ห้องสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การคำนวณออกแบบโครงถักเหล็กระนาบอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีงานสมมุติ

2.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบโครงถักเหล็กระนาบ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง ในระนาบ 2 มิติจากโครงสร้างจริงที่ต้องการออกแบบ โครงสร้างจำลองจะประกอบด้วยองค์อาคาร (Member) ข้อต่อหรือจุดต่อ (Joint) สภาพของฐานรองรับหรือจุดรองรับ (Support)

ในกรณีของโครงถักระนาบ 2 มิติ ฐานรองรับ แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

ฐานรองรับชนิดหมุน (Hinged Support) ฐานชนิดนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เชิงเส้นแต่ให้องค์อาคารที่มาต่อกับฐานนั้นหมุนได้ โดยไม่เกิดการต้านทานต่อการหมุน แรงปฏิกิริยาในแนวสองแนวจะเป็นตัวไม่ทราบค่า แต่โมเมนต์ที่ฐานจะเท่ากับศูนย์

ฐานชนิดลูกกลิ้ง (Roller) องค์อาคารโครงสร้างที่รองรับจะสามารถเคลื่อนที่เชิงเส้น ได้ในแนวหนึ่งและหมุนได้รอบจุดรองรับนั้น แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่เชิงเส้น จะเป็นตัวไม่ทราบค่า

ต่อมาพิจารณาถึงชนิดของเหล็กที่จะนำมาเป็นองค์อาคารโครงถัก เช่น เหล็กฉาก เหล็กรูปรางน้ำ เหล็กท่อ เหล็กหน้าตัดเอส เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชนิดของเหล็กได้ตรงกับความต้องการของวิศวกรผู้ออกแบบ โดยเหล็กชนิดต่างๆ ก็เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละชนิดไป

และข้อมูลสุดท้ายที่ต้องพิจารณา คือ แรงที่กระทำกับโครงถัก แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

1. เนื่องจากน้ำหนักของโครงถักเอง หรือ น้ำหนักที่กระทำถาวรต่อโครงสร้าง จัดเป็นน้ำหนักคงที่ (Dead Load)

2. น้ำหนักกระทำที่โครงถักจะต้องบรรทุกเมื่ออยู่ในสภาพใช้งาน หรือเรียกว่าน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ซึ่งขึ้นกับสภาพการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ขอแยกน้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคาออกเป็นอีกกรณีเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดของวิธีตัวประกอบต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design , LRFD) ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

3. น้ำหนักที่กระทำเป็นช่วง ๆ เช่น แรงลม (Wind Load) แรงดันของดินหรือน้ำ แรงจากการเคลื่อนที่ของเครนยกของในโรงงาน แรงเนื่องจากการกระแทก (Impact Load) นอกจากนั้นยังมีแรงที่เกิดจากสภาพอื่นๆ เช่นแรงซึ่งเกิดจากการทรุดตัวของฐานราก (Support Settlement) และแรงที่เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Loading) เป็นต้น

เมื่อพิจารณาแรงต่างๆแล้วต่อไปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบให้ถูกต้องตามข้อกำหนดในการออกแบบ

โดยมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์และออกแบบโครงถักระนาบว่า ข้อต่อทุกจุดเป็นข้อต่อชนิดหมุน (Hinge) องค์อาคารทุกองค์อาคารสามารถหมุน (Rotate) เพื่อปรับตัวเข้ากับสภาวะสมดุลได้โดยไม่มีโมเมนต์ต้านทานการหมุนทุกข้อต่อ และแรงที่กระทำกับโครงถักนั้นจะต้องกระทำที่จุดข้อต่อเท่านั้น

2.2 การวิเคราะห์โครงถักระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธีการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement Method) หรือวิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยใช้วิธีการทางเมตริกซ์ช่วยในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อรวมสติฟเนสของแต่ละองค์อาคาร ใช้ความสัมพันธ์ของสติฟเนสและการเปลี่ยนตำแหน่งที่คล้องจองตามแรงกระทำภายนอกดังสมการ

$$K u = F \qquad (2.1)$$

เมื่อ K = สติฟเนสเมตริกซ์ของโครงถัก

u = เมตริกซ์การเปลี่ยนตำแหน่งของโครงถักที่เราต้องการทราบ

F = เมตริกซ์ของแรงที่กระทำกับโครงถัก

ซึ่งค่าสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงถัก (K) เริ่มจากการหาสติฟเนสขององค์อาคารรับแรงในแนวแกน

$$k_i = E a_i / L \qquad (2.2)$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก = 2.1×10^6 กิโลกรัม/ตารางเซ็นติเมตร

a_i = พื้นที่หน้าตัดขององค์อาคาร

L = ความยาวขององค์อาคาร

แล้วทำการแปลงให้แต่ละองค์อาคารย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local Coordinate) เข้าสู่ระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล (Global Coordinate) แล้วรวมสติฟเนสย่อยเป็นสติฟเนสรวมของโครงถักโดย

$$K = A^T k_i A \qquad (2.3)$$

เมื่อ A = เมตริกซ์แปลงรูปร่าง (Transformation Matrix) ได้มาจาก โคซายน์ (Cosine) แสดงทิศทางขององค์อาคารที่จุดต่อ

A^T = เมตริกซ์รูปร่างสมดุล (Equilibrium Geometry Matrix) ได้มาจากการทรานสโพส (Transpose) เมตริกซ์แปลงรูปร่าง

จากสมการ (2.3) ค่า A และ A^T ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้าง ที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงเป็นค่าคงที่ ส่วนค่า k_i เปลี่ยนแปลงตามผู้ออกแบบต้องการ หรือในโปรแกรมจะใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error)

จากสมการที่ (2.1) ค่า F เป็นเมตริกซ์ที่รวมแรงที่กระทำกับโครงถัก โดยพิจารณารวมทั้งแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร น้ำหนักแรงลม การยึดหดขององค์อาคารเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และกรณีที่เกิดการทรุดตัวของจุดรองรับ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$F_n = \sum L.F. \times F_i \qquad (2.4)$$

เมื่อ L.F.= ตัวประกอบความปลอดภัย (Load Factor)

