

การจำลองพฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็น

Modeling Axial Compression Behavior of Cold-Formed Steel Sections

กษิต์เดช ลีลาสุขารมย์ (Kasidet Leelasukharom)* ธันยดา พรรณเชษฐ์ (Tanyada Pannachet)^{1**}

เมธี บุญพิเชฐวงศ์ (Maetee Boonpichetvong)**

(Received: June 21, 2021; Revised: August 8, 2021; Accepted: August 26, 2021)

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการศึกษาการจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นเมื่อรับแรงตามแนวแกนด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีความกว้างประสิทธิผล ชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นในการศึกษาประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหน้าตัดรูปตัวซีและรูปตัวซีขอบเม้มซึ่งมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการอยู่แล้ว ผลการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยค่าแรงกระทำสูงสุดที่ชิ้นส่วนรับได้และพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่เกิดขึ้นในระหว่างการให้แรง ซึ่งให้เห็นว่าความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น ทั้งในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป พฤติกรรมการโก่งเดาะจนไปถึงลักษณะของการวิบัติ โดยหากทำการพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมกับการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้พฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

ABSTRACT

This paper was conducted in order to investigate behavior of cold-formed steel members under axial compression loading using the finite element analysis. The numerical results were compared with the results from some existing laboratory experiments and the predicted load from the effective width method. The samples consisted of the channel sections and the lipped channel sections for which the laboratory test results were available. The numerical results, including the axial compression capacity of the samples and their mechanical behavior during the loading, indicated that geometric imperfection affected the nonlinear behavior, the buckling modes and the failure patterns of the cold-formed steel sections. Applying effect of geometric imperfection in the nonlinear finite element analysis could provide the more realistic behavior of the axially loaded cold formed steel sections.

คำสำคัญ: เหล็กขึ้นรูปเย็น แรงอัดตามแนวแกน ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต

Keywords: Cold-formed steel, Axial compression, Geometric imperfection

¹Corresponding author: tanpan@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

วัสดุเหล็กขึ้นรูปเย็นเริ่มถูกนำมาใช้มากขึ้นในงาน โครงสร้างรับแรง อาคารที่ก่อสร้างจากเหล็กขึ้นรูปเย็นสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว วิศวกรสามารถออกแบบและเตรียมชิ้นส่วนจากโรงงาน ทำให้สะดวกต่อการนำไปติดตั้งที่หน้างาน อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างได้ดี โดยไม่ได้จำเป็นต้องใช้แรงงานในการก่อสร้างจำนวนมากเหมือนงานก่อสร้าง โครงสร้างประเภทอื่นๆ

หน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นมักมีความบาง ทำให้พฤติกรรมการรับแรงของหน้าตัดมีความแตกต่างไปจากหน้าตัดของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กหรือเหล็กรูปพรรณโดยทั่วไป รวมทั้งยังมีพฤติกรรมรับแรงหลังการ โกงเดาะ (Post buckling behavior) ในปัจจุบันการวิเคราะห์หาความสามารถของหน้าตัด โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นเพื่อใช้ในการออกแบบสามารถทำได้หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธีกำลังตรง (Direct strength method) [1] วิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective width method) [2] และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) [3-8] สองวิธีแรกสามารถให้ค่าแรงสูงสุดที่หน้าตัดสามารถรับได้เท่านั้น ต่างจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุร่วมด้วยได้ อย่างไรก็ตาม การทำนายพฤติกรรมของเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นยังต้องการองค์ความรู้หลายอย่างที่ช่วยให้การวิเคราะห์ผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ส่งผลให้พฤติกรรมของวัสดุเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงบนวัสดุนั้นคือ ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต (Geometric imperfection) [9-16] ซึ่งเกิดจากการเสีรูบบนหน้าตัดและตามความยาวของวัสดุที่มีความบางและชะลูด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของวัสดุเหล็กขึ้นรูปเย็นผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย ไม่พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย อาจส่งผลให้พฤติกรรมและกำลังสูงสุดที่รับได้ของวัสดุนั้นเกิดความคลาดเคลื่อนจากผลทดสอบได้

บทความนี้นำเสนอถึงการศึกษการจำลองพฤติกรรมของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นภายใต้แรงอัดตามแนวแกนผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูบและน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น เมื่อมีการพิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย โดยผลการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและการคำนวณโดยวิธีความกว้างประสิทธิผล ซึ่งเป็นวิธีคำนวณที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กขึ้นรูปเย็นของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [17]

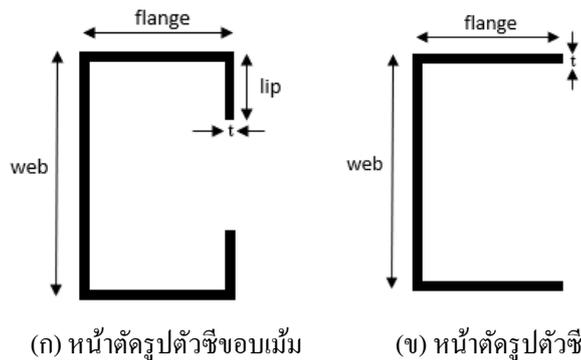
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษการจำลองพฤติกรรมของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนเมื่อ ไม่พิจารณาและพิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผลที่ได้กับสมการทำนายกำลังตามมาตรฐานการออกแบบของประเทศไทย และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยที่มีอยู่

