

PART 2 : Design of Steel

[Roof Truss]

➡ **ในปัจจุบัน**การออกแบบอาคารโดยทั่วไป ในส่วนของหลังคาอาคารเริ่มนิยมหันมาใช้เป็นโครงหลังคาเหล็กรูปพรรณกันมากขึ้น ทั้งนี้ผมมองว่าเนื่องมาจากหลายสาเหตุคือ

- ก่อสร้างง่าย
- ใช้เวลาน้อยลง
- ใช้แรงงานน้อยลง
- ป้องกันการรั่วซึมได้ดีกว่าหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- ซ่อมแซมได้ง่ายและใช้เวลาน้อย

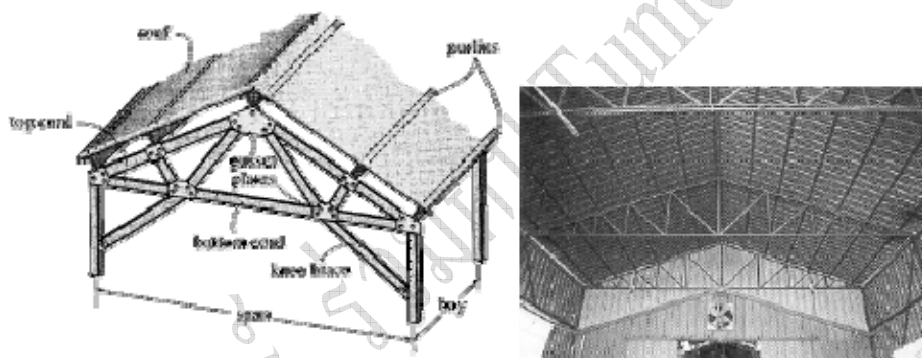
➡ **เมื่อพูดถึง**การออกแบบโครงหลังคาเหล็ก จะเห็นว่ามีองค์ประกอบอยู่มากมาย ที่ผู้ออกแบบจะต้องทำความเข้าใจ และแยกแยะให้ออกว่า

- มีโครงสร้างในส่วนของอะไรบ้างที่เราต้องวิเคราะห์ และออกแบบ
- โครงข้อหมุนถ้าเป็นทรงโค้ง จะวิเคราะห์และออกแบบอย่างไร
- โครงข้อหมุนที่น้ำหนักกระทำไม่ลงตรงจุดต่อ จะวิเคราะห์และออกแบบอย่างไร
- การออกแบบแป ในโครงหลังคาแบนและโครงหลังคาลาดชัน เหมือนกันหรือไม่
- ลักษณะของการต่อเชื่อมขององค์อาคารในแต่ละส่วน มีอะไรบ้าง พิจารณาและออกแบบอย่างไร
- อะไรคือ Fixed อะไรคือ Roller ออกแบบอย่างไร ให้รายละเอียดแบบไหน
- น้ำหนักต่างๆที่กระทำต่อโครงหลังคา มีอะไรบ้าง และวางตัวอย่างไร
- ความลาดชันของโครงหลังคาเป็นอย่างไร ใช้แรงลมมากน้อยแค่ไหน
- Sag Rod คืออะไร ใส่ในแง่ไหน หรือใช้เพื่ออะไร
- Bracing จริงหรือที่ไม่ต้องใส่ หรือใส่เพื่ออะไร ใช้ประโยชน์ในแง่ไหน
- Gusset Plate มีเพื่ออะไร ใช้แค่ไหน และออกแบบๆใด
- Welding และ Bolt จะเลือกใช้เมื่อไหร่ ออกแบบอย่างไร
- Anchor Bolt ออกแบบอย่างไร ใช้อะไรพิจารณา
- Bearing Plate มีไว้เพื่ออะไร ใช้หรือออกแบบอย่างไร

- ช่อง Slot คืออะไร ออกแบบๆไหน
เหล่านี้เป็นต้น...

➡ **องค์อาคาร**ที่ต้องวิเคราะห์และออกแบบหลักๆประกอบด้วย

- ① แป หรือ ระแนง
- ② จันทันหลัก-พราง
- ③ ตะเฆ่สัน-ราง
- ④ ออกไก่ ขื่อ อะเส
- ⑤ คั้ง
- ⑥ Sag Rod และ ค้ำยันต่างๆ
- ⑦ โครงข้อหมุน



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบของโครงหลังคา

โครงข้อหมุน

① นิยาม : โดยทั่วไปของโครงข้อหมุน(ดูรูปที่ 1.2 ประกอบ)คือ “โครงสร้างที่รับแรงในแนวระนาบ(In Plane ; ดังรูปที่ 1.5) ซึ่งประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งตรง(Line Element)ขนาดสม่ำเสมอ(ค่า I , E และ A คงที่)และมีน้ำหนักเบา ต่อเชื่อมกันด้วยจุดหมุน(Pin)ที่ไม่สามารถส่งถ่ายโมเมนต์ได้นอกจากแรงตามแนวแกน(Axial Forces)เท่านั้น โดยแนวแรงตามแนวแกนต้องผ่านจุดศูนย์กลางมวล(c.g.)หรือจุด Shear Center และต้องตัดผ่านกันที่จุดหมุน”
(หมายเหตุ: สำหรับหน้าตัดรูปทรงสมมาตร ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล(c.g.)และจุด Shear Center คือจุดเดียวกัน)

ข้อสังเกต : ในทางปฏิบัติมีอยู่บ่อยครั้งมากที่ โครงข้อหมุนมีลักษณะไม่เข้าข่ายตามนิยามข้างบน เป็นต้นว่า(ดูรูปที่ 1.3 ประกอบ)

① ตรงรอยต่อไม่มีสภาพเป็นเป็น “จุดหมุน(Pin)” ที่สมบูรณ์แบบ(ตรงตามอุดมคติ) เช่น ต่อชิ้นส่วนด้วยการเชื่อม หรือยึดด้วยน๊อต ซึ่งการต่อชิ้นส่วนด้วยวิธีทั้งสองนั้นแท้ที่จริงแล้ว มันสามารถส่งถ่ายโมเมนต์ได้บ้าง(แต่ในบางกรณีโครงถักที่เป็นโครงข้อแข็งก็มีการวิเคราะห์และออกแบบมาใช้งานอยู่บ้าง) แต่...การตั้งสมมุติฐานว่าชิ้นส่วนบาง-มีน้ำหนักเบา และแนวแรงต้องตัดผ่านกันที่จุดต่อ จึงทำให้การสมมุติว่าจุดต่อมีสภาพเป็นจุดหมุน(Pin)นั้น มีค่าความคลาดเคลื่อน(error)อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

② แนวแรงของชิ้นส่วนที่มาต่อเชื่อมกัน มักไม่ตัดผ่านกันที่จุดหมุน(ดูรูปที่ 1.3(ก.) ประกอบ) ทำให้เกิดการเอียงศูนย์ของแนวแรง ซึ่งจะส่งผลให้จุดต่อเชื่อมเกิดการคดโค้ง(ซึ่งก็คือจะเกิดโมเมนต์เล็กขึ้นได้)

③ ชิ้นส่วน(รูปร่างหน้าตัด)ที่นำมาทำเป็นโครงข้อหมุน โต-หนาและหนัก เช่น หน้าตัดรูปตัวที(T) เหล็กทรงน้ำ([) เหล็กตัวไอ(I) ฯลฯ ผลที่ตามมาคือจะทำให้เกิดโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวมันเอง แทนที่จะมีแต่เฉพาะแรงตามแนวแกนเท่านั้น(ดูรูปที่ 1.3(ข.) ประกอบ)

④ บ่อยครั้งที่การวางตัวของแป(หรือน้ำหนัก)ลงไม่ตรงจุดต่อ รวมถึงการห้อยหรือแขวนระบบฝ้าเพดาน-พัดลม-คอมไฟ-กันความร้อน ดังนั้นจึงทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นในชิ้นส่วนร่วมกับแรงตามแนวแกน แต่มักคิดเอาเองว่าไม่มีโมเมนต์(ดูรูปที่ 1.3(ค.) ประกอบ)

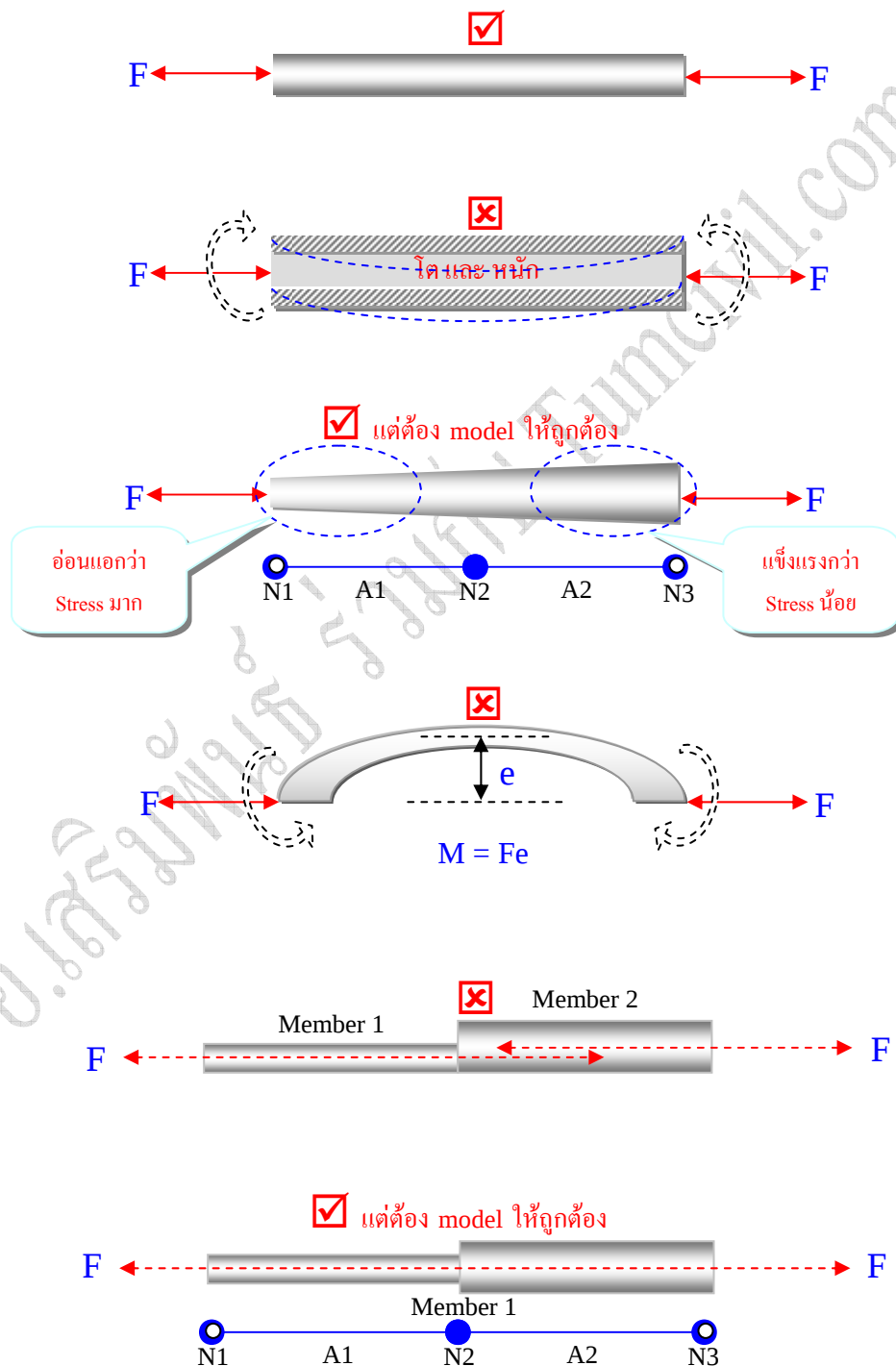
⑤ บ่อยครั้งในงานก่อสร้าง จะเห็นว่าโครงข้อหมุนที่ชิ้นส่วนมีการคดขึ้นรูปเป็นทรงโค้ง(ชิ้นส่วนที่นำมาประกอบถูกคดโค้งด้วย...แต่ถ้าชิ้นส่วนที่นำมาประกอบไม่ได้คดโค้ง แสดงว่าเป็นไปตามนิยาม ดูรูปที่ 1.3(ง.) ประกอบ) ซึ่งตามนิยามแล้วไม่อาจทำได้เพราะจะเกิดโมเมนต์คด(แต่ในทางปฏิบัติก็มีเห็นชิ้นส่วนคดขึ้นรูปโค้ง แล้วนำมาประกอบขึ้นเป็นโครงข้อหมุนทรงโค้ง ซึ่งก็สามารถทำได้...แต่...ควรจะต้องทำการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์คดที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาหา Combine Stress ระหว่าง Axial Stress + Bending Stress แต่หากไม่ทำการตรวจสอบหาค่าโมเมนต์ดังกล่าว ที่เห็นมักออกแบบเพื่อรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนัก)

