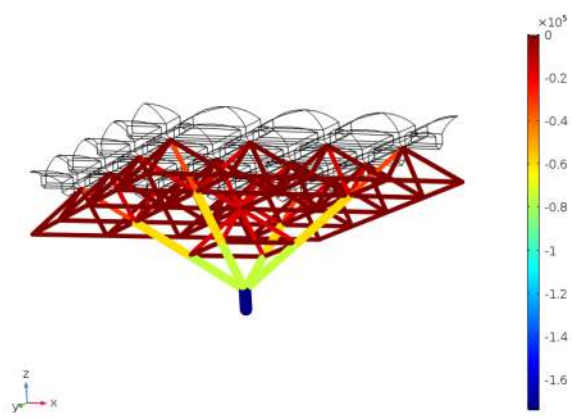
4. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์

4.1 การกระจายของแรงในโครงสร้างเหล็ก (axial forces)

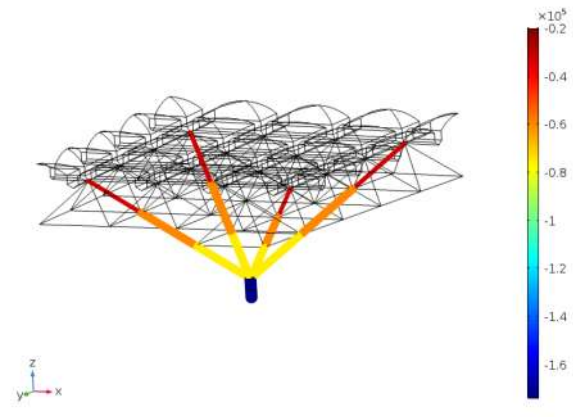
ค่าของแรงที่กระจายไปตามท่อนเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลังคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐ X ๑๐ ตารางเมตร เป็นแรงดึง (tension ค่าเป็นบวก) และแรงกด (compression ค่าเป็นลบ) ดังรูปที่ 4.1 มีแรงดึงสูงสุด มีค่า ๑๗,๘๗๓ นิวตัน และแรงกดสูงสุด -๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน รูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) เพิ่มเติมรายละเอียด ของท่อเหล็กที่รับแรงกดอย่างเดี่ยว แรงดึงอย่างเดี่ยวตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.1 (ง) แสดงค่าแรงกดในท่อเหล็ก ๑.๕ นิ้วสูงสุด -๓๒,๗๐๕ นิวตัน (สีแดง) นอกนั้นต่ำกว่า -๒๐,๐๐๐ นิวตัน ส่วนขนาด ๓ นิ้ว ท่อนบน -๔๖,๑๓๐ นิวตัน (สีแดง) ท่อนล่าง -๕๕,๗๕๐ นิวตัน(สีเหลือง) เมื่อตรวจสอบกับค่า บั๊กคิลิงโหลด (buckling load, $\pi^2 \frac{EI}{L^2}$) ของ ท่อเหล็ก ๑.๕ นิ้ว ยาวสูงสุด ๒.๕ เมตร เท่ากับ ๘๓,๖๑๐ นิวตัน และท่อเหล็ก ๓ นิ้ว ยาวสูงสุด ๔.๓๓ เมตร เท่ากับ ๒๖๘,๓๘๓ นิวตันแล้วยังมีเสถียรภาพและความปลอดภัยสูง



