

การศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการดัดในระนาบของหน้าตัดคานเหล็ก เซลล์ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10

A Study of the Increase in In-Plane Flexural Capacity of Cellular Steel Sections Based on EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 Codes

วรเทพ แซ่ล่ง^{1*} ปฐเมศ พาณิตพจมาน² ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ¹ สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ²
ปริดา ไชยมหาวัน¹ วรจักร จันทรแว่น¹ และอภิชาติ บัวกล้า¹

Worathep Sae-Long^{1*} Pattamad Panedpojaman² Nattapong Damrongwiriyanupap¹
Suchart Limkatanyu² Preeda Chaimahawan¹ Worajak Janwaen¹ and Apichat Buakla¹

Received: August 17, 2021; Revised: September 21, 2021; Accepted: September 21, 2021

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันคานเซลล์ (Cellular Beam) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานก่อสร้างอาคาร เนื่องมาจากรูปลักษณะที่เข้ากับยุคสมัยใหม่และประโยชน์ของช่องเปิด อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลล์จากคานเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมยังมีไม่มากนัก ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลล์โดยอ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 บนพื้นฐานของข้อกำหนด SCI P355 การตรวจสอบดำเนินการผ่านการศึกษารูปพรรณ ซึ่งครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรด้านขนาดของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตัวเอช อัตราส่วนขนาดช่องเปิด และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด จากผลการศึกษาพบว่า กำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลล์จะเพิ่มขึ้นจากคานเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและอัตราส่วนระยะห่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเอว และด้วยการลดลงของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดและอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีก อิทธิพลของอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดส่งผลให้กำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 39 และ 41.38 % โดยเฉลี่ย สำหรับมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 นอกจากนี้กำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลล์ตามมาตรฐานการออกแบบทั้งสองเพิ่มขึ้นประมาณ 56.74 % โดยเฉลี่ย เนื่องจากอิทธิพลของอัตราส่วนระยะห่างพื้นที่แผ่นปีกและความลึกต่อความกว้างแผ่นปีก

คำสำคัญ : กำลังต้านทานแรงดัดในระนาบ; คานเซลล์; มาตรฐาน EN1993-1-1; มาตรฐาน ANSI/AISC 360-10

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

¹ School of Engineering, University of Phayao

² Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla

* Corresponding Author E - mail Address: worathep.sa@up.ac.th

Abstract

Nowadays, cellular beams have been widely used for building construction due to their modern appearance and the utility of their openings. However, studies on the increase in the flexural capacity of the cellular beams from the parent profile beams are still lacking. Therefore, this paper aimed to investigate the increase of the in-plane flexural capacity of the cellular beams based on the structural steel design codes of EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 under the requirements of SCI P355. An examination was conducted through a parametric study that included the variation of parameters such as the size properties of the H-shaped steel, opening ratios, and spacing of the opening ratios. From the parametric study results, it was found that the cellular beam's in-plane bending capacity increases from the in-plane bending capacity of the parent profile beams with increasing in the opening ratios and the flange-web area ratio, and with decreasing in the spacing of the opening ratios and the depth-to-width ratio. Based on the influence of the opening ratios and spacing of the opening ratios on the in-plane bending capacity of the cellular beams, the flexural capacity increased with an average value of 39 and 41.38 % for EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10, respectively. Furthermore, the in-plane bending capacity of the cellular beams for both design codes increased with an average value of 56.74 % due to the influence of the flange-web area ratio and depth-to-width ratio.

Keywords: Capacity of In-Plane Bending Moment; Cellular Meam; EN1993-1-1 code; ANSI/AISC 360-10 code

บทนำ

คานเซลล์รู (Cellular Beam) เป็นหนึ่งในคานที่มีช่องเปิดช่วงซ้ำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานโครงสร้างเหล็กของอาคารที่มีช่วงความยาวคานที่สูง ยกตัวอย่างเช่น สนามฟุตบอล โรงงาน ทางสรรพสินค้า หอศิลป์ ศูนย์ประชุม และโรงแรม เป็นต้น โดยทั่วไปคานเซลล์รูเกิดจากการนำเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอสหรือไอนามาตัดตามแนวเป็นรูปครึ่งวงกลมช่วงซ้ำ (Half Circle Pattern) และนำเอามาเชื่อมประกอบกันใหม่ ทำให้เกิดช่องเปิดรูปวงกลม โดยมีความลึกเพิ่มขึ้นจากเหล็กรูปพรรณตั้งต้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 40 - 60 [1] ส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกลศาสตร์บางประการของคานเซลล์รูสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคานเหล็กรูปพรรณตั้งต้นก่อนการนำมาตัดประกอบ [2] นอกจากนี้การมีช่องเปิดยังทำให้โครงสร้างเกิดรูปทรงที่สวยงาม มีมิติ ทันสมัย และก่อให้เกิดประโยชน์ต่องานระบบหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น สามารถเดินงานระบบไฟฟ้าหรือประปาตลอดผ่านช่องเปิดคานได้โดยตรง เป็นต้น

เมื่อกล่าวถึงการออกแบบคานเซลล์รูในปัจจุบัน ได้มีหลายประเทศศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กที่มีช่องเปิดช่วงซ้ำและได้นำเสนอมาตรฐานการออกแบบ อันได้แก่ มาตรฐาน

EN1993-1-1 [3] ในกลุ่มสหภาพยุโรปภายใต้การกำกับดูแลของคณะกรรมการยุโรปด้านมาตรฐาน (European Committee for Standardization, CEN) และมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] ในกลุ่มประเทศสหรัฐอเมริกาภายใต้การกำกับดูแลของสถาบันเหล็กก่อสร้างแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (American Institute of Steel Construction, AISC) สำหรับประเทศไทยยังคงอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC เพื่อใช้งานในปัจจุบันอยู่ [5] จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าได้มีการตรวจสอบความแม่นยำของมาตรฐานการออกแบบทั้งสองผ่านแบบจำลอง [6] - [14] ซึ่งงานวิจัยเหล่านั้นสามารถยืนยันความปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว

สำหรับโครงสร้างคานหลัก พฤติกรรมการคดถือเป็นพฤติกรรมหลักในการพิจารณาในการออกแบบ โดยพฤติกรรมการคดของคานเซลลูลาร์เกิดจากแรงอัดและแรงดัดบริเวณส่วนบนและล่างของหน้าตัดคาน ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการคดในคานเหล็กทั่วไป [2], [5] - [6], [15] ดังนั้นรูปแบบการวิบัติในคานเซลลูลาร์เนื่องจากการคด จึงแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การวิบัติเนื่องจากการคดในระนาบ (In-Plane Bending) และการวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด (Lateral Torsional Buckling) ในด้านการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการวิบัติเนื่องจากการคดทั้งสองรูปแบบ แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจเพียงแค่การคดในระนาบเท่านั้น

การศึกษาการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์ ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านที่ศึกษาพฤติกรรมการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์ ยกตัวอย่างเช่น [16] ตรวจสอบการออกแบบคานเซลลูลาร์ตามมาตรฐาน BS: 5950 [17] กับแบบจำลอง พบว่ากำลังรับแรงที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานการออกแบบอยู่ประมาณร้อยละ 5 ต่อมา [15] แนะนำการตรวจสอบรูปแบบการวิบัติและเสถียรภาพของคานเซลลูลาร์ ซึ่งรวมถึงวิบัติเนื่องจากการคดในระนาบ ในขณะที่ [6] เปรียบเทียบกำลังต้านทานการคดระหว่างการออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] กับผลวิเคราะห์จากแบบจำลอง โดยสามารถสรุปได้ว่ากำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์ตามมาตรฐานทั้งสองให้ค่าที่น้อยกว่าแบบค่าที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณร้อยละ 10 โดยเฉลี่ย ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันและมีความปลอดภัยในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์เมื่อเทียบกับคานเหล็กรูปพรรณดัดตัน รวมถึงอิทธิพลของขนาดเหล็กรูปพรรณดัดตันที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดของคานเซลลูลาร์ยังมีไม่มากนัก

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคดคานเหล็กรูปพรรณดัดตัน บนพื้นฐานของมาตรฐานการออกแบบทั้ง EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] โดยศึกษาผ่านการศึกษารามิเตอร์ (Parametric Studies) ซึ่งครอบคลุมทั้งขนาดเหล็กรูปพรรณดัดตันที่ถูกใช้ในประเทศไทย [6] ขนาดของช่องเปิด และระยะห่างระหว่างช่องเปิด โดยกำหนดให้อัตราส่วนขนาดของช่องเปิดอยู่ในช่วง 0.8 - 1.2 และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดอยู่ในช่วง 1.1 - 1.7 ขอบเขตของตัวแปรดังกล่าวเป็นไปตามข้อกำหนดของ SCI P355 [18] ผลการศึกษาที่ได้จากบทความวิจัยนี้สามารถทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วนขนาดของช่องเปิดและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่ทำให้คานเซลลูลาร์มีความต้านทานการคดเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับคานเหล็กรูปพรรณดัดตัน รวมถึงอิทธิพลของขนาดเหล็กรูปพรรณดัดตันต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดของคานเซลลูลาร์ เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถตระหนักถึงอิทธิพลดังกล่าวและเกิดความมั่นใจในการออกแบบคานเซลลูลาร์สำหรับการใช้งานจริง และรวมถึงการใช้งานร่วมกับโครงสร้างคอนกรีต [19] - [20]

ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคดในระนาบของเหล็กรูปพรรณดั้งเดิม ในบทความนี้จะแบ่งกลุ่มการศึกษาตัวแปรออกเป็น 2 กรณี โดยใช้เหล็กรูปพรรณตัวเอชในประเทศไทยในการศึกษา ซึ่งมีค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น (E) และกำลังจุดครากของหน้าตัดเหล็ก (F_y) เท่ากับ 210,000 MPa และ 235 MPa ตามลำดับ รายละเอียดของกรณีศึกษาทั้งสองสามารถแสดงได้ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 คือ การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับช่องเปิดของคานเซลลูลาร์ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบ จากวิจัยในอดีต [2], [6] – [16], [21] ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับช่องเปิดของคานเซลลูลาร์ที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงของคานเซลลูลาร์ ได้แก่ อัตราส่วนขนาดช่องเปิด (d_o / d) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด (s / d_o) ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ตัวแปรทั้งสองในการศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์ ซึ่งช่วงการศึกษาการตัวแปรทั้งสองอยู่ระหว่าง 0.8 – 1.2 สำหรับอัตราส่วนขนาดช่องเปิด และ 1.1 – 1.7 สำหรับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด โดยขอบเขตของตัวแปรดังกล่าวเป็นไปตามข้อกำหนดของ SCI P355 [18] และกำหนดให้ขนาดเหล็กรูปพรรณมีขนาดแตกต่างกันจำนวน 6 ขนาด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 1 จากข้อมูลการศึกษาพารามิเตอร์ข้างต้นจะประกอบด้วยผลการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 210 กรณี

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมที่ใช้ในการศึกษากรณีศึกษาที่ 1

ขนาดเหล็กรูปพรรณ	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	$\frac{d_o}{d}$	$\frac{s}{d_o}$
900x300x286	912	302	34	18		1.1,
800x300x210	800	300	26	14	0.8,	1.2,
700x300x185	700	300	24	13	0.9,	1.3,
600x300x151	588	300	20	12	1.0,	1.4,
400x300x94.3	386	299	14	9	1.1,	1.5,
350x250x69.2	336	249	12	8	1.2	1.6,
						1.7