F_i = แรงที่กระทำต่อข้อต่อแยกตามชนิดของแรงที่กระทำ

โดยค่าแรงที่กระทำกับข้อต่อเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Temperature Load) มีวิธีการพิจารณาดังนี้

$$\delta U = \int_L \alpha \Delta_t \delta N \, dx \qquad (2.5)$$

ระยะการยืดหดในแนวแกนหาได้จาก

$$e_o = \alpha \Delta_t L \qquad (2.6)$$

เมื่อ e_o = ระยะยืดหดขององค์อาคารเริ่มแรก เช่น เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยน

α = สัมประสิทธิ์ต้านทานการยืดหดของเหล็กเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน มีค่าเท่ากับ 0.000012 / ° C (Coefficient of linear expansion)

Δ_t = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส (° C)

L = ความยาวขององค์อาคารที่เกิดการยืดหดตัว

$$P_o = k \times e_o \qquad (2.7)$$

$$F_o = A^T \times P_o \qquad (2.8)$$

เมื่อ P_o = แรงในแนวแกนขององค์อาคารเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

F_o = แรงที่กระทำที่จุดข้อต่อของโครงถักเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

แรงที่กระทำกับข้อต่อเนื่องจากฐานรองรับเกิดการทรุดตัว (Nodal Settlement) หาได้จาก

$$F_{set} = u_{set} \qquad (2.9)$$

เมื่อ F_{set}= แรงที่กระทำต่อข้อต่อเนื่องจากฐานรองรับเกิดการทรุดตัว

u_{set}= ระยะการทรุดตัวของจุดรองรับ

การรวมน้ำหนักบรรทุกเพื่อวิเคราะห์หาแรงในแนวแกนแต่ละองค์อาคารของโครงถัก มาตรฐานเหล็กรูปพรรณของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย เหมือนกับข้อกำหนดโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design) ของสถาบัน AISC 1989 ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีอิลาสติกต้องพิจารณา การรวมน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรเป็นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำตามช่วงเวลาปกติ และพิจารณาสำหรับน้ำหนักที่

กระทำเป็นช่วงๆ เนื่องจากแรงลม โดยมาตรฐาน AISC กำหนดให้เพิ่มค่าหน่วยแรงที่ยอมให้อีกหนึ่งในสามเนื่องจากเป็นน้ำหนักของแรงกระทำชั่วคราว ดังนั้นจึงใช้ค่าแรงสามในสี่ของผลรวมแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่น้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักแรงลมที่กระทำกับโครงถักพิจารณาเปรียบเทียบว่าจะเกิดค่าแรงในแนวแกนจากกรณีใดมากที่สุด สำหรับบางโครงถักที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนั้น เมื่อมิได้พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรแต่พิจารณาเพียงน้ำหนักคงที่รวมกับน้ำหนักแรงลมที่กระทำกับโครงถัก กลับทำให้ค่าแรงในแนวแกนขององค์อาคารเกิดมากกว่า เพราะทิศทางของแรงลมกับน้ำหนักคงที่มีค่าเสริมกัน หรือบางกรณีเมื่อทิศทางของแรงลมกลับทิศ ก็มีค่าเสริมกับน้ำหนักคงที่แทน

ในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการพิจารณารวมน้ำหนักบรรทุก เป็น 4 กรณีดังนี้

Case a. $D + L$ (2.10)

Case b. $0.75 (D + L + W)$ (2.11)

Case c. $0.75 (D + W)$ (2.12)

Case d. $0.75 (D - W)$ (2.13)

เมื่อ D = น้ำหนักคงที่ที่กระทำถาวรต่อโครงถัก
L = น้ำหนักบรรทุกจรเป็นน้ำหนักที่โครงถักจะต้องบรรทุกเมื่ออยู่ในสภาพใช้งาน
W = น้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลม

ส่วนการรวมน้ำหนักบรรทุกตามข้อกำหนดโดยวิธีตัวประกอบต้านทานและน้ำหนักบรรทุก ของ AISC/LRFD 1994 จะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

สำหรับการรวมแรงที่กระทำกับโครงถักเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะพิจารณา ใช้ตัวประกอบความปลอดภัยเช่นเดียวกับน้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลมเพราะมิใช่เป็นแรงหลัก แต่เป็นแรงที่กระทำต่อโครงถักเป็นช่วงๆ และพิจารณาแรงเนื่องจากฐานรองรับเกิดการทรุดตัวด้วยค่าตัวประกอบความปลอดภัยเช่นเดียวกับน้ำหนักบรรทุกคงที่ เนื่องจากเมื่อเกิดการทรุดตัวแล้วจะยังคงมีแรงกระทำกับโครงถักต่อไป จนกว่าจะแก้ปัญหาการทรุดตัวได้

จากสมการที่(2.1)คำตอบที่ต้องการ คือค่าเมตริกซ์การเปลี่ยนตำแหน่งของโครงถัก(u) หาได้จาก

$$K^{-1} F_n = u \tag{2.14}$$

แล้วสามารถนำค่า u หาแรงในแต่ละองค์อาคารได้

$$P_i = k (e-e_o) \tag{2.15}$$

เมื่อ P_i = แรงในแนวแกนขององค์อาคาร

$$e = A u \tag{2.16}$$

จากสมการสมดุล (Equilibrium Equation) หาน้ำหนักกระทำที่จุดรองรับได้

$$R = A^T P_i \qquad (2.17)$$

เมื่อ R = แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ

จากนั้นพิจารณาหาจุดที่เกิดการเคลื่อนตัวรวมสูงสุดของโครงถัก นำแรงหนึ่งหน่วย (Virtual Force) กระทำในทิศทางนั้น ได้แรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคาร (p_i) เพื่อนำมาพิจารณาออกแบบต่อไป

หลักการของงานสมมุตินำมาประยุกต์กับการออกแบบโครงถักเหล็กระนาบมีประโยชน์ ในการตรวจสอบกำลัง เสถียรภาพและสติฟเนสดังนี้

หลักการของงานสมมุติ

งานภายใน (W_I) = งานภายนอก (W_E) (2.18)

งานภายในสำหรับแต่ละองค์อาคาร i หาได้จาก

$$W_{I,i} = {}_v\int \frac{P_i p_i \, dv}{A_i A_i E} \qquad (2.19)$$

งานภายในสำหรับ n องค์อาคาร ของโครงสร้างคือ

$$W_I = \sum_{I=1}^{n} \frac{P_i p_i L_i}{A_i E} \qquad (2.20)$$

เมื่อ P_i = แรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคารที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างรวม เมื่อถูกแรงกระทำ

p_i = แรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคารเมื่อถูกแรงสมมุติ (Q=1) กระทำในทิศทางที่เกิดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งรวมสูงสุดในแต่ละกรณีของแรงที่กระทำกับโครงถัก