⑥ บ่อยครั้งที่ลักษณะการวางตัวของรอยเชื่อมและน๊อตไม่สมมาตร(หมายถึงแนว c.g. ของกลุ่มน๊อตหรือรอยเชื่อม ไม่อยู่หรือทับกับแนวของแรงที่ส่งผ่านระหว่างชิ้นส่วน) ทำให้การส่งผ่านแรงเกิดการเอียงศูนย์ หรืออาจเกิดจากการเลือกใช้รูปร่างหน้าตัดที่ไม่สมมาตร เช่น กรณียของเหล็กฉากเดี่ยว(โดยเฉพาะเหล็กฉากขาไม่เท่ากัน ฯลฯ)ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสลับ(ดุ้ง)หรือเกิดการคดในทิศทางนอกกระนาบของโครงถักได้

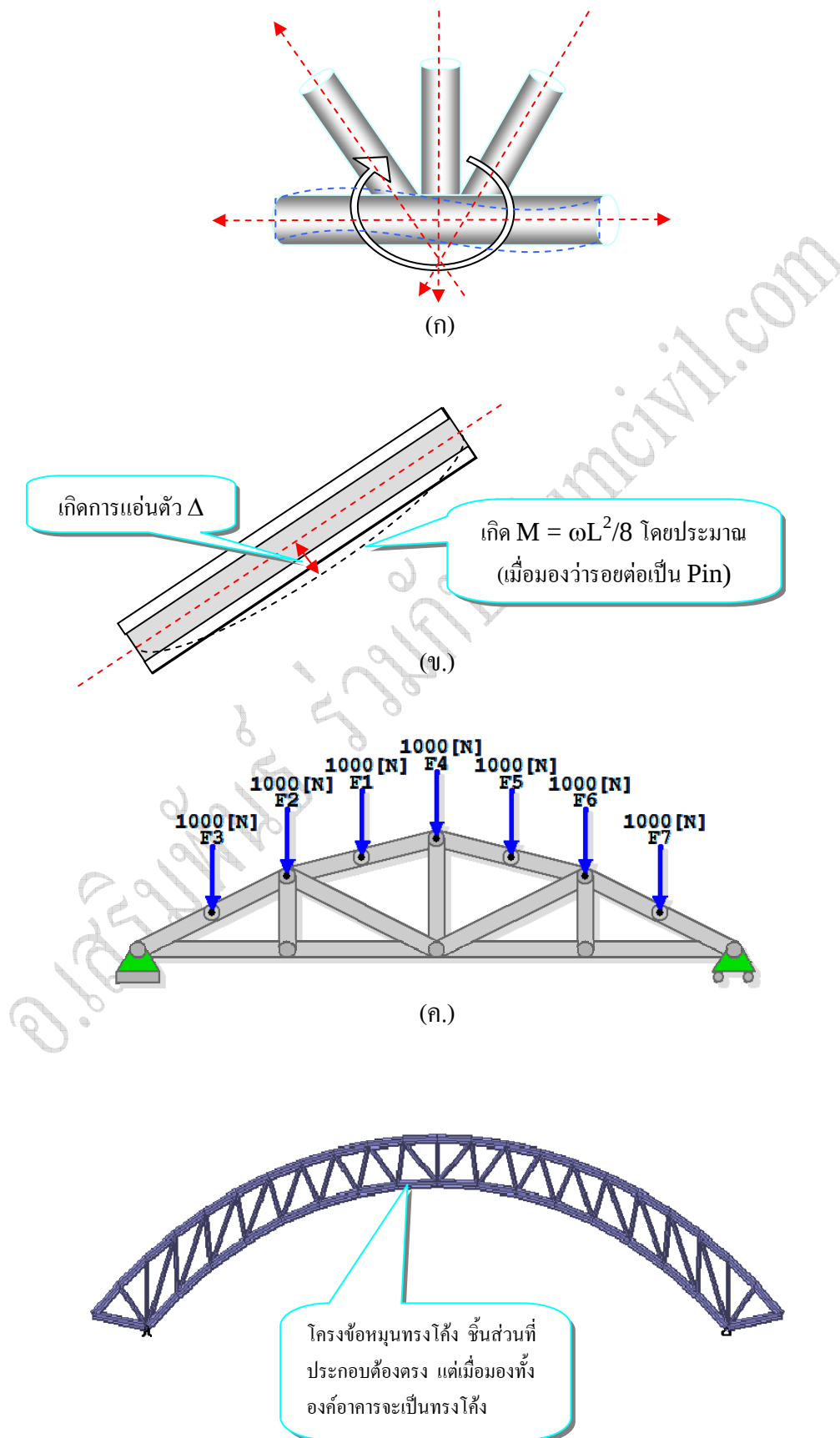
⑦ บ่อยครั้งเช่นกันที่มีการใช้ขนาดของชิ้นส่วนไม่เท่ากันมาต่อกัน(อาจเนื่องมาจากมองถึงเรื่องของความประหยัด หรือเลือกออกแบบตามขนาดของแรงที่วิเคราะห์ได้ โดยเฉพาะการใช้ Softwares ตัวใหญ่ๆของต่างประเทศที่มีคุณสมบัติ “ออกแบบให้โดยอัตโนมัติ”) ซึ่งอาจทำ

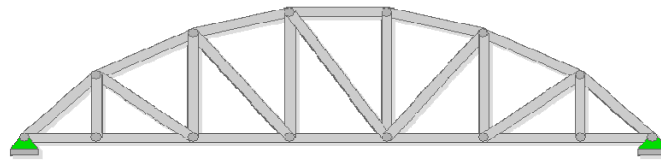
ให้การส่งถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วน ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล(c.g.) หรือจุด Shear Center รูปที่ 1.3(น.) ประกอบ)

⑧ ในบางกรณีหากจำเป็นต้องใช้ชิ้นส่วนที่มีลักษณะหน้าตัดสอบ(Taper Section) หรือหน้าตัดมากกว่าหนึ่งขนาด(สำหรับชิ้นส่วนหนึ่งๆ) การวิเคราะห์ที่อาจทำได้แต่จะต้องมีความเข้าใจในการจำลองโครงสร้าง(พอสสมการ)

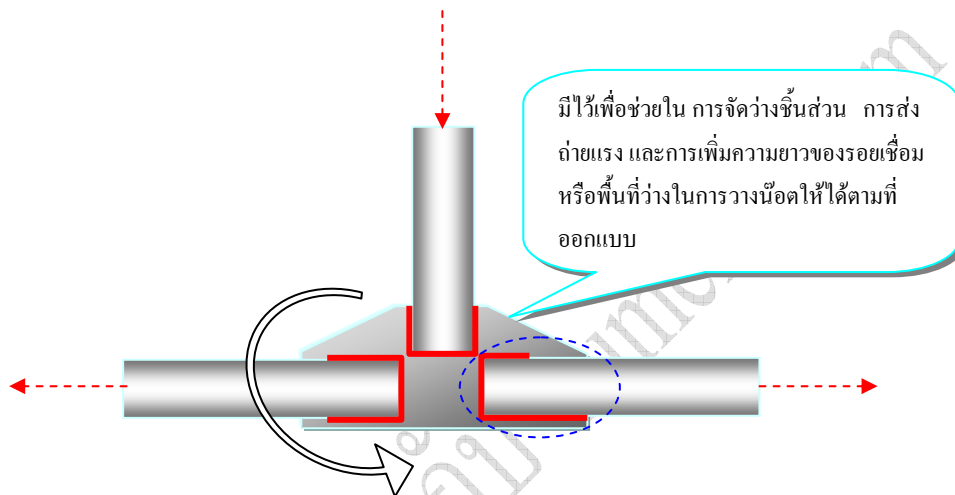


รูปที่ 1.2 ลักษณะของโครงข้อหมุนที่ถูกและผิดตามค่านิยม

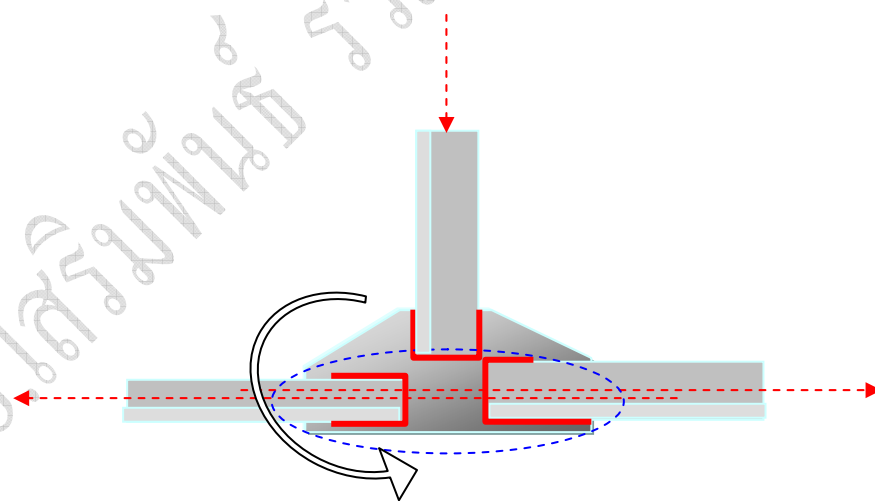




(ง.)



(จ.)

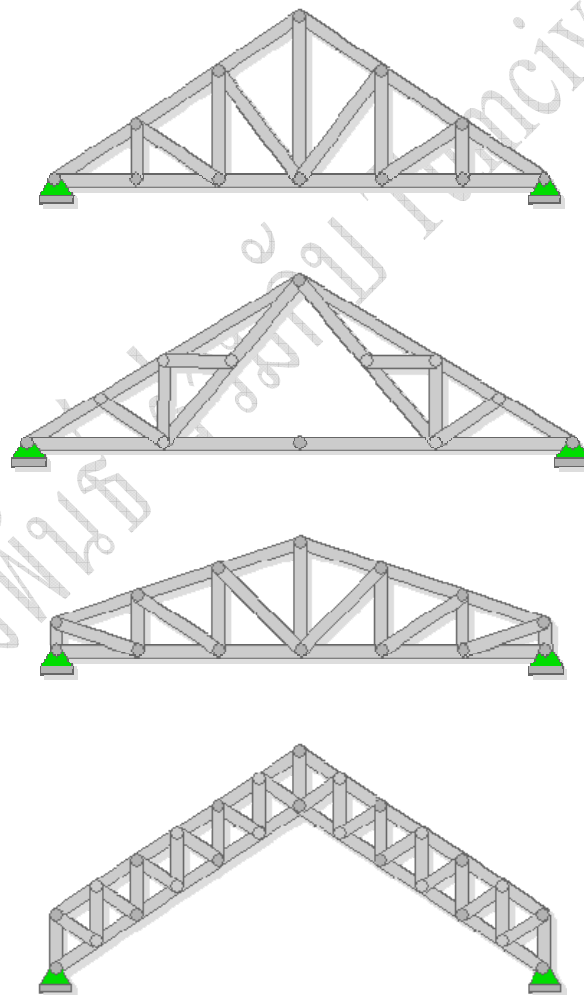


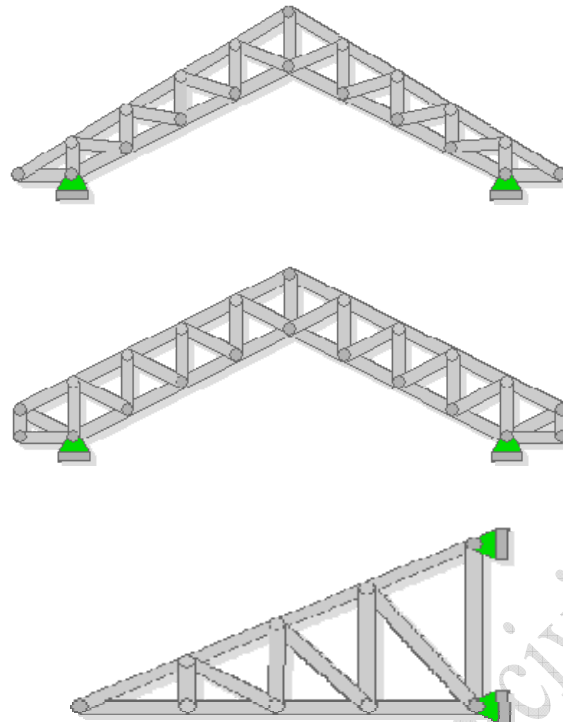
(ฉ.)