กรณีศึกษาที่ 2 คือ การศึกษาขนาดของตัวแปรคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างแผ่นปีก (d / b_f) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกต่อพื้นที่แผ่นเวบ (A_f / A_w) โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนขนาดช่องเปิด (d_o / d) และค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด (s / d_o) มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 1.1 ตามลำดับ (ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลลูลาร์สูงสุดในช่วงขอบเขตที่ใช้งาน [6]) นอกจากนี้ขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมที่ใช้มีขนาดแตกต่างกันจำนวน 65 ขนาด (เป็นหน้าตัดประเภทอัดแน่น [6]) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 ดังนั้นในกรณีศึกษานี้จะประกอบด้วยผลการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 65 กรณี

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของเหล็กรูปพรรณต่างชนิดที่ใช้ในการศึกษากรณีศึกษาที่ 2

ขนาดเหล็ก รูปพรรณ	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	ขนาดเหล็ก รูปพรรณ	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
900x300x286	912	302	18	34	350x350x156	350	357	19	19
900x300x243	900	300	16	28	350x350x137	350	350	12	19
900x300x213	890	299	15	23	350x250x79.7	340	250	9	14
800x300x210	800	300	14	26	350x175x57.8	354	176	8	13
800x300x191	792	300	14	22	350x175x49.6	350	175	7	11
700x300x185	700	300	13	24	350x175x41.4	346	174	6	9
700x300x166	692	300	13	20	300x300x106	304	301	11	17
600x300x175	594	302	14	23	300x300x94	300	300	10	15
600x300x151	588	300	12	20	300x200x65.4	298	201	9	14
600x300x137	582	300	12	17	300x200x56.8	294	200	8	12
600x200x134	612	202	13	23	300x150x36.7	300	150	6.5	9
600x200x120	606	201	12	20	300x150x32	298	149	5.5	8
600x200x106	600	200	11	17	250x250x82.2	250	255	14	14
600x200x94.6	596	199	10	15	250x250x72.4	250	250	9	14
500x300x150	494	302	13	21	250x250x66.5	248	249	8	13
500x300x128	488	300	11	18	250x175x44.1	244	175	7	11
500x300x114	482	300	11	15	250x125x29.6	250	125	6	9
500x200x103	506	201	11	19	250x125x25.7	248	124	5	8
500x200x89.6	500	200	10	16	200x200x65.7	208	202	10	16
500x200x79.5	496	199	9	14	200x200x56.2	200	204	12	12
450x300x145	446	302	13	21	200x200x49.9	200	200	8	12
450x300x124	440	300	11	18	200x150x30.6	194	150	6	9
450x300x106	434	299	10	15	200x100x21.3	200	100	5.5	8
450x200x88.9	456	201	10	17	200x100x18.2	198	99	4.5	7
450x200x76	450	200	9	14	175x175x40.2	175	175	7.5	11
450x200x66.2	446	199	8	12	175x125x23.3	169	125	5.5	8
400x400x232	411	405	18	28	150x150x31.5	150	150	7	10
400x400x197	400	408	21	21	150x100x21.1	148	100	6	9
400x400x172	400	400	13	21	150x75x14	150	75	5	7
400x300x107	390	300	10	16	125x125x23.8	125	125	6.5	9
400x200x75.5	404	201	9	15	100x100x17.2	100	100	6	8
400x200x66	400	200	8	13	100x50x9.3	100	50	5	7
400x200x56.6	396	199	7	11					

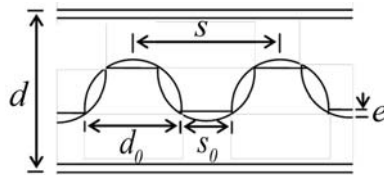
โดยการคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าตัดคานเซลล์ลูลาร์ รวมถึงกำลังต้านทานการดัดในระนาบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) - (2)

$$H = d + \frac{d_0}{2} - e \quad (1)$$

$$e = \frac{d_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{s-d_0}{2}\right)^2} \quad (2)$$

เมื่อ

H	คือ	ความลึกของหน้าตัดคานเซลล์ลาร์
d_0	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด
s	คือ	ระยะห่างระหว่างช่องเปิด
d	คือ	ความลึกของเหล็กรูปพรรณตั้งต้น
e	คือ	ระยะห่างระหว่างขอบการตัด ดังรูปที่ 1 [6]



รูปที่ 1 รูปแบบการตัดประกอบคานเซลล์ลูลาร์ [6]

คุณสมบัติพื้นฐานของคานเชลลูลาร์ที่สัมพันธ์กับกำลังต้านทานการตัดในระนาบสำหรับกรณีที่หน้าตัดผ่านช่องเปิด ได้แก่ โมเมนต์สองมิติของหน้าตัด (Z_x) และโมเมนต์อินertiaสองมิติของหน้าตัด (S_x) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) - (4)

$$Z_x = (b_f t_f)(H - t_f) + \frac{t_w}{4}(H - 2t_f)^2 - \frac{t_w}{4}(0.9d_0)^2 \quad (3)$$

$$S_x = \frac{2I_x}{H} \quad (4)$$

เมื่อ

b_f	คือ	ความกว้างของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ
t_f	คือ	ความหนาแผ่นปีกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ
t_w	คือ	ความหนาแผ่นเอวของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ
I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์ซีयरอบแกนหลักสำหรับกรณีที่หน้าตัดผ่านช่องเปิด

โมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนหลักสำหรับกรณีที่หน้าตัดผ่านช่องเปิดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$I_x = \frac{I}{12} [b_f H^3 - (b_f - t_w)(H - 2t_f)^3 - t_w(0.9d_o)^3] \quad (5)$$