A_i = พื้นที่หน้าตัดของแต่ละองค์อาคาร

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

L_i = ความยาวของแต่ละองค์อาคาร

งานภายนอกหาได้จาก

$$W_E = \delta Q \qquad (2.21)$$

เมื่อ δ = ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งรวมของโครงถัก ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการหา

Q = แรงสมมุติที่กระทำกับโครงถัก มีค่าเท่ากับ 1 หน่วย

โดยค่า $W_{I,I}$ คือ ค่าตัวประกอบเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวรวมขององค์อาคาร (The member displacement participation factor , DPF)' เป็นค่าที่แสดงถึงองค์อาคารใดมีผลต่อระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในทิศทางของแรงสมมุติ ซึ่งในกรณีของโครงถัก ค่า DPF แสดงถึงค่าการยืดหดตัวในแนวแกน (Axial deformation)

จากสมการที่ (2.20)เท่ากับ (2.21) งานภายในเท่ากับงานภายนอกเมื่อ Q เท่ากับ 1 หน่วย

$$\delta = \frac{P_i p_i L_i}{A_i E} \qquad (2.22)$$

$$SI_i = \lim_{V=0} \left[\frac{DPF_i}{V_i} \right] \qquad (2.23)$$

$$SI_i = \frac{DPF_i}{V_i} = \frac{P_i p_i}{A_i^2 E} \qquad (2.24)$$

เมื่อ V_i = ปริมาตรของแต่ละองค์อาคาร

โดยค่า SI_i คือ ค่าดัชนีความไวขององค์อาคาร (The member's sensitivity index) เป็นค่าที่ดัชนีที่แสดงถึงองค์อาคารใดมีผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงถัก จากสมการข้างต้นแสดงถึงการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคารมีความสัมพันธ์กับค่า SI_i และมีผลในการลดค่าการเคลื่อนตัวรวมของโครงถัก การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในองค์อาคารที่มีค่า SI_i มาก และลดพื้นที่หน้าตัดในองค์อาคารที่มีค่า SI_i น้อย เป็นการปรับโครงสร้างให้มีเสถียรภาพและพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคารมีความเหมาะสม และเมื่อทุกองค์อาคารมีค่า SI เท่ากันแล้ว แสดงว่าได้ปรับให้โครงถักมีขนาดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Design)

วิธีการปรับปรุงค่า SI ให้มีค่าเท่ากัน จากสมการ (2.12)

$$SI_i = \frac{P_1 p_1 L_1}{A_1 E_1 (A_1 L_1)} = \frac{P_1 p_1}{A_1^2 E_1} = \frac{P_i p_i}{A_i^2 E_i} \qquad (2.25)$$

เมื่อให้ค่า SI เท่ากัน จะได้หน้าตัดของแต่ละองค์อาคาร

$$A_j = A_i \sqrt{\frac{P_j p_j E_i}{P_i p_i E_j}} \qquad (2.26)$$

สิ่งที่จะควบคุมให้เกิดการออกแบบอย่างเหมาะสมคือ ระยะการเคลื่อนตัวต้องไม่เกินค่าที่กำหนดให้ (Allowable displacement = δ_{alw})

สำหรับโครงถัก ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวรวมขององค์อาคาร กับค่า DPF และ SI มีดังนี้

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} DPF_i = \sum_{i=1}^{n} SI_i V_i \qquad (2.27)$$

$$\delta = SI \times V \qquad (2.28)$$

เมื่อ V = ปริมาตรรวมของโครงถัก

และในโครงถักที่เหมาะสม จะทำให้ค่า SI เท่ากัน จากสมการที่ (2.25)

$$\delta = \frac{P_i p_i}{A_i^2 E} \sum_{j=1}^{n} A_j L_j \qquad (2.29)$$

จากสมการ (2.26) แทนค่าลงในสมการ (2.28)

$$\delta = \frac{\sqrt{P_i p_i}}{A_i E} \sum_{j=1}^{n} L_j \sqrt{P_j p_j} \qquad (2.30)$$

ถ้าค่าการเคลื่อนตัวไม่เกินค่าที่ยอมให้ (δ_{alw})

$$A_i = \frac{\sqrt{P_i p_i}}{\delta_{alw} E} \sum_{j=1}^{n} L_j \sqrt{P_j p_j} \qquad (2.31)$$

หลังจากหาค่า A_i ใหม่ด้วยสมการข้างต้น ถ้าโครงถักเป็นโครงสร้างดีเทอมิเนท สามารถจะเทียบส่วนหาค่าแรงดึงและแรงอัดได้โดยตรง ผลที่ได้รับคือ หน้าตัดที่ได้ตรงกับสภาพแรงที่เกิดขึ้นจริง แต่ทั้งนี้ยังไม่สามารถนำค่าพื้นที่หน้าตัดไปเทียบกับตารางเหล็กแล้วนำไปใช้งานได้ทันที เพราะค่าของพื้นที่หน้าตัดนี้ยังมีบางองค์อาคารพื้นที่หน้าตัดมีค่าน้อยมาก เนื่องจากแรงในแนวแกนขององค์อาคารนั้นเป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก และยังไม่ได้คำนึงถึงข้อกำหนดอื่นๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐาน เช่นแรงอัดยังไม่คำนึงถึงค่าสัดส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) และค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ยังต้องขึ้นกับค่าสัดส่วนความชะลูด จึงต้องนำไปคำนวณออกแบบตามข้อกำหนดซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ส่วนโครงถักที่เป็นอินดีเทอมิเนทนั้น ไม่สามารถเทียบสัดส่วนของแรงได้เนื่องจาก ต้องคำนึงถึงผลของแรงอันดับรอง (Secondary Effect) ที่เกิดขึ้น และค่าการเคลื่อนตัวรวมของโครงถัก โดยในโปรแกรมจะทำการคำนวณซ้ำและปรับค่าพื้นที่หน้าตัดจนมีค่าSI เท่ากันหรือลู่เข้าสู่จุดที่เหมาะสมที่สุด (Convergence) งานวิจัยนี้ใช้สมการที่แนะนำโดย Jacoby , Kowalik และ Pizzo (9) โดยการเปรียบเทียบความยาวของค่าประจำ (Norm Length) สองค่า