(ค) ท่อเหล็กที่รับแรงดึงอย่างเดี่ยว หน่วย:นิวตัน



(ก) ท่อเหล็กที่รับแรงดึงแรงกด หน่วย:นิวตัน

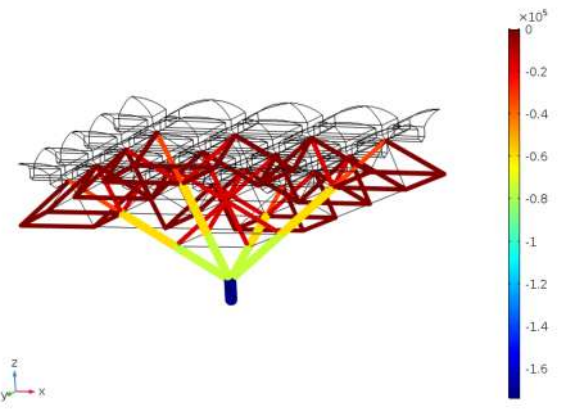


(ง) ท่อเหล็กที่รับแรงกดเพื่อตรวจสอบความเสถียรภาพ

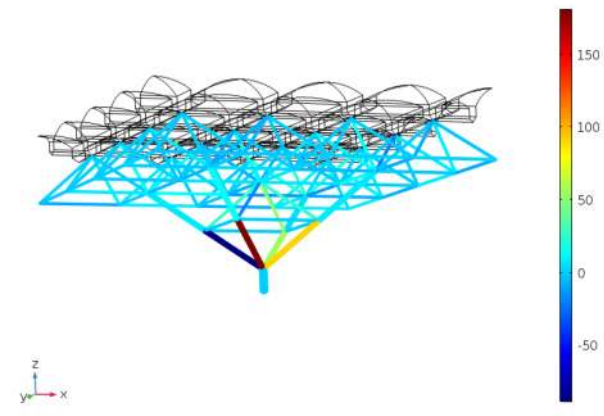
รูปที่ 4.1 การกระจายแรงในโครงสร้างเหล็ก

4.2 การกระจายแรงเฉือนในโครงสร้างเหล็ก (Shear forces)

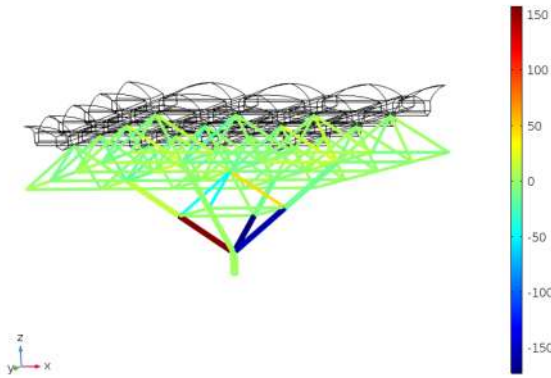
รูปที่ 4.2 แสดงค่าของแรงเฉือนที่กระจายไปตามท่อเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลังคา เป็นแรงเฉือนบวก มีแรงเฉือนบวกสูงสุด มีค่า ๑๘๑.๓๐ นิวตัน และแรงเฉือนลบสูงสุด เท่ากับ -๘๘.๓๒ นิวตัน สำหรับโลคอลแกน y ในรูปที่ 4.2 (ก) และ มีแรงเฉือนบวกสูงสุด มีค่า ๑๕๗.๘๘ นิวตัน และแรงเฉือนลบสูงสุด เท่ากับ -๑๗๒.๖๓ นิวตัน สำหรับโลคอลแกน z รูปที่ 4.2 (ข) ทั้งสองแกนมีค่าแรงเฉือนน้อยมาก