ทั้งนี้ตามข้อกำหนด SCI P355 [18] ได้กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะที่พิจารณาใช้เพียง 90 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเดิม ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าโมดูลัสพลัสติก โมดูลัสอีลาสติก และโมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนหลักของหน้าตัดคานเซลล์ูลาร์ ดังสมการที่ (3) - (5) ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (d_o) ที่ใช้ในการคำนวณจึงมีค่าเท่ากับ $0.9d_o$

พื้นที่แผ่นปีก (A_f) และพื้นที่แผ่นเอว (A_w) ของคานเซลล์ูลาร์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) - (7)

$$A_f = 2b_f t_f \quad (6)$$

$$A_w = (d - 2t_f) t_w \quad (7)$$

การประเมินกำลังต้านทานแรงดัดในระนาบของคานเซลล์ูลาร์ (M_n) ในบทความนี้อ้างอิงจากการคำนวณการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 มาตรฐาน อันได้แก่ มาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

มาตรฐาน EN1993-1-1 [3]:

สำหรับมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] กำลังต้านทานแรงดัดในระนาบของคานเซลล์ูลาร์ จะถูกพิจารณาแบ่งออกตามชั้น (Class) ของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่พิจารณา เนื่องจากเหล็กรูปพรรณที่ใช้งานตามท้องตลาดของประเทศไทยส่วนใหญ่ที่ถูกจัดอยู่ในหน้าตัดเหล็กชั้นที่ 1 2 และ 3 [6] ดังนั้นในการศึกษานี้จะครอบคลุมเฉพาะกรณีที่หน้าตัดเหล็กอยู่ในชั้นที่ 1 และ 2 (หน้าตัดอัดแน่น) และชั้นที่ 3 (หน้าตัดไม่อัดแน่น) โดยการจำแนกชั้นของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8) - (9)

หน้าตัดเหล็กชั้นที่ 1 และ 2:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 10\varepsilon \quad \text{และ} \quad \frac{h}{t_w} \leq 83\varepsilon \quad (8)$$

หน้าตัดเหล็กชั้นที่ 3:

$$10\varepsilon < \frac{b_f}{2t_f} \leq 14\varepsilon \quad \text{และ} \quad 83\varepsilon < \frac{h}{t_w} \leq 124\varepsilon \quad (9)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} h &= s_f - t_f && \text{คือ} && \text{ระยะความยาวเอวของหน้าตัดในกรณีที่หน้าตัดผ่านช่องเปิด} \\ s_t &= (H - d_o)/2 && \text{คือ} && \text{ความลึกหน้าตัดรูปตัวที} \\ F_y &&& \text{คือ} && \text{กำลังจุดครากของเหล็กรูปพรรณ และ } \varepsilon = \sqrt{235 / F_y} \end{aligned}$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดครั้นภายใต้การดัดในระนาบ (M_n^{EN}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) - (11)

$$M_n^{EN} = F_y Z_x \quad \text{สำหรับหน้าตัดชั้นที่ 1 และ 2} \quad (10)$$

$$M_n^{EN} = F_y S_x \quad \text{สำหรับหน้าตัดชั้นที่ 3} \quad (11)$$

โดยที่สัญลักษณ์ (Superscript) EN นิยามถึงการคำนวณตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3]

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4]:

สำหรับมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] ได้จำแนกประเภทหน้าตัดเหล็กรูปพรรณผ่านค่าตัวแปรความชะลูด (λ) ซึ่งได้แก่ หน้าตัดอัดแน่น (Compact Section) หน้าตัดไม่อัดแน่น (Noncompact Section) และหน้าตัดชั้นส่วนชะลูด (Slender Element Section) ค่าตัวแปรความชะลูดจะสัมพันธ์กับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดครั้นภายใต้การดัดในระนาบ (M_n^{AISC}) ดังรูปที่ 2 โดยสำหรับหน้าตัดคานทั่วไป เช่น หน้าตัดคานรูปตัวเอชหรือตัวไอ จะประกอบไปด้วยแผ่นบาง 2 ส่วน อันได้แก่ แผ่นปีกและแผ่นเอวของหน้าตัด ดังนั้นในการจำแนกประเภทของหน้าตัดตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] จะต้องพิจารณาทั้ง 2 ส่วน ค่าตัวแปรความชะลูดของแผ่นปีกและแผ่นเอวในกรณีผ่านช่องเปิด สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (12) - (17)

ค่าตัวแปรความชะลูดกรณีแผ่นปีกของหน้าตัด:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (12)$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (13)$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (14)$$

ค่าตัวแปรความชะลูดกรณีแผ่นเอวของหน้าตัด:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (15)$$

$$\lambda_p = 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (16)$$

$$\lambda_r = 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (17)$$

เมื่อ

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดครั้นภายใต้การดัดในระนาบ (M_n^{AISC}) กับตัวแปรความชะลูด (λ) ดังรูปที่ 2 จะเห็นว่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดครั้นภายใต้การดัดในระนาบสำหรับกรณีที่หน้าตัดอัดแน่น ($\lambda \leq \lambda_p$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (18) - (20)

$$M_n^{AISC} = M_p = F_y Z_x \quad (18)$$

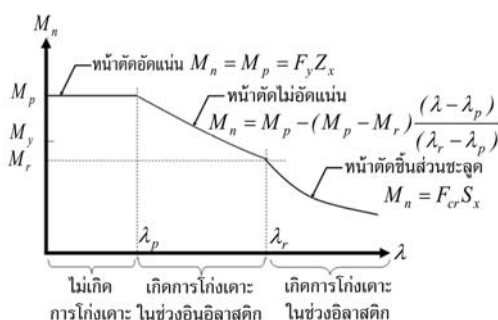
สำหรับกรณีหน้าตัดไม่อัดแน่น ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) :

$$M_n^{AISC} = M_p - \frac{(M_p - M_r)(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \quad (19)$$

สำหรับกรณีหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด ($\lambda > \lambda_r$) :

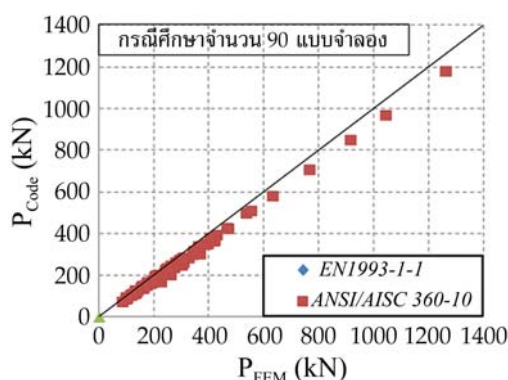
$$M_n^{AISC} = F_{cr} S_x \quad (20)$$

โดยที่สัญลักษณ์ (Supersubscript) AISC นิยามถึงการคำนวณตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] M_p คือ โมเมนต์พลาสติก $M_r = 0.7 F_y S_x$ คือ โมเมนต์คราก ซึ่งคำนึงถึงผลกระทบของความเค้นคงค้าง [2], [5] $F_{cr} = Q F_y$ คือ ความเค้นวิกฤติสำหรับการโก่งเดาะเฉพาะที่ และ Q คือ ตัวคูณปรับลดสำหรับการคำนวณความเค้นวิกฤติของการโก่งเดาะเฉพาะที่ [5]



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดครั้นภายใต้การดัดในระนาบกับตัวแปรความชะลูดตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [2], [5]

ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการศึกษาพฤติกรรมการคัตของคานเซลล์รูปพรรณ เพื่อยืนยันค่าความแม่นยำของสมการการออกแบบกำลังต้านทานการคัตในระนาบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] (สมการที่ (10) - (11)) และ ANSI/AISC 360-10 [4] (สมการที่ (18) - (20)) ได้มีการนำไปเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ANSYS [22] ซึ่งผ่านการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในรูปของน้ำหนักบรรทุกทุกวิถีที่ทำให้แบบจำลองวิบัติในรูปแบบของการคัตในระนาบรวมทั้งสิ้น 90 แบบจำลอง จากผลการศึกษาของวิจัยที่ผ่านมา [6] ดังรูปที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] มีค่าการเบี่ยงเบนค่อนข้างต่ำและผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณร้อยละ 10 โดยเฉลี่ย ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าสมการการออกแบบตามมาตรฐานทั้งสองมีความแม่นยำในการออกแบบและมีความปลอดภัยในการใช้งาน โดยรายละเอียดการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเปรียบเทียบบ้างว่าถูกอธิบายเพิ่มเติมในงานวิจัยของ [6]



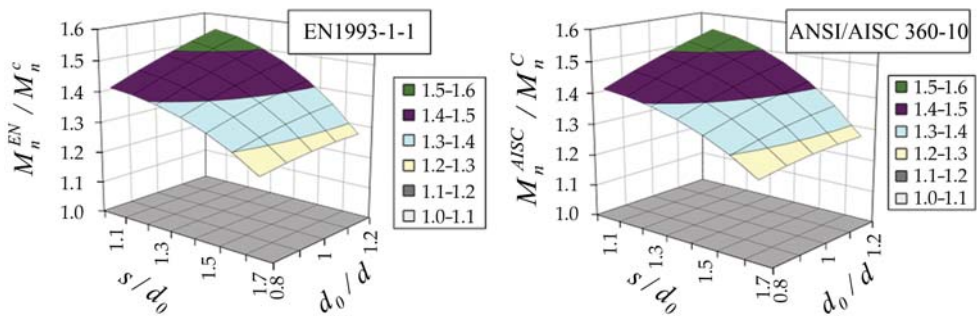
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกวิถีที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับน้ำหนักบรรทุกทุกวิถีที่ได้จากการออกแบบมาตรฐานทั้งสอง ในกรณีเกิดการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์คัตในระนาบ [6]

ผลการศึกษา

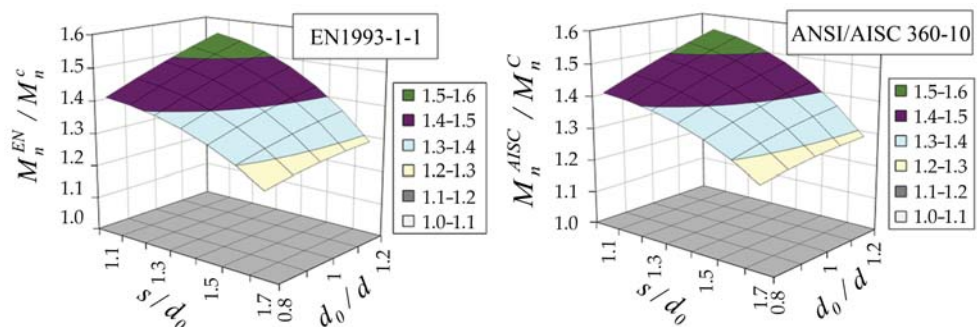
กรณีศึกษาที่ 1: การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับช่องเปิดต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์รูปพรรณ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด 210 กรณี สามารถนำเสนอในรูปของกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์รูปพรรณเมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคัตในระนาบของเหล็กรูปพรรณดัดตัน (M_n^C) จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนขนาดช่องเปิด (d_o / d) มีค่าสูงขึ้นและจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด (s / d_o) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าผลการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์รูปพรรณสำหรับหน้าตัดเหล็กรูปพรรณดัดตันที่มีขนาด 900x300x286 800x300x210 700x300x185 และ 600x300x151 ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 4(ก) - (ง) เนื่องจากหน้าตัดเหล็กรูปพรรณเหล่านี้อยู่ในประเภทหน้าตัดอัดแน่น