$$\frac{\| X^{k-1} - X^{k} \|}{\| X^{k-2} - X^{k} \|} = C \qquad (2.32)$$

โดย X = จุดพิกัดใน n มิติ

X^{k} = หมายถึงค่าของ $A^{k} L_{1}$ ที่เป็นคำตอบอย่างเหมาะที่สุด

X^{k-1} = หมายถึงค่าของ $A^{k-1} L_{1}$ ที่ได้จากการทำซ้ำรอบที่ k-1

X^{k-2} = หมายถึงค่าของ $A^{k-2} L_{1}$ ที่ได้จากการทำซ้ำรอบที่ k-2

ถ้าพิกัดของ X^{k-2} อยู่ใกล้พิกัดคำตอบมากกว่าจุดพิกัด X^{k-1} แสดงว่าฟังก์ชั่นยังคงลู่เข้าสู่คำตอบอยู่ (Converge) ในกรณีนี้ ค่า $C < 1$ และจะหยุดเมื่อ ปริมาตรรวมของโครงถักต่างกันน้อยกว่าเท่ากับ 2.5% ถ้าในกรณีค่า $C \geq 1$ ให้หยุดทำงาน คำตอบจะเป็น X^{k} พิกัดสุดท้ายที่ยังลู่เข้าสู่คำตอบ

กรณีนี้ ค่า $C < 1$

$$\frac{\left| X^{k} - X^{k-1} \right|}{\left| X^{k-1} \right|} \leq 0.025 \qquad (2.33)$$

2.3 การออกแบบโครงถักระนาบ

ผลจากการวิเคราะห์โครงถัก ได้คำตอบคือแรงในแต่ละองค์อาคาร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงดึง (Tensile Force) และแรงอัด (Compressive Force) ซึ่งแรงที่ได้จะนำไปออกแบบแต่ละองค์อาคารตามข้อกำหนด (Code) เพื่อให้องค์อาคารที่ออกแบบสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐานของแต่ละข้อกำหนด ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการออกแบบโครงเหล็กได้ 3 ข้อกำหนด คือ

2.3.1 งานมาตรฐานอาคารเหล็กรูปพรรณ ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ธันวาคม พ.ศ. 2518 (11)

2.3.2 ข้อกำหนดโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design) ของ AISC/ASD 1989 (12)

2.3.3 ข้อกำหนดโดยวิธีตัวประกอบต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design) ของ AISC/LRFD 1994 (13)

ดังมีรายละเอียดแต่ละข้อกำหนดดังนี้

2.3.1 งานมาตรฐานอาคารเหล็กรูปพรรณของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage) หรือ มาตรฐาน ว.ส.ท. (E.I.T. Standard) ธันวาคม พ.ศ.2518 เริ่มร่างมาตั้งแต่ พ.ศ.2516 โดยอาศัยมาตรฐาน AISCและมาตรฐานของ AIJ ประเทศญี่ปุ่นเป็นหลัก (11) กล่าวถึงค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็ก ที่ใช้ในการคำนวณกำลังส่วนของอาคารที่ประกอบด้วยเหล็กรูปพรรณดังนี้

(ก) หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ พิจารณาจากเนื้อที่หน้าตัดสุทธิ

$$F_t = 0.60\ F_y \qquad (2.34)$$

เมื่อ F_t = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้

สมมุติว่าหน่วยแรงกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดขององค์อาคาร ความสามารถในการรับแรงดึงที่ยอมให้ขององค์อาคารมีค่าดังนี้

$$T_w = F_t A_n \qquad (2.35)$$

เมื่อ T_w = แรงดึงที่ยอมให้

A_n = เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ (Net Area)

(ข) หน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกน

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ขององค์อาคารรับแรงอัดมีค่าขึ้นกับสัดส่วนความชะลูดซึ่งคำนวณจาก

$$\text{สัดส่วนความชะลูด} = KL/r \qquad (2.36)$$

เมื่อ KL = ความยาวประสิทธิผลขององค์อาคารที่จะเกิดการโก่งเดาะ,cm.

r = รัศมีไจเรชั่นของพื้นที่รอบแกนที่จะเกิดการโก่งเดาะ

K = ตัวคูณประกอบของความยาวประสิทธิผล

L = ช่วงยาวอิสระที่ไม่มีสิ่งยึดทางข้าง

ความยาวประสิทธิผลขององค์อาคารรับแรงอัดในโครงข้อหมุนในงานวิจัยนี้ใช้ค่า K = 1

(1) หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ พิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดขององค์อาคารรับแรงอัดหลัก ซึ่งมีค่ามากของสัดส่วนความชะลูด $KL/r < C_c$

เมื่อ

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \qquad (2.37)$$

หน่วยแรงอัดในแนวแกนที่ยอมให้ หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \qquad (2.38)$$

(2) องค์อาคารรับแรงอัดหลักที่มีสัดส่วนความชะลูด $KL/r > C_c$
หน่วยแรงอัดในแนวแกนที่ยอมให้

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL/r)^2} \qquad (2.39)$$

(3) องค์อาคารรับแรงอัดรองและค้ำยันที่มี $L/r > 120$
หน่วยแรงอัดที่ยอมให้

$$F_{as} = \frac{\text{ค่าที่น้อยกว่าของ } F_a \text{ จากสมการ (2.38) หรือ (2.39)}}{1.6 - \frac{L/r}{200}} \qquad (2.40)$$

เมื่อหน่วยแรงอัดกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดขององค์อาคาร ความสามารถในการรับแรงอัดที่ยอมให้ขององค์อาคารมีค่าดังนี้

$$P_a = F_a A \qquad (2.41)$$

เมื่อ P_a = แรงอัดที่ยอมให้
A = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (Gross Area)

สัดส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio)