(ข) ท่อเหล็กที่รับแรงกดอย่างเดี่ยว หน่วย:นิวตัน



(ก) การกระจายแรงเฉือนในโครงสร้างเหล็ก โลคอลแกน y หน่วย:นิวตัน

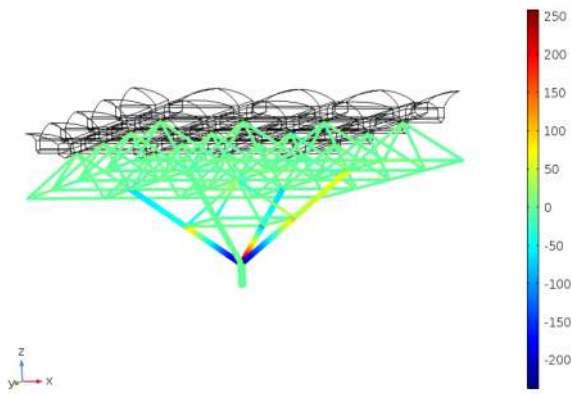


(ข) การกระจายแรงเฉือนในโครงสร้างเหล็ก โลคอลแกน z หน่วย:นิวตัน

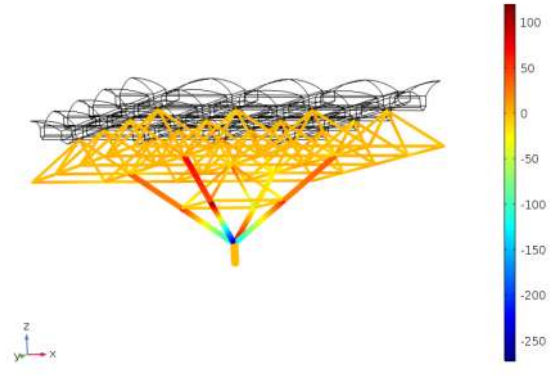
รูปที่ 4.2 การกระจายแรงเฉือนในโครงสร้างเหล็ก

4.3 การกระจายของโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก (Moment)

รูปที่ 4.3 แสดงค่าของโมเมนต์ที่กระจายไปตามท่อเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลังคา เป็นโมเมนต์บวก มีโมเมนต์บวกสูงสุด มีค่า ๒๕๙.๑๒ นิวตัน-เมตร และโมเมนต์ลบสูงสุด เท่ากับ -๒๓๖.๘๖ นิวตัน-เมตร ในโลคอลแกน y ในรูปที่ 4.3 (ก) และมีโมเมนต์บวกสูงสุด มีค่า ๑๒๐.๕๒ นิวตัน-เมตร และโมเมนต์ลบสูงสุด เท่ากับ -๒๗๒.๐๐ นิวตัน-เมตร ในโลคอลแกน z ในรูปที่ 4.3 (ข) ทั้งสองแกนมีค่าโมเมนต์น้อยมาก สรุปผลของจากน้ำหนักของหลังคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐x๑๐ ตารางเมตร ได้กระจายไปตามท่อเหล็กต่างๆ ที่มีอิทธิพลมากคือเป็นแรงดึง และแรงกด และใช้แรงกดในท่อเหล็กวิเคราะห์ความปลอดภัยหรือเสถียรภาพของโครงสร้าง (buckling analysis)



(ก) การกระจายโมเมนต์ในโครงสร้างเหล็ก โลคอลแกน y หน่วย:นิวตัน-เมตร

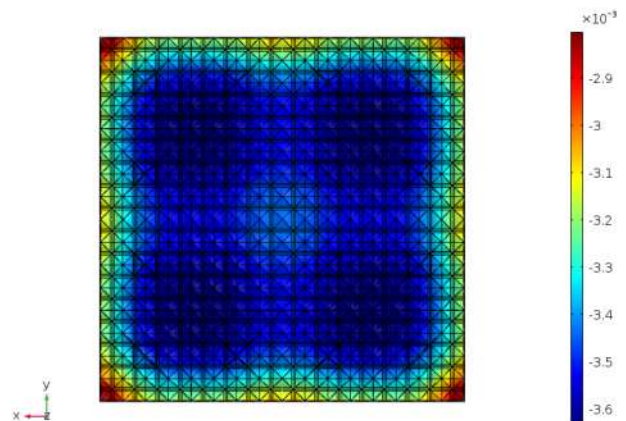


(ข) การกระจายโมเมนต์ในโครงสร้างเหล็ก โลคอลแกน z หน่วย:นิวตัน-เมตร

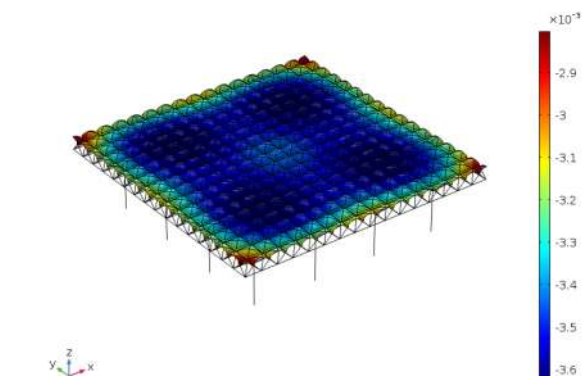
รูปที่ 4.3 การกระจายโมเมนต์ในโครงสร้างเหล็ก