(Compact Section) โดยอ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบทั้งสอง ค่ากำลังต้านทานการดัดในระนาบจึงมีค่าเท่ากัน ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากหน้าตัดเหล็กรูปพรรณดัดตันขนาด 400x300x94.3 และ 350x250x69.2 ดังแสดงในรูปที่ 4(จ) และ (ข) ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าแตกต่างกันเนื่องมาจากการจำแนกประเภทหน้าตัดอัดแน่นของทั้งสองมาตรฐานมีความแตกต่างกันดังสมการที่ (8) - (9) สำหรับมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และสมการที่ (12) - (17) สำหรับมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] ผลการวิเคราะห์หน้าตัดทั้งสองแสดงให้เห็นว่าหน้าตัดทั้งสองเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่นสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] ในขณะที่หน้าตัดทั้งสองถูกจัดว่าเป็นหน้าตัดอัดแน่นสำหรับมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการดัดในระนาบของคานเซลลูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการดัดของเหล็กรูปพรรณดัดตันตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] จึงมีค่าน้อยกว่าค่าตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [4] ประมาณร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย

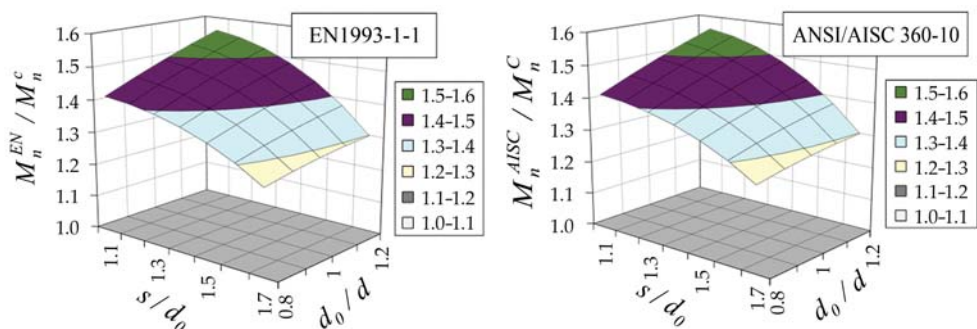


(ก) หน้าตัดเหล็กขนาด 900x300x286

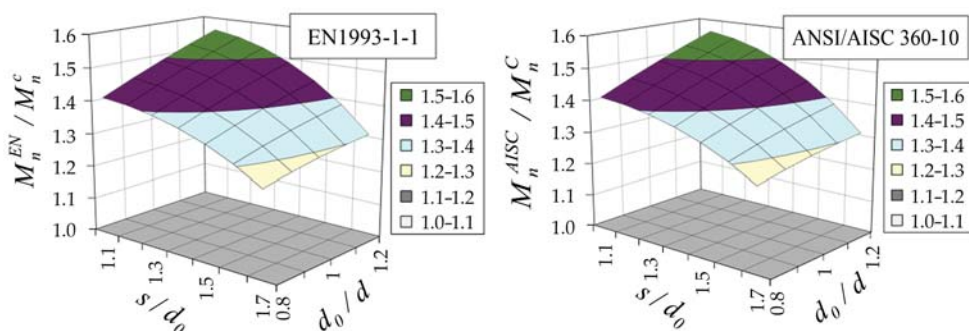


(ข) หน้าตัดเหล็กขนาด 800x300x210

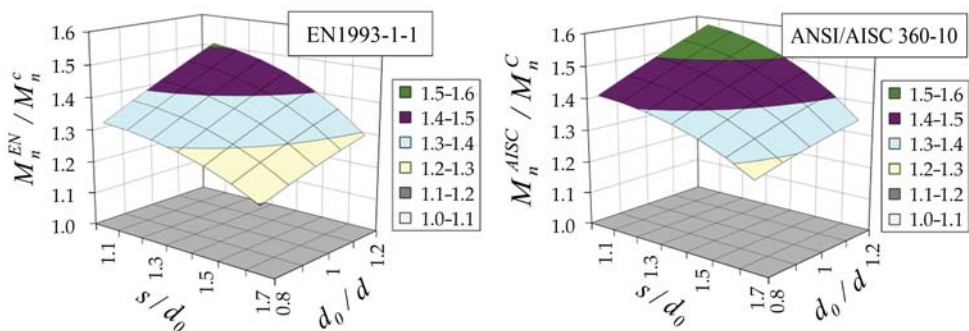
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการดัดของคานเซลลูลาร์ที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดตามมาตรฐาน EN1993-1-1 (สมการที่ (10) - (11)) และ ANSI/AISC 360-10 (สมการที่ (18) - (20))



(ค) หน้าตัดเหล็กขนาด 700x300x185

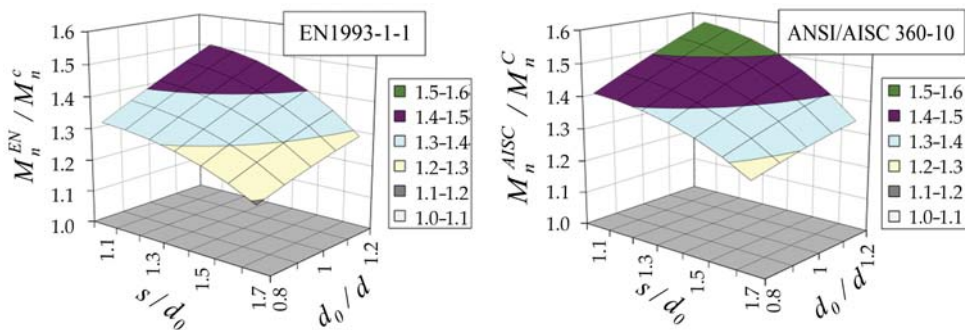


(ง) หน้าตัดเหล็กขนาด 600x300x151



(จ) หน้าตัดเหล็กขนาด 400x300x94.3

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการดัดของคานเซลล์ลาร์ที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและอัตราส่วนระยะทางระหว่างช่องเปิดตามมาตรฐาน EN1993-1-1 (สมการที่ (10) - (11)) และ ANSI/AISC 360-10 (สมการที่ (18) - (20)) (ต่อ)