สัดส่วนความชะลูดเป็นข้อกำหนดอย่างต่ำไม่ให้องค์อาคารมีความชะลูดเกินไป จนเกิดการโก่งเดาะในระนาบในองค์อาคารรับแรงอัด กำหนดสัดส่วนความชะลูดของท่อนรับแรงอัดไว้ สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดเป็นหลักหรือเสาจะต้องไม่เกิน 200 สำหรับค้ำยันและองค์อาคารรับแรงอัดรองยอมได้ไม่เกิน 300 สัดส่วนความชะลูดของเหล็กยึดทแยงเดี่ยวต้องไม่เกิน 140 และของเหล็กยึดทแยงคู่ต้องไม่เกิน 200

สำหรับในองค์อาคารรับแรงดึงก็มีการกำหนดสัดส่วนความชะลูดไว้ไม่เกิน 240 สำหรับองค์อาคารรับแรงดึงหลัก และ 300 สำหรับองค์อาคารรับแรงดึงรองและค้ำยัน (11)

ค่าการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ (Displacement Allowable)

คานหรือโครงถักจะต้องคำนวณระยะโก่งสูงสุดไม่เกิน 1 ต่อ 300 ของความยาวของช่วงสำหรับคานหรือโครงถักทั่วไป และไม่เกิน 1 ต่อ 250 ของความยาวของช่วงสำหรับโครงถักหรือคานยื่นในการคำนวณออกแบบรางรับปั้นจั่นที่ใช้แรงคนเข็นระยะโก่งจะต้องไม่เกิน 1 ต่อ 500 ของความยาวช่วง และสำหรับรางที่ใช้เครื่องจักรเป็นตัวเลื่อนปั้นจั่น ระยะโก่งจะต้องไม่เกิน 1 ต่อ 800 ถึง 1 ต่อ 1200 ของความยาวของช่วง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมสำหรับปั้นจั่นแต่ละแบบ (11)

2.3.2 ข้อกำหนดโดยวิธี Allowable Stress Design (ASD) ของ AISC ปี 1989 หรือเรียกว่าวิธี Working Stress Design เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้มานานกว่า 50 ปีแล้ว ข้อกำหนดฉบับแรกออกเมื่อปี ค.ศ. 1923 และฉบับล่าสุดออกเมื่อปี ค.ศ. 1989 เป็นข้อกำหนดที่เป็นการประมวลผลมาจากประสบการณ์และข้อแนะนำของผู้ที่ทำงานวิจัยศึกษาพฤติกรรมขององค์อาคารเหล็ก เป็นวิธีการออกแบบที่ให้โอกาสเกิดการวิบัติเท่ากับศูนย์มาจากผลทางสถิติ ซึ่งในบางกรณีก็ไม่ได้เป็นวิธีการที่ประหยัดนัก และเป็นรากฐานที่นำไปในการพัฒนาการออกแบบด้วยวิธีตัวประกอบต้านทานและน้ำหนักบรรทุก

(ก) ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้และแรงดึงในแนวแกนมีค่าดังนี้
ยกเว้นองค์อาคารที่มีข้อต่อแบบหมุนได้

$$F_t = 0.60\,F_y \text{ บนเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด } (A_g) \qquad (2.42)$$

$$T_w = F_t \times A_g \qquad (2.43)$$

$$F_t = 0.50\,F_u \text{ บนเนื้อที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล } (A_e) \qquad (2.44)$$

$$T_w = F_t \times A_e \qquad (2.45)$$

F_u = กำลังดึงน้อยที่สุด เหล็ก A36 มีค่าเท่ากับ 4000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
สำหรับองค์อาคารที่มีข้อต่อแบบหมุนได้

$$F_t = 0.45\,F_y \text{ บนเนื้อที่หน้าตัดสุทธิ } (A_n) \qquad (2.46)$$

$$T_w = F_t \times A_n \qquad (2.47)$$

AISC/ASD 1989 ให้ใช้ค่า $F_t = 0.60\,F_y$ บนเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) แทนที่การใช้เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ ทั้งนี้เพราะผลการศึกษาพบว่าบ่อยครั้งที่ผลการวิบัติอาจเกิดขึ้นตรงหน้าตัดทั้งหมด ซึ่งอยู่นอกบริเวณหน้าตัดที่เจาะรู ดังนั้นเพื่อป้องกันการวิบัติบริเวณดังกล่าว มาตรฐาน AISC จึงกำหนดให้ทำการตรวจสอบกำลังขององค์อาคารรับแรงดึงบนเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดด้วย

การที่ AISC/ASD กำหนดให้ใช้เนื้อที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผลแทนเนื้อที่หน้าตัดสุทธิ เพราะการทดสอบพบว่าในกรณีที่องค์อาคารรับแรงดึงมีรูปร่างหน้าตัดขององค์อาคารไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน และที่บริเวณรอยต่อการถ่ายแรงเกิดขึ้นเฉพาะบางองค์อาคารของหน้าตัดเท่านั้น เช่น ในกรณีของเหล็กฉากเป็นต้น องค์อาคารจะรับหน่วยแรงดึงไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด อันมีผลทำให้กำลังขององค์อาคารบริเวณหน้าตัดสุทธินี้ลดน้อยลง ดังนั้น AISC จึงใช้ค่า U เพื่อเป็นตัวลดกำลังขององค์อาคารดังกล่าว นอกจากนี้ ค่าของ U ยังขึ้นกับความเหนียวของเหล็กซึ่งก็ขึ้นกับชนิดของเหล็ก วิธีการเจาะรูเพื่อยึดสลักเกลียว และอัตราส่วนระหว่างรูเจาะต่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (14)

(ข.) หน่วยแรงอัดและแรงในแนวแกนที่ยอมให้ตามข้อกำหนดของ AISC/ASD 1989 พิจารณาเช่นเดียวกับวิธีของ วสท.

