

การประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมโดยใช้ฐานข้อมูลการทดสอบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Strength evaluation of composite columns using experimental database



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมโดยใช้ฐานข้อมูลการทดสอบ
โดย	นายวรพล ฮ้อแสงชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารีย์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรรณ)	

6070302721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: COMPOSITE COLUMNS, EXPERIMENTAL DATABASE, SYMBOLIC
REGRESSION, SIZE EFFECT, NORMALIZED INTERACTION DIAGRAMS

Voraphol Horsangchai : Strength evaluation of composite columns using
experimental database. Advisor: Assoc. Prof. Akhrawat Lenwari, Ph.D.

This research presents an evaluation of the AISC 360-16 and Eurocode 4 strength prediction equations. The experimental database of composite columns test results is compiled from the published technical literature from year 1970 to present. A total 76, 426, and 347 specimens are used to evaluate the accuracy and conservativeness of prediction for concrete-encased steel (CES) columns, circular and square concrete-filled steel tube (CFST) columns, respectively. It is found that the AISC 360-16 strength prediction equations can conservatively predict the strength of CES and CFST columns even the material strength exceeds the specification limits, while the Eurocode 4 strength prediction equations over-predict the strength of some CES and square CFST columns with the yield strength of steel exceeding the code limit. In addition, the experimental database is used in the symbolic regression for investigating the column size effect on the peak axial stress of circular CFST columns. It is found that the size effect on the peak axial stress is dependent on the size of steel tube, steel ratio and compressive strength of concrete. Furthermore, the concept for constructing normalized column strength interaction diagrams for design of circular CFST columns based on the symbolic regression is proposed. The concept is in the same feature as the normalized interaction diagrams for design of reinforced concrete columns subjected to combined axial forces and moments.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิจพัฒน์ ภู่วรรณ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา และ ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่สนับสนุนทุนการวิจัยและค่าเล่าเรียนตลอดจนค่าใช้จ่ายรายเดือนในระหว่างระยะเวลาการศึกษาระดับมหาบัณฑิตของข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรม สั่งสอน และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาและสามารถนำไปต่อยอดเพื่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมโยธาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรพล ฮ้อแสงชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัย.....	6
2.1 การทดสอบและประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมประเภทเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	6
2.2 การทดสอบและประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมประเภทเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต.....	11
2.2.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม	11
2.2.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม	14
2.3 ผลกระทบของขนาดเสาต่อกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต.....	22
2.4 การใช้หลักการโปรแกรมเชิงพันธุกรรมในการพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสม	23
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	24

3.1 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-16	24
3.1.1 ข้อกำหนดทั่วไปด้านวัสดุ.....	24
3.1.2 เสาวัสดุผสม	24
3.1.3 คานวัสดุผสม.....	26
3.1.4 คาน-เสาวัสดุผสม	28
3.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode 4	31
3.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป	31
3.2.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมด้วยวิธีแบบง่าย.....	31
3.3 หลักการของโปรแกรมเชิงพันธุกรรม	36
3.3.1 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	36
3.3.2 โปรแกรมเชิงพันธุกรรม.....	41
3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม <i>HeuristicLab</i>	43
บทที่ 4 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสม	47
4.1 การรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต	47
4.2 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม	50
4.3 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม	55
4.4 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	61
บทที่ 5 การประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาวัสดุผสม	68
5.1 เสาวัสดุผสมภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์	68
5.1.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม	69
5.1.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม	72
5.1.3 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	76
5.2 เสาวัสดุผสมภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์.....	77

5.2.1	เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม	77
5.2.2	เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม	90
5.2.3	เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	106
บทที่ 6 การศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต		110
6.1	สมการสำหรับทำนายกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์	110
6.2	ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต.....	113
บทที่ 7 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับการออกแบบเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต		118
7.1	สมการสำหรับทำนายกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์	118
7.2	การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16.....	123
7.3	การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย	124
7.4	ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	130
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย.....		134
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	134
8.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง.....	136
บรรณานุกรม.....		137
ภาคผนวก ก การคำนวณกำลังของเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนดและมาตรฐาน		149
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม <i>HeuristicLab</i>		172
ภาคผนวก ค ผลของตัวแปรในสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย		176
ประวัติผู้เขียน.....		180

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัด	25
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของคานท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	27
ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_p และ c_m	30
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาสูงสุดสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	31
ตารางที่ 3.5 ประเภทเส้นโค้งการโก่งเดาะสำหรับเสาวัสดุผสม	33
ตารางที่ 3.6 ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์สำหรับเส้นโค้งการโก่งเดาะ	33
ตารางที่ 3.7 กระบวนการเข้ารหัส (encoding)	37
ตารางที่ 3.8 ผลการคัดเลือกข้อมูลโดยวิธี Roulette wheel selection	38
ตารางที่ 3.9 การครอสโอเวอร์	39
ตารางที่ 3.10 สรุปข้อมูลผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่ 3.2	43
ตารางที่ 3.11 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมของตัวอย่างที่ 3.2	44
ตารางที่ 3.12 ค่า Pearson's r squared สำหรับสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ	44
ตารางที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ 3.23	46
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์และคอนกรีตทรงกระบอก ...	47
ตารางที่ 4.2 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์	50
ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์	51
ตารางที่ 4.4 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์	55
ตารางที่ 4.5 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์	56
ตารางที่ 4.6 ฐานข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์	62
ตารางที่ 4.7 ฐานข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์	63
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม	71
ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ...	75

ตารางที่ 6.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	111
ตารางที่ 6.2 ความแม่นยำของสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ.....	111
ตารางที่ 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{11} ในสมการที่ 6.1	112
ตารางที่ 7.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	118
ตารางที่ 7.2 ความแม่นยำของสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ.....	119
ตารางที่ 7.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{21} ในสมการที่ 7.1	120
ตารางที่ 7.4 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{44} ในสมการที่ 7.5.....	121
ตารางที่ 7.5 ตัวอย่างเสาสำหรับการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย.....	127



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้างอาคารที่ใช้เสาวัสดุผสม	1
รูปที่ 1.2 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	5
รูปที่ 2.1 ผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	8
รูปที่ 2.2 การกระจายของค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณได้ต่อกำลังจากผลการทดสอบ	9
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ทำนายจากข้อกำหนด AISC 360-16 กับผลการทดสอบ สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	12
รูปที่ 2.4 ผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อค่า SRF	13
รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต.....	18
รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่คำนวณได้กับผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วย คอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด.....	19
รูปที่ 2.7 ผลของค่าอัตราส่วนกำลังสัมพัทธ์ต่อลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์	20
รูปที่ 2.8 ผลของค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกต่อลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์	20
รูปที่ 2.9 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต.....	22
รูปที่ 3.1 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาวัสดุผสมจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก ..	28
รูปที่ 3.2 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาวัสดุผสมจากวิธีสองเส้นตรงอย่างง่าย	29
รูปที่ 3.3 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด	30
รูปที่ 3.4 เส้นโค้งการโก่งเดาะตามมาตรฐาน EN 1993-1-1	34
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์แบบง่ายและการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก	34
รูปที่ 3.6 การหาค่า μ_d สำหรับการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน	35
รูปที่ 3.7 ค่าความเหมาะสมแต่ละยุคข้อมูลของตัวอย่างที่ 3.1.....	40
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี	41
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกระบวนการวิวัฒนาการสำหรับ GP.....	42

รูปที่ 3.10 แผนภาพการกระจายสำหรับสมการรูปแบบที่ 2	45
รูปที่ 3.11 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีสำหรับสมการรูปแบบที่ 2.....	45
รูปที่ 4.1 เสายาวใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางและเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด	48
รูปที่ 4.2 จำนวนและสัดส่วนของเสาวัสดุผสมแต่ละประเภทในฐานข้อมูลการทดสอบ	49
รูปที่ 4.3 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง	52
รูปที่ 4.4 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์กลาง ...	53
รูปที่ 4.5 เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม	55
รูปที่ 4.6 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง	58
รูปที่ 4.7 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์กลาง	59
รูปที่ 4.8 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง.....	61
รูปที่ 4.9 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง.....	64
รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์กลาง	65
รูปที่ 5.1 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง	69
รูปที่ 5.2 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อนเหล็ก เติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม.....	70
รูปที่ 5.3 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ Eurocode 4 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม.....	71
รูปที่ 5.4 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง	72
รูปที่ 5.5 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อนเหล็ก เติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	74
รูปที่ 5.6 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ Eurocode 4 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	75
รูปที่ 5.7 เส้นโค้งการโก่งเดาะในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	76

รูปที่ 5.8 สัดส่วนของข้อมูลเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์.....	77
รูปที่ 5.9 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดกลม (หน้าตัดอัดแน่น).....	80
รูปที่ 5.10 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดกลม (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด).....	84
รูปที่ 5.11 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดกลม ($D/t \leq 90(235/f_y)$).....	85
รูปที่ 5.12 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดกลม ($D/t > 90(235/f_y)$)	89
รูปที่ 5.13 สัดส่วนของข้อมูลเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์ 90	
รูปที่ 5.14 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น).....	92
รูปที่ 5.15 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด).....	97
รูปที่ 5.16 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t \leq 52\sqrt{235/f_y}$).....	99
รูปที่ 5.17 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t > 52\sqrt{235/f_y}$).....	103
รูปที่ 5.18 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	106
รูปที่ 5.19 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	108
รูปที่ 6.1 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันสำหรับสมการที่ 6.1.....	112
รูปที่ 6.2 แผนภาพการกระจายของกำลังที่ทำนายได้จากสมการที่ 6.1.....	113
รูปที่ 6.3 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 MPa.114	
รูปที่ 6.4 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 50 MPa.115	
รูปที่ 6.5 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 70 MPa.116	
รูปที่ 6.6 ร้อยละผลต่างของหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	117

รูปที่ 7.1 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรีสำหรับสมการที่ 7.1.....	119
รูปที่ 7.2 แผนภาพการกระจายของกำลังที่คำนวณได้จากสมการที่ 7.1.....	120
รูปที่ 7.3 การเปรียบเทียบผลของ $P\delta$ ต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด	122
รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 7.1 และข้อกำหนด AISC 360-16	123
รูปที่ 7.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วย.....	124
รูปที่ 7.6 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับวิเคราะห์และ ออกแบบเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม.....	125
รูปที่ 7.7 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 ในรูปแบบไร้หน่วย.....	126
รูปที่ 7.8 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับวิเคราะห์และออกแบบ เสา ต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม.....	127
รูปที่ 7.9 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 1 ($L/D = 5$).....	128
รูปที่ 7.10 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 2 ($L/D = 20$) ...	129
รูปที่ 7.11 เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตัวอย่างที่ 7.1.....	130
รูปที่ 7.12 กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตัวอย่างที่ 7.1.....	131
รูปที่ 7.13 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับตัวอย่างที่ 7.2.....	132

รายการสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
A_s	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ
A_{sr}	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
A_g	พื้นที่หน้าตัดรวมของเสาวัสดุผสม
B	ความกว้างภายนอกของท่อเหล็กสี่เหลี่ยม หรือ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
b	ความกว้างภายในของท่อเหล็กสี่เหลี่ยม ($B - 2t$)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเหล็กกลม
$E_{I_{eff}}$	สติเฟเนสประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสม
E_c	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก
e	ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงกระทำ
e^*	ผลรวมของระยะเยื้องศูนย์กลางและระยะโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา ($e + \delta$)
F	เขตของฟังก์ชันนอลสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์
F_{cr}	หน่วยแรงการโก่งเดาะวิกฤติ
f'_c	กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก
f_y	หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ
f_{yr}	หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม
I_c	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีต
I_s	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ
I_{sr}	โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริม
K	ตัวคูณความยาวประสิทธิภาพ
K_n	กำลังอัดในรูปแบบไร้หน่วย ($P_n/f'_c A_g$)

L	ความยาวของเสาวัสดุผสม
L_e	ความยาวประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสม (KL)
M_n	กำลังแรงดัดระบุของเสาวัสดุผสม
M_p	กำลังแรงดัดพลาสติกของหน้าตัดเสาวัสดุผสม
M_u	กำลังแรงดัดของเสาวัสดุผสมจากผลการทดสอบ
M_y	กำลังแรงดัดครากของเสาวัสดุผสม
N_{top}	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงอัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
N_{mid}	จำนวนเหล็กเสริมตำแหน่งกลางหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
N_{bot}	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงดึงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
P_e และ N_{cr}	กำลังโก่งเดาะของออยเลอร์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และ มาตรฐาน Eurocode 4
P_{no} และ $N_{pl,Rd}$	กำลังอัดตามแนวแกนระบุของหน้าตัดเสาโดยไม่คิดผลของความชะลูดตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4
P_n	กำลังอัดตามแนวแกนระบุของเสาวัสดุผสม
P_p	กำลังอัดพลาสติกของเสาวัสดุผสม
P_u	กำลังอัดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสมจากผลการทดสอบ
P_y	กำลังอัดครากของเสาวัสดุผสม
R_n	แรงดัดในรูปแบบไร้หน่วย ($M_n/f'_c A_g D$)
T	เซตของเทอร์มินอลสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์
t	ความหนาของท่อเหล็ก
α	อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (A_s/A_c)
λ_p	ขอบเขตความชะลูดสำหรับ หน้าตัดอัดแน่น/ หน้าตัดไม่อัดแน่น
λ_r	ขอบเขตความชะลูดสำหรับ หน้าตัดไม่อัดแน่น/ หน้าตัดชะลูด
$\bar{\lambda}_{EC4}$	ความชะลูดสัมพัทธ์สำหรับมาตรฐาน Eurocode 4 ($\sqrt{N_{pl,Rd}/N_{cr}}$)

λ_{AISC}	ความชะลุดัสมัพธ์สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 ($\sqrt{P_{no}/P_e}$)
σ_u	หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (P_u/A_g)
δ	ระยะโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา
ξ	ตัวประกอบการโอบรัด ($A_s f_y / A_c f'_c$)
ϕ_b	ตัวคูณความต้านทานสำหรับคานวัสดุผสม ($\phi_b = 0.90$)
ϕ_c	ตัวคูณความต้านทานสำหรับเสาวัสดุผสม ($\phi_c = 0.75$)
ϕ_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว
ϕ_t	เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก
χ	ตัวประกอบลดค่าเพื่อพิจารณาผลของการโก่งเดาะของเสา

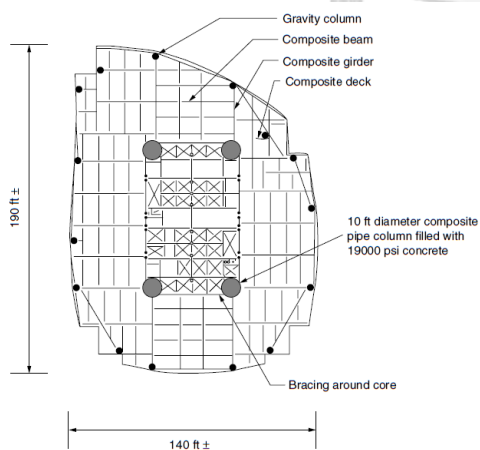


บทที่ 1

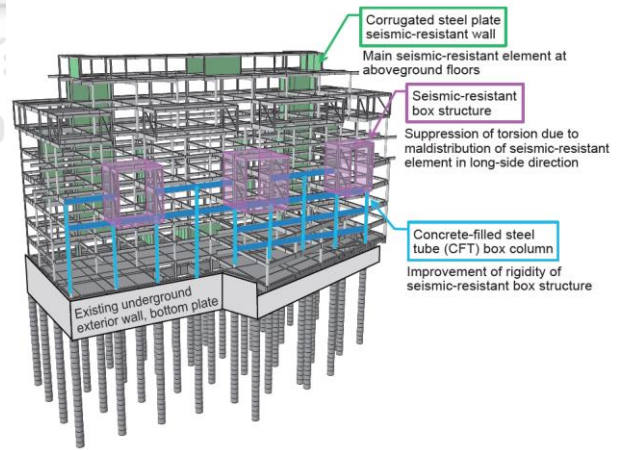
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เสาวัสดุผสม (composite column) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (concrete-encased steel columns, CES) และ เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (concrete filled-steel tube columns, CFST) โดยเสาวัสดุผสมได้รวมลักษณะเด่นของเหล็ก รูปพรรณและคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกัน สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตนั้น คอนกรีตทำหน้าที่ป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของเหล็ก รูปพรรณและเป็นฉนวนป้องกันเหล็ก รูปพรรณจากอ็อกซิไดซ์ และสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ท่อเหล็กทำหน้าที่เพิ่มกำลังและความเหนียว (strength and ductility) ให้คอนกรีตจากผลของการโอบรัด (confining effect) นอกจากนี้ ท่อเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบสำหรับหล่อคอนกรีตในขณะเดียวกัน ดังประโยชน์ที่กล่าวมา ทำให้เสาวัสดุผสมเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในงานโครงสร้างสะพาน และ โครงสร้างอาคารสูง เช่น อาคาร Two Union Square สหรัฐอเมริกา และ อาคาร Hirakata T-Site ประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยในการออกแบบเสาวัสดุผสมนั้น กำลังของเสาวัสดุผสมสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 [1] และ มาตรฐาน Eurocode 4 [2] อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านี้มีขอบเขตการใช้งานทั้งในด้านคุณสมบัติกำลังของวัสดุ ปริมาณเหล็ก รูปพรรณ และความชะลูดของหน้าตัดท่อเหล็ก ที่แตกต่างกันในแต่ละข้อกำหนดและมาตรฐาน



(ก) อาคาร Two Union Square [3]



(ข) อาคาร Hirakata T-Site [4]

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้างอาคารที่ใช้เสาวัสดุผสม

สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตนั้น คอนกรีตแกนกลาง (concrete core) มีกำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการโอบรัดจากท่อเหล็กดั่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยกำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength of concrete) นอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต ยังขึ้นอยู่กับขนาดของคอนกรีตด้วย ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีขนาดใหญ่ขึ้น [5] ดังนั้น ผลกระทบของขนาด (size effect) อาจเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของขนาดสำหรับคอนกรีตภายใต้การโอบรัด (confined concrete) อาจมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติ (unconfined concrete) Wang และคณะ [6] ได้ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมจำนวน 36 ตัวอย่าง โดยเสามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กตั้งแต่ 150 ถึง 469 มิลลิเมตร อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (steel ratio) ตั้งแต่ 4% ถึง 10% และกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 62 เมกะปาสคาล จากผลการทดสอบพบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุด (peak axial stress) ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และพบว่าผลกระทบของขนาดเสามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สมการออกแบบตามข้อกำหนดและมาตรฐานในปัจจุบันยังไม่พิจารณาถึงผลกระทบของขนาดเสาคือกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

ในการวิเคราะห์และออกแบบเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดและแรงดัดกระทำร่วมกัน กำลังที่เสาสามารถรับได้สามารถพิจารณาได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด (strength interaction diagram) ในกรณีเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforce concrete columns) ACI Handbook Volume 3: Design Aids [7] ได้กำหนดกราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับช่วยออกแบบ (design aids) ในรูปแบบไร้หน่วย (non-dimensional interaction diagram) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในข้อกำหนดและมาตรฐานปัจจุบันยังไม่มีเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับการช่วยวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ (1) ประเมินความแม่นยำและความปลอดภัยของสมการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 โดยใช้ฐานข้อมูลผลการทดสอบเสาวัสดุผสมที่รวบรวมขึ้นจากงานวิจัยในอดีต (2) ศึกษาผลกระทบของขนาดเสาคือหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากสมการทำนายกำลังซึ่งพัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ (symbolic regression) บนพื้นฐานของฐานข้อมูลการทดสอบ และ (3) นำเสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ที่ใช้ทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์จากการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสม
2. ศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมจากสมการทำนายกำลังซึ่งพัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์
3. นำเสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขตของการศึกษา ดังนี้

1. ประเภทเสาวัสดุผสมที่พิจารณาในการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานประกอบด้วย
 - เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วน (fully CES)
 - เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม (circular CFST)
 - เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square CFST)
2. พิจารณาเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ใช้หน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช (H-shape) และหน้าตัดรูปตัวไอ (I-shape) เท่านั้น
3. พิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมตามยาว (reinforcing steel rebar) เท่านั้น
4. ฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสมได้จากการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยตั้งแต่ ค.ศ. 1970 ถึงปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ที่ทำให้เกิดแรงดัดรอบแกนหลักเท่านั้น
5. การวิเคราะห์การถดถอยใช้หลักการโปรแกรมเชิงพันธุกรรม (genetic programming) ภายใต้ขั้นตอนวิธี (algorithms) ที่มีโปรแกรม *HeuristicLab* เท่านั้น

1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

แนวทางเบื้องต้นในการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ ดังนี้

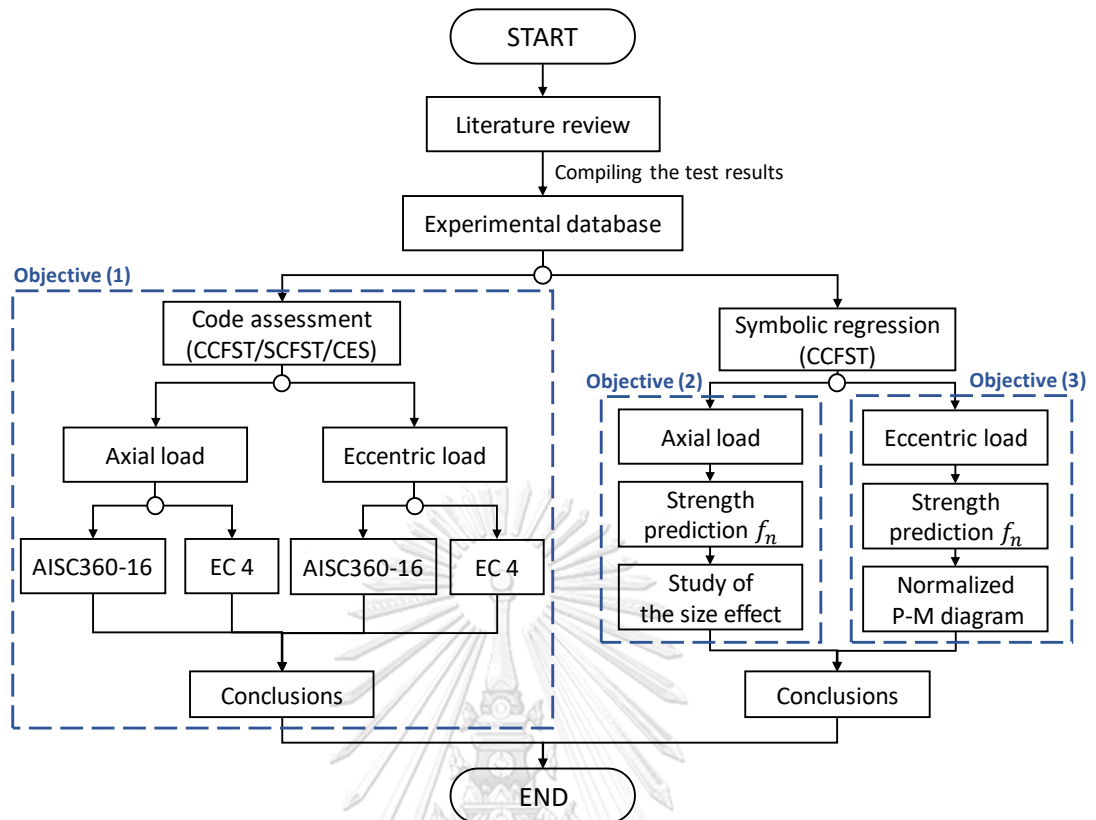
1. ศึกษาข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ที่ใช้ทำนายกำลังของเสาวัสดุผสม
2. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการทดสอบและการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาวัสดุผสม
3. ศึกษาหลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์
4. รวบรวมผลการทดสอบเสาวัสดุผสมจากงานวิจัยในอดีตและจำแนกผลการทดสอบตามประเภทและลักษณะการทดสอบเสาวัสดุผสมเพื่อสร้างฐานข้อมูลการทดสอบ
5. ประเมินความแม่นยำและความปลอดภัยของสมการในข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ที่ใช้ทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์โดยทำการตรวจสอบกับฐานข้อมูลผลการทดสอบ
6. ใช้หลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ฐานข้อมูลผลการทดสอบ เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม
7. ศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมโดยใช้สมการทำนายกำลังที่พัฒนาขึ้น
8. สร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมโดยใช้สมการทำนายกำลังที่พัฒนาขึ้น
9. สรุปและเรียบเรียงผลการวิจัย

โดยขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1.2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ

1. ทราบถึงช่องว่างของงานวิจัย (research gap) ที่เกี่ยวข้องกับเสาวัสดุผสมจากการพิจารณาฐานข้อมูลการทดสอบ
2. ทราบถึงความแม่นยำและความปลอดภัยของสมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ที่ใช้ทำนายกำลังของเสาวัสดุผสม
3. ทราบถึงกระบวนการของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างอื่น ๆ ได้
4. ทราบถึงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
5. สามารถนำแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้



รูปที่ 1.2 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัย

จากการที่เสาว์สดผสมถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างอย่างแพร่หลายดังที่กล่าวในบทที่ 1 ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของเสาว์สดผสมเป็นที่สนใจในกลุ่มผู้วิจัยจำนวนมาก โดยในบทที่ 2 นี้ได้รวบรวมและสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาว์สดผสมทั้งเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต โดยรายละเอียดสามารถแสดงได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

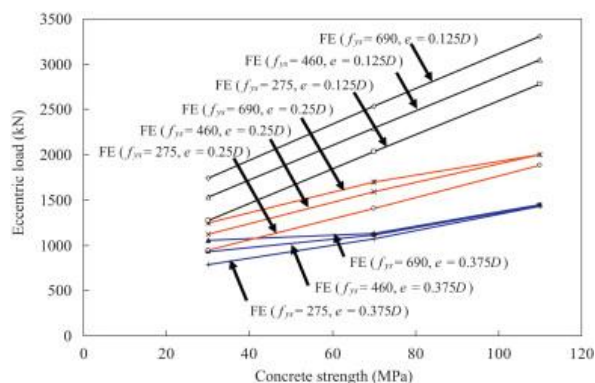
2.1 การทดสอบและประเมินกำลังของเสาว์สดผสมประเภทเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

ในอดีตมีการศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งจากการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข นอกจากนี้งานวิจัยบางส่วนยังได้ตรวจสอบความแม่นยำของสมการในมาตรฐานกับผลการทดสอบหรือผลการวิเคราะห์ เช่น Mirza และคณะ [8] ทำการทดสอบคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีความขะลุดสูงจำนวน 16 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำด้านข้างเพื่อศึกษาผลของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของแผ่นครีบริบ (steel ribs) และคอนกรีต และเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการในมาตรฐาน ACI 318-95 และ Eurocode 4 ที่ใช้ทำนายกำลังของคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยผลการศึกษาพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างครีบริบและคอนกรีตมีผลน้อยต่อกำลังของคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและกำลังของคาน-เสาที่คำนวณจากสมการในมาตรฐาน ACI 318-95 และ Eurocode 4 มีความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดสอบโดยค่ากำลังที่คำนวณได้จากสมการของ ACI 318-95 มีความปลอดภัยมากกว่าและมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (coefficient of variation) น้อยกว่ากำลังที่คำนวณจากสมการของ Eurocode 4

Kim และคณะ [9] ทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วนและบางส่วนจำนวน 7 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ ซึ่งคอนกรีตและเหล็กที่ใช้เป็นวัสดุกำลังสูง ($f'_c = 94$ และ 113 เมกะปาสคาล, $f_y = 806$ และ 913 เมกะปาสคาล) จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่สร้างตามวิธีของมาตรฐานกับผลการทดสอบพบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามมาตรฐาน Eurocode 4 และ Architectural Institute of Japan (AIJ) ทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบ เนื่องจากคอนกรีตเกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กจะสามารถพัฒนากำลังได้ถึงกำลังพลาสติก สำหรับข้อกำหนด AISC 360-10 (วิธีที่ 1: พิจารณามบนพื้นฐานของหน้าตัดเหล็กเพียงลำพัง) พบว่า สามารถทำนายกำลังได้อย่างแม่นยำสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน และทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วน และสำหรับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างด้วยวิธีความสอดคล้องความเครียดตามข้อกำหนด ACI 318-08 พบว่า กำลังที่ทำนายได้มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบเนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงผลของการไอบรัด

Mirza และ Skrabek [10, 11] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนกำลังทางทฤษฎีต่อกำลังระบุของคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เมื่อกำลังทางทฤษฎีหาได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาความแปรปรวนของคุณสมบัติวัสดุด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo technique) และกำลังระบุหาได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-89 จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีต ค่าความชะลุดของเสา (L/r) และค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ (e/h) ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอัตราส่วนกำลัง โดยค่าอัตราส่วนกำลังจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนการเยื้องศุนย์มีค่าน้อย

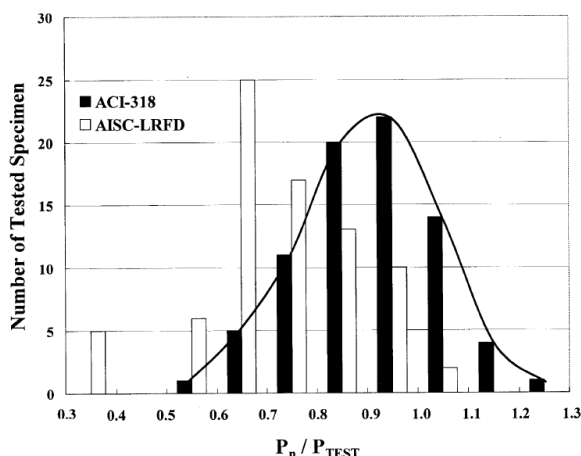
Ellobody และ Young [12] ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยพบว่า สำหรับเสาที่มีค่าความชะลุดสัมพัทธ์ ($\bar{\lambda}$) สูง กำลังครากของเหล็กรูปพรรณส่งผลน้อยต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับกำลังที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-05 และ Eurocode 4 พบว่า สมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังรับแรงอัดได้อย่างแม่นยำสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตและกำลังครากของเหล็กอยู่ภายใต้ขอบเขตที่มาตรฐานกำหนดไว้ และการคำนวณกำลังอัดของเสาตามข้อกำหนด AISC360-05 ค่อนข้างปลอดภัยสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีค่ากำลังของวัสดุภายใต้และเกินขอบเขตที่กำหนด นอกจากนี้ Ellobody และคณะ [13] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศุนย์โดยพบว่า การเพิ่มกำลังครากของเหล็กส่งผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหากแรงกระทำเยื้องศุนย์มีค่าน้อย ($0.125D$) และสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงกระทำเยื้องศุนย์ที่มีค่ามาก ($0.375D$) พบว่า การเพิ่มกำลังครากของเหล็กส่งผลอย่างมีนัยสำคัญสำหรับเสาที่มีกำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่า 70 เมกะปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับกำลังที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 4 พบว่าวิธีตามมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศุนย์ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2.1 ผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [13]

El-Tawil และคณะ [14] ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 318-92 และข้อกำหนด AISC-LRFD (1993) โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ไฟเบอร์เอลิเมนต์พบว่า สำหรับเสาสั้นและเสาขลุ่ย กำลังของคาน-เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่คำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-92 มีค่ามากกว่ากำลังที่ได้จากแบบจำลองไฟเบอร์เอลิเมนต์เล็กน้อย และพบว่ากำลังของเสาสั้นที่คำนวณตามข้อกำหนด AISC-LRFD นั้น มีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้จากแบบจำลองไฟเบอร์เอลิเมนต์ถึงร้อยละ 41 นอกจากนี้ สำหรับเสาขลุ่ยที่มีค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณสูง พบว่ากำลังที่คำนวณได้ตามข้อกำหนด AISC-LRFD มีค่าใกล้เคียงกับกำลังที่ได้จากแบบจำลองไฟเบอร์เอลิเมนต์ และสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังสูงนั้น El-Tawil และ Deierlein [15] พบว่ากำลังที่คำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-92 มีความไม่ปลอดภัย (unconservative) เล็กน้อยเมื่อแรงตามแนวแกนมีค่ามาก และกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังสูงที่คำนวณตามข้อกำหนด AISC-LRFD นั้น มีความปลอดภัยสูง (overly conservative) เมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่ามาก

Weng และ Yen [16] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมการในมาตรฐาน ACI 318-99 และ AISC-LRFD (1993) ที่ใช้ทำนายกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยได้รวบรวมผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจำนวน 78 ตัวอย่าง จากงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้ประเมินความแม่นยำของสมการของมาตรฐานและข้อกำหนด จากผลการวิจัยพบว่า สมการในมาตรฐาน ACI 318-99 สามารถทำนายกำลังได้แม่นยำกว่าสมการในข้อกำหนด AISC-LRFD เมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่า 2% ถึง 12% ซึ่งสมการในข้อกำหนด AISC-LRFD จะมีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าน้อยกว่า 4% นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณได้จากมาตรฐาน ACI 318-99 ต่อกำลังจากผลการทดสอบจะพบว่า มีลักษณะการกระจายแบบปกติรูประฆังคว่ำ (bell-shaped normal distribution curve) โดยมีค่าสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.9 และ 1.0 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การกระจายของค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณได้ต่อกำลังจากผลการทดสอบ [16]

Mirza และคณะ [17] ได้รวบรวมผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจากงานวิจัยในอดีตจำนวน 150 ตัวอย่าง เพื่อใช้ประเมินความแม่นยำของสมการในมาตรฐาน ACI 318-02, Eurocode 4 และ AISC-LRFD (1999) โดยได้พิจารณาตัวแปรออกแบบที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนกำลัง (strength ratio) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก กำลังที่ได้จากผลการทดสอบหารด้วยกำลังที่คำนวณจากมาตรฐาน โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าอัตราส่วน L/h ไม่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณจากทุกมาตรฐาน ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง (e/h) ค่าดัชนีเหล็กรูปพรรณ (structural steel index, $\rho_{ss}f_{yss}/f'_c$) และค่ากำลังอัดของคอนกรีต (f'_c) ไม่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณจากมาตรฐาน Eurocode 4 และ ACI 318-02 ในทางกลับกัน ตัวแปรทั้งสามส่งผลต่อค่าอัตราส่วนกำลังที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC-LRFD โดยพบว่า กำลังที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC-LRFD นั้นเหมาะสมสำหรับเสาที่มีค่าดัชนีเหล็กรูปพรรณมากกว่า 1.0

Soliman และคณะ [18] ได้ตรวจสอบกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่คำนวณจากมาตรฐาน ECP (Egyptian code), ACI 318-08, AISC 360-10 และ BS-5400 จากการเปรียบเทียบกำลังที่คำนวณได้กับผลการทดสอบพบว่า มาตรฐานดังกล่าวสามารถทำนายกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกนได้อย่างปลอดภัย โดยกำลังที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI 318-08 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด

Chen [19] ได้ตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณกำลังรับแรงดัดขององค์อาคารเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยเปรียบเทียบกำลังที่คำนวณได้กับผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีตจำนวน 34 ตัวอย่าง จากผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงดัดที่คำนวณตามวิธีการรวมหน่วยแรงอีลาสติก (superposition of elastic stresses) และวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกบนหน้าตัดเหล็ก (plastic stress distribution on the steel section) มีค่าต่ำกว่าผลการ

ทดสอบอย่างมาก และสำหรับวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกบนหน้าตัดวัสดุผสม (plastic stress distribution on the composite section) และวิธีความสอดคล้องของความเครียด (strain compatibility) สามารถทำนายกำลังได้อย่างแม่นยำทั้งสำหรับองค์อาคารเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มี และไม่มีตัวยึดรับแรงเฉือน (shear anchors) นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลกระทบของเหล็กเสริมตามยาวต่อความความแม่นยำในการทำนายกำลังรับแรงดัดพบว่า ค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึง (ρ) ค่าอัตราส่วนพื้นที่ปีกต่อพื้นที่หน้าตัดเหล็ก (R_f) และค่าอัตราส่วนความลึกของหน้าตัดเหล็กต่อความลึกของคานเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (R_d) ไม่ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการทำนายกำลังรับแรงดัด และจากการพิจารณาค่าอัตราส่วนรวมของตัวแปรดังกล่าว ($R_f R_d / \rho$) พบว่า เมื่อค่าอัตราส่วน $R_f R_d / \rho$ มีค่ามากกว่า 40 ค่ากำลังรับแรงดัดที่คำนวณตามข้อกำหนดจะมีค่าน้อยกว่ากำลังจากผลการทดสอบ



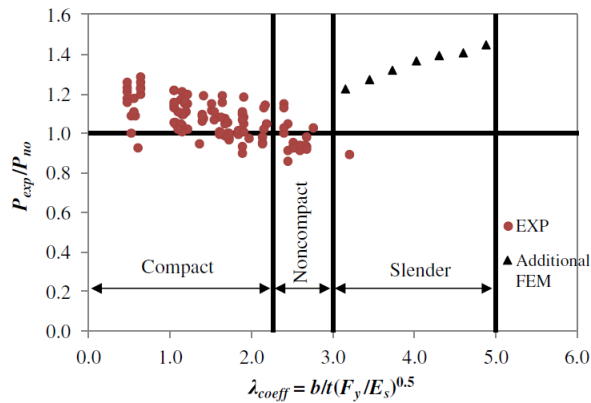
2.2 การทดสอบและประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมประเภทเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเป็นที่สนใจของผู้วิจัยจำนวนมากเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยจากงานวิจัยในอดีตมีการศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตทั้งหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดกลมซึ่งมีพฤติกรรมและการออกแบบที่แตกต่างกัน [20, 21] ดังนั้น การทบทวนงานวิจัยในส่วนนี้จึงแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

2.2.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

งานวิจัยบางส่วนได้ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำตามแนวแกน เช่น Han [22] ได้ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 24 ตัวอย่าง โดยพบว่า ค่าอัตราส่วน $A_s f_y / A_c f_c'$ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังและความเหนียวของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต นอกจากนี้ จากการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่ทำนายได้ตามข้อกำหนดและมาตรฐานพบว่า สมการในข้อกำหนดและมาตรฐาน AISC-LRFD (1994), AIJ, GJB 4142-2000 และ Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย Liu และคณะ [23] ทดสอบเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงอัดตามแนวแกนจำนวน 22 ตัวอย่าง พบว่า กำลังที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดและมาตรฐาน AISC-LRFD (1994), ACI 318-95 และ Eurocode 4 มีความปลอดภัย โดยสมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด

Lai และ Varma [24] ได้รวบรวมผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 124 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของการขยายขอบเขตด้านกำลังของวัสดุสำหรับสมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC 360-16 โดยพิจารณาเสาสั้นที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กมากกว่า 525 เมกะปาสคาล และกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่า 70 เมกะปาสคาล ซึ่งจากการประเมินพบว่า สมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC 360-16 สามารถทำนายกำลังอัดได้อย่างแม่นยำสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดอัดแน่น สำหรับเสาที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นนั้น กำลังที่ทำนายได้มีค่าไม่ปลอดภัยเล็กน้อย นอกจากนี้เนื่องจากผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดชะลูดมีจำนวนจำกัด จึงได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาหน้าตัดชะลูดเพื่อใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของกำลังที่ทำนายได้จากสมการตามข้อกำหนด โดยจากผลการตรวจสอบพบว่า กำลังที่ทำนายจากสมการตามข้อกำหนดมีความปลอดภัยสูงสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดชะลูดดังแสดงในรูปที่ 2.3

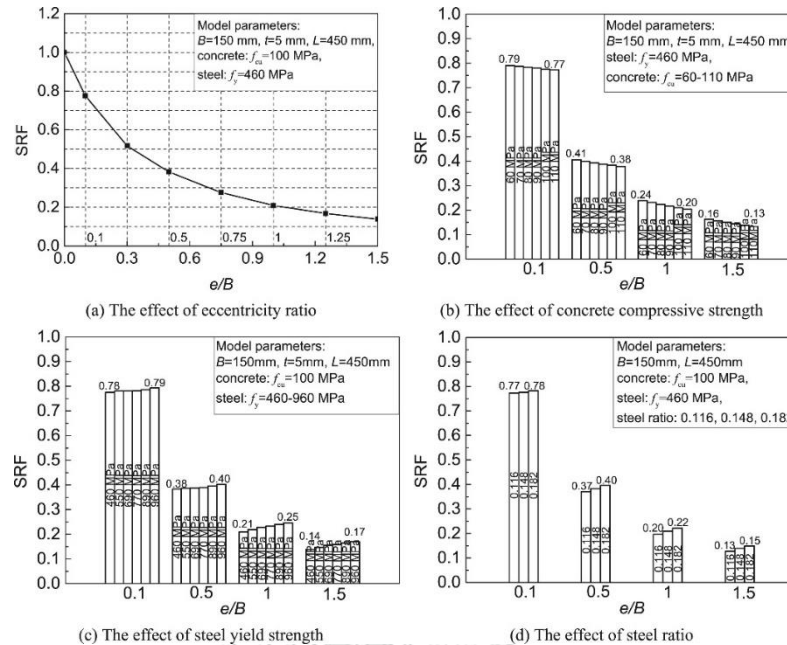


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ทำนายจากข้อกำหนด AISC 360-16 กับผลการทดสอบ สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [24]

สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดและแรงดัดร่วมกันนั้น Figueirido และคณะ [25] ได้ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 90$ เมกะปาสกาล) ภายใต้แรงอัดและแรงดัดแบบคงที่และไม่คงที่ตลอดความยาว จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ กำลังที่ทำนายได้ตามข้อกำหนดและมาตรฐานพบว่า สมการในข้อกำหนด AISC 360-10 และ มาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงได้อย่างปลอดภัยสำหรับกรณีที่มีแรงอัดมีค่ามาก อย่างไรก็ตาม เมื่อความยาวของเสาและระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่า กำลังที่คำนวณได้มีความไม่ปลอดภัยสูงขึ้น Varmar และคณะ [26] ได้ศึกษาพฤติกรรมของคาน-เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง โดยทำการทดสอบคาน-เสาจำนวน 8 ตัวอย่าง ($f_y = 317$ และ 552 เมกะปาสกาล, $f'_c = 110$ เมกะปาสกาล) และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างตามข้อกำหนดและมาตรฐานพบว่า ข้อกำหนด AISC-LRFD (1999) ทำนายกำลังของคาน-เสาได้น้อยกว่าผลการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ มาตรฐาน AIJ สามารถทำนายกำลังได้อย่างแม่นยำแต่มีแนวโน้มไม่ปลอดภัยเมื่อใช้ท่อเหล็กที่มีกำลังครากสูง มาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มไม่ปลอดภัยสำหรับเหล็กที่มีกำลังครากสูง และมาตรฐาน ACI 318-99 สามารถทำนายกำลังของคาน-เสาได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับข้อกำหนดและมาตรฐานอื่นดังที่กล่าวมา

Li และคณะ [27] ได้ทดสอบเสาสั้นจำนวน 12 ตัวอย่าง และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง พบว่า กำลังอัดของเสาเมื่อเทียบกับกำลังอัดของหน้าตัด (P/P_u หรือ SRF) ที่ค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ มีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม กำลังอัดของเสามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังครากของเหล็กและค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 และเมื่อพิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปทั่วไป ($P/P_u - M/M_u$) พบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่า M/M_u จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อกำลังครากของท่อเหล็กและค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่า

เพิ่มขึ้นค่า M/M_u จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างจากข้อกำหนด AISC 360-10 พบว่ามีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อค่า SRF [27]

ผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากงานวิจัยในอดีตรวบรวมโดย Zhang และ Shahrooz [28] เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของมาตรฐาน ACI 318-95 และข้อกำหนด AISC-LRFD (1994) ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า กำลังที่คำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-95 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าสำหรับเสาสั้นที่ใช้ท่อเหล็กกำลังปกติ และพบว่าข้อกำหนดและมาตรฐานทั้งสองสามารถทำนายกำลังได้อย่างเหมาะสมสำหรับเสายาว นอกจากนี้ สำหรับเสาที่ใช้ท่อเหล็กกำลังสูงพบว่า กำลังที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและมาตรฐานทั้งสองมีความปลอดภัยสูง Lai และคณะ [21] ได้ศึกษาที่มาของการออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุดภายใต้แรงอัดตามแนวแกน แรงดัด และ แรงอัดและแรงดัดร่วมกันตามข้อกำหนด AISC 360-10 และได้รวบรวมผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุดสร้างเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC 360-10 และเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยฐานข้อมูลประกอบด้วยผลการทดสอบเสาจำนวน 41 ตัวอย่าง คาน 4 ตัวอย่าง และ คาน-เสา 17 ตัวอย่าง ซึ่งจากการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 กับผลการทดสอบพบว่า กำลังที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดมีความปลอดภัยสำหรับการออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุด

2.2.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

การศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมเป็นที่สนใจของผู้วิจัยจำนวนมากเนื่องจากผลของการโอบรัดของคอนกรีตที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม [29] โดยงานวิจัยบางส่วนได้ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตามแนวแกน เช่น Yu และคณะ [30] ทดสอบเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 17 ตัวอย่าง โดยพิจารณาคอนกรีตแบบปกติ (normal concrete) และคอนกรีตสมรรถนะสูง (self-compacting concrete) จากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบพบว่า สมการตามมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตแบบปกติและคอนกรีตสมรรถนะสูงได้อย่างแม่นยำ Zhu และคณะ [31] ทดสอบเสาท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตโดยพิจารณาเสาสั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ (550 มิลลิเมตร) จำนวน 3 ตัวอย่าง จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่ทำนายได้จากมาตรฐานพบว่า สมการตามมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาตัวอย่างได้อย่างแม่นยำและปลอดภัย Ellobody และคณะ [32] ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตโดยพิจารณาค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (D/t) ระหว่าง 30 ถึง 70 และค่ากำลังอัดของคอนกรีตระหว่าง 30 ถึง 110 เมกะปาสคาล พบว่า สมการตามข้อกำหนดและมาตรฐาน AISC-LRFD (1999), ACI 318-99 และ AS 3600 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่กำลังที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 4 (1994) ค่อนข้างไม่ปลอดภัย

เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 15 ตัวอย่าง ทดสอบโดย Giakoumelis และ Lam [33] ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 60 และ 100 เมกะปาสคาล จากผลการศึกษาพบว่า สมการของมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้ดีทั้งสำหรับคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ในขณะที่กำลังของเสาที่คำนวณโดยมาตรฐาน ACI 318-95 และ AS มีค่าต่ำกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบเนื่องจากมาตรฐานทั้งสองไม่พิจารณาผลของการโอบรัดของท่อเหล็ก Ekmekyapar และ AL-Eliwi [34] ทำการทดสอบและรวบรวมผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีตของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกนรวม 257 ตัวอย่าง เพื่อใช้ประเมินความแม่นยำของสมการในข้อกำหนด AISC 360-10 และมาตรฐาน Eurocode 4 โดยจากผลการศึกษาพบว่า กำลังของเสาที่คำนวณจากมาตรฐาน Eurocode 4 มีค่าสูงกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบเมื่อค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (λ) มีค่าน้อยกว่า 0.4 และเมื่อค่าความขรุขระสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น กำลังที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและมาตรฐานจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กได้อย่างแม่นยำทั้งภายในขอบเขตและเกินขอบเขต (ขอบเขตอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (D/t) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (δ) กำลัง

ครากของเหล็ก และกำลังอัดของคอนกรีต) ที่ข้อกำหนดและมาตรฐานกำหนดไว้ ส่วนสมการของข้อกำหนด AISC360-10 มีความปลอดภัยสูงในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

ผลการทดสอบเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตามแนวแกนจำนวน 250 ตัวอย่าง ($f_y = 185.7$ ถึง 853.0 เมกะปาสคาล, $f'_c = 15.0$ ถึง 130.2 เมกะปาสคาล) จากงานวิจัยในอดีตรวบรวมโดย Lu และ Zhao [35] เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำของสมการในข้อกำหนดและมาตรฐาน ACI 318-05, AISC-LRFD (2005), AIJ (2001), Eurocode 4 (2004) และ DL/T (1999) พบว่าค่าขอบเขตสูงสุดของกำลังวัสดุและค่าขอบเขตความกว้างต่อความหนา (D/t) ที่แต่ละมาตรฐานกำหนดไว้สามารถเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งนอกจากนี้ Lu และ Zhao [35] ยังได้เสนอสมการในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตโดยแต่ละสมการจะมีรูปแบบสอดคล้องกับรูปแบบสมการเดิมของแต่ละข้อกำหนดและมาตรฐาน และจากการตรวจสอบกำลังที่ทำนายได้จากสมการที่เสนอกับผลการทดสอบพบว่า สมการที่เสนอสามารถทำนายกำลังได้อย่างแม่นยำทั้งสำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ใช้วัสดุกำลังปกติและวัสดุกำลังสูง

สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดและแรงดัดร่วมกันนั้น Zeghiche และ Chaoui [36] ได้ทดสอบเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 27 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ โดยพิจารณาทั้งกรณีที่เกิดการดัดแบบโค้งเดี่ยว (single curvature bending) และแบบโค้งคู่ (double curvature bending) จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่ทำนายได้จากมาตรฐานพบว่า สมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังได้อย่างแม่นยำสำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ กรณีที่เกิดการดัดแบบโค้งเดี่ยว แต่สำหรับกรณีที่เกิดการดัดแบบโค้งคู่นั้นพบว่ากำลังที่คำนวณได้จากมาตรฐาน Eurocode 4 มีค่าไม่ปลอดภัย Lee และคณะ [37] ได้ทดสอบเสาสั้นต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 11 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังครากของเหล็กมากกว่า 450 เมกะปาสคาล และกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 31.5 และ 59 เมกะปาสคาล เสาตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุดถึง 600 มิลลิเมตร ผลจากการศึกษาพบว่า สมการของข้อกำหนด AISC 360-05 สามารถทำนายกำลังของเสาภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ ในขณะที่สมการของมาตรฐาน Eurocode 4 ทำนายกำลังได้สูงกว่ากำลังที่รับได้จริง Moon และคณะ [38] ได้ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัด แรงดัด และแรงกระทำร่วมกัน โดยพิจารณาทั้งกรณีที่มีเหล็กเสริมและไม่มีเหล็กเสริมภายใน จากการเปรียบเทียบกำลังที่ทำนายได้จากมาตรฐาน Eurocode 4 และข้อกำหนด AISC 360-10 กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีตพบว่า มาตรฐานและข้อกำหนดสามารถทำนายกำลังรับแรงอัด

และแรงตัดได้อย่างแม่นยำ และพบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐานและข้อกำหนดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันและมีความปลอดภัยสูงในการทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

Portolés และคณะ [39] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง โดยทำการทดสอบเสายาวจำนวน 37 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ จากการทดสอบพบว่า เมื่อเสามีความขรุขระและระยะเยื้องศูนย์ที่มาก การใช้คอนกรีตกำลังสูงไม่ส่งผลให้กำลังสูงสุดของเสาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตปกติ นอกจากนี้ ยังได้ตรวจสอบผลของกำลังอัดของคอนกรีต อัตราส่วนการโอบรัด (θ) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (λ) ที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายกำลังตามมาตรฐาน Eurocode 4 โดยพบว่า สมการของมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างปลอดภัยแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเกินขอบเขตที่มาตรฐานกำหนดไว้ ในขณะเดียวกัน เมื่ออัตราส่วนการโอบรัดมีค่ามาก หรือ เมื่อค่าความขรุขระสัมพัทธ์มีค่าน้อย กำลังที่ทำนายได้จะมีค่ามากกว่ากำลังที่ได้จากผลการทดสอบ

O'Shea และ Bridge [40] ได้ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กผนังบางเติมด้วยคอนกรีตพบว่า สมการของมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กผนังบางเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดไม่เกิน 50 เมกะปาสคาล ได้อย่างปลอดภัยโดยไม่พิจารณาผลของการโก่งเดาะเฉพาะที่ นอกจากนี้ ยังพบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างโดยพิจารณาหน่วยแรงพลาสติกเต็มรูปแบบ (full plasticity) นั้น ไม่เหมาะสมในการทำนายกำลังสำหรับเสาท้อเหล็กผนังบางเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f_c' = 100$ เมกะปาสคาล) Roeder และคณะ [41] ได้รวบรวมผลการทดสอบเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 122 ตัวอย่าง เพื่อใช้ตรวจสอบการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดและแรงดัดร่วมกันพบว่า วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกสามารถทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการคำนวณ นอกจากนี้ ยังได้เสนอสมการรูปแบบปิด (closed-form) เพื่อใช้ในการคำนวณกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตบนพื้นฐานของวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก

นอกจากนี้ งานวิจัยบางส่วนได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตทั้งประเภทหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดกลม เช่น Inai และคณะ [42] ศึกษาพฤติกรรมของคาน-เสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ($f_c' = 40$ ถึง 90 เมกะปาสคาล, $f_y = 400$ ถึง 780 เมกะปาสคาล) โดยทดสอบเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดกลมภายใต้แรงกระทำด้านข้างร่วมกับแรงกระทำตามแนวแกนทั้งแรงอัดและแรงดึง Sakino และคณะ [43] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตโดยการทดสอบเสาสั้นจำนวน 114 ตัวอย่าง จากผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของหน้าตัด เนื่องจากผลของการโอบรัดที่ดีของท้อเหล็กกลม และสำหรับเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัด

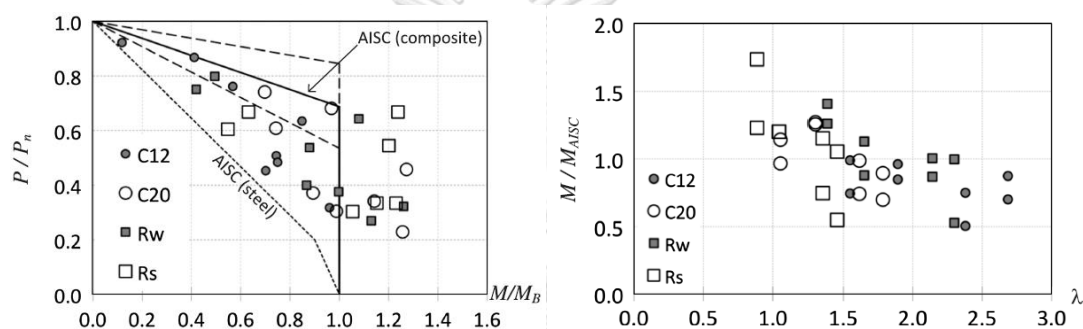
สี่เหลี่ยมที่มีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t) สูง กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของหน้าตัดเนื่องจากผลของการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็ก

Schneider [44] ทดสอบเสาสี่เหลี่ยมเสริมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 14 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำตามแนวแกน ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา อยู่ระหว่าง 17 ถึง 50 และค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/D) ระหว่าง 4 ถึง 5 โดยได้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่คำนวณได้จากข้อกำหนดพบว่า สมการของข้อกำหนด AISI-LRFD (1994) สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย Xiong และคณะ [45] ทดสอบเสาสี่เหลี่ยมกำลังสูงเสริมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 50$ ถึง 190 เมกะปาสกาล, $f_y = 300$ ถึง 780 เมกะปาสกาล) หน้าตัดกลมจำนวน 16 ตัวอย่าง และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 10 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่คำนวณได้จากมาตรฐานพบว่า สมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กกำลังสูงเสริมด้วยคอนกรีตกำลังสูงได้อย่างปลอดภัยเมื่อไม่พิจารณาผลของการโอบรัด นอกจากนี้ Xiong และคณะ [46] ได้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 161$ ถึง 186 เมกะปาสกาล, $f_y = 401$ ถึง 756 เมกะปาสกาล) จำนวน 14 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์พบว่า กำลังรับแรงอัดที่คำนวณได้มีความปลอดภัยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ และสำหรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์นั้น ในการออกแบบควรใช้ค่าสัมประสิทธิ์ α_M เท่ากับ 0.8 ในการทำนายกำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตกำลังสูง

Aslani และคณะ [47] รวบรวมผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตกำลังสูงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 306 ตัวอย่าง และหน้าตัดกลมจำนวน 191 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการพัฒนาสมการทำนายกำลังและเพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายกำลังของมาตรฐานต่าง ๆ โดยพบว่า สมการในมาตรฐาน AS 4100, AS 3600, ACI และ Eurocode 4 มีความแม่นยำสูงในการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตสำหรับเสาสี่เหลี่ยม และสมการในมาตรฐาน AS 5100.6 และ Eurocode 4 มีความแม่นยำสูงในการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตสำหรับเสายาว Kirada [48] ได้รวบรวมงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีต เพื่อใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับกำลัง ความแข็ง และความเหนียวของเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตโดยพบว่า เสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตมีความแข็งและความเหนียวมากกว่าเสาเหล็กและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป นอกจากนี้ จากการพิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตพบว่า ลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เปลี่ยนแปลง

ตามค่าอัตราส่วน $\bar{\gamma}$ ซึ่งคำนวณได้จากกำลังของหน้าตัดเหล็กส่วนด้วยกำลังของหน้าตัดเสาวัสดุผสม โดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จะมีลักษณะเล็กลงเมื่อค่า $\bar{\gamma}$ เพิ่มขึ้น

Perea และคณะ [49-51] ได้ทำการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเท่าขนาดจริง (full scale test) ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดร่วมกัน จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างตามข้อกำหนด AISC 360-10 พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างตามวิธีสองเส้นตรงอย่างง่าย (simplified bilinear) มีความปลอดภัยสูงสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มี ค่าความชะลูดของเสา (KL/r) น้อยกว่า 1.5 อย่างไรก็ตาม สำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มี ค่าความชะลูดของเสามากกว่า 1.5 พบว่า กำลังจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามวิธีสองเส้นตรงอย่างง่ายมี ค่ามากกว่ากำลังจากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.5

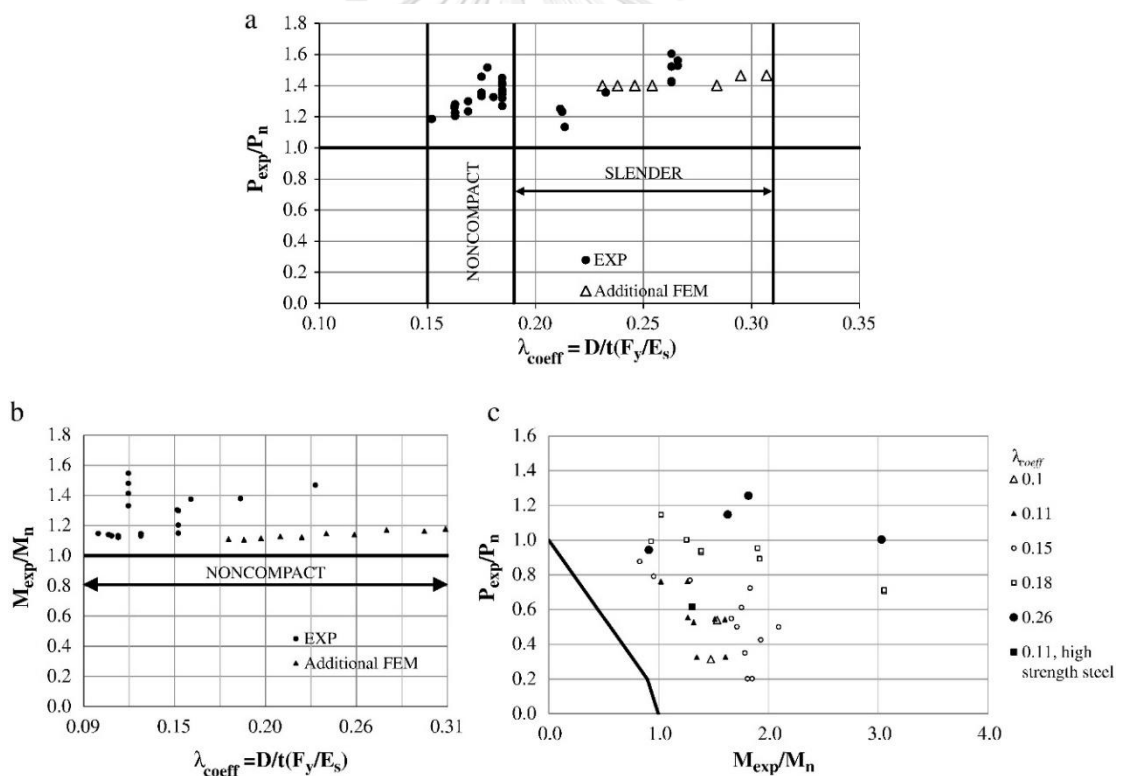


รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบกำลังของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [51]

Fujimoto และคณะ [29] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ โดยทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 33 และ 32 ตัวอย่าง ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าแรงดัดจากผลการทดสอบและแรงดัดพลาสติกตามทฤษฎี (M_u/M_c) พบว่า สำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ค่าอัตราส่วน M_u/M_c จะมีค่ามากกว่า 1 เมื่อค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท่อเหล็กมีค่าน้อยกว่า 75 เนื่องจากผลของการโอบรัดของคอนกรีตและการเพิ่มขึ้นของความเครียด (strain hardening) ของท่อเหล็ก ในขณะที่ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดเนื่องจากผลของการโอบรัดของคอนกรีตสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดัดของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม Kuranovas และคณะ [52] ได้รวบรวมผลการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเอียงศูนย์จำนวน 1303 ตัวอย่าง จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกำลังที่คำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 4 พบว่า สมการของมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมได้อย่างแม่นยำทั้งสำหรับเสาสั้นและเสายาวที่มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่เกิน 100 เมกะปาสคาล และ

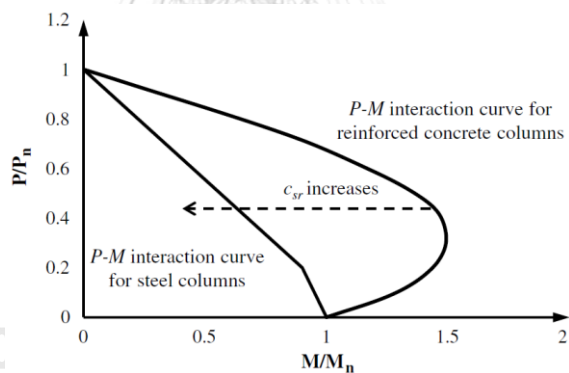
สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมพบว่า กำลังที่คำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีความปลอดภัยเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าไม่เกิน 75 เมกะปาสคาล

Lai และ Varma [20] ได้ศึกษาวิธีการออกแบบเสาท่อเหล็กกลมเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูดตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยมีแนวทางในการศึกษาเช่นเดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งศึกษาเสาท่อเหล็กสี่เหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีต [21] โดยได้รวบรวมผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูดสร้างเป็นฐานข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบเสาจำนวน 47 ตัวอย่าง คาน 42 ตัวอย่าง และ คาน-เสา 36 ตัวอย่าง จากการเปรียบเทียบกำลังที่ทำนายได้จากฐานข้อมูลผลการทดสอบพบว่า สมการในข้อกำหนด AISC 360-10 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูดได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 2.6: (a) เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (b) คานเหล็กเติมด้วยคอนกรีต และ (c) คาน-เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

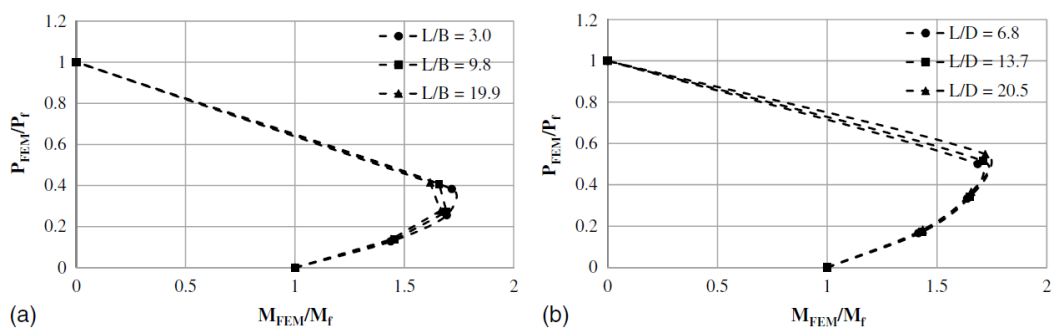


รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่คำนวณได้กับผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด [20]