รายละเอียดชิ้นส่วนเสาที่ใช้ในการศึกษา

ชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยหน้าตัดสองชนิดคือน้ำตัดรูปตัวซีธรรมดาและหน้าตัดรูปตัวซีขอบเม้ม ดังรูปที่ 1 ความหนาของชิ้นส่วนอยู่ระหว่าง 0.95-1.95 มิลลิเมตร รวมจำนวนทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง ในการศึกษาได้จัดกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง S ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนที่มีความสูงระหว่าง 150 – 320 mm และกลุ่มตัวอย่าง L ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่มีความสูง 2850 mm ขนาดของชิ้น

ตัวอย่างและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 สำหรับกลุ่มตัวอย่าง S และกลุ่มตัวอย่าง L ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เลือกมาในการศึกษานี้ มีผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการในงานวิจัยที่มีอยู่แล้ว (อ้างอิงงานวิจัย [18, 19]) ลักษณะการติดตั้งการทดสอบในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการให้แรงตามแนวแกน โดยที่ชิ้นส่วนทดสอบจะถูกยึดครั้งที่ปลายทั้งสองข้าง และกดให้ปลายบนมีการเคลื่อนที่ลง จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า การโก่งเดาะที่พบในกลุ่มตัวอย่าง S เป็นการโก่งเดาะแบบเฉพาะส่วน (local buckling) เท่านั้น ซึ่งต่างจากรูปแบบการโก่งเดาะที่พบในกลุ่มตัวอย่าง L ซึ่งมีการโก่งเดาะแบบเสี้ยวรูป (distortional buckling) และการโก่งเดาะตามยาว (global buckling) เพิ่มเติมขึ้นมาอีกด้วย



ภาพที่ 1 ลักษณะของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นในการศึกษา

ตารางที่ 1 คุณสมบัติหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นแบบสั้น [18]

ตัวอย่าง	หน้าตัด	คุณสมบัติทางเรขาคณิต					คุณสมบัติเชิงกล	
		H (mm)	B (mm)	D (mm)	t (mm)	L (mm)	E (MPa)	F _y (MPa)
S1	ตัวซีขอบเม้ม	62.95	27.65	9	0.95	190	205000	615
S2	ตัวซีขอบเม้ม	98	38	15	1.90	280	206000	515
S3	ตัวซีขอบเม้ม	120	40.25	16	1.95	320	188000	271
S4	ตัวซีขอบเม้ม	60	30	9	0.95	190	200000	320
S5	ตัวซี	48	49	-	1.88	260	206000	515
S6	ตัวซี	25	25	-	0.95	150	205000	615
S7	ตัวซี	25	25	-	0.95	150	200000	320

ตารางที่ 2 คุณสมบัติหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นแบบยาว [19]

ตัวอย่าง	หน้าตัด	คุณสมบัติทางเรขาคณิต					คุณสมบัติเชิงกล	
		H (mm)	B (mm)	D (mm)	t (mm)	L (mm)	E (MPa)	F _y (MPa)
L1	ตัวซีขอบเม้ม	81	78	12	1.11	2850	211000	342
L2	ตัวซีขอบเม้ม	75	65	11	1.11	2850	211000	342
L3	ตัวซีขอบเม้ม	72.4	59.2	11	1.11	2850	211000	342

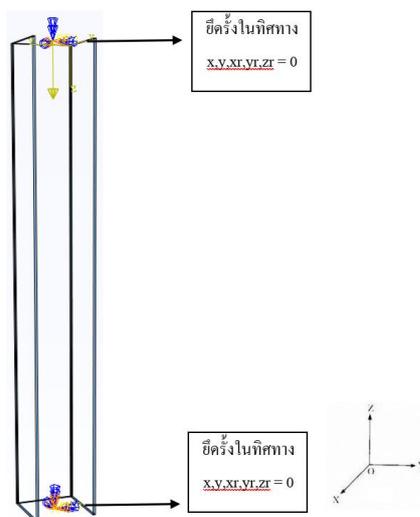
การจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วน

ในงานวิจัยนี้ พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของชิ้นตัวอย่างเหล็กขึ้นรูปเย็นได้ถูกจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ชิ้นส่วนแบบเปลือกบาง (Shell element) แบบ 4 จุดต่อ โดยให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นไปตามเงื่อนไขการครากแบบพอน-มิสเสส (Von-Mises yield criterion) เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การให้แรงกระทำจะเป็นที่ตำแหน่งปลายเสาและการยึดรั้งชิ้นส่วนจะเป็นแบบยึดรั้งทุกทิศทางที่ทุกจุดต่อบนปลายบนและปลายล่าง นั่นคือ ปลายทั้งสองของชิ้นส่วนถูกยึดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่และการหมุน โดยยอมให้ปลายบนสามารถเคลื่อนที่ลงได้เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2

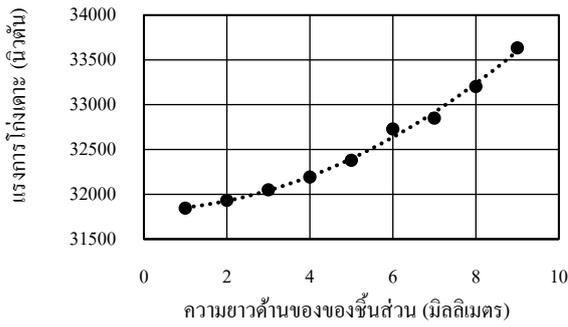
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาประกอบไปด้วย 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์การโก่งคาะแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic buckling analysis) เพื่อหาลักษณะการโก่งคาะของชิ้นส่วนและน้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งคาะ ที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ต่อในส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear analysis) เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปตามแนวแกน รวมถึงค่าแรงกระทำสูงสุดที่ชิ้นส่วนรับได้ การจำลองในส่วนนี้จะใช้การควบคุมการเสียรูป (Displacement control) โดยให้ทุกจุดบนหน้าตัดส่วนปลายบนเคลื่อนที่ลงเท่ากัน

เนื่องจาก การแบ่งชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลต่อความแม่นยำของผลการวิเคราะห์และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาขั้นต้นเพื่อหาขนาดชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม จากภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4 พบว่าเมื่อแบ่งพื้นที่วิเคราะห์เป็นชิ้นส่วนขนาดที่เล็กลง ค่าแรงโก่งคาะตามลักษณะการเสียรูปโหมดที่ 1 จะมีความลู่เข้าสำหรับการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ขนาดของชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ 3×3 มิลลิเมตร ซึ่งน่าจะสามารถทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ ในขณะที่ไม่ได้ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากเกินไป

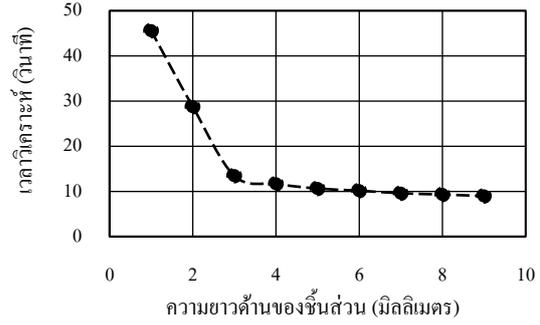
ในการพิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์การโก่งคาะในแต่ละโหมดจะถูกนำไปป้อนเข้าในขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ ซึ่งสำหรับในแต่ละโหมดจะมีตัวแปรคุณลักษณะการเสียรูป (Imperfection sensitivity) ที่แตกต่างกัน [14-16] โดยความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตจะถูกรวมตัวกันแบบสเปกตรัมแบบ 1 มิติ (1D Spectra approach) [16]



ภาพที่ 2 การจำลองลักษณะทางเรขาคณิตชิ้นตัวอย่างและการยึดรั้งในการศึกษานี้



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงโก่งเคาะใน
 โหมดที่ 1 และขนาดของไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการ
 วิเคราะห์และขนาดของไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การโก่งเคาะ

การวิเคราะห์การโก่งเคาะของชิ้นตัวอย่างในกลุ่มตัวอย่าง S และกลุ่มตัวอย่าง L ทำให้ได้ค่าแรงวิกฤตดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ในตารางดังกล่าวได้นำเสนอข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงวิกฤตที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยที่มีอยู่ [18-19] (P_{cr}^{EXP}), ค่าแรงวิกฤตที่คำนวณได้จากวิธีความกว้างประสิทธิผลที่กำหนดไว้ในมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [17] (P_{cr}^{EWM}) และค่าแรงวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (P_{cr}^{FEM})

ในตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์การโก่งเคาะโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นตัวอย่างทั้ง 7 ตัวอย่างในกลุ่มตัวอย่าง S แสดงให้เห็นถึงการโก่งเคาะเพียงโหมดเดียวคือ การโก่งเคาะแบบเฉพาะส่วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยวิธีความกว้างประสิทธิผลที่พบว่า การโก่งเคาะที่เกิดขึ้นโหมดแรกคือการโก่งเคาะแบบเฉพาะส่วน อย่างไรก็ตาม ค่าแรงวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าที่คำนวณได้จากวิธีความกว้างประสิทธิผลมีความแตกต่างกันจากการสังเกตพบว่า สำหรับชิ้นตัวอย่างที่มีหน้าตัดรูปตัวซีขอบมน ค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากวิธีความกว้างประสิทธิผล ซึ่งกลับกันในกรณีของชิ้นตัวอย่างที่มีหน้าตัดรูปตัวซี

ตารางที่ 3 ค่าแรงวิกฤตเนื่องจากการโก่งเคาะของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น ในกลุ่มตัวอย่าง S