2.3.3 ข้อกำหนดโดยวิธี Load and Resistance Factor Design (LRFD) เป็นข้อกำหนดที่จัดทำขึ้นโดยสถาบัน American Institute of Steel Construction AISC ปี ค.ศ.1986 และ1994 เริ่มมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1974 เริ่มใช้ในประเทศแคนาดา ในชื่อว่าวิธี Limited States Design เป็นข้อกำหนดที่ใช้ในทวีปยุโรปเป็นส่วนใหญ่(15) วิธี LRFD ใช้หลักการของภาวะสุดขีด (Limit State) โดยมีอัตราส่วนแสดงความปลอดภัยที่เหมาะสมจากการเทียบเคียงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ขณะที่โครงสร้างนั้นอยู่ในภาวะที่ใกล้จะพังหรือหมดความเหมาะสมที่จะใช้งานกับน้ำหนักที่บรรทุกอยู่จริงบนโครงสร้างนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

กำลังที่ต้องการ $\leq$ กำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$\sum \gamma_i Q_i = \phi R_n \qquad (2.48)$$

เมื่อ Q_i = น้ำหนักหรือแรงกระทำที่มีผลต่อโครงสร้าง

γ_i = ค่าความปลอดภัยของน้ำหนัก (มีค่ามากกว่า 1)

R_n = ค่ากำลังต้านทานขององค์อาคาร

ϕ = ตัวคูณลดค่ากำลังขององค์อาคาร มีค่าน้อยกว่า 1 (Resistance Factor)
โดยค่า ϕ แปรตามค่าความเสี่ยงในการวิบัติ

ค่าความปลอดภัยของน้ำหนัก (Load Factor) ที่ AISC/LRFD 1994 แนะนำให้ใช้มีค่า ดังนี้

1.4 D	(A4-1),(2.49)
1.2 D + 1.6 L + 0.5(L_r or S or R)	(A4-2),(2.50)
1.2 D + 1.6(L_r or S or R) + (0.5 L or 0.8 W)	(A4-3),(2.51)
1.2 D + 1.3 W + 0.5 L + 0.5 (L_r or S or R)	(A4-4),(2.52)
1.2 D + 1.5 E + (0.5 L or 0.2 S)	(A4-5),(2.53)
0.9 D - (1.3 W or 1.5 E)	(A4-6),(2.54)

สมการ (A4-1) ถึง (A4-6) เป็นหมายเลขอ้างอิงตามข้อกำหนดของ LRFD

(A4-3),(A4-4),(A4-5) ค่าน้ำหนักปลอดภัยของ L = 1.0 สำหรับโรงรถ

เมื่อ D = Dead load คือ น้ำหนักคงที่ของโครงสร้างเองหรือน้ำหนักที่กระทำถาวรต่อโครงสร้าง อาจรวมถึงผนังเบากั้นห้องภายในอาคาร

L = Live load คือ น้ำหนักบรรทุกจร เป็นน้ำหนักที่กระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก กับวัตถุที่เคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายได้ เช่น คน หรือเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

L_r = Roof Live load คือ น้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา

R = Rain load คือ น้ำหนักกระทำเนื่องจากน้ำฝน

S = Snow load คือ น้ำหนักกระทำเนื่องจากหิมะ

W = Wind load คือ น้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลม

E = Earthquake load คือ น้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

โดยสมการ (A4-1) พิจารณาขณะกำลังก่อสร้าง

(A4-2) พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร (L)เป็นหลัก

(A4-3) พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา (L_r)เป็นหลัก

(A4-4) พิจารณาน้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลม (W)เป็นหลัก

(A4-5) พิจารณากรณีที่แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (E) เสริมกับน้ำหนักคงที่ (D)

(A4-6) พิจารณากรณีที่แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (E) หรือน้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลมกลับทิศแล้วเสริมกับน้ำหนักคงที่ (D)

สำหรับประเทศไทย อิทธิพลของน้ำหนักกระทำที่มีผลต่อโครงถักมาก ได้แต่ D , L , L_r และ W และจะพิจารณาเลือกใช้กรณีที่ทำให้เกิดแรงในองค์อาคารของโครงถักมากที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การรวมน้ำหนักบรรทุกเป็น 4 กรณีดังนี้

Case e. $1.4\ D$ (2.55)

Case f. $1.2\ D + 1.6\ L$ (2.56)

Case g. $1.2\ D + 0.5\ L + 1.3\ W$ (2.57)

Case h. $0.9\ D - 1.3\ W$ (2.58)

โดยมีค่าหน่วยแรงที่ยอมให้และแรงดึงในแนวแกนมีค่าดังนี้

(ก.) หน่วยแรงดึงและค่าแรงดึงที่ยอมให้

กำลังรับแรงดึงที่ยอมให้ $= \phi_t P_n$ (2.59)

เมื่อ ϕ_t = อัตราส่วนต้านทานสำหรับแรงดึง

P_n = กำลังรับแรงดึงในแนวแกน

สำหรับการวิบัติด้วยการยืดตัว (Yeilding) พิจารณาบนพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

$$\phi_t = 0.90 \quad (2.60)$$

$$P_n = F_y A_g \quad (2.61)$$

$$\phi_t P_n = 0.9\ F_y A_g \quad (2.62)$$

สำหรับการวิบัติด้วยการแตกร้าว (Fracture) พิจารณาบนพื้นที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล (Effective net area)

$$\phi_t = 0.75 \quad (2.63)$$

$$P_n = F_u A_e \quad (2.64)$$

$$\phi_t P_n = 0.75 F_u A_e \quad (2.65)$$

การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล ($A_e = U A_n$) กรณียึดด้วยสลักเกลียวหรือ หมุดย้ำ พิจารณาเหมือนวิธี ASD ของ AISC 1989

ในกรณีการยึดองค์อาคารด้วยการเชื่อมมีข้อพิจารณาเพิ่มเติม ที่กำหนดในข้อกำหนดของ LRFD ดังนี้ (15)

1. สำหรับองค์อาคารหน้าตัด W,M หรือ S หรือตัว T ที่ตัดจาก W,M หรือ S ยึดตั้งฉากแรงดึงด้วยรอยเชื่อมตลอดหน้าตัด

$$U = 1.0$$

A_e = พื้นที่หน้าตัดที่ถูกยึดโดยรอบ

2. สำหรับแผ่นเหล็กปะกับ (Plate) เชื่อมยึดกับ แท่ง (Bar) ยึดตลอดความยาวที่ปลายองค์อาคาร

$$U = 1.00 \quad \text{เมื่อ} \quad \ell \geq 2w$$

$$= 0.87 \quad \text{เมื่อ} \quad 1.5w \leq \ell < 2w$$

$$= 0.75 \quad \text{เมื่อ} \quad w \leq \ell < 1.5w$$

เมื่อ ℓ = ความยาวของรอยเชื่อมทั้งสองฝั่ง ซึ่งต้องมากกว่าหรือเท่ากับ w

w = ระยะระหว่างรอยเชื่อมทั้งสอง

3. กรณีองค์อาคารที่นำมาเชื่อมยึดแผ่นเหล็กปะกับ ไม่สามารถเชื่อมได้รอบทั้งองค์อาคาร เช่น L หรือ C เป็นต้น จะเกิดแรงเฉือนเยื้องศูนย์ (Shear lag)

$$U = 1 - x/L \leq 0.90 \quad \text{(B3-2),(2.66)}$$

เมื่อ x = ระยะจากจุดศูนย์ถ่วงขององค์อาคาร(Centroid) ที่ยึดไปหาระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ของจุดยึดต่อด้วยรอยเชื่อม