รูปที่ 1.3 แสดงรูปตามข้อสังเกต

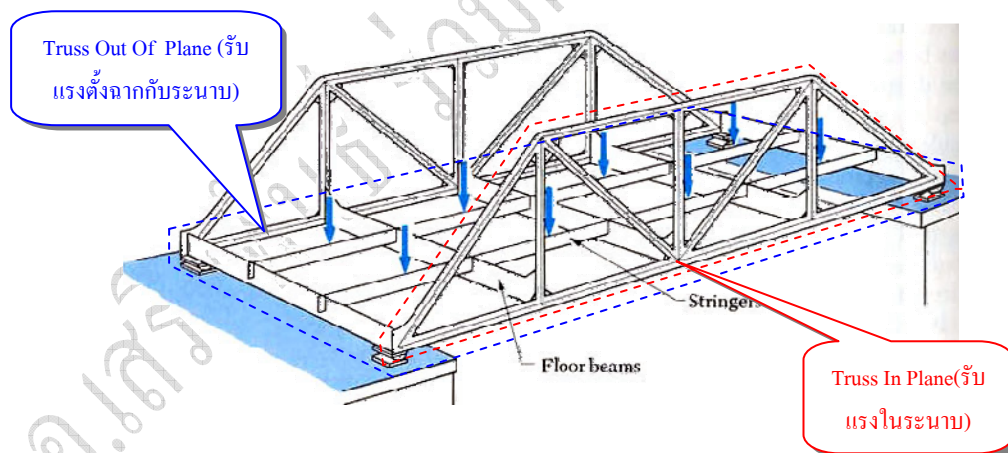
②รูปแบบ(ทรง)ของโครงข้อหมุน : ที่จะกล่าวถึงในที่นี้(ดูรูปที่ 1.4 ประกอบ) หมายถึง โครงหลังคารูปทรงต่างๆไป แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นในทางปฏิบัติรูปทรงของโครงหลังคาจะเป็นเป็นเช่นไรนั้น โดยหลักการแล้วมักขึ้นอยู่กับความต้องการของเจ้าของเงินและแนวคิดของสถาปนิกเป็นหลัก ซึ่งมีทั้งรูปทรงง่ายๆและซับซ้อน(ไม่ว่าจะเป็นใน 2 มิติ หรือ 3 มิติ)

ข้อสังเกต : เนื่องจากโครงข้อหมุนเป็นโครงสร้างที่สร้างมาเพื่อ ให้รับเฉพาะแรงดึงหรือแรงอัดเท่านั้น ซึ่งหากสังเกตให้ดีจะเห็นว่าชิ้นส่วนที่มีความยาวเท่ากันและมีแรงตามแนวแกนเท่ากัน ชิ้นส่วนที่รับแรงอัดนั้นการออกแบบจะวิกฤติกว่าชิ้นส่วนที่รับแรงดึง ฉะนั้นในการเลือกใช้รูปทรงโครงข้อหมุนในรูปแบบต่างๆ จะต้องจัดให้มีการวางตัวของชิ้นส่วนรับแรงอัด ให้มีความยาวให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อความประหยัดและความแข็งแรงของโครงข้อหมุนโดยรวม





รูปที่ 1.4 โครงข้อหมุนในรูปแบบต่างๆ(ใน 2 มิติ)



รูปที่ 1.5 แสดงโครงข้อหมุนในระบบ In Plane และ Out Of Plane

๓ ทฤษฎี : ว่าด้วยการวิเคราะห์โครงข้อหมุน โดยหลักการแล้วตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อสมมุติฐานดังนี้

-วัสดุที่ใช้ทำเป็นโครงข้อหมุนจะต้อง ประพฤติตนให้อยู่ในกรอบของความสัมพันธ์เชิงเส้น(ตีความเอาว่าเป็นเส้นตรง)ระหว่าง “ความเค้น(Stress)” และ “ความเครียด(Strain)”

-จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนเป็นแบบ “จุดหมุน(Pin)” ที่ส่งผ่านเฉพาะแรงตามแนวแกน (เท่านั้น) โดยไม่สามารถส่งถ่ายโมเมนต์ได้(เลยแม้แต่หน่อย)

-แรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนใดๆมีเพียงแรงๆเดียว คือแรงตามแนวแกนซึ่งอาจจะเป็นแรงอัดหรือแรงดึงก็ได้ขึ้นอยู่กับรูปทรง(การจัดวางชิ้นส่วน) รวมถึงตำแหน่งและทิศทางที่น้ำหนักกระทำ

-แรงที่กระทำต่อโครงข้อหมุนจะต้องเป็น “แรงกระทำเป็นจุด(Point Load)” กระทำที่จุดต่อเท่านั้น และต้องกระทำในระนาบของโครงข้อหมุนนั้นด้วย

-ชิ้นส่วนที่เลือกใช้จะต้องมีขนาดหน้าตัดและน้ำหนักเบา(มาก)จนสามารถตัดทิ้งได้ นั่นหมายความว่าต้องไม่มีน้ำหนักของตัวเองเข้ามาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

-โครงข้อหมุนต้องประกอบขึ้นด้วยชิ้นส่วนที่ ต่อเชื่อมกันเป็นรูปทรง 3 เหลี่ยมอย่างง่าย วางต่อเนื่องกันเป็นโครงข้อหมุนรูปทรงต่างๆ

ข้อพึงระวังและควรตระหนักคือ : เนื่องจากเป็นทฤษฎีและมีข้อจำกัดในบางกรณี ฉะนั้นตราบใดที่เราวิเคราะห์โครงข้อหมุน โดยใช้วิธีการการวิเคราะห์ตามหลักการของทฤษฎีนี้ ไม่ว่าจะเป็นวิธีตัดจุดต่อ(Joint Method)หรือวิธีตัดแยกส่วน(Section Method) จำเป็นอย่างยิ่งที่เรา จะต้องพิจารณาและทำความเข้าใจ

① ในขั้นตอนของการจำลองโครงสร้างเพื่อการวิเคราะห์ การกระทำใดๆควรที่ต้องปฏิบัติตาม “นิยาม” และ “หลักการของทฤษฎี” ที่เราอ้างอิง...ไม่เช่นนั้นแล้วการกระทำใดๆตามวิธีการของทฤษฎี แต่ไม่ปฏิบัติตามหลักการหลักของทฤษฎี ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ก็อาจกล่าวได้ว่ามีความถูกต้องหรือมีความน่าเชื่อถือได้ **แต่ในบางเงื่อนไขหากไม่ปฏิบัติตาม “นิยาม หรือ หลักทฤษฎี”** แต่นำมาซึ่งความปลอดภัยและประหยัด ผมมองว่าก็น่าจะกระทำแต่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขหลักคือ ความมีเสถียรภาพ-แข็งแรงและเสียรูปน้อย(ไม่ว่าจะเป็นใน 2 มิติ หรือ 3 มิติ) เช่น น้ำหนักของตัวเองโครงข้อหมุนเองในเชิงปฏิบัติจริงควรต้องคิด เพราะน้ำหนักดังกล่าวจะส่งผลไปถึง ระบบฐานรองรับ(ออกแบบ เสา+แผ่นเหล็กรองฐานเสา หรือฐานราก) และการยกเพื่อการแอนตัว(Camber)ของโครงข้อหมุนในขณะก่อสร้างหรือติดตั้ง รวมถึงการช่วยถ่วงเพื่อลดการแกว่งตัวของโครงข้อหมุนได้บ้าง

② น้ำหนักที่กระทำต่อโครงข้อหมุนต้องกระทำผ่านจุดต่อหมุน(ตามทฤษฎี...โดยใช้หลักการของ Tributary Area ในการหาแรงลงจุดต่อหมุน) แต่ในบางกรณี(ดูรูปที่ 1.6(จ.-1))เราอาจจำลองเป็นแรงแผ่กระจายได้ถ้า...ระยะห่างระหว่างจุดต่อหมุ่นน้อยกว่าความยาวของโครงข้อหมุนมากๆ...ซึ่งการกระทำอย่างนี้นั้นนอกจากจะเกิดแรงตามแนวแกนแล้ว ยังก่อให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด คล้ายๆกับกรณีของคานช่วงเดียวอย่างง่าย(ดูรูปที่ 1.6(จ.-2 และ จ.-3))

ข้อสังเกต : หากเรากำหนดให้น้ำหนักแผ่กระจายกระทำในแนวแกนอ้างอิง Global Axes(เรียกง่ายๆว่าแกนอ้างอิงโลกหรือแกนอ้างอิงใหญ่) แรงตามแนวแกนที่ได้จะไม่เท่ากันตลอดความ

ยาวของชิ้นส่วน(แต่ต่างกันไม่มากนัก) แต่ถ้ากำหนดให้แรงดังก่อกระทำในแนวแกนอ้างอิง Local Axes(เรียกง่าย ๆ ว่าแกนอ้างอิงเฉพาะชิ้นส่วน ซึ่งมีแนวแกน X วิ่งผ่านแนวแกนตามยาวของชิ้นส่วน) แรงตามแนวแกนที่ได้จะมีขนาดเท่ากันตลอดความยาวของชิ้นส่วน

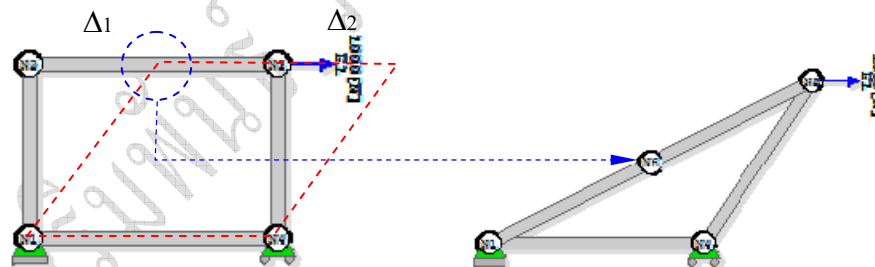
③ โครงข้อหมุนเป็นโครงสร้างที่รับเฉพาะแรงในระนาบ(นั่นหมายความว่า การวางตัวของชิ้นส่วนและแรงกระทำ จะต้องวางตัวอยู่ในระนาบเดียวกัน) ดังนั้นเมื่อนำโครงข้อหมุนมาประกอบกันเป็นโครงสร้างจริง(ใน 3 มิติ) หากมีแรงกระทำนอกระนาบของโครงข้อหมุนดังกล่าว เช่น แรงลม-พายุ หรือแรงจากแผ่นดินไหว จะต้องมีการใส่ “ระบบค้ำยัน(Bracing)” เพื่อต้านแรงที่กระทำในระนาบดังกล่าว(นอกระนาบของโครงข้อหมุน) ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยภาพ-ความแข็งแรง และป้องกันการบิดหรือหมุนตัวของโครงข้อหมุน(ของโครงสร้าง)ทั้งกลุ่ม(ดูรูปที่ 1.6 ประกอบ)

④ เมื่อโครงข้อหมุนรับเฉพาะแรงในแนวระนาบ ดังนั้นในการจำลองเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อความง่ายและสะดวกจึงมักจำลองให้อยู่ในรูปของโครงข้อหมุนใน 2 มิติ (ดูรูปที่ 1.6(จ.) ประกอบ) **ข้อระวัง**..การจำลองโครงข้อหมุนจากสภาพใน 3 มิติ มาสู่การจำลองเพื่อการวิเคราะห์และออกแบบใน 2 มิตินั้น ใ้ว่าเราจะทำได้ง่าย ๆ ตามอำเภอใจเราได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีหลักการเบื้องต้นง่าย ๆ ในการกระทำดังกล่าวคือ ชิ้นส่วนต่างๆต้องวางตัวอยู่ในระนาบเดียวกันกับแรงที่กระทำเท่านั้น ถ้าการวางตัวของชิ้นส่วนและแรงที่กระทำไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน การจำลองและวิเคราะห์ต้องกระทำในสภาพ 3 มิติเท่านั้น เช่น โครงข้อหมุนรูปทรงโดม เสาพาดสายไฟฟ้าแรงสูง ฯลฯ แต่พึงควรระวังเรื่องความปลอดภัยภาพของโครงข้อหมุนเมื่อนำไปก่อสร้างจริง ทั้งนี้เพราะว่าโดยภาพรวมแล้วเมื่อทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงข้อหมุนในระบบ 2 มิติซึ่งเรามองว่ามีเสถียรภาพดีนั้น นั้นเป็นเพียงเสถียรภาพใน 2 มิติเท่านั้น หมายความว่าโครงข้อหมุนนั้นมีเสถียรภาพแต่เฉพาะตามแนวแกน X และแกน Y เท่านั้น แต่ในแนวแกน Z จะไม่มีเสถียรภาพแน่นอน(เพราะเวลาก่อสร้างจริงโครงข้อหมุนจะอยู่ในสภาพ 3 มิติ ซึ่งจะมีแกน Z เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นขณะก่อสร้างต้องมีการค้ำยันชั่วคราวตามแนวแกนนี้ด้วย)

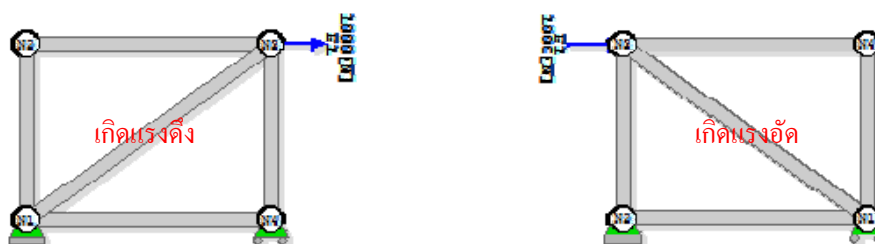
⑤ เหตุที่โครงข้อหมุนต้องประกอบขึ้นจากรูป 3 เหลี่ยมอย่างง่าย ให้พิจารณารูปที่ 1.6 (ก.)ประกอบ สมมุติว่าเดิมชิ้นส่วนประกอบกัน(ด้วยจุดหมุน)เป็นโครงสร้างรูปทรง(โครงกรอบ)สี่เหลี่ยม เมื่อมีแรงมากระทำที่จุดต่อดังรูป โครงสร้างดังกล่าวจะเกิดการเสียรูปไปตามแรงที่กระทำ(ทางทฤษฎีบอกว่าระยะ $\Delta_1 = \Delta_2$ แต่ผมมองว่าแท้ที่จริงแล้วไม่น่าจะเท่ากัน แต่หากันไม่มากจึงพออนุมานได้ว่าเท่ากันได้) ซึ่งหากสังเกตให้ดีจะเห็นว่ารูปแบบของรูปทรงโครงสร้างเมื่อมีการเสียรูปแล้วจะเปลี่ยนจาก(ตราบโดที่ชิ้นส่วนยังรับแรงได้ หรือยังไม่มีชิ้นส่วนใดเสียหาย)ก่อนสี่เหลี่ยมมุมฉาก $\rightarrow$ สี่เหลี่ยมขนานแปดเหลี่ยม $\rightarrow$ เข้าใกล้หรือเป็นทรงสามเหลี่ยม...แล้วก็หยุดอยู่แค่นั้น นอกเสียจากว่าจะมีชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งพัง(หรือข้อต่อบิดกลับด้าน) โครงสร้างดังกล่าวจึงจะพังหรือเปลี่ยนรูปใหม่ นั่นหมายความว่าโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ต่อกัน

ด้วยจุดหมุนที่ปลายทั้งสอง ท้ายที่สุดแล้วรูปแบบที่ไม่มีการเสีรูป(หรือเสีรูปน้อยมาก) หรือมีสภาพสมดุลมากที่สุดก็คือ รูปทรงสามเหลี่ยม ดังนั้นหากนำชิ้นส่วนมาประกอบกันด้วยจุดต่อหมุนเป็นรูปทรงอื่นๆ จะต้องมีการยึดโยงหรือค้ำยันเพื่อช่วยให้มาเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 1.6(ข.)