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุตตามข้อกำหนด AISC 360-10 สามารถสร้างได้จากสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับหน้าตัดเหล็กเพียงลำพัง ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ [20, 21] พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์มีค่ากำลังต่ำกว่าผลการทดสอบจริงอยู่มาก ดังนั้น Lai และคณะ [53] จึงได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการเสนอสมการในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุต โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ค่าอัตราส่วนกำลังสัมพันธ์ ($A_s f_y / A_c f'_c$ หรือ c_{sr}) และ ค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/D) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่า c_{sr} เพิ่มขึ้น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาเหล็ก และจะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อค่า c_{sr} มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.7 และจากรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงผลของค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกสำหรับคาน-เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (a) หน้าตัดกลม และ (b) หน้าตัดสี่เหลี่ยม พบว่าค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกไม่เกิน 20.0 (20.0 สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ 20.5 สำหรับหน้าตัดกลม)



รูปที่ 2.7 ผลของค่าอัตราส่วนกำลังสัมพันธ์ต่อลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ [53]



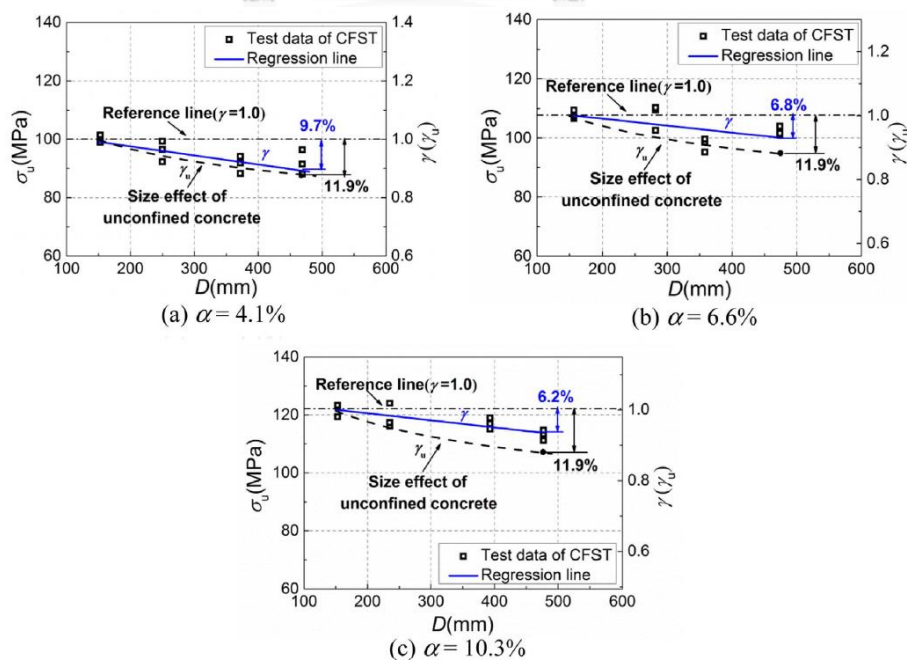
รูปที่ 2.8 ผลของค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกต่อลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ [53]

นอกจากนี้ งานวิจัยบางส่วนได้ศึกษาเสาวัสดุผสมทั้งประเภทเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต Kim และคณะ [54] ได้ทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจำนวน 2 ตัวอย่าง และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 4 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง โดยใช้เหล็กกำลังสูง ($f_y = 806$ ถึง 913 เมกะปาสคาล) และคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 94$ ถึง 184 เมกะปาสคาล) จากผลการศึกษาพบว่า ผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีความสอดคล้องกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างด้วยวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามมาตรฐาน Eurocode 4 และ AIJ และสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างด้วยวิธีความสอดคล้องของความเครียด ตามมาตรฐาน ACI 318-08 ทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ ในขณะที่ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างตามมาตรฐาน Eurocode 4 และ AIJ มีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่ากำลังที่รับได้จากผลการทดสอบ

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของเสาวัสดุผสมได้รวบรวมโดย Shanmugam และ Lakshimi [55] โดยได้สรุปผลการวิจัยในอดีตตามหมวดหมู่ประเด็นที่ศึกษา เช่น การใช้คอนกรีตกำลังสูง การโก่งเดาะเฉพาะที่ การโอบรัดของคอนกรีต เป็นต้น Kim [56, 57] ได้รวบรวมผลการทดสอบเสาวัสดุผสมเพิ่มเติมจากฐานข้อมูลในอดีต [58, 59] เพื่อใช้ในการประเมินและพัฒนาสมการการออกแบบเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-05 โดยฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสมประกอบด้วย เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลาง Kato [60] ได้ตรวจสอบเส้นโค้งการโก่งเดาะ (buckling curve) สำหรับเสาวัสดุผสมจากการรวบรวมผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยได้เสนอตัวคูณปรับค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังรับแรงอัดของหน้าตัดเสาวัสดุผสมแต่ละประเภท Saw และ Liew [61] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อกำหนดและมาตรฐาน Eurocode 4, BS 5400 และ AISC-LRFD (1993) ในการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสม และตรวจสอบความแม่นยำของกำลังที่ทำนายได้จากข้อกำหนดและมาตรฐานกับผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต โดยพิจารณาทั้งเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลาง Wang [62] ได้ตรวจสอบความแม่นยำของสมการในการทำนายกำลังตามมาตรฐาน Eurocode 4 และ BS 5400 สำหรับเสาวัสดุผสมที่มีความชะลูดสูง ($\lambda > 1$) จากการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลักและแกนรอง รวมถึงแรงดัดสองแกน (biaxial bending) จากผลการศึกษาพบว่า สมการตามมาตรฐานทั้งสองสามารถทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมที่มีความชะลูดสูงได้อย่างปลอดภัย โดยสมการในมาตรฐาน Eurocode 4 สามารถทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่ามาตรฐาน BS 5400

2.3 ผลกระทบของขนาดเสาต่อกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

โดยทั่วไป กำลังอัดของคอนกรีตนอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต ยังขึ้นอยู่กับขนาดของคอนกรีตด้วย ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีขนาดใหญ่ขึ้น [5] ดังนั้น ผลกระทบของขนาดอาจเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของขนาดสำหรับคอนกรีตภายใต้การโอบรัดอาจมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติ จากงานวิจัยในอดีต Yamamoto และคณะ [63] ได้ตรวจสอบผลกระทบของขนาดเสาต่อกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากการทดสอบเสาสั้นหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 21 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ โดยเสาตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 ถึง 319 มิลลิเมตร กำลังอัดของคอนกรีต 27 ถึง 50 เมกะปาสกาล และอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 13% จากผลการทดสอบพบว่า ค่าหน่วยแรงอัดของเสามีค่าลดลงเมื่อเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน ต่อมา Wang และคณะ [6] ได้ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมจำนวน 36 ตัวอย่าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กตั้งแต่ 150 ถึง 469 มิลลิเมตร อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณตั้งแต่ 4% ถึง 10% และกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 62 เมกะปาสกาล จากผลการทดสอบพบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กเพิ่มขึ้นและพบว่าผลกระทบของขนาดเสามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [6]

2.4 การใช้หลักการโปรแกรมเชิงพันธุกรรมในการพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสม

ในปัจจุบันมีการนำหลักการโปรแกรมเชิงพันธุกรรม หรือหลักการแสดงออกของยีน (Gene expression programming, GEP) ที่ถูกพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (genetic algorithm, GA) มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการทำนายกำลังขององค์อาคารคอนกรีต เหล็ก และองค์อาคารวัสดุผสม เช่น Jafari และ Mahini [64] ได้พัฒนาสมการทำนายกำลังของคอนกรีตมวลเบาจากการประยุกต์ใช้หลักการ GEP Gandomi และคณะ [65, 66] พัฒนาสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นฐานของผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต Aniello และคณะ [67] ประยุกต์หลักการ GEP ในการพัฒนาสมการเพื่อใช้ทำนายความสามารถในการต้านทานการหมุน (rotation capacity) ของคานเหล็กโครงสร้างขึ้นรูปเย็น Cevik และคณะ [68] ประยุกต์ใช้หลักการ GP ในการพัฒนาสมการทำนายกำลังของคอนกรีตทรงกระบอกโอบรัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

สำหรับการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมนั้น Mansouri และคณะ [69] ประยุกต์ใช้หลักการ GEP เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของหน้าตัด (cross-sectional resistance) เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากผลการทดสอบจำนวน 344 ตัวอย่าง โดยพบว่า สมการที่เสนอสามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้สอดคล้องกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี Güneysi และคณะ [70] เสนอสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม โดยประยุกต์ใช้หลักการ GEP ในการพัฒนาสมการจากข้อมูลผลการทดสอบจำนวน 314 ตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ข้อมูลสำหรับเทรนนิ่ง (training data) เพื่อใช้พัฒนาสมการ จำนวน 236 ตัวอย่าง และข้อมูลสำหรับทดสอบ (testing data) เพื่อใช้ตรวจสอบสมการ จำนวน 78 ตัวอย่าง โดยตัวแปรอิสระ (independent variable) ที่ใช้ในสมการประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของเสา (D), ความหนาของท่อเหล็ก (t), ความยาวของเสา (L), กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') และกำลังครากของท่อเหล็ก (f_y) จากการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่พัฒนาจากการประยุกต์ใช้หลักการ GEP พบว่า สมการสามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถแสดงได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.999 และ 0.989 สำหรับชุดข้อมูลเทรนนิ่ง และชุดข้อมูลทดสอบ ตามลำดับ

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินกำลังของเสาวัสดุผสม โดยในส่วนของเนื้อหาจะประกอบด้วย การออกแบบเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 หลักการของโปรแกรมเชิงพันธุกรรม และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

3.1 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-16

ข้อกำหนด AISC 360-16 ได้กำหนดหลักการออกแบบเสาวัสดุผสมไว้ ดังนี้

3.1.1 ข้อกำหนดทั่วไปด้านวัสดุ

คอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และ เหล็กเสริม จะต้องมีความสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) ต้องมีหน่วยแรงอัดไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล และไม่เกิน 69 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา (lightweight concrete) ต้องมีหน่วยแรงอัดไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล และไม่เกิน 41 เมกะปาสคาล
2. สำหรับเหล็กรูปพรรณต้องมีหน่วยแรงครากระบุไม่เกิน 525 เมกะปาสคาล
3. สำหรับเหล็กเสริมต้องมีหน่วยแรงครากระบุไม่เกิน 550 เมกะปาสคาล

3.1.2 เสาวัสดุผสม

3.1.2.1 ข้อกำหนดสำหรับเสาวัสดุผสม

1. ต้องมีพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของพื้นที่หน้าตัดเสา
2. สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ต้องมีเหล็กเสริมยื่นและเหล็กปลอก โดยกำหนดให้มีค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมยื่น (ρ_{sr}) ไม่น้อยกว่า 0.004 และเหล็กปลอกต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร โดยมีระยะเรียงไม่เกิน 300 มิลลิเมตร หรือใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 13 มิลลิเมตร โดยมีระยะเรียงไม่เกิน 400 มิลลิเมตร ซึ่งระยะเรียงจะต้องไม่เกิน 0.5 เท่าของด้านที่แคบที่สุดของหน้าตัดเสา
3. สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เสาหน้าตัดอัดแน่น ($\lambda \leq \lambda_p$) เสาหน้าตัดไม่อัดแน่น ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) และเสาหน้าตัดขะลุ่ย ($\lambda > \lambda_r$) โดยที่ λ คือ ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วน ซึ่งค่า λ_p λ_r และ λ_{max} แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัด [1]

ชิ้นส่วน	λ	λ_p	λ_r	λ_{max}
1. ปีก/เอว มีความหนา สม่ำเสมอ (เหล็กท่อ HSS)	b/t	$2.26\sqrt{E_s/f_y}$	$3.00\sqrt{E_s/f_y}$	$5.00\sqrt{E_s/f_y}$
2. ท่อกลมกลวง	D/t	$0.15E_s/f_y$	$0.19E_s/f_y$	$0.31E_s/f_y$

3.1.2.2 กำลังรับแรงอัด (compressive strength)

กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนระบุ (P_n) สำหรับเสาวัสดุผสมคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{เมื่อ } P_{no}/P_e \leq 2.25: \quad P_n = P_{no} \left(0.658 \frac{P_{no}}{P_e} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{เมื่อ } P_{no}/P_e > 2.25: \quad P_n = 0.877P_e \quad (3.2)$$

โดยที่

$$P_e = \pi^2(EI_{eff})/L_e^2$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad \text{สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต}$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad \text{สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต}$$

$$C_1 = 0.25 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0.7$$

$$C_3 = 0.45 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0.9$$

โดย E_c และ E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและเหล็ก ตามลำดับ (เมกะปาสคาล), I_c , I_s และ I_{sr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริม ตามลำดับ (มิลลิเมตร⁴) และ L_e หรือ KL คือ ความยาวประสิทธิผลของเสา (มิลลิเมตร)

สำหรับค่า P_{no} คือ ค่าแรงอัดตามแนวแกนระบุของหน้าตัดเสาโดยไม่คิดผลของความขรุขระสามารถคำนวณได้ตามประเภทของเสาวัสดุผสม ดังนี้

ก. สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

$$P_{no} = f_y A_s + f_{ysr} A_{sr} + 0.85 f'_c A_c \quad (3.3)$$

โดย A_c , A_s และ A_{sr} คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริม ตามลำดับ (ตารางมิลลิเมตร), f'_c , f_y และ f_{ysr} คือ กำลังอัดระบุของคอนกรีต หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ และ หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม ตามลำดับ (เมกะปาสคาล)

ข. สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

- หน้าตัดอัดแน่น (compact section)

$$P_{no} = P_p = f_y A_s + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ $C_2 = 0.85$ สำหรับท่อเหลี่ยม

$C_2 = 0.95$ สำหรับท่อกกลม (ค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการโอบรัด)

- หน้าตัดไม่อัดแน่น (noncompact section)

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3.5)$$

เมื่อ $P_y = f_y A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right)$

- หน้าตัดชะลูด (slender section)

$$P_{no} = f_{cr} A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ $f_{cr} = \frac{9E_s}{(b/t)^2}$ สำหรับท่อเหลี่ยม

$f_{cr} = \frac{0.72 f_y}{\left(\frac{D}{t} \frac{f_y}{E_s} \right)^{0.2}}$ สำหรับท่อกกลม

ในการออกแบบตามวิธี LRFD กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ของเสามีค่า $\phi_c P_n$ (โดยที่ $\phi_c = 0.75$) และไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงที่คิดจากเหล็กเพียงลำพัง

3.1.3 คานวัสดุผสม

3.1.3.1 การออกแบบคานเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

แรงดัดที่สามารถรับได้ตามวิธี LRFD มีค่าเท่ากับ $\phi_b M_n$ โดยที่ $\phi_b = 0.90$ และกำลังรับแรงดัดระบุสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีดังต่อไปนี้

ก. วิธีการรวมหน่วยแรงอีลาสติกบนหน้าตัดวัสดุผสม โดยกำลังรับแรงดัดระบุพิจารณาจากแรงดัดที่เริ่มเกิดการครากของเหล็ก (yield moment)

ข. วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกบนหน้าตัดเหล็กเท่านั้น โดยกำลังรับแรงดัดระบุพิจารณาจากแรงดัดพลาสติก (plastic moment) ของหน้าตัดเหล็ก

ค. วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกหรือวิธีความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดวัสดุผสม โดยกำลังรับแรงดัดระบุพิจารณาจากแรงดัดพลาสติกของหน้าตัดคานวัสดุผสม

3.1.3.2 การออกแบบคานท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

คานท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตสามารถจำแนกประเภทได้ 3 ประเภท เช่นเดียวกับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต โดยค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งกำลังรับแรงดัดระบุ (M_n) สามารถคำนวณได้ตามประเภทของหน้าตัด ดังนี้

- หน้าตัดอัดแน่น

$$M_n = M_p \quad (3.7)$$

เมื่อ M_p = กำลังแรงดัดพลาสติกของหน้าตัดคานวัสดุผสม

- หน้าตัดไม่อัดแน่น

$$M_n = M_p - \frac{M_p - M_y}{(\lambda_r - \lambda_p)} (\lambda - \lambda_p) \quad (3.8)$$

เมื่อ M_y = กำลังแรงดัดคราก คำนวณจากการกระจายหน่วยแรงแบบเชิงเส้น โดยหน่วยแรงสูงสุดในคอนกรีตไม่เกิน $0.7f_c'$ และหน่วยแรงสูงสุดในเหล็กไม่เกิน f_y

- หน้าตัดชะลูด

ค่า M_n คำนวณได้จากการกำหนดหน่วยแรงอัดในเหล็กไม่เกินค่าหน่วยแรงอัดวิกฤต (f_{cr}) จากในสมการ 3.6 และการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีตเป็นแบบเชิงเส้นโดยมีหน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีตไม่เกิน $0.7f_c'$

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของคานท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [1]

ชั้นส่วน	λ	λ_p	λ_r	λ_{max}
1. ปีกมีความหนาสม่ำเสมอ	b/t	$2.26\sqrt{E_s/f_y}$	$3.00\sqrt{E_s/f_y}$	$5.00\sqrt{E_s/f_y}$
2. เวมมีความหนาสม่ำเสมอ	h/t	$3.00\sqrt{E_s/f_y}$	$5.70\sqrt{E_s/f_y}$	$5.70\sqrt{E_s/f_y}$
3. ท่อกลมกลวง	D/t	$0.09E_s/f_y$	$0.31E_s/f_y$	$0.31E_s/f_y$

3.1.4 คาน-เสาวัสดุผสม

กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาวัสดุผสมนั้น หาได้จากการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด ซึ่งข้อกำหนด AISC 360-16 ได้กำหนดแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ไว้ดังนี้ โดยสองวิธีแรกนั้นสามารถใช้ได้กับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดอัดแน่น ส่วนวิธีสุดท้ายใช้สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขรุขระ

วิธีที่ 1: ออกแบบโดยใช้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากหน้าตัดเหล็กเพียงลำพัง

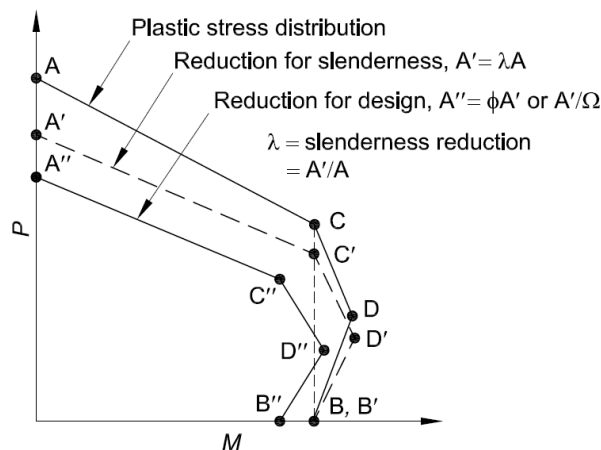
$$\text{เมื่อ } P_r/P_c \geq 0.2: \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_r}{M_c} \right] \leq 1.0 \quad (3.9)$$

$$\text{เมื่อ } P_r/P_c < 0.2: \quad \frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_r}{M_c} \leq 1.0 \quad (3.10)$$

โดยที่ P_r และ M_r คือ แรงอัดและแรงดัดที่เกิดขึ้น หาได้จากการพิจารณาผลของแรงลำดับที่สองหรือจากการวิเคราะห์ลำดับที่หนึ่งคูณด้วยตัวคูณขยาย ส่วน P_c และ M_c คือ แรงอัดและแรงดัดที่เสาสามารถรับได้

วิธีที่ 2: ออกแบบโดยใช้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก

การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก สามารถทำได้โดยการลากเส้นตรงเชื่อมจากจุด A ถึงจุด B ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจุด A คือ จุดที่แสดงค่าแรงอัดของหน้าตัดโดยไม่พิจารณาความขรุขระของเสาและมีค่าแรงดัดเป็นศูนย์ จุด B คือ จุดที่แสดงค่าแรงดัดระบุของเสาเมื่อแรงอัดเป็นศูนย์ จุด C คือ จุดที่ค่าแรงดัดระบุของเสามีค่าเท่ากับแรงดัดระบุที่จุด B แต่มีแรงอัดร่วมด้วย และจุด D คือ จุดที่ค่าแรงอัดมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงอัดที่จุด C และมีค่าแรงดัดสูงสุด



รูปที่ 3.1 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาวัสดุผสมจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก [1]

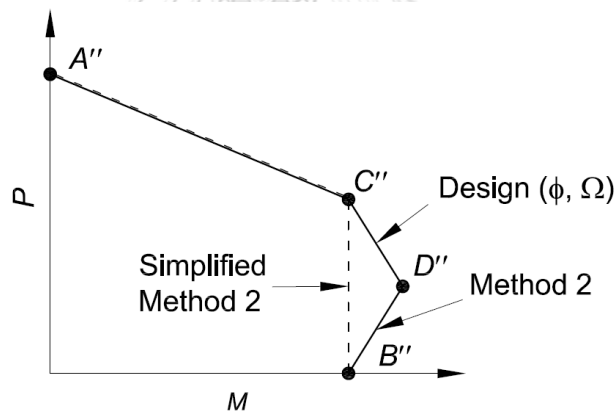
จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาผลของความขะลุ่ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 หรือ 3.2 กำลังอัดจะมีค่าลดลงดังแสดงด้วยจุด A' B' C' และ D' โดยในการออกแบบตามวิธี LRFD กำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่สามารถรับได้จะมีค่าเท่ากับ $\phi_c P_n$ และ $\phi_b M_n$ ตามลำดับ ดังแสดงด้วยจุด A'' B'' C'' และ D''

นอกจากนี้ ข้อกำหนด AISC 360-16 ยังได้เสนอวิธีสองเส้นตรงอย่างง่าย (simplified bilinear) ซึ่งเกิดจากการลากเส้นตรงเชื่อมผ่านจุด A'' C'' และ B'' ดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 3.2 และสามารถเขียนสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\text{เมื่อ } P_r < P_c: \quad \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1.0 \quad (3.11)$$

$$\text{เมื่อ } P_r \geq P_c: \quad \frac{P_r - P_c}{P_A - P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1.0 \quad (3.12)$$

โดยที่ P_A และ P_c คือ แรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ที่จุด A'' และจุด C'' ส่วน M_{cx} และ M_{cy} คือกำลังรับแรงดัดรอบแกนหลักและแกนรองที่สามารถรับได้ที่จุด C''



รูปที่ 3.2 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาวัสดุผสมจากวิธีสองเส้นตรงอย่างง่าย [1]

วิธีที่ 3: เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับคาน-เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขะลุ่

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขะลุ่แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{เมื่อ } P_r/P_c \geq c_p: \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{1-c_p}{c_m} \left[\frac{M_r}{M_c} \right] \leq 1.0 \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ } P_r/P_c < c_p: \quad \frac{1-c_m}{c_p} \left[\frac{P_r}{P_c} \right] + \frac{M_r}{M_c} \leq 1.0 \quad (3.14)$$

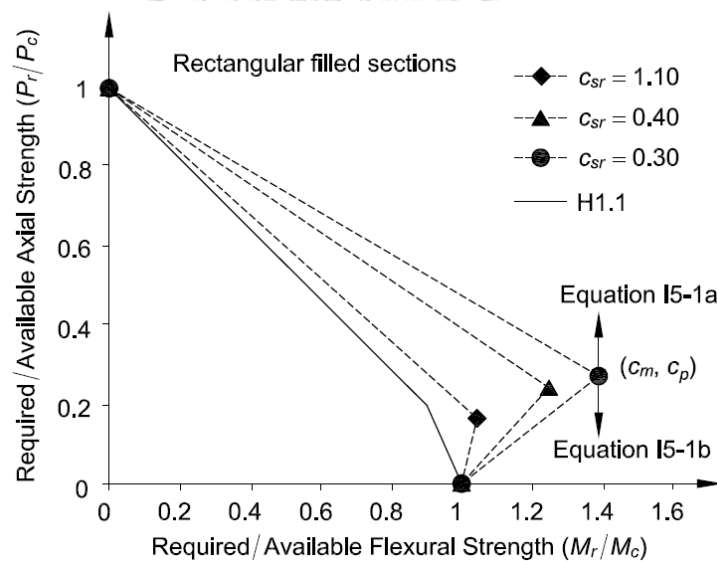
โดยค่า c_p และ c_m สามารถคำนวณได้จากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_p และ c_m [1]

ประเภทของหน้าตัด	c_p	c_m	
		เมื่อ $c_{sr} \geq 0.5$	เมื่อ $c_{sr} < 0.5$
1. ท่อเหลี่ยม	$c_p = \frac{0.17}{c_{sr}^{0.4}}$	$c_m = \frac{1.06}{c_{sr}^{0.11}} \geq 1.0$	$c_m = \frac{0.90}{c_{sr}^{0.36}} \leq 1.67$
2. ท่อกลมกลาง	$c_p = \frac{0.27}{c_{sr}^{0.4}}$	$c_m = \frac{1.10}{c_{sr}^{0.08}} \geq 1.0$	$c_m = \frac{0.95}{c_{sr}^{0.32}} \leq 1.67$

เมื่อ $c_{sr} = (A_s f_y - A_{sr} f_{yr}) / A_c f'_c$

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 3.13 และ 3.14 สามารถใช้ได้กับคาน-เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขลุ่ยที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของเสา (L/D หรือ L/b) ไม่เกิน 20



รูปที่ 3.3 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขลุ่ย [1]

3.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode 4

มาตรฐาน Eurocode 4 ได้กำหนดหลักการออกแบบเสาวัสดุผสมไว้ ดังนี้

3.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป

1. สามารถใช้ได้กับเหล็กชั้นคุณภาพ S235 ถึง S460 และคอนกรีตน้ำหนักปกติ C20/25 ถึง C50/60
2. สามารถใช้ได้กับเสาที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (steel contribution ratio, δ) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.9 เมื่อค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.17
3. ไม่พิจารณาผลของการโก่งเดาะเฉพาะที่สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาไม่เกินค่าในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาสูงสุดสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [2]

ประเภทหน้าตัด	ค่า D/t หรือ b/t สูงสุด
เหล็กท่อกกลม	$\max(D/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
เหล็กท่อเหลี่ยม	$\max(b/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

มาตรฐาน Eurocode 4 ได้กำหนดวิธีการออกแบบเสาวัสดุผสมไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีทั่วไป (general method) และวิธีแบบง่าย (simplified method) ซึ่งเสาวัสดุผสมที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นเสาที่หน้าตัดมีความสมมาตรทั้ง 2 แกน (double symmetrical) และหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวของเสา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาออกแบบเสาวัสดุผสมด้วยวิธีแบบง่าย

3.2.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมด้วยวิธีแบบง่าย

3.2.2.1 ขอบเขตการออกแบบ

1. ค่าความชะลูดสัมพัทธ์ (relative slenderness, $\bar{\lambda}$) คำนวณจากสมการที่ 3.18 มีค่าไม่เกิน 2
2. สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ระยะหุ้มจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กรูปพรรณในทิศทางแกน Y ไม่เกิน 0.3 เท่าของความลึกของหน้าตัด และไม่เกิน 0.4 เท่าของความกว้างสำหรับระยะหุ้มในทิศทางแกน X
3. ปริมาณเหล็กเสริมยื่นไม่เกินร้อยละ 6 ของพื้นที่คอนกรีต
4. อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกขอเสาอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 5.0

3.2.2.2 กำลังต้านทานของหน้าตัด

ค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงพลาสติก ($N_{pl,Rd}$) ของหน้าตัดเสาวัสดุผสมคำนวณได้ ดังนี้

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0.85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.15)$$

เมื่อ A_a A_c และ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ คอนกรีต และเหล็กเสริม ตามลำดับ, f_{yd} และ f_{sd} คือ หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมสำหรับออกแบบ ส่วน f_{cd} คือ กำลังอัดของคอนกรีตสำหรับออกแบบ โดยสมการที่ 3.15 สามารถใช้ได้กับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตนั้น สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 1.0 แทน 0.85 ได้ (เนื่องจากการคายน้ำที่น้อยกว่าของคอนกรีตในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต [71])

นอกจากนี้ สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม สามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีต เนื่องจากผลของการโอบรัดได้ เมื่อค่าความชะลูดสัมพัทธ์ ($\bar{\lambda}$) มีค่าไม่เกิน 0.5 และ ค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/D) มีค่าน้อยกว่า 0.1 โดยค่ากำลังต้านทานแรงอัดสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + A_c f_{cd} \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \right) + A_s f_{sd} \quad (3.16)$$

เมื่อ $e = 0$:

$$\eta_a = \eta_{ao} \text{ และ } \eta_c = \eta_{co}$$

เมื่อ $0 < e/D \leq 0.1$:

$$\eta_a = \eta_{ao} + (1 - \eta_{ao})(10 e/d) \text{ และ } \eta_c = \eta_{co}(1 - 10 e/d)$$

เมื่อ $e/D > 0.1$:

$$\eta_a = 1.0 \text{ และ } \eta_c = 0$$

โดยที่

$$\eta_{ao} = 0.25(3 + 2\bar{\lambda}) \leq 1.0$$

$$\eta_{co} = 4.9 - 18.5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \geq 0$$

3.2.2.3 ค่าสติเฟนสการัดประสิทธิผล ค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ และ ค่าความชะลูดสัมพัทธ์

ก. ค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (3.17)$$

เมื่อ $N_{pl,Rd}$ คำนวณจากหัวข้อที่ 3.2.2.2

ข. ค่าความชะลูดสัมพัทธ์

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (3.18)$$

เมื่อ $N_{cr} = \frac{(EI)_{eff} \Pi^2}{L_e^2}$ โดยที่ $L_e = L$ สำหรับจตุรรองรับแบบยึดหมุน (pin-ended)

ค. ค่าสติฟเนสการดัดประสิทธิผล (effective flexural stiffness, EI_{eff})

$$EI_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{cm} I_c \quad (3.19)$$

เมื่อ K_e คือ ตัวประกอบการปรับแก้ ควรใช้เท่ากับ 0.6

I_a I_c และ I_s คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรูปพรรณ คอนกรีต และเหล็กเสริม

E_a E_{cm} และ E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ คอนกรีต และเหล็กเสริม

3.2.2.4 การตรวจสอบกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกน

กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสมสามารถตรวจสอบได้ ดังนี้

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.20)$$

เมื่อ χ คือ ตัวประกอบลดค่าตามรูปแบบการโก่งเดาะของเสา โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1.0 \text{ หรือ พิจารณาจากรูปที่ 3.4}$$

โดยที่ $\Phi = 0.5[1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2]$

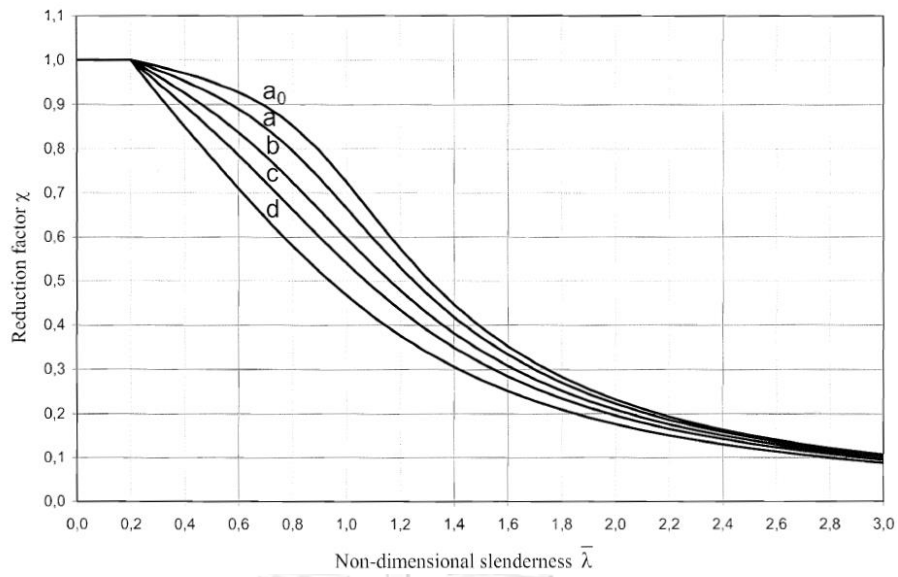
α คือ ตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ (imperfection factor) สามารถพิจารณาได้จากประเภทของเส้นโค้งการโก่งเดาะ (buckling curve) ดังตารางที่ 3.6 โดยประเภทของเส้นโค้งการโก่งเดาะกำหนดจากประเภทของเสาวัสดุผสมดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ประเภทเส้นโค้งการโก่งเดาะสำหรับเสาวัสดุผสม [2]

ประเภทเสาวัสดุผสม	ขอบเขต	แกนโก่งเดาะ	เส้นโค้งการโก่งเดาะ
เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	-	X-X	b
	-	Y-Y	c
เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	$\rho_s \leq 3\%$	-	a
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	-	b

ตารางที่ 3.6 ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์สำหรับเส้นโค้งการโก่งเดาะ [72]

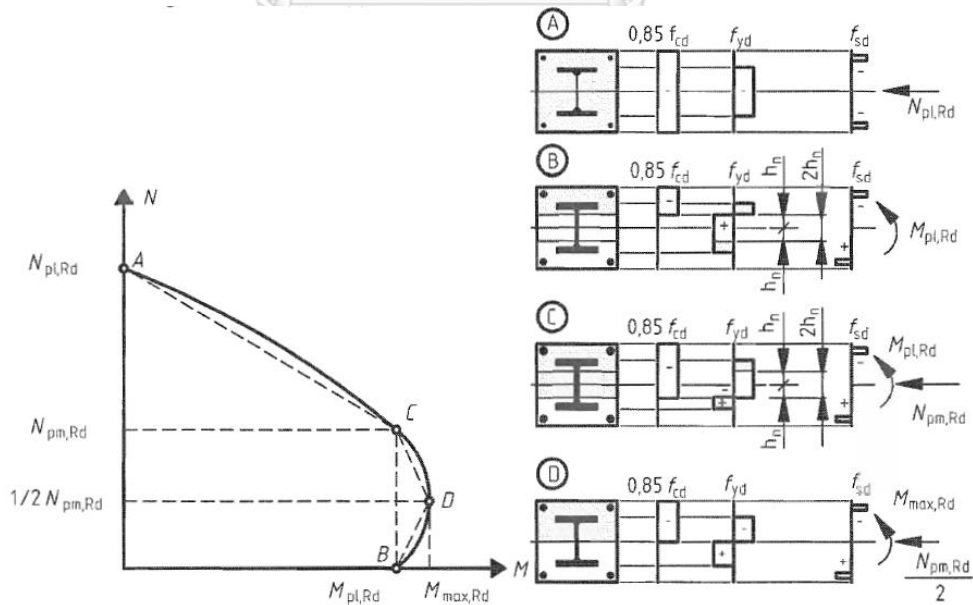
เส้นโค้งการโก่งเดาะ	a ₀	a	b	c	d
ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ (α)	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76



รูปที่ 3.4 เส้นโค้งการโก่งเคาะตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 [72]

3.2.2.5 การตรวจสอบกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน

กำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาสามารถหาได้จากการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ ซึ่งมาตรฐาน Eurocode 4 ได้เสนอแนวทางแบบง่ายในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์โดยการลากเส้นตรงเชื่อมจากจุด A ถึงจุด B ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.5 ซึ่งสร้างด้วยวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์แบบง่ายและการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก [2]

จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ กำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาวัสดุผสมสามารถตรวจสอบได้ดังสมการที่ 3.21

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (3.21)$$

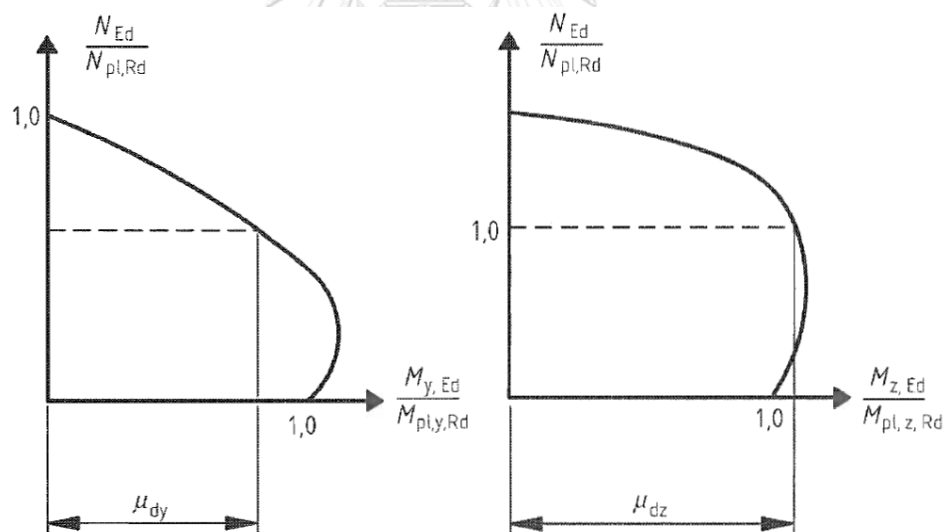
เมื่อ M_{Ed} คือ ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาโดยพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วน และผลจากการวิเคราะห์ลำดับที่สอง

$M_{pl,N,Rd}$ คือ ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในช่วงพลาสติกโดยพิจารณาจากแรงอัดที่เกิดขึ้น (N_{Ed})

$M_{pl,Rd}$ คือ ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในช่วงพลาสติกที่จุด B ดังแสดงในรูปที่ 3.5

μ_d มีค่าเท่ากับ μ_{dy} หรือ μ_{dz} สำหรับการดัดรอบแกนหลักหรือแกนรอง โดยค่า μ_d คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดัด ณ ตำแหน่งที่เกิดแรงอัด N_{Ed} กับกำลังรับแรงดัดของเสา โดยสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.6

α_M มีค่าเท่ากับ 0.9 สำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ S235 ถึง S355 และมีค่าเท่ากับ 0.8 สำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ S420 ถึง S460



รูปที่ 3.6 การหาค่า μ_d สำหรับการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน [2]

3.3 หลักการของโปรแกรมเชิงพันธุกรรม

โปรแกรมเชิงพันธุกรรม [73, 74] ได้พัฒนาขึ้นจากหลักการของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม [75-77] โดยสามารถนำกระบวนการของโปรแกรมเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเรียกการวิเคราะห์การถดถอยลักษณะนี้ว่า “การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ (symbolic regression)” โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์การถดถอยแบบดั้งเดิม เช่น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) จะต้องกำหนดรูปแบบของสมการก่อนแล้วจึงวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์เพื่อให้สมการมีความสอดคล้องกับข้อมูลบนพื้นฐานของรูปแบบสมการที่กำหนด แต่สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์นั้น เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาทั้งค่าสัมประสิทธิ์และรูปแบบสมการที่สอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด ดังนั้น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์จึงไม่จำเป็นที่จะต้องกำหนดรูปแบบสมการก่อน ซึ่งทำให้สมการที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลอย่างมาก เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการของโปรแกรมเชิงพันธุกรรม เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมแล้วจึงกล่าวถึงรายละเอียดของโปรแกรมเชิงพันธุกรรม

3.3.1 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม เป็นหนึ่งในวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณค่า (approximation optimization algorithms) โดยอาศัยกลไกการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (natural selection) กล่าวคือ สายพันธุ์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะมีโอกาสอยู่รอดได้มากและสามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมสู่ลูกหลานรุ่นต่อไป ในขณะที่สายพันธุ์ที่ไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะมีโอกาสอยู่รอดได้น้อยและสูญพันธุ์ไปในที่สุด สำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมนั้น สภาพแวดล้อมเปรียบได้กับฟังก์ชันเป้าหมายหรือฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) และสายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมเปรียบได้กับผลเฉลยของปัญหา สำหรับกระบวนการเบื้องต้นของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมนั้น สามารถแสดงได้ดังนี้

1. กำหนดฟังก์ชันความเหมาะสมและกำหนดชุดคำตอบชุดแรก (initial population) ในรูปแบบของโครโมโซมด้วยการสุ่ม เพื่อใช้ในกระบวนการวิวัฒนาการชุดคำตอบ
2. นำชุดคำตอบเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการซึ่งประกอบด้วย
 - 2.1 การรีโพรดักชัน (reproduction)
 - 2.2 การครอสโอเวอร์ (crossover)
 - 2.3 การมิวเทชัน (mutation)
3. คำนวณค่าความเหมาะสมและตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดการทำงาน (termination criteria)

การกำหนดชุดคำตอบชุดแรกหรือการสร้างโครโมโซม สามารถทำได้โดยสุ่มค่าคำตอบภายในช่วงขอบเขตของคำตอบโดยมีชุดคำตอบตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ แล้วทำการแปลงค่าคำตอบให้อยู่ในรูปของเลขฐานสอง (binary bit string) ซึ่งจะเรียกชุดคำตอบนี้ว่า “โครโมโซม (chromosome)” โดยแต่ละตำแหน่งของโครโมโซมคือยีน (gene) และเรียกกลุ่มของโครโมโซมเหล่านี้ว่า “ประชากร (population)” ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 3.1 หาค่าสูงสุดของ $f(x) = -0.2x^2 + 5x + 10$ โดย $0 \leq x \leq 25.5$

- กำหนดให้โครโมโซมมีขนาด 8 บิต ดังนั้น ค่ามากที่สุดจะเท่ากับ 11111111 เมื่อแปลงเป็นเลขฐานสิบจะมีค่าเท่ากับ 255 ซึ่งเมื่อหารด้วย 10 แล้วจะมีค่าเท่ากับขอบเขตมากที่สุดของช่วงคำตอบคือ 25.5
- กำหนดให้มีชุดข้อมูล (ประชากร) เริ่มต้น 4 ชุดข้อมูล โดยแต่ละชุดข้อมูลเกิดจากการแปลงค่าคำตอบเริ่มต้น (x_i) เป็นเลขฐานสอง ดังแสดงในตารางที่ 3.7

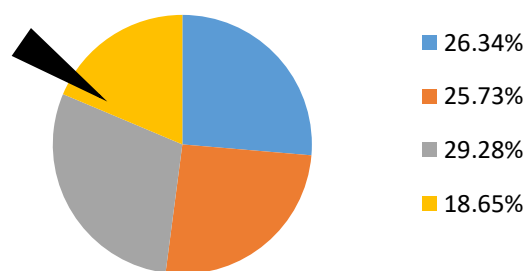
ตารางที่ 3.7 กระบวนการเข้ารหัส (encoding)

ชุดข้อมูล	ประชากรเริ่มต้น (x_i)	ประชากรเริ่มต้น (binary)	$f(x_i)$
1	18.8	10111100	33.31
2	19.1	10111111	32.54
3	7.9	01001111	37.02
4	21.9	11011011	23.58
			$\Sigma y = 126.45$
			$\bar{y} = 31.61$

สำหรับขั้นตอนต่อไปคือ กระบวนการวิวัฒนาการซึ่งจะประกอบด้วย การรีโพรดักชัน การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชัน ดังแสดงต่อไปนี้

การรีโพรดักชัน คือ กระบวนการคัดเลือกข้อมูลโดยใช้ความน่าจะเป็นตามร้อยละความเหมาะสมที่ได้จากการประเมินฟังก์ชันความเหมาะสม โดยโครโมโซมที่มีความเหมาะสมมากย่อมมีโอกาสอยู่รอดมากกว่าโครโมโซมที่มีความเหมาะสมน้อย ซึ่งโครโมโซมที่มีความเหมาะสมมากจะถูกทำสำเนาเพิ่มจำนวน ส่วนโครโมโซมที่มีความเหมาะสมน้อยจะถูกกำจัดหรือลบบน กระบวนการคัดเลือกนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Tournament selection Rank selection และ Roulette wheel selection เป็นต้น ซึ่งในตัวอย่างนี้จะทำการคัดเลือกโครโมโซมด้วยวิธี Roulette wheel selection

Roulette wheel selection



ตารางที่ 3.8 ผลการคัดเลือกข้อมูลโดยวิธี Roulette wheel selection

ชุดข้อมูล	ประชากรเริ่มต้น	$f(x_i)$	% fitness	Count	Reproduction
1	10111100	33.31	26.34	1	01001111
2	10111111	32.54	25.73	1	01001111
3	01001111	37.02	29.28	2	10111100
4	11011011	23.58	18.65	0	10111111
$\Sigma y = 126.45$			100 %		

การคัดเลือกข้อมูลโดยวิธี Roulette wheel selection นั้น จะแบ่งพื้นที่วงล้อตามค่าร้อยละความเหมาะสมและทำการหมุนวงล้อ 4 ครั้ง จากตัวอย่างจะพบว่า ชุดข้อมูลที่ 2 ถูกเลือก 2 ครั้ง จึงถูกทำสำเนาซ้ำเป็น 2 ชุด ในขณะที่ชุดข้อมูลที่ 4 มีค่าร้อยละความเหมาะสมน้อยที่สุดไม่ถูกเลือกจึงถูกกำจัดออกจากกลุ่มประชากร

การครอสโอเวอร์ เป็นการนำประชากรที่ได้จากการรีโพรดักชันมาจับคู่และครอสโอเวอร์ระหว่างกันให้ได้โครโมโซมใหม่เพื่อหาลักษณะทางพันธุกรรมที่มีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งการครอสโอเวอร์หรือการสลับรหัสข้อมูลนั้นทำได้หลายวิธี เช่น ครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single point crossover) ครอสโอเวอร์แบบสองจุด (two point crossover) และการครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (uniform crossover) เป็นต้น โดยในตัวอย่างนี้จะใช้การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว ทำได้โดยสุ่มจับคู่ข้อมูล 2 ชุด แล้วทำการสุ่มตำแหน่งที่จะสลับรหัสข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 การครอสโอเวอร์

ชุดข้อมูล	Reproduction	คู่ชุดข้อมูล	ตำแหน่งที่สลับ	ประชากรใหม่	x	f(x)
1	01001111	3	3	01011100	9.2	39.07
2	01001111	4	4	01001111	7.9	37.02
3	10111100	1	3	10101111	17.5	36.25
4	10111111	2	4	10111111	19.1	32.54
$\Sigma y = 144.88$						
$\bar{y} = 36.22$						

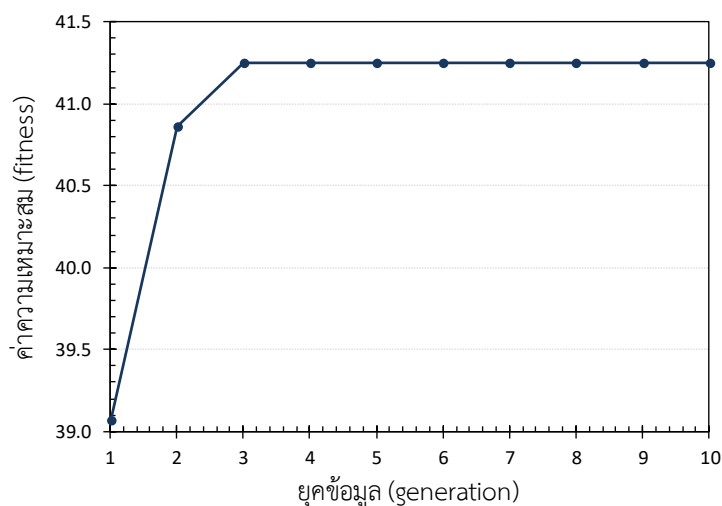
สามารถสังเกตได้ว่า ภายหลังกการครอสโอเวอร์ โครโมโซมใหม่ที่ได้จะมีความเหมาะสมมากกว่าเดิม โดยค่าสูงสุดของฟังก์ชันเพิ่มขึ้นจากประชากรเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 37.02 เป็น 39.07 นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันจากกลุ่มประชากรเริ่มต้นยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย (จาก 31.61 เพิ่มเป็น 36.22) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการรีโพรดักชันและครอสโอเวอร์ใหม่ต่อไปจะพบว่าค่าสูงสุดของฟังก์ชันไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากรหัสบางตำแหน่งบนโครโมโซมไม่ถูกเปลี่ยน ดังนั้น จึงต้องทำการมิวเทชันเพื่อให้พบโครโมโซมภายนอกข้อมูลกลุ่มประชากรเดิม

การมิวเทชันเกิดขึ้นเนื่องจากรหัสบางตำแหน่งบนโครโมโซมไม่ถูกเปลี่ยนภายหลังจากการรีโพรดักชันและครอสโอเวอร์หลาย ๆ ครั้ง จึงต้องเกิดการมิวเทชันขึ้นเพื่อให้ค้นพบโครโมโซมที่ไม่ได้อยู่ในชุดประชากรเดิม โดยการมิวเทชันสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนรหัสข้อมูลในตำแหน่งของโครโมโซมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการสลับเปลี่ยนรหัสข้อมูลบางตำแหน่งบนโครโมโซม ดังแสดงในตัวอย่าง

01111100 \rightleftarrows 01111101

จากตัวอย่าง เมื่อทำการรีโพรดักชันและครอสโอเวอร์ไป 7 ยุคข้อมูล (generation) พบว่าค่าสูงสุดของฟังก์ชันไม่เปลี่ยนแปลง (มีค่าเท่ากับ 41.248 เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 12.4) ดังนั้นจึงทำการมิวเทชันตำแหน่งที่ 8 ของโครโมโซม 01111100

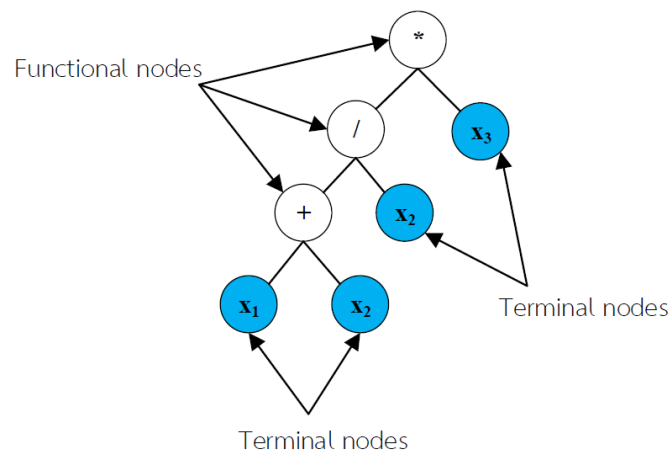
ภายหลังจากการมิวเทชัน ได้ทำการรีโพรดักชันและครอสโอเวอร์จนกระทั่งได้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชัน เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 12.5 ให้ค่าสูงสุดของฟังก์ชันคือ 41.25 สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดนั้น โดยทั่วไปแล้วสามารถกำหนดได้หลายวิธี เช่น กำหนดจำนวนรอบการทำงาน หรือ กำหนดจากผลของคำตอบเมื่อค่าของคำตอบมีค่าซ้ำกันมากกว่าจำนวนครั้งที่กำหนด เป็นต้น



รูปที่ 3.7 ค่าความเหมาะสมแต่ละยุคข้อมูลของตัวอย่างที่ 3.1

3.3.2 โปรแกรมเชิงพันธุกรรม

โปรแกรมเชิงพันธุกรรม (GP) ได้พัฒนาขึ้นจากหลักการของขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (GA) โดยกระบวนการของ GP จะมีลักษณะเดียวกันกับกระบวนการของ GA คืออาศัยกลไกการคัดเลือกโดยธรรมชาติ แต่จะแตกต่างกันที่ชุดข้อมูลของ GA จะแทนด้วยเลขฐานสอง แต่สำหรับ GP ชุดข้อมูลจะแทนด้วยแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี (expression tree) โดยแผนภาพจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ ฟังก์ชันนอล (functional) และเทอร์มินอล (terminal) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถกำหนดได้จากเซตของฟังก์ชันนอล (F) และเซตของเทอร์มินอล (T) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เซตของฟังก์ชันนอล: $F = \{+, *, /\}$ ทั้งนี้ เซตของฟังก์ชันนอลสามารถประกอบด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ หรือ ตัวดำเนินการ (operators) แบบอื่น ๆ ได้ [74] และสำหรับเซตของเทอร์มินอล: $T = \{x_1, x_2, x_3\}$ จะประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (independent variables) และค่าคงที่สำหรับฟังก์ชัน โดยตัวอย่างแผนภาพดังรูปที่ 3.8 สามารถแสดงในรูปของสมการได้เป็น $x_3(x_1 + x_2)/x_2$



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี [78]

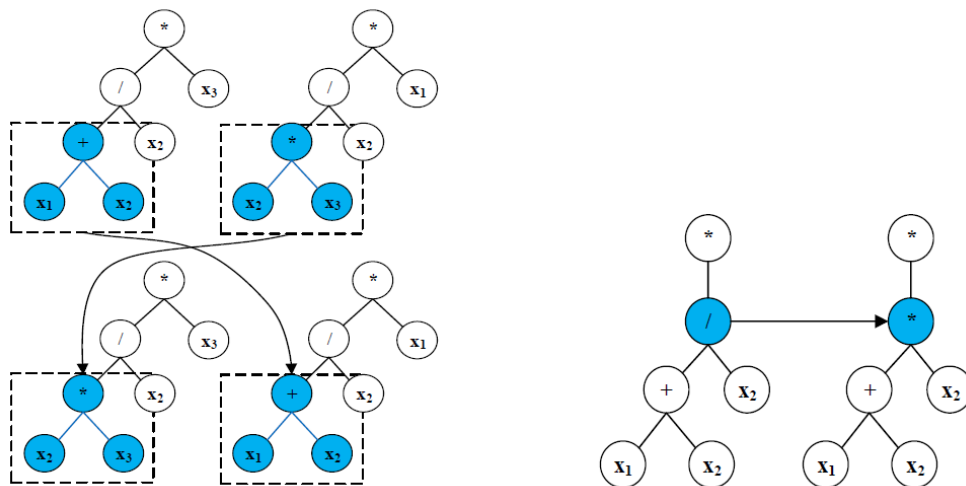
โดยในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการของ GP สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาค่าที่มากที่สุด (maximum) ของค่า R^2 (Pearson's R^2) ตามสมการที่ 3.22 โดย R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเมื่อ R^2 มีค่ามาก (เข้าใกล้ 1) จะหมายถึง สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยนั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลหรือมีความแม่นยำสูง

$$R^2 = \frac{[\sum(P_i - \bar{P})(M_i - \bar{M})]^2}{\sum(P_i - \bar{P})^2 \sum(M_i - \bar{M})^2} \quad (3.22)$$

เมื่อ M_i คือ ค่ากำลังที่ได้จากข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต, \bar{M} คือ ค่าเฉลี่ยของ M_i , P_i คือ กำลังที่ทำนายจากสมการที่พัฒนาขึ้น และ \bar{P} คือ ค่าเฉลี่ยของ P_i

กระบวนการเบื้องต้นของโปรแกรมเชิงพันธุกรรมสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. กำหนดชุดคำตอบชุดแรกในรูปแบบของแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี ด้วยการสุ่มส่วนประกอบของแผนภาพหรือโหนด (node) สำหรับโหนดภายใน (internal points of the tree) จะทำการสุ่มตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์จากเซตของฟังก์ชันนอล และสำหรับตัวแปรอิสระและค่าคงที่นั้น จะทำการสุ่มจากเซตของเทอร์มินอล
2. คำนวณค่า R^2 ของแต่ละแผนภาพในชุดคำตอบและนำชุดคำตอบเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการซึ่งประกอบด้วย การรีโพรดักชัน การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชัน โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนคล้ายกับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมดังแสดงในรูปที่ 3.9
3. ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดการทำงาน



(ก) การครอสโอเวอร์ (ข) การมิวเทชัน

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกระบวนการวิวัฒนาการสำหรับ GP [79]

3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

โปรแกรม *HeuristicLab* [80] เป็นซอฟต์แวร์ประเภทโอเพนซอร์ส (open source software) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางฮิวริสติก (heuristic) และขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม *HeuristicLab* ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์เพื่อพัฒนาสมการในการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเฉียงศูนย์จากฐานข้อมูลการทดสอบ โดยในขั้นตอนของการศึกษานี้ ได้ทดสอบการใช้โปรแกรมกับโจทย์ปัญหาตัวอย่างเพื่อให้เห็นถึงวิธีการใช้งานและการทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในตัวอย่างที่ 3.2

ตัวอย่างที่ 3.2 ให้พัฒนาสมการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกจากข้อมูลผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ เมื่อ

- ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต (วัน) ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) และ ค่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวม (C/(CA+FA)) เมื่อ CA และ FA คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ
- ข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต [81] จำนวน 73 ตัวอย่าง โดยรายละเอียดเบื้องต้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 สรุปข้อมูลผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่ 3.2

รายละเอียด	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต	วัน	1	28
ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)	-	0.48	0.65
มวลรวมหยาบ	Kg/m ³	956	1024
มวลรวมละเอียด	Kg/m ³	749	936

โดยในการคำนวณนั้น ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นสองชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่ง (training set) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (testing set) โดยชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งจะใช้สำหรับพัฒนาสมการ และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบจะใช้สำหรับตรวจสอบสมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งตัวอย่างนี้ได้กำหนดจำนวนข้อมูลสำหรับการเทรนนิ่งและสำหรับการทดสอบเท่ากับร้อยละ 75 และ 25 ของข้อมูลทั้งหมด ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดเซตของฟังก์ชันนอล (F) และเซตของเทอร์มินอล (T) รวมถึงทำการกำหนดตัวแปรควบคุม (control parameters) สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ของ GP

ในตัวอย่างนี้ เซตของฟังก์ชันนอล (F) และเซตของเทอร์มินอล (T) สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์คือ $F = \{+, -, *, \text{exponential}\}$ และ $T = \{x_1, x_2, x_3, [-10,10]\}$ เมื่อ x_1, x_2 และ x_3 คือ ค่าระยะเวลาการบ่มคอนกรีต (วัน), ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) และ ค่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวม ($C/(CA+FA)$) ตามลำดับ และสำหรับการกำหนดตัวแปรควบคุมเบื้องต้นในกระบวนการวิเคราะห์ของ GP ได้กำหนดไว้ 6 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีการตั้งค่าที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.11 เนื่องจากตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ส่งผลต่อความแม่นยำของสมการ โดยการตั้งค่าที่เหมาะสมนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่ชัดแต่จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่วิเคราะห์ [82, 83]

จากการวิเคราะห์ทั้ง 6 ครั้ง (สำหรับรูปแบบการตั้งค่าที่ต่างกัน) จะได้สมการทำนายกำลังของคอนกรีตจำนวน 6 รูปแบบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ทำนายได้จากสมการแต่ละรูปแบบกับกำลังที่ได้จากผลการทดสอบในชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งและชุดข้อมูลสำหรับทดสอบสามารถแสดงค่า R^2 ได้ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.11 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมของตัวอย่างที่ 3.2

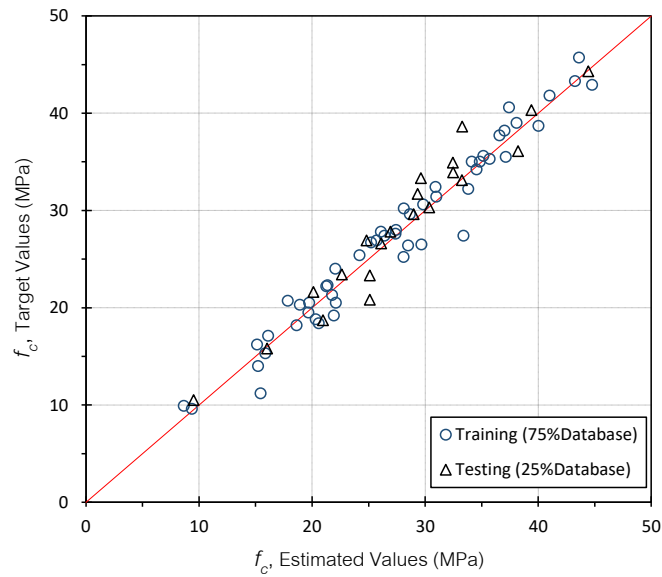
การตั้งค่า	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
Maximum Generation	100	100	100	100	100	100
Population Size	500	1000	500	1000	500	1000
Mutation Probability	5%	5%	10%	10%	20%	20%
Elites count*	2	2	2	2	2	2

*หมายเหตุ: Elites count คือ จำนวนคำตอบที่ดีที่สุด (the best fitness values) ในยุคข้อมูลปัจจุบันที่ถูกส่งผ่านไปยุคข้อมูลถัดไปโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางพันธุกรรม [84]

ตารางที่ 3.12 ค่า Pearson's r squared สำหรับสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ

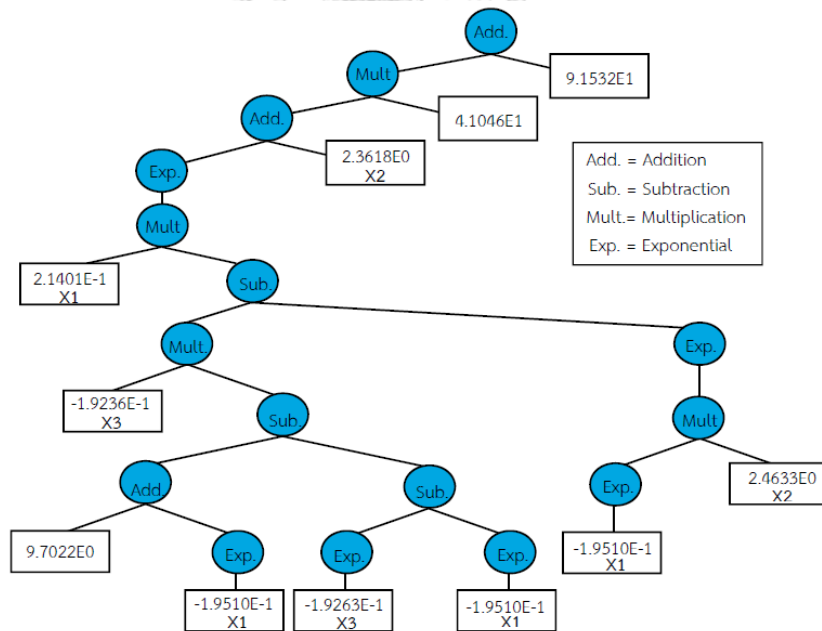
ชุดข้อมูล	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
R^2 ชุดข้อมูลเทรนนิ่ง	0.961	0.962	0.961	0.960	0.959	0.960
R^2 ชุดข้อมูลทดสอบ	0.930	0.938	0.936	0.927	0.914	0.925

จากตารางที่ 3.12 พบว่าสมการรูปแบบที่ 2 มีค่า R^2 มากที่สุดทั้งสำหรับชุดข้อมูลเทรนนิ่งและชุดข้อมูลทดสอบ โดยรูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพการกระจาย (scatter plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำนายได้กับกำลังที่ได้จากผลการทดสอบ



รูปที่ 3.10 แผนภาพการกระจายสำหรับสมการรูปแบบที่ 2

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดย GP สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ได้ (สมการรูปแบบที่ 2) สามารถแสดงในรูปของแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีดังรูปที่ 3.11 โดยสามารถแปลงเป็นสมการได้ตามสมการที่ 3.23



รูปที่ 3.11 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีสำหรับสมการรูปแบบที่ 2

ทั้งนี้สมการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกตั้งสมการที่ 3.23 สามารถใช้ได้เฉพาะภายในค่าขอบเขตของข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.10 เท่านั้น

$$f_c = (e^{(c_0 x_1^\lambda)} + c_8 x_2) c_9 + c_{10} \quad (3.23)$$

โดยที่ $\lambda = c_1 x_3 (c_2 + e^{(c_3 x_1)} - e^{(c_4 x_3)} + e^{(c_5 x_1)}) - e^{(c_7 x_2 e^{(c_6 x_1)})}$ (3.24)

เมื่อ x_1 คือ ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต (วัน)

x_2 คือ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)

x_3 คือ ค่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวม (C/(CA+FA))

และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{10} แสดงดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ 3.23

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
0.21401	-0.19263	-9.70220	-0.19510	-0.19263	-0.19510
c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	
-0.19510	2.46330	2.36180	-41.0460	91.5320	

บทที่ 4

ฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสม

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงขอบเขตในการรวบรวมข้อมูลและแสดงรายละเอียดของฐานข้อมูลตามประเภทของเสาวัสดุผสม โดยฐานข้อมูลการทดสอบนี้รวบรวมขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินความแม่นยำและความปลอดภัยของสมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังแสดงในบทที่ 5 นอกจากนี้ ยังได้ใช้ฐานข้อมูลการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาวัสดุผสมและใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยดังแสดงในบทที่ 6 และบทที่ 7 ตามลำดับ