ℓ = ความยาวรอยเชื่อม

และในข้อแนะนำของ AISC B3 ให้ใช้ค่า Reduction factor กับจุดยึดที่เป็นสลักเกลียวหรือหมุดย้ำได้ โดย ℓ = ระยะจากจุดแรกที่ติดตั้งสลักเกลียวถึงจุดสุดท้ายที่ยึด เช่น ยึดด้วยสลักเกลียว 6 ตัว 2 แถว แถวละ 3 ตัว ระยะของจุดยึด 2 ตัวแรกถึง 2 ตัวสุดท้าย เท่ากับ 15 ซม. ℓ = 15 ซม.

x พิจารณาเหมือนเดิม

แล้วพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า U ที่ได้จากข้อกำหนด ยึดด้วยสลักเกลียวหรือหมุดย้ำ อย่างน้อย 3 ตัวต่อแถว ในทิศทางรับแรงดึง U = 0.85 แล้วเลือกค่าน้อย

ควบคุมสัดส่วนความชะลูด (KL/r) เมื่อเป็นองค์อาคารรับแรงดึงไม่เกิน 300

(ข.) หน่วยแรงอัดและแรงในแนวแกนที่ยอมให้

$$\text{กำลังรับแรงอัดที่ยอมให้} = \phi_c P_n \qquad (2.67)$$

เมื่อ ϕ_c = อัตราส่วนต้านทานสำหรับแรงอัด = 0.85

P_n = กำลังรับแรงดึงในแนวแกน = $A_g F_{cr}$

F_{cr} = หน่วยรับแรงอัดที่จุดวิกฤติ (Critical buckling stress)
ใช้ได้ทั้งเสาที่มีพฤติกรรมแบบอิลาสติคและอินอิลาสติค โดยพิจารณาจาก

λ_c = Slenderness parameter

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi}\sqrt{\frac{F_y}{E}} \qquad \text{(E2-4),(2.68)}$$

$\lambda_c \leq 1.5$ สำหรับเสาในช่วงอินอิลาสติค

$$F_{cr} = (0.658)^{\lambda_c^2} F_y \qquad \text{(E2-2),(2.69)}$$

$\lambda_c > 1.5$ สำหรับเสาในช่วงอิลาสติค

$$F_{cr} = \frac{0.877\ F_y}{\lambda_c^2} \qquad \text{(E2-3),(2.70)}$$

สมการข้างต้นได้จากประสบการณ์และทฤษฎี ใน AISC โดยคำนึงถึงผลของหน่วยแรงคงค้าง (Residual stress) และการโก่งเดาะเริ่มแรก (Initial out of Straightness) ของระยะ L/1500
เมื่อ L = ความยาวขององค์อาคาร และ AISC B7 แนะนำใช้สัดส่วนความชะลูดสูงสุดไม่เกิน 200

ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement)

ค่าการเคลื่อนตัวสำหรับการออกแบบด้วยวิธีตัวประกอบต้านทานและน้ำหนักบรรทุก จะพิจารณาค่าการยืดหรือหดตัวในแนวแกนสำหรับแต่ละองค์อาคาร เมื่อรับน้ำหนักกระทำภายใต้สภาพน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service Load) ดังสมการ

$$\Delta = \frac{P\,l}{E\,A_g} \qquad (2.71)$$

เมื่อ Δ = การยืดหดในแนวแกนของแต่ละองค์อาคาร

P = แรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคารที่สภาพน้ำหนักบรรทุกใช้งานไม่มีตัวประกอบคูณเพิ่ม

การพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวรวมของการออกแบบตามข้อกำหนด AISC/LRFD 1994 เนื่องจากน้ำหนักภายนอกที่กระทำกับโครงถัก มีการคูณค่าความปลอดภัยของน้ำหนักกระทำแต่ละชนิดดังสมการที่ (2.55)-(2.58) ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวที่จะใช้ในสมการที่ (2.31) จึงใช้ค่าที่เป็นสัดส่วนกับน้ำหนักภายนอกที่กระทำในสภาพน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยพิจารณาวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หาค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (u_D) , การเคลื่อนตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (u_L) และการเคลื่อนตัวเนื่องจากน้ำหนักแรงลมกระทำ (u_W) นำมาหาค่าตัวประกอบดังนี้

Case e. Factor = $1.4\,u_D / u_D$ (2.72)

Case f. Factor = $(1.2\,u_D+1.6\,u_L)/(u_D + u_L)$ (2.73)

Case g. Factor = $(1.2\,u_D+0.5\,u_L+1.3\,u_W)/(u_D + u_L + u_W)$ (2.74)

Case h. Factor = $(0.9\,u_D-1.3\,u_W)/(u_D - u_W)$ (2.75)

จึงได้ค่าตัวประกอบที่จะนำไปคูณกับค่าการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ในสมการที่ (2.31) สำหรับการออกแบบตามข้อกำหนดของ AISC/LRFD 1994 ดังสมการที่ (2.76)

$$A_i = \frac{\sqrt{P_i\,p_i}}{\text{Factor} \times \delta_{alw}\,E} \sum_{j=1}^{n} L_j \sqrt{P_j\,p_j} \qquad (2.76)$$

2.4 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบด้วยวิธีงานสมมุติ

ในการวิเคราะห์และออกแบบด้วยวิธีงานสมมุติ เริ่มจากการป้อนข้อมูลที่ประกอบด้วย

1. ข้อมูลข้อต่อ ประกอบด้วย จำนวนจุดต่อทั้งหมด ระยะของแต่ละจุดต่อเทียบกับแกนอ้างอิง (0,0) และมีจุดต่อใดบ้างที่เป็นฐานรองรับ

2. ข้อมูลองค์อาคาร ประกอบด้วย จำนวนองค์อาคาร ความต่อเนื่องของแต่ละองค์อาคารที่อยู่ระหว่างแต่ละจุดต่อ