ชิ้น ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ (kN)		วิธีความกว้างประสิทธิผล		วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
	P_{cr}^{EXP} (kN)	การโก่งเคาะ	P_{cr}^{EWM} (kN)	การโก่งเคาะ	P_{cr}^{FEM} (kN)	การโก่งเคาะ
S1	-	Local	22.58	Local	32.05	Local
S2	-	Local	109.48	Local	159.00	Local
S3	-	Local	84.01	Local	121.26	Local
S4	-	Local	24.64	Local	34.17	Local
S5	-	Local	36.04	Local	32.50	Local
S6	-	Local	12.03	Local	8.86	Local
S7	-	Local	11.13	Local	8.64	Local

สำหรับกลุ่มตัวอย่าง L ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นค่าแรงวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะ ทั้ง 3 โหมด เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นอันดับแรก (ดังแสดงในตารางที่ 4) กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ลักษณะของการโก่งเดาะที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างจากลักษณะที่ได้จากวิธีความกว้างประสิทธิผล ทั้งนี้ การเปรียบเทียบค่าแรงวิกฤตของทั้งสองวิธีข้างต้นไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลในห้องปฏิบัติการได้ เนื่องจากงานวิจัย [19] ไม่ได้นำเสนอค่าแรงโก่งเดาะ แต่มีเพียงรูปแบบของการโก่งเดาะเท่านั้น

ตารางที่ 4 ค่าแรงวิกฤตเนื่องจากการโก่งเดาะของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น กลุ่มตัวอย่าง L

ชิ้น ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ (kN)		วิธีความกว้างประสิทธิผล		วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*	
	P_{cr}^{EXP} (kN)	การโก่งเดาะ	P_{cr}^{EWM} (kN)	การโก่งเดาะ	P_{cr}^{FEM} (kN)	การโก่งเดาะ
L1	-	Distortional + Global	32.23	Local	42.21	Distortional
L2	-	Distortional + Global	40.80	Local	46.79	Distortional
L3	-	Distortional + Global	46.00	Local	51.36	Distortional

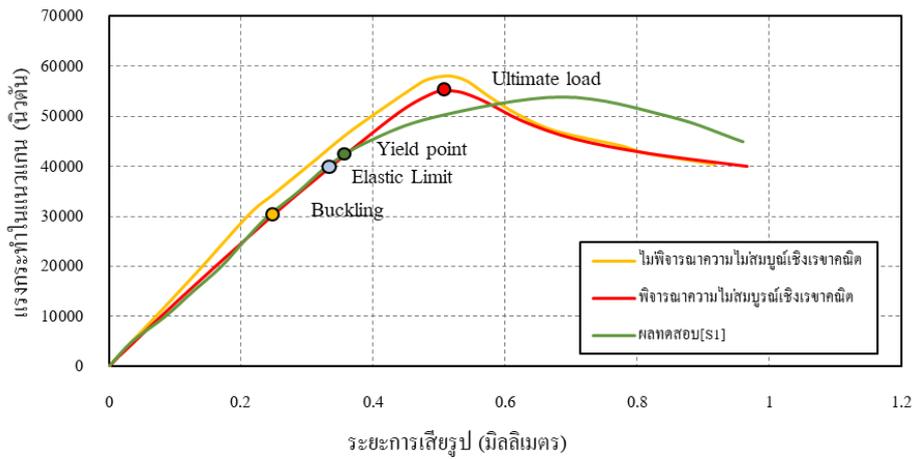
หมายเหตุ * ค่าแรงวิกฤตที่การโก่งเดาะที่เกิดขึ้นอันดับแรก

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

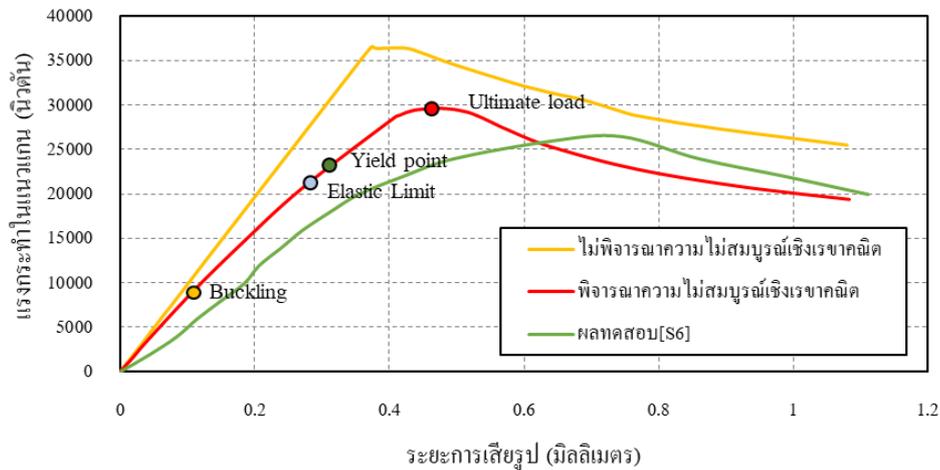
ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น พฤติกรรมของวัสดุไดถูกกำหนดให้เป็นไปตามเงื่อนไขการครากฟอน-มิสเชส และมีการใส่ผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตเข้าไปในแบบจำลองด้วย เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างคล้ายคลึงกันในกลุ่มตัวอย่างและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ข้อมูลจำกัด [18-19] ผลการวิเคราะห์ของชิ้นตัวอย่างเพียง 4 ชิ้น จึงถูกนำเสนอในภาพที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสียรูปที่เกิดขึ้นตามแนวแกนที่ตำแหน่งแรงกระทำ โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งแบบที่ไม่พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต และแบบที่มีการพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย

จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า การพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วยในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของชิ้นตัวอย่างในกลุ่มตัวอย่าง L ที่แสดงว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังพบว่า เมื่อมีการใส่ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตในโหมดอื่น ๆ ร่วมด้วยในชิ้นตัวอย่าง L2 และ L3 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความใกล้เคียงกับผลทดสอบมากขึ้นอีก (ดูภาพที่ 7 และภาพที่ 8)

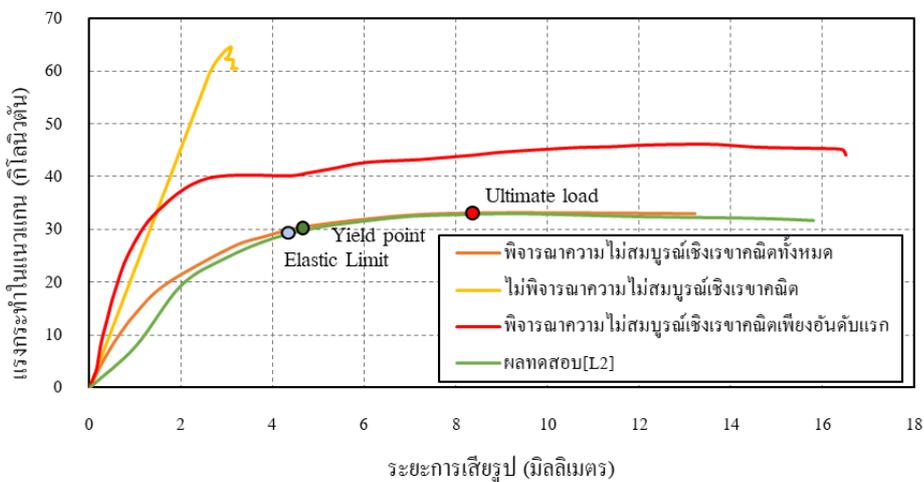
ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับชิ้นตัวอย่างในการศึกษากลุ่ม S และ กลุ่ม L ตามลำดับ โดยได้นำเสนอข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบในงานที่มีอยู่ [18-19] (P_u^{EXP}) ค่าแรงกระทำสูงสุดที่คำนวณได้จากวิธีความกว้างประสิทธิผลที่กำหนดไว้ในมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [17] (P_u^{EWM}) และค่าแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้มาจาก 3 กรณี ได้แก่ ค่ากำลังสูงสุดที่ไม่พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต (P_u^{FEM0}) ค่ากำลังสูงสุดที่พิจารณาผลความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตเพียงโหมดแรก (P_u^{FEM1}) และค่ากำลังสูงสุดที่พิจารณาผลความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตทั้งสามโหมด (P_u^{FEM3})



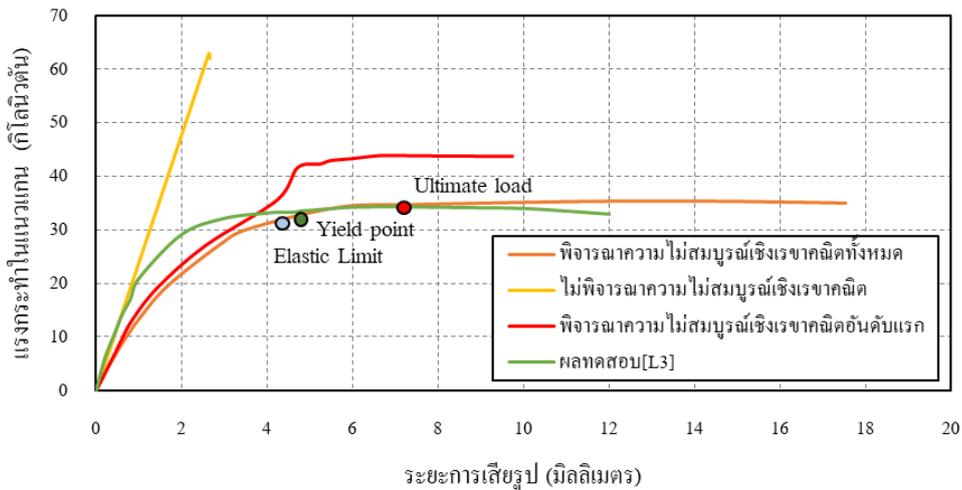
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสี้ยวรูปตามแนวแกนของชิ้นตัวอย่าง S1