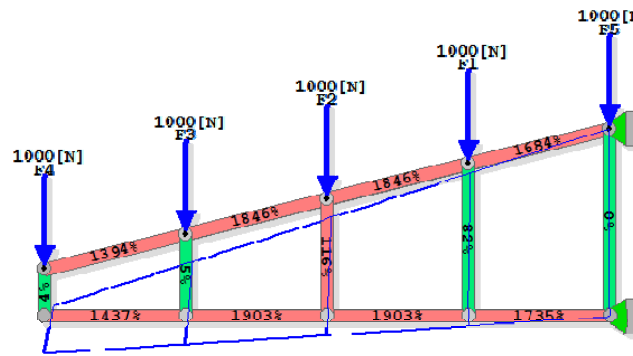
แต่... ในบางครั้งโครงข้อหมุนที่เราเห็นกันในงานก่อสร้างจริง เช่น กันสาดหรือชายคา ฯลฯ โครงข้อหมุนกลับไม่ได้ประกอบขึ้นจากรูปทรง 3 เหลี่ยม(ดูรูปที่ 1.6(ค.) ประกอบ) ซึ่งไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎี(ซึ่งจริงๆ แล้วไม่น่าจะวิเคราะห์และออกแบบได้ โดยเฉพาะการใช้ Software ช่วยในการออกแบบ) แต่กลับสามารถรับแรงกระทำได้โดยไม่พัง(ที่พบมักใช้ในการรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนัก) ทั้งนี้ก็เนื่องจากชิ้นส่วนในแนวนอนทั้ง 2 (คอร์ดบน และ คอร์ดล่าง) จะเป็นชิ้นส่วนเดี่ยวยาวตลอด(ไม่ได้ตัดเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ แล้วมาต่อกันดูรูปที่ 1.6(ง.) ประกอบ) นั้นหมายความว่าตรงบริเวณของจุดต่อที่ชิ้นส่วนในแนวดิ่งทั้งหลายมาต่อกับ 2 ชิ้นส่วนในแนวนอนดังกล่าว นั้น ไม่ได้หมายความว่า จะเป็นจุดหมุนในทุกชิ้นส่วน ซึ่งในกรณีนี้ชิ้นส่วนที่มีจุดต่อเป็นจุดหมุนคือชิ้นส่วนในแนวดิ่งทั้งหมด(เอามาเชื่อมแปะติดไว้) ส่วนชิ้นส่วนในแนวนอนทั้งสองจะไม่มีจุดต่อ(จุดต่อหมุน)เพราะยาวเป็นชิ้นส่วนเดี่ยวตลอด 4 ช่วง(จริงๆ แล้วเป็นจุดต่อแบบแข็งแรง ตรงบริเวณที่ชิ้นส่วนในแนวดิ่งมาเชื่อมแปะไว้) จึงทำให้โครงข้อหมุนตามรูปมีเสถียรภาพสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้



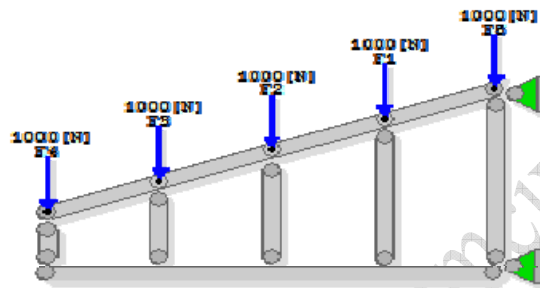
(ก.)



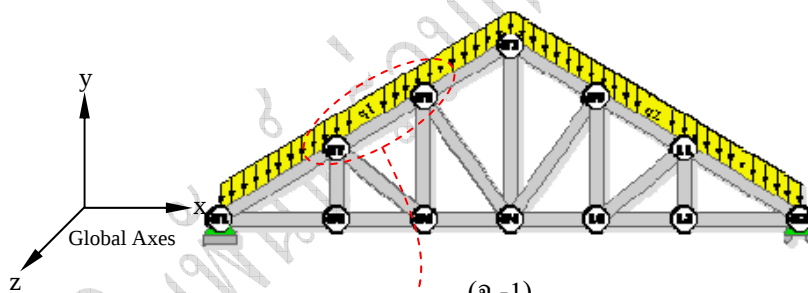
(ข.)



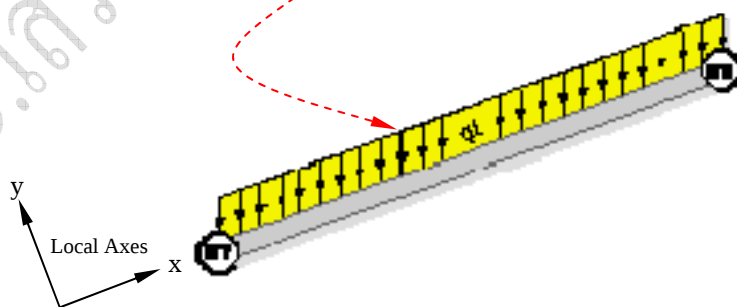
(ก)



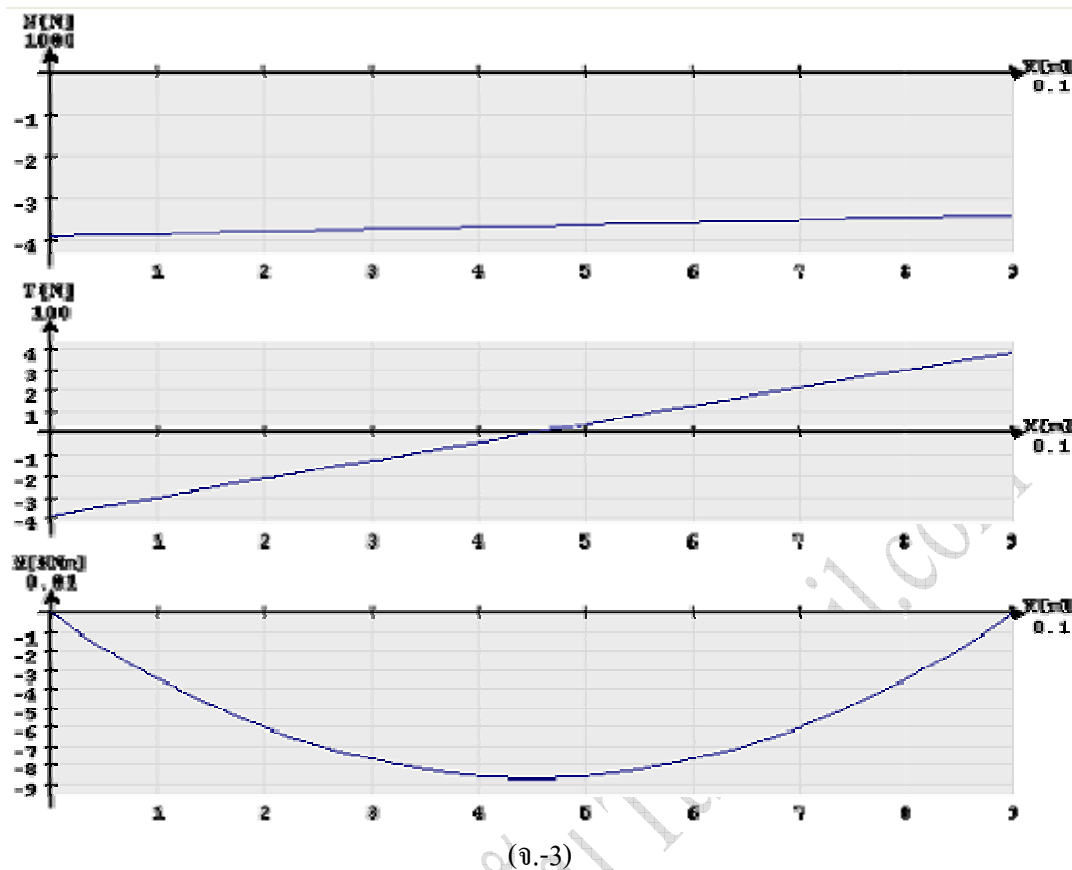
(ง.)



(จ.-1)

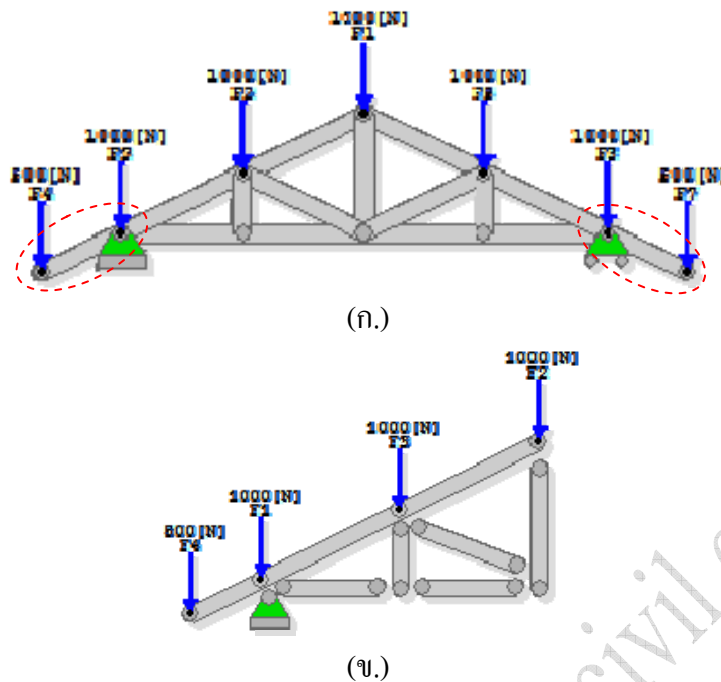


(จ.-2)



รูปที่ 1.6 ประกอบการอธิบายทฤษฎีของโครงข้อหมุน

⑥ เนื่องจากทฤษฎีบอกว่าจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนจะต้องเป็นจุดต่อหมุน นั้นย่อมหมายความว่าโครงข้อหมุนต้องประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนย่อยๆ แล้วนำมาคล้องหรือร้อยเข้าด้วยกันเป็นรูปทรง 3 เหลี่ยม แต่บางครั้งในทางปฏิบัติกลับมีกรณีที่น่าสนใจ(ดังแสดงในรูปที่ 1.7(ก.))คือโครงข้อหมุนที่มีการยื่นชิ้นส่วนเลยจุดรองรับ(เพื่อทำเป็นกันสาด) ถ้าหากเราทำการวิเคราะห์หาแรงในส่วนยื่นดังกล่าวตามทฤษฎี เราจะไม่สามารถวิเคราะห์หาแรงได้เนื่องจากโครงสร้างไม่มีเสถียรภาพ(Unstable) กล่าวคือชิ้นส่วนที่ยื่นจะไม่สามารถรับแรง 500[N] ได้เพราะทฤษฎีบอกว่าทุกจุดต่อเป็นจุดหมุน แต่ในทางปฏิบัติกลับมีการวิเคราะห์และออกแบบมาใช้งานกันได้ โดยไม่พังเสียหาย(มีทั้งในงานเอกชนและในงานทางราชการ) ทั้งนี้เนื่องจากว่าชิ้นส่วนในส่วนที่ยื่นนั้นแท้ที่จริงแล้วจะเป็นชิ้นส่วนเดี่ยวยาวตลอดต่อเนื่องกันกับอีกในสองช่วงที่เหลือ(ดังแสดงในรูปที่ 1.7(ข.)) ดังนั้นชิ้นส่วนดังกล่าวที่บริเวณจุดรองรับจึงไม่ใช่จุดหมุน(จริงๆแล้วเป็นจุดต่อแบบแข็งเกร็ง) จึงสามารถคำนวณโมเมนต์ได้