4.4 การเคลื่อนตัวของโครงสร้างหลังคาโดมคอนกรีต

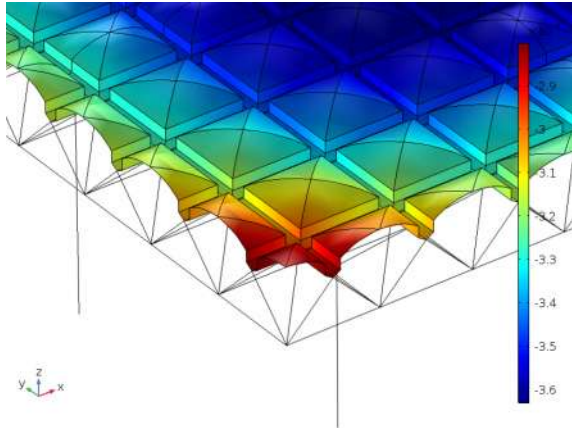
เพื่อให้ได้เห็นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างชัดเจนขึ้น จะขยายการวิเคราะห์ เป็นอาคารของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ หรือภาควิชาอุตสาหกรรม ซึ่งสร้างแยกออกจากตึกใหญ่ เป็นอาคาร ขนาดพื้นที่ ๔๐ x ๔๐ ตารางเมตร มีเสา ๑๖ ต้น ครั้งนี้จะรวมน้ำหนักของท่อเหล็กด้วย จะมีน้ำหนักรวม ๒,๘๔๘,๔๐๐ นิวตัน หรือ ๒๙๐.๓๖ ตัน เสาแต่ละต้นรับน้ำหนักประมาณ ๑๘.๑๕ ตัน รูปที่ 4.4 แสดงการเคลื่อนตัวต่ำลงของหลังคาในแนวตั้ง แกน z มีค่า ระหว่าง -๐.๐๐๒๘ ถึง -๐.๐๐๓๖ เมตร แทบจะเป็นพื้นหลังคาที่เรียบมาก มีความต่างมากที่สุดเพียง ๐.๐๐๐๘ เมตร จากบริเวณขอบและกึ่งกลางหลังคา



(ก) การเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวตั้ง มุมมองจากแกน Z หน่วย: เมตร



(ข) การเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร

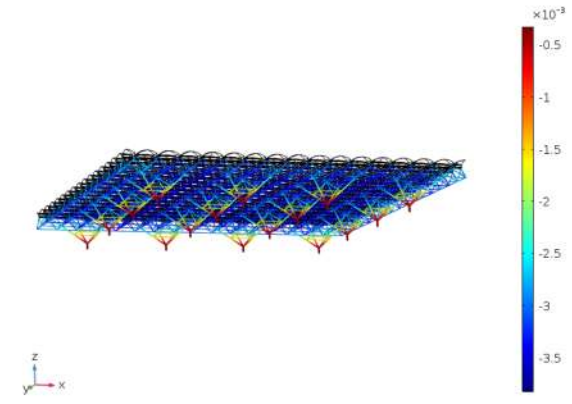


(ค) ภาพขยายการเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร

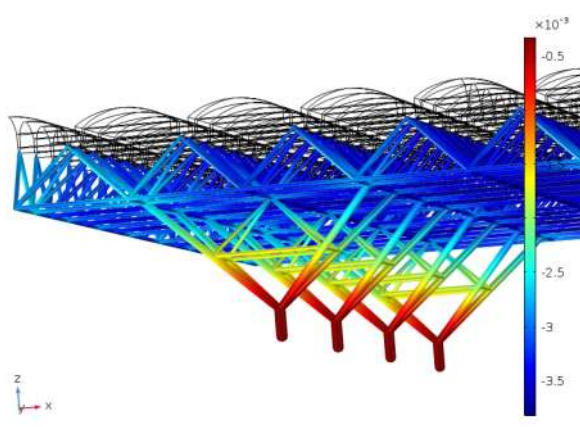
รูปที่ 4.4 แสดงการเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร

รูปที่ 4.5 แสดงการเคลื่อนตัวต่ำของโครงเหล็กในแนวดิ่ง แกน z

มีค่า ระหว่าง -0.00๑ ถึง -0.๓๒๖ เมตร และในลักษณะเดียวกัน หลัคคาโดมคอนกรีตของตึกสตางค์ มงคลสุข ๑๕๐ x ๑๕๐ ตาราง เมตร มีพฤติกรรมของการรับแรงและการเคลื่อนตัวเช่นเดียวกัน



(ง) การเคลื่อนตัวของโครงเหล็กต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร



(ช) ภาพขยายการเคลื่อนตัวของโครงเหล็กต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร

รูปที่ 4.5 การเคลื่อนตัวของโครงเหล็กต่ำลงในแนวดิ่ง แกน Z หน่วย: เมตร

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอประวัติการของตึกอาคารสตางค์ มงคลสุข ใน วาระครบรอบ ๕๐ ปีของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และได้รับพระราชทาน รางวัลอาคารอนุรักษ์ศิลปสถาปัตยกรรมดีเด่นประจำปี ๒๕๕๙ จาก สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดยสมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์

ได้วิเคราะห์เชิงวิศวกรรมของแรง โมเมนต์ และการเคลื่อนตัวของ หลัคคาโดมคอนกรีตฐานสี่เหลี่ยม บนโครงสร้างเหล็ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอ ลีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำ ถูกต้อง ยอมรับและความนิยมสูงใน ปัจจุบัน และสามารถจำลองรูปแบบได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ด้วยโปรแกรมชื่อ COMSOL multiphysics ด้วยเอลิเมนต์พื้นบางสำหรับ หลัคคาโดมคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานสำหรับโครงเหล็กถัก

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าของแรงที่กระจายไปตามท่อนเหล็ก ต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลัคคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐ X ๑๐ ตารางเมตร เป็นแรงดิ่ง และแรงกด มีแรงดิ่งสูงสุด มีค่า ๑๗,๘๗๓ นิวตัน และแรงกดสูงสุด - ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ค่าของแรงเฉือนที่กระจาย ไปตามท่อนเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลัคคา เป็นแรงเฉือนบวก มี แรงเฉือนบวกสูงสุด มีค่า ๑๘๑.๓๐ นิวตัน และแรงเฉือนลบสูงสุด เท่ากับ -๘๘.๓๐ นิวตัน สำหรับโลคอลแกน y และมีแรงเฉือนบวก สูงสุด มีค่า ๑๕๗.๘๘ นิวตัน และแรงเฉือนลบสูงสุด เท่ากับ -๑๗๒.๖๓ นิวตัน สำหรับโลคอลแกน z ทั้งสองแกนมีค่าแรงเฉือนน้อยมาก ค่าของ โมเมนต์ที่กระจายไปตามท่อนเหล็กต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักของหลัคคา เป็นโมเมนต์บวก มีโมเมนต์บวกสูงสุด มีค่า ๒๕๙.๑๒ นิวตัน-เมตร และ โมเมนต์ลบสูงสุด เท่ากับ -๒๓๖.๘๖ นิวตัน-เมตร ในโลคอลแกน y และมีโมเมนต์บวกสูงสุด มีค่า ๑๒๐.๕๒ นิวตัน-เมตร และโมเมนต์ลบสูงสุด เท่ากับ -๒๗๒.๐๐ นิวตัน-เมตร เมตร ในโลคอลแกน z ทั้งสองแกนมี ค่าโมเมนต์น้อยมาก สรุปผลของจากน้ำหนักของหลัคคาโดม ๑๗๓,๘๓๐ นิวตัน ต่อพื้นที่ ๑๐ x ๑๐ ตารางเมตร ได้กระจายไปตามท่อน เหล็กต่างๆ ที่มีอิทธิพลมากคือเป็นแรงดิ่ง และแรงกด