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสี้ยวรูปตามแนวแกนของชิ้นตัวอย่าง S6



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสี้ยวรูปตามแนวแกนของชิ้น L2



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสียรูปตามแนวแกนของชิ้น L3

ตารางที่ 5 ค่าแรงกระทำสูงสุดในชิ้นตัวอย่าง กลุ่ม S

ชิ้นตัวอย่าง	แรงกระทำสูงสุด (kN)			
	P_u^{EXP}	P_u^{EWM}	P_u^{FEM0}	P_u^{FEM1}
S1	53.95	49.16	58.02	55.08
S2	151.30	149.37	168.20	162.21
S3	102.04	95.32	117.11	105.32
S4	37.09	33.35	36.11	32.55
S5	96.89	87.10	115.01	98.51
S6	26.50	25.51	36.65	29.64
S7	16.83	15.69	22.61	17.10

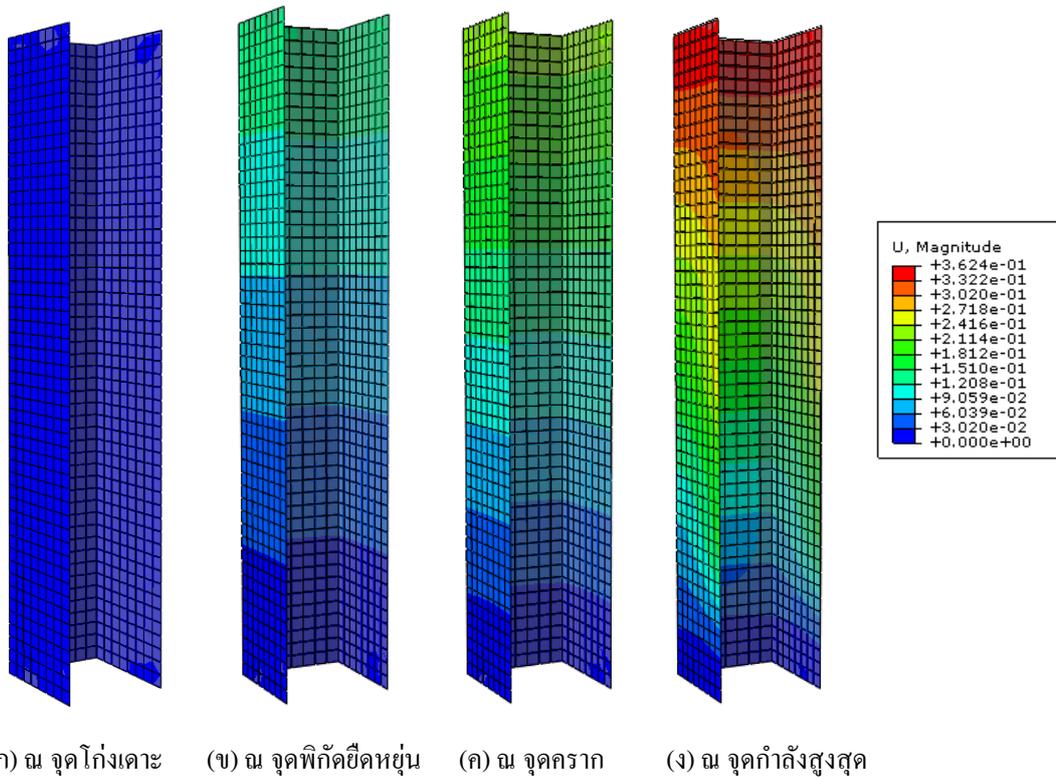
ตารางที่ 6 ค่าแรงกระทำสูงสุดในชิ้นตัวอย่าง กลุ่ม L

ชิ้นตัวอย่าง	แรงกระทำสูงสุด (kN)				
	P_u^{EXP}	P_u^{EWM}	P_u^{FEM0}	P_u^{FEM1}	P_u^{FEM3}
L1	30.37	31.58	60.97	44.03	30.01
L2	31.31	32.75	63.75	45.92	34.91
L3	34.45	33.37	62.97	44.75	35.90