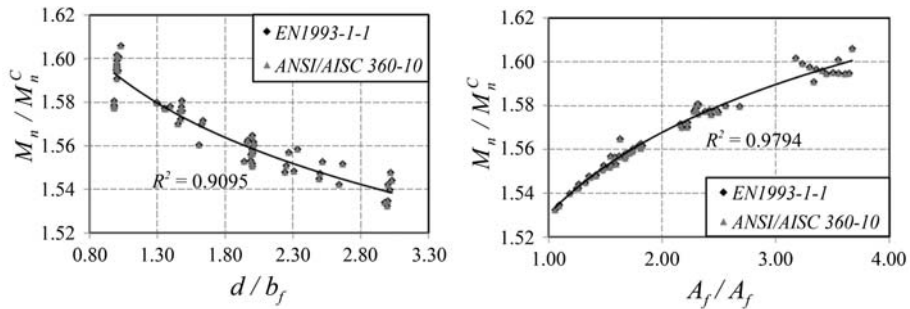
(จ) หน้าตัดเหล็กขนาด 350x250x69.2

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการคดของคานเซลล์ูลาร์ที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดตามมาตรฐาน EN1993-1-1 (สมการที่ (10) - (11)) และ ANSI/AISC 360-10 (สมการที่ (18) - (20)) (ต่อ)

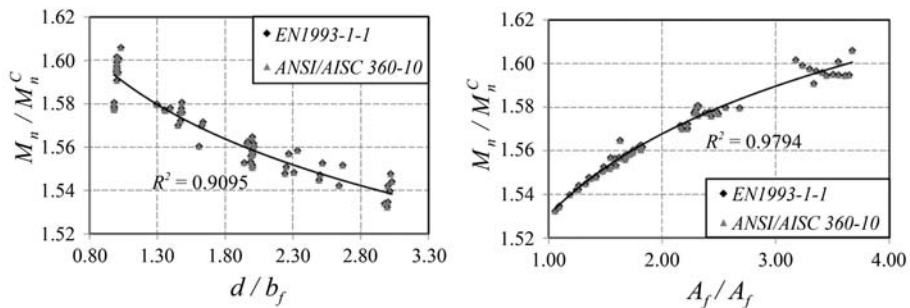
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังต้านทานการคดในระนาบที่เพิ่มขึ้นของคานเซลล์ูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] (สมการที่ (10) - (11)) และ ANSI/AISC 360-10 [4] (สมการที่ (18) - (20)) ในกรณีศึกษานี้เพิ่มขึ้นร้อยละ 39 และ 41.38 โดยเฉลี่ย ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอแนะที่พบในงานวิจัยในอดีต [6], [8], [23]

กรณีศึกษาที่ 2: การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลล์ูลาร์

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด 65 กรณี สามารถนำเสนอในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดและอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีกดังรูปที่ 5(ก) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดและอัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเวดดังรูปที่ 5(ข) ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] ให้ผลลัพธ์ที่ค่าเท่ากันเนื่องจากหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในกรณีหน้าตัดอัดแน่นจากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีกมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดของคานเซลล์ูลาร์เมื่อเทียบกับเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมมีค่าลดลงในรูปของฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic Function) ที่ระดับความมั่นใจร้อยละ 90.95 ในทางกลับกันเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเวดมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดของคานเซลล์ูลาร์เมื่อเทียบกับเหล็กรูปพรรณดั้งเดิมมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมที่ระดับความมั่นใจร้อยละ 97.94 นอกจากนี้กำลังต้านทานการคดในระนาบที่เพิ่มขึ้นของคานเซลล์ูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเหล็กดั้งเดิมตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] ในกรณีศึกษานี้เพิ่มขึ้นร้อยละ 56.74 โดยเฉลี่ย



(ก) อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีก



(ข) อัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเอว

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการคัตของคานเซลล์ลูลาร์ที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงค่า

สรุปผลและการอภิปรายผล

บทความวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์ลูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเหล็กรูปพรรณดั้งเดิม ตามมาตรฐานการออกแบบ EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 บนพื้นฐานของข้อกำหนด SCI P355 ผ่านการศึกษาพารามิเตอร์ ซึ่งครอบคลุมทั้งการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรด้านขนาดของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตัวเอช อัตราส่วนขนาดช่องเปิด และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด สมการที่ใช้ในการออกแบบ (สมการที่ (10) - (11) สำหรับมาตรฐาน EN1993-1-1 และสมการที่ (18) - (20) สำหรับมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10) ได้มีการผ่านการศึกาและเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์และผลการทดสอบเพื่อยืนยันความปลอดภัยและความแม่นยำในการใช้งาน [6] โดยจากผลการศึกษาในบทความวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

อิทธิพลของอัตราส่วนขนาดช่องเปิด (d_o / d) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด (s / d_o) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์ลูลาร์เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเหล็กดั้งเดิมประมาณร้อยละ 39 และ 41.38 โดยเฉลี่ยสำหรับมาตรฐานการออกแบบ EN1993-1-1 [3] และ ANSI/AISC 360-10 [4] โดยเมื่อค่าอัตราส่วนขนาดช่องเปิดเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดลดลงจะทำให้การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคัตในระนาบของคานเซลล์ลูลาร์มีค่าเพิ่มขึ้น