4.1 การรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาฐานข้อมูลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1974 ถึง 2018 ประกอบด้วยเสาวัสดุผสมประเภทเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลาง โดยมีขอบเขตในการรวบรวมข้อมูล ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตน้ำหนักปกติโดยไม่มีเหล็กเสริม
2. เหล็กชุบพรมที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel)
3. แรงอัดตามแนวแกนกระทำเต็มหน้าตัด (เหล็กและคอนกรีต)
4. ในบทความวิจัยมีการอธิบายวิธีการทดสอบไว้อย่างชัดเจน

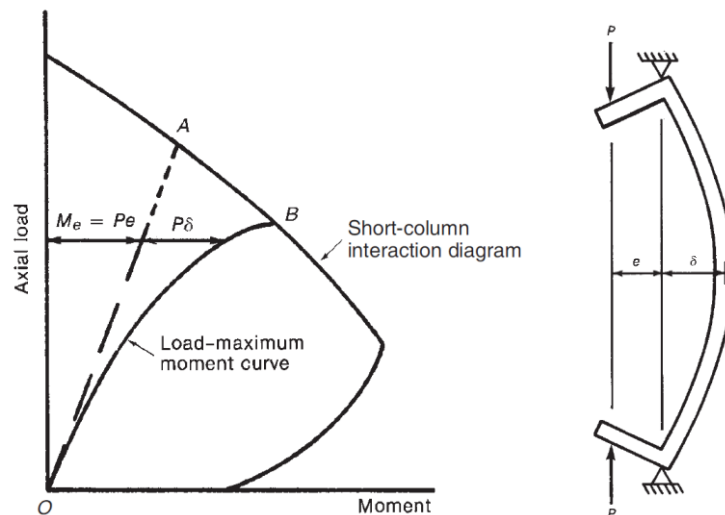
โดยในงานวิจัยนี้มีสมมติฐานในการคำนวณดังต่อไปนี้: กำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (cube) ได้แปลงเป็นกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก (cylinder) ตามความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้ใน Eurocode 2 [85] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 100$ มิลลิเมตรได้แปลงเป็นกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 150$ มิลลิเมตร โดยการคูณกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 100$ ด้วย 0.96 ตามความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Rashid และคณะ [86], สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (K) มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 1.0 สำหรับเสาที่ปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น (fix-ended supports) และแบบจุดหมุน (pinned-end supports) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์และคอนกรีตทรงกระบอก [85]

f_{cyl} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{cu} (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105

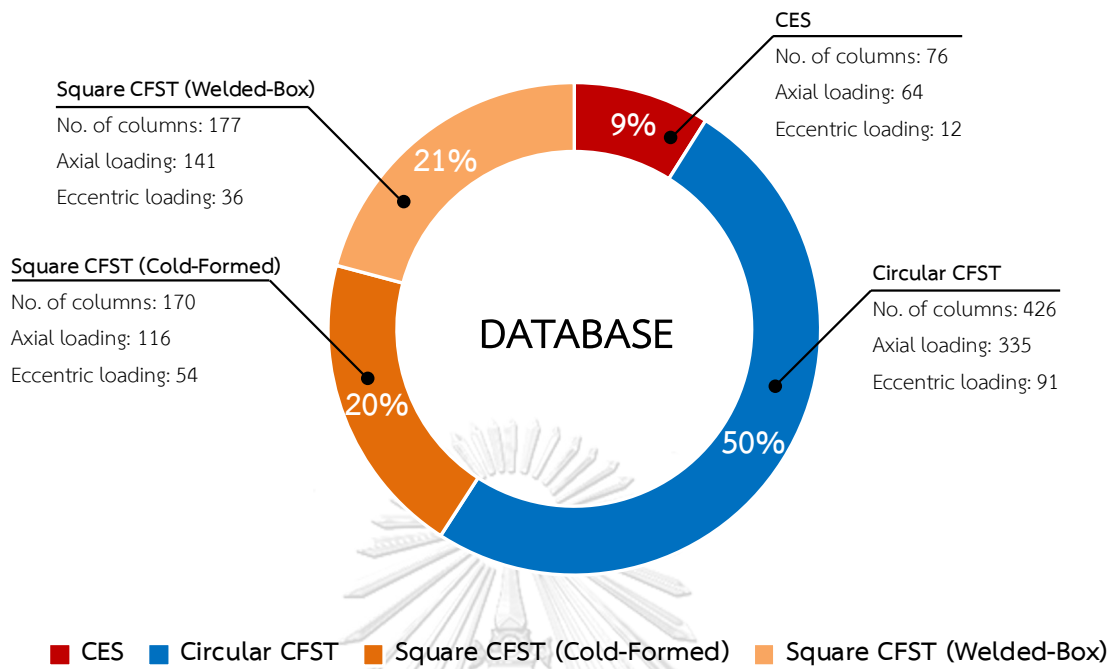
สำหรับเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 4.1 นั้น แรงดัดที่เกิดขึ้นนอกจากจะเกิดจากแรงอัด P คูณด้วยระยะเยื้องศูนย์กลาง e แล้ว การโก่งตัว (deflection, δ) ของเสายังเป็นสาเหตุให้แรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งแรงดัดสูงสุดนั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกลางเสาซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวสูงสุด ดังนั้น ค่าแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นดังแสดงในฐานข้อมูลผลการทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นผลรวมของแรงดัดที่เกิดจากระยะเยื้องศูนย์กลาง Pe และแรงดัดที่เกิดจากการโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา $P\delta$ โดยสามารถแสดงได้ดังเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปที่ 4.1 กล่าวคือ ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดที่เสาเกิดการวิบัติขึ้นนั้นแสดงได้ดังจุด B และเนื่องจากค่าแรงดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงจากจุด A เป็นจุด B [87]

$$M = P(e + \delta) \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 เสาภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางและเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด [87]

รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของเสาวัสดุผสมแต่ละประเภทในฐานข้อมูลการทดสอบและแสดงรายละเอียดย่อยสำหรับเสาแต่ละประเภทซึ่งประกอบด้วย จำนวนตัวอย่างรวมและจำนวนตัวอย่างตามประเภทของแรงกระทำ (แรงกระทำตรงศูนย์กลางและแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง) โดยภาพรวมสามารถสังเกตได้ว่า ตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมนั้น มีจำนวนถึงร้อยละ 50 ของฐานข้อมูลการทดสอบทั้งหมด สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมนั้น สามารถจำแนกได้เป็นสองประเภท คือ เสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต โดยมีจำนวนตัวอย่างคิดเป็นร้อยละ 20 และ 21 ของฐานข้อมูลการทดสอบ ตามลำดับ และสำหรับเสาวัสดุผสมที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยที่สุดคือเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยมีจำนวนตัวอย่างเพียงร้อยละ 9 ของฐานข้อมูลการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 4.2 จำนวนและสัดส่วนของเสาวัสดุผสมแต่ละประเภทในฐานข้อมูลการทดสอบ

4.2 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมประกอบด้วยเสาจำนวน 426 ตัวอย่าง โดยเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์จำนวน 335 และ 91 ตัวอย่าง ตามลำดับ ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนเสาดังกล่าวและช่วงของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับแต่ละงานวิจัย โดยตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อนเหล็ก (D), ความหนาของท่อนเหล็ก (t), ความสูงของเสา (L), กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก (f'_c), หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ (f_y), ระยะเยื้องศูนย์ของแรงกระทำ (e) และกำลังรับแรงอัดของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (P_u)

ตารางที่ 4.2 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

Ref.	No. of test	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	P_u (kN)
[88]	12	174-179	3.0-9.0	360	22-46	248-283	1304-3217
[89]	6	152	1.7	500-900	73-85	270-328	1458-1895
[90]	6	165	4.5	661-4956	41	414	782-1563
[44]	3	140	3.0-6.7	635	23-28	285-537	881-2715
[91]	12	108-133	3.5	7.0	77-85	352-429	1518-3404
[40]	15	165-190	0.9-2.8	577-664	41-108	186-363	1350-3360
[92]	11	108	4.5	3510-4158	26-37	348	280-440
[63]	13	101-318	3.0-10.4	304-956	23-53	331-452	649-8289
[93]	6	110-165	1.9-4.7	2200-2475	27	350-355	355-1058
[33]	8	114-115	3.7-5.0	300	26-90	343-265	948-1787
[43]	36	108-450	3.0-6.5	324-1350	24-82	279-853	941-13776
[94]	17	100-200	3.0	300-2000	48	303	708-2383
[36]	15	160	5.0	2000-4000	40-106	270-283	1091-2000
[30]	6	165-219	2.7-4.8	510-650	33-62	350	1560-3400
[95]	6	89-112	2.7-2.9	340	23	360	620-822
[96]	10	100	1.9	300-3000	104	404	288-1170
[97]	16	114	3.3	343-800	31-101	287	737-1453
[37]	2	300-360	6.0-12.0	1580-1760	31.5	479-498	6888-9823
[98]	24	115-194	3.0-3.5	1000-2500	26-32	345-488	566-2000
[99]	6	114-219	3.5-9.7	250-600	52-178	377-428	1550-6121
[100]	3	159	6	2135	38-120	394-487	1414-2792

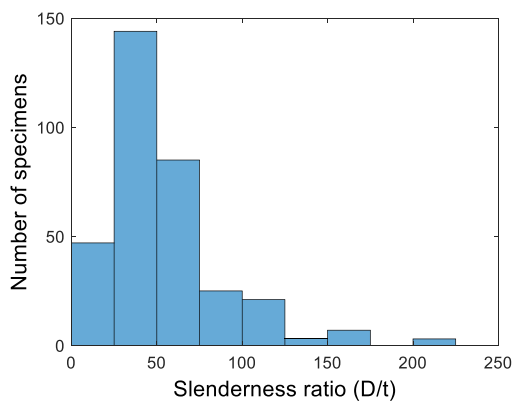
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

Ref.	No. of test	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	P_u (kN)
[31]	3	558-559	16.5	995-997	26	546	28830-29590
[34]	18	114	2.7-5.9	300-900	54-103	235-355	877-1990
[45]	12	114-219	3.6-10.0	250-600	49-178	300-428	2340-9085
[46]	2	219-273	10.0-16.0	4195	173-178	374-412	6402-8648
[6]	36	153-477	1.5-11.4	306-954	62	290-345	1823-20462
[101]	12	216-632	2.6-11.2	657-1890	50	260-590	4030-29463
[102]	15	141-262	2.1-3.0	525-975	40-43	691-734	1550-4302
[103]	4	209-211	2.0-3.0	1370-2170	28-36	256-297	1405-1606
	ค่าสูงสุด	632	16.5	4956	179	853	29590
	ค่าต่ำสุด	89	0.9	250	22	186	280

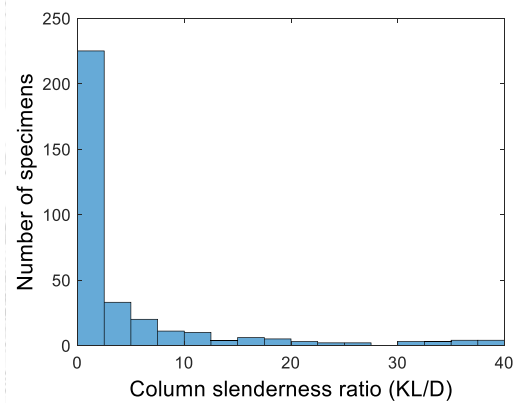
ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

Ref.	No. of test	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	e (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)
[90]	18	165	4.5	661-4956	41	414	21-103	238-1214	32-64
[94]	5	200	3.0	2000	49	304	30	1132-1291	54-63
[36]	8	160	5.1	2000-4000	101	271-281	8-32	666-1697	19-50
[96]	4	100	1.9	1500	105	404	15-30	298-478	16-17
[37]	9	240-600	6.0-12.0	1400-2480	32-59	468-517	60-300	1277-5135	165-1457
[39]	32	100-160	3.0-5.7	2135-3135	31-107	320-322	20-50	94-1013	7-61
[104]	5	140	4.0	1070-4670	62	374	25	336-814	23-37
[100]	6	159	6.0	2135	40-111	376-487	20-50	587-1525	31-76
[46]	4	219-273	10.0-16.0	3640-4450	169-177	374-412	20-50	3293-5288	255-563
	ค่าสูงสุด	600	16.0	4956	177	517	300	5288	1457
	ค่าต่ำสุด	100	1.9	661	31	271	8	94	7

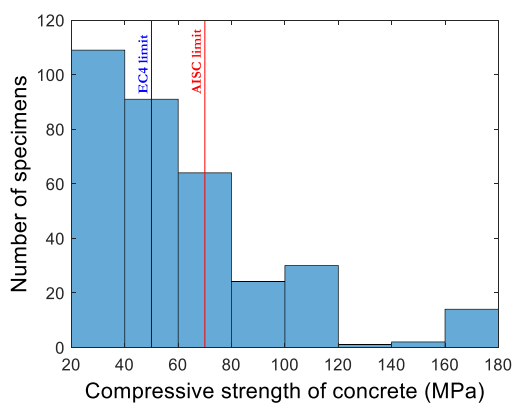
รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ สำหรับอัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) สามารถจำแนกข้อมูลตามประเภทของหน้าตัด โดยมีเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดร้อยละ 85 5 และ 10 ของฐานข้อมูลตามลำดับ รูปที่ 4.3 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในฐานข้อมูล และแสดงขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งมีข้อมูลที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเกินกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 27 และ 44 ของฐานข้อมูลการทดสอบ รูปที่ 4.3 (ง) แสดงฮิสโตแกรมของหน่วยแรงครากของท่อเหล็ก โดยมีข้อมูลที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 12 และ 15 ของฐานข้อมูลการทดสอบ



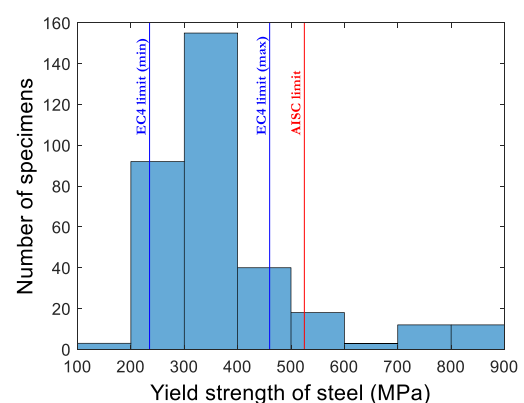
(ก) อัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็ก



(ข) อัตราส่วนความชะลูดของเสา

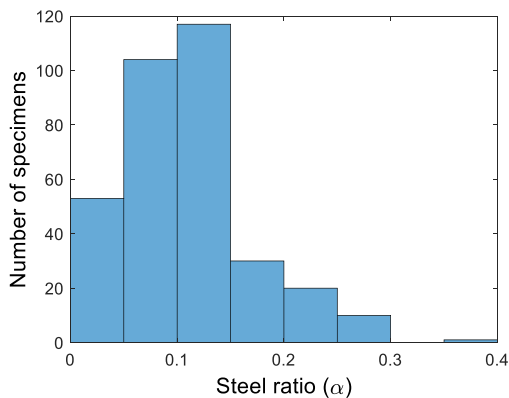


(ค) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

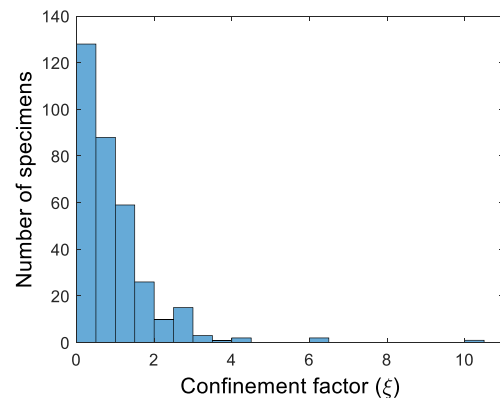


(ง) หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก

รูปที่ 4.3 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์



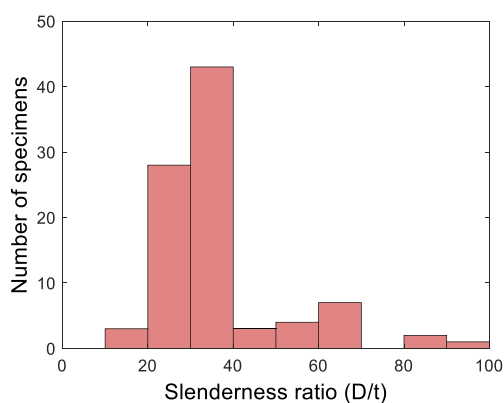
(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ



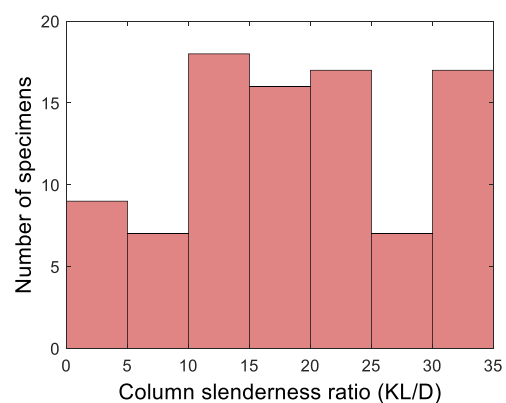
(ข) ตัวประกอบการโอบรัด

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ จากรูปที่ 4.4 (ก) สามารถจำแนกข้อมูลตามประเภทของหน้าตัด โดยมีเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดร้อยละ 81 16 และ 3 ของฐานข้อมูลตามลำดับ รูปที่ 4.4 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในฐานข้อมูล และแสดงขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งมีข้อมูลที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเกินกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 46 และ 57 ของฐานข้อมูลการทดสอบ รูปที่ 4.4 (ง) แสดงฮิสโตแกรมของหน่วยแรงครากของท่อเหล็ก โดยมีข้อมูลที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเกินขอบเขตของมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 10 ของฐานข้อมูลการทดสอบ และข้อมูลทั้งหมดมีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กไม่เกินขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16

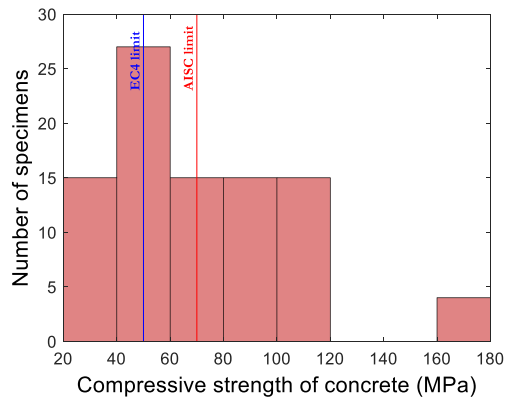


(ก) อัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็ก

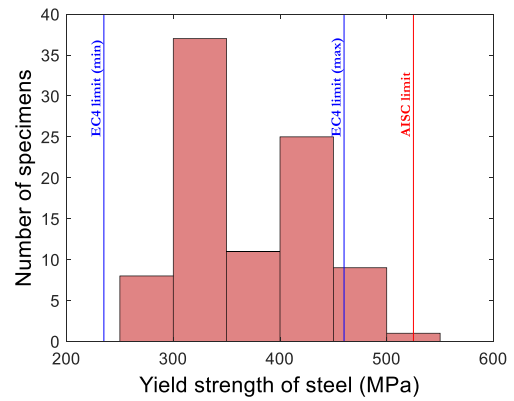


(ข) อัตราส่วนความชะลูดของเสา

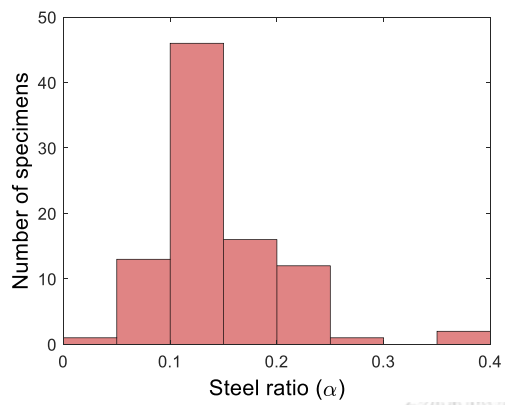
รูปที่ 4.4 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์



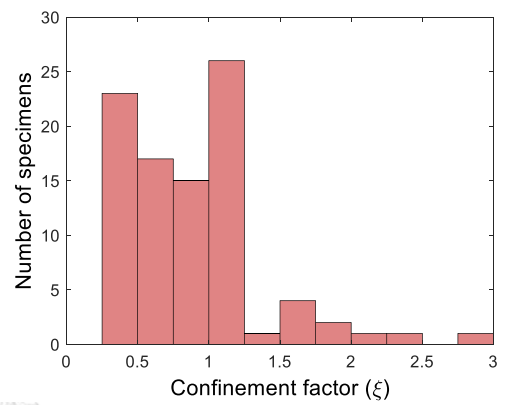
(ค) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



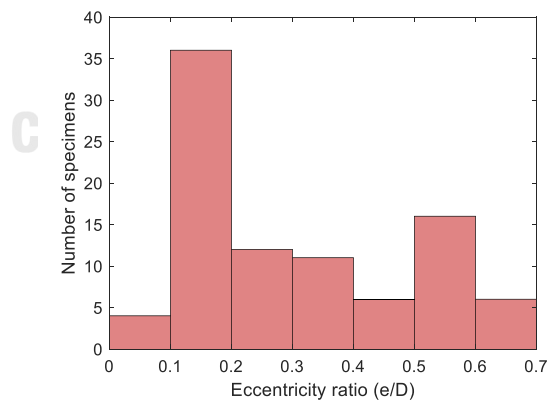
(ง) หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก



(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ



(ฉ) ตัวประกอบการโอบรัด

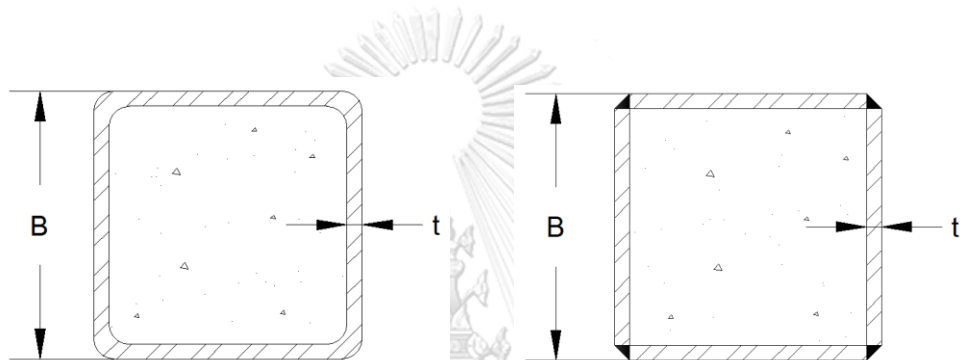


(ช) อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์กลาง

4.3 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ในงานวิจัยนี้ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะพิจารณา รวบรวมเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น โดยเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยมสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทได้แก่ เสาท่อนเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีตและ เสาท่อนเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยฐานข้อมูลประกอบด้วยเสาท่อนเหล็ก ขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีตจำนวน 170 ตัวอย่าง (ภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ 116 ตัวอย่าง และแรงอัด เยื้องศูนย์ 54 ตัวอย่าง) และเสาท่อนเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต 177 ตัวอย่าง (ภายใต้แรงอัดตรง ศูนย์ 141 ตัวอย่าง และแรงอัดเยื้องศูนย์ 36 ตัวอย่าง) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5



(ก) เสาท่อนเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีต (ข) เสาท่อนเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต

รูปที่ 4.5 เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 4.4 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

Ref.	No. of test	B (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	P_u (kN)
(ก) เสาท่อนเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีต							
[105]	6	150	0.7-2.1	480-800	22-35	245	558-974
[90]	6	150	4.3	599-4494	32	438	909-1598
[44]	5	127	3.1-7.5	635	24-30	312-357	917-2069
[106]	4	305	5.8-8.9	1200	110	259-660	11390-14116
[63]	8	100-301	2.2-6.1	301-902	26-64	300-395	609-6496
[43]	48	119-323	4.4-9.4	360-969	24-87	262-835	1153-10357
[93]	6	100-140	2.0-5.0	2100-2500	27	240-366	342-1248
[107]	27	60-150	3.0-4.5	1000-2700	26-29	335-528	105-1516
[108]	6	200	6.1-10.3	600	20	382-438	2730-3980
	ค่าสูงสุด	324	10.3	4494	110	835	14116
	ค่าต่ำสุด	60	0.7	301	20	240	105

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

Ref.	No. of test	B (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	P_u (kN)
(ข) เสาท่อนเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต							
[22]	4	100-120	2.9	300-360	49	228	760-1050
[109]	4	65-75	3	1770	52-79	455-468	269-414
[23]	6	100-183	4.2	300-540	57-67	550	1490-4210
[110]	3	120	2.7	360-1400	16-29	340	640-816
[111]	2	130	2.7	780	18	340	760-770
[94]	11	200	3.0	600-2310	49	303	1986-2594
[112]	4	120-270	5.0	430-880	20	761	1835-3950
[113]	2	200	2.5	1190-2340	48	270	2260-2305
[114]	6	150	2.9-4.9	1085-3101	79	317-319	1558-2597
[96]	10	100	1.9	300-3000	105	404	466-1220
[115]	4	410-500	10.0-16.0	1230-1500	42	358-389	12800-17900
[116]	3	250-251	3.7	750	32	324	2677-3131
[117]	12	80-200	5.0	210-570	21-54	701	1367-3882
[118]	39	84-210	4.9	1512-3512	113	762	286-6329
[119]	16	83-209	4.9	285-1514	100-113	762	1636-7506
[45]	15	150	8.0-12.5	450	141-157	446-779	5911-8912
	ค่าสูงสุด	500	16.0	3512	157	779	17900
	ค่าต่ำสุด	65	1.9	210	16	228	269

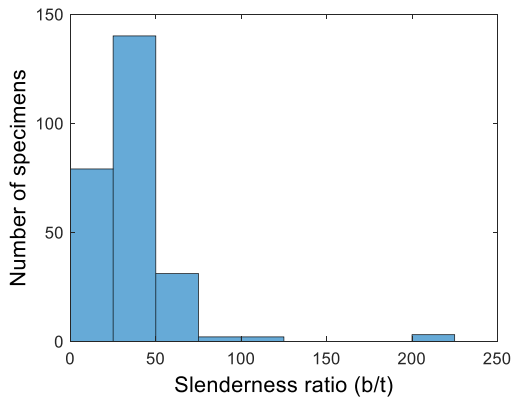
ตารางที่ 4.5 ฐานข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

Ref.	No. of test	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	e (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)
(ก) เสาท่อนเหล็กขึ้นรูปยื่นเติมด้วยคอนกรีต									
[90]	18	150	4.3	661-4956	32	438	25-125	277-1184	32-67
[29]	18	144-323	4.4-6.4	648	25-77	262-618	45-200	267-4045	39-408
[25]	6	100	4.0	2135-4135	74-95	280-376	20-50	220-491	17-27
[27]	12	150	4.0-6.0	530	96	435	20-65	1244-2130	45-98
	ค่าสูงสุด	323	6.4	4956	96	618	200	4045	408
	ค่าต่ำสุด	100	4.0	530	25	262	20	220	17

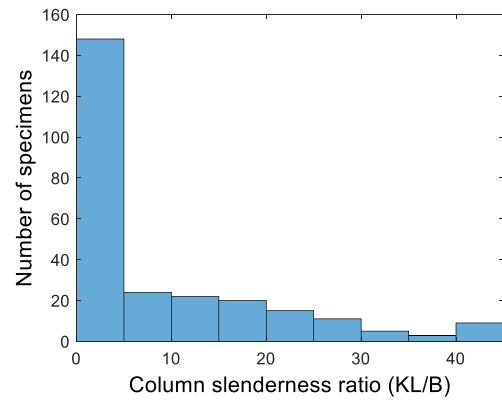
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ฐานข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

Ref.	No. of test	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	e (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)
(ข) เสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต									
[110]	4	120	2.7	360-1400	16-29	340	14-31	412-600	8-16
[94]	5	200	3.0	2310	49	304	30	1415-1620	57-71
[112]	4	120-270	5.0	2174-2817	20	761	10-25	1481-3062	36-95
[113]	4	200	2.5	1190-2340	48	270	30-60	1068-1760	60-80
[114]	8	148-151	2.9-4.9	1090-3101	79	317-319	21-43	941-1901	41-67
[96]	4	100	1.9	1500	105	404	15-30	390-660	13-19
[120]	4	150	8.3	1180	34-45	488	13-33	2020-2470	61-89
[46]	3	200	12.0-12.5	3640	169-176	465-756	20-50	5078-7136	350-550
		ค่าสูงสุด	270	12.5	3640	176	761	7136	550
		ค่าต่ำสุด	100	1.9	360	16	270	390	8

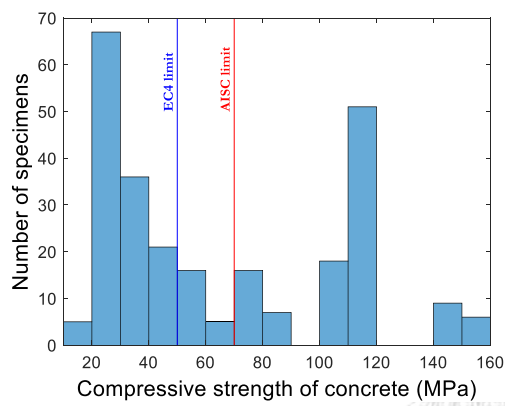
รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ โดยจำนวนของข้อมูลที่แสดงนั้น เป็นจำนวนรวมของเสาท่อเหล็กขึ้นรูปเป็นเติมด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต จากรูปที่ 4.6 (ก) สามารถจำแนกข้อมูลตามประเภทของหน้าตัด โดยมีเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดร้อยละ 75 23 และ 2 ของฐานข้อมูลตามลำดับ รูปที่ 4.6 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในฐานข้อมูล และแสดงขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งมีข้อมูลที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเกินกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 36 และ 42 ของฐานข้อมูลการทดสอบ รูปที่ 4.6 (ง) แสดงฮิสโตแกรมของหน่วยแรงครากของท่อเหล็ก โดยมีข้อมูลที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 41 และ 42 ของฐานข้อมูลการทดสอบ



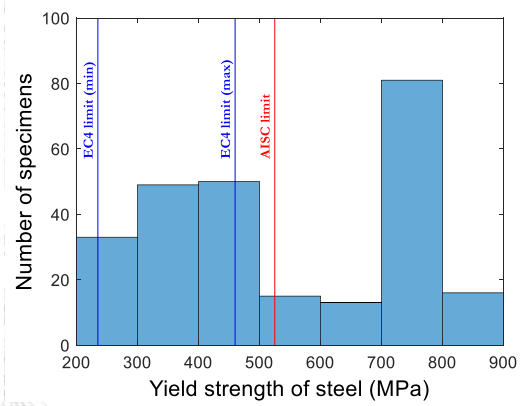
(ก) อัตราส่วนความชะลูดของท่อนเหล็ก



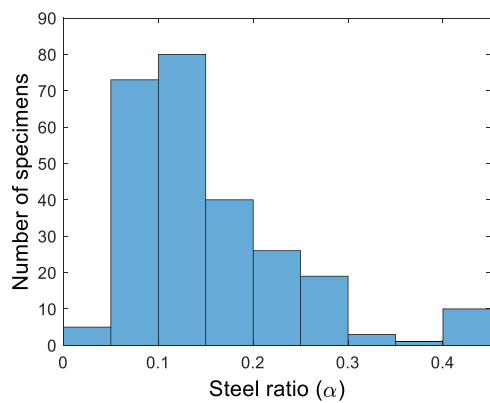
(ข) อัตราส่วนความชะลูดของเสา



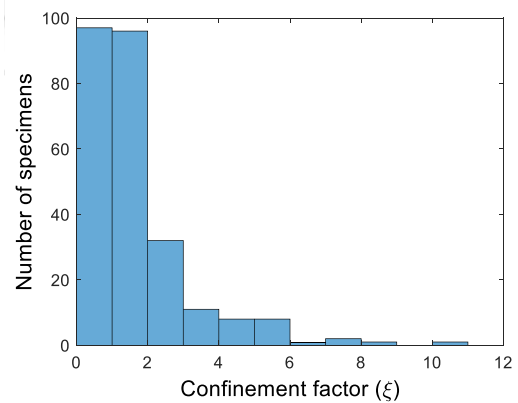
(ค) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



(ง) หน่วยแรงครากของท่อนเหล็ก



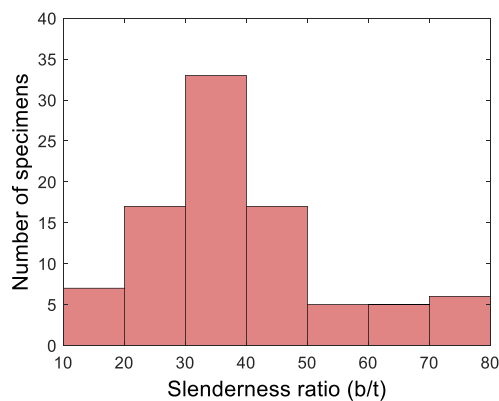
(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ



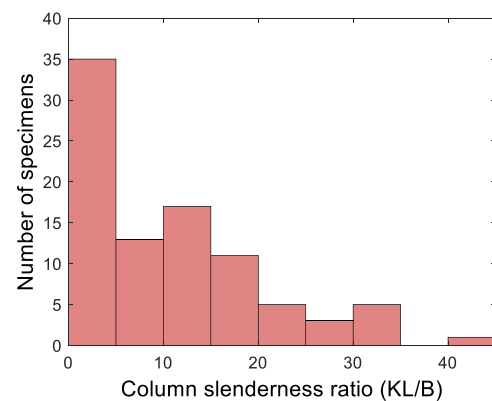
(ฉ) ตัวประกอบการโอบรัด

รูปที่ 4.6 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

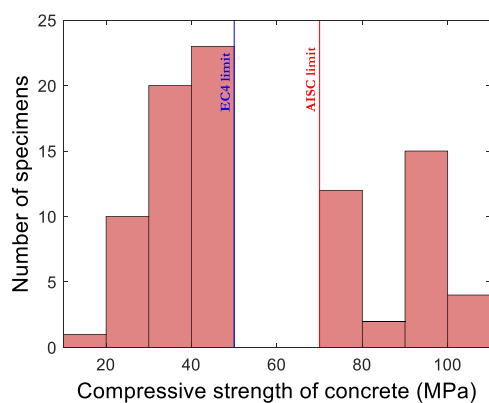
รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ สำหรับอัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) สามารถจำแนกข้อมูลตามประเภทของหน้าตัด โดยมีเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดร้อยละ 80 19 และ 1 ของฐานข้อมูลตามลำดับ รูปที่ 4.7 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในฐานข้อมูล และแสดงขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งมีข้อมูลที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเกินกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 40 ของฐานข้อมูลการทดสอบ รูปที่ 4.7 (ง) แสดงฮิสโตแกรมของหน่วยแรงครากของท่อเหล็ก โดยมีข้อมูลที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 14 และ 20 ตามลำดับ



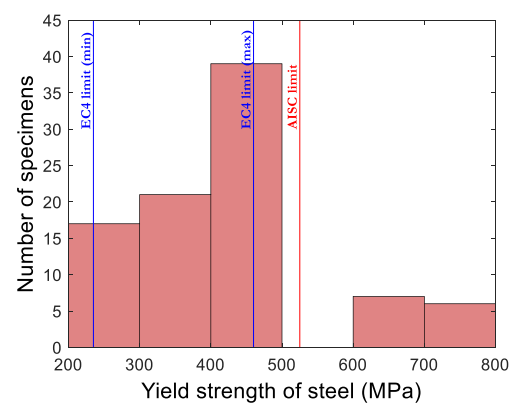
(ก) อัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็ก



(ข) อัตราส่วนความชะลูดของเสา

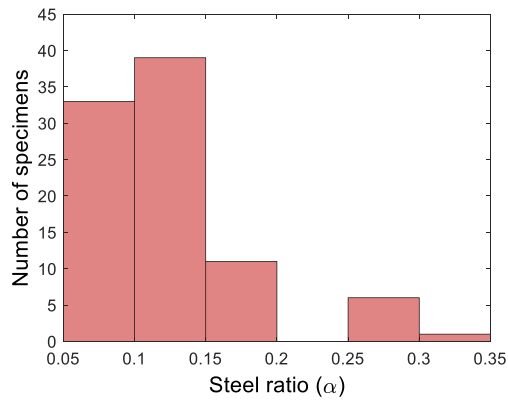


(ค) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

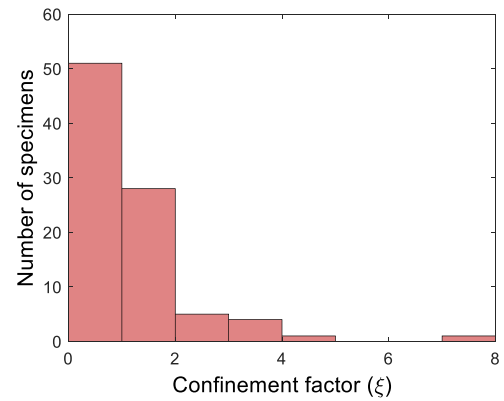


(ง) หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก

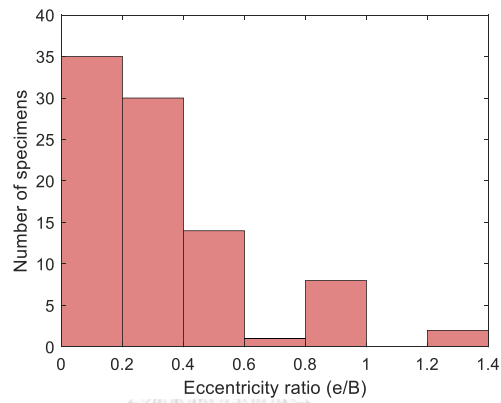
รูปที่ 4.7 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์



(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ



(ฉ) ตัวประกอบกรอบรัด



(ช) อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง

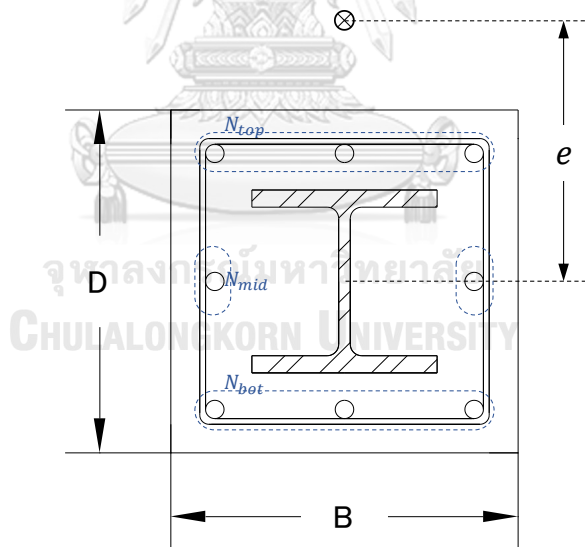
รูปที่ 4.7 (ต่อ) ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 ฐานข้อมูลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

ฐานข้อมูลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตประกอบด้วยเสาจำนวน 76 ตัวอย่าง โดยเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์จำนวน 64 และ 12 ตัวอย่างตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ซึ่งฐานข้อมูลการทดสอบนี้จะพิจารณาเฉพาะเสาที่มีหน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช (H-shape) และหน้าตัดรูปตัวไอ (I-shape) เท่านั้น นอกจากนี้สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์ จะพิจารณาเฉพาะเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์ที่ทำให้เกิดแรงดัดรอบแกนหลักเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ประกอบด้วย ความกว้าง (B) และความลึก (D) ของหน้าตัด, ความสูงของเสา (L), ขนาดของเหล็กรูปพรรณ ($b \times d \times t_f \times t_w$), เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (ϕ_s), จำนวนเหล็กเสริมตามยาวที่ตำแหน่งบนหรือเหล็กเสริมรับแรงอัด (N_{top}) ตำแหน่งกลาง (N_{mid}) และตำแหน่งล่างของหน้าตัดหรือเหล็กเสริมรับแรงดึง (N_{bot}), กำลังอัดของคอนกรีต (f'_c), หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ (f_y), หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม (f_{yr}), เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก (ϕ_t), ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (spacing), ระยะหุ้มจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กรูปพรรณ (covering) และกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (P_u)

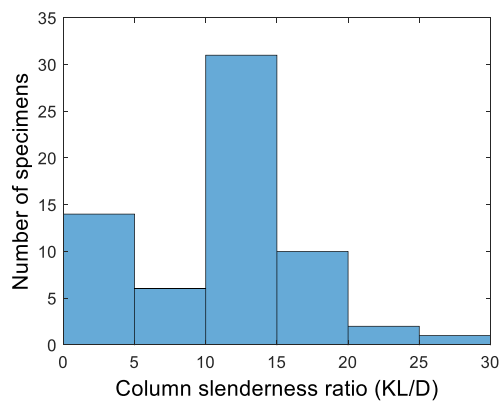


รูปที่ 4.8 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์

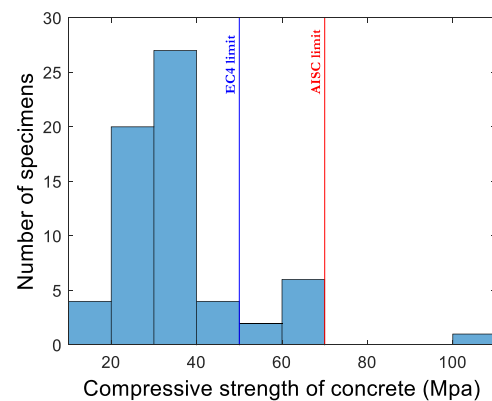
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

No. of test	Dimensions			Structure steel			Reinforcing steel			Material strength			Tie bar		Covering (mm)	P_u (kN)
	B (mm)	D (mm)	L (mm)	$b \times d \times t_f \times t_w$ (mm)	ϕ_s (mm)	N_{top}	N_{mid}	N_{bot}	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yr} (MPa)	ϕ_t (mm)	Spacing (mm)			
[121]	30	240-320	210-240	1253-4281	140x140x12x7	12	2	0	2	29-36	273-502	414	5	180	39	2060-2747
110x220x9.2x5.9																
[122]	4	160	160	924-4619	100x100x8x6	6	2	0	2	15-18	298-306	376	4	75	19	522-996
[123]	7	356	356	4572	166x205x12x7	16-22	2	0	2	30-66	345-380	471-585	10	178-254	25	6555-9777
205x210x14x9																
210x229x24x15																
[124]	4	160	160	500	75x100x4.5x3.2	10	2	0	2	20-21	287-292	275	5	40-80	10	1037-1577
100x100x8x6																
[125]	5	160	160	700-2200	100x100x4.5x3.2	10	2	0	2	20-21	288-304	275	5	80	10	1051-1542
100x100x8x6																
[126]	7	280	280	1200	150x75x7x5	16	4	4	4	26-30	296-303	350	8	35-140	34	3630-4399
150x150x10x7																
[127]	5	180	160	2800-4100	68x115x7.6x4.5	12	2	0	2	41-55	235	358	6	150	15	1183-1900
[128]	2	240	240	500	154x162x8x16	16	3	2	3	49-105	363	357	6	150	16	3744-6913

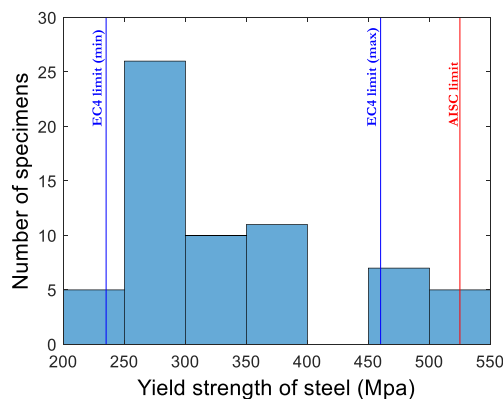
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง จากรูปที่ 4.9 (ข) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในฐานข้อมูล และแสดงขอบเขตสูงสุดของสมการตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งมีข้อมูลที่กำลังอัดของคอนกรีตเกินกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 2 และ 14 ของฐานข้อมูลการทดสอบ รูปที่ 4.9 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ โดยมีข้อมูลที่มีหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณเกินขอบเขตของมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 19 ของฐานข้อมูลการทดสอบ ทั้งนี้ทุกข้อมูลมีหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณไม่เกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 นอกจากนี้สำหรับอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณและอัตราส่วนเหล็กเสริมยื่นดังแสดงในรูปที่ 4.9 (จ) และ (ง) พบว่าเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในฐานข้อมูลมีค่าอัตราส่วนทั้งสองอยู่ในช่วงขอบเขตที่ข้อกำหนดและมาตรฐานได้กำหนดไว้ กล่าวคือเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตมีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมากกว่าร้อยละ 1 ของพื้นที่หน้าตัดและมีอัตราส่วนเหล็กเสริมยื่นมากกว่าร้อยละ 0.4 แต่ไม่เกินร้อยละ 6 ของพื้นที่หน้าตัด



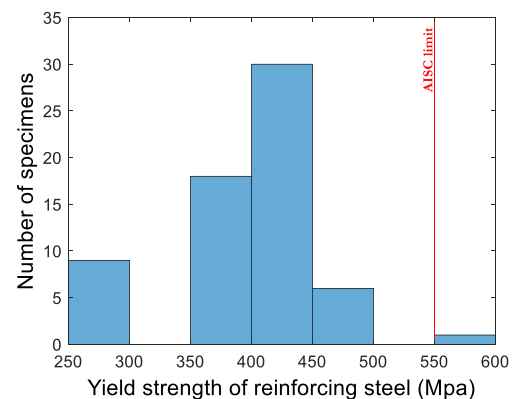
(ก) อัตราส่วนความขะลูดของเสา



(ข) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

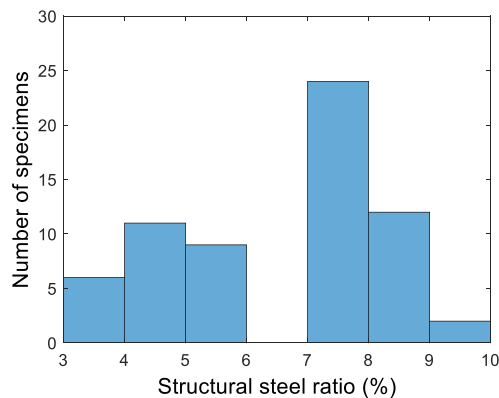


(ค) หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ

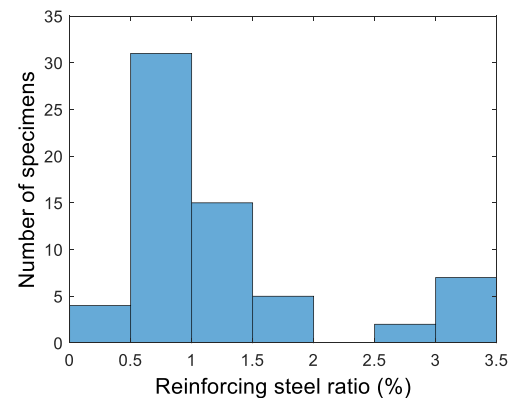


(ง) หน่วยแรงครากของเหล็กเสริมยื่น

รูปที่ 4.9 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง



(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ

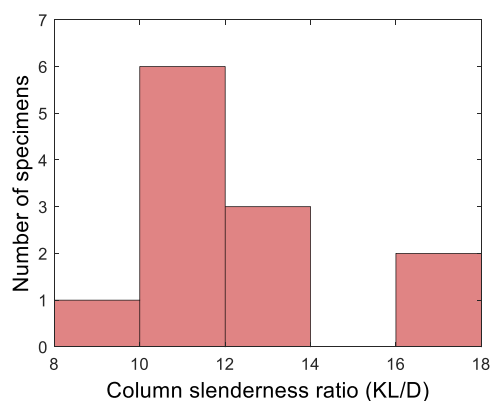


(ฉ) อัตราส่วนเหล็กเสริมยื่น

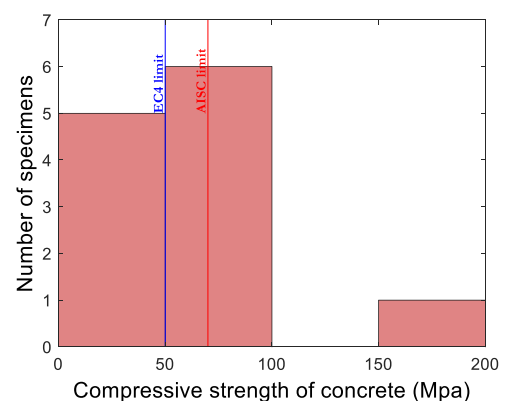
รูปที่ 4.9 (ต่อ) ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายของข้อมูลสำหรับแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ จากรูปที่ 4.10 (ข) และรูปที่ 4.10 (ค) แสดงฮิสโตแกรมของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ โดยมีข้อมูลที่มีกำลังอัดของคอนกรีตและหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณเกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ร้อยละ 58 ของฐานข้อมูลการทดสอบ ทั้งนี้ทุกข้อมูลมีหน่วยแรงครากของเหล็กเสริมยื่นไม่เกินขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 ดังรูปที่ 4.10 (ง) สำหรับอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณและอัตราส่วนเหล็กเสริมยื่นดังแสดงในรูปที่ 4.10 (จ) และ (ฉ) พบว่าเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในฐานข้อมูลมีค่าอัตราส่วนทั้งสองอยู่ในช่วงขอบเขตที่ข้อกำหนดและมาตรฐานได้กำหนดไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

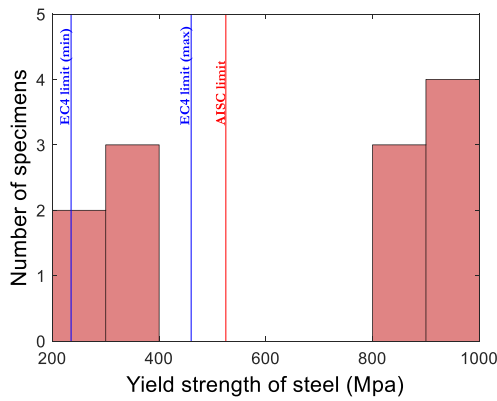


(ก) อัตราส่วนความชะลูดของเสา

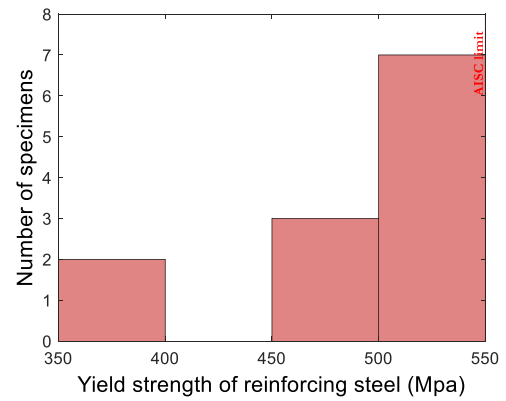


(ข) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

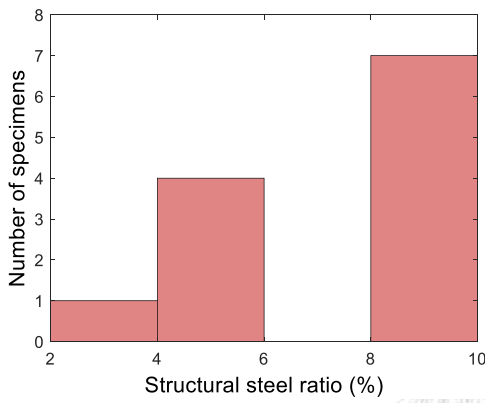
รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์



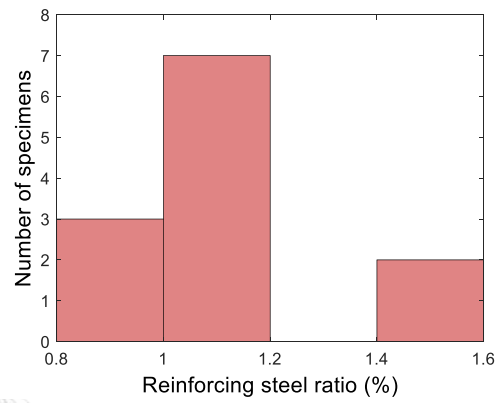
(ค) หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ



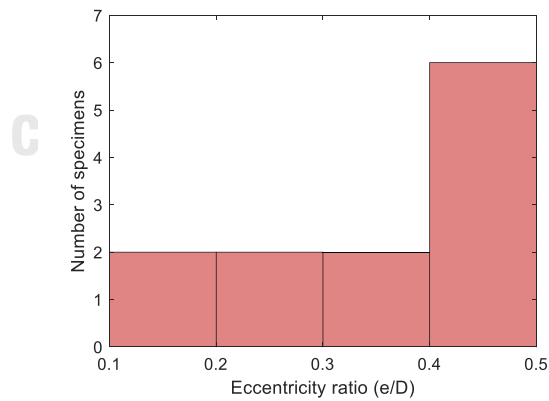
(ง) หน่วยแรงครากของเหล็กเสริมยื่น



(จ) อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ



(ฉ) อัตราส่วนเหล็กเสริมยื่น



(ช) อัตราส่วนการเอียงศูนย์

รูปที่ 4.10 (ต่อ) ฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

โดยสรุปสำหรับบทที่ 4 นี้ ได้แสดงรายละเอียดของฐานข้อมูลการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลผลการทดสอบเสาวัสดุผสมจำนวน 849 ตัวอย่าง จากงานวิจัยในอดีตจำนวน 63 บทความ โดยมีสัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมถึงร้อยละ 50 ของฐานข้อมูลการทดสอบ และสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ เสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีต และเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต มีจำนวนข้อมูลร้อยละ 20 และ 21 ของฐานข้อมูลการทดสอบ ตามลำดับ ส่วนข้อมูลผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตนั้น มีสัดส่วนของข้อมูลน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 9 ของฐานข้อมูลการทดสอบ และจากฮิสโตแกรมของข้อมูลเสาวัสดุผสมดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.10 พบว่า ตัวอย่างเสาวัสดุผสมส่วนมากในฐานข้อมูลการทดสอบมีกำลังของวัสดุ (กำลังอัดของคอนกรีตและหน่วยแรงครากของเหล็ก รูปพรรณ) ภายใต้ขอบเขตที่ข้อกำหนดและมาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยข้อมูลส่วนมากมีค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสาอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 และ 10 ถึง 15 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต และ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งฐานข้อมูลการทดสอบนี้ จะใช้สำหรับการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานในบทที่ 5 นอกจากนี้ ฐานข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ จะใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ในบทที่ 6 และบทที่ 7 ตามลำดับ

บทที่ 5

การประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาวัสดุผสม

ในบทที่ 5 นี้จะแสดงผลของการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานตามประเภทของแรงที่กระทำต่อเสาวัสดุผสม โดยในการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานนั้น ได้ใช้ฐานข้อมูลการทดสอบจากบทที่ 4 เปรียบเทียบกับกำลังของเสาวัสดุผสมที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4

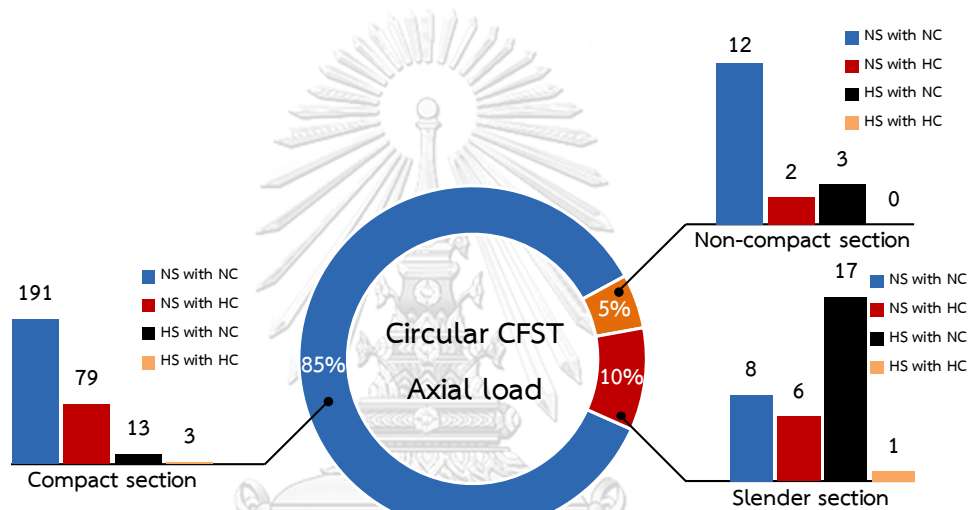
5.1 เสาวัสดุผสมภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์

ในการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานสำหรับเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ ได้จำแนกข้อมูลผลการทดสอบเป็น 4 กลุ่มตามกำลังของวัสดุของเสาวัสดุผสม ได้แก่ (1) เหล็กรูปพรรณกำลังปกติและคอนกรีตกำลังปกติ (NS with NC), (2) เหล็กรูปพรรณกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง (NS with HC), (3) เหล็กรูปพรรณกำลังสูงและคอนกรีตกำลังปกติ (HS with NC) และ (4) เหล็กรูปพรรณกำลังสูงและคอนกรีตกำลังสูง (HS with HC) โดยนิยามให้วัสดุกำลังสูงคือวัสดุที่มีกำลังสูงกว่าขอบเขตของข้อกำหนด AISC 360-16 กล่าวคือ เหล็กรูปพรรณมีหน่วยแรงครากมากกว่า 525 เมกะปาสคาล หรือคอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่า 70 เมกะปาสคาล

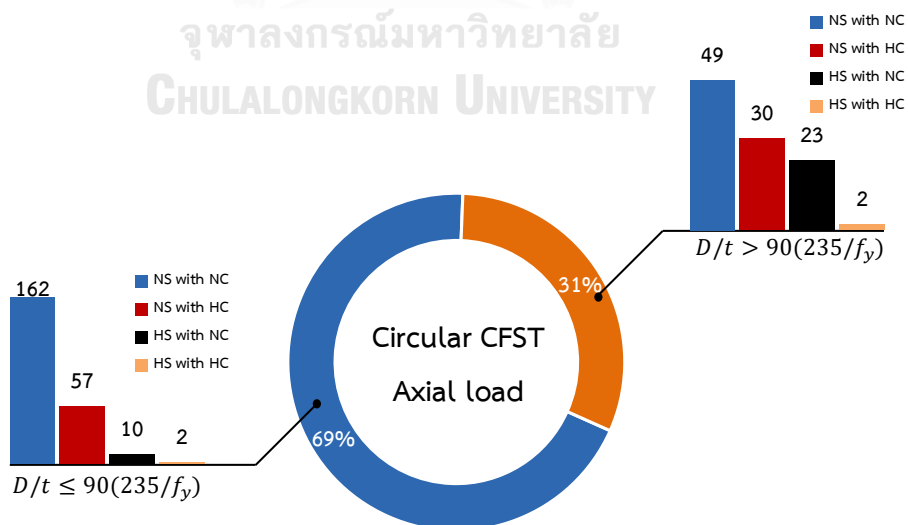
รูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.7 แสดงเส้นโค้งการโก่งเดาะในรูปแบบไร้หน่วย (normalized column buckling curves) โดยกำลังอัดของเสาวัสดุผสมจะถูกหารด้วยกำลังอัดของหน้าตัด (cross-sectional strength) ที่คำนวณจากข้อกำหนดหรือมาตรฐานเพื่อแสดงผลในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและกำลังที่ทำนายได้จากข้อกำหนดและมาตรฐาน นอกจากนี้ตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.2 ได้สรุปค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัด (average strength prediction ratio) ของเสาวัสดุผสมซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังจากผลการทดสอบและกำลังที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC 360-16 หรือมาตรฐาน Eurocode 4 (P_{exp}/P_{AISC} หรือ P_{exp}/P_{EC4}) โดยผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความถูกต้องในการทำนายกำลังของสมการตามข้อกำหนดและมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

ในฐานะข้อมูลผลการทดสอบได้จำแนกข้อมูลตามขอบเขตของค่าอัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็กที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละข้อกำหนดและมาตรฐาน สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 ข้อมูลผลการทดสอบได้จำแนกเป็น 3 กลุ่มตามประเภทของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ก) และสำหรับมาตรฐาน Eurocode 4 ข้อมูลผลการทดสอบได้จำแนกเป็น 2 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ข) โดยข้อมูลแต่ละกลุ่มสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 4 กลุ่มย่อยตามกำลังของวัสดุตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) นี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะสำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 (รูปที่ 5.2) และมาตรฐาน Eurocode 4 (รูปที่ 5.3) ตามลำดับ



(ก) จำแนกข้อมูลตามข้อกำหนด AISC 360-16

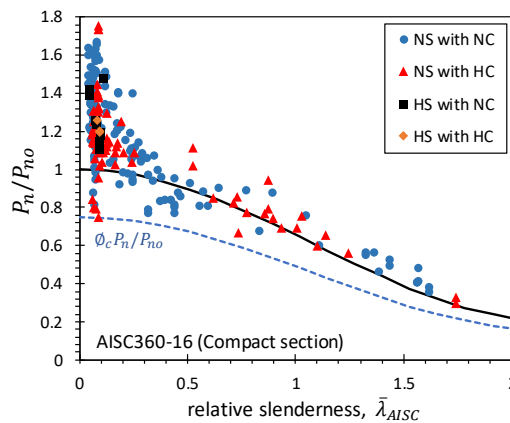


(ข) จำแนกข้อมูลตามมาตรฐาน Eurocode 4

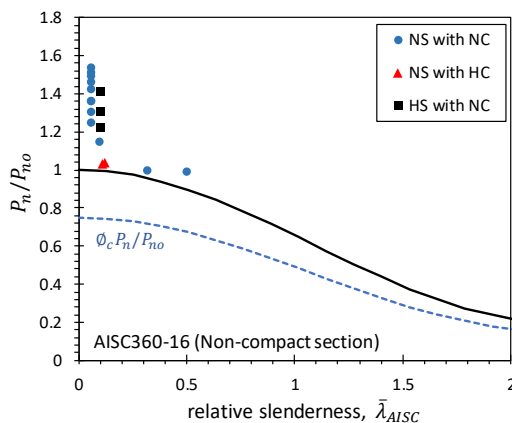
รูปที่ 5.1 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

5.1.1.1 ผลของกำลังของวัสดุ

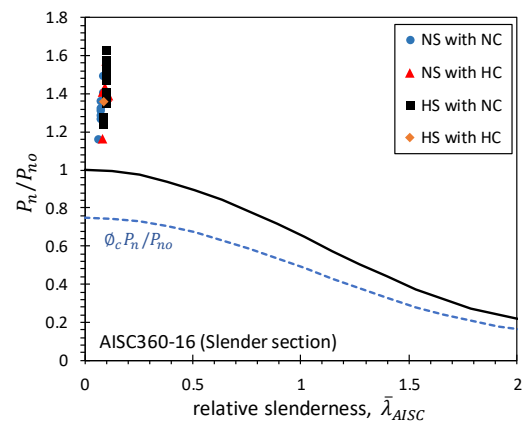
AISC 360-16: จากรูปที่ 5.2 พบว่า สมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มในการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับทุกกลุ่มของกำลังวัสดุ โดยเฉพาะสำหรับกลุ่มท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ และท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งข้อมูลทั้งหมดของสองกลุ่มดังกล่าวมีค่าอยู่เหนือเส้นโค้งการโก่งเดาะของข้อกำหนด AISC นอกจากนี้เส้นโค้งการโก่งเดาะของ AISC ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทาน ($\phi_c P_n$) แสดงโดยเส้นประ จากรูปที่ 5.2 (ก) พบว่าสมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานแล้วนั้น มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ ($f'_c = 178$ เมกะปาสคาล)