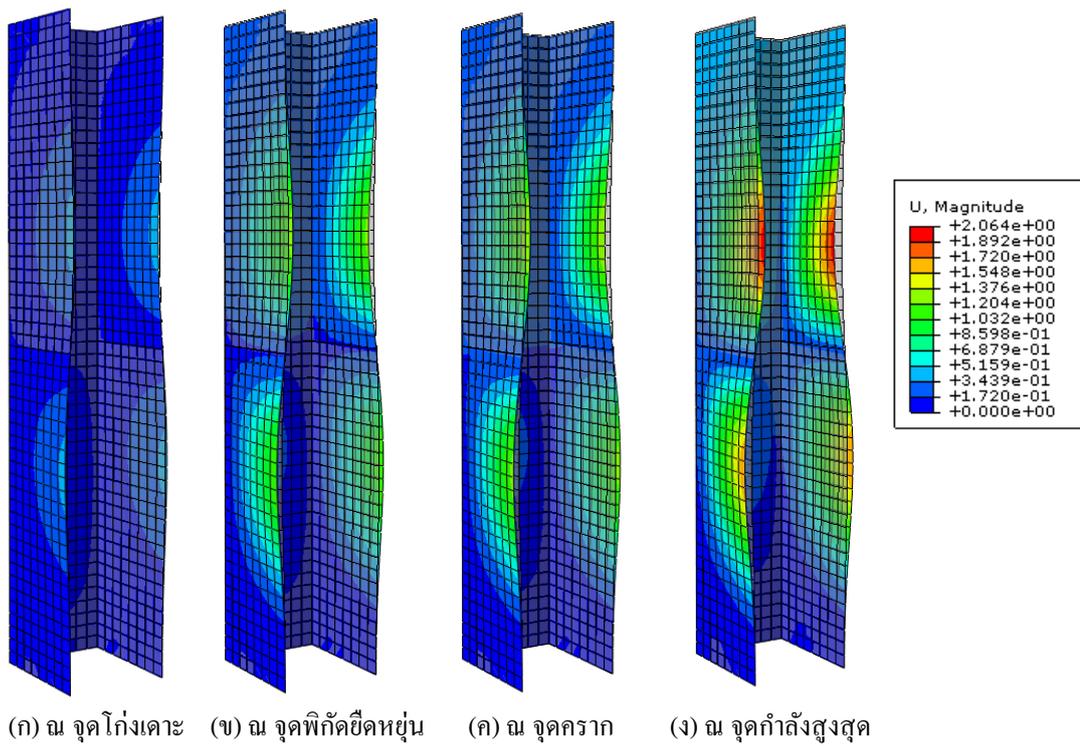
เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากวิธีความกว้างประสิทธิภาพกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ค่าแรงสูงสุดที่ได้จากวิธีความกว้างประสิทธิภาพค่อนข้างจะมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในทางอนุรักษ์นิยม นั่นคือมีค่าที่ใกล้เคียงแต่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบ ในขณะที่ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ และมีค่าสูงเป็นพิเศษในกลุ่มตัวอย่าง L เมื่อไม่ได้พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตในแบบจำลอง จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า ค่าแรง

สูงสุดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกลุ่มตัวอย่าง L นั้นมีค่าสูงเป็นสองเท่าโดยประมาณของค่าที่ได้จากการทดสอบ และการคำนวณวิธีความกว้างประสิทธิผล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตอันดับแรก ร่วมด้วยในการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าค่าแรงกระทำสูงสุดที่ได้จะมีค่าต่ำลง และเมื่อวิเคราะห์ผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตที่พบทั้งหมดร่วมด้วย พบว่าแรงกระทำสูงสุดใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบและวิธีความกว้างประสิทธิผล ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นความสำคัญของการใส่ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วยในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

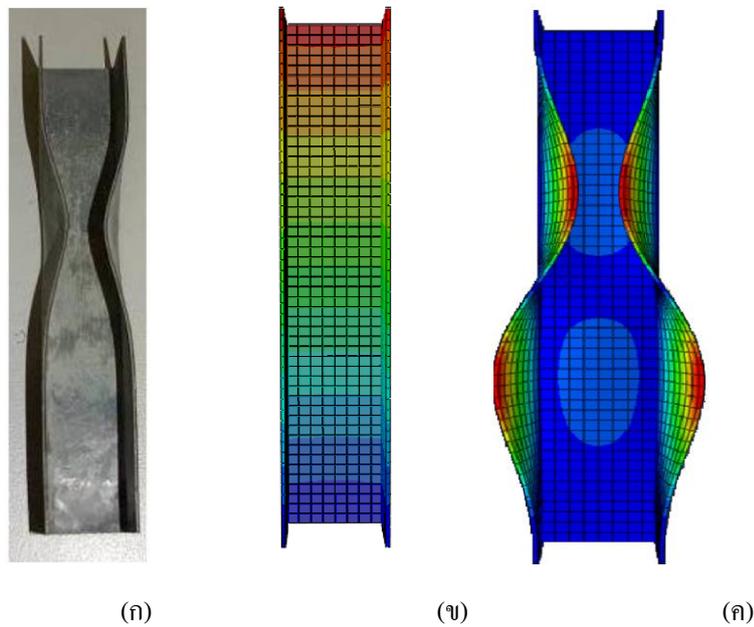
การพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้พฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นส่วนมีความแตกต่างจากในกรณีที่ไม่ใส่ความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาการเสียรูปของชิ้นตัวอย่าง S6 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ลักษณะของการเสียรูปที่ ณ จุดสำคัญต่างๆ อันได้แก่ จุดที่หน้าตัดเกิดการโก่งเดาะ จุดพีกัดยึดหย่อน จุดครากของวัสดุ และจุดที่แรงกระทำสูงสุด ของทั้งสองกรณีข้างต้นจะเป็นไปดังภาพที่ 9 และภาพที่ 10 โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะของการเสียรูป ณ แรงสูงสุดในกรณีที่มีการพิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ดูภาพที่ 11)



ภาพที่ 9 การเสียรูปของชิ้นส่วน S6 เมื่อไม่ได้พิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย



ภาพที่ 10 การเสีรูปของชิ้นส่วน S6 เมื่อพิจารณาความไม่สมบรูณ์เชิงเรขาคณิตร่วมด้วย



ภาพที่ 11 การเสีรูปของชิ้นส่วน S6 ณ ตำแหน่งการวิบัติ (ก) ผลการทดสอบ (ข) ผลไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ไม่พิจารณาความไม่สมบรูณ์เชิงเรขาคณิต (ค) ผลไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาความไม่สมบรูณ์เชิงเรขาคณิต

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นเมื่อรับแรงตามแนวแกนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. จากผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะ พบว่า ลักษณะการโก่งเดาะที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีความกว้างประสิทธิภาพ มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ค่าแรงกระทำโก่งเดาะสำหรับหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นรูปตัวซีและรูปตัวซีขอบมนที่ได้จากสองวิธีมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากทั้งวิธีอยู่บนพื้นฐานของหลักการคนละแบบ วิธีความกว้างประสิทธิภาพใช้หลักการสร้างสมมติฐานอย่างง่าย ในขณะที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้หลักการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข

2. ค่าความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ได้จากวิธีความกว้างประสิทธิภาพและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพจะค่อนข้างให้ผลในทางอนุรักษ์นิยม หรือมีค่าที่ใกล้เคียงแต่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบ ในขณะที่ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ

3. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเหล็กขึ้นรูปเย็นภายใต้แรงตามแนวแกน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกันในกรณีที่มีการพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตและในกรณีที่ไม่ได้พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ชิ้นส่วนมีความยาว ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าแรงสูงสุดอาจมีค่าต่างกันถึงสองเท่า การพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต ทำให้ลักษณะพฤติกรรมการรับแรงและการเสียรูปของชิ้นส่วนมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากพิจารณารูปแบบการโก่งเดาะในโหมดที่สูงขึ้นร่วมด้วย นอกจากนี้ หากคิดผลของความเค้นคงค้างร่วมด้วยอาจส่งผลให้ผลที่ได้รับใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโครงการจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. American Iron and Steel Institute. Supplement 2004 to the North American specification for the design of cold formed steel structure members, Design of cold-formed steel structural members using direct strength method. Washington: USA; 2004.
2. American Iron and Steel Institute. Specification for the cold-formed steel structural member (AISI 2007). Washington, USA; 2007.
3. Chou SM, Chai GB, Ling L. Finite element technique for design of stub columns. Thin-walled structure. 2000; 37(2): 97-112.
4. Gardner L, Nethercot DA. Numerical modeling of stainless steel structural components. Journal of Structural Engineering. 2004; 130(10): 1586-1601.
5. Camotin D, Silvestre N, Dinis PB. Numerical analysis of cold-formed steel members. International Journal of Steel Structure. 2005; 5(1): 63-78.



6. Ashraf M, Gardner L, Nethercot DA. Finite element modelling of structural stainless steel cross-sections. Thin-walled structures. 2007; 44(10): 1048-1062.
7. Dinis PB, Camotim D, Silvestre N. FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns. Computers and structure. 2007; 85(19-20): 1461-1474.
8. Schafer BW, Li Z, Moen CD. Computational modeling of cold-formed steel. Thin-walled Structures. 2010; 48(10-11): 752-762.
9. Bernard ES. Flexural behavior of cold-formed profiled steel decking [PhD thesis]. Sydney, Australia: University of Sydney; 1993.
10. Schafer BW. Cold formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of element and member with longitudinal stiffeners [Ph.D.Thesis]. Ithaca, New York: Cornell university; 1997
11. Young B. The behaviour and design of cold-formed channel columns [PhD thesis]. Sydney, Australia: University of Sydney; 1997.
12. Shifferaw Y, Vieira LCM, Schafer BW. Compression testing of cold-formed steel columns with different sheathing configurations. In: Proceedings of Structural Stability Research Council - Annual Stability Conference (SSRC2010); 2010; 593-612.
13. Zeinodini V, Schafer BW. Global imperfection and dimensional variations in cold-formed steel members. International journal of structure stability conference, Structural stability research council. 2011; 11(5): 829-854.
14. Gendy BL, Hanna MT. Effect of geometric imperfections in the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape sections. HBRC Journal. 2015; 13(2): 163-170.
15. Schafer BW, Pekoz T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfection and residual stresses. Journal of Constructional Steel Research. 1998; 47(3): 193-210.
16. Zeinodini V, Schafer BW. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. Thin-Walled Structures. 2012; 60: 105-117.
17. Engineering Institute of Thailand under H.M. the King's Patronage. Design Standards for Cold Formed Steel Buildings (EIT1024-53). Bangkok: Thailand; 2010. Thai.
18. Shanmuganathan G, Yasintha B, Mahen M. Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research. 2015; 108: 31-45.
19. Dinis PB, Batista EM, Camotim D, dos Santos ES. Local-distortional-global interaction in lipped channel columns: Experimental result, numerical simulations and design considerations. Thin-Walled Structures. 2012; 61: 2-13.