รูปที่ 1.7 แสดงโครงข้อหมุนที่มีส่วนยื่นของชายคา

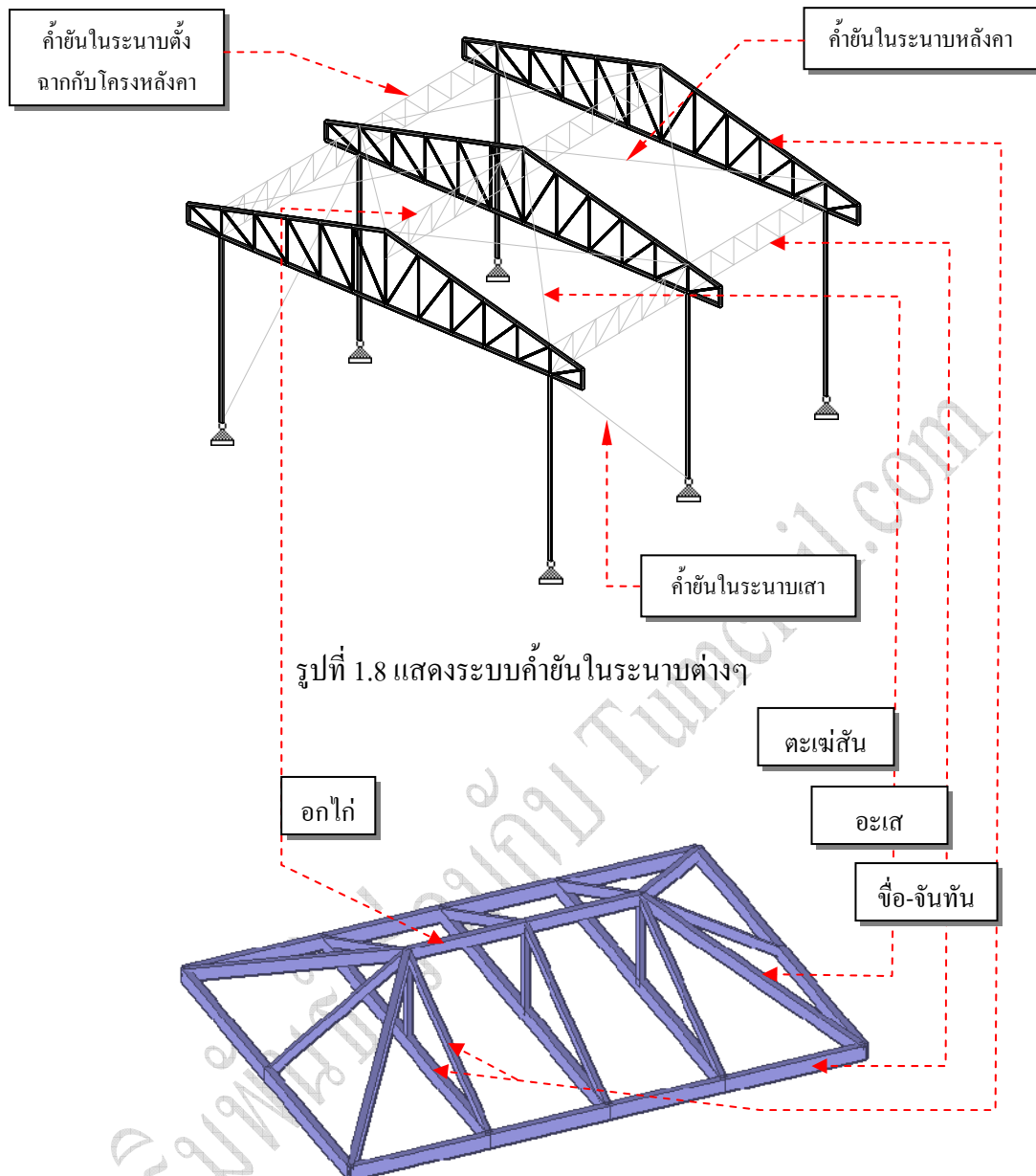
④ ระบบค้ำยัน : ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบโครงสร้าง โดยเฉพาะระบบโครงสร้างที่มีโครงข้อหมุนเป็นส่วนประกอบของระบบโครงสร้างนั้นๆ เนื่องจากโครงข้อหมุนมีจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนเป็นระบบจุดต่อหมุน ดังนั้นจึงต้องพึงระวังให้มากในเรื่องของ ① ความมีเสถียรภาพและ ② ความแข็งแรง(ต่างจากความแข็งแรงของชิ้นส่วน)ของระบบโครงสร้างโดยรวม ฉะนั้นระบบของโครงสร้างที่จะถูกนำมาเพื่อช่วยเสริมสภาพดังกล่าวคือ “ระบบค้ำยัน” ดังรูปที่ 1.8 ซึ่งระบบค้ำยันดังกล่าวอาจจะเป็นโครงข้อหมุน(ทั้งที่อาจรับแรงด้วยหรือช่วยยึดโยงเฉยๆก็ได้)หรือชิ้นส่วนเดี่ยวๆ(รวมถึง Sag Rod ซึ่งถือว่าเป็นการค้ำยันในระนาบที่อ่อนแอของแป) และเพื่อเพิ่มความเข้าใจให้ลองมองเปรียบเทียบระบบการค้ำยัน ระหว่างโครงหลังคาที่เป็นแบบโครงข้อหมุน(รูปที่ 1.8) และ โครงหลังคาที่ไม่ใช่โครงข้อหมุน(รูปที่ 1.9)

ซึ่งจากรูปที่ 1.8 หากสังเกตให้ดี จะเห็นว่าระนาบที่จะต้องมีการพิจารณาเรื่องการค้ำยันนั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 ระนาบหลัก และอีก 1 ระนาบเสริม(เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเอียงของระนาบ ซึ่งก็คือโครงหลังคานั้นเอง)รวมเป็น 3 ระนาบคือ ① ระนาบในแนวดิ่ง(ซึ่งก็คือระนาบของเสาที่รับโครงหลังคาโดยรอบ รวมถึงระบบการค้ำยันระหว่างโครงข้อหมุนถึงโครงข้อหมุนไม่ว่าจะเป็นบริเวณที่เดิมเป็นนอกไก่หรืออะเส ดังรูปที่ 1.8) การใส่ชิ้นส่วนค้ำยันในระนาบดังกล่าวไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใส่ในทุกช่วงเสา อาจใส่เฉพาะช่วงหัว-ท้าย ช่วงเว้นช่วง หรือช่วงหัว-กลาง-ท้าย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของตัวเสา(ซึ่งความแข็งแรงดังกล่าวจะเกี่ยวเนื่องกับรูปแบบ

ของจุดรองรับที่เราจำลองในขณะวิเคราะห์ด้วย) และตัวของค้ำยันเอง รวมถึงเรื่องความสวยงามและความเหมาะสมในการจัดวางช่องประตู-หน้าต่างด้วย ② ระบายในแนวนอน(ซึ่งก็คือระบายของฝ้าเพดานหรือข้อและคอร์ดล่างของโครงหลังคา) ③ ระบายในแนวเอียง(ซึ่งก็คือระบายของหลังคา..รูปที่ 1.8 ประกอบ) ในระนาบนี้ระบบค้ำยันมักนิยมใช้ลวดสลิงที่มีเกลียวแรงเป็นตัวปรับความตึง-หย่อนของลวดสลิง โดยการใส่เพื่อค้ำยันนั้นอาจใส่เฉพาะช่วงหัว-ท้าย ช่วงเว้นช่วงหรือช่วงหัว-กลาง-ท้ายก็ได้ ซึ่งการทำงานของค้ำยันในส่วนดังกล่าวนี้ จะเป็นการช่วยดันไม่ให้โครงหลังคาทั้งกลุ่มเกิดการหมุนหรือบิดตัวเมื่อมีระบบของแรงมากระทำด้านข้าง ส่วน “แปหรือระแนง” ก็ถือได้ว่าเป็นระบบค้ำยันในระนาบนี้อีกส่วนหนึ่ง เพียงแต่เป็นการช่วยค้ำยันจากโครงข้อหมุนถึงโครงข้อหมุน(ในส่วนของ Upper Chord เท่านั้น) ซึ่งจะช่วยให้โครงข้อหมุนไม่เกิดการพลิกคว่ำ ในขณะที่ตัว Sag Rod เองจะเป็นตัวช่วยค้ำยันแปอีกทอดหนึ่ง(ช่วยลด Span ในบางแนวแกน)ซึ่งจะช่วยทำให้แปมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขนาดของ Sag Rod จะต้องมีการคำนวณหาขนาดและใช้ตามมาตรฐาน(AISC. ระบุไว้ว่าขนาดที่ใช้ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 5/8 นิ้ว) ไม่ใช่จับใส่อย่างที่เราเห็นๆทำกันคือ ใช้ท่อนเหล็กกลมไม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ถึงขนาด 9 มิลลิเมตร ซึ่งถ้าขนาดเล็กจนเกินไปก็ไม่อาจถือได้ว่าเป็นตัวช่วยค้ำยันแปได้(ที่จริงแล้ว Sag Rod ที่แข็งแรงพอตามมาตรฐานก็คือ Support กลายๆนั่นเอง)

หากสังเกตให้ดีจะเห็นว่า ลักษณะของการค้ำยันไม่ว่าจะเป็นการค้ำยันโดยชิ้นส่วนเดี่ยวๆหรือค้ำยันโดยระบบของโครงข้อหมุนเอง การวางตัวของชิ้นส่วน(ที่ทำหน้าที่เป็นระบบค้ำยัน) มักจะเป็นไปในลักษณะของรูปทรงสามเหลี่ยมเสมอ ทั้งนี้ก็ด้วยเหตุผลที่ว่าโครงสร้างเมื่อนำมาประกอบกันเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นถ้าหากว่าเราได้มีการ จำลองโครงสร้าง-การวิเคราะห์+ออกแบบ-การตรวจสอบ(ระบบโครงสร้างที่เราทำการออกแบบไว้มีความมั่นคงและแข็งแรงที่ดีพอ) รวมถึงการก่อสร้างว่าเป็นไปตามที่เราจำลองเพื่อการวิเคราะห์และออกแบบแล้ว ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องพิจารณา ระบบค้ำยันเข้ามาช่วยเสริมก็ได้(แต่ไม่แนะนำให้ทำ) **แต่!**อย่าลืมว่าการวิเคราะห์และตรวจสอบดังกล่าวข้างต้นนั้น จะต้องมั่นใจได้ว่าได้มีการพิจารณาถึงระบบของแรงต่างๆ(ทั้งชนิดและระดับความรุนแรง)ที่มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้น ตลอดช่วงอายุของการใช้งานอาคารได้อย่างทั่วถึงและครอบคลุมดีแล้วเท่านั้น



รูปที่ 1.9 ลักษณะการวางตัวของชิ้นส่วนในโครงหลังคาเหล็ก ที่ไม่ใช่โครงข้อหมุน

มีอยู่สิ่งหนึ่งที่เราต้องเข้าใจเป็นพื้นฐาน ในเรื่องของการพิจารณาระบบค้ำยันในโครงหลังคาก็คือ ทำไม!...เราถึงต้องให้ความสำคัญกับระบบค้ำยันมากมายเช่นนี้ คำตอบง่ายๆคือ...ตราบใดที่เราวิเคราะห์โครงหลังคาให้เป็นระบบโครงข้อหมุน(และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำลองโครงข้อหมุนให้เป็นระบบ 2 มิติ...ที่มีจุดรองรับเป็นแบบ Hinge และ Roller ซึ่งเรียกโดยรวมว่า Simple Support) เมื่อนั้นความมีเสถียรภาพของโครงสร้างก็จะด้อยลงไป(แม้ว่าโดยตัวของมันเอง

จะมีเสถียรภาพก็ตาม)...เมื่อนำไปต่อเชื่อมกับระบบโครงสร้างอื่น(เช่น เสา คาน โดยเฉพาะ เสา-คาน เหล็กรูปพรรณ)ในงานก่อสร้างจริงซึ่งเป็นระบบ 3 มิติ