(ก) หน้าตัดอัดแน่น



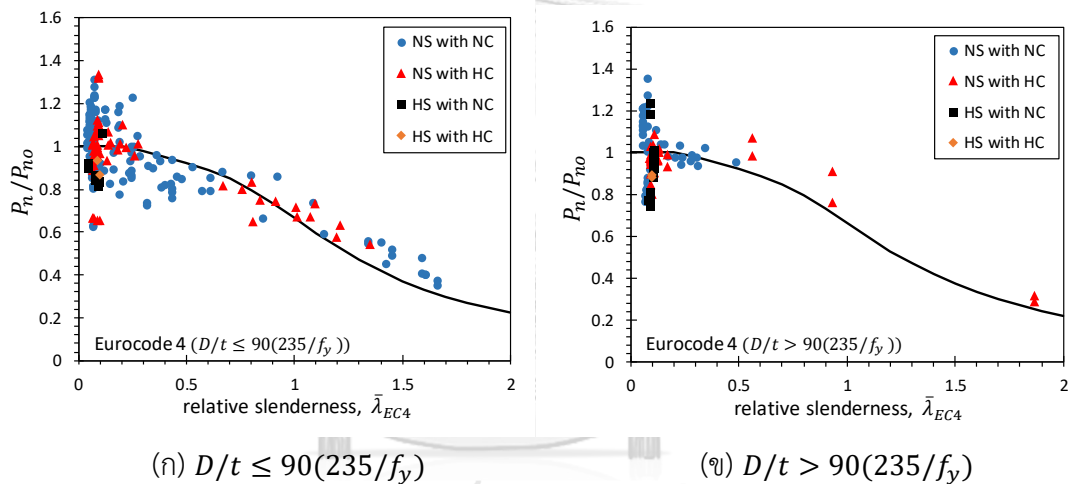
(ข) หน้าตัดไม่อัดแน่น



(ค) หน้าตัดชะลูด

รูปที่ 5.2 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

Eurocode 4: จากรูปที่ 5.3 สมการทำนายกำลังของมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยสำหรับกลุ่มเสาท่อเหล็กกำลังปกติเติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ และกลุ่มเสาท่อเหล็กกำลังปกติเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง และจากตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของข้อมูลมีค่าใกล้เคียง 1.00 สำหรับทุกกลุ่มข้อมูล โดยที่สำหรับกลุ่มท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ และท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงนั้น ค่าอัตราส่วน P_{exp}/P_{EC4} มีค่าน้อยกว่า 1.00 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัย (partial safety factor) สำหรับกำลังของวัสดุพบว่า กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ทำนายได้นั้นมีค่ามากกว่ากำลังจากผลการทดสอบจำนวน 9 ตัวอย่าง สำหรับเสาท่อเหล็กกำลังปกติเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ ($f'_c = 178$ เมกะปาสคาล) และเสาท่อเหล็กกำลังสูงพิเศษ ($f_y = 853$ เมกะปาสคาล) เติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ



รูปที่ 5.3 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ Eurocode 4 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

Group	$(P_{exp}/P_{AISC})_{avg}$			$(P_{exp}/P_{EC4})_{avg}$	
	Compact	Non-compact	Slender	In-limit	Out-limit
NS with NC	1.25	1.34	1.33	1.02	1.02
NS with HC	1.16	1.04	1.40	1.01	1.01
HS with NC	1.26	1.32	1.42	0.89	0.86
HS with HC	1.22	-	1.36	0.90	0.89

หมายเหตุ: ค่ากำลังรับแรงอัดคำนวณโดยไม่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทาน

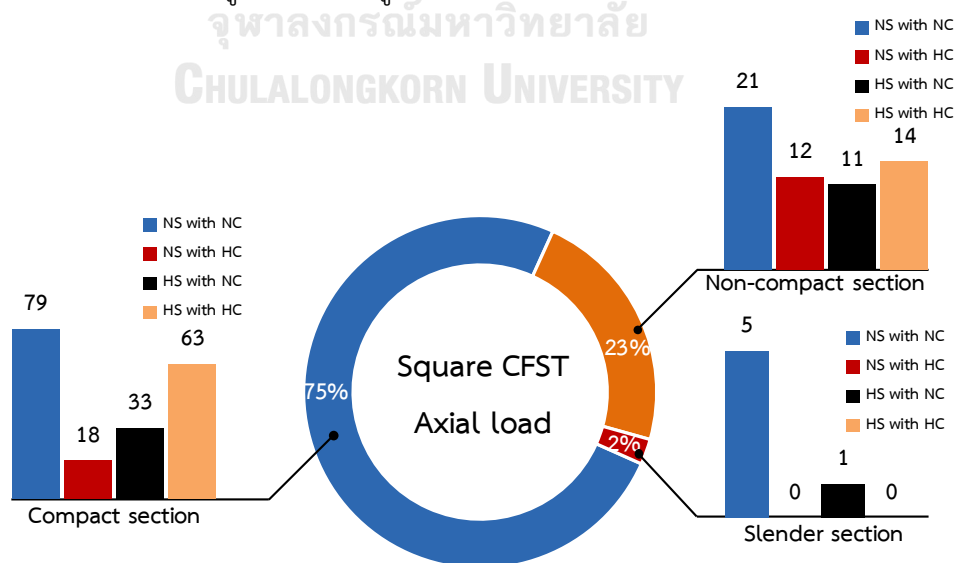
5.1.1.2 ผลของความชะลูดของเสา

AISC 360-16: จากรูปที่ 5.2 พบว่า สำหรับเสาที่มีความชะลูดสัมพัทธ์น้อยกว่า 0.5 สมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบอย่างมาก สำหรับเสาทุกประเภท (หน้าตัดอัดแน่น, ไม่อัดแน่น และชะลูด) โดยสมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC นั้น สามารถทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบสำหรับเสาประเภทหน้าตัดอัดแน่นที่มีความชะลูดสัมพัทธ์มากกว่า 0.9 ทั้งนี้จากรูปที่ 5.2 (ค) พบว่า สมการทำนายกำลังสำหรับเสาที่มีหน้าตัดชะลูดสามารถทำนายกำลังของเสาสั้นที่มีอัตราส่วนความชะลูดของหน้าตัดมากกว่าค่าขอบเขตความชะลูดสูงสุด ($D/t > \lambda_{max}$) ได้อย่างปลอดภัยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ

Eurocode 4: จากรูปที่ 5.3 พบว่า สมการทำนายกำลังของมาตรฐาน Eurocode 4 มีความแปรปรวนในการทำนายกำลังสูงสำหรับเสาที่มีความชะลูดสัมพัทธ์น้อยกว่า 0.3 (ข้อมูลผลการทดสอบมีการกระจายทั้งด้านบนและด้านล่างของเส้นโค้งการโค้งเดาะ) ในขณะที่เสาที่มีความชะลูดสัมพัทธ์สูงนั้น สมการทำนายกำลังของมาตรฐานมีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ

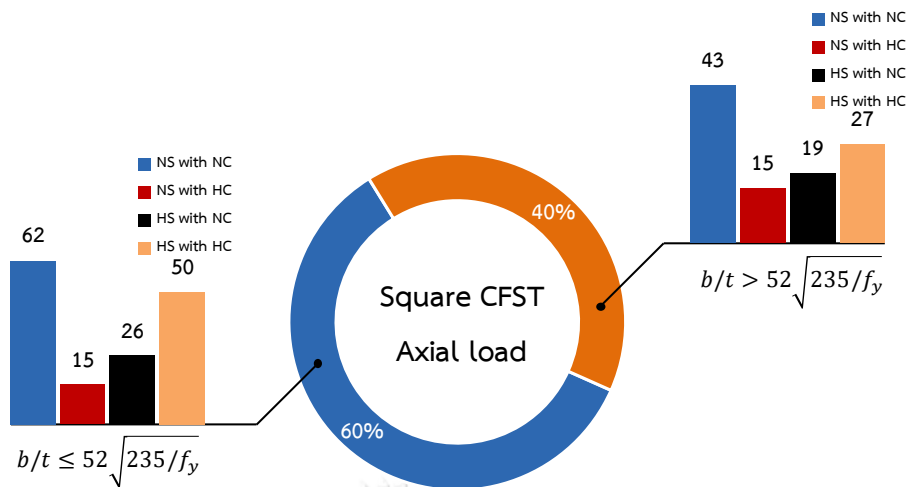
5.1.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามารถจำแนกข้อมูลตามขอบเขตของค่าอัตราส่วนความชะลูดของท่อเหล็กและกำลังของวัสดุได้เช่นเดียวกับข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบที่จำแนกดังรูปที่ 5.4 (ก) และ (ข) นี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโค้งเดาะสำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ



(ก) จำแนกข้อมูลตามข้อกำหนด AISC 360-16

รูปที่ 5.4 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์



(ข) จำแนกข้อมูลตามมาตรฐาน Eurocode 4

รูปที่ 5.4 (ต่อ) สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดตรงศูนย์

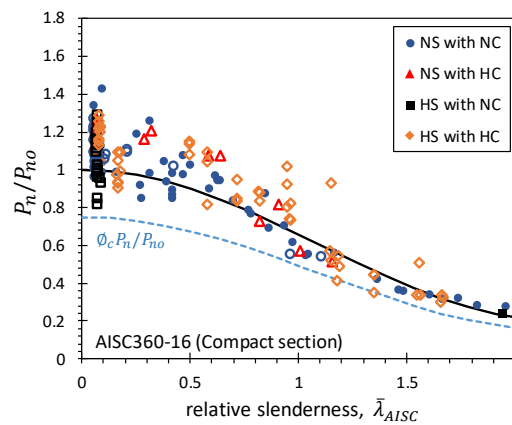
5.1.2.1 ผลของกำลังของวัสดุ

AISC 360-16: จากรูปที่ 5.5 (ก) และ (ข) พบว่า สมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดอัดแน่นและไม่อัดแน่น โดยจากตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของข้อมูลมีค่าใกล้เคียง 1.00 สำหรับทุกกลุ่มข้อมูลของกำลังวัสดุ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานพบว่าค่ากำลังที่ทำนายได้ตามข้อกำหนด AISC นั้น มีค่ามากกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ใช้วัสดุกำลังสูงพิเศษ ($f'_c = 113$ เมกะปาสคาล, $f_y = 762$ เมกะปาสคาล) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ก)

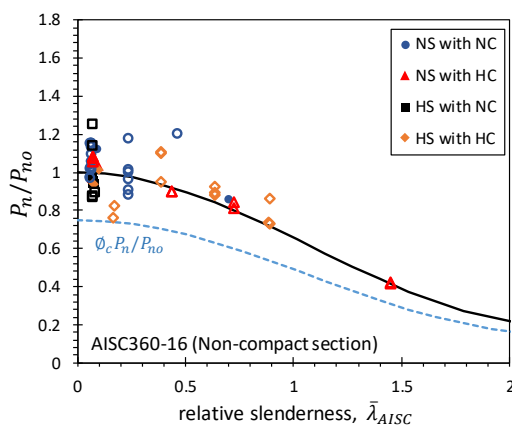
Eurocode 4: จากรูปที่ 5.6 (ก) พบว่าสมการทำนายกำลังตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยสำหรับทุกกลุ่มของกำลังวัสดุเมื่อเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีความชะลุดของหน้าตัดไม่เกินขอบเขตความชะลุดที่มาตรฐานกำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัยสำหรับกำลังของวัสดุพบว่า กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ทำนายได้นั้นมีค่ามากกว่ากำลังจากผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กมากกว่าหน่วยแรงครากสูงสุดที่มาตรฐานกำหนดไว้ ($f_y = 460$ เมกะปาสคาล) ดังนั้น จึงไม่ควรใช้สมการทำนายกำลังในกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กมากกว่าขอบเขตหน่วยแรงครากของมาตรฐาน

5.1.2.2 ผลของความชะลุดของเสา

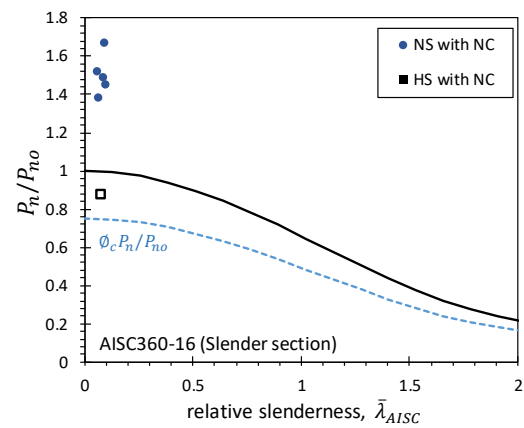
AISC 360-16: จากรูปที่ 5.5 (ก) พบว่า สมการทำนายกำลังของข้อกำหนด AISC สามารถทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดอัดแน่นที่มีค่าความชะลุดสัมพัทธ์มากกว่า 1.0 ในขณะที่สำหรับเสาสั้นที่มีหน้าตัดชะลุดนั้น กำลังที่ทำนายได้มีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ค)



(ก) หน้าตัดอัดแน่น



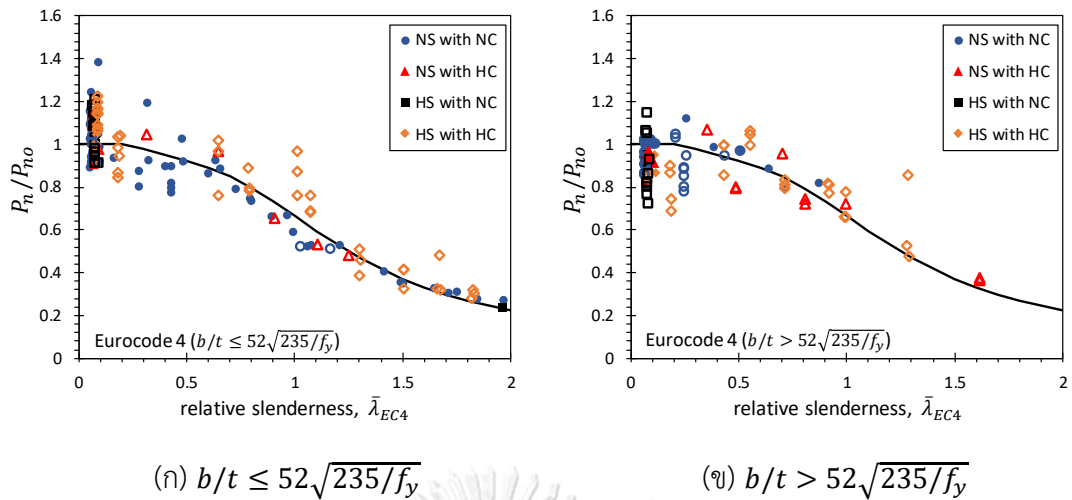
(ข) หน้าตัดไม่อัดแน่น



(ค) หน้าตัดชะลุด

รูปที่ 5.5 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Eurocode 4: จากรูปที่ 5.6 พบว่า สมการทำนายกำลังของมาตรฐาน Eurocode 4 มีความแปรปรวนในการทำนายกำลังสูง (ข้อมูลผลการทดสอบมีการกระจายรอบเส้นโค้งการโก่งเดาะอย่างมาก) สำหรับเสาสั้นที่มีความชะลุดของหน้าตัดมากกว่าขอบเขตความชะลุดที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดยเฉพาะสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีความชะลุดสัมพัทธ์น้อยกว่า 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ข) โดยกำลังที่ทำนายได้มีแนวโน้มมากกว่าผลการทดสอบ



รูปที่ 5.6 เส้นโค้งการโก่งเดาะของ Eurocode 4 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

5.1.2.3 ผลของประเภทของท่อเหล็ก

จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามารถแสดงด้วยเครื่องหมายทึบและเครื่องหมายกลวง ตามลำดับ โดยจากตารางที่ 5.2 พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของข้อกำหนด AISC และ Eurocode 4 มีค่าใกล้เคียง 1.0 ทั้งสำหรับเสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นและเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 พบว่า ข้อมูลผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีตมีการกระจายรอบเส้นโค้งการโก่งเดาะสูงกว่าผลการทดสอบเสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีต

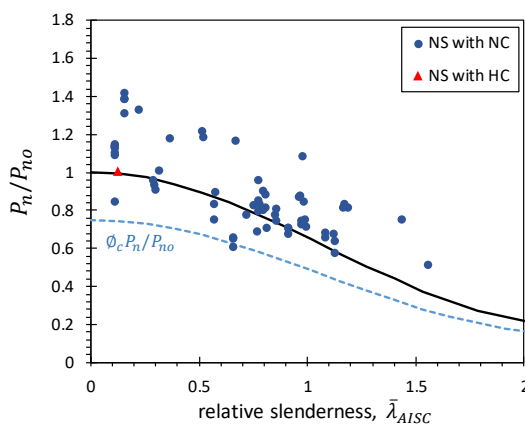
ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Group	$(P_{exp}/P_{AISC})_{avg}$			$(P_{exp}/P_{EC4})_{avg}$	
	Compact	Non-compact	Slender	In-limit	Out-limit
NS with NC	1.07 (1.09)	1.06 (1.08)	1.51	1.01 (1.01)	0.99 (0.95)
NS with HC	1.09 (1.15)	1.01 (1.03)	-	0.97 (1.06)	0.87 (1.00)
HS with NC	1.06 (1.07)	0.96 (1.01)	(0.88)	1.04 (1.06)	0.92 (0.90)
HS with HC	1.05 (1.11)	0.97 (1.04)	-	0.99 (1.11)	0.89 (1.04)

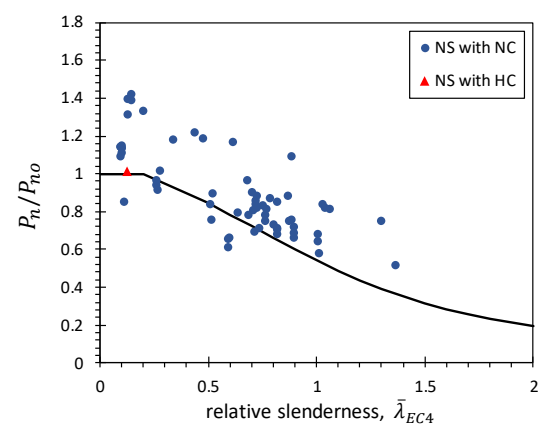
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีตแสดงในวงเล็บ

5.1.3 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

ฐานข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ประกอบด้วยข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจำนวน 64 ตัวอย่างดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.6 (บทที่ 4) โดยสามารถจำแนกได้เป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังปกติจำนวน 63 ตัวอย่าง และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 105$ เมกะปาสคาล) จำนวน 1 ตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบดังกล่าวจะใช้ในการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะสำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังรูปที่ 5.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ข้อกำหนด AISC 360-16



(ข) มาตรฐาน Eurocode 4

รูปที่ 5.7 เส้นโค้งการโก่งเดาะในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

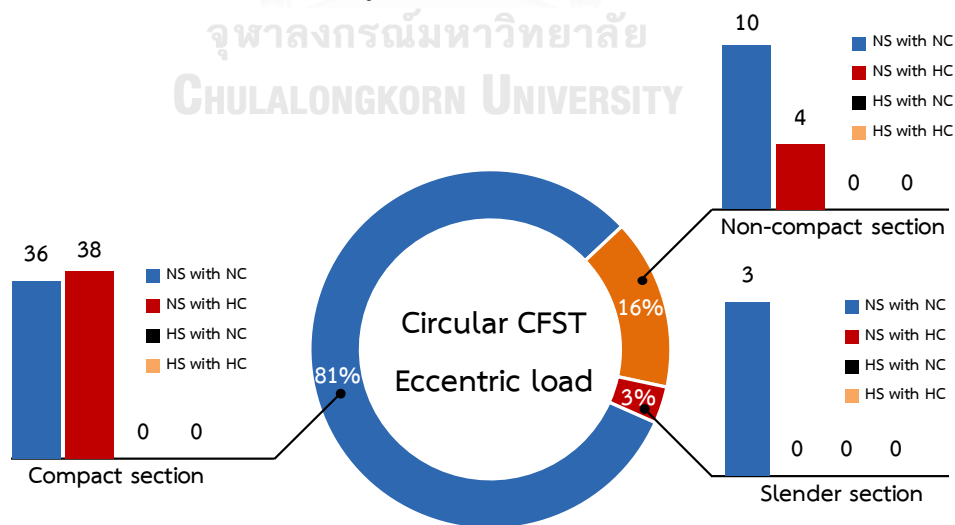
จากรูปที่ 5.7 พบว่า ข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังปกติเท่ากับ 1.14 และ 1.20 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยพิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัยสำหรับมาตรฐาน Eurocode 4 พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้ มีค่ามากกว่าผลทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตดังกล่าวมีค่าหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 500 เมกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าขอบเขตหน่วยแรงครากสูงสุดที่มาตรฐาน Eurocode 4 กำหนดไว้ ($f_y = 460$ เมกะปาสคาล)

5.2 เสาว์สดุผสมภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์

สำหรับการประเมินสมการทำนายกำลังของข้อกำหนดและมาตรฐานสำหรับเสาว์สดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์นั้น ได้จำแนกข้อมูลผลการทดสอบเป็น 4 กลุ่มตามกำลังของวัสดุ เช่นเดียวกับการประเมินสมการทำนายกำลังสำหรับเสาว์สดุผสมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ โดยรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดสอบและเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ซึ่งกำลังรับแรงอัดร่วมกับแรงดัดของเสาว์สดุผสม (จากผลการทดสอบและจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์) จะถูกหารด้วยกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนระบุ (P/P_n) และกำลังรับแรงดัดระบุ (M/M_n) ที่คำนวณจากข้อกำหนดและมาตรฐานเพื่อแสดงผลในรูปแบบไร้หน่วย โดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยนี้ สามารถใช้สำหรับเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาว์สดุผสมที่มีค่าตัวประกอบการโอบรัดที่เท่ากันแต่มีขนาด ความสูง และกำลังของวัสดุที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.19 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบสำหรับข้อมูลผลการทดสอบเสาว์สดุผสมที่มีค่าตัวประกอบการโอบรัดที่ใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลในแต่ละรูปนั้น จะแสดงผลการเปรียบเทียบตามกลุ่มของกำลังของวัสดุและตามค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสา

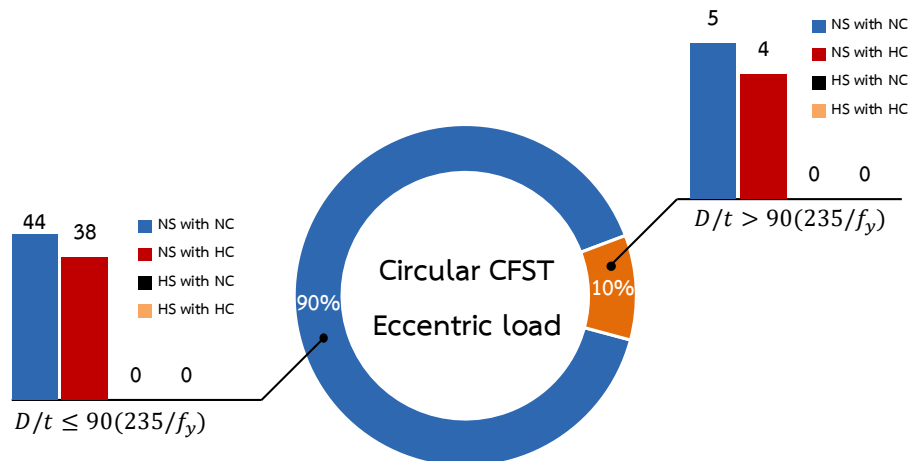
5.2.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

ฐานข้อมูลผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ ได้จำแนกตามขอบเขตของอัตราส่วนความชะลุดของท่อเหล็กสำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) จำแนกข้อมูลตามข้อกำหนด AISC 360-16

รูปที่ 5.8 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเยื้องศูนย์



(ข) จำแนกข้อมูลตามมาตรฐาน Eurocode 4

รูปที่ 5.8 (ต่อ) สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

ข้อมูลผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) นี้จะใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 โดยผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความถูกต้องในการทำนายกำลังของสมการตามข้อกำหนดและมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

5.2.1.1 ผลของกำลังของวัสดุ

AISC 360-16: จากฐานข้อมูลผลการทดสอบดังรูปที่ 5.8 ข้อมูลผลการทดสอบประกอบด้วยข้อมูลเพียง 2 กลุ่มข้อมูลได้แก่ ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ และท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง โดยจากรูปที่ 5.9 (ก) ถึง (ง) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนดของ AISC มีแนวโน้มทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้สูงกว่าผลการทดสอบ (เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์มีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดมากกว่าข้อมูลผลการทดสอบ) โดยเฉพาะกลุ่มที่คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าขอบเขตของข้อกำหนด

Eurocode 4: จากรูปที่ 5.11 (ก) ถึง (ง) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้สูงกว่าข้อมูลผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงเช่นเดียวกับข้อกำหนด AISC ซึ่งเมื่อคำนวณกำลังของเสาโดยพิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัยสำหรับมาตรฐาน Eurocode 4 พบว่า กำลังที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงพิเศษ ($f'_c = 169$ เมกะปาสคาล) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ก) (ง) และ (ฉ)

5.2.1.2 ผลของความชะลุดของเสา

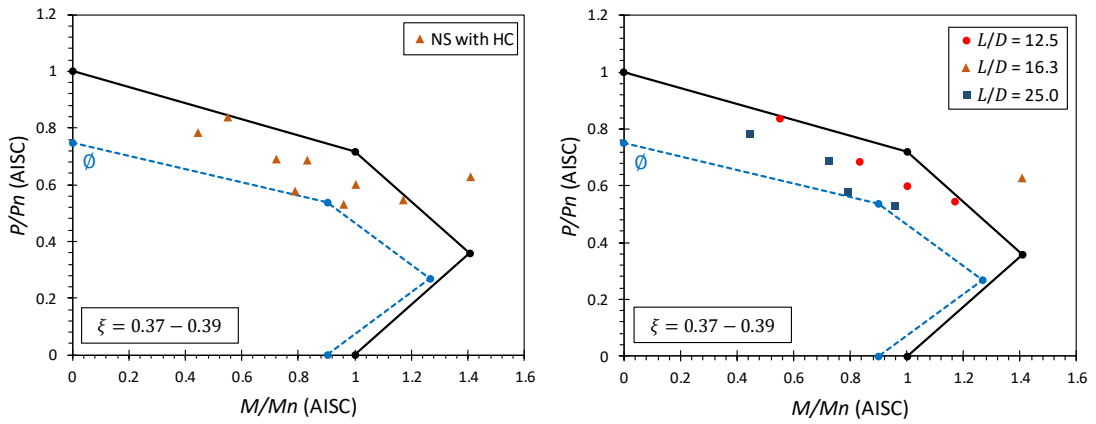
AISC 360-16: เมื่อพิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ค่าตัวประกอบไอบริดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ก) ถึง (ฎ) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสาสูง เช่น จากรูปที่ 5.9 (ซ) เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานตามข้อกำหนด AISC พบว่า ค่ากำลังที่ทำนายได้นั้นมีค่ามากกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสามากกว่า 12.0

Eurocode 4: เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสาสูง ($L/D > 12$) เช่นเดียวกับข้อกำหนด AISC ดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ซ)

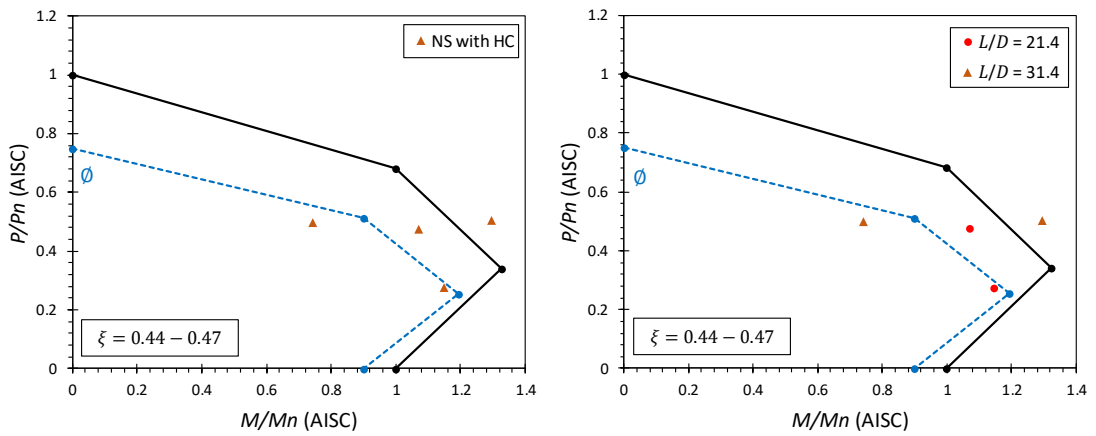
5.2.1.3 ผลของความชะลุดของหน้าตัด

AISC 360-16: จากรูปที่ 5.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดสอบและเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุด พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานตามข้อกำหนด AISC สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุดได้อย่างปลอดภัย (เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานมีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดต่ำกว่าข้อมูลผลการทดสอบ)

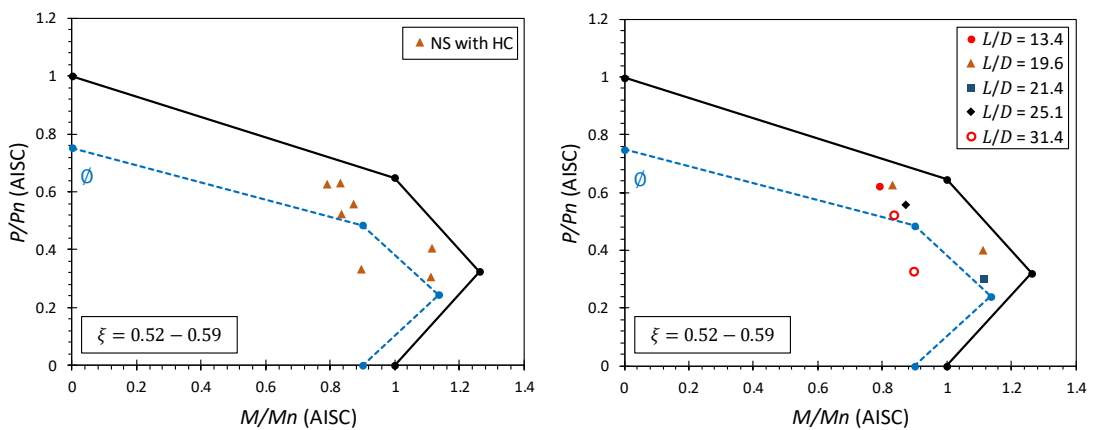
Eurocode 4: จากการเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 และข้อมูลผลการทดสอบสำหรับเสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดของหน้าตัดสูงกว่าขอบเขตของมาตรฐาน ($D/t > 90(235/f_y)$) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 ทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c = 105$ เมกะปาสกาล) ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ก) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัยสำหรับมาตรฐาน Eurocode 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ข) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 ทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดของเสาเท่ากับ 4.9



(ก) $\xi = 0.37 - 0.39$

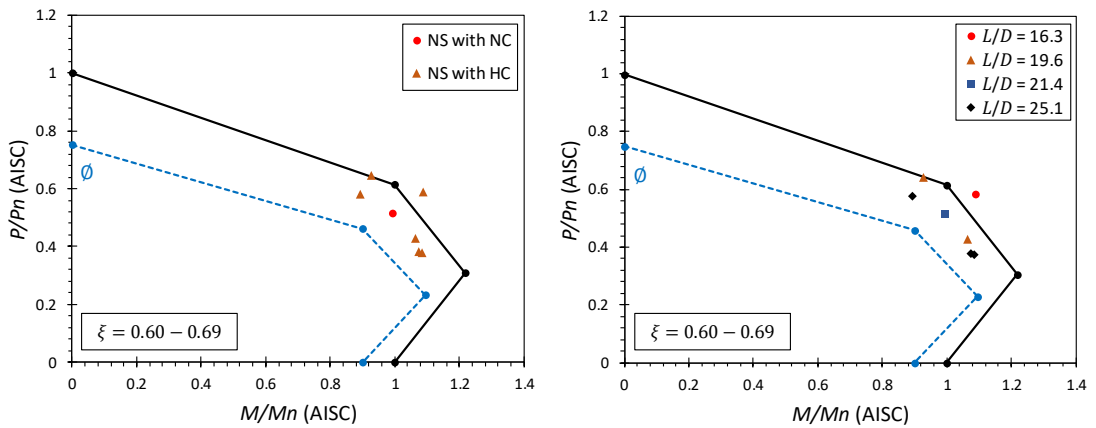


(ข) $\xi = 0.44 - 0.47$

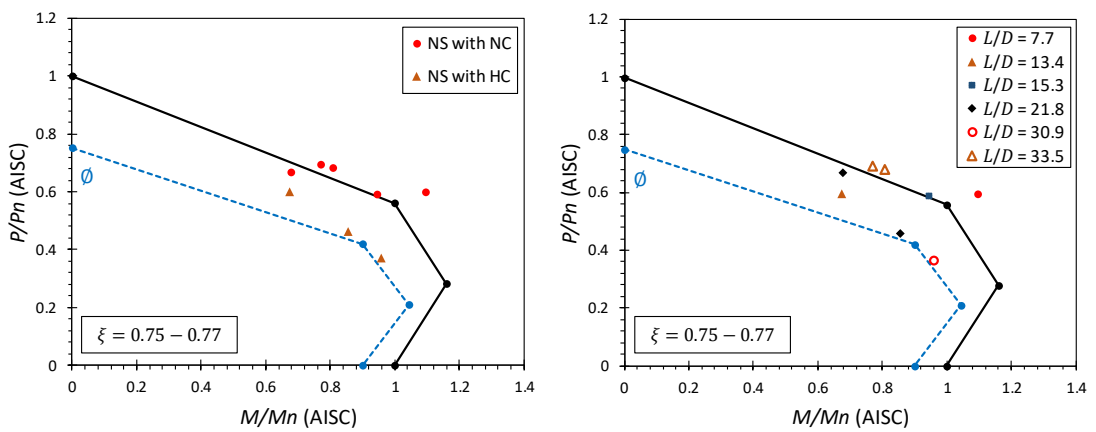


(ค) $\xi = 0.52 - 0.59$

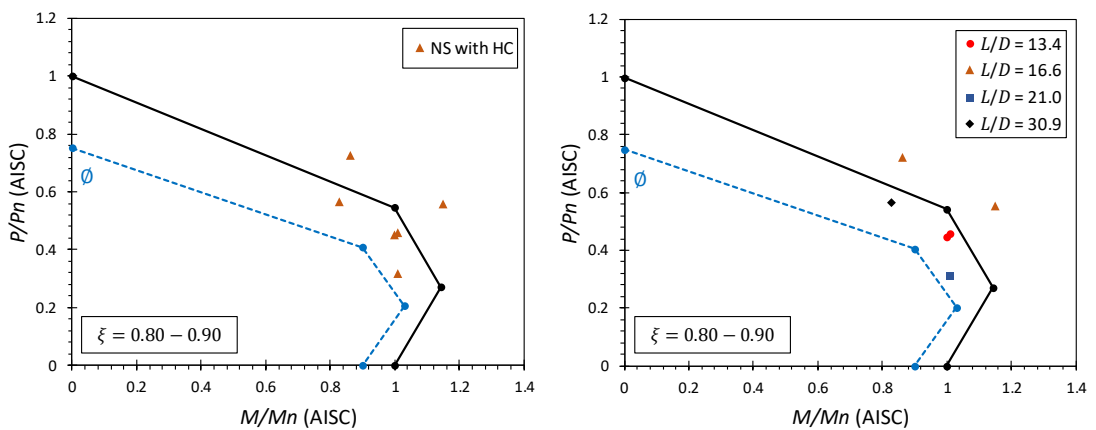
รูปที่ 5.9 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดกลม (หน้าตัดอัดแน่น)



(ง) $\xi = 0.60 - 0.69$

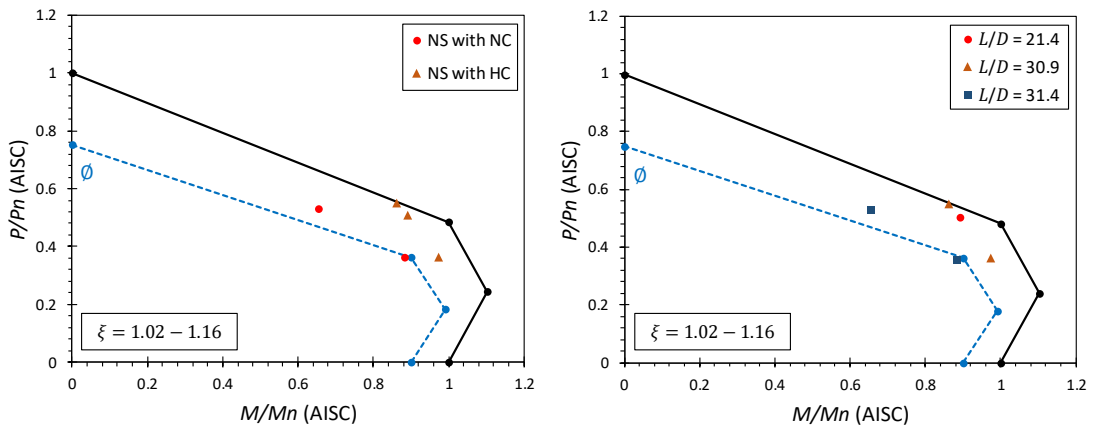


(จ) $\xi = 0.75 - 0.77$

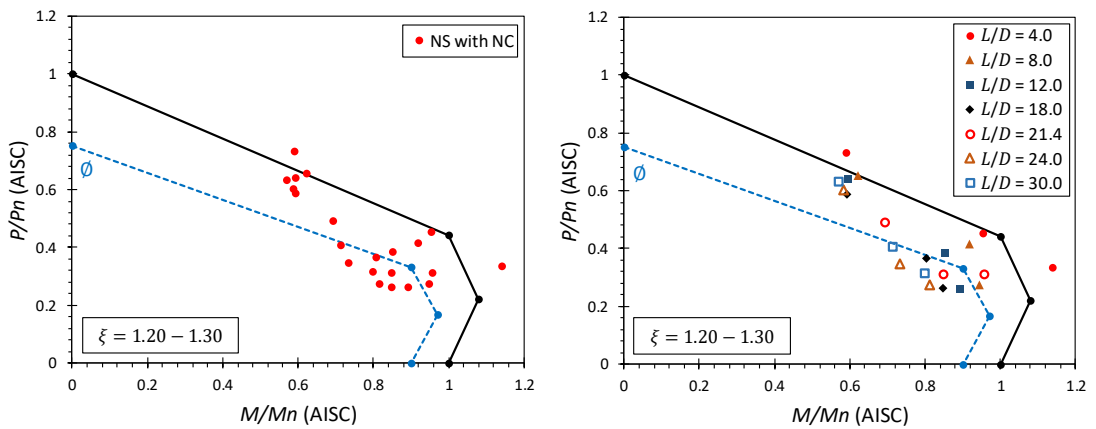


(ฉ) $\xi = 0.80 - 0.90$

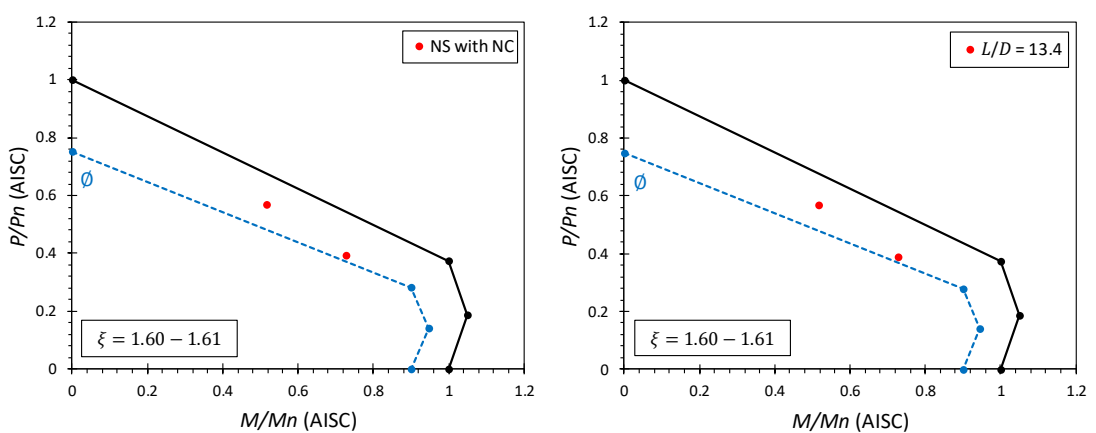
รูปที่ 5.9 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดกลม (หน้าตัดอัดแน่น)



(จ) $\xi = 1.02 - 1.16$

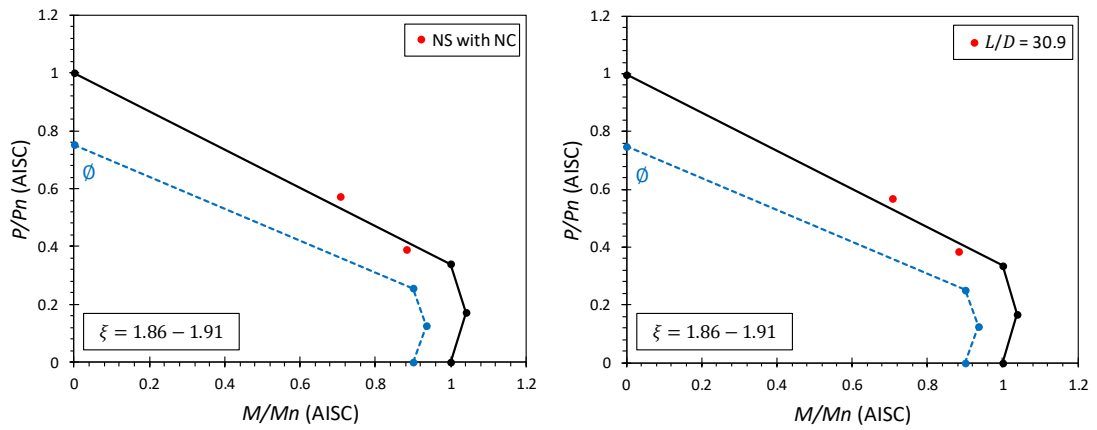


(ข) $\xi = 1.20 - 1.30$

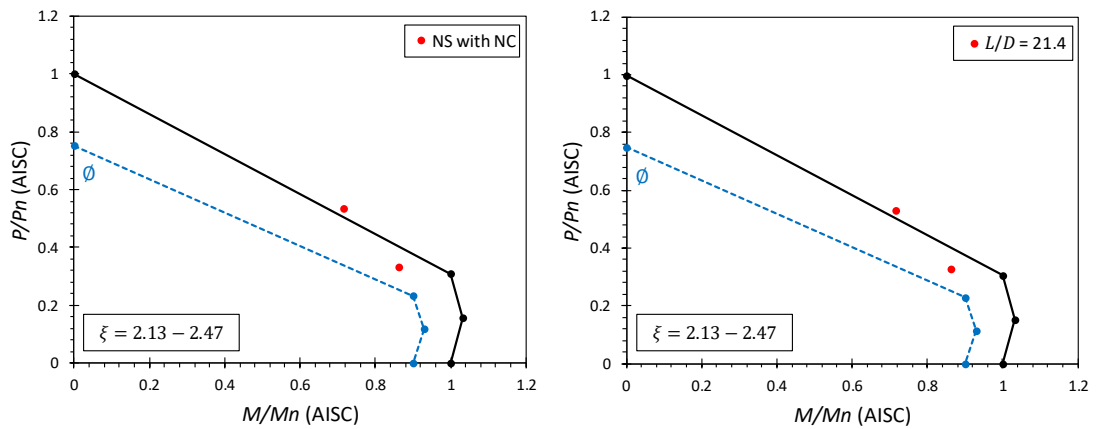


(ค) $\xi = 1.60 - 1.61$

รูปที่ 5.9 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม (หน้าตัดอัดแน่น)

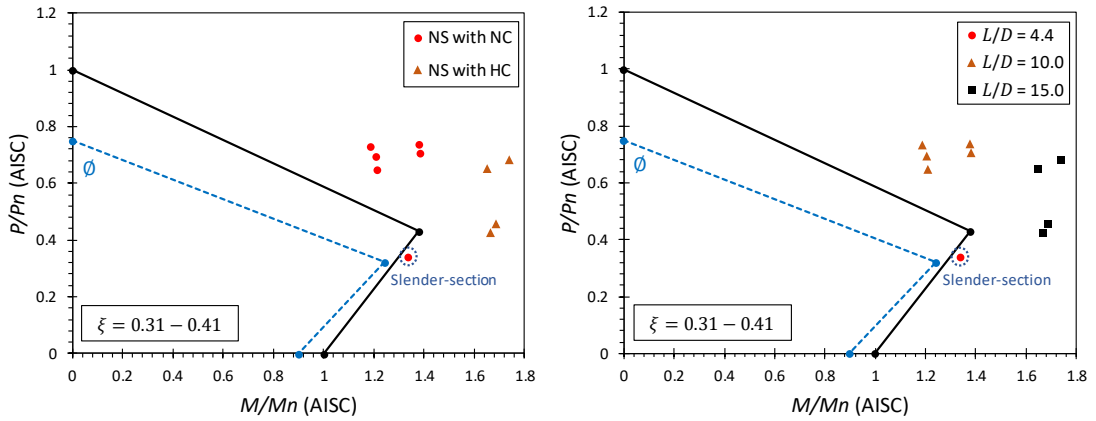


(จ) $\xi = 1.86 - 1.91$

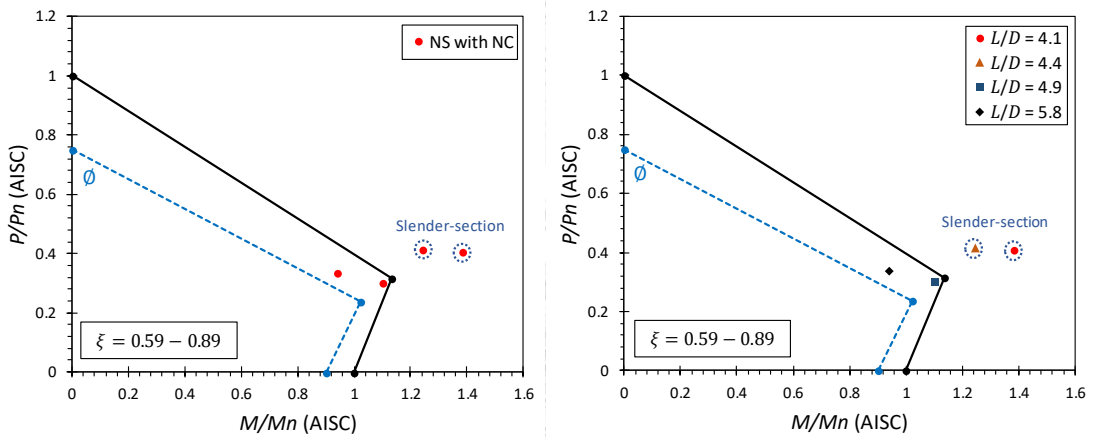


(จ) $\xi = 2.13 - 2.47$

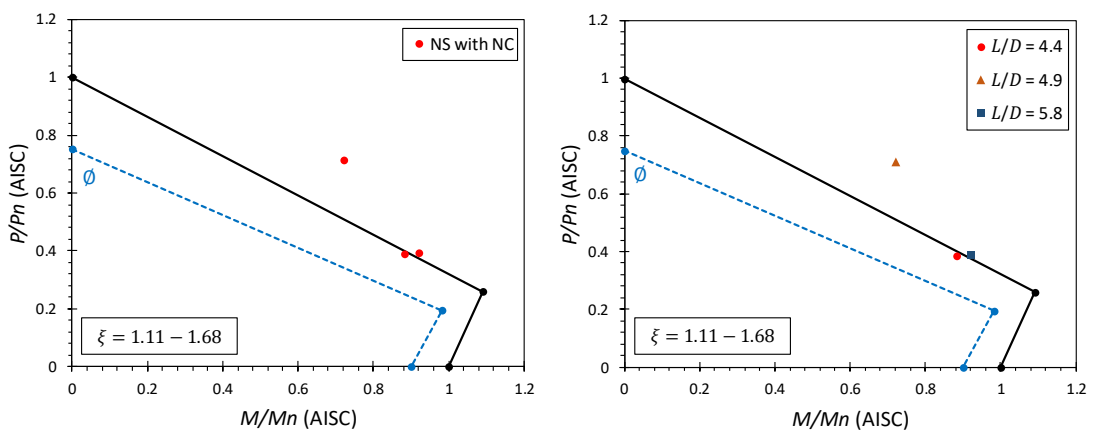
รูปที่ 5.9 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดกลม (หน้าตัดอัดแน่น)



(ก) $\xi = 0.31 - 0.41$

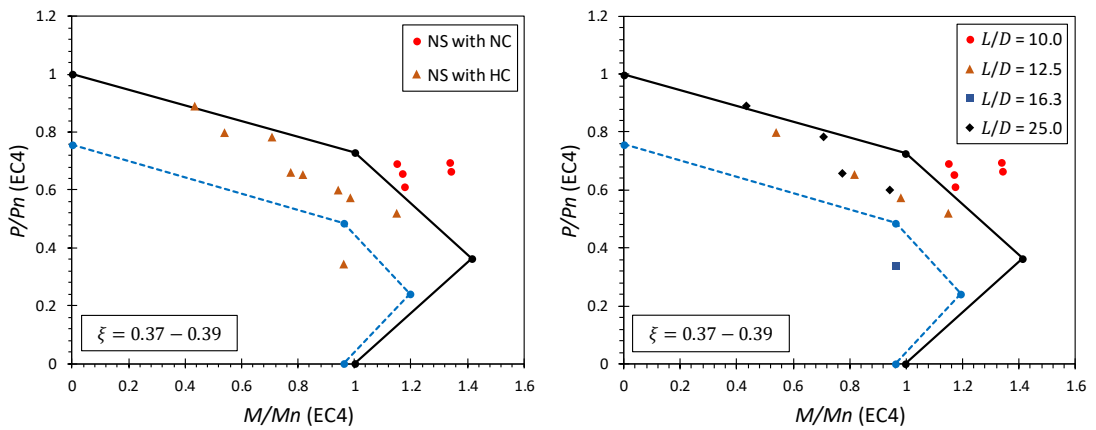


(ข) $\xi = 0.59 - 0.89$

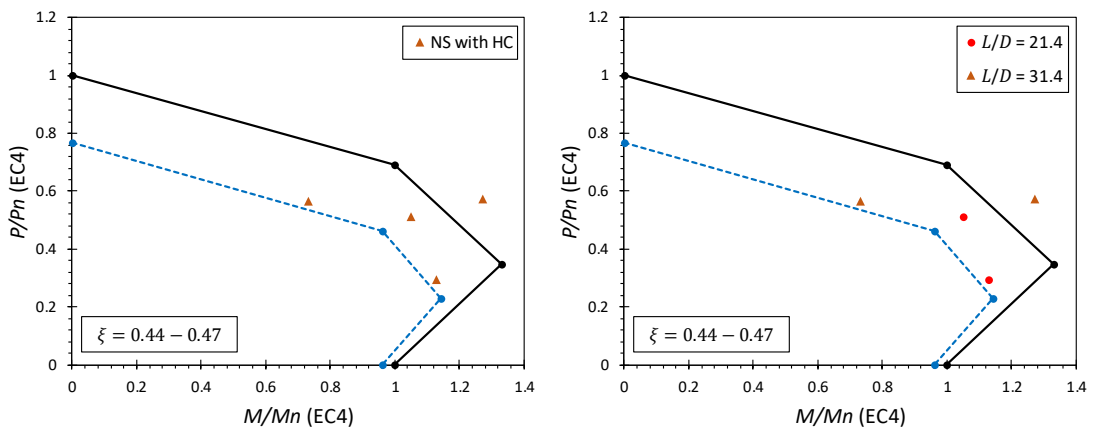


(ค) $\xi = 1.11 - 1.68$

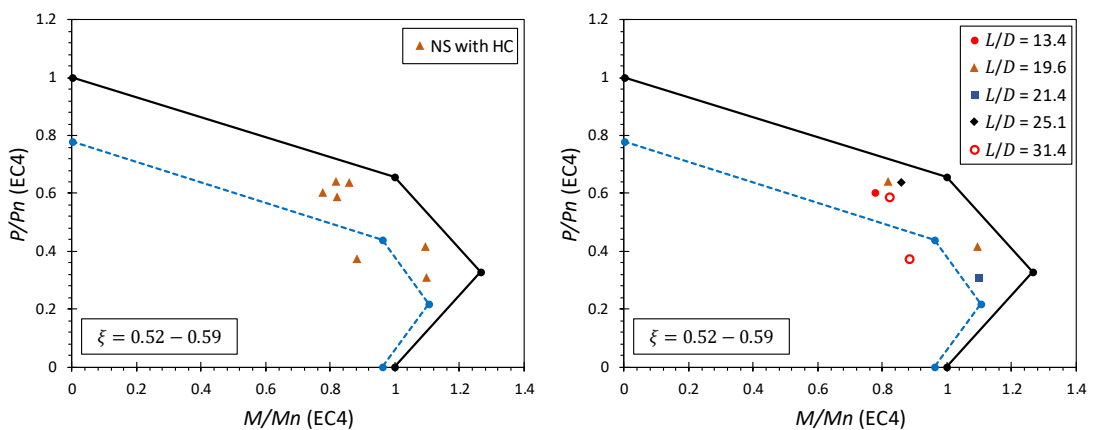
รูปที่ 5.10 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขลุ่ย)



(ก) $\xi = 0.37 - 0.39$

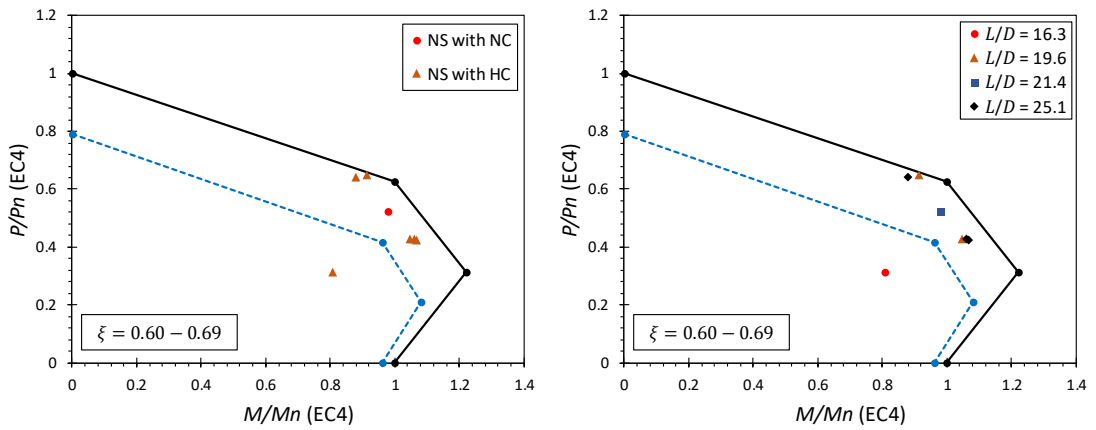


(ข) $\xi = 0.44 - 0.47$

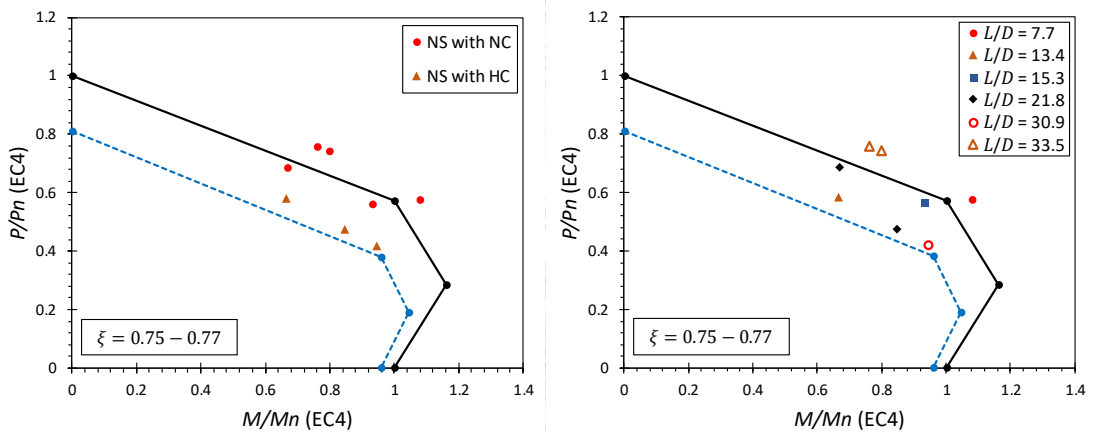


(ค) $\xi = 0.52 - 0.59$

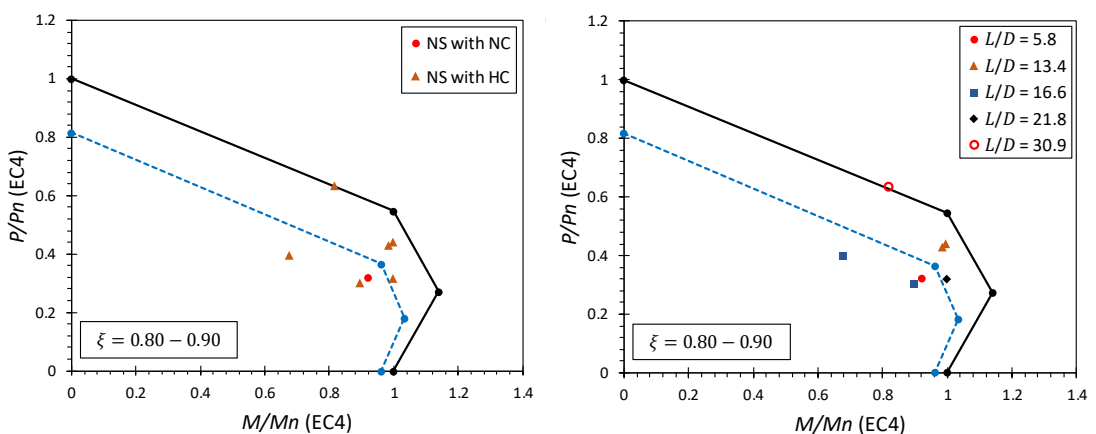
รูปที่ 5.11 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดกลม ($D/t \leq 90(235/f_y)$)



(ง) $\xi = 0.60 - 0.69$

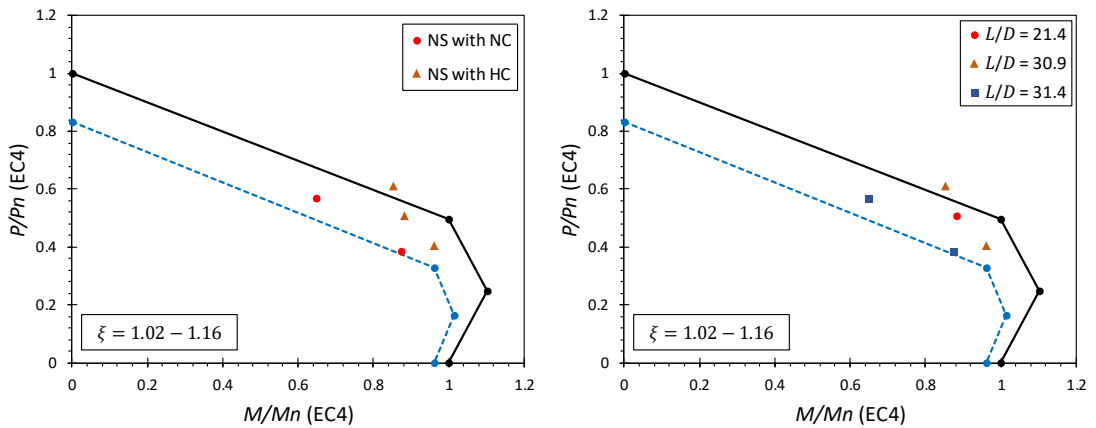


(จ) $\xi = 0.75 - 0.77$

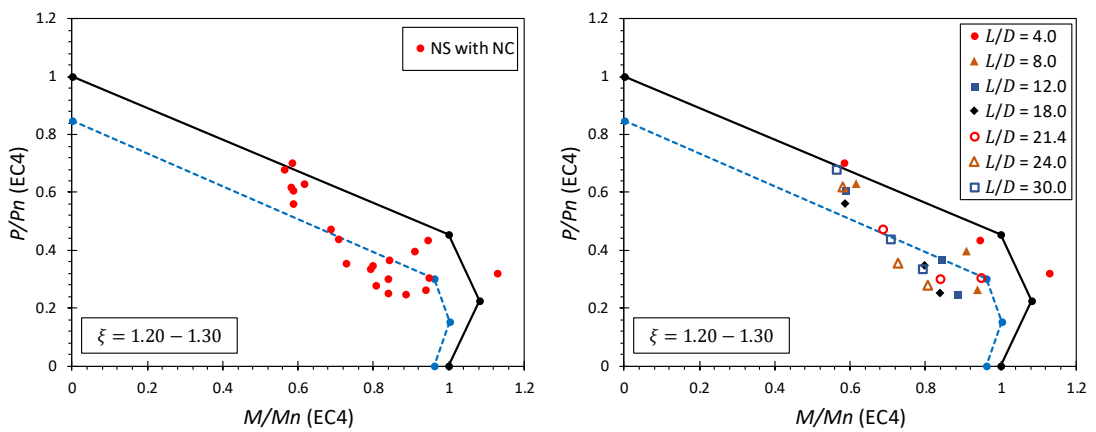


(ฉ) $\xi = 0.80 - 0.90$

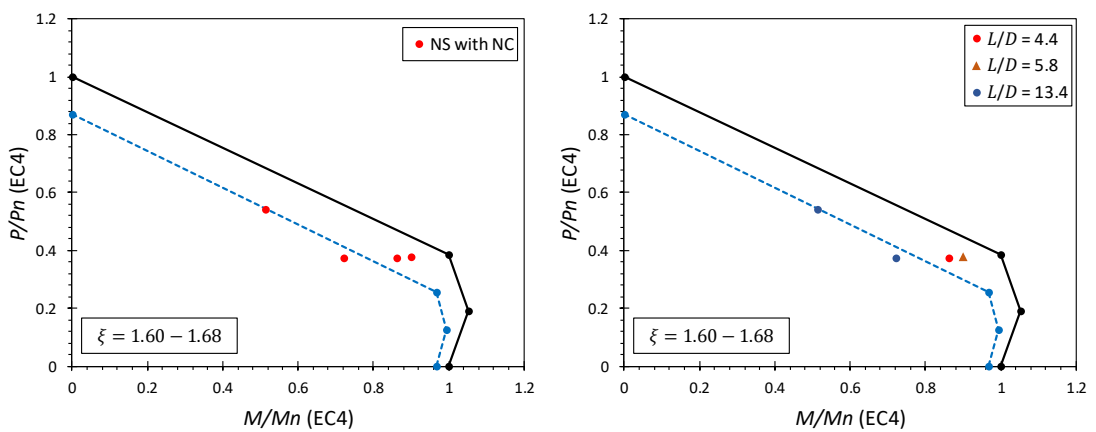
รูปที่ 5.11 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ($D/t \leq 90(235/f_y)$)



(จ) $\xi = 1.02 - 1.16$

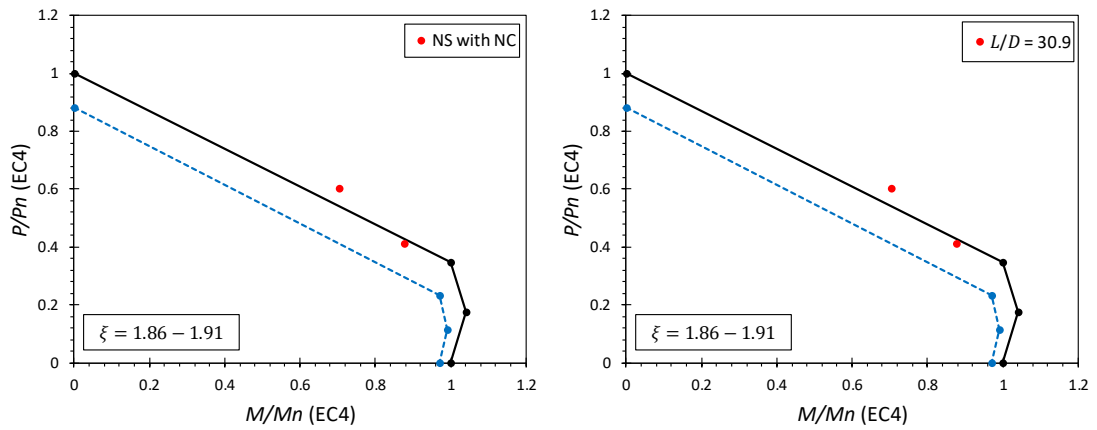
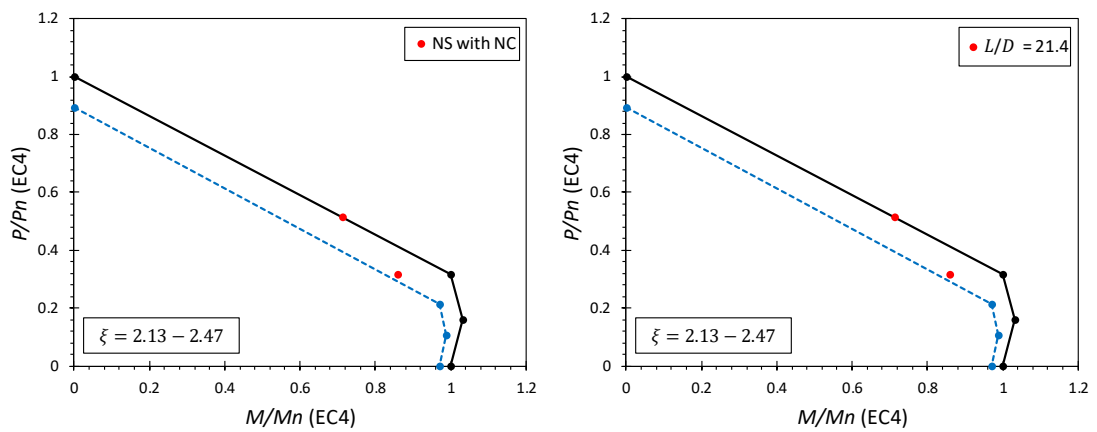