การเคลื่อนตัวของอาคารของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ หรือ ภาควิชาอุตสาหกรรม ซึ่งสร้างแยกออกจากตึกใหญ่ เป็นอาคาร ขนาด พื้นที่ ๔๐ x ๔๐ ตารางเมตร มีเสา ๑๖ ต้น มีน้ำหนักรวม ๒,๘๔๘,๔๐๐ นิวตัน หรือ ๒๙๐.๓๖ ตัน เสาต่างละต้นรับน้ำหนักประมาณ ๑๘.๑๕ ตัน มีค่าเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวดิ่ง แกน z มีค่า ระหว่าง - ๐.๐๐๒๘ ถึง -๐.๐๐๓๖ เมตร แทบจะเป็นพื้นหลัคคาที่เรียบมาก มีความ ต่างมากที่สุดเพียง ๐.๐๐๐๘ เมตร จากบริเวณขอบและกึ่งกลางหลัคคา และค่าการเคลื่อนตัวต่ำลงในแนวดิ่ง แกน z มีค่า ระหว่าง -๐.๐๐๐๓๒๕ ถึง -๐.๐๐๓๘ เมตร

ในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพและความ ปลอดภัยของโครงสร้างหลัคคาในอาคารรวม การศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างเนื่องจากแรงกระทำในลักษณะไดนามิกส์ เช่น แรงจากพายุ ลมฝน แรงจากแผ่นดินไหว เป็นต้น ผลกระทบจากแรงกระทำที่เอียงศูนย์ เนื่องจากการเชื่อมบริเวณรอยต่อจุดต่อต่างๆ รวมไปถึงการขึ้นสนิมของ เหล็ก การ ผูกถักของหลัคคาโดมคอนกรีต

ผู้เขียนในฐานะศิษย์เก่ารุ่นที่ ๑๑ ตั้งใจนำเสนอบทความนี้ เพื่อร่วม แสดงความยินดี ในโอกาสที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มีอายุครบ ๕๐ ปี และขอแสดงความ ชื่นชม ยกย่อง พร้อมเชิดชูเกียรติ ให้แก่ ศาสตราจารย์

ดร.สตาจค์ มงคลสุข อธิการบดีท่านที่สองและคณบดีท่านแรก เป็นผู้ร่วมก่อตั้งมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แต่คุณอมร ศรีวงศ์ สถาปนิก และวิศวกรโครงสร้าง ดร. รชฏ กาญจนวานิชย์ ที่ได้ร่วมออกแบบ และก่อสร้างตึกสตางค์ มงคลสุข ได้อย่างวิจิตร งดงาม สมบูรณ์แบบ และท้ายสุดผู้เขียนขอฝากเชิญชวนให้นักวิชาการทั้งหลาย ได้หันมาสนใจ ศิลปะ วัฒนธรรม ทำการวิเคราะห์ วิจัย ผลงานของคนไทยทั้งในอดีต และปัจจุบัน ร่วมรณรงค์ทำนุ บำรุง ศิลปะและวัฒนธรรมของชาติไทย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายก และคณะกรรมการ สมาคมศิษย์เก่าคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน, ผู้บริหารคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน และภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นผลให้บทความนี้ได้นำเสนอ และสำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.psu.ac.th/th/node/7338>
- [2] Logan, D. L., **A First Course in the Finite Element Method**, 5th ed, Cengage Learning, Canada, 2012.
- [3] Radeş, M., **Finite Element Analysis**, University Politehnica of Bucharest, 2006.