3. ข้อมูลวัสดุ ประกอบด้วย ชนิดของวัสดุ กลุ่มของวัสดุ มีองค์อาคารใดบ้างที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม และองค์อาคารดังกล่าวจัดเป็นองค์อาคารหลักหรือรอง

4. ข้อมูลน้ำหนักภายนอกที่กระทำกับโครงถัก ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

4.1 น้ำหนักกระทำคงที่

4.2 น้ำหนักบรรทุกจร

4.3 น้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา

4.4 น้ำหนักกระทำเนื่องจากแรงลม

เมื่อได้ข้อมูลครบแล้ว ก็ทำการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากหาพื้นที่หน้าตัดเริ่มแรก จากค่าสัดส่วนความชะลูดไม่เกินค่าที่กำหนดสำหรับองค์อาคารรับแรงดึง เนื่องจากมีค่ามากกว่าองค์อาคารรับแรงอัดและสามารถครอบคลุมถึงกรณีองค์อาคารรับแรงอัดได้ โดยค่าสัดส่วนความชะลูดขององค์อาคารรับแรงดึงสำหรับองค์อาคารหลักคือ 240 และสำหรับองค์อาคารรองคือ 300 หาค่ารัศมีไจเรชั่นที่หาได้จากสมการที่ (2.36) ไปเปิดตารางเหล็ก หาค่าพื้นที่หน้าตัดที่มีค่ารัศมีไจเรชั่นมากกว่าเท่ากับรัศมีไจเรชั่นที่ต้องการ ได้ค่าพื้นที่หน้าตัดเริ่มแรกที่น้อยที่สุดสำหรับแต่ละองค์อาคาร

ขั้นตอนต่อไปเป็นการใช้หลักการของงานสมมุติมาปรับพื้นที่หน้าตัดให้เหมาะสม โดยการวิเคราะห์โครงถักดังกล่าวด้วยวิธีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือการรวมสติฟเนสโดยตรง หาค่าแรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคารเป็นค่า (P_i) และค่าการเคลื่อนตัวของแต่ละจุดต่อ พิจารณาหาจุดต่อที่มีค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดนำเฉพาะค่าแรงหนึ่งหน่วยกระทำกับโครงถักในทิศทางที่จุดต่อดังกล่าว วิเคราะห์ด้วยวิธีการเปลี่ยนตำแหน่งอีกครั้ง หาค่าแรงในแนวแกนของแต่ละองค์อาคารเป็นค่า (p_i) นำหลักการของงานสมมุติมาปรับค่าพื้นที่หน้าตัดให้เหมาะสมกับแรงในแนวแกนที่โครงถักตามสมการ (2.31) ปรับจนค่าพื้นที่หน้าตัดที่ได้ให้ค่า SI_i เท่ากัน หรือสำหรับโครงถักอินดีเทอมิเนทก็ปรับจนค่า Norm length มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 ดังสมการ (2.32) หรือค่าปริมาตรรวมของโครงถักต่างกันน้อยกว่า 2.5% ดังสมการ (2.33) แล้วนำไปตรวจสอบการรับแรงตามข้อกำหนดอย่างใดอย่างหนึ่งใน 3 ข้อกำหนด ดังในรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วสรุปเป็นพื้นที่หน้าตัดของโครงถักในการรับแรงเพียง 1 กรณี จาก 4 กรณี ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนการวิเคราะห์จนได้พื้นที่หน้าตัดที่เป็นคำตอบทั้ง 4 กรณี เช่น ในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบด้วยข้อกำหนด EIT หรือ AISC/ASD 1989 วิเคราะห์และออกแบบทั้ง 4 กรณีตั้งแต่ Case a. – Case d. และในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบด้วยข้อกำหนด AISC/LRFD 1994 ก็ทำการวิเคราะห์และออกแบบทั้ง 4 กรณีตั้งแต่ Case e.– Case h. หากรณีที่ให้ปริมาตรรวมของโครงถักสูงสุด นับเป็นกรณีวิกฤติ (Critical Case) นำพื้นที่หน้าตัดจากกรณีวิกฤติ ไปตรวจสอบการรับแรงในกรณีอื่นอีก 3 กรณี แล้วกลับมาตรวจสอบกรณีวิกฤติเป็นรอบสุดท้าย แต่ละครั้งที่ตรวจสอบถ้ามีพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคารใดมีค่าพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าที่ต้องการ ก็ปรับเฉพาะพื้นที่หน้าตัดองค์อาคารนั้นให้เพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะรับแรงได้ แล้วนำค่าพื้นที่หน้าตัดชุดใหม่นี้ไปวิเคราะห์กรณีที่เหลือ จนถึงกรณีวิกฤติ เช่น ในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบด้วยข้อกำหนด AISC/ASD 1989 Case a. เป็นกรณีวิกฤติ นำพื้นที่หน้าตัดของ Case a. ไปวิเคราะห์ด้วยแรงที่กระทำด้วย Case b. ตรวจสอบการรับแรงด้วยข้อกำหนดของ AISC/ASD 1989 สมมุติว่ามีเพียงองค์อาคารที่ 1 มีค่าน้อยเกินกว่าค่าที่ต้องการ ก็ปรับเฉพาะองค์อาคารที่ 1 ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะรับแรงได้ นำพื้นที่หน้าตัดชุดใหม่นี้ ไปวิเคราะห์ด้วยแรงที่กระทำด้วย Case c. และ Case d. ตามลำดับตรวจสอบการรับแรงด้วยข้อกำหนดเดียวกันในขั้นตอนดังกล่าวมาแล้วจึงวิเคราะห์ด้วยแรงที่กระทำกับ Case a. เป็นกรณีสุดท้าย แสดงผลของแรงในแนวแกน ผลของการเคลื่อนตัวแต่ละจุด และผลด้านทานการรับแรงของฐานรองรับ นำผลของพื้นที่หน้าตัดคำตอบสุดท้ายมาจัดกลุ่มโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย จากแต่ละเซ็ตที่ผู้ออกแบบกำหนด คำตอบที่ได้คือพื้นที่หน้าตัดของโครงถักที่สามารถรับแรงได้ทุกกรณี ตามขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นนี้ สรุปเป็นแผนภาพ แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ 5-8 หน้า 48-51 ตามลำดับ