(ข) $\xi = 1.20 - 1.30$

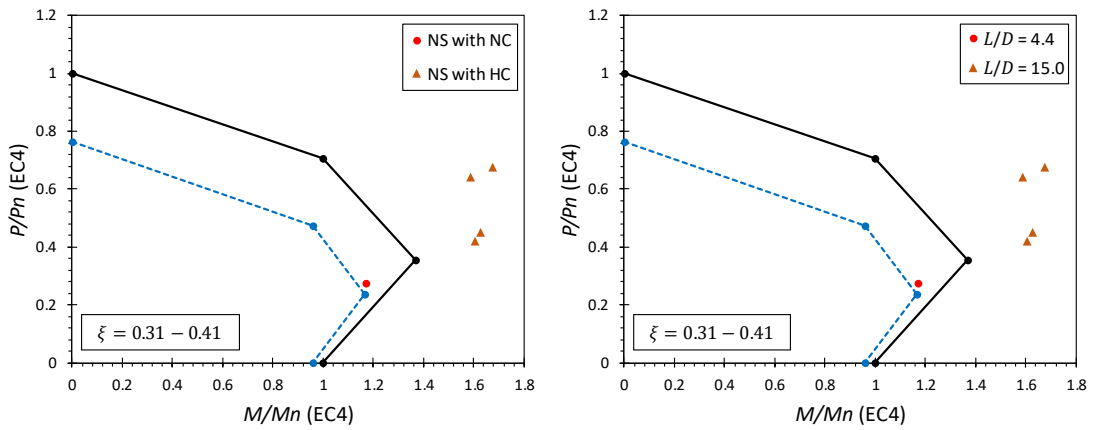


(ค) $\xi = 1.60 - 1.68$

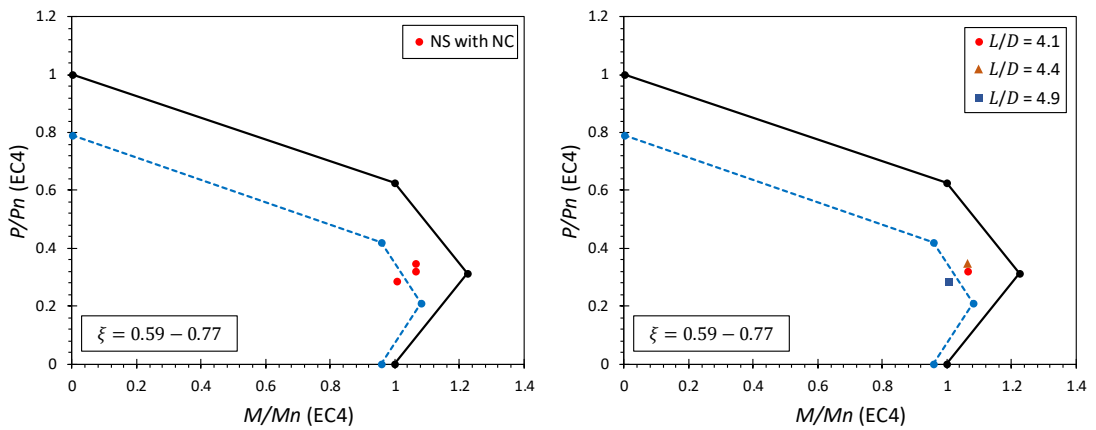
รูปที่ 5.11 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ($D/t \leq 90(235/f_y)$)

(ญ) $\xi = 1.86 - 1.91$ (ฎ) $\xi = 2.13 - 2.47$

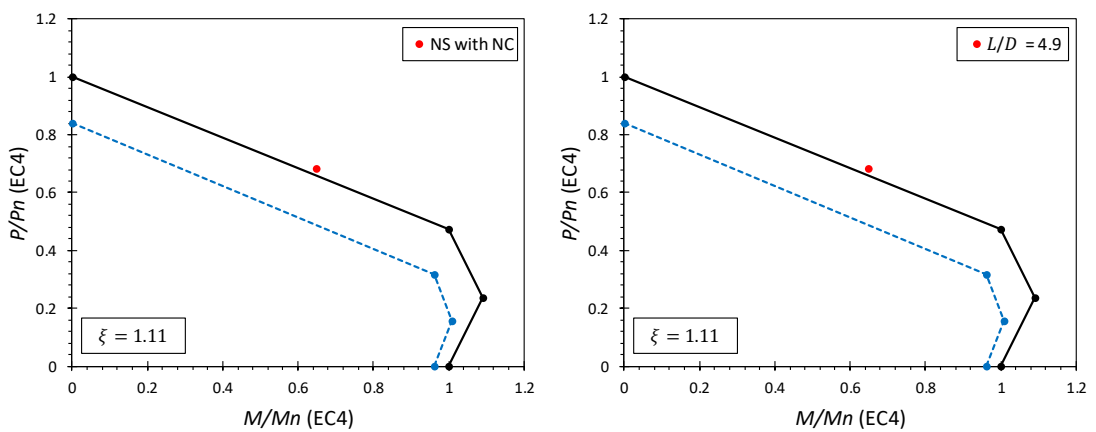
รูปที่ 5.11 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ($D/t \leq 90(235/f_y)$)



(ก) $\xi = 0.31 - 0.41$



(ข) $\xi = 0.59 - 0.77$

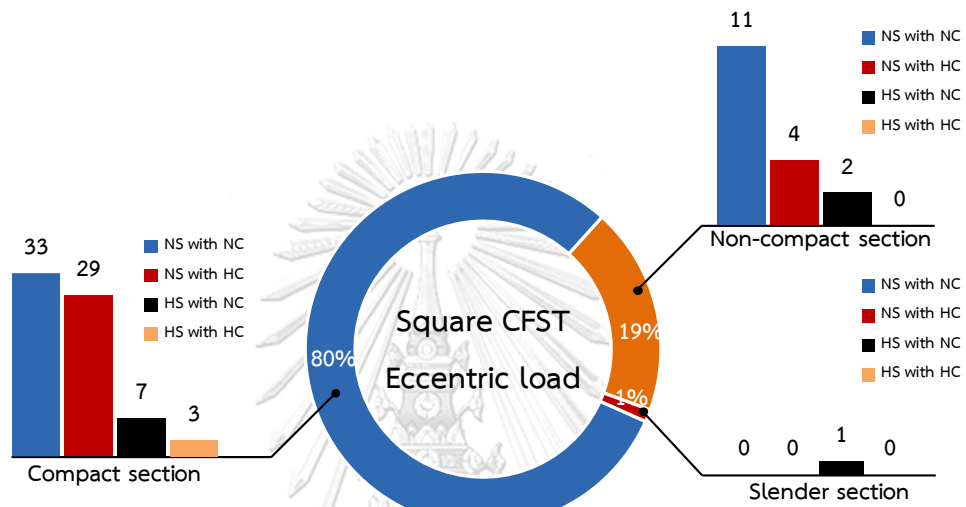


(ค) $\xi = 1.11$

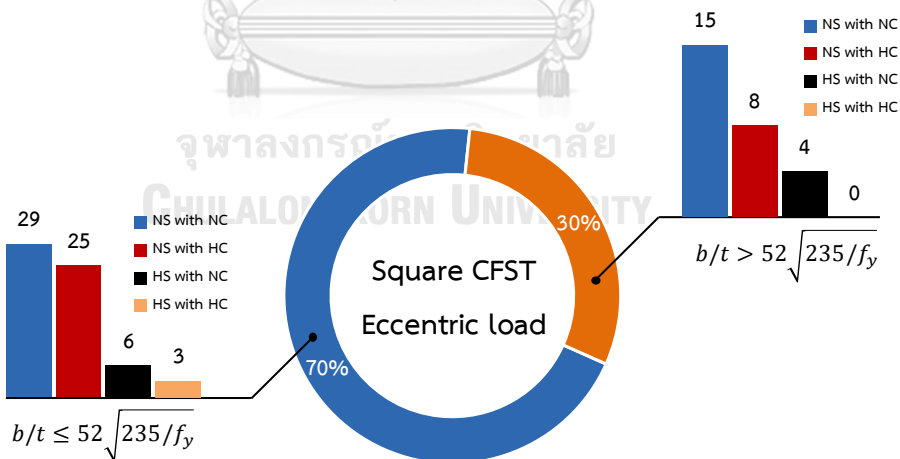
รูปที่ 5.12 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ($D/t > 90(235/f_y)$)

5.2.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ในรูปที่ 5.13 แสดงฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยสามารถจำแนกข้อมูลตามขอบเขตของค่าอัตราส่วนความชะลุดของท่อเหล็กและกำลังของวัสดุได้ เช่นเดียวกับข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบที่จำแนกดังรูปที่ 5.13 (ก) และ (ข) จะใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.17



(ก) จำแนกข้อมูลตามข้อกำหนด AISC 360-16



(ข) จำแนกข้อมูลตามมาตรฐาน Eurocode 4

รูปที่ 5.13 สัดส่วนของข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

5.2.2.1 ผลของกำลังของวัสดุ

AISC 360-16: จากรูปที่ 5.14 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับทุกกลุ่มข้อมูลที่จำแนกตามกำลังของวัสดุ โดยเฉพาะสำหรับกลุ่มเสาท่อเหล็กกำลังปกติเดิมด้วยคอนกรีตกำลังสูง และเสาท่อเหล็กกำลังสูงเดิมด้วยคอนกรีตกำลังสูงดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ข) และ (ฉ) ตามลำดับ โดยในรูปที่ 5.14 (ฉ) สำหรับกลุ่มวัสดุกำลังสูงนั้น กำลังอัดของคอนกรีตและหน่วยแรงครากของท่อเหล็กมีค่าสูงถึง 170 และ 756 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

Eurocode 4: สำหรับข้อมูลผลการทดสอบในกลุ่ม เสาท่อเหล็กกำลังปกติเดิมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ เสาท่อเหล็กกำลังปกติเดิมด้วยคอนกรีตกำลังสูง และ เสาท่อเหล็กกำลังสูงเดิมด้วยคอนกรีตกำลังสูงนั้น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก) ถึง (จ) อย่างไรก็ตาม จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัย พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 ยังคงทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับทุกกลุ่มข้อมูล

5.2.2.2 ผลของความขรุขระของเสา

AISC 360-16: จากรูปที่ 5.14 (ก) (ข) (ง) และ (จ) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC สามารถทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตที่มีค่าความขรุขระของเสาเท่ากับ 3.0 และสำหรับเสาที่มีค่าอัตราส่วนความขรุขระสูงนั้น ($7.4 \leq L/D \leq 31.4$) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ

Eurocode 4: เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาสั้น ($L/D = 3.0$) ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก) (ข) (ง) และ (จ) โดยสำหรับเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนความขรุขระของเสาระหว่าง 7.4 ถึง 31.4 นั้น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบเช่นเดียวกับข้อกำหนด AISC

5.2.2.3 ผลของความขรุขระของหน้าตัด

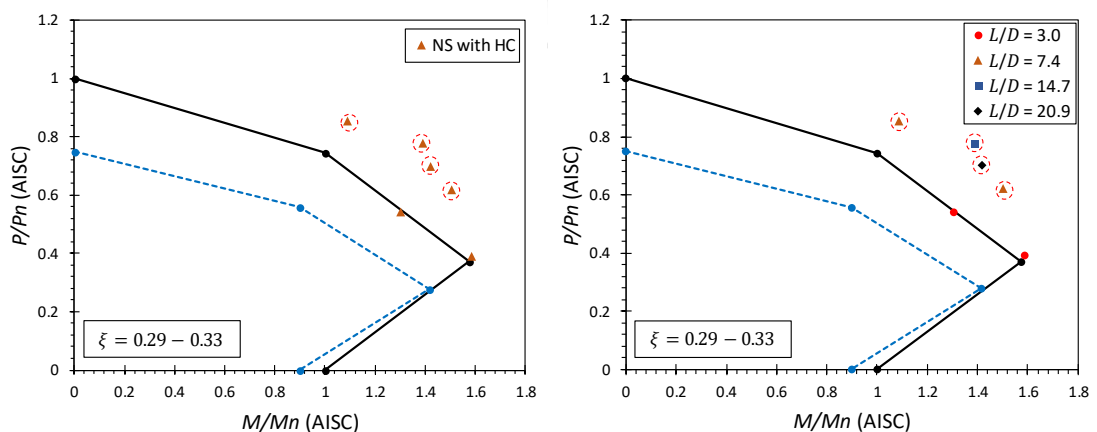
AISC 360-16: จากรูปที่ 5.15 ซึ่งแสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขรุขระ พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC มีแนวโน้มทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นสำหรับเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดขรุขระนั้น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC ทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ง) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา

ค่าตัวคูณความต้านทาน พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สามารถทำนายกำลังของตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้อย่างปลอดภัย (เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทานมีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดต่ำกว่าข้อมูลผลการทดสอบ)

Eurocode 4: จากรูปที่ 5.17 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 และผลการทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนความละเอียดของหน้าตัดมากกว่าขอบเขตที่มาตรฐานกำหนดไว้ ($b/t > 52\sqrt{235/f_y}$) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 5.17 (ก) ถึง (จ) โดยเฉพาะข้อมูลผลการทดสอบกลุ่มท่อเหล็กกำลังสูงเติมด้วยคอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความปลอดภัยมีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่าข้อมูลผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.17 (ง) และ (ฉ)

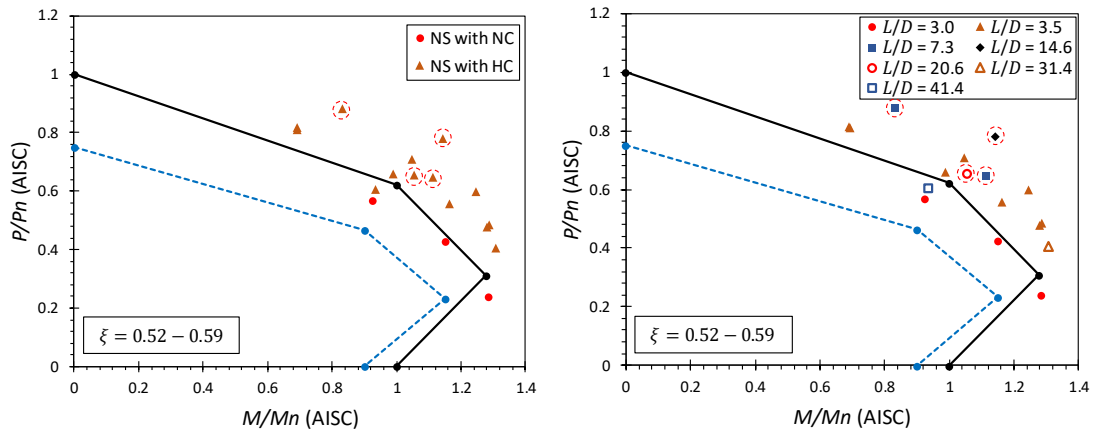
5.2.2.4 ผลของประเภทของท่อเหล็ก

จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.16 ข้อมูลผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามารถจำแนกตามประเภทของท่อเหล็กได้สองประเภท ได้แก่ เสาท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นเติมด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต (สำหรับเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีตจะแสดงเครื่องหมายวงกลมรอบจุดข้อมูลผลการทดสอบ) โดยพบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC และมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กประกอบเติมด้วยคอนกรีต

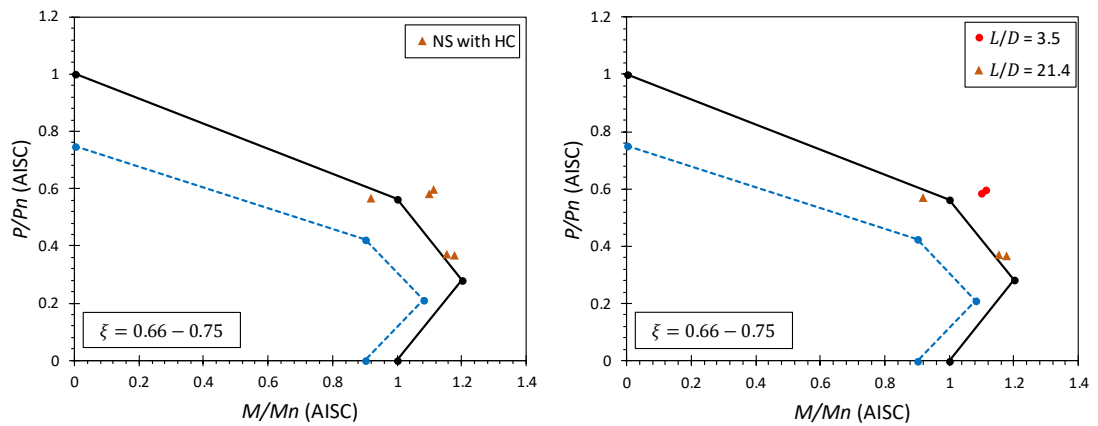


(ก) $\xi = 0.29 - 0.33$

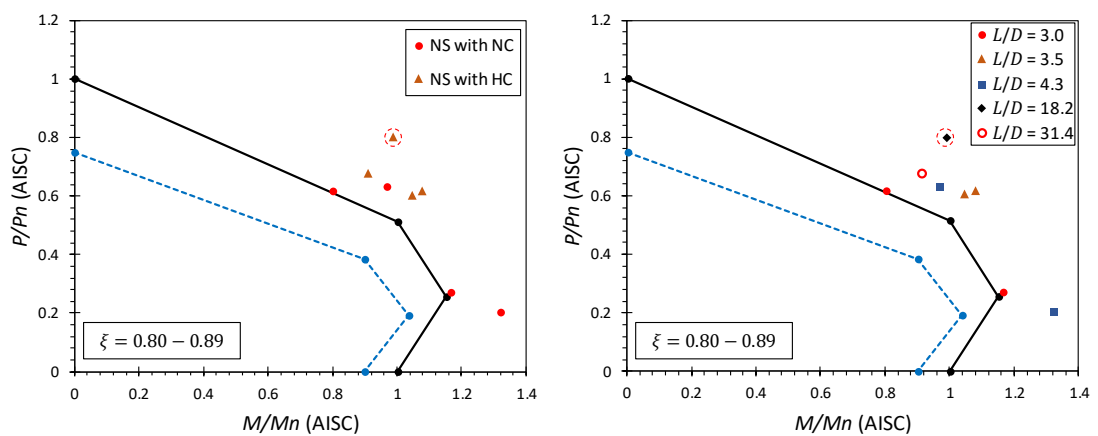
รูปที่ 5.14 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น)



(ข) $\xi = 0.52 - 0.59$

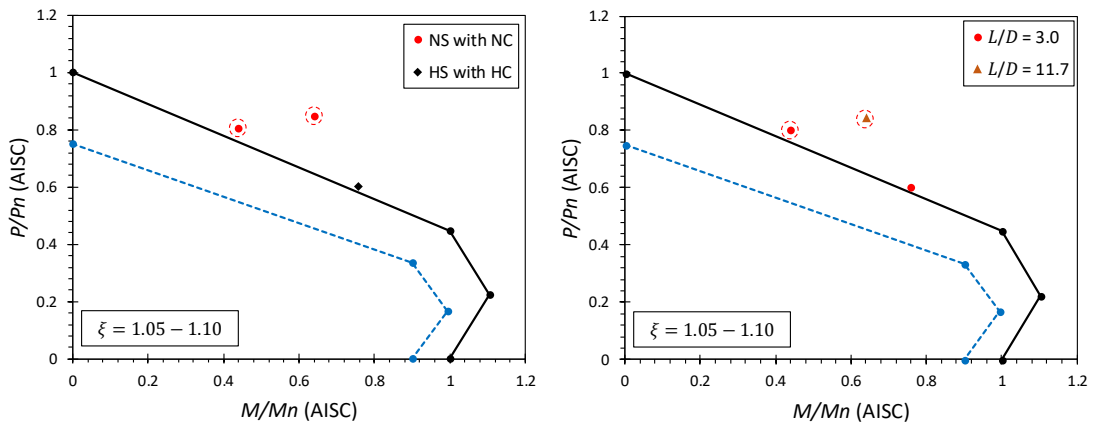


(ค) $\xi = 0.66 - 0.75$

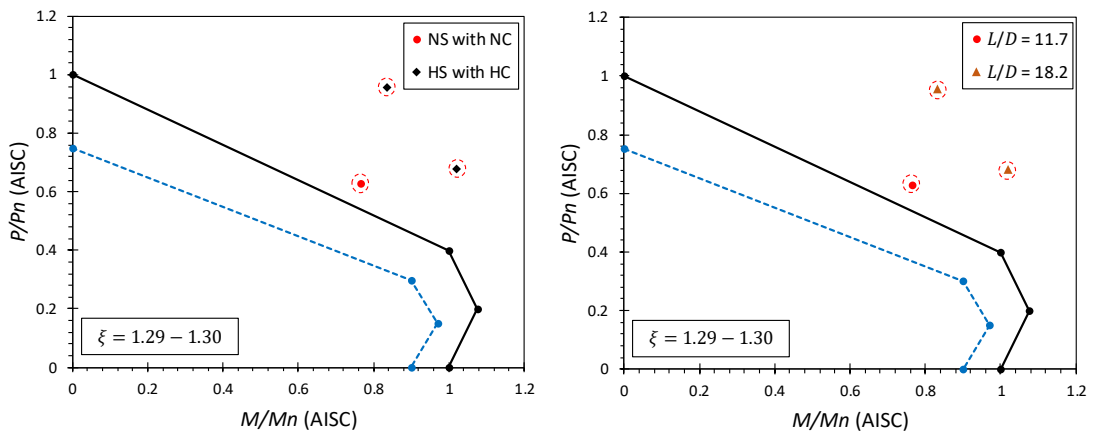


(ง) $\xi = 0.80 - 0.89$

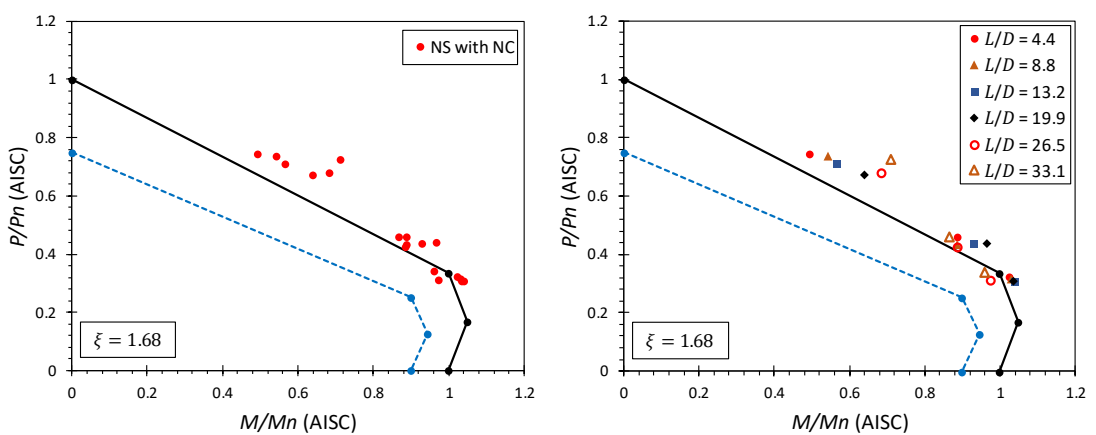
รูปที่ 5.14 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น)



(จ) $\xi = 1.05 - 1.10$

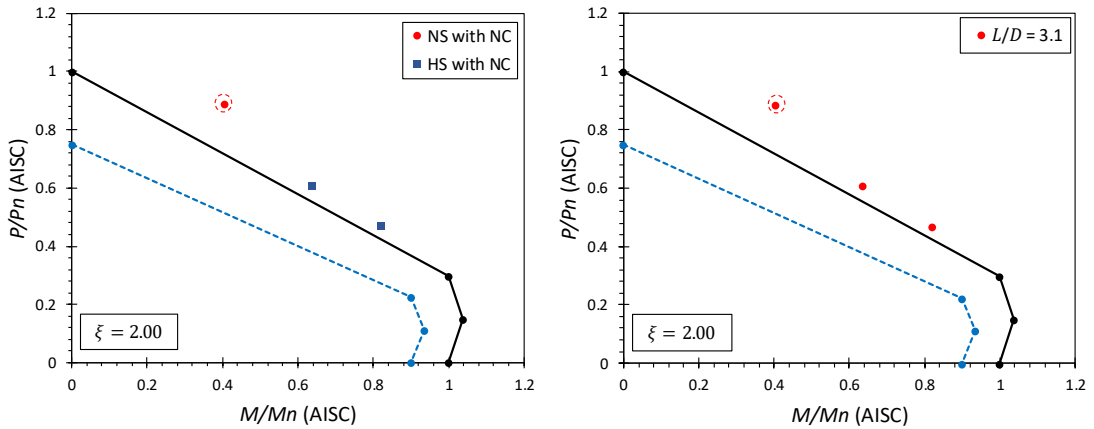


(ฉ) $\xi = 1.29 - 1.30$

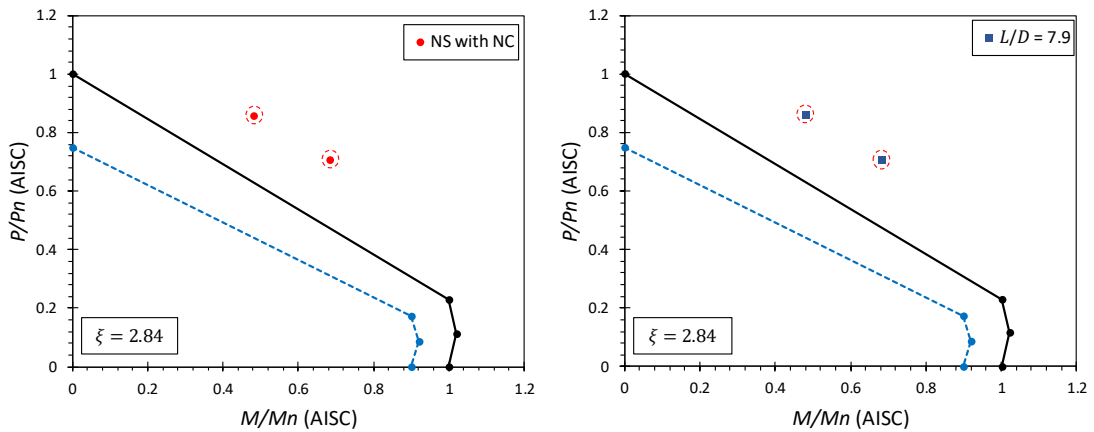


(ช) $\xi = 1.68$

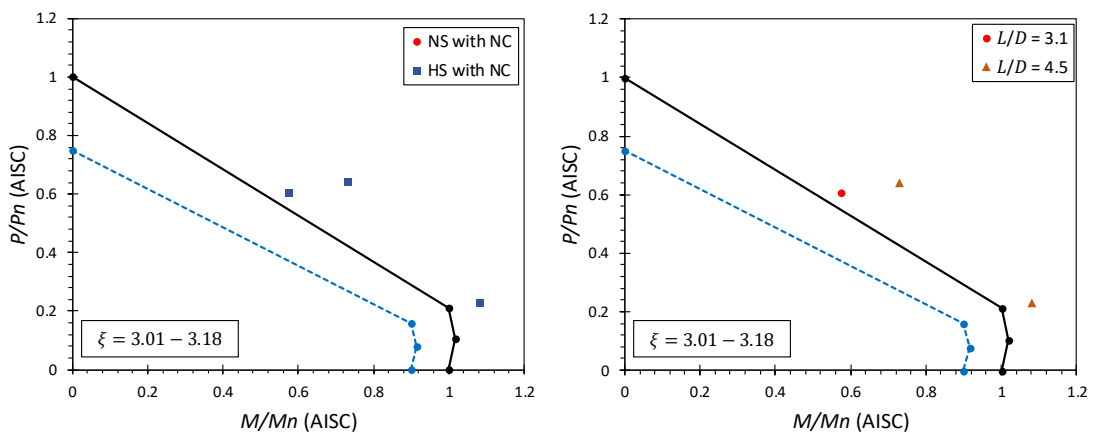
รูปที่ 5.14 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น)



(จ) $\xi = 2.00$

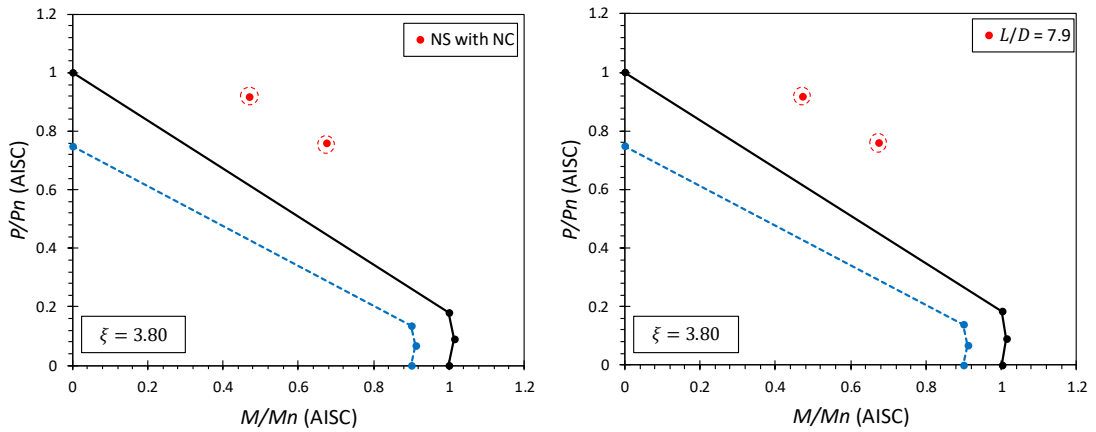


(ฉ) $\xi = 2.84$

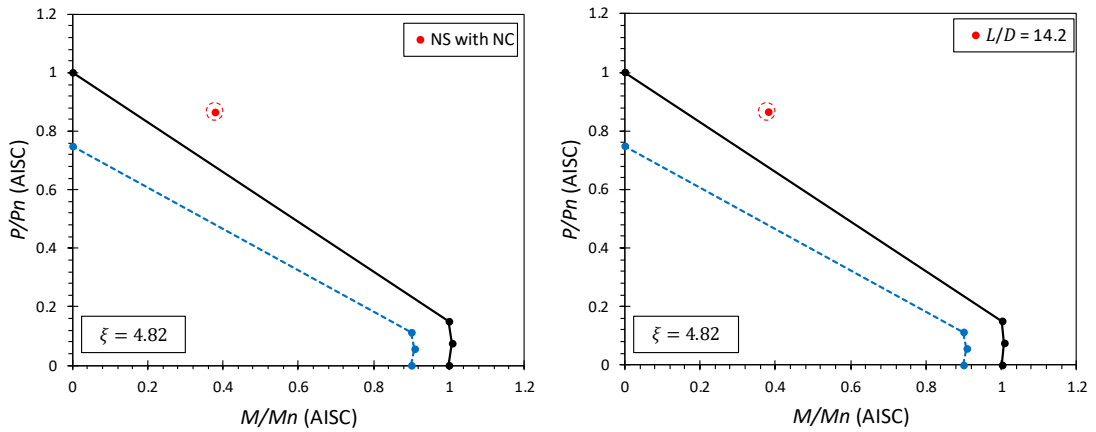


(ง) $\xi = 3.01 - 3.18$

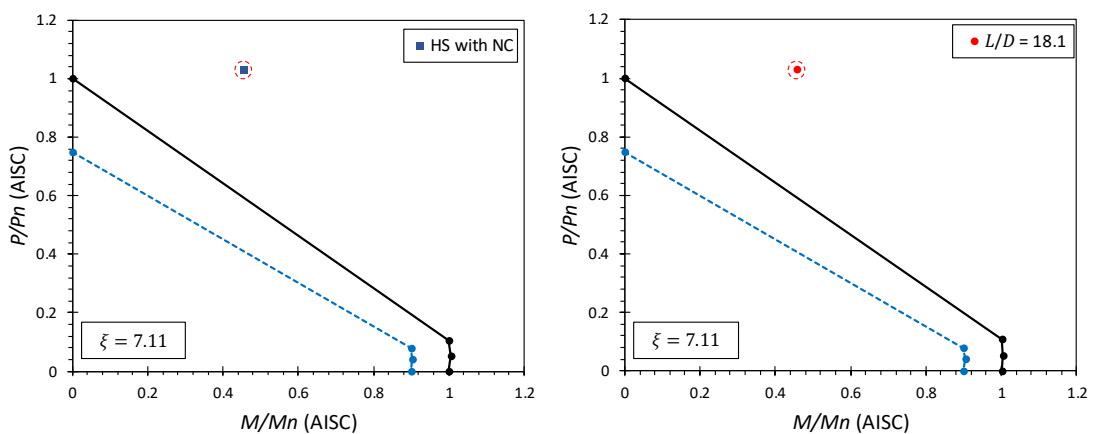
รูปที่ 5.14 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น)



(จ) $\xi = 3.80$

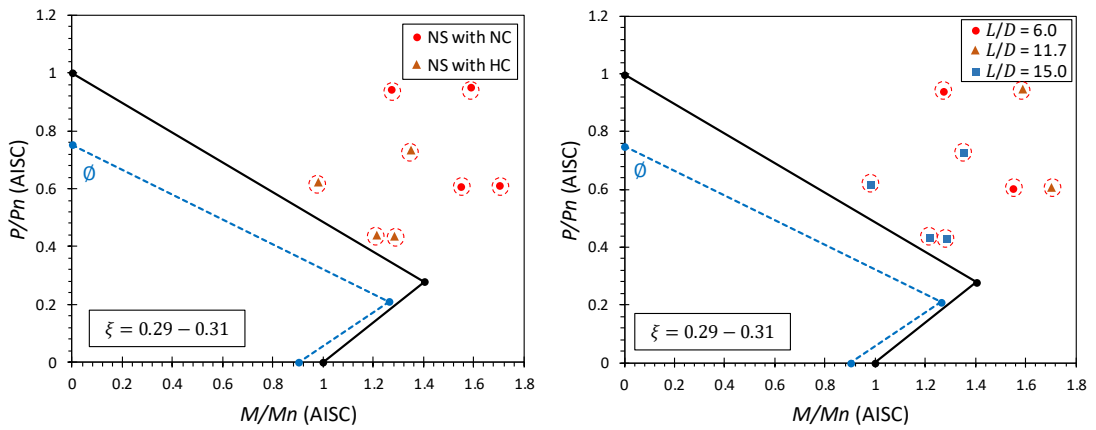


(ข) $\xi = 4.82$

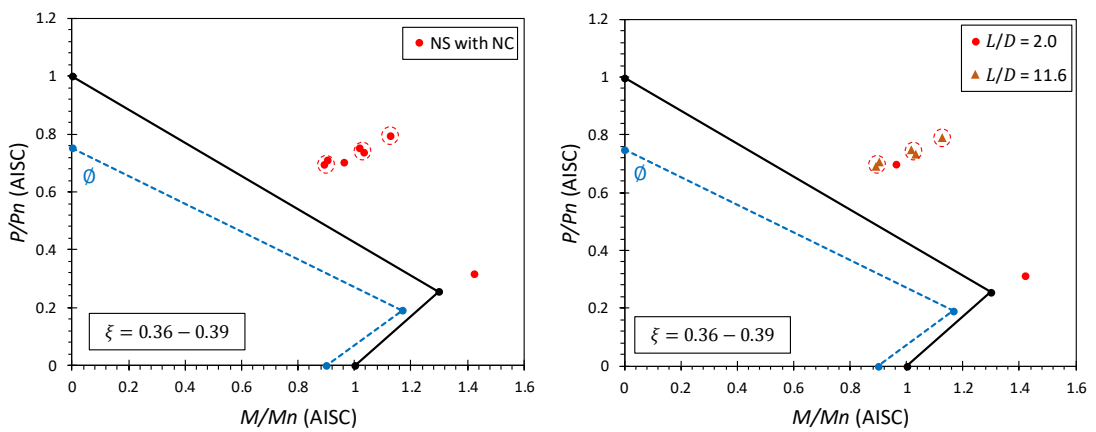


(ค) $\xi = 7.11$

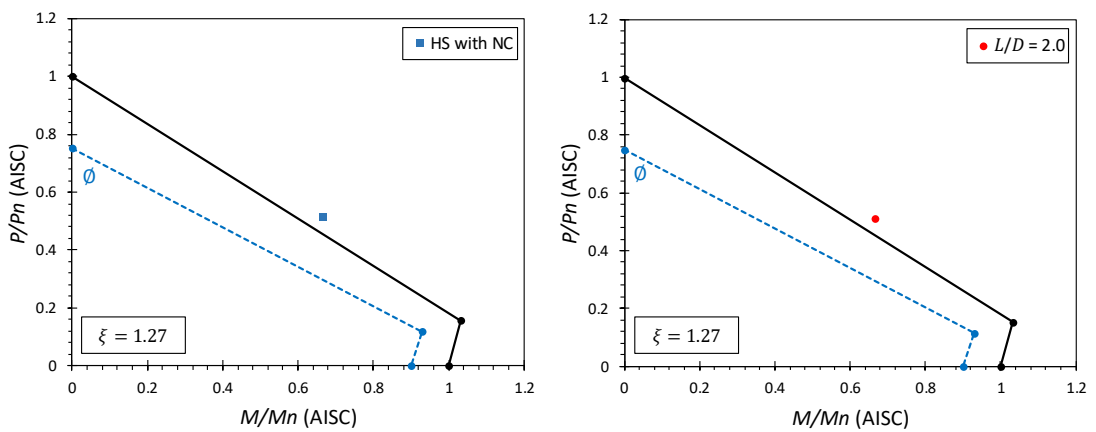
รูปที่ 5.14 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดอัดแน่น)



(ก) $\xi = 0.29 - 0.31$

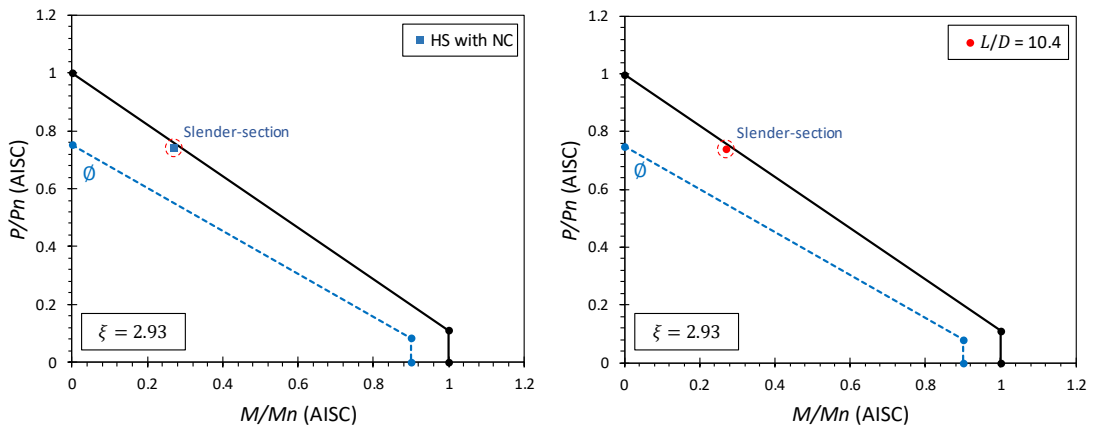


(ข) $\xi = 0.36 - 0.39$

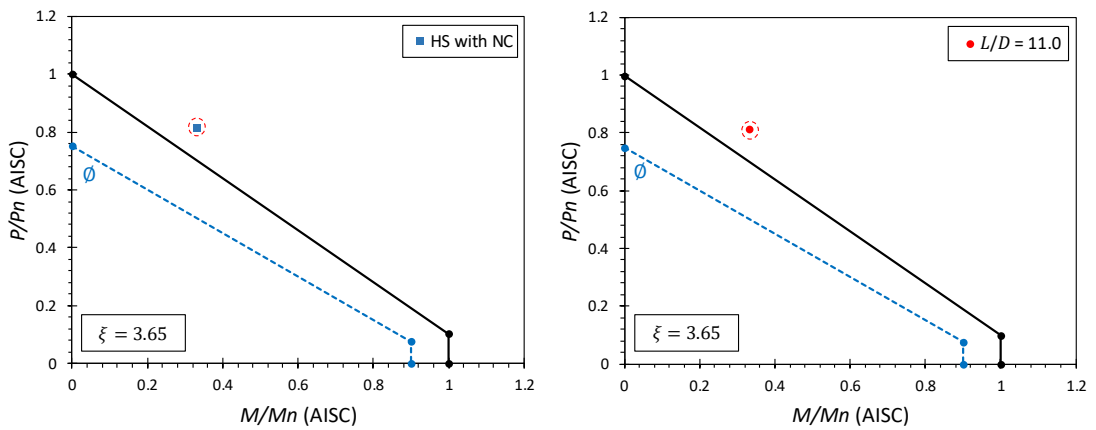


(ค) $\xi = 1.27$

รูปที่ 5.15 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด)

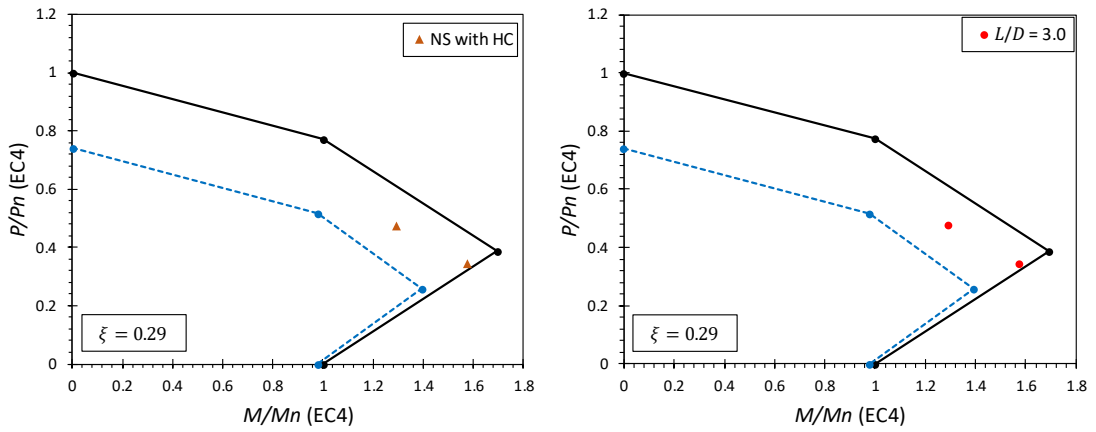


(ง) $\xi = 2.93$

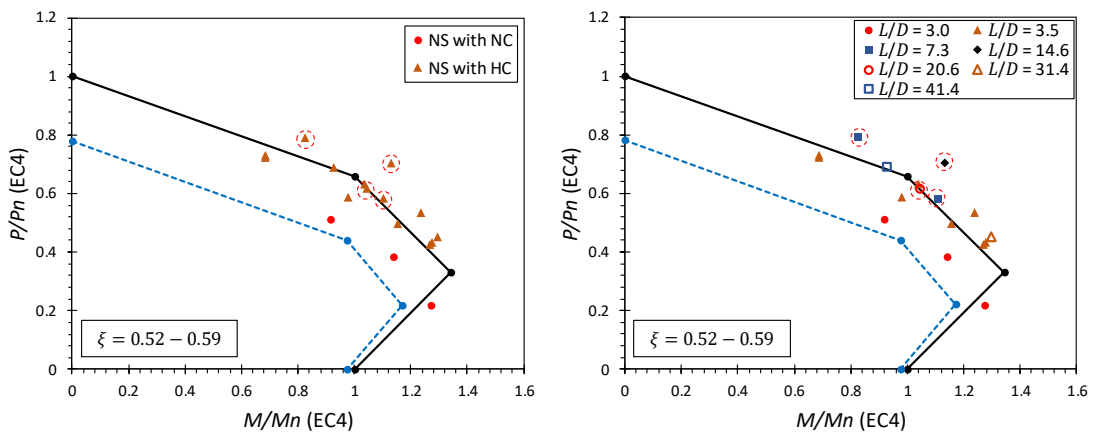


(จ) $\xi = 3.65$

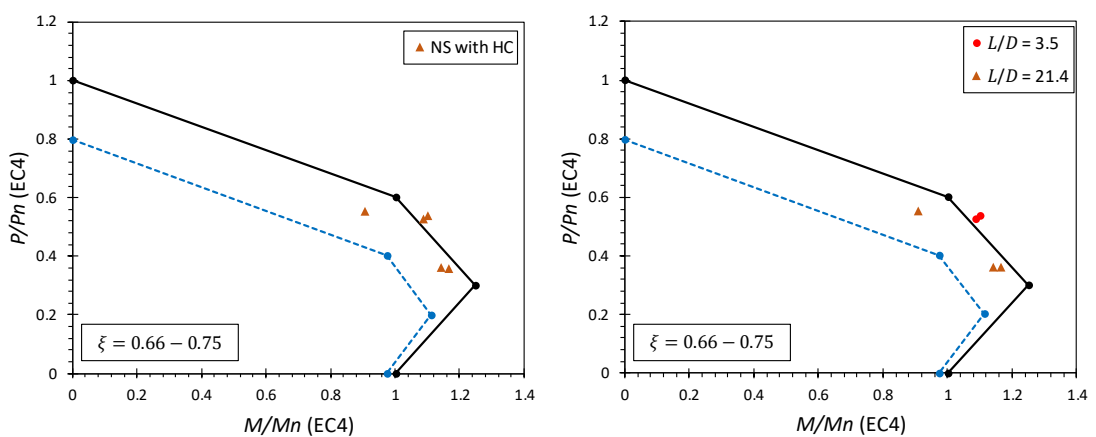
รูปที่ 5.15 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลูด)



(ก) $\xi = 0.29$

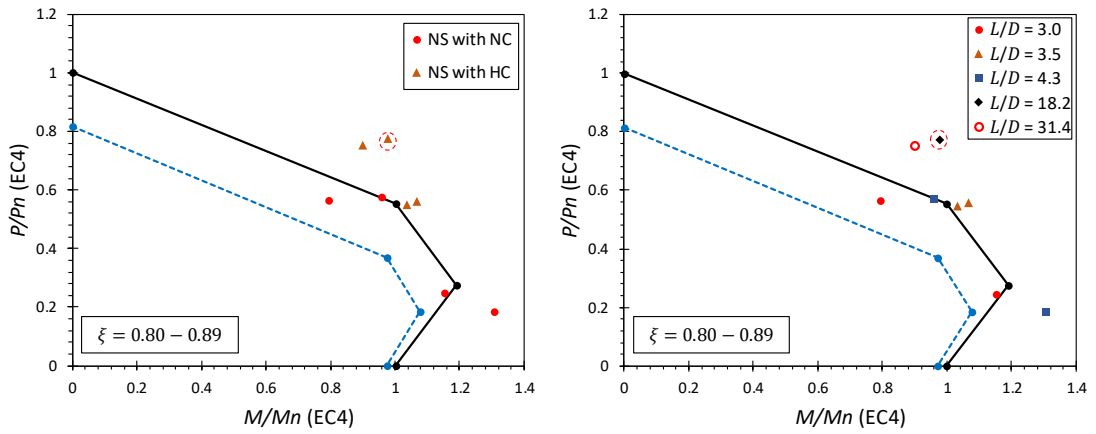


(ข) $\xi = 0.52 - 0.59$

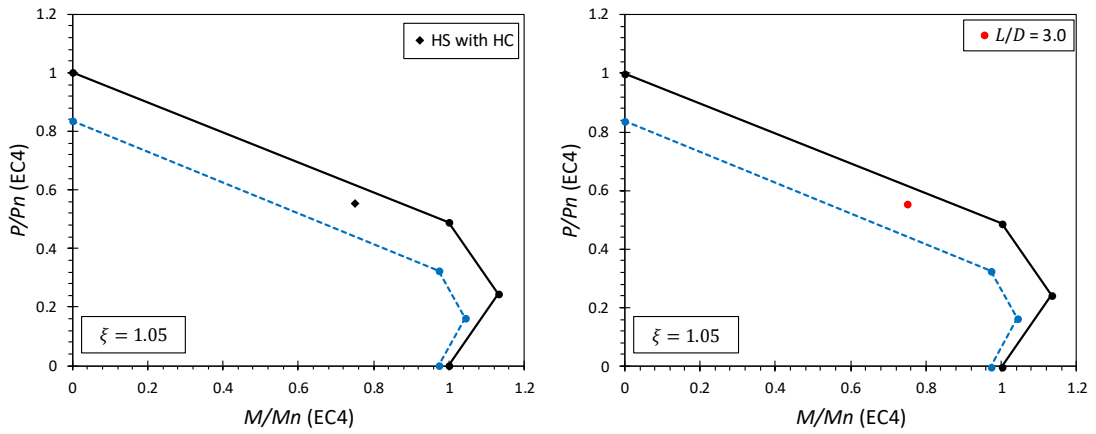


(ค) $\xi = 0.66 - 0.75$

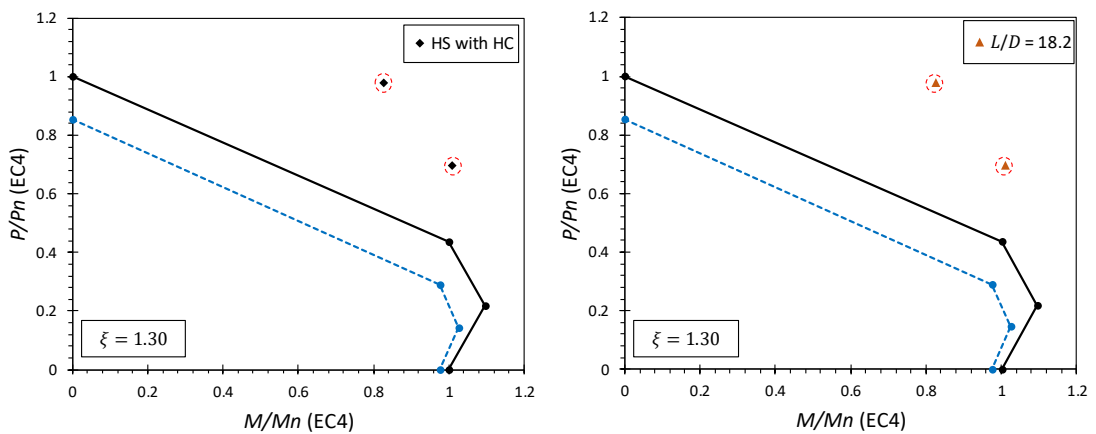
รูปที่ 5.16 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t \leq 52\sqrt{235/f_y}$)



(ง) $\xi = 0.80 - 0.89$

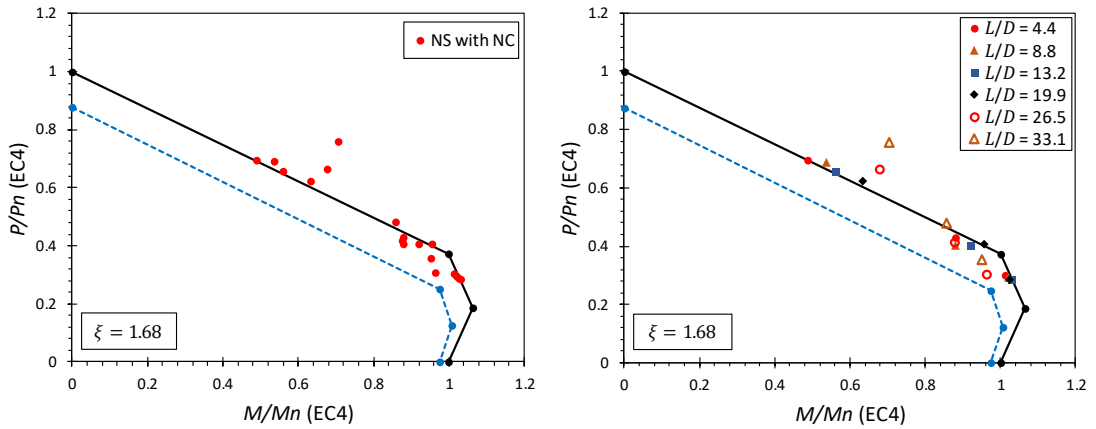


(จ) $\xi = 1.05$

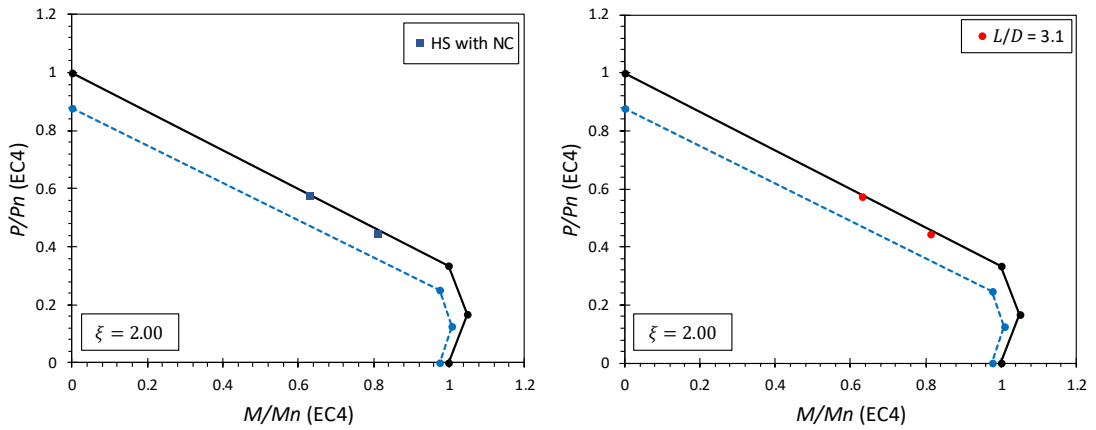


(ฉ) $\xi = 1.30$

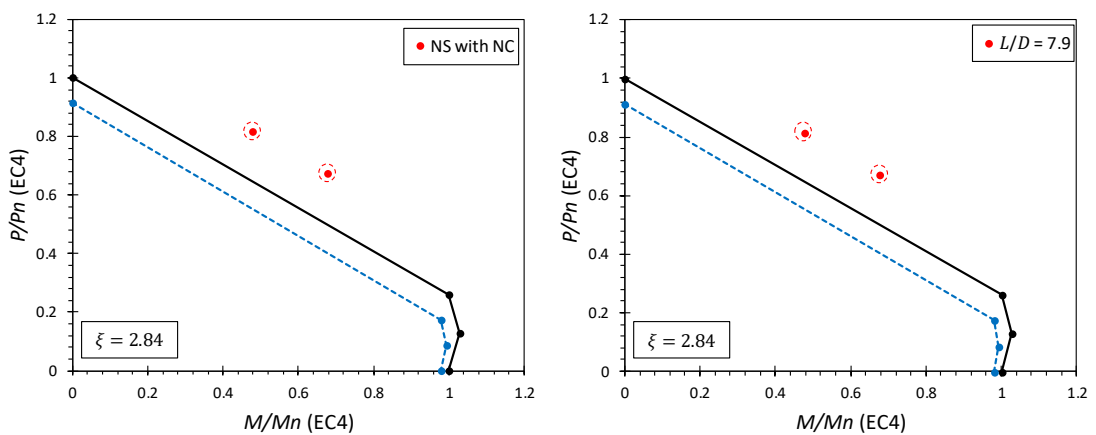
รูปที่ 5.16 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t \leq 52\sqrt{235/f_y}$)



(จ) $\xi = 1.68$

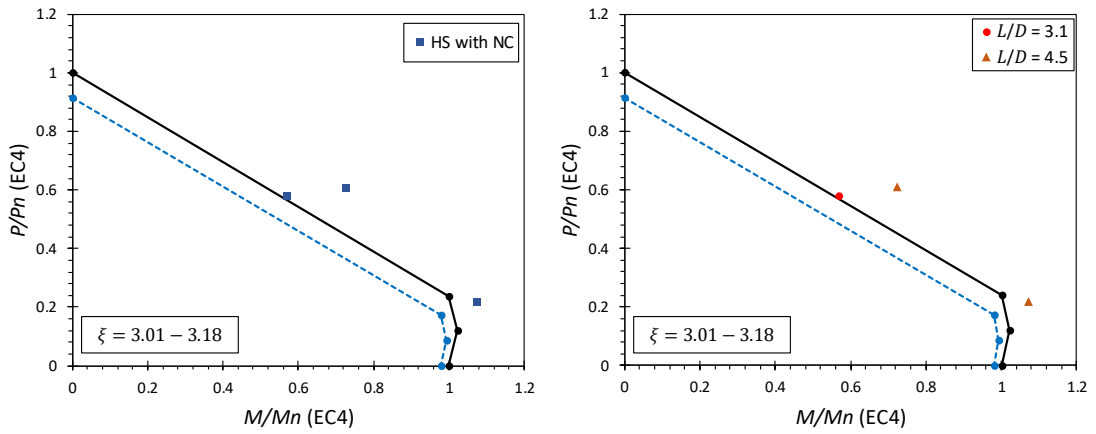


(ข) $\xi = 2.00$

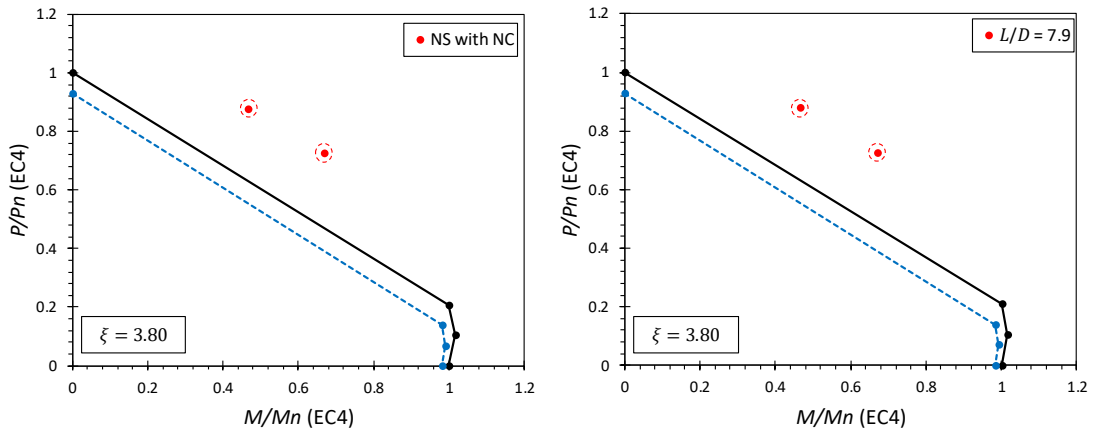


(ค) $\xi = 2.84$

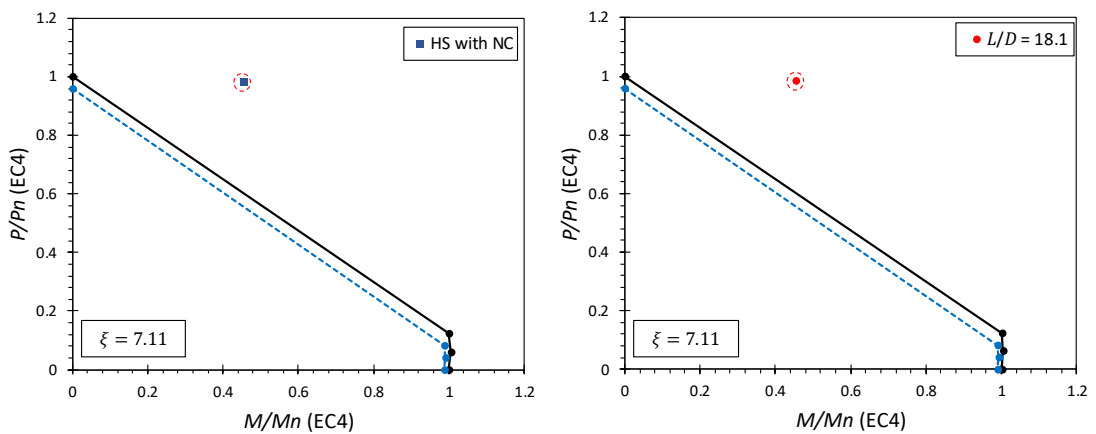
รูปที่ 5.16 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t \leq 52\sqrt{235/f_y}$)



(ง) $\xi = 3.01 - 3.18$

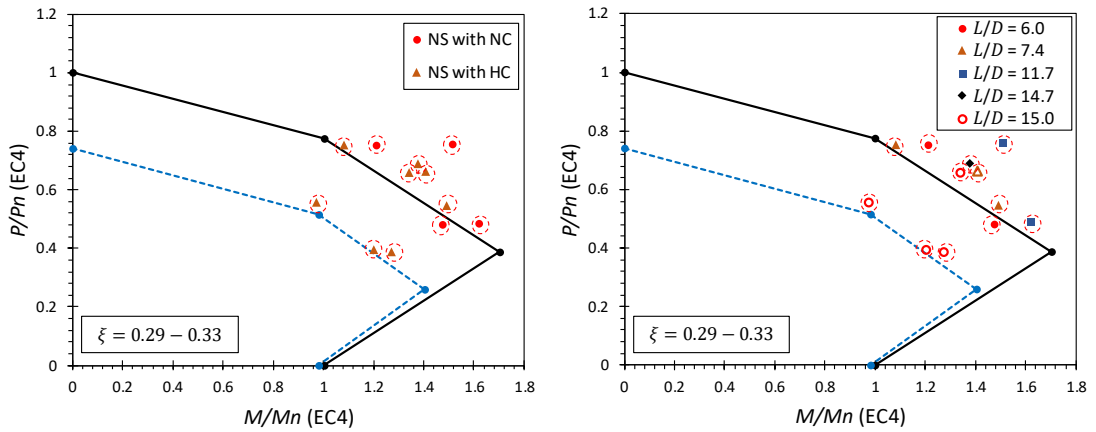


(จ) $\xi = 3.80$

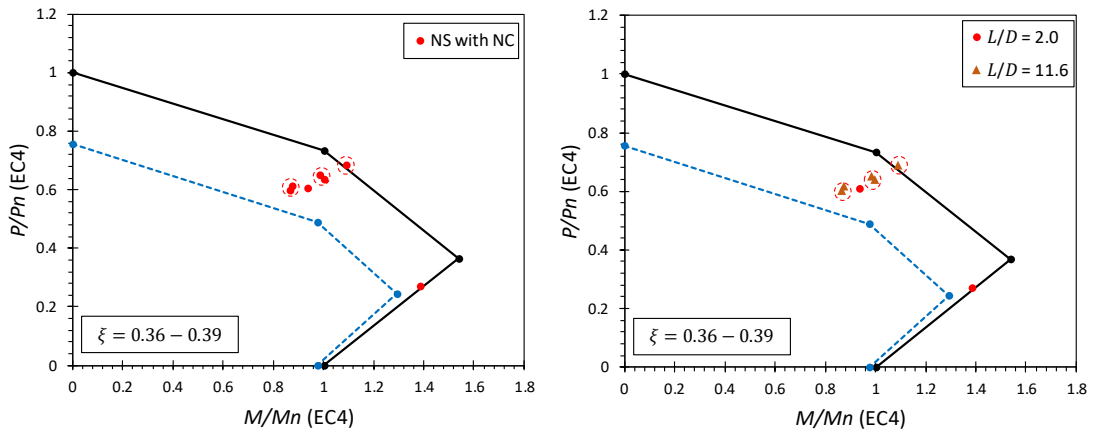


(ข) $\xi = 7.11$

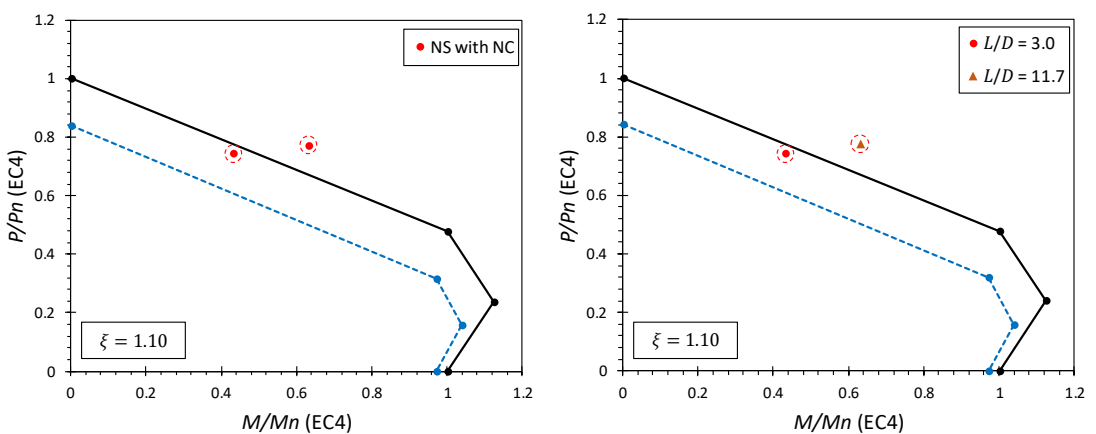
รูปที่ 5.16 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t \leq 52\sqrt{235/f_y}$)