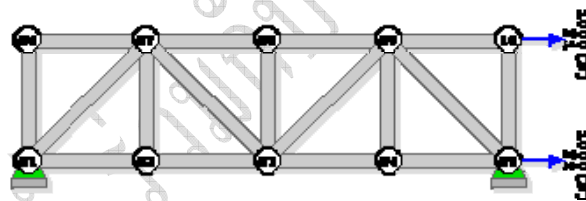
เพื่อความเข้าใจลองมาพิจารณาลักษณะของการค้ำยัน(ดูรูปที่ 1.11-1.12) รูปที่ 1.11 (ก.) และ (ค.) แสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการวางตัวของ Web & Diagonal ที่ไม่ถูกต้องและถูกต้อง(ตามลำดับ..ซึ่งเป็นการค้ำยันตามแนวยาว)เมื่อนำระบบโครงข้อหมุนมาใช้เป็นระบบค้ำยันโดยการวางตัวที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้น จะต้องมึลักษณะคล้ายๆกับการวางเท้าแขน(หรือการค้ำยันเอง) ซึ่งการวางตัวดังกล่าวนอกจากจะเป็นการช่วยค้ำยันให้โครงสร้างมีเสถียรภาพดีขึ้นแล้ว (คือ 1.ช่วยค้ำยันหรือยึดโครงข้อหมุนไม่ให้พลิก และ 2.เป็นการช่วยยึดเสาไม่ให้โยกหรือล้ม..ทั้งนี้ เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วการจำลองโครงสร้างมักกำหนดให้ฐานเสาเป็น Hinge มากกว่าเป็น Fixed เพราะว่าในการก่อสร้างจริงนั้นการที่จะทำให้เป็น Fixed แท้ๆตามที่จำลองนั้น แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยหรือถ้าต้องการทำจริงๆค่าใช้จ่ายก็ค่อนข้างสูงทีเดียว...) มันยังช่วยกระจายแรง(หรือส่งถ่ายแรง)มายังเสาด้วย(เพราะเสามีค่า Flexural Stiffness สูงกว่า...แม้ว่าเสาที่เราจำลองจะมีฐานรองรับเป็น Hinge ก็ตามแต่) รูปที่ 1.11 (ข.) เป็นการค้ำยันตามแนวขวาง ซึ่งอันที่จริงแล้วตามแนวนี้อาจไม่จำเป็นต้องมีการใส่ค้ำยันก็ได้ เพราะเรามองไว้ว่า 1.)ให้โครงข้อหมุนรับแรงในแนวตั้งทั้งหมด 2.)ส่วนเสาให้รับแรงในแนวราบทั้งหมด แต่...เรามักลืม(อาจไม่รู้หรือไม่เข้าใจก็เป็นได้) กันไปว่า การที่จะเป็นอย่างนั้นได้นั้นในขั้นตอนของการจำลองโครงสร้างเพื่อการวิเคราะห์ ที่ฐานเสาจะต้องเป็นแบบยึดแน่น(หรือ Fixed ดังรูปที่ 1.12 (ค.))เท่านั้น ไม่ใช่เป็นแบบบานพับ (Pin)อย่างที่เห็นทำๆกัน แต่ถ้าเมื่อใดเราจำลองโครงสร้างโดยให้ฐานเสาเป็นแบบบานพับ(Hinge) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงข้อหมุนเราจำเป็นต้องมีการใส่ตัวค้ำยันเข้าไปเสริมดังรูปที่ 1.11 (ข.) เสมอ แต่การใส่ค้ำยันดังกล่าวในขั้นตอนของการจำลองโครงสร้างที่ถูกต้องนั้น ก็ค่อนข้างที่จะต้องให้ความสนใจพอดูซึ่งที่ถูกต้องจะเป็นดังรูปที่ 1.12 (ข.) ไม่ใช่เหมือนดังรูปที่ 1.12 (ก.)

ส่วนการออกแบบชิ้นส่วนที่เป็นระบบค้ำยันนั้น ยังมีความเข้าใจกันคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งแท้ที่จริงแล้วอาจออกแบบเป็นชิ้นส่วนรับแรงดึงหรือแรงอัดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลผลของการวิเคราะห์โครงสร้างดังรูปข้างล่างนี้ ระบบค้ำยันดังรูปที่ 1.10(ก.) ซึ่งขึ้นรูปเป็นสามเหลี่ยมอย่างง่าย การออกแบบให้ออกแบบทั้งชิ้นส่วนที่รับแรงดึงและแรงอัด(คงไม่ใช่แค่เพียงออกแบบเป็นโครงสร้างรับแรงดึงอย่างเดียว แล้วตรวจสอบอัตราส่วนขลุ้ไม่ให้เกิน $L/300$ เท่านั้น) ส่วนระบบค้ำยันดังรูปที่ 1.10(ข.) ซึ่งขึ้นรูปเป็นสามเหลี่ยมอย่างง่ายแต่เสริมไขว้กลับด้านอีกรอบ(เราเรียกว่า Cross-Braced Truss) ซึ่งการออกแบบให้ออกแบบเฉพาะชิ้นส่วนที่รับแรงดึงเท่านั้น โดยเรากำหนดให้ชิ้นส่วนที่รับแรงดึงเป็นตัวแบกภาระอันเนื่องมาจากแรงกระทำด้านข้างทั้งหมด(100 เปอร์เซ็นต์) ชิ้นส่วนที่เหลือ(ตัวไขว้ด้านตรงข้าม)ไม่ต้องรับแรง...แต่! จะกลับมาเป็นตัวรับภาระอันเนื่องมาจากแรงกระทำด้านข้างทั้งหมด(100 เปอร์เซ็นต์)แทน...เมื่อมีแรงกระทำที่ด้านข้าง

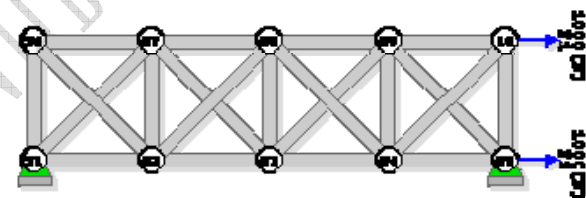
ตรงกันข้าม ซึ่งโดยปกติแล้วมักนิยมให้ใช้ขนาดเท่ากัน(ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับทางด้านความสะดวกและความสวยงามด้วย)

ในขณะที่ระบบค้ำยันที่เป็นชิ้นส่วนเดี่ยวๆ เช่น ลวดสลิงยึดในระนาบของโครงหลังคา การออกแบบเรามักออกแบบมาเพื่อให้มันดึงหรือรั้งให้โครงสร้างอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มเป็นก้อน ดังนั้นจึงออกแบบเป็นชิ้นส่วนรับแรงดึง

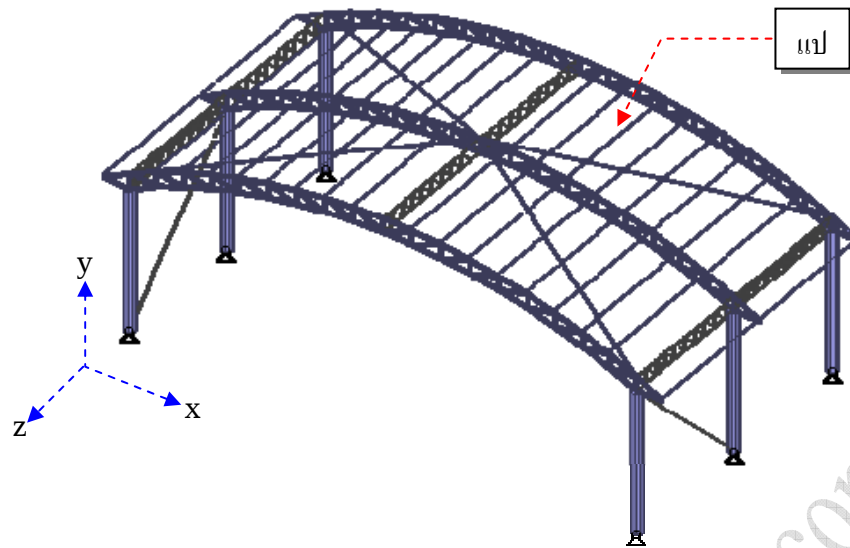
ความสัมพันธ์ของแปกับการค้ำยัน หากเรามองให้ดีจะเห็นประโยชน์ของแปมีมากกว่าที่เราคิด แปมิใช่จะมีหน้าที่รับเฉพาะวัสดุผนังหลังคาเท่านั้น หากแต่แปเองยังทำหน้าที่ ①เป็นตัวช่วยยึดโยงระหว่างโครงข้อหมุนไปยังโครงข้อหมุนที่อยู่ลึกถัดเข้าไปตามแนวแกน Z(ดูรูปที่ 1.10(ค.)ประกอบ)ให้มีเสถียรภาพ ②เป็นตัวช่วยค้ำยันชิ้นส่วนรับแรงอัด(ในที่นี้คือโครงข้อหมุนตัวบนสุดหรือก็คือ Upper Chords)ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบ X-Y ไม่ให้ยาวมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิด Bulking ของ Upper Chord ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบ X-Y ③เมื่อมีแรงมากระทำด้านข้าง(ตามแนวแกน Z) แปจะทำหน้าที่รับแรงอัดเพิ่มเติมขึ้นมานอกจากการรับแรงคดใน 2 แนวแกน(คือ X กับ Y)



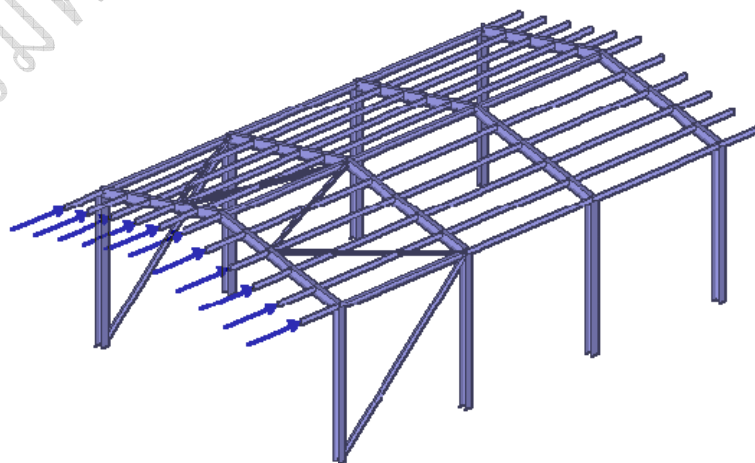
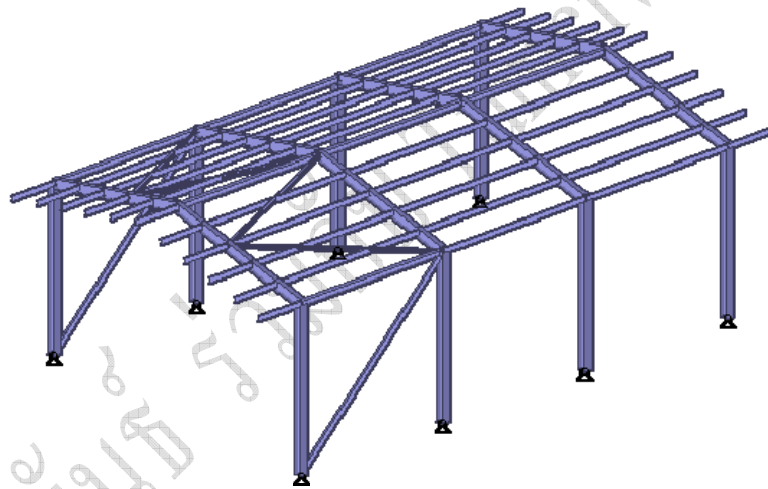
(ก.)

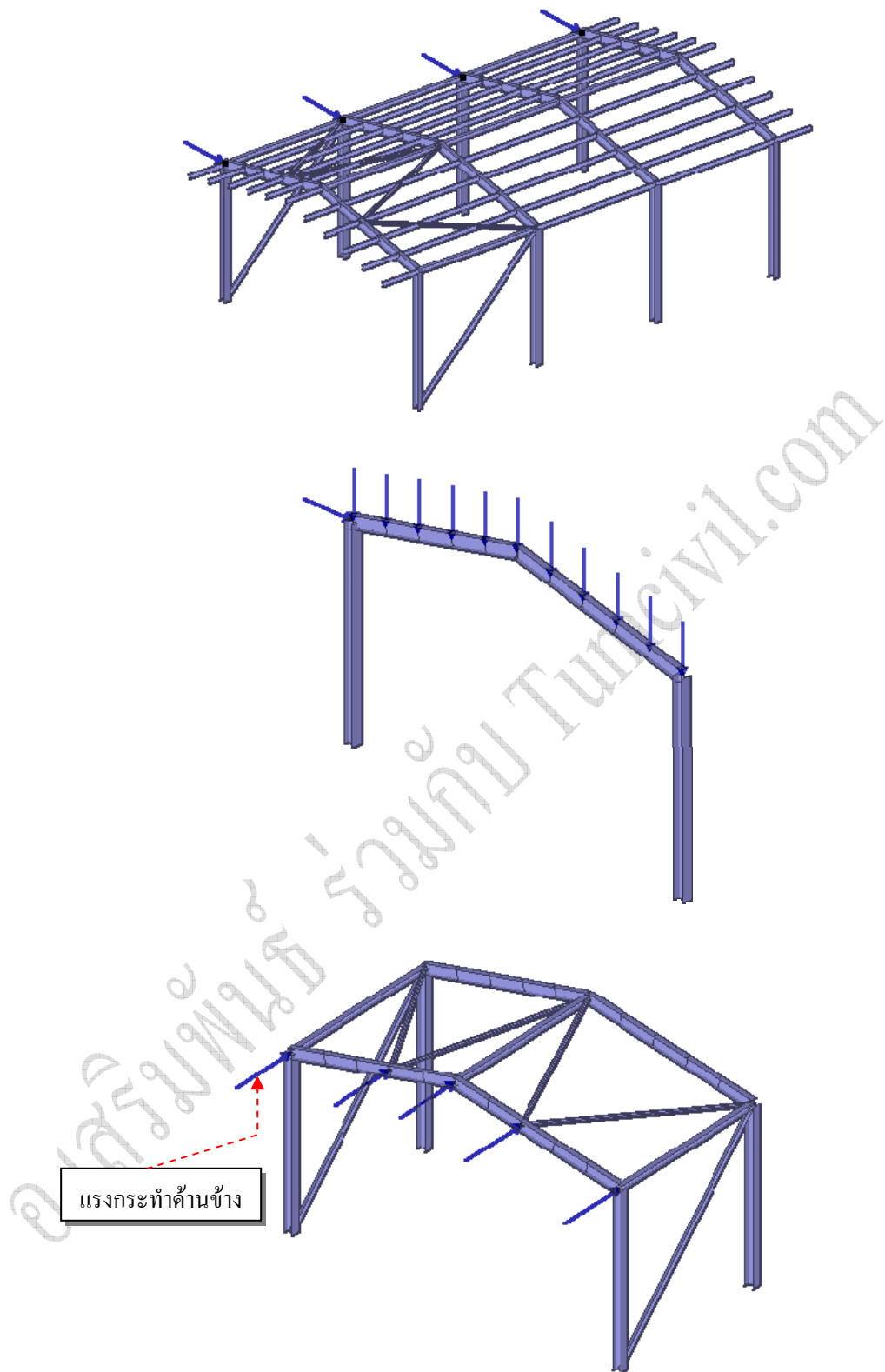


(ข.)

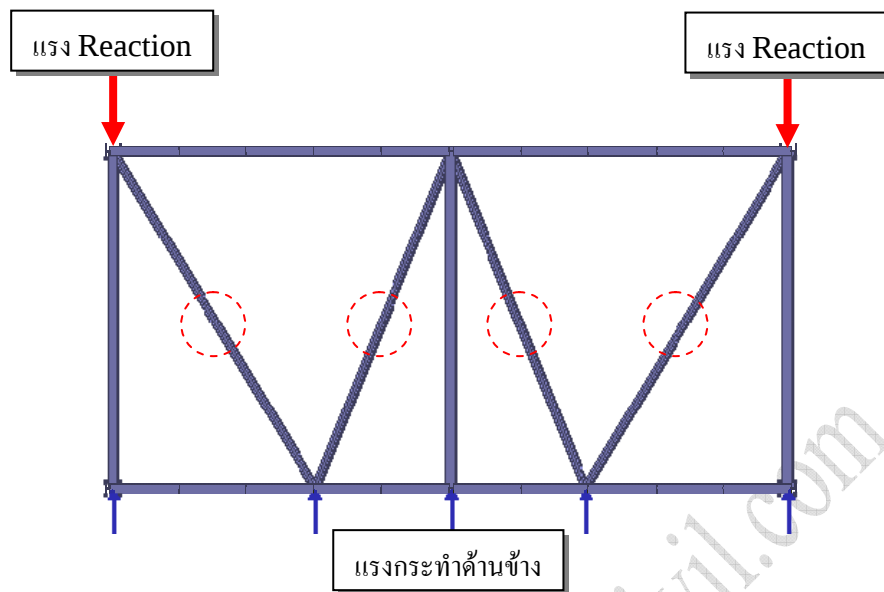


(ก.)

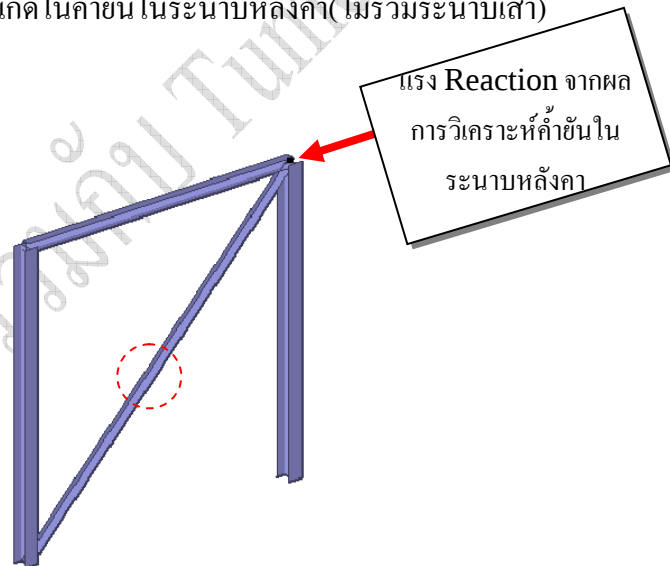




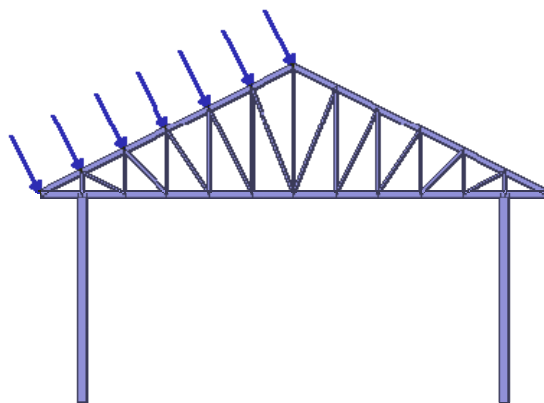
ค้ำยันในระนาบหลังคา และในระนาบเสา

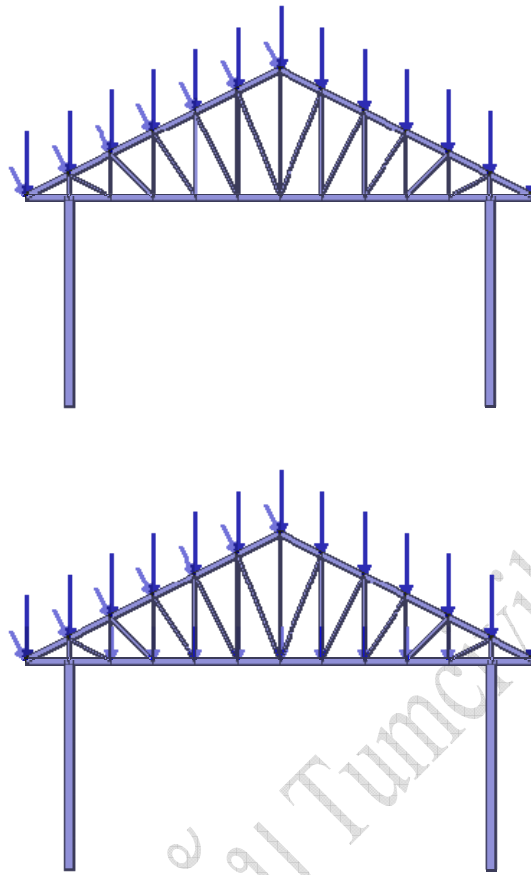


รูปวิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันในระนาบหลังคา(ไม่รวมระนาบเสา)

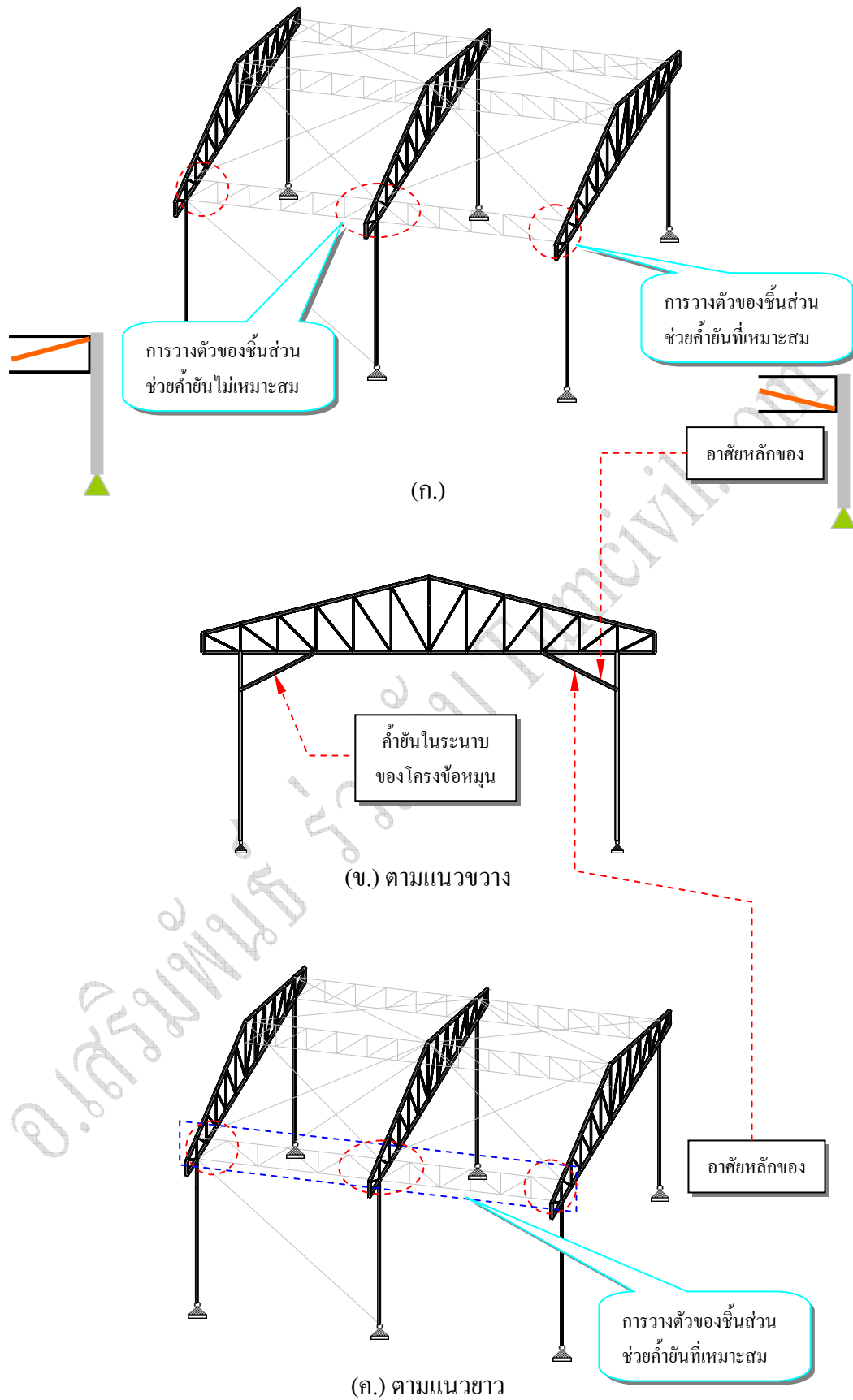


รูปวิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันในระนาบเสา

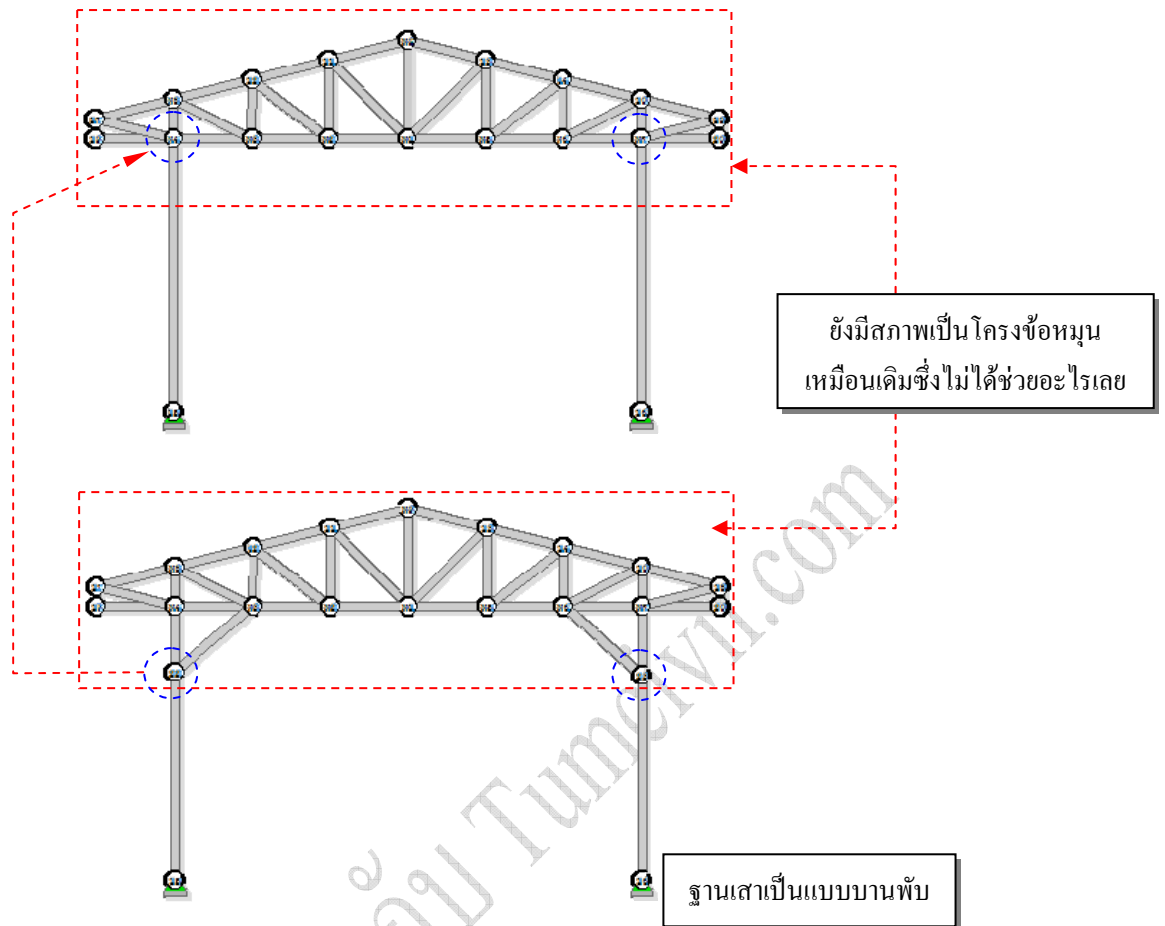




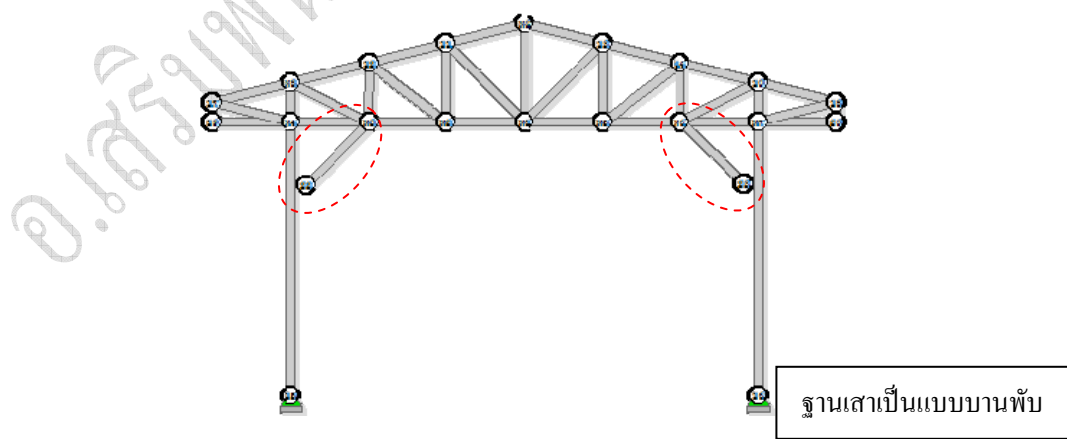
รูปที่ 1.10



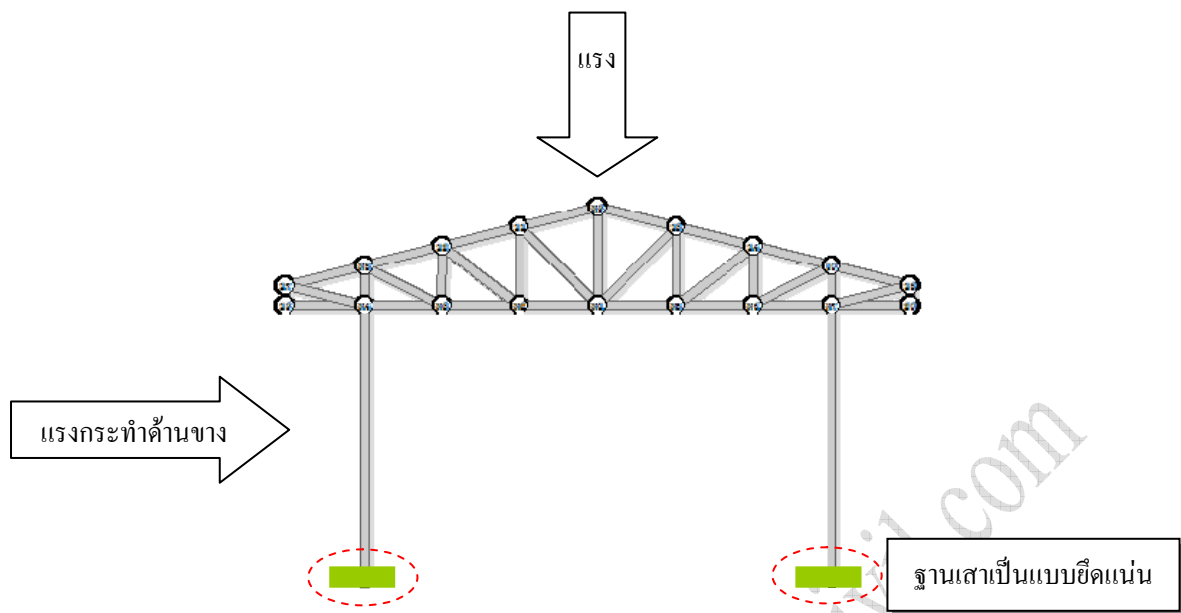
รูปที่ 1.11 การยึดหรือค้ำยันโครงข้อหมุนเข้ากับโครงสร้างหลักอื่นๆ



(ก.) เสาไม่แข็งแรง (เนื่องจากฐานเป็นแบบบานพับ) จึงต้องเสริมด้วยเท้าแขน... ซึ่งจำลองโครงสร้างไม่ถูกต้อง



(ข.) เสาไม่แข็งแรง (เนื่องจากฐานเป็นแบบบานพับ) จึงต้องเสริมด้วยเท้าแขน... ซึ่งจำลองโครงสร้างถูกต้อง

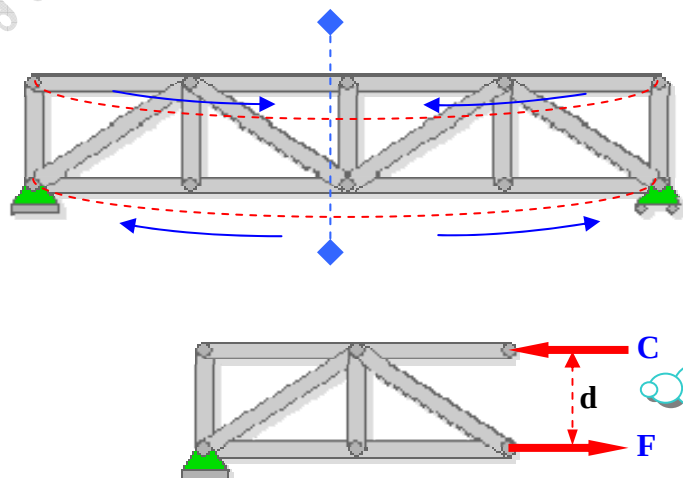


(ค.) เสาแข็งแรง (เนื่องจากฐานเป็นแบบยึดแน่น) จึงไม่จำเป็นต้องเสริมด้วยเท้าแขน... ซึ่งเสาจะทำหน้าคล้ายๆ กับคานยื่น

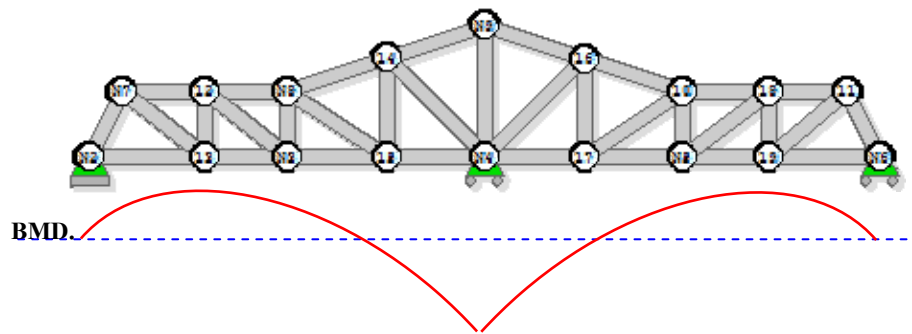
รูปที่ 1.12 การยึดหรือค้ำยัน โครงข้อหมุนเข้ากับโครงสร้างหลักอื่นๆ

⑤ วิธีการในการวิเคราะห์โครงข้อหมุน : ในระนาบ..... (ยังไม่สมบูรณ์)

1. การตั้งแกนอ้างอิง
2. วิธีการตามทฤษฎี
3. วิธีการโดยประมาณ (ให้มองโครงข้อหมุนเสมือนเป็นคานลิก)



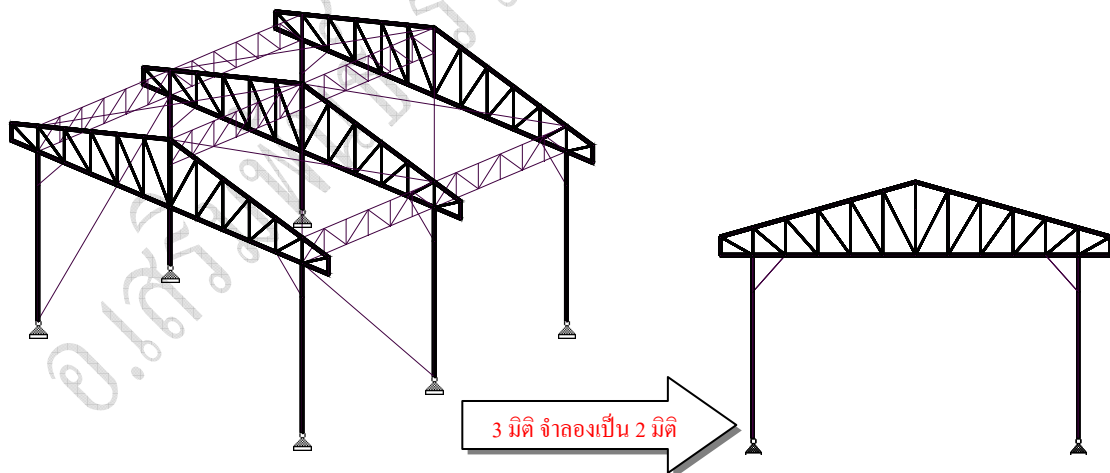
เกิดโมเมนต์คู่
ความมั่งคั่งเท่ากับ
 $Cd = Fd$



รูปที่ 1.13

⑥ การสร้างโมเดลเพื่อการวิเคราะห์ :(ยังไม่สมบูรณ์)

1. ด้านน้ำหนักที่กระทำ
2. ด้านรูปทรงทางเรขาคณิต(เมื่อไหร่จะเป็น Plane เมื่อไหร่จะเป็น 3 มิติ)
3. ข้อพึงระวัง ใน 2 มิติการวิเคราะห์บอกว่ามีสมดุลย์ แต่ในขณะที่ก่อสร้างจะเป็น 3 มิติ จึงไม่สมดุลย์ในแนวแกน Z หากไม่มีการค้ำยันก่อนอาจนำมาสู่การวิบัติได้

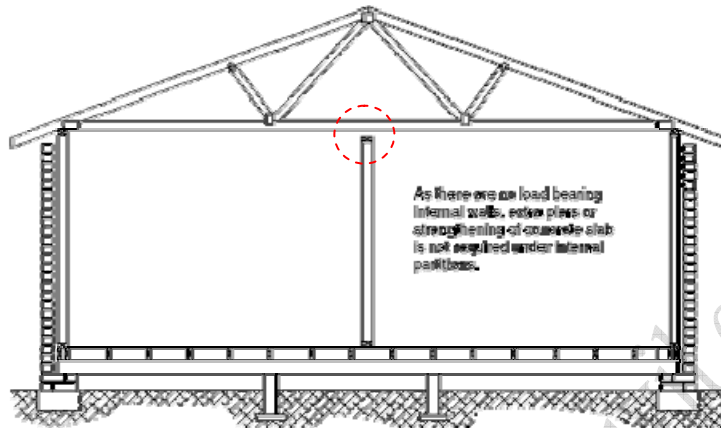


รูปที่ 1.14

⑦ การออกแบบ.....(ยังไม่สมบูรณ์)

1. การพิจารณาผลจากการวิเคราะห์เพื่อนำไปออกแบบ
2. การออกแบบ

- 3.การยกเพื่อการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง
- 4.ผลที่เกิดกรณียกติดตั้งและก่อผนังมาชนท้องโครงข้อหมุน



หนังสืออ้างอิง

เสริมพันธุ์ เอี่ยมจะบก, 2545. เอกสารประกอบการสอนการออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.

วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย, 2538. แนวโน้มและการพัฒนาโครงสร้างเหล็กในประเทศไทย. โยธาสาร. 2538.

คณะอนุกรรมการสาขาโครงสร้างเหล็ก, 2540. เอกสารอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่องการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ. , โรงแรมสุโขทัย.

Stanley W. Crawley and M. Arch , Steel Buildings Analysis And Design , 2nd Ed. , Jhon Wiley & Sons , New York , 1977

Jack Stroud Foster & Raymond Harington , Structure & Fabric , 6th Ed. , Longman , England , 2000

Steel Design Handbook : LRFD Method , Akbar R. Tamboli , 1st Ed. , McGraw-Hill , New York , 1997

William T. Segui , LRFD Steel Design , 2nd , PWS Publishing , 1999

T J MacGinley & T C Ang , Structure Steelwork : Design to Limit State Theory , 2nd , BH , London , 1992

W.F.Chen , Handbook of Structural Engineering , 1st , CRC , New York , 1997

Daniel L. Schodek , Structures , 5th , Prentice-Hall , , New Jersey , 2004

Jack C. McCormac , Structural Steel Design : ASD Method , 4th , HarperCollinsPublishers , New York , 1992