อิทธิพลของขนาดเหล็กgrupพรรณดั่งต้น อันได้แก่ อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีก (d_o / d) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเอว (A_f / A_w) ที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดในระนาบของคานเซลล์ลูลาร์ สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานการคดของคานเซลล์ลูลาร์ เมื่อเทียบกับคานเหล็กgrupพรรณดั่งต้นมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 56.74 โดยเฉลี่ย เมื่อค่าอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างแผ่นปีกมีค่าลดลงและค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปีกและพื้นที่แผ่นเอวมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันลอการิทึมที่ระดับความมั่นใจร้อยละ 90.95 และ 97.94

จากการศึกษาพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้ ผู้แต่งคาดหวังว่าองค์ความรู้หรือระเบียบวิธีวิจัยที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษากำลังต้านทานแรงรูปแบบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นนอกเหนือจากกำลังต้านทานแรงคดระนาบของคานเซลล์ลูลาร์ ซึ่งจะก่อเกิดประโยชน์แก่ผู้ศึกษาและวิศวกรทั้งทางด้านงานวิจัยและการออกแบบสืบไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุน Unit of Excellence for Innovation in Infrastructures and Advanced Construction Management, University of Phayao, Grant No. FF64-UoE001

References

- [1] Erdal, F., Doğan, E., and Saka, M. P. (2011). Optimum Design of Cellular Beams Using Harmony Search and Particle Swarm Optimizers. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 67, Issue 2, pp. 237-247. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.07.014
- [2] Panedpojaman, P. (2019). **Design of Steel Beams and Steel Beams with Openings**. Songkhla: Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
- [3] Eurocode 3. (2005). **Design of Steel Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. UK: British Standards Institution
- [4] ANSI/AISC 360-10. (2010). **Specification for Structural Steel Buildings**. Illinois: American Institute of Steel Construction
- [5] Thepchatri, T. and Lenwari, A. (2012). **Behavior and Design of Steel Structures**. Bangkok: Chulalongkorn University Press
- [6] Sae-Long, W. and Panedpojaman, P. (2015). Design Strength Comparison of Cellular Beam Based on EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 Codes. **UBU Engineering Journal**. Vol. 8, No. 2, pp. 14-25
- [7] Panedpojaman, P., Thepchatri, T., and Limkatanyu, S. (2014). Novel Design Equations for Shear Strength of Local Web-Post Buckling in Cellular Beams. **Thin-Walled Structures**. Vol. 76, pp. 92-104. DOI: 10.1016/j.tws.2013.11.007

- [8] Panedpojaman, P., Thepchatri, T., and Limkatanyu, S. (2015). Novel Simplified Equations for Vierendeel Design of Beams with (Elongated) Circular Openings. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 112, pp. 10-21. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.04.007
- [9] Lawson, R. M., Lim, J., Hicks, S. J., and Simms, W. I. (2006). Design of Composite Asymmetric Cellular Beams and Beams with Large Web Openings. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 62, Issue 6, pp. 614-629. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.09.012
- [10] Sweedan, A. (2011). Elastic Lateral Stability of I-Shaped Cellular Steel Beams. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 67, Issue 2, pp. 151-163. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.08.009
- [11] Boissonnade, N., Nseir, J., Lo, M., and Somja, H. (2014). Design of Cellular Beams Against Lateral Torsional Buckling. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**. Vol. 167, Issue 7, pp. 436-444. DOI: 10.1680/stbu.12.00049
- [12] Sonck, D. and Belis, J. (2015). Lateral-Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 105, pp. 119-128. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.11.003
- [13] Ferreira, F. P. V. and Martins, C. H. (2020). LRFD for Lateral-Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams. **International Journal of Civil Engineering**. Vol. 18, pp. 303-323. DOI: 10.1007/s40999-019-00474-7
- [14] Panedpojaman, P., Sae-Long, W., and Thepchatri, T. (2021). Design of Cellular Beam-Columns About the Major Axis. **Engineering Structures**. Vol. 236, No. 6, p. 112060. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112060
- [15] Kuchta, K. and Maślak, M. (2015). Failure Modes Determining the Resistance and the Stability of Steel Cellular Beams. **Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture**. Vol. 62, pp. 263-280. DOI: 10.7862/RB.2015.194
- [16] Pachpor, P. D., Gupta, L. M., and Deshpande, N. V. (2014). Analysis and Design of Cellular Beam and its Verification. **IERI Procedia**. Vol. 7, pp. 120-127. DOI: 10.1016/j.ieri.2014.08.019
- [17] BS 5950. (2000). **Structural use of Steelwork in Building Part 1: Code of Practice for Design-Rolled and Welded Sections**. London: British Standards Institution
- [18] Lawson, R. M. and Hicks, S. J. (2009). **Design of Composite Beams with Large Openings**. The Steel Construction Institute Publication 355.
- [19] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30
- [20] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2014). Effects of Flexural Strengthening with Non-Prestressed wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 7, No. 2, pp. 16-33
- [21] Panedpojaman, P., Thepchatri, T., and Limkatanyu, S. (2014). Elastic Buckling of Cellular Columns Under Axial Compression. **Thin-Walled Structures**. Vol. 145, 106434. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106434

- [22] ANSYS. (2007). **Release 11.0 documentation**. Ansys Inc.
- [23] Akgönen, A. L., Gunes, B., and Nassani, D. E. (2020). Investigation of Flexural and Elastic Buckling Behavior of Cellular Beams. **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**. Vol. 8, No. 3, pp. 869-882. DOI: 10.21923/jesd.705441