(ก) $\xi = 0.29 - 0.33$

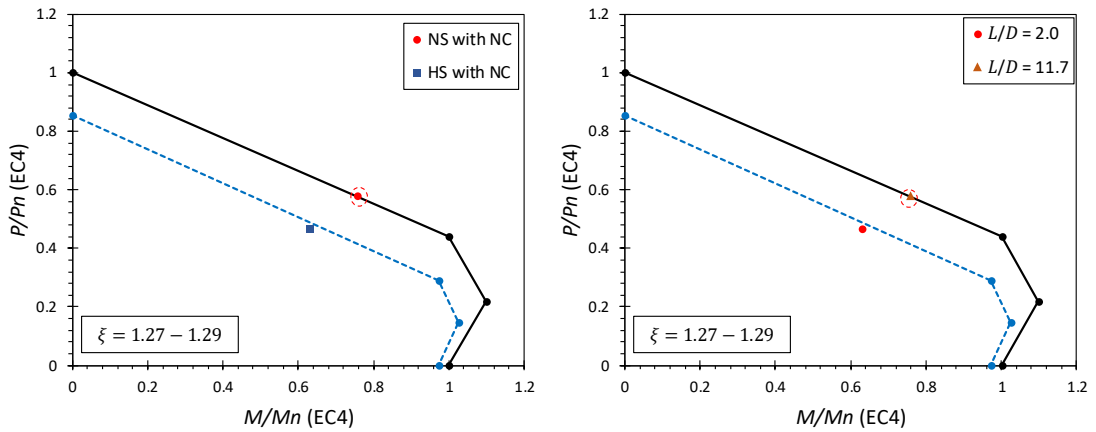


(ข) $\xi = 0.36 - 0.39$

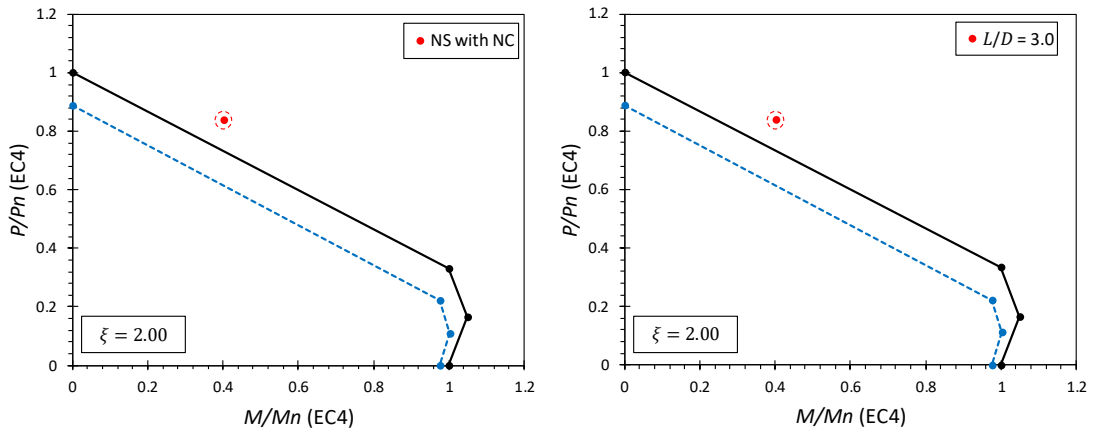


(ค) $\xi = 1.10$

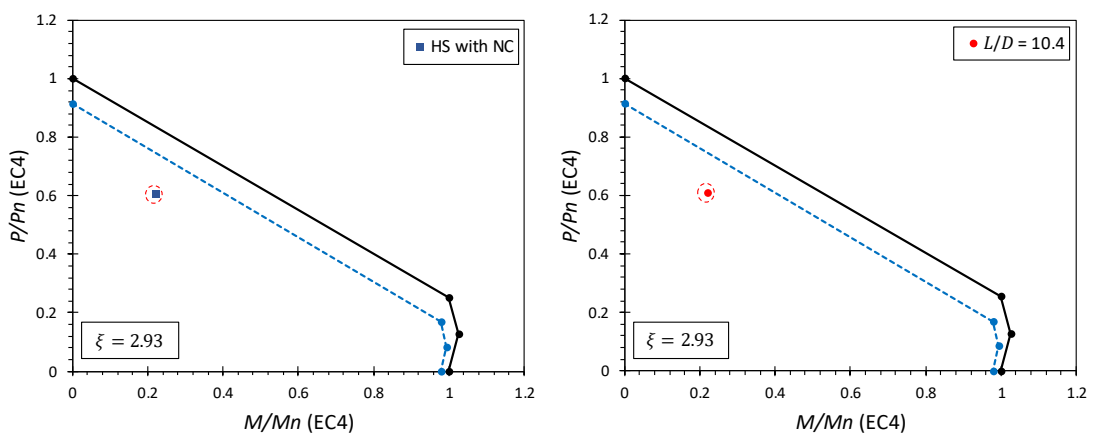
รูปที่ 5.17 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t > 52\sqrt{235/f_y}$)



(ง) $\xi = 1.27 - 1.29$

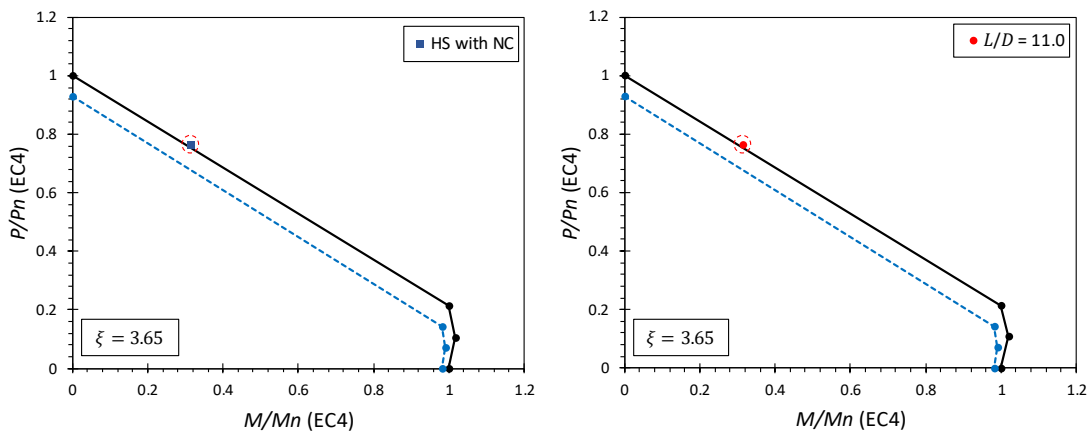


(จ) $\xi = 2.00$

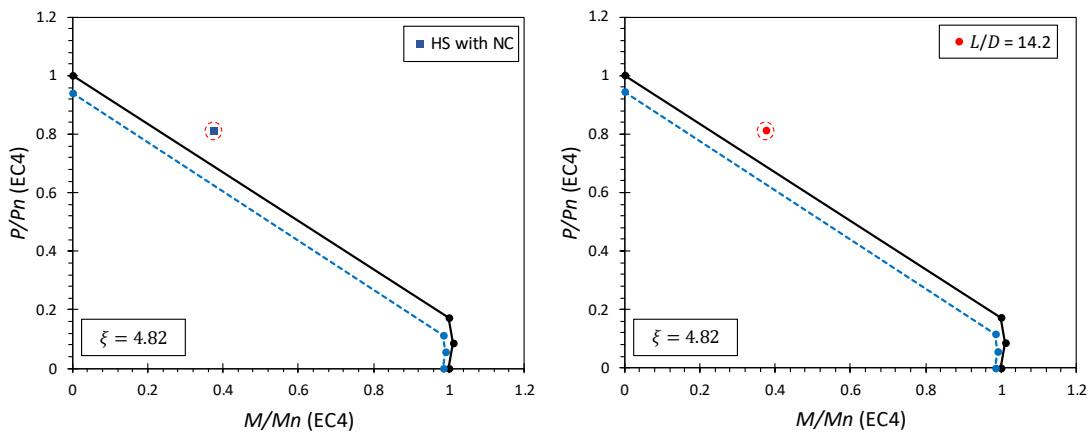


(ฉ) $\xi = 2.93$

รูปที่ 5.17 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t > 52\sqrt{235/f_y}$)



(ข) $\xi = 3.65$



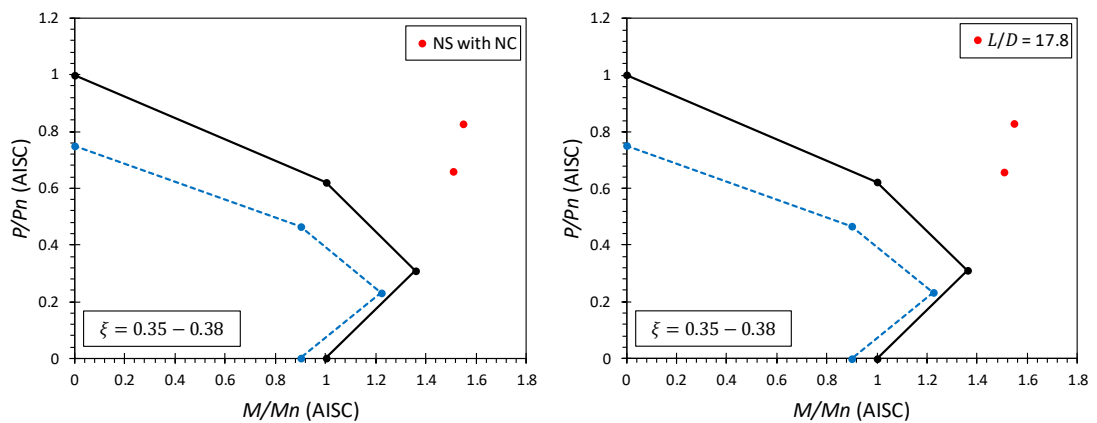
(ง) $\xi = 4.82$

รูปที่ 5.17 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
หน้าตัดสี่เหลี่ยม ($b/t > 52\sqrt{235/f_y}$)

5.2.3 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

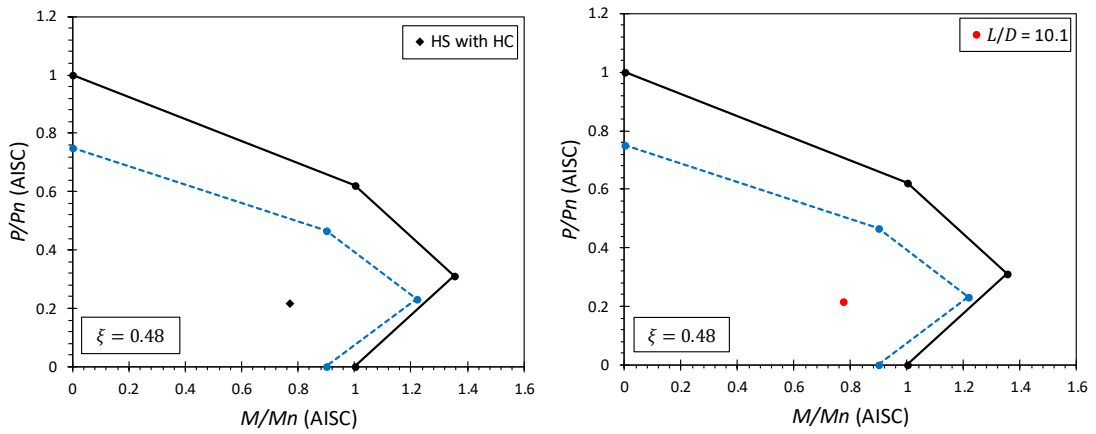
ฐานข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ประกอบด้วยข้อมูลเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจำนวน 12 ตัวอย่างดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4 (บทที่ 4) ซึ่งจำแนกได้เป็นเสาเหล็กรูปพรรณกำลังปกติหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังปกติ และ เสาเหล็กรูปพรรณกำลังสูงหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังสูง จำนวน 5 และ 7 ตัวอย่าง ตามลำดับ โดยได้ใช้ข้อมูลผลการทดสอบดังกล่าวในการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19

จากรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังปกติ อย่างไรก็ตาม สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ใช้เหล็กรูปพรรณกำลังสูงพิเศษและคอนกรีตกำลังสูง ($f'_c > 88$ เมกะปาสคาล และ $f_y > 812$ เมกะปาสคาล) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนดและมาตรฐานทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 (ข) (ง) และ (จ) ซึ่งเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคูณความต้านทาน (สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16) หรือ ค่าตัวคูณความปลอดภัย (สำหรับมาตรฐาน Eurocode 4) มีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่าข้อมูลผลการทดสอบ

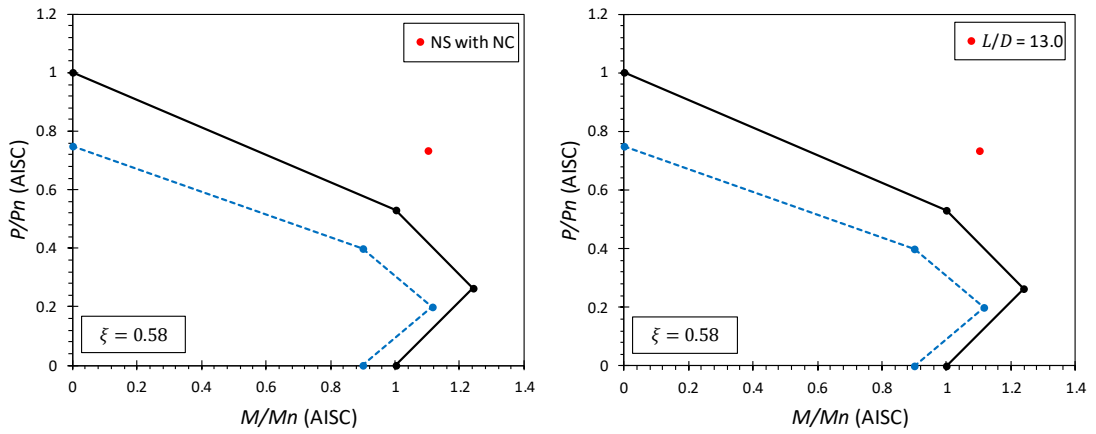


(ก) $\xi = 0.35 - 0.38$

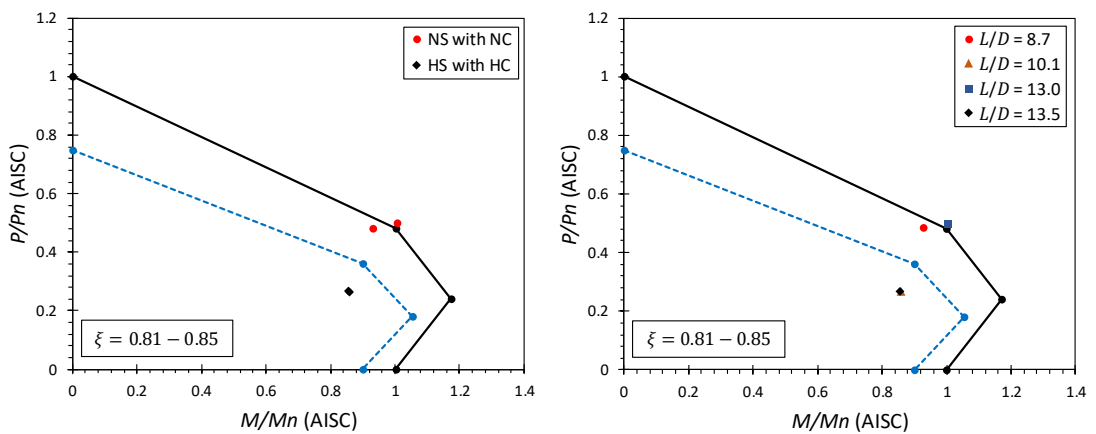
รูปที่ 5.18 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต



(ข) $\xi = 0.48$

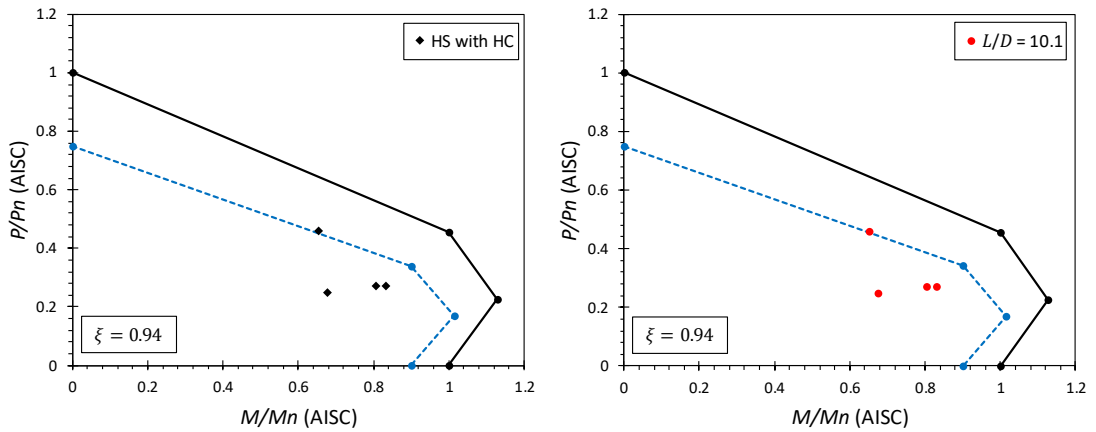


(ค) $\xi = 0.58$



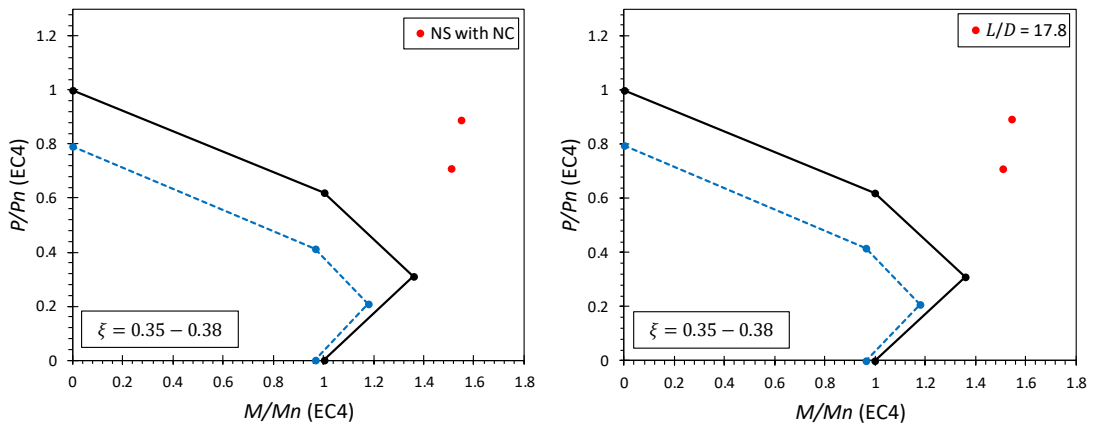
(ง) $\xi = 0.81 - 0.85$

รูปที่ 5.18 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

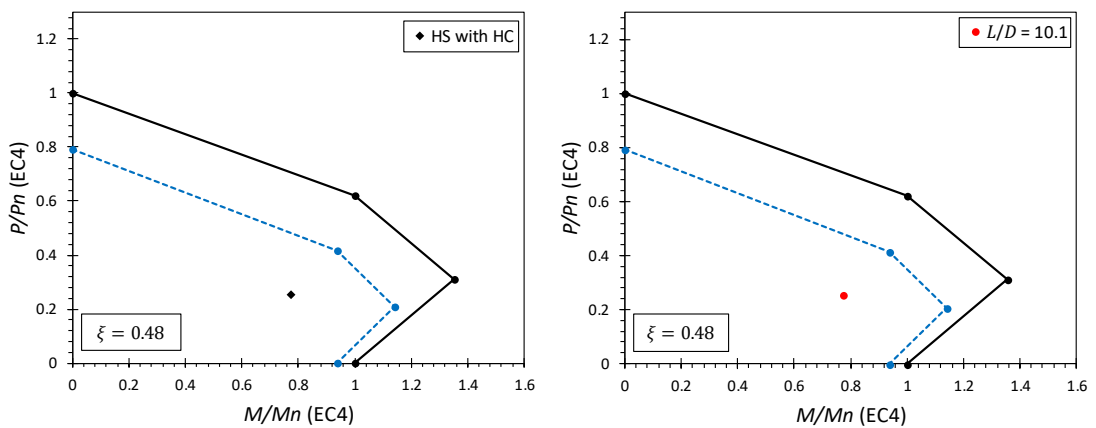


(จ) $\xi = 0.94$

รูปที่ 5.18 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

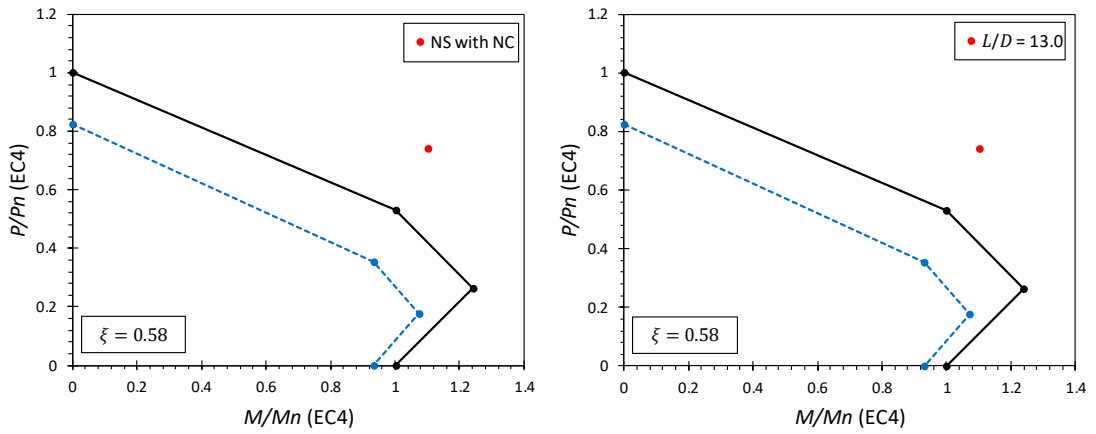


จุพาลงก (ก) $\xi = 0.35 - 0.38$

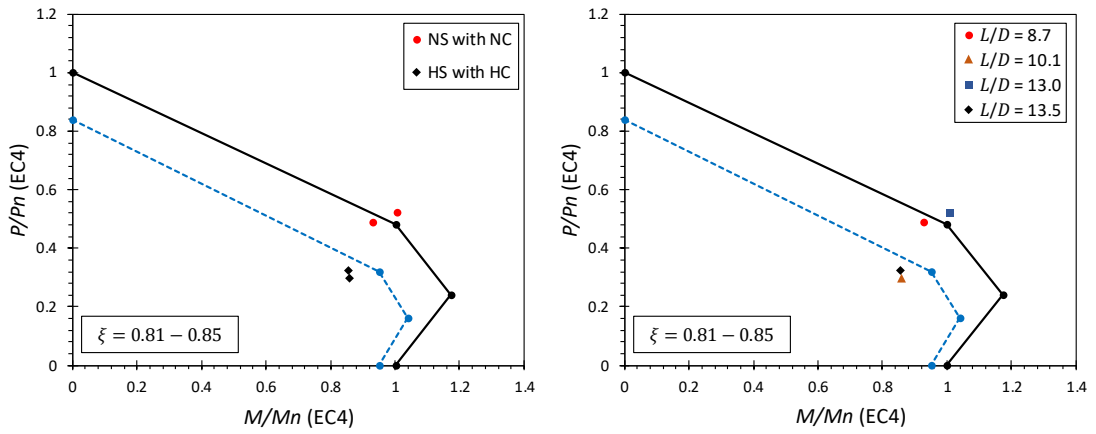


(ข) $\xi = 0.48$

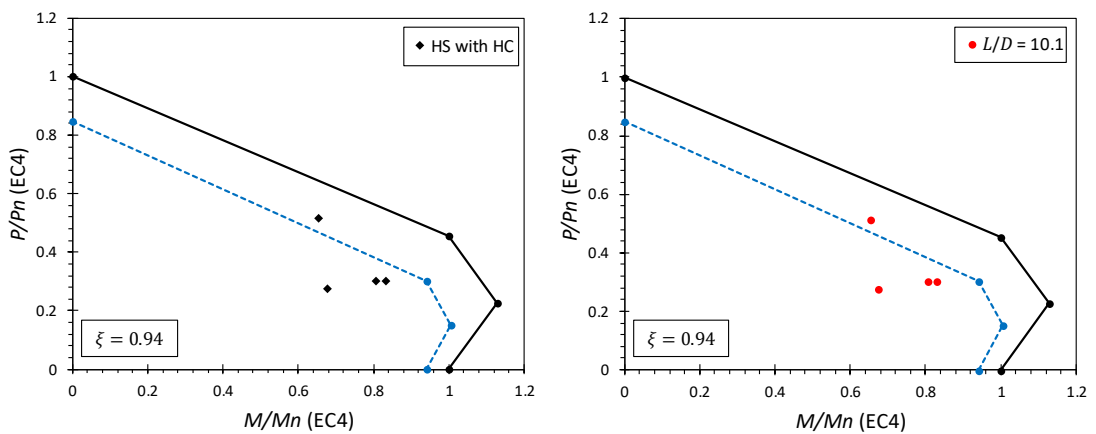
รูปที่ 5.19 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต



(ค) $\xi = 0.58$



(ง) $\xi = 0.81 - 0.85$



(จ) $\xi = 0.94$

รูปที่ 5.19 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามมาตรฐาน Eurocode 4 สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

บทที่ 6

การศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

จากงานวิจัยในอดีต [6, 63] พบว่า ผลกระทบของขนาดสำหรับเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต นั้นขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อเหล็กและค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ โดยพบว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อเหล็กเพิ่มขึ้นและพบว่าผลกระทบของขนาดเสามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ไม่มีงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาผลกระทบของกำลังอัดของคอนกรีตต่อผลกระทบของขนาดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ดังนั้นในบทที่ 6 ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากฐานข้อมูลผลการทดสอบที่รวบรวมจากงานวิจัยในอดีต โดยในการศึกษาผลกระทบของขนาดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตนั้น ต้องใช้ข้อมูลผลการทดสอบของเสาที่มีขนาดต่างกัน และมีอัตราส่วนความชะลุดของเสา กำลังอัดของคอนกรีตและหน่วยแรงครากของท้อเหล็กเท่ากัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากฐานข้อมูลผลการทดสอบเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมดังแสดงในบทที่ 4 มีข้อมูลของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามลักษณะที่กล่าวมาไม่เพียงพอสำหรับการศึกษาผลกระทบของขนาดเสา งานวิจัยนี้จึงได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ในการพัฒนาสมการสำหรับทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากฐานข้อมูลผลการทดสอบ และใช้สมการที่ได้ในการศึกษาผลกระทบของขนาดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

6.1 สมการสำหรับทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์กลาง

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม *HeuristicLab* ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมจากฐานข้อมูลการทดสอบดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 โดยในการวิเคราะห์ ได้แบ่งข้อมูลเป็นสองชุดข้อมูลได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่ง และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 3.2 ในบทที่ 3 สำหรับในบทนี้ได้กำหนดจำนวนชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งและสำหรับทดสอบเท่ากับร้อยละ 90 และ 10 ของจำนวนข้อมูลทั้งหมดในฐานข้อมูลการทดสอบเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง โดยกำหนดเซตของฟังก์ชันนอลและเซตของเทอร์มินอลดังนี้: $F = \{+, -, *\}$ และ $T = \{D, t, L_e, f'_c, f_y, [-20, 20]\}$ และสำหรับการตั้งค่าระเบียบวิธีของกระบวนการโปรแกรมเชิงพันธุกรรมนั้น ได้กำหนดการตั้งค่าไว้ 6 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

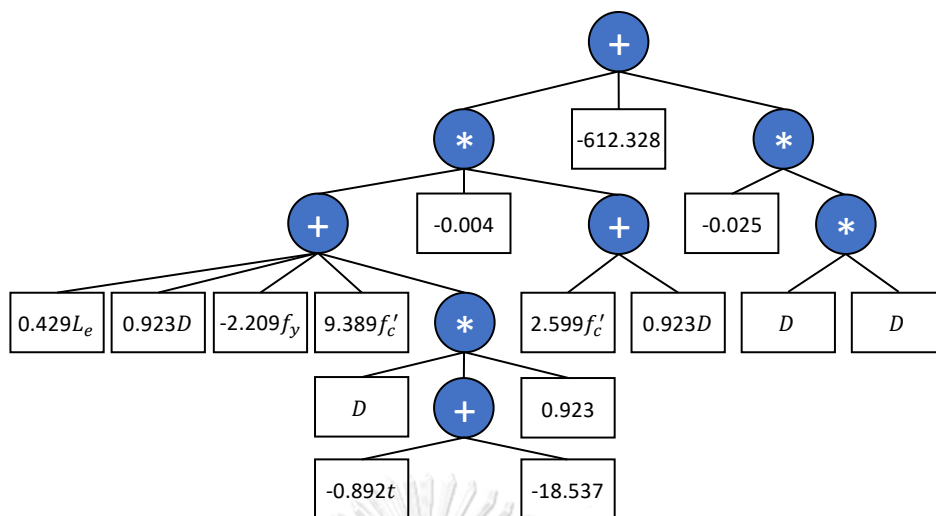
การตั้งค่า	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
Maximum Generation	200	200	200	200	200	200
Population Size	500	1000	500	1000	500	1000
Mutation Probability	5%	5%	10%	10%	15%	15%
Elites count	1	1	1	1	1	1

จากการรันโปรแกรมทั้ง 6 ครั้งสำหรับแต่ละรูปแบบการตั้งค่าที่แตกต่างกัน จะได้สมการในการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตจำนวน 6 รูปแบบ โดยความแม่นยำในการทำนายกำลังของสมการสามารถแสดงได้จากค่า R^2 ดังแสดงในตารางที่ 6.2 นอกจากนี้ในตารางยังแสดงถึงจำนวนชั้น (model depth) และจำนวนโหนด (model length) ของแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี่สำหรับแต่ละสมการที่ได้ โดยจำนวนชั้นและจำนวนโหนดของแผนภาพจะแสดงถึงความซับซ้อนของรูปแบบสมการที่ได้ กล่าวคือเมื่อแผนภาพมีจำนวนชั้นและจำนวนโหนดมาก รูปแบบของสมการจะมีความซับซ้อนมาก

ตารางที่ 6.2 ความแม่นยำของสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ

ผลที่ได้	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
R^2 ชุดข้อมูลเทรนนิ่ง	0.982	0.980	0.984	0.983	0.981	0.983
R^2 ชุดข้อมูลทดสอบ	0.963	0.957	0.967	0.963	0.965	0.962
Model depth-length	6-28	6-20	6-23	6-30	4-29	6-26

จากตารางที่ 6.2 พบว่า ค่า R^2 ของแต่ละรูปแบบสมการมีค่าไม่ต่างกันมาก โดยสมการทั้ง 6 รูปแบบนั้นมีความแม่นยำในการทำนายกำลังสูง (R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1.0) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากความซับซ้อนของรูปแบบสมการพบว่า สมการรูปแบบที่ 3 มีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนอีกทั้งยังมีค่า R^2 สำหรับชุดข้อมูลเทรนนิ่งและชุดข้อมูลทดสอบเข้าใกล้ 1.0 มากที่สุดเมื่อเทียบกับสมการรูปแบบอื่น ดังนั้นจึงเลือกสมการรูปแบบที่ 3 ในการใช้ศึกษาผลกระทบของขนาดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีต โดยสมการรูปแบบที่ 3 แสดงในรูปแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี่ได้ดังรูปที่ 6.1 และแสดงในรูปสมการได้ดังสมการที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรีสำหรับสมการที่ 6.1

ทั้งนี้ การใช้งานสมการสำหรับทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมดั่งสมการที่ 6.1 ควรใช้งานภายใต้ขอบเขตค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบที่ระบุในตารางที่ 4.2 (บทที่ 4)

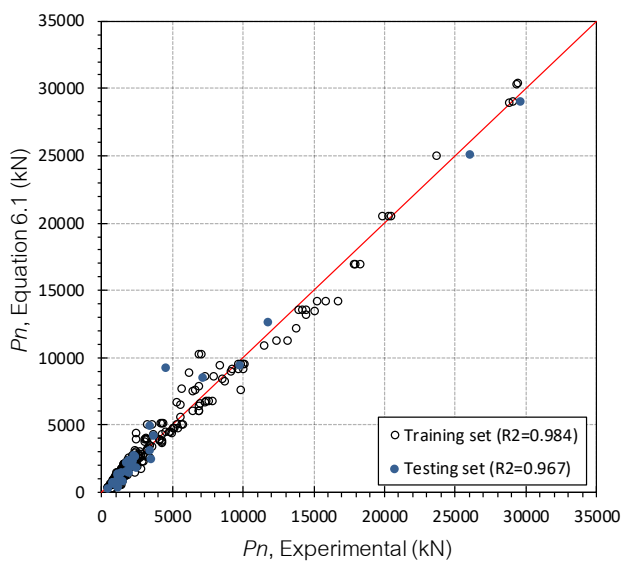
$$P_u = (c_0L_e + c_1D + c_2f_y + c_3f'_c + (c_4t + c_5)c_6D)(c_7f'_c + c_8D)c_9 + c_{10}D^2 + c_{11} \quad (6.1)$$

ดังตารางที่ 6.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{11}

ตารางที่ 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{11} ในสมการที่ 6.1

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
0.4287	0.9230	-2.2094	9.3889	-0.8921	-18.5375
c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
0.9230	2.5992	0.9230	-0.0037	-0.0252	-612.3284

รูปที่ 6.2 แสดงแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ทำนายได้จากสมการที่ 6.1 กับกำลังที่ได้จากผลการทดสอบ โดยพบว่าข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบเส้นสมมาตร ซึ่งกำลังที่ทำนายได้นั้นมีทั้งน้อยกว่าและมากกว่ากำลังที่ได้จากผลการทดสอบ โดยในช่วงที่กำลังอัดมีค่าระหว่าง 10000 ถึง 20000 กิโลนิวตันนั้น สมการที่ 6.1 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้น้อยกว่าผลการทดสอบ



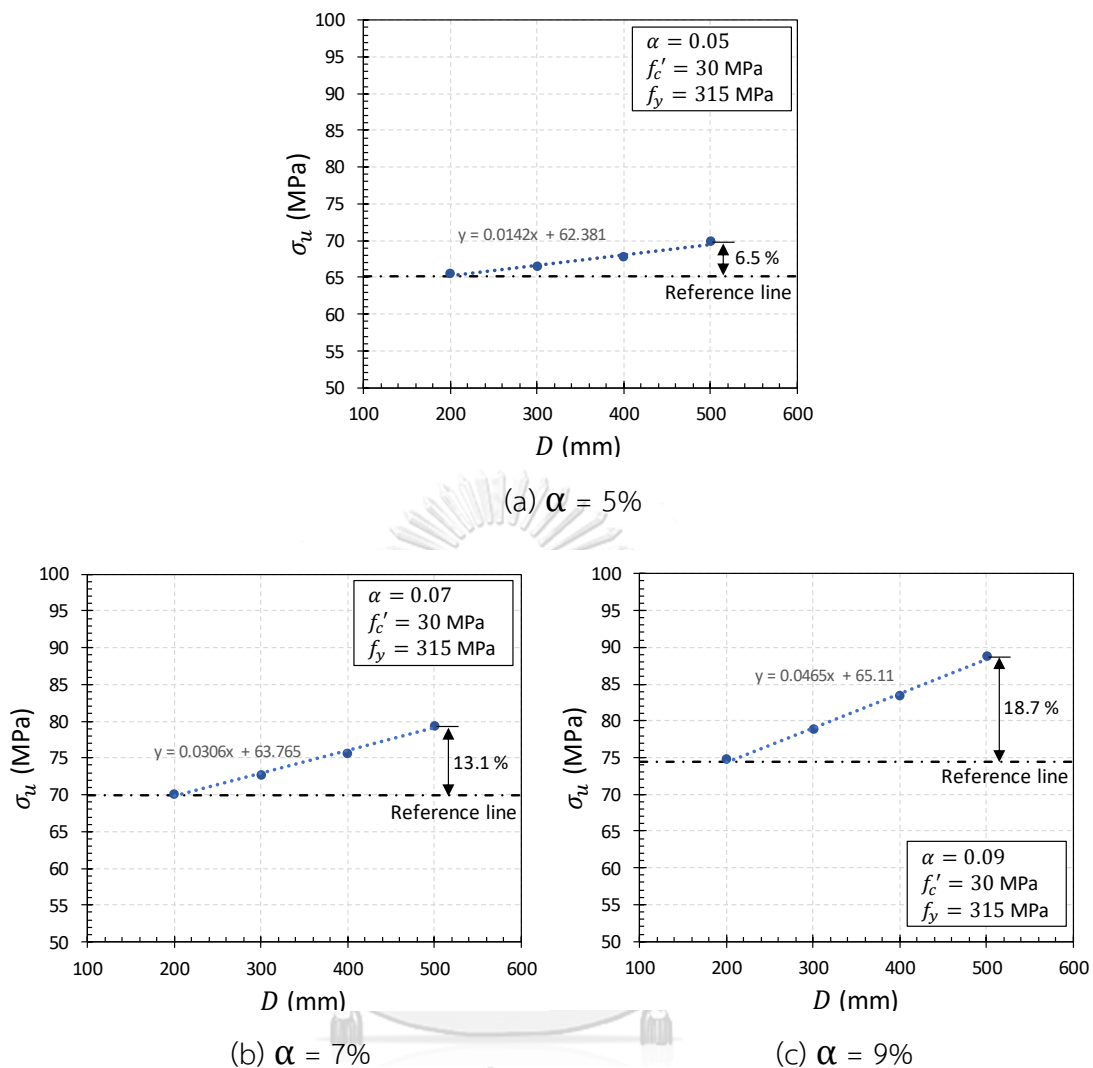
รูปที่ 6.2 แผนภาพการกระจายของกำลังที่ทำนายได้จากสมการที่ 6.1

6.2 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีต

ในการศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีต จะพิจารณาจากหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีต (σ_u) ดังสมการที่ 6.2 โดยที่ P_u คือ กำลังรับแรงอัดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตซึ่งทำนายจากสมการที่ 6.1 โดยพิจารณาเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 200 ถึง 500 มิลลิเมตร, อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% 7% และ 9%, กำลังอัดของคอนกรีต 30 50 และ 70 เมกะปาสคาล และหน่วยแรงครากของเสาต่อเหล็กเท่ากับ 315 เมกะปาสคาล (ชั้นคุณภาพ STK490) โดยเสาที่พิจารณานั้นเป็นเสาสั้น ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลุดของเสาเท่ากับ 3 และเป็นเสาประเภทหน้าตัดอัดแน่น

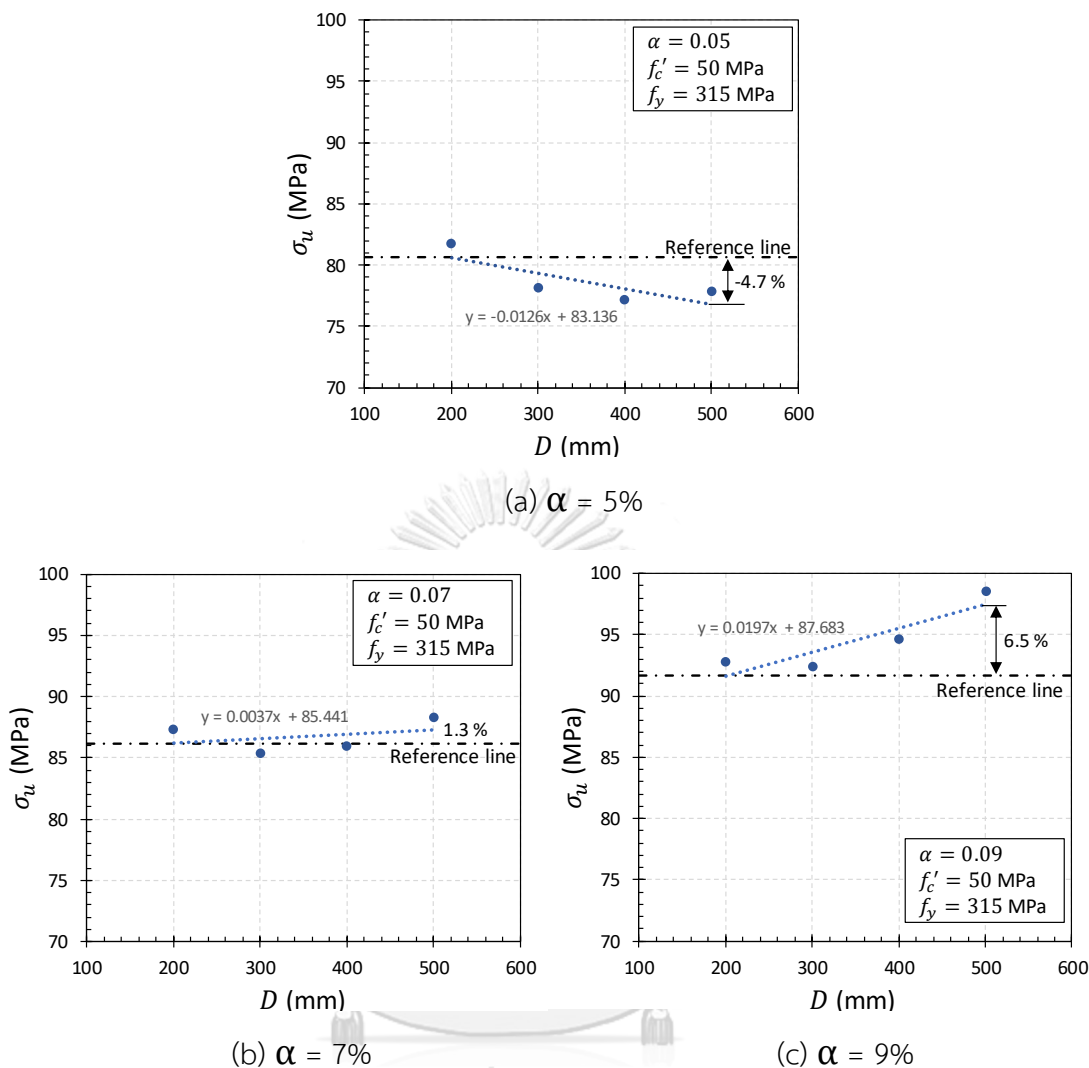
$$\sigma_u = \frac{P_u}{A_s + A_c} \quad (6.2)$$

รูปที่ 6.3 ถึงรูปที่ 6.5 แสดงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมสำหรับอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน คือ 30 50 และ 70 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยเส้นอ้างอิง (reference line) แสดงถึงหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร และเส้นแนวโน้ม (trendline) แสดงถึงแนวโน้มของหน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



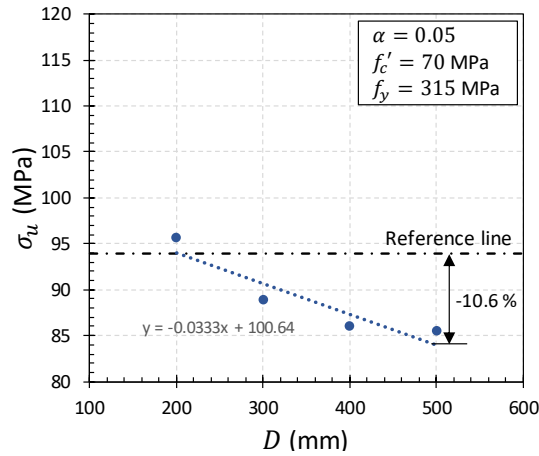
รูปที่ 6.3 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30 MPa

จากรูปที่ 6.3 ซึ่งแสดงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 30 เมกะปาสคาล พบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยหน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% 7% และ 9% มีค่าเพิ่มขึ้น 6.5% 13.1% และ 18.7% ตามลำดับ เมื่อท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามผลที่ได้นั้นมีลักษณะขัดแย้งกับ Wang และคณะ [6] ซึ่งศึกษาผลกระทบของขนาดเสาจากการทดสอบเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 62 เมกะปาสคาล โดยพบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตจะมีค่าลดลง

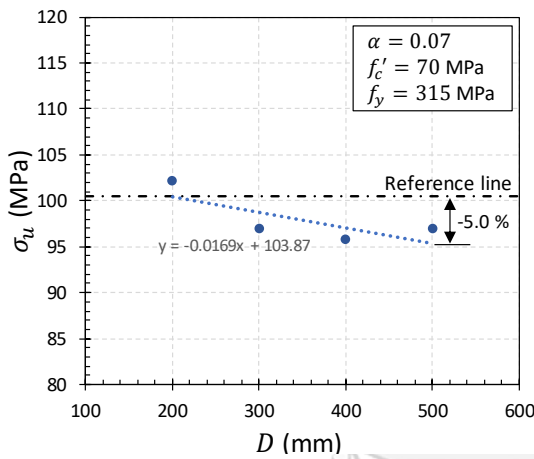


รูปที่ 6.4 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 50 MPa

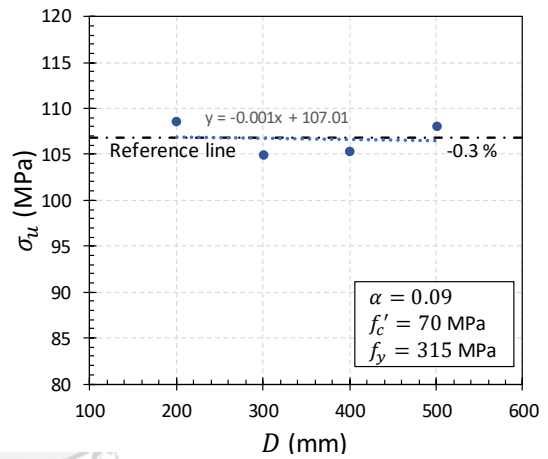
จากรูปที่ 6.4 ซึ่งแสดงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 50 เมกะปาสคาล พบว่า สำหรับเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 5% นั้น หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสามีแนวโน้มลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสามีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่เสาที่มีค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 7% และ 9% นั้น หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเสามีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5% ถึง 9% หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสามีค่าเพิ่มขึ้นจาก -4.7% ถึง 6.5% ตามลำดับเมื่อท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร



(a) α = 5%



(b) α = 7%

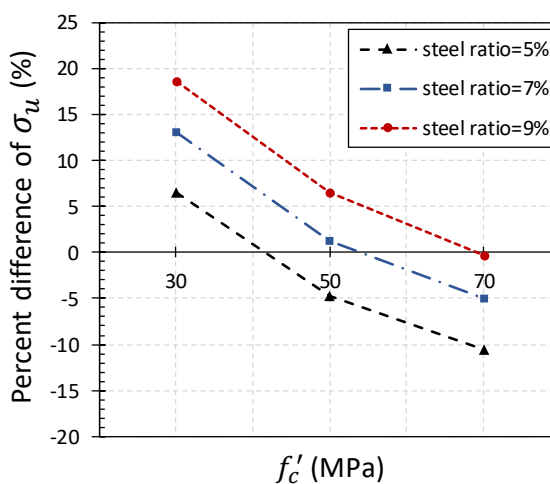


(c) α = 9%

รูปที่ 6.5 ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 70 MPa

จากรูปที่ 6.5 ซึ่งแสดงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 70 เมกะปาสคาล พบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% 7% และ 9% มีค่าลดลง 10.6% 5% และ 0.3% ตามลำดับเมื่อท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้ นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [6] กล่าวคือ หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กเสริมด้วยคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นและผลกระทบของขนาดเสามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 6.3 ถึงรูปที่ 6.5 ซึ่งแสดงผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 30 50 และ 70 เมกะปาสคาลนั้น สามารถสรุปค่าร้อยละผลต่างของหน่วยแรงอัดสูงสุด (ผลต่างระหว่างหน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 และ 500 มิลลิเมตร) สำหรับแต่ละค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณและค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้ดังรูปที่ 6.6 เมื่อพิจารณาเสาที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณเท่ากันจะพบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละผลต่างของหน่วยแรงอัดสูงสุดจะมีค่าลดลง เช่น สำหรับเสาที่มีค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% และกำลังอัดของคอนกรีต 30 เมกะปาสคาล หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสามีค่าเพิ่มขึ้น 6.5% เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร ในขณะที่เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 50 และ 70 เมกะปาสคาลนั้น หน่วยแรงอัดสูงสุดของเสามีค่าลดลง 4.7% และ 10.6% ตามลำดับ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของเสาและอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณแล้ว ยังขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตอีกด้วย



รูปที่ 6.6 ร้อยละผลต่างของหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

บทที่ 7

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับการออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

การวิเคราะห์และออกแบบเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดและแรงดัดกระทำร่วมกันนั้น กำลังที่สามารถรับได้สามารถหาได้จากการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด สำหรับเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ACI Handbook Volume 3: Design Aids [7] ได้กำหนดกราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามในข้อกำหนดและมาตรฐานปัจจุบันยังไม่มีการเสนอเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับใช้ในการช่วยวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ดังนั้นในบทที่ 7 ได้นำเสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม โดยใช้หลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ในการพัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์จากฐานข้อมูลผลการทดสอบ จากนั้นใช้สมการที่ได้ในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยในแนวทางเดียวกับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

7.1 สมการสำหรับทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดเอียงศูนย์

ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตนั้น ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ได้ถูกแบ่งเป็น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งและชุดข้อมูลสำหรับทดสอบจำนวนร้อยละ 90 และ 10 ของฐานข้อมูลตามลำดับ โดยกำหนดเซตของฟังก์ชันนอลและเซตของเทอร์มินอลดังนี้: $F = \{+, -, *\}$ และ $T = \{D, t, L_e, f'_c, f_y, e^*, [-20, 20]\}$ เมื่อ e^* คือผลบวกของระยะเอียงศูนย์ (e) และการโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา (δ) จากนั้นทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยกำหนดการตั้งค่าระเบียบวิธีของกระบวนการโปรแกรมเชิงพันธุกรรมที่ต่างกัน 6 รูปแบบดังตารางที่ 7.1 เพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุด

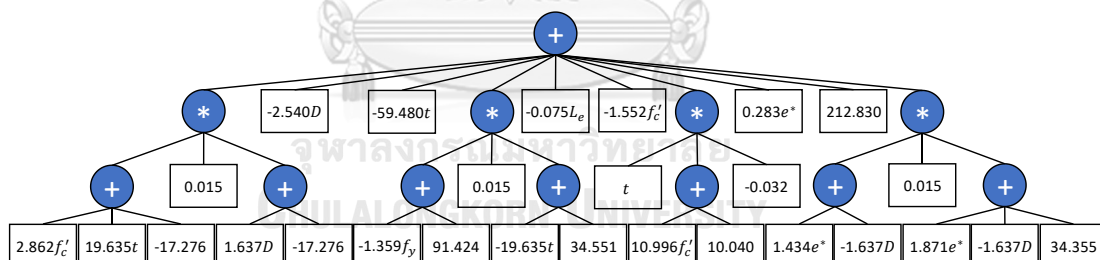
ตารางที่ 7.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

การตั้งค่า	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
Maximum Generation	300	300	300	300	300	300
Population Size	500	1000	500	1000	500	1000
Mutation Probability	1%	1%	5%	5%	10%	10%
Elites count	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.2 แสดงค่า R^2 สำหรับสมการทำนายกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ทั้ง 6 รูปแบบ พบว่า สมการรูปแบบที่ 3 มีค่า R^2 สำหรับชุดข้อมูลเทรนนิ่งและชุดข้อมูลทดสอบเข้าใกล้ 1.0 มากที่สุดเมื่อเทียบกับสมการรูปแบบอื่น ดังนั้นจึงเลือกสมการรูปแบบที่ 3 ในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม โดยสมการรูปแบบที่ 3 สามารถแสดงในรูปแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีได้ดังรูปที่ 7.1 และแสดงในรูปสมการได้ดังสมการที่ 7.1 นอกจากนี้จากรูปที่ 7.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการที่ 7.1 กับกำลังที่ได้จากผลการทดสอบ พบว่าข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบเส้นสมมาตรซึ่งกำลังที่คำนวณได้นั้นมีทั้งน้อยกว่าและมากกว่ากำลังที่ได้จากผลการทดสอบ

ตารางที่ 7.2 ความแม่นยำของสมการทำนายกำลังแต่ละรูปแบบ

ผลที่ได้	รูปแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
R^2 ชุดข้อมูลเทรนนิ่ง	0.965	0.985	0.986	0.984	0.979	0.982
R^2 ชุดข้อมูลทดสอบ	0.981	0.989	0.991	0.984	0.984	0.989
Model depth-length	4-44	6-39	4-39	6-46	6-93	6-32



รูปที่ 7.1 แผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีสำหรับสมการที่ 7.1

การใช้งานสมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ดังสมการที่ 7.1 นั้น ควรใช้งานสมการภายใต้ขอบเขตค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละตัวแปรในฐานข้อมูลการทดสอบที่ระบุในตารางที่ 4.3 (บทที่ 4)

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 \quad (7.1)$$

$$\text{เมื่อ } P_1 = C_0D + C_1t + C_2L_e + C_3f'_c + C_4e^* + C_5 \quad (7.2)$$

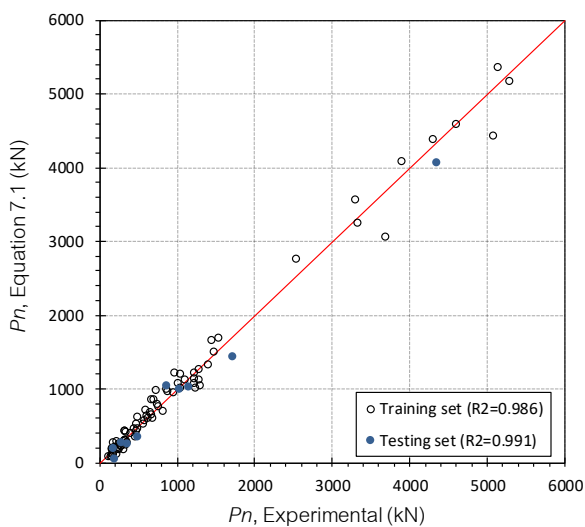
$$P_2 = (C_6D + C_7)(C_8f'_c + C_9t + C_{10}) + (C_{11}f_y + C_{12})(C_{13}t + C_{14}) \quad (7.3)$$

$$P_3 = (C_{15}f'_c + C_{16})t + (C_{17}e^* + C_{18}D + C_{19})(C_{20}e^* + C_{21}D) \quad (7.4)$$

ดังตารางที่ 7.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{21}

ตารางที่ 7.3 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{21} ในสมการที่ 7.1

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
-2.5404	-59.4801	-0.0747	-1.5519	0.2828	212.8254	0.0252	-0.2657
c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}
2.8620	19.6348	-17.2756	-1.3589	91.4239	-0.3020	0.5313	-0.3473
c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{20}	c_{21}		
-0.3171	1.8705	-1.6366	34.3545	0.0221	-0.0252		



รูปที่ 7.2 แผนภาพการกระจายของกำลังที่คำนวณได้จากสมการที่ 7.1

ในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 ค่ากำลังรับแรงดัดของเสาสามารถคำนวณได้จาก $P_n e^*$ เมื่อ P_n คือกำลังรับแรงอัดที่คำนวณจากสมการที่ 7.1 และ e^* คือ ผลบวกของระยะเยื้องศูนย์กลางและการโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา เพื่อเปรียบเทียบผลของ $P\delta$ ต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสมการทำนายกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่ไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสมการที่ 7.1 (สมการที่ 7.1 พิจารณาผลของการโก่งตัว

ที่ตำแหน่งกลางเสาในรูปของตัวแปร e^*) ในการพัฒนาสมการดังกล่าวมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการพัฒนาสมการที่ 7.1 โดยที่เซตของเทอร์มิตอนนั้น จะแทนที่ e^* ด้วย e ($T = \{D, t, L_e, f'_c, f_y, e, [-20, 20]\}$) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ สมการทำนายกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเอียงศูนย์ (ไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวที่ตำแหน่งกลางเสา) ที่เหมาะสมที่สุดแสดงได้ดังสมการที่ 7.5 โดยสมการมีค่า R^2 ของชุดข้อมูลสำหรับ เทรนนิ่งและสำหรับทดสอบเท่ากับ 0.996 และ 0.942 ตามลำดับ

$$P_n^{1st} = P_1^{1st} + P_2^{1st} + P_3^{1st} + P_4^{1st} + P_5^{1st} \quad (7.5)$$

เมื่อ

$$P_1^{1st} = C_0D + C_1t + C_2L_e + C_3f'_c + C_4e + C_5 \quad (7.6)$$

$$P_2^{1st} = (C_6D + C_7)(C_8D + C_9t + C_{10}e)(C_{11}f'_c + C_{12}t) + (C_{13}D + C_{14})(C_{15}D + C_{16}t) \quad (7.7)$$

$$P_3^{1st} = (C_{17}t + C_{18}D + C_{19}f_y + C_{20}e + C_{21})(C_{22}D + C_{23}f_y + C_{24}e + C_{25})(C_{26}f'_c + C_{27}) \quad (7.8)$$

$$P_4^{1st} = (C_{28}D + C_{29})(C_{30}t + C_{31}f'_c + C_{32}) + (C_{33}t + C_{34}f_y)(C_{35}e + C_{36}D + C_{37})t \quad (7.9)$$

$$P_5^{1st} = (C_{38}L + C_{39}f_y + C_{40})(C_{41}t + C_{42}D + C_{43}e + C_{44}) \quad (7.10)$$

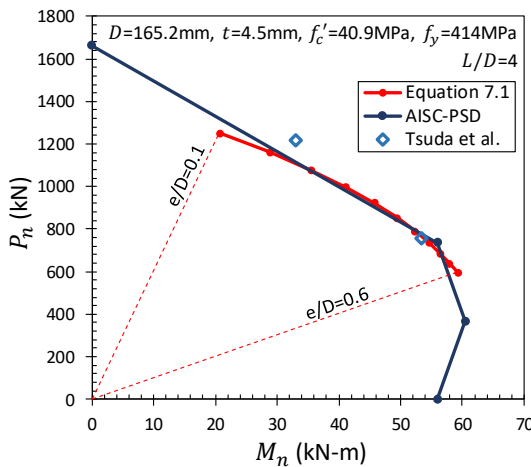
ดังตารางที่ 7.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{44}

ตารางที่ 7.4 ค่าสัมประสิทธิ์ c_0 ถึง c_{44} ในสมการที่ 7.5

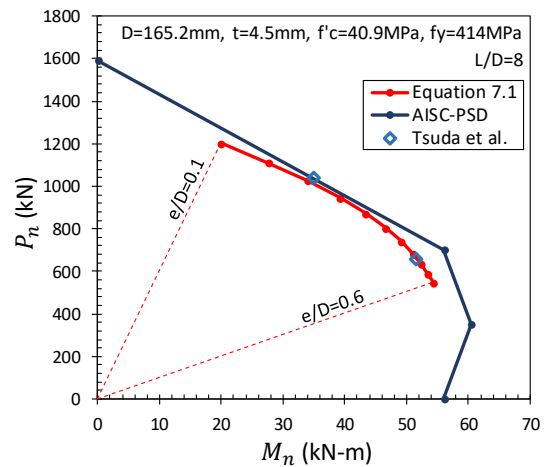
c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
-0.0004	-0.0010	-0.1077	-0.0003	0.0005	151.1724	0.9211	13.7457
c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}
-0.7982	-1.0739	0.9211	0.0002	0.0010	0.9211	-19.9990	-0.0004
c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{20}	c_{21}	c_{22}	c_{23}
0.0003	-0.7982	0.9211	-0.0219	-1.0739	59.9222	-0.0219	-1.0739
c_{24}	c_{25}	c_{26}	c_{27}	c_{28}	c_{29}	c_{30}	c_{31}
0.9211	-19.9990	0.0002	0.0170	0.0289	-0.9597	4.8507	0.3577
c_{32}	c_{33}	c_{34}	c_{35}	c_{36}	c_{37}	c_{38}	c_{39}
25.9891	-0.0359	0.0030	-1.0739	0.9211	-33.7448	-0.0003	-0.0019
c_{40}	c_{41}	c_{42}	c_{43}	c_{44}			
0.0168	1.8421	-3.2218	1.6045	-44.4858			

7.2 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16

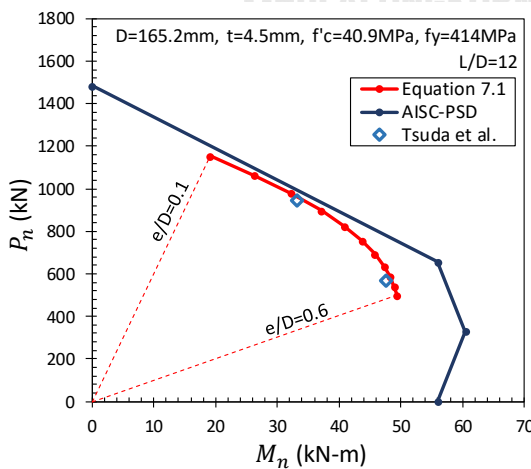
รูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ซึ่งสร้างจากสมการที่ 7.1 และวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามข้อกำหนด AISC 360-16 โดยพิจารณาจำนวนกำลังของตัวอย่างเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจากงานวิจัยของ Tsuda และคณะ [90] จากรูปที่ 7.4 พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 มีความสอดคล้องกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 เมื่อความขะลุดของเสามีค่าน้อย ($L/D=4$) อย่างไรก็ตาม เมื่อความขะลุดของเสาและค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ทำนายกำลังได้สูงกว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 (เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนดมีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดใหญ่กว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1)



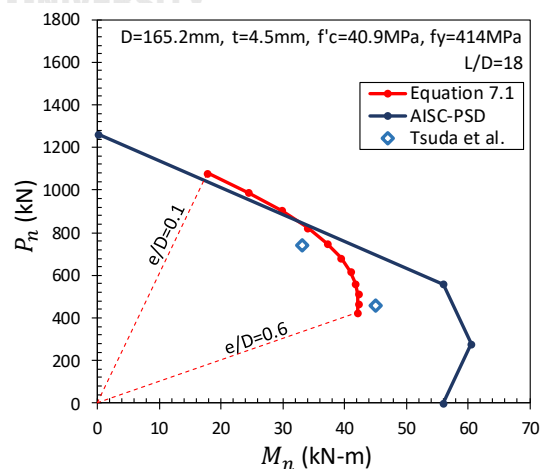
(ก) $L/D = 4$



(ข) $L/D = 8$



(ค) $L/D = 12$



(ง) $L/D = 18$

รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 7.1 และข้อกำหนด AISC 360-16

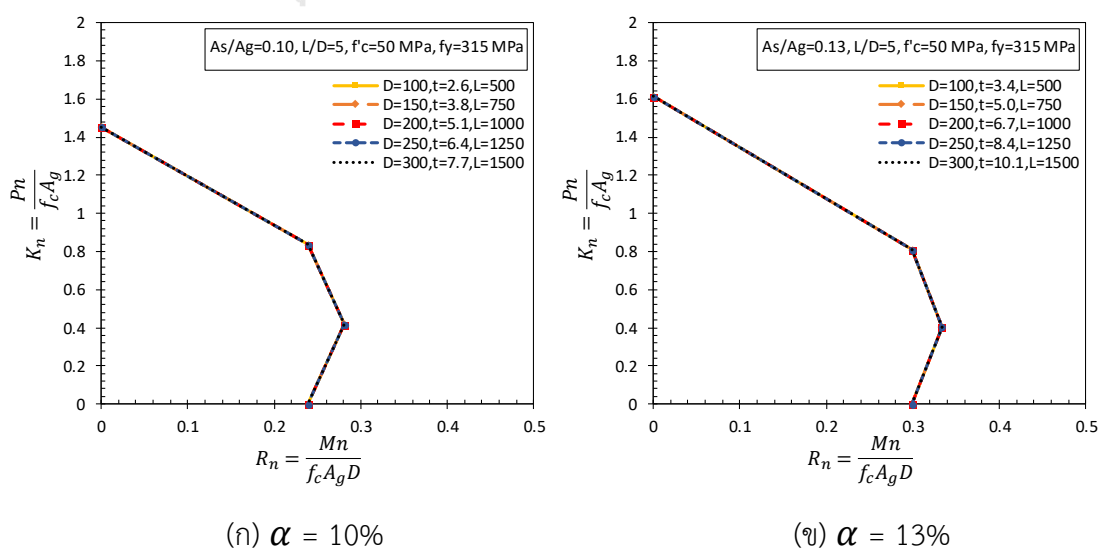
7.3 การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 และจากสมการที่ 7.1 สำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม โดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก กล่าวคือ แกน X และแกน Y ของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์คำนวณได้จากสมการที่ 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ

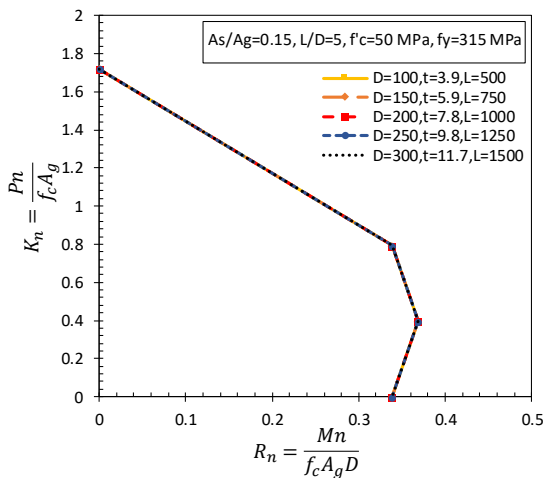
$$R_n = \frac{M_n}{f'_c A_g D} \quad (7.11)$$

$$K_n = \frac{P_n}{f'_c A_g} \quad (7.12)$$

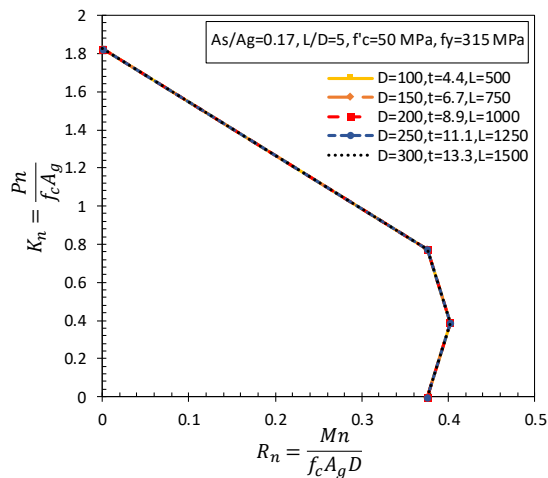
รูปที่ 7.5 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 เมื่อพิจารณาในรูปแบบไร้หน่วยพบว่า สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันแต่มีอัตราส่วนความชะลุดของเสา อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ กำลังอัดของคอนกรีต และหน่วยแรงครากของเหล็ก รูปพรรณที่เท่ากันจะได้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยเส้นเดียวกัน เมื่อทำการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเหล็กรูปพรรณที่แตกต่างกัน (รูปที่ 7.5 (ก) ถึง (ง)) จะได้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีต 50 เมกะปาสคาล หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก 315 เมกะปาสคาล (ชั้นคุณภาพ STK490) และอัตราส่วนความชะลุดของเสาเท่ากับ 5 ดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วย

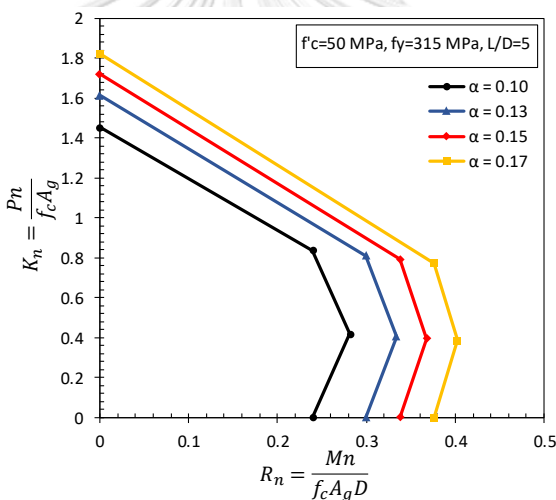


(ค) $\alpha = 15\%$



(ง) $\alpha = 17\%$

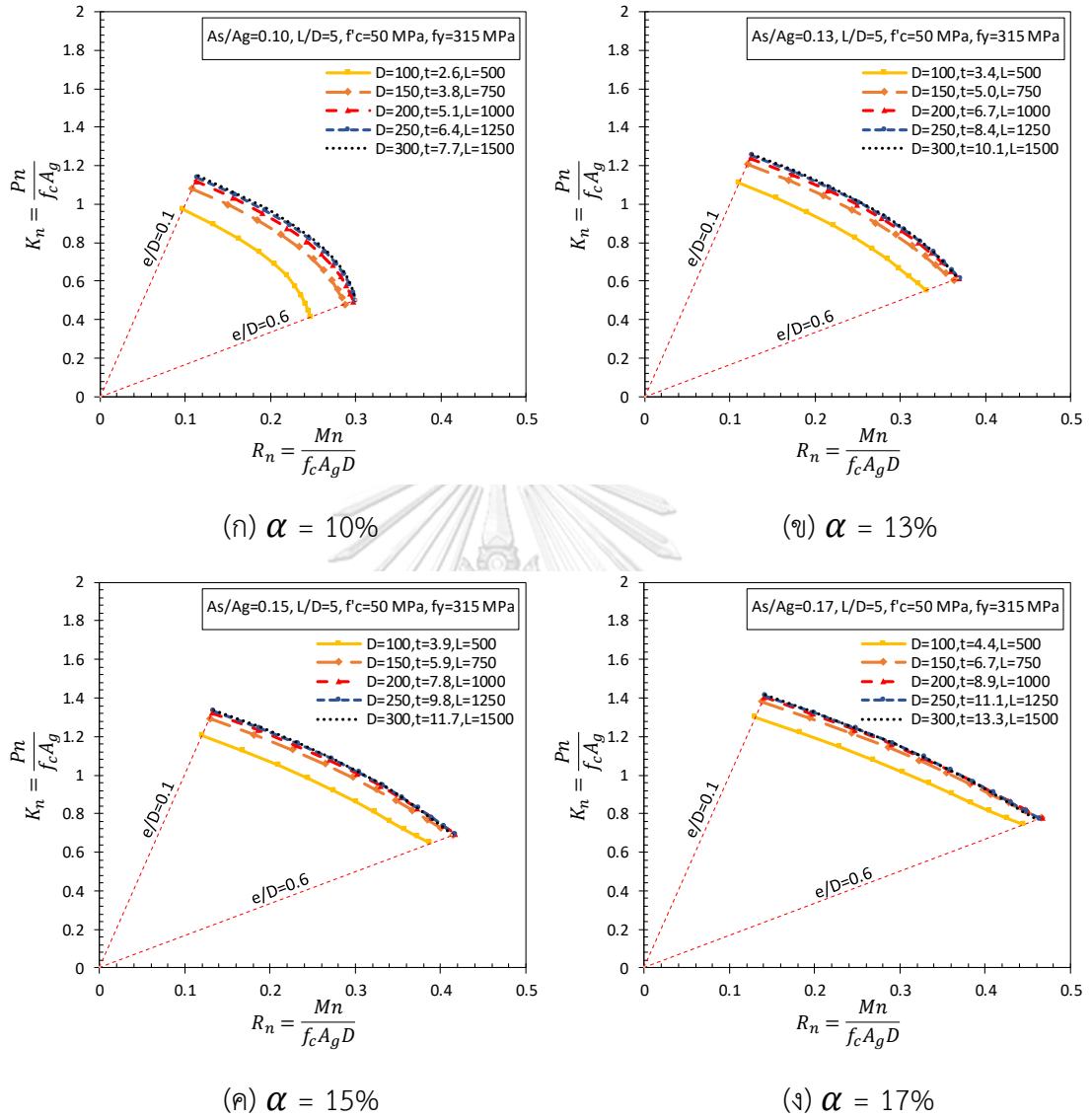
รูปที่ 7.5 (ต่อ) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วย



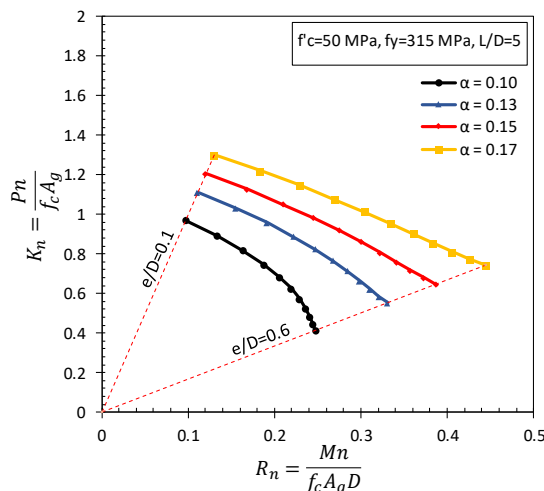
รูปที่ 7.6 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 สามารถทำได้เช่นเดียวกับการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ในรูปแบบไร้หน่วย อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 7.7 พบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 นั้น มีความแตกต่างกันเมื่อเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน ดังนั้น สำหรับการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเหล็กรูปพรรณที่แตกต่างกัน (รูปที่ 7.7 (ก) ถึง (ง)) จึงทำการเลือกรวมจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อความปลอดภัยในการใช้ออกแบบ เช่น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ดังรูปที่ 7.8 สร้างขึ้นจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นเส้น

โค้งปฏิสัมพันธ์ที่มีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตขนาดอื่น ๆ ดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 ในรูปแบบไร้หน่วย



รูปที่ 7.8 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม

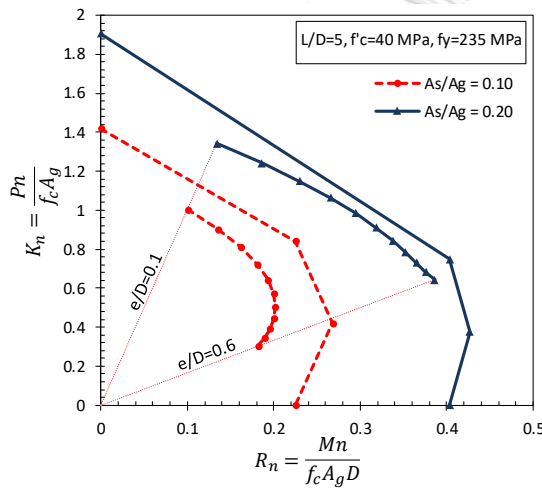
รูปที่ 7.9 และรูปที่ 7.10 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยซึ่งสร้างจากสมการที่ 7.1 และจากข้อกำหนด AISC 360-16 โดยพิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ, ความขรุขระของเสา, กำลังอัดของคอนกรีต และหน่วยแรงครากของท่อเหล็กที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7.5 โดยได้แบ่งเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่พิจารณาเป็น 2 กลุ่มตามความขรุขระของเสา ($L/D=5$ และ $L/D = 20$) โดยแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 0.10 และ 0.20, กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 และ 70 เมกะปาสคาล และหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเท่ากับ 235 และ 390 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 7.5 ตัวอย่างเสาสำหรับการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย

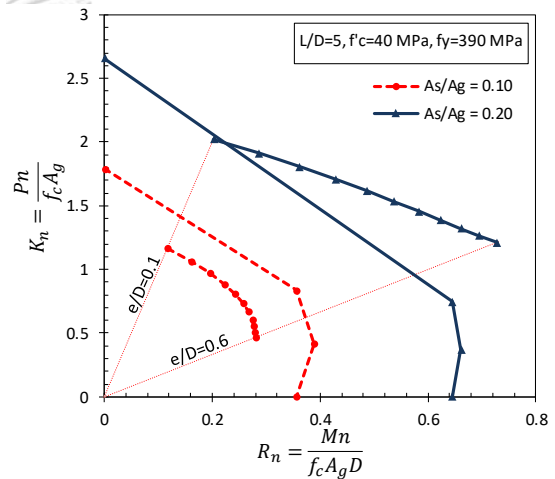
Group	No.	A_s/A_g	L/D	f'_c (MPa)	f_y (MPa)
1	1	0.10	5	40	235
	2	0.20	5	40	235
	3	0.10	5	40	390
	4	0.20	5	40	390
	5	0.10	5	70	235
	6	0.20	5	70	235
	7	0.10	5	70	390
	8	0.20	5	70	390

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ตัวอย่างเสาสำหรับการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย

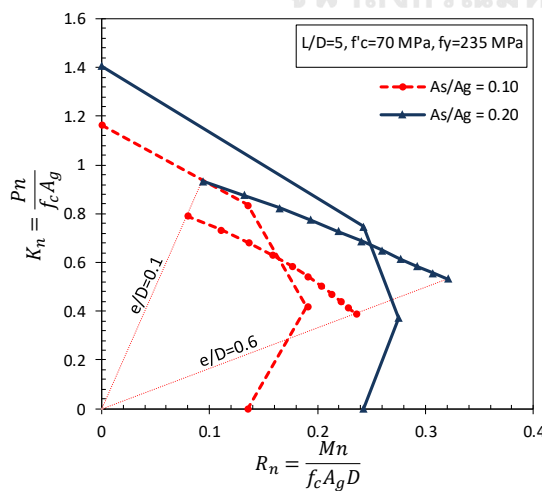
Group	No.	A_s/A_g	L/D	f'_c (MPa)	f_y (MPa)
2	1	0.10	20	40	235
	2	0.20	20	40	235
	3	0.10	20	40	390
	4	0.20	20	40	390
	5	0.10	20	70	235
	6	0.20	20	70	235
	7	0.10	20	70	390
	8	0.20	20	70	390



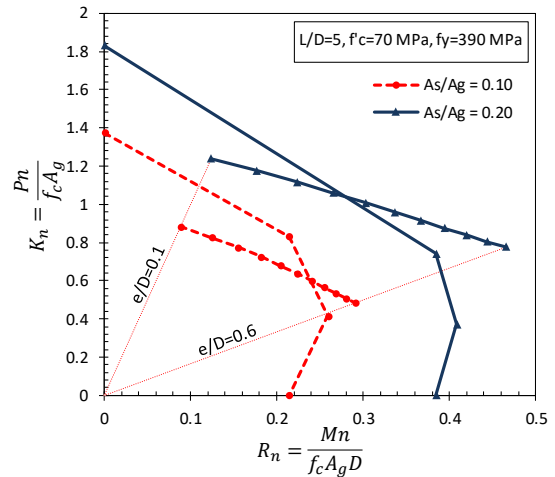
(ก) $f'_c = 40$ MPa และ $f_y = 235$ MPa



(ข) $f'_c = 40$ MPa และ $f_y = 390$ MPa



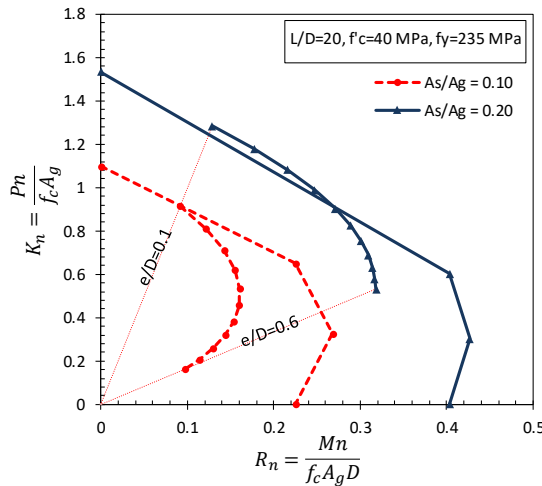
(ค) $f'_c = 70$ MPa และ $f_y = 235$ MPa



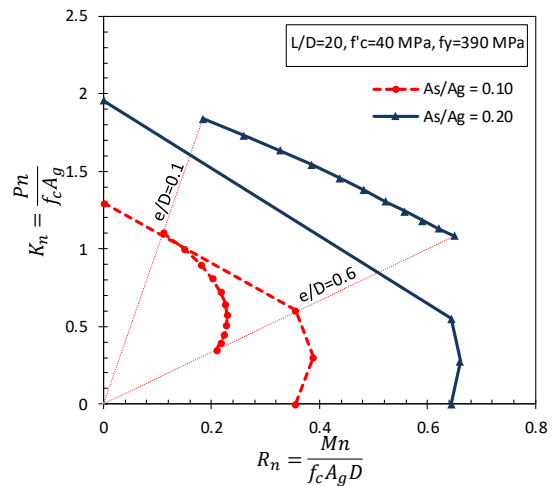
(ง) $f'_c = 70$ MPa และ $f_y = 390$ MPa

รูปที่ 7.9 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 1 ($L/D = 5$)

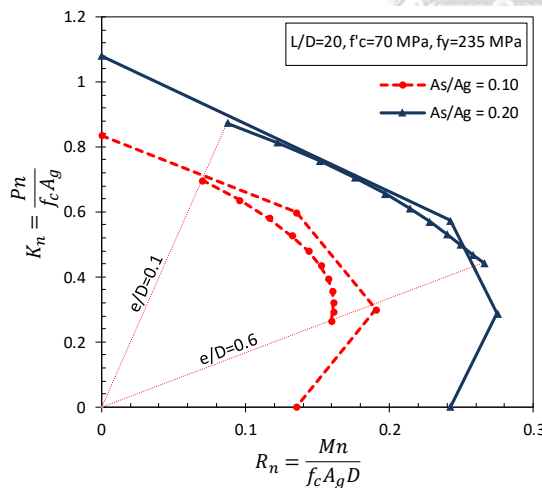
จากรูปที่ 7.9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 1 ($L/D = 5$) พบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 70 เมกะปาสคาล เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 มีแนวโน้มในการทำนัยกำลังได้ปลอดภัยมากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 สำหรับช่วงที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก



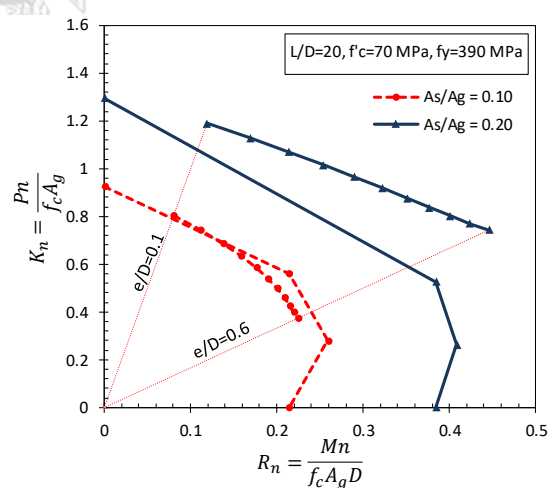
(ก) $f'_c = 40$ MPa และ $f_y = 235$ MPa



(ข) $f'_c = 40$ MPa และ $f_y = 390$ MPa



(ค) $f'_c = 70$ MPa และ $f_y = 235$ MPa



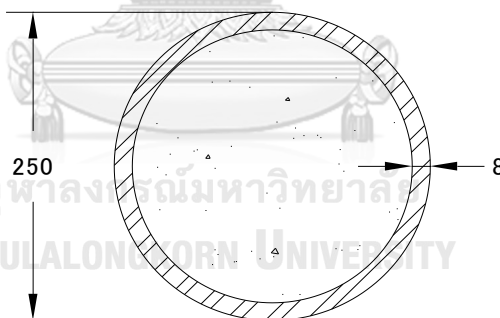
(ง) $f'_c = 70$ MPa และ $f_y = 390$ MPa

รูปที่ 7.10 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 2 ($L/D = 20$)

จากรูปที่ 7.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับกลุ่มที่ 2 ($L/D = 20$) พบว่า เมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าลดลงจาก 0.20 เป็น 0.10 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ปลอดภัยมากกว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 ในขณะที่เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 70 เมกะปาสคาล พบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 ทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 มากขึ้น นอกจากนี้สำหรับเสาที่มีหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเท่ากับ 390 เมกะปาสคาลพบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 สามารถทำนายกำลังได้ปลอดภัยมากกว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 เมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าเท่ากับ 0.20

7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

ตัวอย่างที่ 7.1 ให้ตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดและแรงดัดปรับค่า (จากการวิเคราะห์ลำดับ 2) $P_r = 1500$ กิโลนิวตัน และ $M_r = 100$ กิโลนิวตัน-เมตร โดยเสามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ท่อเหล็กหนา 8.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.11 และเสามีความสูง 3.00 เมตร (มีการยึดปลายแบบจุดหมุน) กำหนดกำลังอัดของคอนกรีต 50 เมกะปาสคาลและหน่วยแรงครากของท่อเหล็ก 315 เมกะปาสคาล



รูปที่ 7.11 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตัวอย่างที่ 7.1

ขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบคุณสมบัติของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด AISC 360-16

ก. คอนกรีตน้ำหนักปกติ $21 \leq f'_c \leq 69$ เมกะปาสคาล: $f'_c = 50$ เมกะปาสคาล

ข. เหล็กรูปพรรณ $f_y \leq 525$ เมกะปาสคาล: $f_y = 315$ เมกะปาสคาล

ค. อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ $A_s/A_g \geq 1\%$: $A_s/A_g = 12.4\%$

ง. ตรวจสอบประเภทของหน้าตัด

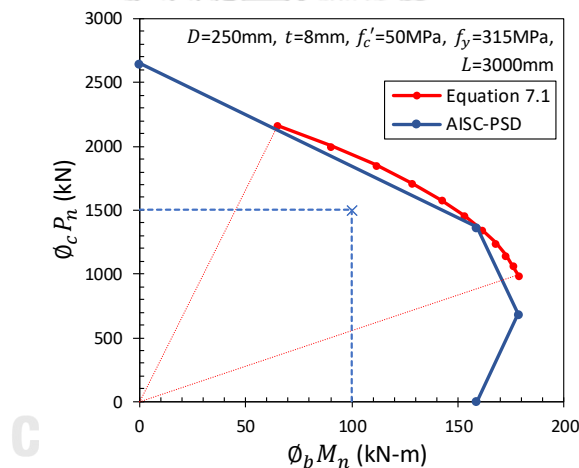
$$\text{สำหรับท่อเหล็กกลม } \lambda_p = 0.09E_s/f_y = 0.09 (2 \times 10^5)/315 = 57.1$$

$$\text{ความขรุขระของหน้าตัด } (\lambda) = D/t = 250/8.0 = 31.3 < \lambda_p = 57.1$$

ดังนั้น เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเป็นเสาประเภทหน้าตัดอัดแน่น

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตพิจารณาได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 นั้น เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สามารถสร้างได้ ด้วยวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1.4 (บทที่ 3) โดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 7.12 นอกจากนี้รูปที่ 7.12 ยังแสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่สร้างจากสมการที่ 7.1 โดยกำลังที่คำนวณได้จะคูณด้วยค่าตัวคูณความต้านทานตามวิธี LRFD ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75 และ 0.90 สำหรับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดตามลำดับ



รูปที่ 7.12 กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตัวอย่างที่ 7.1

จากรูปที่ 7.12 พบว่า $P_r = 1500$ กิโลนิวตัน และ $M_r = 100$ กิโลนิวตัน-เมตร มีค่าอยู่ภายในเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ดังนั้น เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตสามารถรับแรงอัดและแรงดัดที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย

ตัวอย่างที่ 7.2 ให้คำนวณหาความหนาของท่อเหล็กสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดและแรงดัดปรับค่า (จากการวิเคราะห์ลำดับ 2) $P_r = 2500$ กิโลนิวตัน และ $M_r = 250$ กิโลนิวตัน-เมตร โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ความสูงประสิทธิภาพของเสาเท่ากับ 3.00 เมตร กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 50 เมกะปาสกาล และหน่วยแรงครากของท่อเหล็กเท่ากับ 315 เมกะปาสกาล

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า K_n และ R_n จากแรงอัดและแรงดัดปรับค่าที่เกิดขึ้น

แรงอัดและแรงดัดสำหรับออกแบบ

$$P_n = P_r / \phi_c = 2500 / 0.75 = 3333.3 \text{ กิโลนิวตัน}$$

$$M_n = M_r / \phi_b = 250 / 0.90 = 277.8 \text{ กิโลนิวตัน-เมตร}$$

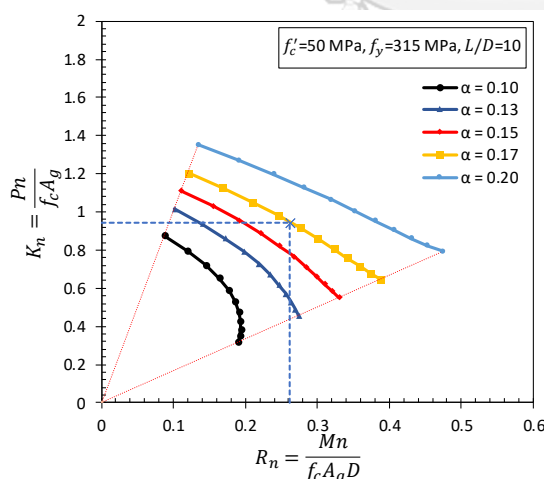
จากสมการที่ 7.11 และ 7.12

$$K_n = P_n / A_g f'_c = (3333.3 \times 1000) / ((\pi \times 150^2) 50) = 0.94$$

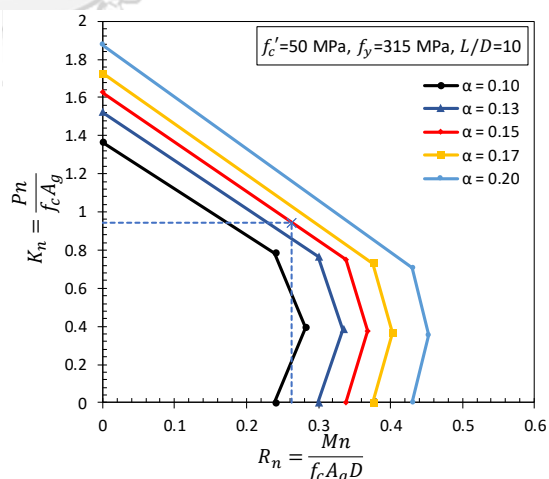
$$R_n = M_n / A_g f'_c D = (277.8 \times 1000 \times 1000) / ((\pi \times 150^2) 50 \times 300) = 0.26$$

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วย

พิจารณาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับ $f'_c = 50$ เมกะปาสกาล $f_y = 315$ เมกะปาสกาล และ $L/D = 10$ ดังแสดงในรูปที่ 7.13



(ก) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1



(ข) เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จาก AISC 360-16

รูปที่ 7.13 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับตัวอย่างที่ 7.2

จากรูปที่ 7.13 ที่ตำแหน่ง $(R_n, K_n) = (0.26, 0.94)$ จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วย จากสมการที่ 7.1 จะได้ค่าอัตราส่วนเหล็กgrupพรรณเท่ากับ 0.17 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนเหล็กgrupพรรณ ที่ได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 มีค่าเท่ากับ 0.15

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณความหนาของท่อเหล็ก

ก. ความหนาของท่อเหล็กที่พิจารณาจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1

สำหรับ $\alpha = A_s/A_g = 0.17$ จะได้ $A_s = 0.17A_g = 0.17(\pi \times 150^2) = 12016.6$ ตารางมิลลิเมตร

จาก $A_s = 12016.6$ ตารางมิลลิเมตร คำนวณความหนาของท่อเหล็กได้เท่ากับ 13.3 มิลลิเมตร

ข. ความหนาของท่อเหล็กที่พิจารณาจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจาก AISC 360-16

สำหรับ $\alpha = A_s/A_g = 0.15$ จะได้ $A_s = 0.15A_g = 0.15(\pi \times 150^2) = 10602.9$ ตารางมิลลิเมตร

จาก $A_s = 10602.9$ ตารางมิลลิเมตร คำนวณความหนาของท่อเหล็กได้เท่ากับ 11.7 มิลลิเมตร

จากขั้นตอน ก. และ ข. พบว่า ความหนาของท่อเหล็กที่ออกแบบโดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 มีค่ามากกว่าความหนาของท่อเหล็กที่ออกแบบโดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 เนื่องจากเมื่อพิจารณาความหนาของท่อเหล็กที่ออกแบบได้จากสมการที่ 7.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมีค่าตัวประกอบการโอบรัดเท่ากับ 1.29 ซึ่งจากหัวข้อที่ 5.2.1 (บทที่ 5) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้สูงกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีค่าตัวประกอบการโอบรัดในช่วงดังกล่าว ($\xi = 1.20-1.30$) นอกจากนี้ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 สร้างขึ้นจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่มีขนาดเล็กที่สุดจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับค่าอัตราส่วนเหล็กgrupพรรณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.7 ดังนั้น ในตัวอย่างที่ 7.2 นี้ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากสมการที่ 7.1 จึงมีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้น้อยกว่ากำลังที่พิจารณาจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 ทำให้ความหนาของท่อเหล็กที่ออกแบบโดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากสมการที่ 7.1 มีค่ามากกว่าความหนาของท่อเหล็กที่ออกแบบโดยเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย

8.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาฐานข้อมูลการทดสอบเสาวัสดุผสมจากงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้สำหรับการประเมินสมการทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 โดยได้ใช้ฐานข้อมูลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดในรูปแบบไร้หน่วยจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์และจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามข้อกำหนด AISC 360-16 สำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม โดยจากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. สมการทำนายกำลังตามข้อกำหนด AISC 360-16 มีแนวโน้มทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ โดยเฉพาะสำหรับเสาสั้น ($\lambda_{AISC} \leq 0.9$) ประเภทเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมที่มีกำลังของวัสดุภายใต้ขอบเขตและมากกว่าขอบเขตที่ข้อกำหนดได้กำหนดไว้ ($f'_c > 70$ เมกะปาสคาล, $f_y > 525$ เมกะปาสคาล) นอกจากนี้ สมการทำนายกำลังสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมสามารถทำนายกำลังของเสาที่มีค่าอัตราส่วนความขะลุดของหน้าตัดมากกว่าค่าขอบเขตความขะลุดสูงสุด ($D/t > 0.31(E_s/f_y)$) ได้อย่างปลอดภัยเมื่อเทียบกับข้อมูลผลการทดสอบ
2. สมการทำนายกำลังตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ที่มีค่าความขะลุดสัมพันธ์ของเสามากกว่า 0.3 อย่างไรก็ตาม กำลังของเสาวัสดุผสมที่ทำนายโดยสมการตามมาตรฐาน Eurocode 4 มีค่ามากกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่างสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณมากกว่าขอบเขตที่มาตรฐานกำหนดไว้ ($f_y > 460$ เมกะปาสคาล) และสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีความขะลุดของหน้าตัดสูงกว่าขอบเขตความขะลุดของมาตรฐาน ($b/t > 52 \sqrt{235/f_y}$)

3. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ซึ่งสร้างจากวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกตามข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode 4 มีแนวโน้มทำนายกำลังได้ต่ำกว่าผลการทดสอบสำหรับเสาวัสดุผสมที่มีกำลังของวัสดุภายใต้ขอบเขตที่ข้อกำหนดและมาตรฐานได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคุณความต้านทาน (สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16) หรือ ค่าตัวคุณความปลอดภัย (สำหรับ Eurocode 4) สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม มีแนวโน้มทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้สูงกว่าผลการทดสอบบางตัวอย่าง (เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์มีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่าข้อมูลผลการทดสอบ) สำหรับกลุ่มที่คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าขอบเขตของข้อกำหนดและมาตรฐาน และสำหรับเสาที่มีค่าอัตราส่วนความละเอียดของเสามากกว่า 12.0
4. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุดตามข้อกำหนด AISC 360-16 สามารถทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย กล่าวคือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่พิจารณาค่าตัวคุณความต้านทานมีขอบเขตกำลังรับแรงอัดและแรงดัดต่ำกว่าข้อมูลผลการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดชะลุด
5. สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีกำลังของวัสดุสูงพิเศษ ($f'_c \geq 113$, $f_y \geq 762$) พบว่า สมการทำนายกำลังที่พิจารณาค่าตัวคุณความต้านทานหรือค่าตัวคุณความปลอดภัย ทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมได้สูงกว่าข้อมูลผลการทดสอบดังกล่าว
6. ผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อเหล็ก อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ และกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ สำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 30 เมกะปาสคาล พบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% 7% และ 9% มีค่าเพิ่มขึ้น 6.5% 13.1% และ 18.7% ตามลำดับ เมื่อท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร ในขณะที่ เสาที่มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 70 เมกะปาสคาล พบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ 5% 7% และ 9% มีค่าลดลง 10.6% 5% และ 0.3% ตามลำดับ เมื่อท่อเหล็กมีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 500 มิลลิเมตร
7. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยซึ่งสร้างจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์และจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC 360-16 สามารถใช้สำหรับช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมได้ โดยสำหรับเสาเส้น

($L/D = 4.0$) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากข้อกำหนด AISC 360-16 มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ปลอดภัยมากขึ้น (เทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์) เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 70 เมกะปาสคาล และสำหรับเสายาว ($L/D = 20$) พบว่า เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์รูปแบบไร้หน่วยจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ มีแนวโน้มในการทำนายกำลังได้ปลอดภัยมากกว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากข้อกำหนด AISC 360-16 เมื่ออัตราส่วนเหล็กรูปพรรณมีค่าลดลงจาก 0.20 เป็น 0.10

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง

1. จากฐานข้อมูลผลการทดสอบพบว่า งานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดไม่แน่นอนและหน้าตัดชะลุด ภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลางอย่างจำกัด โดยเฉพาะสำหรับเสาที่มีค่าความชะลุดสัมพันธ์ (ตามข้อกำหนด AISC 360-16) มากกว่า 1.0 ดังนั้น ควรมีการศึกษาวิจัยสำหรับเสาประเภทดังกล่าวเพิ่มเติม
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดเสาต่อหน่วยแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตโดยใช้สมการซึ่งพัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์บนพื้นฐานของฐานข้อมูลผลการทดสอบ ดังนั้น ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของขนาดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
3. ควรมีการวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่น (reliability analysis) เพื่อพัฒนาค่าตัวคูณความต้านทานเพื่อใช้สำหรับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบไร้หน่วยซึ่งสร้างจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

บรรณานุกรม

- [1] ANSI/AISC360-16, *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 2016.
- [2] CEN, *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels (Belgium), 2004.
- [3] B. S. Taranath, *Wind and earthquake resistant buildings: Structural Analysis and Design*. CRC press, 2004.
- [4] T. Corporation, "HIRAKATA T-SITE Protruding Box Structures Form Expressive Façade and Improve Seismic Resistance," in *Steel Construction Today & Tomorrow: The Japan Iron and Steel Federation and the Japanese Society of Steel Construction*, no. 33, pp. 15-18, 2018.
- [5] Z. P. Bažant and Y. Xiang, "Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, no. 2, pp. 162-172, 1997.
- [6] Y. Wang, P. Chen, C. Liu, and Y. Zhang, "Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 120, pp. 397-407, 2017.
- [7] ACI SP-17(14), *The Reinforced Concrete Design Handbook*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015.
- [8] S. A. Mirza, V. Hyttinen, and E. Hyttinen, "Physical tests and analyses of composite steel-concrete beam-columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, no. 11, pp. 1317-1326, 1996.
- [9] C.-S. Kim, H.-G. Park, K.-S. Chung, and I.-R. Choi, "Eccentric axial load testing for concrete-encased steel columns using 800 MPa steel and 100 MPa concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 8, pp. 1019-1031, 2011.
- [10] S. Mirza and B. Skrabek, "Reliability of short composite beam-column strength interaction," *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, no. 8, pp. 2320-2339, 1991.
- [11] S. A. Mirza and B. Skrabek, "Statistical analysis of slender composite beam-column

- strength," *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 5, pp. 1312-1332, 1992.
- [12] E. Ellobody and B. Young, "Numerical simulation of concrete encased steel composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 2, pp. 211-222, 2011.
- [13] E. Ellobody, B. Young, and D. Lam, "Eccentrically loaded concrete encased steel composite columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 1, pp. 53-65, 2011.
- [14] S. El-Tawil, C. Sanz-Picon, and G. Deierlein, "Evaluation of ACI 318 and AISC (LRFD) strength provisions for composite beam-columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 34, no. 1, pp. 103-123, 1995.
- [15] S. El-Tawil and G. G. Deierlein, "Strength and ductility of concrete encased composite columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, no. 9, pp. 1009-1019, 1999.
- [16] C. Weng and S. Yen, "Comparisons of concrete-encased composite column strength provisions of ACI code and AISC specification," *Engineering Structures*, vol. 24, no. 1, pp. 59-72, 2002.
- [17] S. Mirza and E. Lacroix, "Comparative strength analyses of concrete-encased steel composite columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 12, pp. 1941-1953, 2004.
- [18] K. Soliman, A. Arafa, and T. M. Elrakib, "Review of design codes of concrete encased steel short columns under axial compression," *HBRC journal*, vol. 9, no. 2, pp. 134-143, 2013.
- [19] C.-C. Chen, "Accuracy of AISC methods in predicting flexural strength of concrete-encased members," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 3, pp. 338-349, 2012.
- [20] Z. Lai and A. H. Varma, "Noncompact and slender circular CFT members: experimental database, analysis, and design," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 106, pp. 220-233, 2015.
- [21] Z. Lai, A. H. Varma, and K. Zhang, "Noncompact and slender rectangular CFT members: experimental database, analysis, and design," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 101, pp. 455-468, 2014.
- [22] L.-H. Han, "Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections," *Journal of*

- Constructional Steel Research*, vol. 58, no. 3, pp. 353-372, 2002.
- [23] D. Liu, W.-M. Gho, and J. Yuan, "Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, no. 12, pp. 1499-1515, 2003.
- [24] Z. Lai and A. H. Varma, "High-Strength Rectangular CFT Members: Database, Modeling, and Design of Short Columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 5, p. 04018036, 2018.
- [25] D. Hernández-Figueirido, M. L. Romero, J. Bonet, and J. Montalvá, "Influence of slenderness on high-strength rectangular concrete-filled tubular columns with axial load and nonconstant bending moment," *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 12, pp. 1436-1445, 2012.
- [26] A. H. Varma, J. M. Ricles, R. Sause, and L.-W. Lu, "Experimental behavior of high strength square concrete-filled steel tube beam-columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 3, pp. 309-318, 2002.
- [27] G. Li, B. Chen, Z. Yang, and Y. Feng, "Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 127, pp. 483-499, 2018.
- [28] W. Zhang and B. M. Shahrooz, "Comparison between ACI and AISC for concrete-filled tubular columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, no. 11, pp. 1213-1223, 1999.
- [29] T. Fujimoto, A. Mukai, I. Nishiyama, and K. Sakino, "Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 2, pp. 203-212, 2004.
- [30] Z.-w. Yu, F.-x. Ding, and C. Cai, "Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, no. 2, pp. 165-174, 2007.
- [31] L. Zhu *et al.*, "Large diameter concrete-filled high strength steel tubular stub columns under compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 108, pp. 12-19, 2016.
- [32] E. Ellobody, B. Young, and D. Lam, "Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 7, pp. 706-715, 2006.

- [33] G. Giakoumelis and D. Lam, "Axial capacity of circular concrete-filled tube columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 7, pp. 1049-1068, 2004.
- [34] T. Ekmekyapar and B. J. M. Al-Eliwi, "Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications," *Thin-Walled Structures*, vol. 105, pp. 220-230, 2016.
- [35] Z.-H. Lu and Y.-G. Zhao, "Suggested empirical models for the axial capacity of circular CFT stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 6, pp. 850-862, 2010.
- [36] J. Zeghiche and K. Chaoui, "An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, no. 1, pp. 53-66, 2005.
- [37] S.-H. Lee, B. Uy, S.-H. Kim, Y.-H. Choi, and S.-M. Choi, "Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 1, pp. 1-13, 2011.
- [38] J. Moon, D. E. Lehman, C. W. Roeder, and H.-E. Lee, "Strength of circular concrete-filled tubes with and without internal reinforcement under combined loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 12, p. 04013012, 2012.
- [39] J. M. Portolés, M. L. Romero, J. L. Bonet, and F. C. Filippou, "Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 4, pp. 623-633, 2011.
- [40] M. D. O'Shea and R. Q. Bridge, "Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes," *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, no. 11, pp. 1295-1303, 2000.
- [41] C. W. Roeder, D. E. Lehman, and E. Bishop, "Strength and stiffness of circular concrete-filled tubes," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 12, pp. 1545-1553, 2010.
- [42] E. Inai, A. Mukai, M. Kai, H. Tokinoya, T. Fukumoto, and K. Mori, "Behavior of concrete-filled steel tube beam columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 2, pp. 189-202, 2004.
- [43] K. Sakino, H. Nakahara, S. Morino, and I. Nishiyama, "Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns," *Journal of Structural Engineering*, vol.

- 130, no. 2, pp. 180-188, 2004.
- [44] S. P. Schneider, "Axially loaded concrete-filled steel tubes," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 10, pp. 1125-1138, 1998.
- [45] M.-X. Xiong, D.-X. Xiong, and J. R. Liew, "Axial performance of short concrete filled steel tubes with high-and ultra-high-strength materials," *Engineering Structures*, vol. 136, pp. 494-510, 2017.
- [46] M.-X. Xiong, D.-X. Xiong, and J. R. Liew, "Behaviour of steel tubular members infilled with ultra high strength concrete," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 138, pp. 168-183, 2017.
- [47] F. Aslani, B. Uy, Z. Tao, and F. Mashiri, "Predicting the axial load capacity of high-strength concrete filled steel tubular columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 967-993, 2015.
- [48] T. Kitada, "Ultimate strength and ductility of state-of-the-art concrete-filled steel bridge piers in Japan," *Engineering Structures*, vol. 20, no. 4-6, pp. 347-354, 1998.
- [49] T. Perea, "Analytical and experimental study on slender concrete-filled steel tube columns and beam-columns," Georgia Institute of Technology, 2010.
- [50] T. Perea, R. T. Leon, J. F. Hajjar, and M. D. Denavit, "Full-scale tests of slender concrete-filled tubes: axial behavior," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 7, pp. 1249-1262, 2012.
- [51] T. Perea, R. T. Leon, J. F. Hajjar, and M. D. Denavit, "Full-scale tests of slender concrete-filled tubes: Interaction behavior," *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, no. 9, p. 04014054, 2014.
- [52] A. Kuranovas, D. Goode, A. K. Kvedaras, and S. Zhong, "Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 15, no. 1, pp. 21-33, 2009.
- [53] Z. Lai, A. H. Varma, and L. G. Griffis, "Analysis and design of noncompact and slender CFT beam-columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, no. 1, p. 04015097, 2015.
- [54] C.-S. Kim, H.-G. Park, K.-S. Chung, and I.-R. Choi, "Eccentric axial load capacity of high-strength steel-concrete composite columns of various sectional shapes,"

Journal of Structural Engineering, vol. 140, no. 4, p. 04013091, 2013.

- [55] N. E. Shanmugam and B. Lakshmi, "State of the art report on steel-concrete composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, no. 10, pp. 1041-1080, 2001.
- [56] D. K. Kim, "A database for composite columns," Georgia Institute of Technology, 2005.
- [57] R. T. Leon and J. F. Hajjar, "Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns. Part II: Application of Design Provisions for 2005 AISC Specification," *Engineering Journal*, vol. 45, no. 1, p. 21, 2008.
- [58] M. F. Aho, "A database for encased and concrete-filled columns," Georgia Institute of Technology, 1996.
- [59] R. T. Leon and M. Aho, "Towards new design provisions for composite columns," in *Composite Construction in Steel and Concrete IV*, 2002, pp. 518-527.
- [60] B. Kato, "Column curves of steel-concrete composite members," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 39, no. 2, pp. 121-135, 1996.
- [61] H. Saw and J. R. Liew, "Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 53, no. 2, pp. 121-147, 2000.
- [62] Y. Wang, "Tests on slender composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 49, no. 1, pp. 25-41, 1999.
- [63] T. Yamamoto, J. Kawaguchi, and S. Morino, "Experimental study of scale effects on the compressive behavior of short concrete-filled steel tube columns," in *Composite Construction in Steel and Concrete IV*, 2002, pp. 879-890.
- [64] S. Jafari and S. S. Mahini, "Lightweight concrete design using gene expression programming," *Construction and Building Materials*, vol. 139, pp. 93-100, 2017.
- [65] A. H. Gandomi, A. H. Alavi, M. Gandomi, and S. Kazemi, "Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part II: With shear reinforcement," *Measurement*, vol. 95, pp. 367-376, 2017.
- [66] A. H. Gandomi, A. H. Alavi, S. Kazemi, and M. Gandomi, "Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part I: Without shear reinforcement," *Automation in Construction*, vol. 42, pp. 112-121, 2014.

- [67] M. D'Aniello, E. M. Güneyisi, R. Landolfo, and K. Mermerdaş, "Analytical prediction of available rotation capacity of cold-formed rectangular and square hollow section beams," *Thin-Walled Structures*, vol. 77, pp. 141-152, 2014.
- [68] A. Cevik, M. T. Göğüş, İ. H. Güzelbey, and H. Filiz, "Soft computing based formulation for strength enhancement of CFRP confined concrete cylinders," *Advances in Engineering Software*, vol. 41, no. 4, pp. 527-536, 2010.
- [69] I. Mansouri, R. Chacón, and J. W. Hu, "Improved predictive model to the cross-sectional resistance of CFT," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 3887-3895, 2017.
- [70] E. M. Güneyisi, A. Gültekin, and K. Mermerdaş, "Ultimate capacity prediction of axially loaded CFST short columns," *International Journal of Steel Structures*, vol. 16, no. 1, pp. 99-114, 2016.
- [71] D. Dujmovic, B. Androic, and I. Lukacevic, *Composite Structures According to Eurocode 4: Worked Examples*. John Wiley & Sons, 2015.
- [72] CEN, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels (Belgium), 2005.
- [73] J. R. Koza, "Genetic programming as a means for programming computers by natural selection," *Statistics and Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 87-112, 1994.
- [74] S. Sette and L. Boullart, "Genetic programming: principles and applications," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 14, no. 6, pp. 727-736, 2001.
- [75] R. K. Bhattacharjya, "Introduction to genetic algorithms," *IIT Guwahati*, vol. 12, 2012.
- [76] J. H. Holland and D. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
- [77] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.
- [78] B. Do, "Optimum patch design for repairing cracked steel plates using genetic algorithm," Chulalongkorn University, 2017.
- [79] B. Do and A. Lenwari, "Empirical Stress Intensity Factor Equations for Cracked Steel Plates Repaired with Double-Sided FRP Patches," in *IOP Conference Series:*

- Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 371, no. 1: IOP Publishing, p. 012056.
- [80] S. Wagner, G. Kronberger, A. Beham, M. Kommenda, A. Scheibenpflug, E. Pitzer, S. Vonolfen, M. Kofler, S. Winkler and V. Dorfer, "Architecture and design of the heuristiclab optimization environment," in *Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence*: Springer, 2014, pp. 197-261.
- [81] M. Irrigaray, R. d. A. Pinto, and I. Padaratz, "A new approach to estimate compressive strength of concrete by the UPV method," *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 9, no. 3, pp. 395-402, 2016.
- [82] P. Bajpai and M. Kumar, "Genetic algorithm—an approach to solve global optimization problems," *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 199-206, 2010.
- [83] J. McCall, "Genetic algorithms for modelling and optimisation," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 184, no. 1, pp. 205-222, 2005.
- [84] G. Purohit, A. M. Sherry, and M. Saraswat, "Optimization of function by using a new MATLAB based genetic algorithm procedure," *International Journal of Computer Applications*, vol. 61, no. 15, 2013.
- [85] CEN, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. Brussels (Belgium), 2004.
- [86] M. Rashid, M. Mansur, and P. Paramasivam, "Correlations between mechanical properties of high-strength concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 230-238, 2002.
- [87] J. G. MacGregor, J. K. Wight, S. Teng, and P. Irawan, *Reinforced concrete: Mechanics and design*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1997.
- [88] K. Sakino and H. Hayashi, "Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns under Concentric Loading," *Proceedings of 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, pp. 25–30, 1991.
- [89] H. G. Prion and J. Boehme, "Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 207-218, 1994.
- [90] K. Tsuda, C. Matsui, and E. Mino, "Strength and behavior of slender concrete filled

- steel tubular columns," in *Proceeding 5th International Colloquium on Structural Stability*, 1996, vol. 489.
- [91] T. Ke-Feng, P. Xin-Cheng, and C. Shao-Huai, "Study on the mechanical properties of steel extra-high strength concrete encased in steel tubes," *Journal of Building Structures*, vol. 20, no. 1, pp. 10-15, 1999.
- [92] L.-H. Han, "Tests on concrete filled steel tubular columns with high slenderness ratio," *Advances in Structural Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 337-344, 2000.
- [93] S. Ghannam, Y. A. Jawad, and Y. Hunaiti, "Failure of lightweight aggregate concrete-filled steel tubular columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 4, no. 1, pp. 1-8, 2004.
- [94] L.-H. Han and G.-H. Yao, "Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC)," *Thin-Walled Structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1357-1377, 2004.
- [95] P. Gupta, S. Sarada, and M. Kumar, "Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, no. 2, pp. 182-193, 2007.
- [96] Q. Yu, Z. Tao, and Y.-X. Wu, "Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, no. 4, pp. 362-370, 2008.
- [97] W. L. A. de Oliveira, S. De Nardin, A. L. H. de Cresce El, and M. K. El Debs, "Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, no. 12, pp. 2103-2110, 2009.
- [98] M. Dundu, "Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 56, pp. 62-70, 2012.
- [99] J. R. Liew and D. Xiong, "Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction," *Advances in Structural Engineering*, vol. 15, no. 9, pp. 1487-1503, 2012.
- [100] J. Portoles, E. Serra, and M. Romero, "Influence of ultra-high strength infill in slender concrete-filled steel tubular columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 86, pp. 107-114, 2013.

- [101] W. Wang, H. Ma, Z. Li, and Z. Tang, "Size effect in circular concrete-filled steel tubes with different diameter-to-thickness ratios under axial compression," *Engineering Structures*, vol. 151, pp. 554-567, 2017.
- [102] S. Zhou, Q. Sun, and X. Wu, "Impact of D/t ratio on circular concrete-filled high-strength steel tubular stub columns under axial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 132, pp. 461-474, 2018.
- [103] M. Abramski, "Load-carrying capacity of axially loaded concrete-filled steel tubular columns made of thin tubes," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 902-913, 2018.
- [104] G. Muciaccia, F. Giussani, G. Rosati, and F. Mola, "Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 5, pp. 904-916, 2011.
- [105] C. Lin, "Axial capacity of concrete infilled cold-formed steel columns," *Ninth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, U.S.A.*, pp. 443-457, 1988.
- [106] A. H. Varma, J. Ricles, and R. Sause, "Seismic behavior, analysis, and design of high strength square concrete filled steel tube (CFT) columns," Lehigh University, 2000.
- [107] M. Dundu, "Column buckling tests of hot-rolled concrete filled square hollow sections of mild to high strength steel," *Engineering Structures*, vol. 127, pp. 73-85, 2016.
- [108] A. Zhu, X. Zhang, H. Zhu, J. Zhu, and Y. Lu, "Experimental study of concrete filled cold-formed steel tubular stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 134, pp. 17-27, 2017.
- [109] Z. Vrcelj and B. Uy, "Behaviour and design of steel square hollow sections filled with high strength concrete," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 153-170, 2002.
- [110] L.-H. Han and G.-H. Yao, "Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, no. 12, pp. 1455-1475, 2003.
- [111] L.-H. Han and G.-H. Yao, "Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol.

- 59, no. 6, pp. 751-767, 2003.
- [112] M. Mursi and B. Uy, "Strength of slender concrete filled high strength steel box columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 12, pp. 1825-1848, 2004.
- [113] Z. Tao, L.-H. Han, and D.-Y. Wang, "Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 45, no. 5, pp. 517-527, 2007.
- [114] S. Zhang and L. Guo, "Behaviour of high strength concrete-filled slender RHS steel tubes," *Advances in Structural Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 337-351, 2007.
- [115] C.-C. Chen, J.-W. Ko, G.-L. Huang, and Y.-M. Chang, "Local buckling and concrete confinement of concrete-filled box columns under axial load," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 78, pp. 8-21, 2012.
- [116] F.-x. Ding, C. Fang, Y. Bai, and Y.-z. Gong, "Mechanical performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 98, pp. 146-157, 2014.
- [117] F. Aslani, B. Uy, Z. Tao, and F. Mashiri, "Behaviour and design of composite columns incorporating compact high-strength steel plates," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 107, pp. 94-110, 2015.
- [118] M. Khan, B. Uy, Z. Tao, and F. Mashiri, "Concentrically loaded slender square hollow and composite columns incorporating high strength properties," *Engineering Structures*, vol. 131, pp. 69-89, 2017.
- [119] M. Khan, B. Uy, Z. Tao, and F. Mashiri, "Behaviour and design of short high-strength steel welded box and concrete-filled tube (CFT) sections," *Engineering Structures*, vol. 147, pp. 458-472, 2017.
- [120] Y. Du, Z. Chen, Y.-B. Wang, and J. R. Liew, "Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 133, pp. 418-433, 2017.
- [121] R. Anslin and J. Janss, *Le calcul des charges ultimes des colonnes métalliques enrobées de béton*. Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Industrie des, 1974.
- [122] C. Matsui, "Study on elasto-plastic behaviour of concrete-encased columns

- subjected to eccentric axial thrust," *Annual Assembly of Architectural Institute of Japan*, pp. 1627-8, 1979.
- [123] C. Chen, A. Astaneh-Asl, and J. Moehle, "Behavior and design of high strength composite columns," in *Structures Congress' 92*, 1992, pp. 820-823.
- [124] D. Han, P. Kim, and K. Kim, "The influence of hoop bar on the compressive strength of short steel reinforced concrete columns," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, vol. 12, no. 1, pp. 335-338, 1992.
- [125] D. Han and K. Kim, "A Study on the Strength and Hysteretic Characteristics of Steel Reinforced Concrete Columns," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, vol. 11, no. 4, pp. 183-190, 1995.
- [126] C.-C. Chen and N.-J. Lin, "Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 5, pp. 424-433, 2006.
- [127] G. Zhao, Y. Li, B. Li, G. Xue, Z. Han, and F. Cao, "Strength of slender steel reinforced concrete composite columns," in *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, 2005: Elsevier, pp. 623-628.
- [128] Z. Huang, X. Huang, W. Li, Y. Zhou, L. Sui, and J. Liew, "Experimental behaviour of very high-strength concrete-encased steel composite column subjected to axial compression and end moment," in *Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures. ASCCS 2018*, 2018: Editorial Universitat Politècnica de València, pp. 323-329.
- [129] A. M. Al-Shahari, Y. M. Hunaiti, and B. A. Ghazaleh, "Behavior of lightweight aggregate concrete-encased composite columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 3, no. 2, pp. 97-110, 2003.

ภาคผนวก ก

การคำนวณกำลังของเสาวัสดุผสมตามข้อกำหนดและมาตรฐาน

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรม *MATLAB* ในการเขียนคำสั่งสำหรับคำนวณกำลังของเสาวัสดุผสม โดยได้ตรวจสอบคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณกับตัวอย่างการคำนวณใน Design Examples Companion to the AISC Steel Construction Manual Version 15.0 (2017) และ Composite Structures according to Eurocode 4 Worked Examples (2015) สำหรับข้อกำหนด AISC 360-16 และ มาตรฐาน Eurocode 4 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณกำลังของเสาวัสดุผสม ได้ ดังนี้

ก.1 ข้อกำหนด AISC 360-16

ก.1.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์

```
% Type: Circular Concrete-Filled Steel Tube (CCFST)
% Load: Axial Loading (AISC 360-16)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CCFST=xlsread('Input-CCFST.xlsx');% In-put file
Ds=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
Paisc=zeros(length(Ds),1);
re_aisc=zeros(length(Ds),1);
K=1;
for i=1:length(Ds)
D=Ds(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
% 2.2 Section property
d=D-2*t;
Ac=pi*(d^2)/4; As=pi*(D^2)/4-Ac;
Ag=Ac+As; Ic=pi*(d^4)/64; Is=pi*(D^4)/64-Ic;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
C3=0.45+3*(As/Ag);
if C3>0.9
    C3=0.9;
else
    C3=C3;
end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((K*L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
lamda=D/t; lamda_p=0.15*Es/fy; lamda_r=0.19*Es/fy;
lamda_max=0.31*Es/fy;
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.95;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
```

```

elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Non-compact section
    Pp=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=0.72*fy/(lamda*fy/Es)^0.2;
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else
    warning('section slenderness (D/t)> lamda_max')
    Fcr=0.72*fy/(lamda*fy/Es)^0.2;
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end
re_aisc(i,1)=sqrt(Pno/Pe);% Relative slenderness
Paisc(i,1)=Pn;% Compressive strength of CCFST
end

```

ก.1.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง

```

% Type: Square Concrete-Filled Steel Tube (SCFST)
% Load: Axial Loading (AISC 360-16)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
RCFST=xlsread('Input-SCFST.xlsx');% In-put file
Bs=RCFST(:,1); ts=RCFST(:,2); Ls=RCFST(:,3);
fcs=RCFST(:,4); fys=RCFST(:,5);
Paisc=zeros(length(Bs),1);
re_aisc=zeros(length(Bs),1);
for i=1:length(Bs)
    B=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
    f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
% 2.2 Section property
    b=B-2*t;
    Ac=(b^2)+(t^2)*(pi-4);
    As=4*b*t-8*(t^2)+3*pi*(t^2);
    Ag=Ac+As;
%-----
    Ic=((b^4)/12)-4*((t^4)/12+(t^2)*((b-t)/2)^2)+2*(0.1098*(t^4)+...
        (pi*(t^2)/2)*(b/2-t+4*t/(3*pi))^2);
    bb=B; tt=2*t;
    Ig=((bb^4)/12)-4*((tt^4)/12+(tt^2)*((bb-tt)/2)^2)+2*(0.1098*(tt^4)+...
        (pi*(tt^2)/2)*(bb/2-tt+4*tt/(3*pi))^2);
    Is=Ig-Ic;
%-----
% 2.3 Compute P euler
    Es=200000;% MPa
    Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
    C3=0.45+3*(As/Ag);
    if C3>0.9
        C3=0.9;
    else
        C3=C3;
    end

```



```

end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
lamda=b/t; lamda_p=2.26*sqrt(Es/fy); lamda_r=3*sqrt(Es/fy);
lamda_max=5*sqrt(Es/fy);
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.85;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Non-compact section
    Pp=(fy*As+0.85*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=9*Es/(lamda^2);
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else
    warning('section slenderness (b/t)> lamda_max')
    Fcr=9*Es/(lamda^2);
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end
re_aisc(i,1)=sqrt(Pno/Pe);% Relative slenderness
Paisc(i,1)=Pn;% Compressive strength of SCFST
end

```

ก.1.3 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์

```

% Type: Concrete-Encased Steel (CES)
% Load: Axial Loading (AISC 360-16)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CES=xlsread('Input-CES.xlsx');% In-put file
Ds=CES(:,1); Bs=CES(:,2); Ls=CES(:,3);
bfs=CES(:,4); ds=CES(:,5); tfs=CES(:,6); tws=CES(:,7);
Covers=CES(:,8); Dias=CES(:,9);
No_Ats=CES(:,10); No_Ams=CES(:,11); No_Abs=CES(:,12);
fcs=CES(:,13); fys=CES(:,14); fyrs=CES(:,15);
Dties=CES(:,16); spacs=CES(:,17);
%-----
Paisc=zeros(length(Ds),1); As_m=zeros(length(Ds),1);
re_aisc=zeros(length(Ds),1);
K=1;
for i=1:length(Ds)
    D=Ds(i,1); B=Bs(i,1); L=Ls(i,1);
    bf=bfs(i,1); d=ds(i,1); tf=tfs(i,1); tw=tws(i,1);
    Cover=Covers(i,1); Dia=Dias(i,1);
    fc=fcs(i,1); fy=fys(i,1); fyr=fyrs(i,1);
    No_At=No_Ats(i,1); No_Am=No_Ams(i,1); No_Ab=No_Abs(i,1);
% 2.2 Section property
As=2*(tf*bf)+(d-2*tf)*tw;
Asri=pi*(Dia^2)/4;

```

```

sum_No=No_At+No_Am+No_Ab;
Ac=D*B-As-Asri*sum_No;
Ag=D*B;
Isy=2*(1/12)*tf*(bf^3)+(1/12)*(d-2*tf)*tw^3;
if No_Am>2
Isry=sum_No*pi*(Dia^4)/64+No_Am*Asri*((B-
2*Cover)/4)^2+2*No_At*(Asri)*((B-2*Cover)/2)^2;
else
Isry=sum_No*pi*(Dia^4)/64+2*No_At*(Asri)*((B-2*Cover)/2)^2;
end
Icy=(1/12)*D*(B^3)-Isy-Isry;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(fc);% MPa
C1=0.25+3*((As+Asri*sum_No)/Ag);
if C1>0.7
    C1=0.7;
else
    C1=C1;
end
EIeff=Es*Isy+Es*Isry+C1*Ec*Icy;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((K*L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
Pno=(fy*As+fyr*Asri*sum_No+0.85*fc*Ac)/1000;
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end
re_aisc(i,1)=sqrt(Pno/Pe);% Relative slenderness
Paisc(i,1)=Pn;% Compressive strength of CES
end

```

ก.1.4 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (หน้าตัดอัดแน่น)

```

% Type: Circular Concrete-Filled Steel Tube (CCFST)
% Load: Eccentric Loading (AISC 360-16)
% Plastic Stress Distribution (Compact section)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CCFST=xlsread('Input-CCFSTe-com.xlsx',1);% In-put file
Bs=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
Paisc=zeros(length(Bs),4);
Maisc=zeros(length(Bs),4);
for i=1:length(Bs)
D=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
% 2.2 Section property
d=D-2*t;
Ac=pi*(d^2)/4;
As=pi*(D^2)/4-Ac;
Ag=Ac+As;
Ic=pi*(d^4)/64;

```

```

Is=pi*(D^4)/64-Ic;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;%MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
C3=0.45+3*(As/Ag);
if C3>0.9
    C3=0.9;
else
    C3=C3;
end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
lamda=D/t; lamda_p=0.15*Es/fy; lamda_r=0.19*Es/fy;
lamda_max=0.31*Es/fy;
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.95;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Non-compact section
    Pp=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=0.72*fy/(lamda*fy/Es)^0.2;
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else
    warning('section slenderness (D/t)> lamda_max')
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end

%/////////////////3. For combine axial and bending/////////////////
%From Lai and Varma (2015): the smaller (more conservative) of the
two slenderness limits for axial compression and flexure will govern.
lamda_p_comb=0.09*Es/fy;
if lamda<=lamda_p_comb % P-M for compact section

% For point A (axial force)
PA=Pno; % Pno=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000;
PnA=Pn; % consider columns slenderness
ratio=Pn/Pno;

% For point D (maximum moment)
PD=(0.95*f_c*Ac/2)/1000;
Zc=(d^3)/6;
Zs=(D^3)/6-Zc;
MnD=(fy*Zs+(0.95*f_c*Zc)/2)/(1000*1000);
PnD=PD*ratio; % consider columns slenderness

% For point B (pure bending)
PB=0;PnB=0;
Kc=f_c*(d^2);
Ks=fy*(D-t)*t/2;
angle=(0.026*Kc-
2*Ks)/(0.0848*Kc)+sqrt(((0.026*Kc+2*Ks)^2)+0.857*Kc*Ks)/(0.0848*Kc);
ZcB=((d^3)*(sin(angle/2))^3)/6;

```

```

ZsB=( (D^3-d^3)*sin(angle/2))/6;
MnB=(fy*ZsB+0.95*f_c*ZcB/2)/(1000*1000);

% For point C (the same moment as point B)
PC=0.95*f_c*Ac/1000;
PnC=PC*ratio;
MnC=MnB;
%////////////////////4. Collect the data////////////////////
PP=[PnA PnC PnD PnB]; Paisy(i,:)=PP;
MM=[0 MnC MnD MnB]; Maisc(i,:)=MM;
else
    warning('This section is noncompact or slender')
%Use another m.file
end
end
end

```

ก.1.5 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูด)

```

% Type: Circular Concrete-Filled Steel Tube (CCFST)
% Load: Eccentric Loading (AISC 360-16)
% Interaction diagram for non-compact and slender section

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CCFST=xlsread('Input-CCFSTe-non.xlsx');% In-put file
Bs=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
Paisy=zeros(length(Bs),3);
Maisy=zeros(length(Bs),3);
Pnk=zeros(length(Bs),1);
Mnk=zeros(length(Bs),1);
for i=1:length(Bs)
    D=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
    f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
% 2.2 Section property
d=D-2*t;
Ac=pi*(d^2)/4;
As=pi*(D^2)/4-Ac;
Ag=Ac+As;
Ic=pi*(d^4)/64;
Is=pi*(D^4)/64-Ic;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
C3=0.45+3*(As/Ag);
if C3>0.9
    C3=0.9;
else
    C3=C3;
end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno

```

```

lamda=D/t; lamda_p=0.15*Es/fy; lamda_r=0.19*Es/fy;
lamda_max=0.31*Es/fy;
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.95;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Non-compact section
    Pp=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=0.72*fy/(lamda*fy/Es)^0.2;
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else
    warning('section slenderness (D/t)> lamda_max')
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end

%//////////3. For combine axial and bending//////////
lamda_p_comb=0.09*Es/fy;
lamda_r_comb=0.31*Es/fy;
lamda_max_comb=0.31*Es/fy;
if lamda<=lamda_p_comb % Compact section
    warning('This section is compact section')
elseif lamda>lamda_p_comb&&lamda<=lamda_r_comb % Non-compact section
% compute My
My=My_noncompact(D,t,f_c,fy); % function for compute My
% compute Mp
Kc=f_c*(d^2);
Ks=fy*(D-t)*t/2;
angle=(0.026*Kc-
2*Ks)/(0.0848*Kc)+sqrt(((0.026*Kc+2*Ks)^2)+0.857*Kc*Ks)/(0.0848*Kc);
ZcB=((d^3)*(sin(angle/2))^3)/6;
ZsB=((D^3-d^3)*sin(angle/2))/6;
Mp=(fy*ZsB+0.95*f_c*ZcB/2)/(1000*1000);
MnB=(Mp-(Mp-My)*(lamda-lamda_p_comb)/(lamda_r_comb-lamda_p_comb));

elseif lamda>lamda_r_comb&&lamda<=lamda_max_comb % Slender section
Mcr=My_slender(D,t,f_c,fy); % function for compute Mycr
MnB=Mcr;
end
% At balance point (Cm,Cp)
Csr=As*fy/(Ac*f_c);
if Csr>=0.5
    Cm=1.1/(Csr^0.08);
    if Cm<1; Cm=1; else; end
else
    Cm=0.95/(Csr^0.32);
    if Cm>1.67; Cm=1.67; else; end
end
Cp=0.27/(Csr^0.4);
%//////////4. Collect the data//////////
PP=[1 Cp 0]; Paisc(i,:)=PP; Pnk(i,1)=Pn;
MM=[0 Cm 1]; Maisc(i,:)=MM; Mnk(i,1)=MnB;
end

```

ก.1.5.1 ฟังก์ชันสำหรับคำนวณ M_y

```

function Mny=My_noncompact (D,t,f_c,fy)
R=D/2;
r=(D-2*t)/2;
Ac=pi*r^2;
ay=R/2;% initial ay
ayy=0;
while 1
%/////Area 1/////
gramma1=(acos((R-ay)/R))*180/pi;
A1_g=((2*gramma1*pi*R^2)/360)-
(R^2)*sin(gramma1*pi/180)*cos(gramma1*pi/180);
% concrete
alp1=(acos((R-ay)/r))*180/pi;
A1_c=((2*alp1*pi*r^2)/360)-(r^2)*sin(alp1*pi/180)*cos(alp1*pi/180);
% steel
A1_s=A1_g-A1_c;
%/////Force 1/////
F1_s=A1_s*fy/2;
F1_c=A1_c*(0.7*f_c);
F1=F1_s+F1_c;
%/////Area 3/////
gramma3=(acos((R-D+2*ay)/R))*180/pi;
A3_g=((2*gramma3*pi*R^2)/360)-
(R^2)*sin(gramma3*pi/180)*cos(gramma3*pi/180);
% Concrete
alp3=(acos((R-D+2*ay)/r))*180/pi;
A3_c=((2*alp3*pi*r^2)/360)-(r^2)*sin(alp3*pi/180)*cos(alp3*pi/180);
% steel
A3_s=A3_g-A3_c;
%/////Force 3/////
F3_s=A3_s*fy;
F3=F3_s;
%/////Area 2/////
A2_s=pi*((R^2)-(r^2))-A1_s-A3_s;
%/////Force 2/////
F2_s=A2_s*fy/2;
F2=F2_s;
%/////Sum force F/////
F=F1-F2-F3;

% Check equilibrium
if F>=0&&F<=(0.7*Ac*f_c/100)% Tolerance
    ayy=ay;
    break
elseif ay>D
    warning('warning ay>D')
    break
else
    ay=ay+0.01;
end
end
Mny=((ayy/3)*F1_s+((ayy-t)/2)*F1_c+(ayy/3)*F2_s+(ayy+(D-
2*ayy)/2)*F3_s)/(1000*1000);
end

```

ก.1.5.2 ฟังก์ชันสำหรับคำนวณ M_{ycr}

```

function Mcr=My_slender(D,t,f_c,fy)
R=D/2;
r=(D-2*t)/2;
Ac=pi*r^2;
Es=200000;% MPa
fcr=0.72*fy/((D/t)*(fy/Es))^0.2;
acr=t;% initial ay
acrr=0;
while 1
%/////Area 1/////
grammal=(acos((R-acr)/R))*180/pi;
A1_g=((2*grammal*pi*R^2)/360)-(R^2)*sin(grammal*pi/180)*cos(grammal*pi/180);
% concrete
alp1=(acos((R-acr)/r))*180/pi;
A1_c=((2*alp1*pi*r^2)/360)-(r^2)*sin(alp1*pi/180)*cos(alp1*pi/180);
% steel
A1_s=A1_g-A1_c;
%/////Force 1/////
F1_s=A1_s*fcr/2;
F1_c=A1_c*(0.7*f_c)/2;
F1=F1_s+F1_c;
%/////Area 2/////
A2_s=pi*((R^2)-(r^2))-A1_s;
%/////Force 2/////
F2_s=A2_s*fy/2;
F2=F2_s;
%/////Sum force F/////
F=F1-F2;
% Check equilibrium
if F>=0&&F<=(0.7*Ac*f_c/100)% Tolerance
    acrr=acr;
    break
elseif acr>D
    warning('warning ay>D')
    break
else
    acr=acr+0.01;
end
end
Mcr=((acrr/3)*F1_s+((acrr-t)/3)*F1_c+((D-acrr)/3)*F2_s/(1000*1000);
end

```

ก.1.6 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (หน้าตัดอัดแน่น)

```

% Type: Square Concrete-Filled Steel Tube (SCFST)
% Load: Eccentric Loading (AISC 360-16)
% Plastic Stress Distribution (Compact section)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
SCFST=xlsread('Input-SCFSTe-com.xlsx');% In-put file
Bs=SCFST(:,1); ts=SCFST(:,2); Ls=SCFST(:,3);
fcs=SCFST(:,4); fys=SCFST(:,5);
Paisc=zeros(length(Bs),4);
Maisc=zeros(length(Bs),4);
for i=1:length(Bs)
B=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);%mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);%MPa
% 2.2 Section property
b=B-2*t;
Ac=(b^2)+(t^2)*(pi-4);
As=4*b*t-8*(t^2)+3*pi*(t^2);
Ag=Ac+As;
%-----
Ic=((b^4)/12)-4*((t^4)/12+(t^2)*((b-t)/2)^2)+2*(0.1098*(t^4)+(pi*(t^2)/2)*(b/2-t+4*t/(3*pi))^2);
bb=B; tt=2*t;
Ig=((bb^4)/12)-4*((tt^4)/12+(tt^2)*((bb-tt)/2)^2)+2*(0.1098*(tt^4)+(pi*(tt^2)/2)*(bb/2-tt+4*tt/(3*pi))^2);
Is=Ig-Ic;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
C3=0.45+3*(As/Ag);
if C3>0.9
    C3=0.9;
else
    C3=C3;
end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
lamda=b/t; lamda_p=2.26*sqrt(Es/fy); lamda_r=3*sqrt(Es/fy);
lamda_max=5*sqrt(Es/fy);
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.85;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Non-compact section
    Pp=(fy*As+0.85*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=9*Es/(lamda^2);
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else
    warning('section slenderness (D/t)> lamda_max')
    Fcr=9*Es/(lamda^2);

```



```

    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end

%//////////For combine axial and bending//////////
lamda_p_comb=2.26*sqrt(Es/fy);
if lamda<=lamda_p_comb % Compact section

% For point A (axial force)
PA=Pno; %(Pno=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000);
PnA=Pn; % Consider columns slenderness
ratio=Pn/Pno;

% For point D (maximum moment)
PD=(0.85*f_c*Ac/2)/1000;
Zc=b*(b^2)/4-0.429*(t^2)*b+0.192*(t^3);
bb=B;tt=2*t;
Zg=bb*(bb^2)/4-0.429*(tt^2)*bb+0.192*(tt^3);
Zs=Zg-Zc;
MnD=(fy*Zs+(0.85*f_c*Zc)/2)/(1000*1000);
PnD=PD*ratio; % Consider columns slenderness

% For point B (pure bending)
PB=0;PnB=0;
hn=(0.85*f_c*Ac)/(2*(0.85*f_c*b+4*t*fy));
Zsn=2*t*hn^2;
Zcn=b*hn^2;
MnB=MnD-fy*Zsn/(1000*1000)-(0.85*f_c*Zcn/2)/(1000*1000);

% For point C (the same moment as point B)
PC=0.85*f_c*Ac/1000;
PnC=PC*ratio;
MnC=MnB;

%//////////4. Collect the data//////////
PP=[PnA PnC PnD PnB]; Paisc(i,:)=PP;
MM=[0 MnC MnD MnB]; Maisc(i,:)=MM;
else
    warning('This section is noncompact or slender')
% Use another m.file
end
end

```

ก.1.7 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (หน้าตัดไม่อัดแน่นและหน้าตัดขะลุค)

```

% Type: Square Concrete-Filled Steel Tube (SCFST)
% Load: Eccentric Loading (AISC 360-16)
% Interaction diagram for non-compact and slender section

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
CCFST=xlsread('Input-SCFSTe-non.xlsx');% In-put file
Bs=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
Paisc=zeros(length(Bs),3);
Maisc=zeros(length(Bs),3);
Pnk=zeros(length(Bs),1);
Mnk=zeros(length(Bs),1);
for i=1:length(Bs)
B=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
% 2.2 Section property
b=B-2*t;
Ac=(b^2)+(t^2)*(pi-4);
As=4*b*t-8*(t^2)+3*pi*(t^2);
Ag=Ac+As;
%-----
Ic=((b^4)/12)-4*((t^4)/12+(t^2)*((b-t)/2)^2)+2*(0.1098*(t^4)+(pi*(t^2)/2)*(b/2-t+4*t/(3*pi))^2);
bb=B; tt=2*t;
Ig=((bb^4)/12)-4*((tt^4)/12+(tt^2)*((bb-tt)/2)^2)+2*(0.1098*(tt^4)+(pi*(tt^2)/2)*(bb/2-tt+4*tt/(3*pi))^2);
Is=Ig-Ic;
%-----
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(f_c);% MPa
C3=0.45+3*(As/Ag);
if C3>0.9
    C3=0.9;
else
    C3=C3;
end
EIeff=Es*Is+C3*Ec*Ic;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
lamda=b/t; lamda_p=2.26*sqrt(Es/fy); lamda_r=3*sqrt(Es/fy);
lamda_max=5*sqrt(Es/fy);
if lamda<=lamda_p % Compact section
    C2=0.85;
    Pno=(fy*As+C2*f_c*Ac)/1000;
elseif lamda>lamda_p&&lamda<=lamda_r % Noncompact section
    Pp=(fy*As+0.85*f_c*Ac)/1000; Py=(fy*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
    Pno=Pp-(Pp-Py)*(lamda-lamda_p)^2/(lamda_r-lamda_p)^2;
elseif lamda>lamda_r&&lamda<=lamda_max % Slender section
    Fcr=9*Es/(lamda^2);
    Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
else

```

```

warning('section slenderness (D/t)> lamda_max')
Fcr=9*Es/(lamda^2);
Pno=(Fcr*As+0.7*f_c*Ac)/1000;
end
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%For combine axial and bending%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lamda_p_comb=2.26*sqrt(Es/fy);
lamda_r_comb=3.00*sqrt(Es/fy);
lamda_max_comb=5.00*sqrt(Es/fy);
if lamda<=lamda_p_comb % Compact section
    warning('This section is compact section')
elseif lamda>lamda_p_comb&&lamda<=lamda_r_comb % Non-compact section
%-----Plastic moment (Mp)-----
ap=(2*fy*B*t+0.85*f_c*b*t)/(4*t*fy+0.85*f_c*b);
CC1=b*t*fy;          yc1=ap-t/2;
CC2=0.85*f_c*(ap-t)*b; yc2=(ap-t)/2;
CC3=ap*2*t*fy;      yc3=ap/2;
TT1=(B-ap)*2*t*fy;  yt1=(B-ap)/2;
TT2=b*t*fy;         yt2=B-ap-t/2;
Mp=(CC1*yc1+CC2*yc2+CC3*yc3+TT1*yt1+TT2*yt2);
%-----
%-----Yielding Moment (My)-----
ay=(2*fy*B*t+0.35*f_c*b*t)/(4*t*fy+0.35*f_c*b);
CC1=b*t*fy;          yc1=ay-t/2;
CC2=0.35*f_c*(ay-t)*b; yc2=2*(ay-t)/3;
CC3=ay*2*t*0.5*fy;  yc3=2*ay/3;
TT1=ay*2*t*0.5*fy;  yt1=2*ay/3;
TT2=(B-2*ay)*2*t*fy; yt2=B/2;
TT3=b*t*fy;         yt3=B-ay-t/2;
My=CC1*yc1+CC2*yc2+CC3*yc3+TT1*yt1+TT2*yt2+TT3*yt3;
%-----
MnB=(Mp-(Mp-My)*(lamda-lamda_p_comb)/(lamda_r_comb-lamda_p_comb))/(1000*1000);
elseif lamda>lamda_r_comb&&lamda<=lamda_max_comb % Slender section
Fcr=9*Es/((b/t)^2);
%-----Yielding Moment (My)-----
acr=(fy*B*t+(0.35*f_c+fy-Fcr)*b*t)/(t*(Fcr+fy)+0.35*f_c*b);
CC1=b*t*Fcr;          yc1=acr-t/2;
CC2=0.35*f_c*(acr-t)*b; yc2=2*(acr-t)/3;
CC3=acr*2*t*0.5*Fcr;  yc3=2*acr/3;
TT1=(B-acr)*2*t*0.5*fy; yt1=2*(B-acr)/3;
TT2=b*t*fy;         yt2=B-acr-t/2;
MnB=(CC1*yc1+CC2*yc2+CC3*yc3+TT1*yt1+TT2*yt2)/(1000*1000);
%-----
else
    warning('Lamda>lamda_max')
    Fcr=9*Es/((b/t)^2);
%-----Yielding Moment (My)-----
acr=(fy*B*t+(0.35*f_c+fy-Fcr)*b*t)/(t*(Fcr+fy)+0.35*f_c*b);
CC1=b*t*Fcr;          yc1=acr-t/2;
CC2=0.35*f_c*(acr-t)*b; yc2=2*(acr-t)/3;
CC3=acr*2*t*0.5*Fcr;  yc3=2*acr/3;
TT1=(B-acr)*2*t*0.5*fy; yt1=2*(B-acr)/3;
TT2=b*t*fy;         yt2=B-acr-t/2;

```

```

MnB=(CC1*yc1+CC2*yc2+CC3*yc3+TT1*yt1+TT2*yt2)/(1000*1000);
%-----
end
% At balance point (Cm,Cp)
Csr=As*fy/(Ac*f_c);
if Csr>=0.5
    Cm=1.06/(Csr^0.11);
    if Cm<1; Cm=1; else; end
else
    Cm=0.90/(Csr^0.36);
    if Cm>1.67; Cm=1.67; else; end
end
Cp=0.17/(Csr^0.4);
%////////////////////4. Collect the data////////////////////
PP=[1 Cp 0];Paisc(i,:)=PP;Pnk(i,1)=Pn;
MM=[0 Cm 1];Maisc(i,:)=MM;Mnk(i,1)=MnB;
end

```

ก.1.8 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง

```

% Type: Concrete-Encased Steel (CES)
% Load: Eccentric Loading (AISC 360-16)
% Plastic Stress Distribution

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CES=xlsread('Input-CESe.xlsx');% In-put file
Ds=CES(:,1); Bs=CES(:,2); Ls=CES(:,3);
bfs=CES(:,4); ds=CES(:,5); tfs=CES(:,6); tws=CES(:,7);
Covers=CES(:,8); Dias=CES(:,9);
No_Ats=CES(:,10); No_Ams=CES(:,11); No_Abs=CES(:,12);
fcs=CES(:,13); fys=CES(:,14); fyrs=CES(:,15);
Dties=CES(:,16); spacs=CES(:,17);
Paisc=zeros(length(Bs),4);
Maisc=zeros(length(Bs),4);
K=1;
for i=1:length(Ds)
    D=Ds(i,1); B=Bs(i,1); L=Ls(i,1);
    bf=bfs(i,1); d=ds(i,1); tf=tfs(i,1); tw=tws(i,1);
    Cover=Covers(i,1); Dia=Dias(i,1);
    fc=fcs(i,1); fy=fys(i,1); fyr=fyrs(i,1);
    No_At=No_Ats(i,1); No_Am=No_Ams(i,1); No_Ab=No_Abs(i,1);
% 2.2 Section property
As=2*(tf*bf)+(d-2*tf)*tw;
Asri=pi*(Dia^2)/4;
sum_No=No_At+No_Am+No_Ab;
Ac=D*B-As-Asri*sum_No;
Ag=D*B;
Isx=(1/12)*bf*(d^3)-(1/12)*(bf-tw)*(d-2*tf)^3;
Isrx=sum_No*pi*(Dia^4)/64+2*No_At*(Asri)*((D-2*Cover)/2)^2;
Icx=(1/12)*B*(D^3)-Isx-Isrx;
% 2.3 Compute P euler
Es=200000;% MPa
Ec=0.043*(wc^1.5)*sqrt(fc);% MPa
C1=0.25+3*((As+Asri*sum_No)/Ag);

```

```

if C1>0.7
    C1=0.7;
else
    C1=C1;
end
EIeff=Es*Isx+Es*Isrx+C1*Ec*Icx;% N-mm2
Pe=((pi^2)*EIeff/((K*L)^2))/1000;% kN
% 2.4 Compute Pno
Pno=(fy*As+fyr*Asri*sum_No+0.85*fc*Ac)/1000;
if (Pno/Pe)<=2.25
    Pn=Pno*(0.658^(Pno/Pe));
else
    Pn=0.877*Pe;
end
%//////////For combine axial and bending//////////
% For point A (axial force)
PA=Pno;% (Pno=(fy*As+0.95*fc*Ac)/1000;
PnA=Pn;% consider columns slenderness
ratio=Pn/Pno;

% For point D (maximum moment)
PD=(0.85*fc*Ac/2)/1000;
Zs=tf*bf*(d-tf)+(tw/4)*(d-2*tf)^2;
Zr=(Asri*sum_No-Asri*No_Am)*((D/2)-Cover);
Zc=(B*D^2)/4-Zs-Zr;
MnD=(fy*Zs+fyr*Zr+(0.85*fc*Zc)/2)/(1000*1000);
PnD=PD*ratio;

% For point B (pure bending)
PB=0;PnB=0;
% Compute hn and Zsn
% 1st assume hn below flange
Asrs=Asri*No_Am;
hn1=(0.85*fc*(Ac+Asrs)-2*fyr*Asrs)/(2*(0.85*fc*(B-tw)+2*fy*tw));
if hn1<=d/2-tf % Check assumption
    hn=hn1;
    Zsn=tw*hn^2;
else
    % 2nd assume hn with in flange
    hn2=(0.85*fc*(Ac+As-d*bf+Asrs)-2*fy*(As-d*bf)-
2*fyr*Asrs)/(2*(0.85*fc*(B-bf)+2*fy*bf));
    if hn2>(d/2-tf)&&hn2<=d/2 % Check assumption
        hn=hn2;
        Zsn=Zs-bf*(d/2-hn)*(d/2+hn);
    else
        %3rd assume hn above flange
        hn3=(0.85*fc*(Ac+As+Asrs)-2*fy*As-2*fyr*Asrs)/(2*0.85*fc*B);
        if hn3>d/2
            hn=hn3;% Check assumption
            Zsn=Zs;
        else
            warning('can not find hn')
        end
    end
end
end
Zcn=B*(hn^2)-Zsn;
MnB=MnD-(Zsn*fy/(1000*1000))-((Zcn*0.85*fc/2)/(1000*1000));

```

```

% For point C (the same moment as point B)
PC=0.85*fc*Ac/1000;
PnC=PC*ratio;
MnC=MnB;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%4. Collect the data%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PP=[PnA PnC PnD PnB];Paisc(i,:)=PP;
MM=[0 MnC MnD MnB];Maisc(i,:)=MM;
end

```

ก.2 มาตรฐาน Eurocode 4

ก.2.1 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์

```

% Type: Circular Concrete-Filled Steel Tube (CCFST)
% Load: Axial Loading (Eurocode 4)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 1. General input %%%%%%%%%%
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2. Compute Pn %%%%%%%%%%
% 2.1 Input
CCFST=xlsread('Input-CCFST.xlsx');
Ds=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
gramma_c=1;
P_EC=zeros(length(Ds),1);
re_EC=zeros(length(Ds),1);

for i=1:length(Ds)
D=Ds(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
fcd=f_c/gramma_c;
% 2.2 Section property
d=D-2*t;
Ac=pi*(d^2)/4;As=pi*(D^2)/4-Ac;Ag=Ac+As;
Ic=pi*(d^4)/64;Is=pi*(D^4)/64-Ic;
% 2.3 Compute Peuler
Es=210000;% MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;% MPa
Npl_1=(As*fy+Ac*f_c)/1000;% kN
EIeff=Es*Is+0.6*Ec*Ic;% N-mm2
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
if lamda<=0.5
nao=0.25*(3+2*lamda);
if nao>1;nao=1;else nao=nao; end
nco=4.9-18.5*lamda+17*(lamda^2);
if nco<0;nco=0;else nco=nco; end
Npl=(nao*As*fy+Ac*fcd*(1+nco*(t/D)*(fy/f_c)))/1000;
else
Npl=(As*fy+Ac*fcd)/1000;
end
% Consider length effect
phi=0.5*(1+0.21*(lamda-0.2)+(lamda^2));% Buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));
if X>1; X=1; else X=X; end
Npl_X=X*Npl;
re_EC(i,1)=lamda;% Relative slenderness

```

```
P_EC(i,1)=Npl_X;% Compressive strength of CCFST
end
```

ก.2.2 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง

```
% Type: Square Concrete-Filled Steel Tube (SCFST)
% Load: Axial Loading (Eurocode 4)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
RCFST=xlsread('Input-RCFST.xlsx');% In-put file
Bs=RCFST(:,1); ts=RCFST(:,2); Ls=RCFST(:,3);
fcs=RCFST(:,4); fys=RCFST(:,5);
gramma_c=1.5;
P_EC=zeros(length(Bs),1);
Pno_EC=zeros(length(Bs),1);
re_EC=zeros(length(Bs),1);
for i=1:length(Bs)
B=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
fcd=f_c/gramma_c;
% 2.2 Section property
b=B-2*t;
Ac=(b^2)+(t^2)*(pi-4);
As=4*b*t-8*(t^2)+3*pi*(t^2);
Ag=Ac+As;
%-----
Ic=((b^4)/12)-4*((t^4)/12+(t^2)*(b-t)/2)^2+2*(0.1098*(t^4)+(pi*(t^2)/2)*(b/2-t+4*t/(3*pi))^2);
bb=B; tt=2*t; %for compute Is
Ig=((bb^4)/12)-4*((tt^4)/12+(tt^2)*(bb-tt)/2)^2+2*(0.1098*(tt^4)+(pi*(tt^2)/2)*(bb/2-tt+4*tt/(3*pi))^2);
Is=Ig-Ic;
%-----
% 2.3 Compute P euler
Es=210000;% MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;% MPa
Npl_1=(As*fy+Ac*f_c)/1000;% kN
EIeff=Es*Is+0.6*Ec*Ic;% N-mm2
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
Npl=(As*fy+Ac*fcd)/1000;
% Consider length effect
phi=0.5*(1+0.21*(lamda-0.2)+(lamda^2));% buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));
if X>1; X=1; else X=X; end
Npl_X=X*Npl;
re_EC(i,1)=lamda;% Relative slenderness
P_EC(i,1)=Npl_X;% Compressive strength of SCFST
end
```

ก.2.3 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง

```

% Type: Concrete-Encased Steel (CES)
% Load: Axial Loading (Eurocode 4)

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CES=xlsread('Input-CES-EC4.xlsx');% In-put file
Ds=CES(:,1); Bs=CES(:,2); Ls=CES(:,3);
bfs=CES(:,4); ds=CES(:,5); tfs=CES(:,6); tws=CES(:,7);
Covers=CES(:,8); Dias=CES(:,9);
No_Ats=CES(:,10); No_Ams=CES(:,11); No_Abs=CES(:,12);
fcs=CES(:,13); fys=CES(:,14); fyrs=CES(:,15);
gamma_c=1;
P_EC=zeros(length(Ds),1);
re_EC=zeros(length(Ds),1);

for i=1:length(Ds)
D=Ds(i,1); B=Bs(i,1); L=Ls(i,1);
bf=bfs(i,1); d=ds(i,1); tf=tfs(i,1); tw=tws(i,1);
Cover=Covers(i,1); Dia=Dias(i,1);
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1); fyr=fyrs(i,1);
No_At=No_Ats(i,1); No_Am=No_Ams(i,1); No_Ab=No_Abs(i,1);
fcd=f_c/gamma_c;
% 2.2 Section property
As=2*(tf*bf)+(d-2*tf)*tw;
Asri=pi*(Dia^2)/4;
sum_No=No_At+No_Am+No_Ab;
Ac=D*B-As-Asri*sum_No;
Ag=D*B;
Isy=2*(1/12)*tf*(bf^3)+(1/12)*(d-2*tf)*tw^3;
if No_Am>2
Isry=sum_No*pi*(Dia^4)/64+No_Am*Asri*((B-2*Cover)/4)^2+2*No_At*(Asri)*((B-2*Cover)/2)^2;
else
Isry=sum_No*pi*(Dia^4)/64+2*No_At*(Asri)*((B-2*Cover)/2)^2;
end
Icy=(1/12)*D*(B^3)-Isy-Isry;
% 2.3 Compute P euler
Es=210000;% MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;% MPa
EIeff=Es*Isy+Es*Isry+0.6*Ec*Icy;
Npl_1=(As*fy+0.85*Ac*f_c+fyr*Asri*sum_No)/1000;% kN
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
Npl=(As*fy+0.85*Ac*fcd+fyr*Asri*sum_No)/1000;
% Consider length effect
phi=0.5*(1+0.49*(lamda-0.2)+(lamda^2));% buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));
if X>1 X=1; else X=X; end
Npl_X=X*Npl;
re_EC(i,1)=lamda;
P_EC(i,1)=Npl_X;
end

```


ก.2.4 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง

```

% Type: Circular Concrete-Filled Steel Tube (CCFST)
% Load: Eccentric Loading (Eurocode 4)
% Plastic Stress Distribution

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CCFST=xlsread('Input-CCFSTe-EC4.xlsx');
Bs=CCFST(:,1); ts=CCFST(:,2); Ls=CCFST(:,3);
fcs=CCFST(:,4); fys=CCFST(:,5);
gramma_c=1.5;
P_EC=zeros(length(Bs),4);M_Mn=zeros(length(Bs),4);
M_EC=zeros(length(Bs),4);P_Pn=zeros(length(Bs),4);
for i=1:length(Bs)
D=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
fcd=f_c/gramma_c;
%2.2 Section property
d=D-2*t;
Ac=pi*(d^2)/4;As=pi*(D^2)/4-Ac;Ag=Ac+As;
Ic=pi*(d^4)/64;Is=pi*(D^4)/64-Ic;
% 2.3 Compute P euler
Es=210000;%MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;% MPa
Npl_1=(As*fy+Ac*f_c)/1000;% kN
EIeff=Es*Is+0.6*Ec*Ic;% N-mm2
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
Npl=(As*fy+Ac*fcd)/1000;
% Consider length effect
phi=0.5*(1+0.21*(lamda-0.2)+(lamda^2));% buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));
    if X>1 X=1; else X=X; end
Npl_X=X*Npl;
%//////////For combine axial and bending//////////
% For point A (axial force)
PA=Npl;
PnA=Npl_X;
ratio=X;

% For point D (maximum moment)
PD=(fcd*Ac/2)/1000;
Zc=(d^3)/6;
Zs=(D^3)/6-Zc;
MnD=(fy*Zs+(fcd*Zc)/2)/(1000*1000);
PnD=PD*ratio;% consider columns slenderness

% For point B (pure bending)
PB=0;PnB=0;
Kc=fcd*(d^2);
Ks=fy*(D-t)*t/2;%thin HSS wall assumed
angle=(0.026*Kc-
2*Ks)/(0.0848*Kc)+sqrt(((0.026*Kc+2*Ks)^2)+0.857*Kc*Ks)/(0.0848*Kc);
ZcB=((d^3)*(sin(angle/2))^3)/6;
ZsB=((D^3-d^3)*sin(angle/2))/6;

```

```

MnB=(fy*ZsB+fcd*ZcB/2)/(1000*1000);

% For point C (the same moment as point B)
PC=fcd*Ac/1000;
PnC=PC*ratio;
MnC=MnB;

%////////////////////4. Collect the data////////////////////
PP=[PnA PnC PnD PnB];
MM=[0 MnC MnD MnB];
P_EC(i,:)=PP;P_Pn(i,:)=PP/PnA;
M_EC (i,:)=MM;M_Mn(i,:)=MM/MnB;
end

```

ก.2.5 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง

```

% Type: Square Concrete-Filled Steel Tube (SCFST)
% Load: Eccentric Loading (Eurocode 4)
% Plastic Stress Distribution

%//////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%//////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
RCFST=xlsread('Input-SCFSTe-EC4.xlsx');% In-put file
Bs=RCFST(:,1); ts=RCFST(:,2); Ls=RCFST(:,3);
fcs=RCFST(:,4); fys=RCFST(:,5);
gramma_c=1.5;
P_EC=zeros(length(Bs),4);M_Mn=zeros(length(Bs),4);
M_EC=zeros(length(Bs),4);P_Pn=zeros(length(Bs),4);
for i=1:length(Bs)
B=Bs(i,1); t=ts(i,1); L=Ls(i,1);% mm
f_c=fcs(i,1); fy=fys(i,1);% MPa
fcd=f_c/gramma_c;
% 2.2 Section property
b=B-2*t;
Ac=(b^2)+(t^2)*(pi-4);
As=4*b*t-8*(t^2)+3*pi*(t^2);
Ag=Ac+As;
%-----
Ic=((b^4)/12)-4*((t^4)/12+(t^2)*((b-
t)/2)^2)+2*(0.1098*(t^4)+(pi*(t^2)/2)*(b/2-t+4*t/(3*pi))^2);
bb=B; tt=2*t;
Ig=((bb^4)/12)-4*((tt^4)/12+(tt^2)*((bb-
tt)/2)^2)+2*(0.1098*(tt^4)+(pi*(tt^2)/2)*(bb/2-tt+4*tt/(3*pi))^2);
Is=Ig-Ic;
%-----
% 2.3 Compute P euler
Es=210000;% MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;% MPa
Npl_1=(As*fy+Ac*f_c)/1000;% kN
EIeff=Es*Is+0.6*Ec*Ic;% N-mm2
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;% kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
Npl=(As*fy+Ac*fcd)/1000;
% Consider length effect
phi=0.5*(1+0.21*(lamda-0.2)+(lamda^2));% buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));

```

```

    if X>1 X=1; else X=X; end
    Npl_X=X*Npl;
    %//////////For combine axial and bending//////////
    % For point A (axial force)
    PA=Npl;
    PnA=Npl_X; % consider columns slenderness
    ratio=X;

    % For point D (maximum moment)
    PD=(fcd*Ac/2)/1000;
    Zc=b*(b^2)/4-0.429*(t^2)*b+0.192*(t^3);
    bb=B;tt=2*t;
    Zg=bb*(bb^2)/4-0.429*(tt^2)*bb+0.192*(tt^3);
    Zs=Zg-Zc;
    MnD=(fy*Zs+(fcd*Zc)/2)/(1000*1000);
    PnD=PD*ratio; % consider columns slenderness

    % For point B (pure bending)
    PB=0;PnB=0;
    hn=(fcd*Ac)/(2*(fcd*b+4*t*fy));
    Zsn=2*t*hn^2;
    Zcn=b*hn^2;
    MnB=MnD-fy*Zsn/(1000*1000)-(fcd*Zcn/2)/(1000*1000);

    % For point C (the same moment as point B)
    PC=fcd*Ac/1000;
    PnC=PC*ratio;
    MnC=MnB;

    %//////////For combine axial and bending//////////
    PP=[PnA PnC PnD PnB]; P_EC(i,:)=PP; P_Pn(i,:)=PP/PnA;
    MM=[0 MnC MnD MnB]; M_EC(i,:)=MM; M_Mn(i,:)=MM/MnB;
    end

```

ก.2.6 เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง

```

% Type: Concrete-Encased Steel (CES)
% Load: Eccentric Loading (Eurocode 4)
% Plastic Stress Distribution

%////////// 1. General input //////////
wc=2400;% Unit weight of concrete (kg/m3)
%////////// 2. Compute Pn //////////
% 2.1 Input
CES=xlsread('Input-CESe-EC.xlsx');
Ds=CES(:,1); Bs=CES(:,2); Ls=CES(:,3);
bfs=CES(:,4); ds=CES(:,5); tfs=CES(:,6); tws=CES(:,7);
Covers=CES(:,8); Dias=CES(:,9);
No_Ats=CES(:,10); No_Ams=CES(:,11); No_Abs=CES(:,12);
fcs=CES(:,13); fys=CES(:,14); fyrs=CES(:,15);
Dties=CES(:,16); spacs=CES(:,17);
gamma_c=1;
P_EC=zeros(length(Bs),4); P_Pn=zeros(length(Bs),4);
M_EC=zeros(length(Bs),4); M_Mn=zeros(length(Bs),4);
    for i=1:length(Ds)
        D=Ds(i,1); B=Bs(i,1); L=Ls(i,1);
        bf=bfs(i,1); d=ds(i,1); tf=tfs(i,1); tw=tws(i,1);
        Cover=Covers(i,1); Dia=Dias(i,1);

```

```

f_c=fcs(i,1);fy=fys(i,1);fyr=fyrs(i,1);
No_At=No_Ats(i,1);No_Am=No_Ams(i,1);No_Ab=No_Abs(i,1);
fcd=f_c/gramma_c;
% 2.2 Section property
As=2*(tf*bf)+(d-2*tf)*tw;
Asri=pi*(Dia^2)/4;
sum_No=No_At+No_Am+No_Ab;
Ac=D*B-As-Asri*sum_No;
Ag=D*B;
Isx=(1/12)*bf*(d^3)-(1/12)*(bf-tw)*(d-2*tf)^3;
Isrx=sum_No*pi*(Dia^4)/64+2*No_At*(Asri)*((D-2*Cover)/2)^2;
Icx=(1/12)*B*(D^3)-Isx-Isrx;
% 2.3 Compute Peuler
Es=210000;%MPa
Ec=(22*(f_c/10)^0.3)*1000;%MPa
EIeff=Es*Isx+Es*Isrx+0.6*Ec*Icx;
Npl_1=(As*fy+0.85*Ac*f_c+fyr*Asri*sum_No)/1000;%kN
Ne=((pi^2)*EIeff/(L^2))/1000;%kN
lamda=sqrt(Npl_1/Ne);
Npl=(As*fy+0.85*Ac*fcd+fyr*Asri*sum_No)/1000;
%Consider length effect
phi=0.5*(1+0.49*(lamda-0.2)+(lamda^2));%buckling curve a
X=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lamda^2)));
    if X>1 X=1; else X=X; end
Npl_X=X*Npl;

%//////////For combine axial and bending//////////
% For point A (axial force)
PA=Npl; % Pno=(fy*As+0.95*f_c*Ac)/1000;
PnA=Npl_X; % consider columns slenderness
ratio=X;

% For point D (maximum moment)
PD=(0.85*fcd*Ac/2)/1000;
Zs=tf*bf*(d-tf)+(tw/4)*(d-2*tf)^2;
Zr=(Asri*sum_No-Asri*No_Am)*((D/2)-Cover);
Zc=(B*D^2)/4-Zs-Zr;
MnD=(fy*Zs+fyr*Zr+(0.85*fcd*Zc)/2)/(1000*1000);
PnD=PD*ratio;

% For point B (pure bending)
PB=0;PnB=0;
% Compute hn and Zsn
% 1st assume hn below flange
Asrs=Asri*No_Am;
hn1=(0.85*fcd*(Ac+Asrs)-2*fyr*Asrs)/(2*(0.85*fcd*(B-tw)+2*fy*tw));
if hn1<=d/2-tf % Check assumption
    hn=hn1;
    Zsn=tw*hn^2;
else
    % 2nd assume hn with in flange
    hn2=(0.85*fcd*(Ac+As-d*bf+Asrs)-2*fy*(As-d*bf)-
2*fyr*Asrs)/(2*(0.85*fcd*(B-bf)+2*fy*bf));
    if hn2>(d/2-tf)&&hn2<=d/2 % Check assumption
        hn=hn2;
        Zsn=Zs-bf*(d/2-hn)*(d/2+hn);
    else

```

```

    % 3rd assume hn above flange
    hn3=(0.85*fcd*(Ac+As+Asrs)-2*fy*As-
2*fy*Asrs)/(2*0.85*fcd*B);
    if hn3>d/2
        hn=hn3;% Check assumption
        Zsn=Zs;
    else
        warning('can not find hn')
    end
end
end
Zcn=B*(hn^2)-Zsn;
MnB=MnD-(Zsn*fy/(1000*1000))-((Zcn*0.85*fcd/2)/(1000*1000));

% For point C (the same moment as point B)
PC=0.85*fcd*Ac/1000;
PnC=PC*ratio;
MnC=MnB;
%////////////////4. Collect the data////////////////////////////////
PP=[PnA PnC PnD PnB]; P_EC(i,:)=PP; P_Pn(i,:)=PP/PnA;
MM=[0 MnC MnD MnB]; M_EC(i,:)=MM; M_Mn(i,:)=MM/MnB;
end
%////////////////////////////////////// END ////////////////////////////////////////

```

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยใช้โปรแกรม *HeuristicLab* มีขั้นตอน ดังนี้

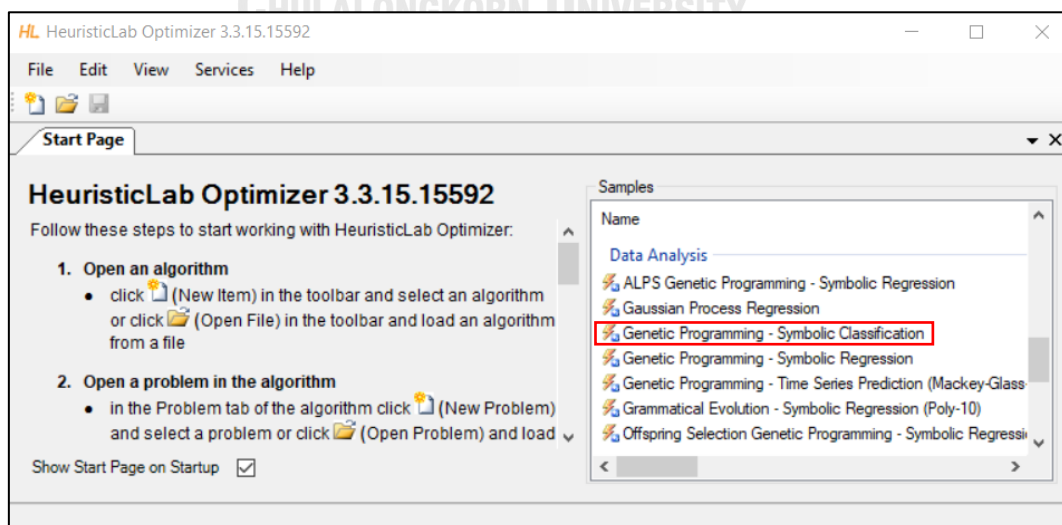
ขั้นตอนที่ 1: การเตรียมข้อมูล

เตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ดังรูปที่ ข.1 ซึ่งแสดงข้อมูลสำหรับตัวอย่างที่ 3.2 โดยค่าตัวแปรต้น ได้แก่ ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ ค่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวม แสดงด้วย X1 X2 และ X3 ตามลำดับ และสำหรับตัวแปรตาม คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต แสดงด้วย Y จากนั้นทำการบันทึกไฟล์จากโปรแกรม *Excel* เป็นไฟล์ CSV (Comma delimited) (*.csv) เพื่อใช้ในโปรแกรม *HeuristicLab* ต่อไป

	A	B	C	D	
1	X1	X2	X3	Y	
2		1	0.474	5.856	18.4
3		2	0.474	5.856	27.6
4		3	0.474	5.856	32.4
5		5	0.474	5.856	34.2
6		7	0.474	5.856	37.7
7		14	0.474	5.856	41.8
8		28	0.474	5.856	42.9
9		1	0.473	4.845	18.8
10		2	0.473	4.845	27.8

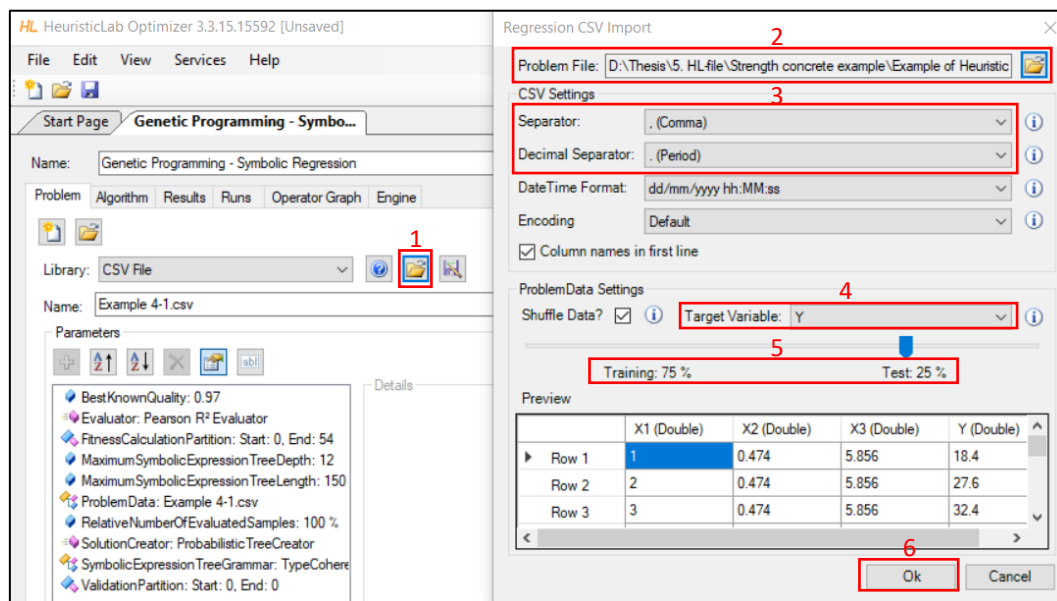
รูปที่ ข.1 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

ขั้นตอนที่ 2: โปรแกรม *HeuristicLab* > เลือก Genetic Programming – Symbolic Regression



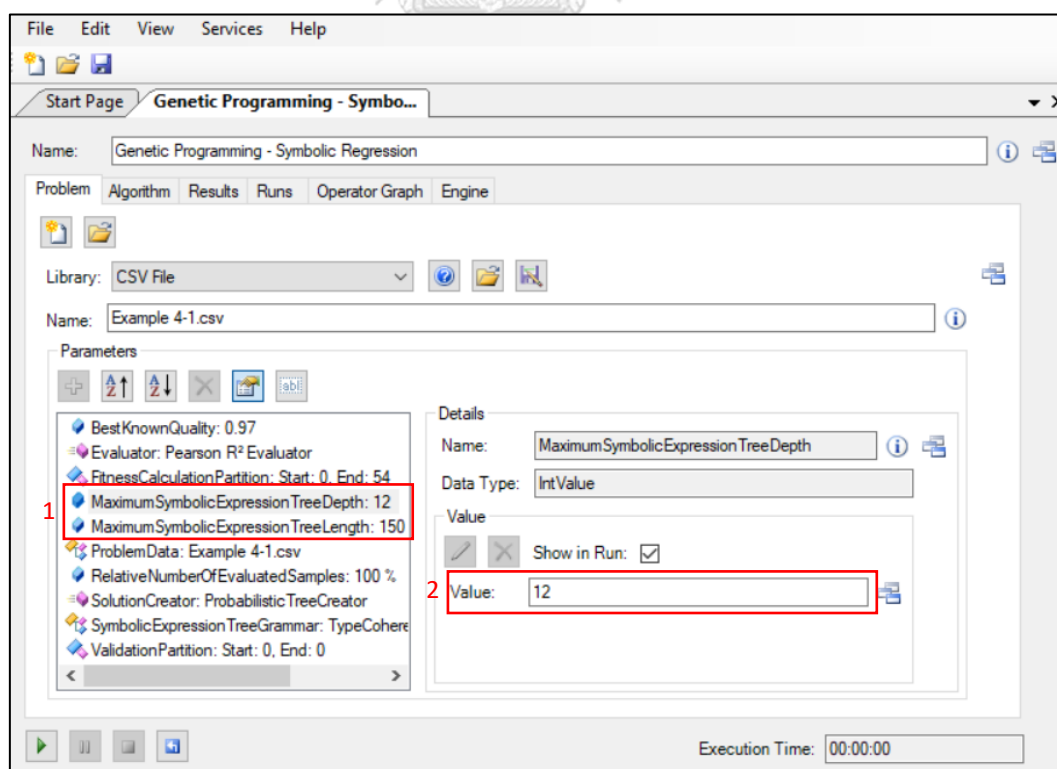
รูปที่ ข.2 หน้าเริ่มต้นโปรแกรม *HeuristicLab*

ขั้นตอนที่ 3: Input database > เลือกไฟล์ข้อมูล (*.csv) > เลือก Target Variable (Y) > กำหนดสัดส่วนชุดข้อมูลเทรนนิ่งและชุดข้อมูลทดสอบ (75:25)



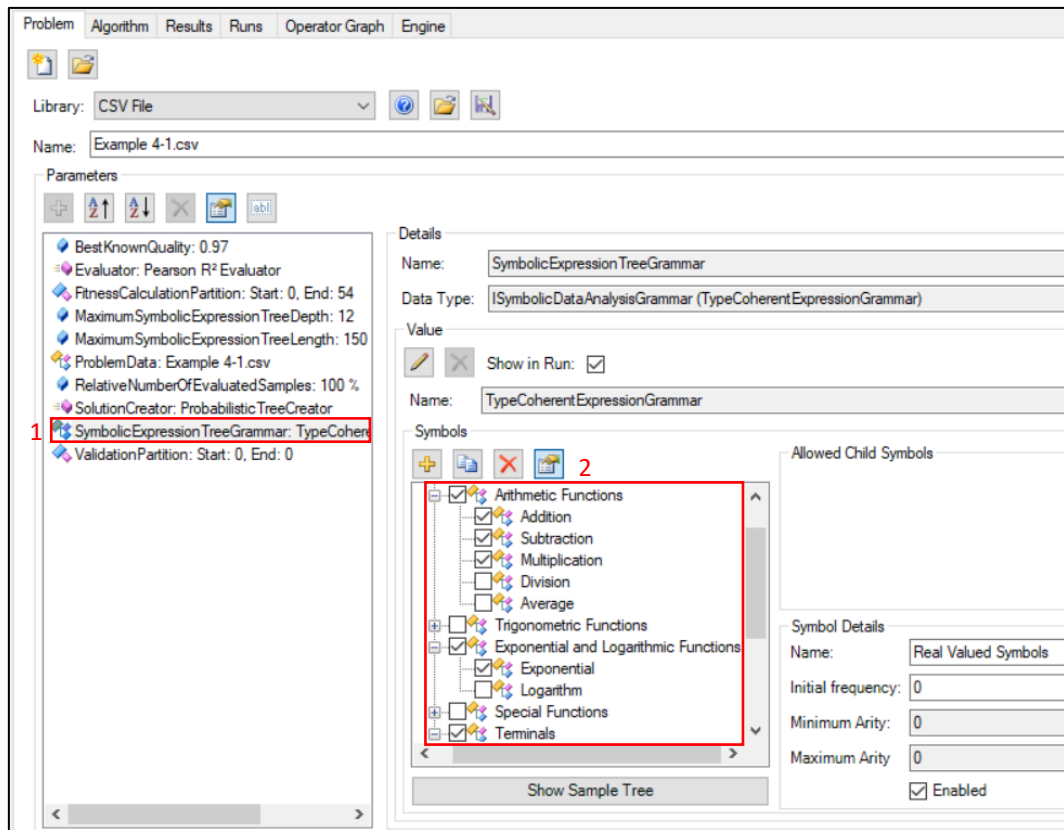
รูปที่ ข.3 การกำหนด Target Variable และสัดส่วนของชุดข้อมูล

ขั้นตอนที่ 4: กำหนด Maximum Tree Depth และ Maximum Tree Length



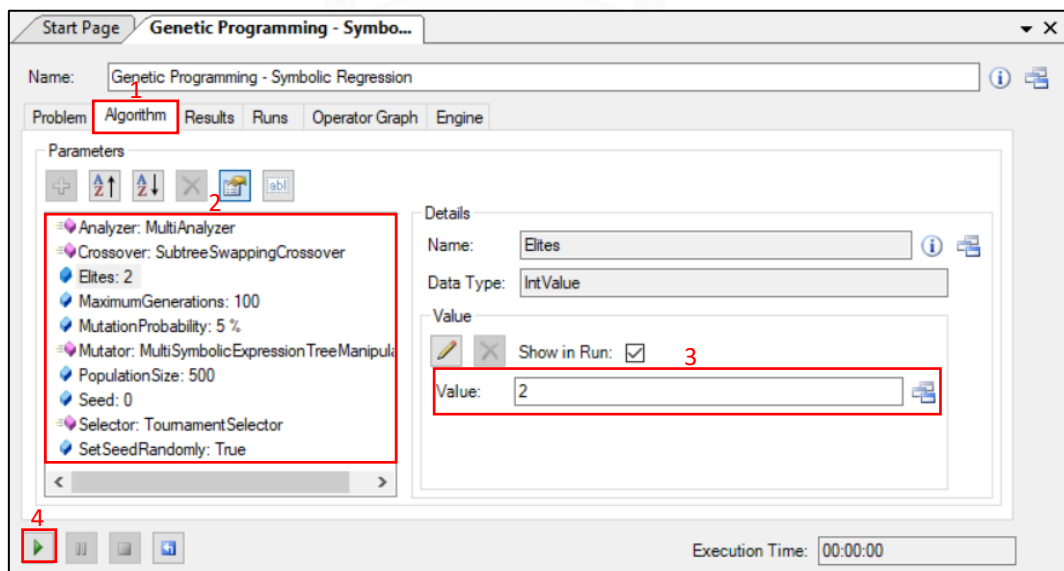
รูปที่ ข.4 การกำหนด Maximum Tree Depth และ Maximum Tree Length

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดเซตของฟังก์ชันนอลและเซตของเทอร์มินอล



รูปที่ ข.5 การกำหนดเซตของฟังก์ชันนอลและเซตของเทอร์มินอล

ขั้นตอนที่ 6: กำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมและเริ่มการวิเคราะห์



รูปที่ ข.6 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบผลการวิเคราะห์

The screenshot displays the 'Results' tab of a Genetic Programming - Symbolic Regression application. The interface is divided into several sections:

- Results Panel (Left):** Lists various performance metrics such as 'Evaluated Solutions: 50300', 'Generations: 100', and 'Best training solution quality: 0.956469201'. A red box highlights the 'Best training solution quality' and 'Symbolic expression tree lengths' items.
- Details Panel (Top Right):** Shows the 'Regression Solution' name as 'SymbolicRegressionSolution'. It includes a list of error metrics like 'Average relative error (test): 5.28693' and 'Mean squared error (test): 2.8063254'. A red box highlights the top three error metrics.
- Regression Tree (Bottom Right):** A hierarchical tree diagram starting with 'StartSymbol' at the root, branching into 'Addition' nodes, and further into numerical values and other symbols.
- Execution Time (Bottom Right):** Shows '00:00:28.3658599'.

รูปที่ ข.7 การตรวจสอบผลการวิเคราะห์

ภาคผนวก ค

ผลของตัวแปรในสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย

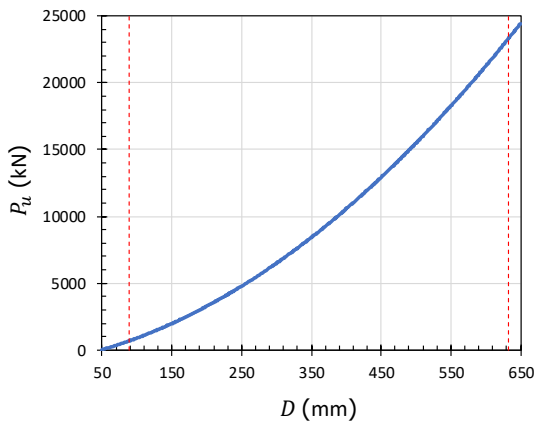
จากสมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab* (สมการที่ 6.1 และ สมการที่ 7.1) สามารถแสดงผลของตัวแปรในสมการต่อกำลังที่ทำนายได้ ดังนี้

ค.1 สมการที่ 6.1

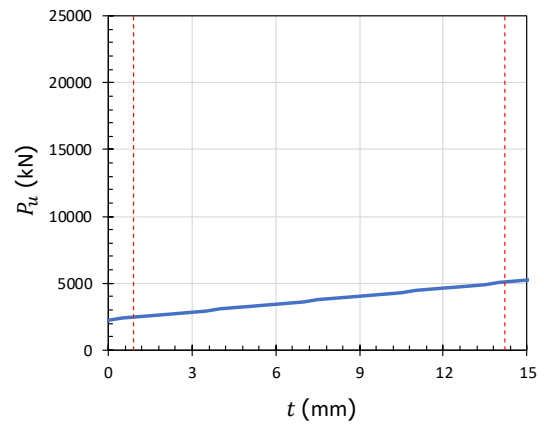
ผลของตัวแปรในสมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.1 (ก) ถึง (จ) โดยได้กำหนดค่าของแต่ละตัวแปรเท่ากับค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ ค.1 และปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรที่พิจารณา จากรูปที่ ค.1 (ก) ถึง (จ) ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละตัวแปรแสดงได้ดั่งเส้นประ ซึ่งค่าขอบเขตสามารถพิจารณาได้จากค่าต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละตัวแปร และ ค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (D/t , L_e/D และ f_y/f'_c) เช่น ค่าความหนาต่ำสุดและสูงสุดของท่อเหล็กในฐานข้อมูลมีค่าเท่ากับ 0.9 และ 16.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าอัตราส่วน D/t สามารถคำนวณความหนาต่ำสุดและสูงสุดของท่อเหล็กได้เท่ากับ 0.9 และ 14.2 มิลลิเมตร ดังนั้น ค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของท่อเหล็กคือ 0.9 และ 14.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ ค.1 ฐานข้อมูลเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์

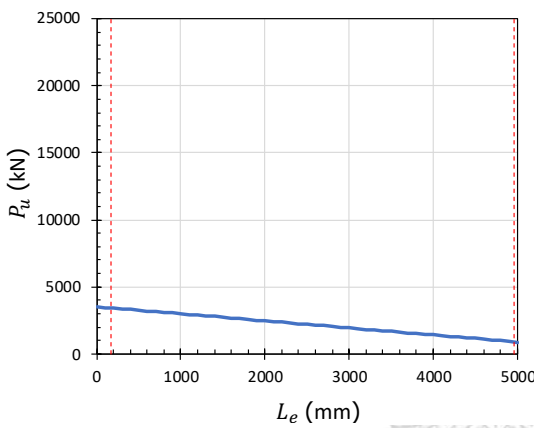
	D (mm)	t (mm)	L_e (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	D/t	L_e/D	f_y/f'_c
ค่าต่ำสุด	89.3	0.9	125.0	22.2	185.7	13.7	0.9	1.7
ค่าสูงสุด	632.1	16.5	4956.0	178.6	853.0	220.9	38.5	35.0
ค่าเฉลี่ย	194.7	4.4	749.1	58.9	377.5	52.5	4.9	8.6
SD	109.0	2.5	998.0	34.3	139.8	33.3	7.8	5.7



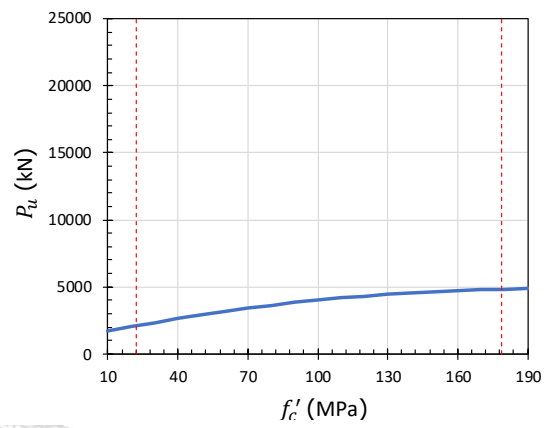
(ก) เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อเหล็ก



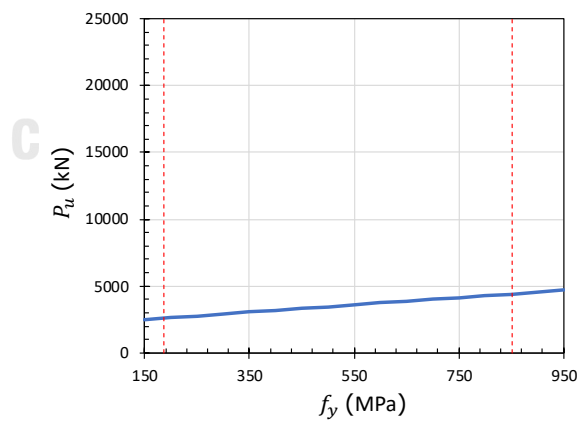
(ข) ความหนาของท่อเหล็ก



(ค) ความสูงประสิทธิภาพของเสา



(ง) กำลังอัดของคอนกรีต



(จ) หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก

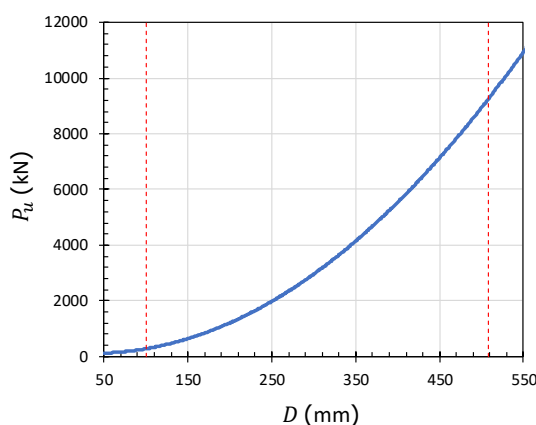
รูปที่ ค.1 ผลของตัวแปรในสมการที่ 6.1 ต่อกำลังอัดของเสาที่ทำนายได้

ค.2 สมการที่ 7.1

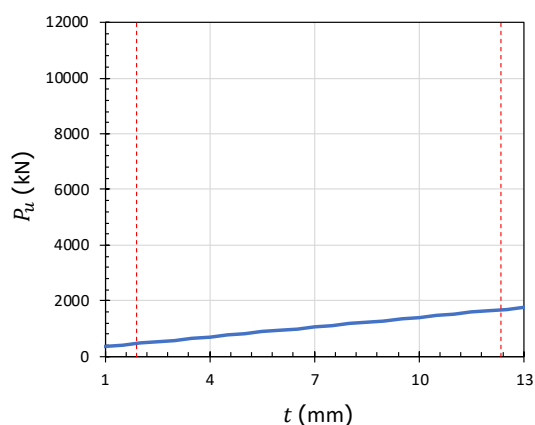
ผลของตัวแปรในสมการทำนายกำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.2 (ก) ถึง (จ) โดยได้กำหนดค่าของแต่ละตัวแปรเท่ากับค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ ค.2 และปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรที่พิจารณา

ตารางที่ ค.2 ฐานข้อมูลเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์

	D (mm)	t (mm)	L_e (mm)	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	e^* (mm)	D/t	L_e/D	f_y/f'_c	e^*/D
ค่าต่ำสุด	100.0	1.9	661.0	30.5	271.0	14.0	13.7	4.0	2.2	0.1
ค่าสูงสุด	600.0	16.0	4956.0	176.6	517.0	317.4	100.0	33.5	16.4	1.1
ค่าเฉลี่ย	169.0	5.1	2606.7	69.9	366.6	81.4	35.6	18.2	6.7	0.5
SD	91.5	2.6	1010.4	34.3	62.8	54.2	15.3	8.8	3.7	0.3

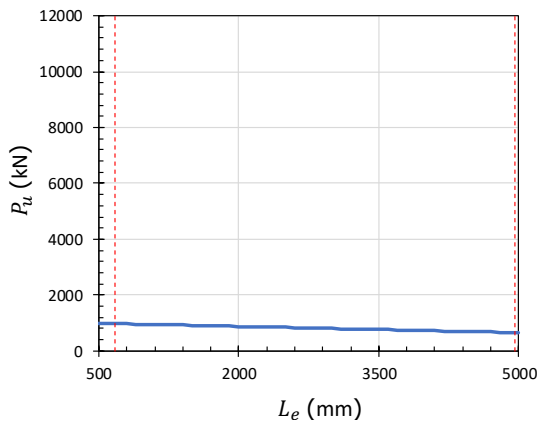


(ก) เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท้อเหล็ก

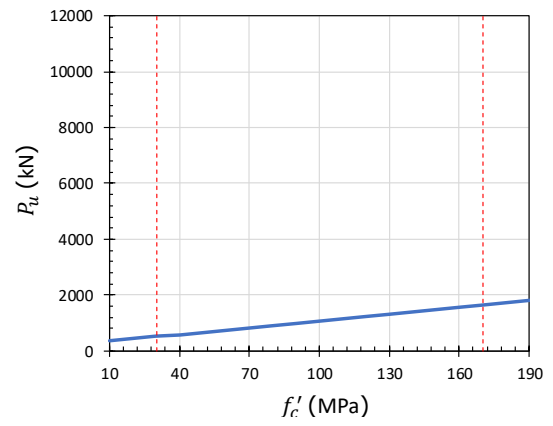


(ข) ความหนาของท้อเหล็ก

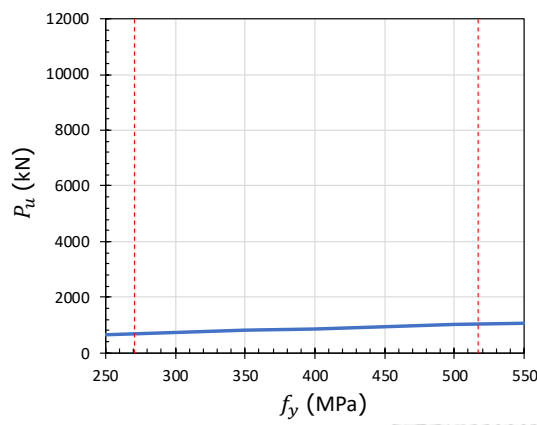
รูปที่ ค.2 ผลของตัวแปรในสมการที่ 7.1 ต่อกำลังอัดของเสาที่ทำนายได้



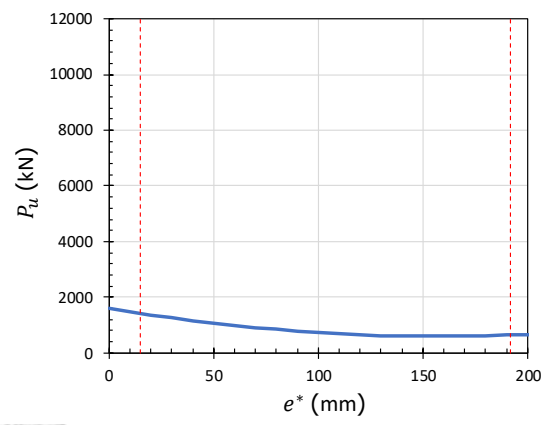
(ค) ความสูงประสิทธิผลของเสา



(ง) กำลังอัดของคอนกรีต



(จ) หน่วยแรงครากของท่อเหล็ก



(ฉ) ระยะเยื้องศูนย์

รูปที่ ค.2 (ต่อ) ผลของตัวแปรในสมการที่ 7.1 ต่อกำลังอัดของเสาที่ทำนายได้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรพล ฮ้อแสงชัย
วัน เดือน ปี เกิด	17 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	67/5 รามอินทรา 23 แขวง อนุสาวรีย์ เขต บางเขน กรุงเทพฯ 11020
รางวัลที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY