การวิเคราะห์กำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน ด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

นายทศพร ประเสริฐศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ANALYSIS OF STRENGTH AND DUCTILITY OF CONCRETE CYLINDERS PARTIALLY CONFINED WITH FIBER-REINFORCED POLYMERS

Mr. Tosporn Prasertsri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
โดย	นายทศพร ประเสริฐศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณสิริ พันธ์อุไร)

ทศพร ประเสริฐศรี : การวิเคราะห์กำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย. (ANALYSIS OF STRENGTH AND DUCTILITY OF CONCRETE CYLINDERS PARTIALLY CONFINED WITH FIBER-REINFORCED POLYMERS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อัครวัชร เล่นวารี, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดหรือบางส่วนด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองกับผลทดสอบที่ผ่านมา โดยแบบจำลองได้ใช้ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัด โดยพบว่าหน่วยการยืดตัวประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีผลต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ตามลำดับ ในกรณีการโอบรัดบางส่วน (2 3 4 และ 5 แถบ) พบว่า รูปแบบการโอบรัดที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ระยะห่างระหว่างแถบที่แถบน้อยที่สุด (5 แถบ) ซึ่งในกรณีนี้ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2555	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370544221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CONCRETE / CONFINEMENT / FIBER REINFORCED POLYMER / COMPRESSIVE STRENGTH / FINITE ELEMENT METHOD

TOSPORN PRASERTSRI : ANALYSIS OF STRENGTH AND DUCTILITY OF CONCRETE CYLINDERS PARTIALLY CONFINED WITH FIBER-REINFORCED POLYMERS. ADVISOR : ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST. PROF. JAROON RUNGAMORNRAT, Ph.D., 133 pp.

This research proposes the three-dimensional finite element model to predict the compressive stress-strain relationships of concrete cylinders fully or partially confined with fiber-reinforced polymer (FRP) sheets. The models are validated with previous experimental data and then used to study the effects of strengthening parameters on the confinement effectiveness of strength and ductility of confined concrete cylinders. The results show that the FRP ultimate strain is the most influential parameter on confinement effectiveness on strength and ductility for both full and partial confinement cases followed by FRP thickness, FRP elastic modulus, and unconfined compressive strength of concrete, respectively. For partial confinement cases (2, 3, 4, and 5 strips), the most appropriate configuration is the use of least spacing (5 strips). For this configuration, the increase in compressive strength due to confinement is proportional to the amount of FRP.

Department : Civil Engineering	Student's Signature ....
Field of Study : Civil Engineering	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2012	Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมถึงการเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ทั้งยังกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณสิริ พันธ์อุไร ที่ให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณนาวาอากาศเอก ดร. พิสิฐ ประเสริฐศรี คุณสุจิตรา ประเสริฐศรี เรืออากาศเอกวิโรจน์ จิระมณีมัย และ ดร. พิทยา แจ่มสว่าง ที่อุทิศกำลังกายและกำลังใจให้การแก้ปัญหาในงานวิจัยเป็นไปอย่างสุขุมคัมภีรภาพ ความดีและประโยชน์ทั้งหลายอันพึงได้จากการวิจัย ขอมอบให้ทุกท่านที่คอยสนับสนุนและช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย..........	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..........	จ
กิตติกรรมประกาศ..........	ฉ
สารบัญ..........	ช
สารบัญตาราง..........	ฌ
สารบัญภาพ..........	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ..........	ฑ
บทที่ 1 บทนำ..........	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..........	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..........	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย..........	4
1.4 แนวทางดำเนินการวิจัย..........	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม..........	6
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดภายใต้แรงอัด..........	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดภายใต้แรงอัด..........	9
2.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..........	29
บทที่ 3 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..........	34
3.1 การทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามแนวทางของ ACI 440.2R-08..........	34
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..........	37
3.3 เกณฑ์การครากของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์..........	43
3.4 การตรวจสอบเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์..........	51

หน้า

บทที่ 4 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.......................... 59

4.1 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.. 59

4.2 การทดสอบการลู่เข้า….. 62

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.. 69

4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.. 78

บทที่ 5 การศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียว.. 80

5.1 ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย........ 80

5.2 ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย...... 88

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย... 98

6.1 สรุปผลการวิจัย... 98

6.2 ข้อเสนอแนะ... 100

รายการอ้างอิง... 101

ภาคผนวก…………………………………………………………………………... 105

ภาคผนวก ก………………………………………………………………….. 106

ภาคผนวก ข………………………………………………………………….. 115

ภาคผนวก ค……………………………………………...………………….. 127

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 133

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางวัสดุของชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Barros และ Ferreira....	26
3.1	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์ความเสียหาย Drucker-Prager จากงานวิจัยในอดีต...	48
4.1	ข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง..	62
4.2	สนามหน่วยแรงของวัตถุทรงกระบอกที่โอบรัดด้วยท่อผนังบาง..................	64
4.3	ขอบเขตการใช้งานสมการความถดถอยเพื่อทำนายมุมของความเสียดทานภายในและประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..................................	72
4.4	ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ด้วยวิธีต่างๆ เทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..	75
4.5	ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากแบบจำลองเทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย...	76
4.6	ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ด้วยวิธีต่างๆ เทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..	78
5.1	รายละเอียดการแปรผันข้อมูลป้อนเข้าเพื่อทำการศึกษาตัวแปรต่างๆในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย........................	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยวัสดุต่างๆ…………	2
1.2	ลักษณะการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย…………	3
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดซึ่งเสนอโดย Popovics…………	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดเสนอโดย Hognestad…………	7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Mander และคณะ….	10
2.4	เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบของ Mander และคณะ…………	14
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณหน่วยแรงจากสมการและผลจากการทดสอบของ Mander และคณะ…………	14
2.6	ชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Rochette และ Labossière…………	16
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวเมื่อลบมุมเสาเพื่อเพิ่มรัศมีโค้ง…………	17
2.8	การวิบัติแบบฉับพลันจากผลการทดสอบของ Rochette และ Labossière……	18
2.9	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเสนอโดย Lam และ Teng…………	18
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดเสนอโดย Lam และ Teng…………	20
2.11	การคำนวณสัมประสิทธิ์ k_1 ของ Lam และ Teng…………	22
2.12	ชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Barros และ Ferreira…………	25
2.13	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และคณะ…………	30
2.14	เงื่อนไขสภาวะขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และคณะ…………	31
2.15	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sadeghian และคณะ…………	31
2.16	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Wu และคณะ…………	32

ภาพที่		หน้า
3.1	ระบบพิกัดของเอลิเมนต์สามมิติ..	38
3.2	การระบุชื่อจุดของเอลิเมนต์สามมิติและเอลิเมนต์สองมิติ..........................	41
3.3	พื้นผิวการวิบัติของเกณฑ์ความเสียหาย Drucker-Prager..........................	44
3.4	ทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติกของวัสดุ..........	47
3.5	วัตถุทรงกระบอกซึ่งโอบรัดด้วยท่อผนังบางรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง...	53
3.6	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในท่อผนังบาง...	55
4.1	ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย..	60
4.2	เอลิเมนต์ของวัตถุทรงกระบอกและระบบพิกัดที่ใช้..................................	60
4.3	เงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง...	61
4.4	การเปลี่ยนรูปของวัตถุในแบบจำลอง...	63
4.5	การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบความเหมาะสมของเงื่อนไขสภาวะขอบเขต...	64
4.6	การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ของจำนวนลำดับขั้นของแรงกระทำจากการให้แรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด 0.1 ม/ม.........	65
4.7	การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.............................	67
4.8	การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย............................	68
4.9	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..............................	69
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของคอนกรีต...	70
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของความเสียดทานภายในและอัตราส่วนการโอบรัด..	71
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงตามแนวแกนและหน่วยการยืดตัวตามแนวแกนของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..	73
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอัตราส่วนการโอบรัด..	74
4.14	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบ..............	75

ภาพที่		หน้า
5.1	ผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย……………………………………………	81
5.2	ผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด……..	82
5.3	ผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย……………………………………………………	83
5.4	ผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด……………………..	84
5.5	ผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย……………………………………………	85
5.6	ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด………………..	86
5.7	ผลกระทบของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย…………………………	87
5.8	ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด…………..	87
5.9	รูปแบบการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย…..	89
5.10	ผลของการลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วนการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมด……………………………………………………………	90
5.11	ผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน….....	91
5.12	ผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน……………………	92

ภาพที่		หน้า

5.13 ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน.................. 94
5.14 ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน........... 95

คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ

A_f	พื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต
A_g	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต
A_s	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว
A_{st}	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก
$[B]$	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวและการเปลี่ยนตำแหน่ง
c	การยึดเหนี่ยว (Cohesion)
C_{ijkl}	เมตริกซ์ประกอบ (Constitutive matrix) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว
C^*	ดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ (Coefficient matrix)
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกคอนกรีต
D_c	เส้นผ่าศูนย์กลางของเสา
$[D]$	เมตริกซ์สติฟเนสยืดหยุ่น (Elastic stiffness matrix)
$\{d\varepsilon^{pl}\}$	เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติก (Plastic strain)
E_c	โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต
E_{cyl}	โมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุทรงกระบอก
E_{frp}	โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
E_h	โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในทิศตามแนวขอบ
E_{ij}	โมดูลัสยืดหยุ่น
$E_{\sec}$	ซีแคนท์โมดูลัส (Secant modulus)
E_{tube}	โมดูลัสยืดหยุ่นของท่อผนังบาง
E_x	โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง x
E_y	โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง y
E_z	โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง z
E_2	ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงที่สองของความสัมพันธ์
F	ฟังก์ชันคราก (Yield function)
f'_{co}	หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด
f'_{cc}	หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

$f'_{cc(ctrl)}$ หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดของแบบจำลองควบคุม
$f'_{cc(f)}$ หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมด
$f'_{cc(p)}$ หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน
f_{frp} หน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
f_{fu} หน่วยแรงดึงประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
f_l หน่วยแรงโอบรัด
f'_l หน่วยแรงโอบรัดประสิทธิผล
f_l / f'_{co} อัตราส่วนการโอบรัด (Confinement ratio)
$f_{l,a} / f'_{co}$ อัตราส่วนการโอบรัดที่พิจารณาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
f'_{cc} / f'_{co} ประสิทธิผลการโอบรัดต่อกำลัง (Confinement effectiveness on strength)
f_y หน่วยแรงคราก (Yield stress)
f_{ys} หน่วยแรงคราก (Yield strength) ของเหล็กเสริม
G_{ij} โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่น (Shear modulus of elasticity)
G_{xy} โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ *xy*
G_{xz} โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ *xz*
G_{yz} โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ *yz*
I_{3x3} เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) ขนาด 3×3
k_c สัมประสิทธิ์ลดหน่วยแรงประสิทธิผล
$\left[K_e\right]$ เมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์
$\left[K_i^T\right]$ เมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ที่ถูกปรับตามการเปลี่ยนตำแหน่ง
L ความยาวของทรงกระบอกคอนกรีต (มม)
n จำนวนชั้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
n_s จำนวนแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
$n_{s(i)}$ จำนวนแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรูปแบบที่ *i*
P_n กำลังรับแรงอัดระบุ (Nominal compressive load)
r^2 สัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient of determination)
s ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก
$\{s\}$ เวกเตอร์หน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviatoric stress vector)
s' ระยะห่างระหว่างขอบของเหล็กปลอก
s_{frp} ระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_f ความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} ความหนาระบุ (Nominal thickness) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$\{u\}$ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement vector)

U_{co} งานภายนอก (External work) เนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต

U_{cc} งานภายนอกเนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต

$u_{r(2)}$ การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของท่อผนังบาง

U_{sc} งานภายนอกเนื่องจากการแตกหัก (Fracture) ของเหล็กตามยาว (Longitudinal steel) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต

U_{sh} พลังงานหน่วยการหดตัวภายใน (Internal strain energy) เนื่องจากการโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต

u_z^* การรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง

W_{frp} ความกว้างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$W_{frp(i)}$ ความกว้างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรูปแบบที่ *i*

α_x สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง *x*

α_y สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง *y*

α_z สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง *z*

β ค่าคงที่ของวัสดุ

$\{\varepsilon\}$ เวกเตอร์หน่วยการหดตัวรวม (Total strain vector)

ε_{co} หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

ε_{cc} หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

$\varepsilon_{cc(ctrl)}$ หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดของแบบจำลองควบคุม

$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$ ประสิทธิผลการโอบรัดต่อความเหนียว (Confinement effectiveness on ductility)

$\{\varepsilon^{el}\}$ เวกเตอร์หน่วยการหดตัวอิลาสติก (Elastic strain vector)

ε_h หน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ε_{ij} สนามหน่วยการหดตัว (Strain field)

ε_{fe} หน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ

ε_{fu} หน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ε_r หน่วยการหดตัวตามแนวรัศมี (Radial strain)

ε_t หน่วยการหดตัวส่งผ่าน

ε_x หน่วยการหดตัวในทิศทาง *x*

ε_{xy} หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ *x*y

ε_{xz} หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ *x*z

ε_y หน่วยการหดตัวในทิศทาง *y*

ε_{yz} หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ yz

ε_z หน่วยการหดตัวในแนวแกน (Axial strain)

ε_θ หน่วยการหดตัวตามแนวขอบ (Hoop strain)

$\varepsilon_{\theta(tube)}$ หน่วยการหดตัวตามแนวขอบของท่อผนังบาง

ϕ ตัวคูณลดกำลัง (Strength reduction factor)

φ มุมของความเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)

φ_f มุมไดลาแทนซี (Dilatancy angle)

κ_a ตัวประกอบประสิทธิผลในการคำนวณหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

κ_b ค่าตัวประกอบประสิทธิผลในการคำนวณหน่วยการหดตัวประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

κ_{frp} ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

κ_ε ตัวประกอบประสิทธิผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างหน่วยการหดตัวประลัยที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการทดลอง

λ ตัวคูณพลาสติก (Plastic multiplier)

ν_c อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

ν_{cyl} อัตราส่วนปัวซองของวัตถุทรงกระบอก

ν_{ij} อัตราส่วนปัวซอง (Poisson’s ratio)

$\nu_{\sec}$ อัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson’s ratio)

ν_{tube} อัตราส่วนปัวซองของท่อผนังบาง

ρ_{sl} ปริมาณการเสริมเหล็กตามยาว

ρ_{st} อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเหล็กปลอกและปริมาตรคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

$\{\sigma\}$ เวกเตอร์หน่วยแรง (Stress vector)

σ_a	หน่วยแรงในแนวแกน (Axial stress)
σ_{ij}	สนามหน่วยแรง (Stress field)
$\sigma_{ij(cyl)}$	สนามหน่วยแรงของวัตถุทรงกระบอก
σ_r	หน่วยแรงตามแนวรัศมี (Radial stress)
σ_x	หน่วยแรงในทิศทาง *x*
σ_{xy}	หน่วยแรงเฉือนบนระนาบ *xy*
σ_{xz}	หน่วยแรงเฉือนบนระนาบ *xz*
σ_y	หน่วยแรงในทิศทาง *y*
σ_z	หน่วยแรงในทิศทาง *z*
σ_m	หน่วยแรงเฉลี่ย (Mean stress)
σ_θ	หน่วยแรงตามแนวขอบ (Hoop stress)
$\sigma_{\theta(tube)}$	หน่วยแรงตามขอบของท่อผนังบาง
ψ_f	ตัวคูณประกอบกำลังของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
$\frac{\Delta S_p}{\Delta S_f}$	การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมด
Δt	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
$\{\Delta u_i\}$	การเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง
$\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันศักย์พลาสติก (เดิม: ฟังก์ชันคราก) เทียบกับสภาวะหน่วยแรง

บทที่ 1

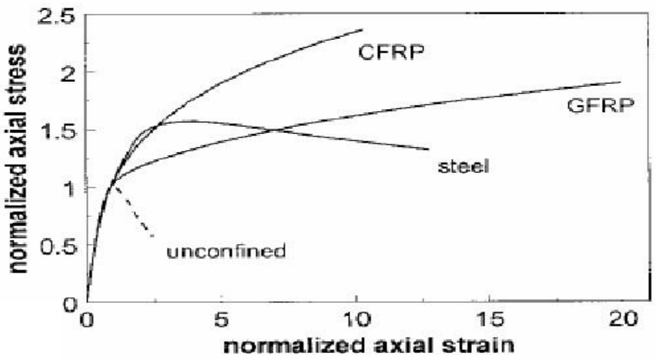
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เสาเป็นองค์อาคารซึ่งทำหน้าที่รับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกของคานถ่ายลงสู่เสาชั้นล่างของอาคารหรือเสาตอม่อในกรณีที่เป็นเสาระดับพื้นดิน ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมบริเวณรอบหรือการใช้โครงสร้างผิดวัตถุประสงค์เป็นเหตุให้ความสามารถในการรับแรงของเสาลดลงและธรรมชาติของเสา โดยเฉพาะเสาคอนกรีต เมื่อรับแรงอัดในแนวแกนทำให้เสาเกิดการขยายออกทางด้านข้าง (Poisson's effect) และเกิดการพังทลายเมื่อแรงกระทำถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่ไม่ถูกโอบรัด (Unconfined compressive strength, $f_{co}^{'}$) ของคอนกรีตซึ่งทราบจากการทดสอบ นักวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันได้เสนอแนวคิดการเสริมกำลังหรือซ่อมบำรุงเสาคอนกรีตโดยการโอบรัดเสาด้วยวัสดุต่างๆเพื่อรับการขยายตัวด้านข้างของเสาทำให้มีสามารถในการรับแรงกระทำได้มากขึ้นรวมทั้งเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวของเสา

แนวทางการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเริ่มต้นจากการหุ้มเสาด้วยคอนกรีต (Concrete encasement) หรืออีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มระยะหุ้ม (Covering) ให้เสา โดยส่วนของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นสามารถใส่เหล็กเสริมหรือเหล็กตะแกรงเพื่อประสิทธิภาพในการรับแรงของส่วนโครงสร้างที่มากขึ้นได้อีก ส่งผลดีต่อการต้านเพลิงไหม้ การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี ดำเนินการได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ผลเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเพิ่มน้ำหนักให้โครงสร้างรวม รวมทั้งพื้นที่ใช้สอยบางส่วนลดลงเพื่อใช้ในการขยายหน้าตัดของส่วนโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง ต่อมามีการติดตั้งเหล็กเพื่อเสริมกำลังรอบเสา (Steel jacketing) โดยใช้อีพ็อกซี่ (Epoxy) เป็นวัสดุประสานระหว่างผิวสัมผัสเหล็กและเสาคอนกรีต ชิ้นส่วนของเหล็กสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางเช่น เหล็กแผ่น (Steel plates) เหล็กรางน้ำ (Channels) เหล็กฉาก (Angles) หรือเหล็กหน้าตัดประกอบ (Built-up members) โดยที่การเสริมกำลังในลักษณะนี้จัดเป็นแนวทางการเสริมกำลังเชิงรับ (Passive reinforcement) เพราะชิ้นส่วนเหล็กที่ติดตั้งเพิ่ม ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงกระทำจนกว่าเสาคอนกรีตเริ่มเกิดการเสียรูปหรือไม่สามารถรับแรงได้ต่อไป แม้ว่าการเสริมกำลังด้วยเหล็กจะไม่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักโครงสร้างมากนัก แต่ปัญหาหลักของวิธีนี้คือเหล็กมีโอกาสผุกร่อนในสภาพแวดล้อมได้ง่าย การติดตั้งที่ยุ่งยาก ใช้เวลาหลายวันสำหรับการติดตั้งในเสาหนึ่งต้น ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานหากติดตั้งผิดพลาดอาจมีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายบานปลาย ทำให้พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymer – FRP) เป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่มาก ต้านทานการ

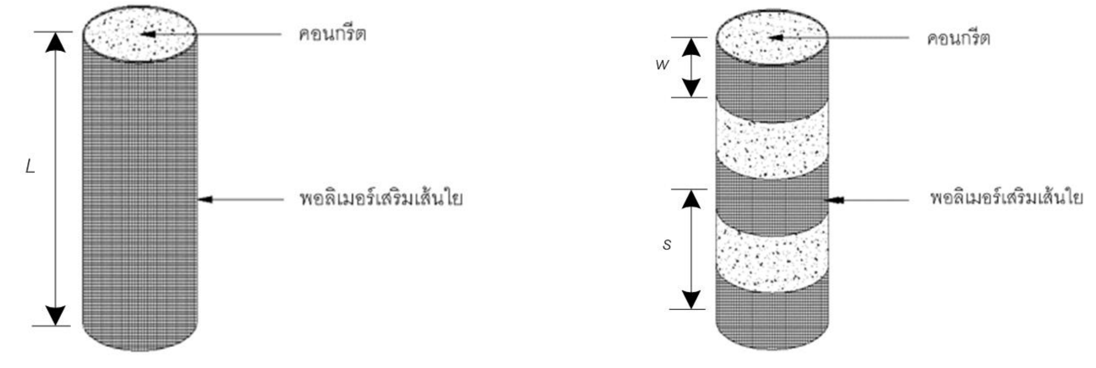
กัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมได้ดี ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่แพง และติดตั้งได้ง่ายรวดเร็ว โดยในหนึ่งวันสามารถติดตั้งเข้ากับเสาได้หลายต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานโดยสังเขปของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (Unconfined concrete) คอนกรีตโอบรัดด้วยเหล็ก (Steel-confined concrete) และคอนกรีตโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริม เส้นใย (FRP-confined concrete) ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว (Stress-strain relationship) เป็นไปตามภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีต
ที่ถูกโอบรัดด้วยวัสดุต่างๆ [1]

นอกเหนือจากแนวทางในการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สิ่งที่ต้องพิจารณาคือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด รวมทั้งคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และศึกษาคุณสมบัติของเอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS [2] ที่เหมาะสมต่อการจำลองพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และการใช้เงื่อนไขสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ที่เหมาะสมกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งรายละเอียดในข้างต้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เกณฑ์การครากของคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเมื่อรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement control) ตามแนวแกน และตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขสภาวะขอบเขตโดยเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยของปัญหาทางกลศาสตร์วัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สมมติให้คอนกรีต วัสดุประสาน และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear

elastic) ซึ่งกล่าวต่อไปในบทที่ 3 และนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เงื่อนไขสภาวะขอบเขตอย่างเหมาะสม ไปปรับปรุงเป็นแบบจำลองที่พิจารณาเกณฑ์การครากเพื่อจำลองพฤติกรรมของวัสดุให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง รวมถึงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องในอดีต และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว สามารถใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆอันประกอบด้วย ความหนา โมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กำลังรับแรงอัดที่ไม่ถูกโอบรัดของคอนกรีต ระยะห่างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นต้น ต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่อไป เนื่องจากตัวแปรต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ล้วนแต่เป็นสิ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของทรงกระบอกคอนกรีตทั้งในด้านกำลังและความเหนียวหลังการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งสิ้นโดยเฉพาะระยะห่างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งพบในทรงกระบอกคอนกรีตที่มีการโอบรัดบางส่วน (Partial confinement) ด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยลดค่าใช้จ่ายของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลงในขณะที่คุณสมบัติของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดมีความแตกต่างจากทรงกระบอกคอนกรีตที่มีการโอบรัดทั้งหมด (Full confinement) ด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งภาพที่ 1.2 แสดงลักษณะของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



(ก) การโอบรัดทั้งหมด (ข) การโอบรัดบางส่วน

ภาพที่ 1.2 ลักษณะการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาสมการที่ใช้ในการออกแบบเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (ACI 440.2R-08 [3])
2. พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
3. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆประกอบด้วย ความหนา โมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยการยืดตัวประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กำลังรับแรงอัดที่ไม่ถูกโอบรัดของคอนกรีต รวมทั้งระยะห่างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นต้น ต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. พิจารณาเฉพาะแรงกระทำในระยะสั้น
2. ไม่พิจารณาอิทธิพลของสภาพแวดล้อม
3. ทรงกระบอกคอนกรีตไม่เกิดการวิบัติแบบเปราะ

1.4 แนวทางดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบเสริมกำลังเสาด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามแนวทางของ ACI 440.2R-08 [3] และพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
2. รวบรวมผลการทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากงานวิจัยที่ผ่านมา
3. ทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลของการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ทำการศึกษาเกณฑ์การครากของคอนกรีต ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเอลิเมนต์ที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [2]
5. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งปรับแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบในอดีต
6. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัด โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
7. ศึกษาความเหมาะสมของสมการของ ACI 440.2R-08 [3] สำหรับทำนายกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
8. สรุปผลการวิจัย และเขียนบทความวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดภายใต้แรงอัด

สิ่งสำคัญในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุแบบไร้เชิงเส้น (Non-linear) คือการป้อนข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด มีดังนี้

Popovics [4] สร้างสมการต้นแบบเพื่อทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดแกนเดียวโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ช่วยลดค่าความผิดพลาดระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบในอดีต และคำตอบจากสมการที่เสนอ สามารถเขียนหน่วยแรงให้อยู่ในฟังก์ชันของหน่วยการหดตัวได้ดังนี้

$$f_c = \frac{n f'_{co}\left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)}{n-1+\left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)^{nk}} \tag{2.1}$$

โดยที่ k = 1 เมื่อ $0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{co}$

k = $0.67+\dfrac{f'_{co}}{62}$ เมื่อ $\varepsilon_c > \varepsilon_{co}$

ε_{co} = หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

= $\dfrac{f'_{co}}{E_c}\dfrac{n}{n-1}$

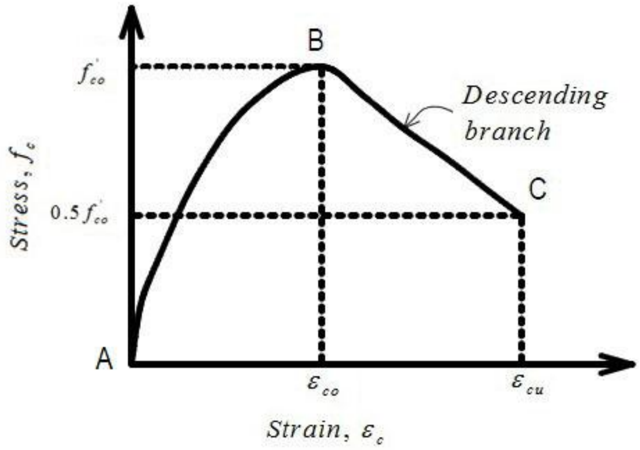
n = $0.8+\dfrac{f'_{co}}{17}$

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

= $6900+3320\sqrt{f'_{co}}$

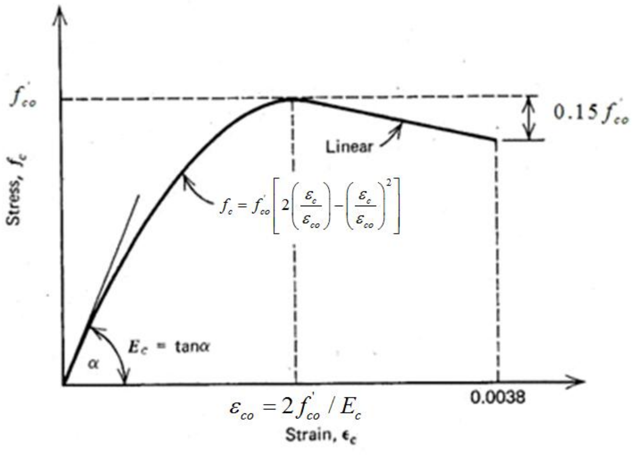
f'_{co} = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Popovics [4] เป็นไปตาม ภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ซึ่งเสนอโดย Popovics [4]

Park และ Paulay [5] พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของ Hognestad [6] จากที่ได้เสนอว่า ช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น (Strain softening, $\varepsilon_{co} \le \varepsilon_c \le 0.0038$) มีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะเชิงเส้นดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด เสนอโดย Hognestad [6]

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตในช่วงที่หน่วยแรงเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น (Strain hardening, $0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{co}$) เป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$f_c = f_{co}^{'}\left[2\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)^2\right] \tag{2.2}$$

เนื่องจากหน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากหน่วยการหดตัวที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า ε_{co} ซึ่ง Park และ Paulay [5] เสนอความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น เป็นไปดังสมการที่ (2.6)

$$f_c = f_{co}^{'}\left[1-\frac{0.15}{(0.0038-\varepsilon_{co})}(\varepsilon_c-\varepsilon_{co})\right] \tag{2.3}$$

โดยที่	E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)
		=	$4734\sqrt{f_{co}^{'}}$
	$f_{co}^{'}$	=	หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)
	ε_{co}	=	หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด
		=	$\dfrac{2f_{co}^{'}}{E_c}$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Popovics [4] สามารถอธิบายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดได้ในช่วงที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดมีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 125 เมกะปาสคาล [7] ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Hognestad [6] ไม่มีรายงานแสดงความสามารถในการอธิบายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ส่งผลให้การวิจัยเลือกใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Popovics [5] ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดภายใต้แรงอัด

นักวิชาการในอดีตพยายามพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวเพื่อทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อยๆและความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ถูกเสนอ มีความจำเป็นต้องตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรม เปรียบเทียบโดยใช้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน อีกทั้งสมการความสัมพันธ์ในบางงานวิจัย มีที่มาจากการสร้างสูตรอย่างง่ายโดยอ้างอิงจากผลทดลองซึ่งทำควบคู่กัน ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการโอบรัดคอนกรีตด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในรูปแบบต่างๆสามารถใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีประสิทธิภาพต่อการทำนายพฤติกรรมของปัญหาเฉพาะทางต่อไป โดยการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเมื่อโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้แรงอัด มีรายละเอียด ดังนี้

Richart และคณะ [8] พบว่าคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยเพิ่มขึ้นเมื่อรับความดันน้ำสถิตย์ (Hydrostatic pressure) และเสนอสมการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อถูกโอบรัดโดยความดันน้ำสถิตย์ และหน่วยการหดตัวในขณะที่เกิดหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อถูกโอบรัดโดยความดันน้ำสถิตย์ ดังนี้

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \tag{2.4}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}}\right) \tag{2.5}$$

โดยที่ f'_{co} = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

f'_{cc} = หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

f_l = หน่วยแรงโอบรัด (เมกะปาสคาล)

k_1 = 4.1

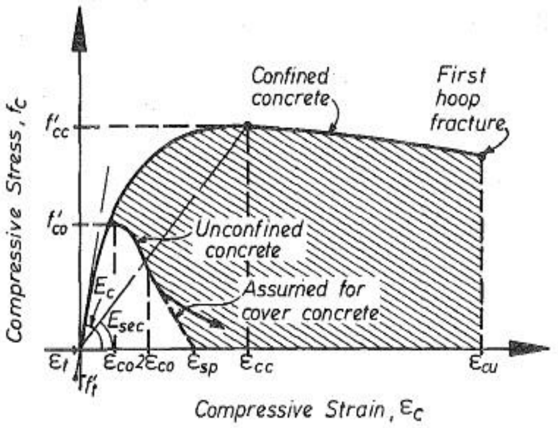
k_2 = $5k_1$

ε_{co} = หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตไม่ถูกโอบรัด

ε_{cc} = หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

ข้อจำกัดของสมการคือ k_1 และ k_2 เกิดจากค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งไม่ครอบคลุมกรณีการเสริมกำลังทั่วไป และลักษณะการเสริมกำลังแบบโอบรัดด้วยความดันน้ำสถิตย์ สามารถทำได้ยากในความเป็นจริง แต่การเสนอสมการในข้างต้นก่อให้เกิดแรงผลักดันเพื่อพัฒนาการทำนายกำลังของคอนกรีตเมื่อถูกโอบรัดเชิงรับต่อไป

Mander และคณะ [9] ปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดซึ่งเสนอโดย Popovics [10] เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กของ Mander และคณะ [9] แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Mander และคณะ [9]

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในช่วง $0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{cc}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \tag{2.6}$$

โดยที่ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

= $5000\sqrt{f'_{co}}$

E_{sec} = ซีแคนท์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)

= $\dfrac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$

r = $\dfrac{E_c}{E_c - E_{\sec}}$

$x = \dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$

ε_{cc} = หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

Mander และคณะ [9] ตั้งสมมติฐานว่า คอนกรีตเสริมเหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด โดยทำการดัดแปลงสมการของ Popovics [4] ให้สามารถทำนายหน่วยแรงได้ถึงค่าหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด และตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ (2.6) คือ หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด และหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$f'_{cc} = f'_{co}\left(-1.254 + 2.254\sqrt{1+\frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2\frac{f'_l}{f'_{co}}\right) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1+5\left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1\right)\right) \quad (2.8)$$

หน่วยแรงโอบรัดประสิทธิผลในสมการที่ (2.7) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$f'_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad (2.9)$$

ซึ่งสัมประสิทธิ์ k_e และ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเหล็กปลอกและปริมาตรคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (ρ_{st}) ในสมการที่ (2.9) คำนวณได้จาก

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2}{1 - \rho_{sl}} \quad (2.10)$$

$$\rho_{st} = \frac{A_{st} D}{\frac{\pi}{4} D^2 s} = \frac{4A_{st}}{Ds} \quad (2.11)$$

โดยที่ A_{st} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (ตร. มม)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัดเสา (มม)

= D_c

s = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (มม)

s' = ระยะห่างระหว่างขอบของเหล็กปลอก (มม)

ρ_{sl} = ปริมาณการเสริมเหล็กตามยาว

ρ_{st} = อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเหล็กปลอกและปริมาตรคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

นอกจากนี้ Mander และคณะ [9] ใช้หลักการพลังงานเพื่อหาค่าหน่วยการหดตัวประลัย (Ultimate confined compressive strain, ε_{cu}) ดังสมการที่ (2.12)

$$U_{sh} = U_{cc} + U_{sc} - U_{co} \tag{2.12}$$

โดยที่ U_{co} = งานภายนอก (External work) เนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

U_{cc} = งานภายนอกเนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

U_{sc} = งานภายนอกเนื่องจากการแตกหัก (Fracture) ของเหล็กตามยาว (Longitudinal steel) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

U_{sh} = พลังงานหน่วยการหดตัวภายใน (Internal strain energy) เนื่องจากการโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

จากการทดสอบคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด [9] พบว่า งานภายนอกเนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{co} = 0.017\left(A_g - A_s\right)\sqrt{f'_{co}} \tag{2.13}$$

งานภายนอกเนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจนกระทั่งถึงหน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีต

$$U_{cc} = \left(A_g - A_s\right)\int_0^{\varepsilon_{cu}} f_c d\varepsilon_c \tag{2.14}$$

งานภายนอกเนื่องจากการแตกหักของเหล็กตามยาวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของเหล็กจนกระทั่งเหล็กเกิดหน่วยการหดตัวเท่ากับหน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีต

$$U_{sc} = \left(A_g - A_s\right)\int_0^{\varepsilon_{cu}} f_s d\varepsilon_c \tag{2.15}$$

จากการทดสอบหน่วยแรงที่ทำให้เหล็กปลอกเกิดแตกหัก Mander และคณะ [9] พบว่า พลังงานหน่วยการหดตัวเฉลี่ยที่ทำให้เหล็กปลอกเกิดแตกหักหรือพลังงานหน่วยการหดตัวภายในเนื่องจากการโอบรัดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 110 เมกะจูล / ลบ.ม

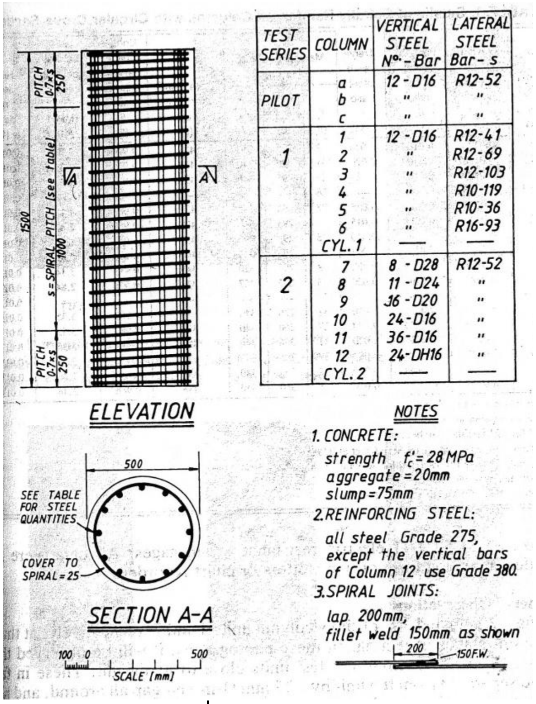
$$U_{sh} = 110\rho_{st}\left(A_g - A_s\right) \tag{2.16}$$

แทนค่าสมการที่ (2.13) ถึง (2.16) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้

$$110\rho_{st} = \int_0^{\varepsilon_{cu}} f_c d\varepsilon_c + \int_0^{\varepsilon_{cu}} f_s d\varepsilon_c - 0.017\sqrt{f'_{co}} \tag{2.17}$$

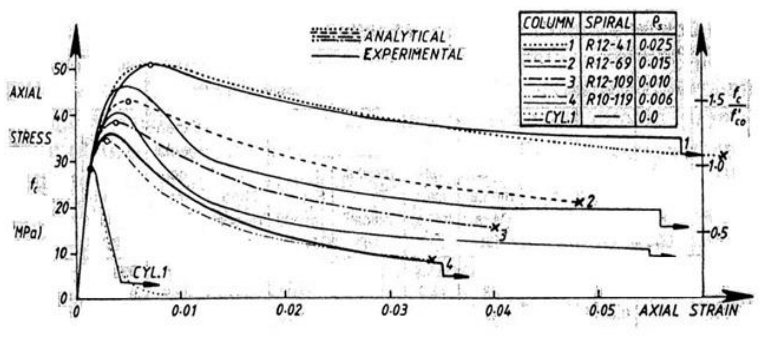
จากสมการที่ (2.17) สามารถคำนวณหาหน่วยการหดตัวประลัยได้ โดยที่ f_c คือฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด จากสมการที่ (2.12) และ f_s คือฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของเหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย Mander และคณะ [9] ถูกใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดวงกลมรับหน่วยการหดตัวกระทำที่อัตรา 0.013 เปอร์เซ็นต์ / วินาที โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบของ Mander และคณะ [10]

จากการทดสอบของ Mander และคณะ [10] พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสนอโดย Mander และคณะ [9] สามารถทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับหน่วยการหดตัวกระทำได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบ [10] ดังภาพที่ 2.5 และการเพิ่มปริมาณการโอบรัดของเหล็กปลอก ทำให้หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด และหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดเพิ่มขึ้น



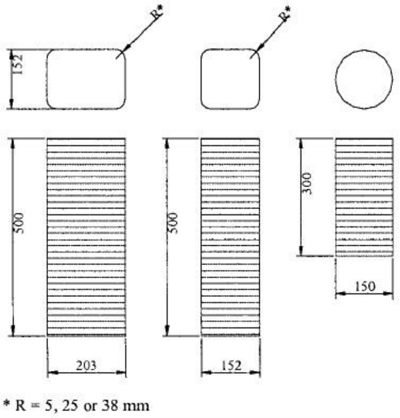
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณหน่วยแรงจากสมการและผลจากการทดสอบของ Mander และคณะ [10]

Nanni และ Bradford [11] นำเสนอผลการทดสอบคอนกรีตหน้าตัดวงกลมเมื่อถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าการเสริมกำลังโดยใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและความเหนียวโดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของการทดสอบโดยใช้สมการของ Mander และคณะ [9] พบว่าการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดในทรงกระบอกคอนกรีตที่มีอัตราส่วนการโอบรัดสูง ได้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบเนื่องจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Mander และคณะ [9] พิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก นอกจากนี้ Nanni และ Bradford [11] สังเกตผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบ พบว่าหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นสองช่วงคือ ช่วงที่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่แสดงผลการโอบรัด และช่วงที่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงผลการโอบรัด

Samaan และคณะ [12] พิจารณาหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดด้วยเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้อัตราส่วนการโอบรัด (Confinement ratio, $f_l \,/\, f_{co}^{'}$) ที่ใกล้เคียงกัน พบว่าเหล็กให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง (Confinement effectiveness on strength, $f_{cc}^{'} \,/\, f_{co}^{'}$) ดีกว่า ในขณะที่การใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้เปรียบทางด้านกำลังรับหน่วยแรงตามแนวขอบสูงกว่าการโอบรัดด้วยเหล็กเมื่อให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณพลังงานที่เก็บสะสมของเหล็กมีค่ามากกว่า รวมทั้งหน่วยการหดตัวในเชิงปริมาตร (Volumetric strain) อยู่ในสภาวะไม่เสถียรเมื่อเหล็กที่ใช้โอบรัดเกิดการคราก แต่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถขยายตัวต่อไปได้หลังเกิดหน่วยแรงอัดประลัยที่ไม่มีการโอบรัดขึ้นในคอนกรีต ทั้งสองปัจจัยนี้บ่งบอกถึงพฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อมีการโอบรัดต่างกัน ซึ่งสมการของ Samaan และคณะ [12] มีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวแบบไร้เชิงเส้นโดยเส้นสัมผัสกราฟช่วงแรกมีความชันตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับปรุงจากข้อกำหนดในอดีตเพื่อลดความผิดพลาดอันเกิดจากค่าประมาณโมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งสูงเกินความเป็นจริง และช่วงที่สองขึ้นอยู่กับสติฟเนสตามแนวขอบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย รวมทั้งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและหน่วยแรงด้านข้างตามที่ Richart และคณะ [8] ได้สมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง พบว่าค่าดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของหน่วยแรงตามแนวขอบได้จากผลการทดสอบ สมการที่เสนอใช้อธิบายพฤติกรรมได้ทั้งในทิศทางในแนวแกนและแนวรัศมี

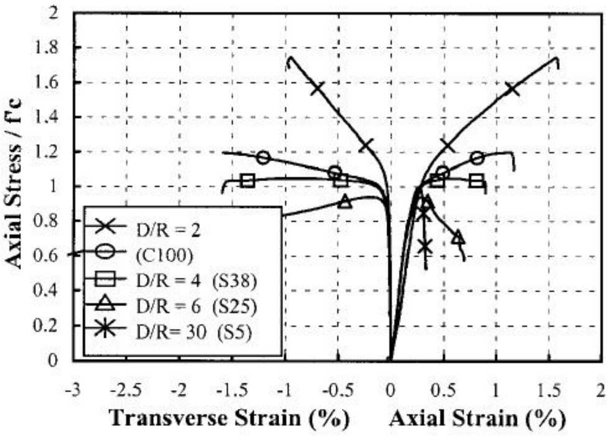
Xiao และ Wu [13] ประยุกต์ใช้กฎของฮุคในรูปแบบทั่วไป (Generalized Hooke's law) จากทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of elasticity) เพื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการโอบรัดและประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังซึ่งได้จากการทดลองคอนกรีตโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่า กราฟผลการทดลองในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงเส้นสัมผัสที่มีความชันเท่ากับ 166 ซึ่งเริ่มต้นจากจุดกำเนิดและข้อมูลในช่วงที่สองมีค่าลู่เข้าสู่กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงจากการวิเคราะห์ความถดถอยสามารถใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวคำนวณหน่วยการหดตัวสำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น อีกทั้งพิจารณาข้อมูลจากผลการทดลองและสมการจากทฤษฎีความยืดหยุ่นซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางวัสดุคือ หน่วยแรงอัดประลัย หน่วยแรงตามแนวขอบหน่วยการหดตัวของคอนกรีตทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี (Radial strain, ε_r) เพื่อสร้างเป็นความสัมพันธ์ในช่วงที่หน่วยแรงเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคือสมการของ Xiao และ Wu [13] มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นสองช่วง (Bilinear) โดยใช้ค่าหน่วยแรงอัดประลัยในการแบ่งช่วงระหว่างสมการทั้งสอง ต่างจากความสมการของ Samaan และคณะ [12] ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในลักษณะไร้เชิงเส้นและทำนายพฤติกรรมได้โดยใช้เพียงสมการเดียว

Rochette และ Labossière [14] ศึกษาอิทธิพลของรัศมีโค้ง (Corner radius) ที่มุมเสาโดยพิจารณาเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการลบมุมเพื่อโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยร่วมกับทรงกระบอกคอนกรีต ดังภาพที่ 2.6



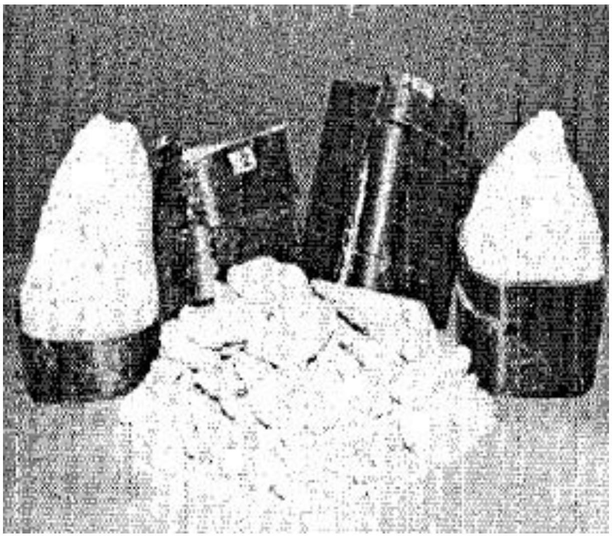
ภาพที่ 2.6 ชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Rochette และ Labossière [14]

จากการทดสอบพบว่า หน้าตัดเสาที่มีเหลี่ยมมุมเกิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวในลักษณะที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้นหลังจากหน่วยการหดตัวได้ผ่านช่วงที่เกิดหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตแล้ว ต่างจากเสาที่ลบมุมเพื่อเพิ่มรัศมีโค้ง ซึ่งมีแนวโน้มในการเกิดพฤติกรรมที่หน่วยแรงเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวเมื่อลบมุมเสา
เพื่อเพิ่มรัศมีโค้ง [14]

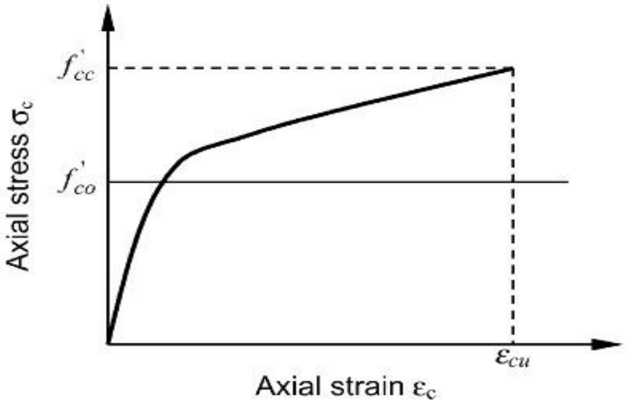
Rochette และ Labossière [14] พบว่า คุณสมบัติของหน้าตัดที่มีความโค้งมนช่วยเพิ่มประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังให้สูงขึ้น กล่าวคือ หลังการเสริมกำลังโดยโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คอนกรีตหน้าตัดวงกลมสามารถรับหน่วยแรงประลัยเมื่อถูกโอบรัดได้สูงกว่าคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม รวมทั้งการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาเมื่อถูกโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งสรุปผลการทดสอบได้ว่า การโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในปริมาณมากช่วยเพิ่มประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังได้โดยตรง แต่ก่อให้เกิดการการวิบัติได้อย่างฉับพลันดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การวิบัติแบบฉับพลัน จากผลการทดสอบของ Rochette และ Labossière [14]

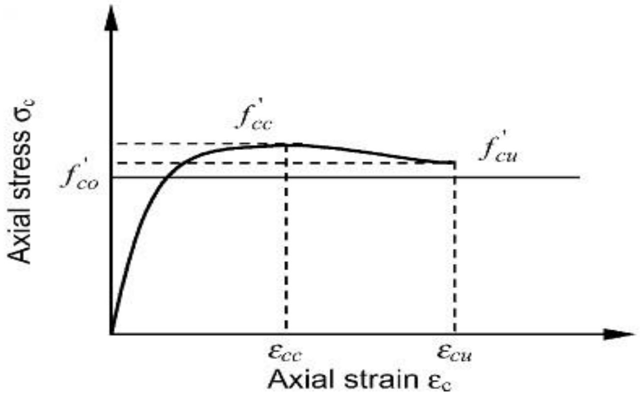
ผลการทดสอบของ Rochette และ Labossière [14] ตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้สมการความสัมพันธ์จาก Rochette และ Labossière [15]

Lam และ Teng [16] รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่โอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จากการพิจารณาผลการทดสอบโดยรวม พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ ดังภาพที่ 2.9

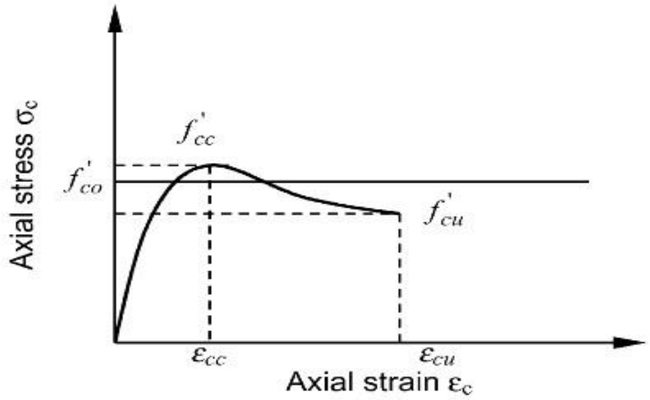


ก. รูปแบบเพิ่มขึ้น (Increasing type)

ภาพที่ 2.9 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเสนอโดย Lam และ Teng [16]



ข. รูปแบบลดลง (Decreasing type) โดยที่ $f'_{cu} > f'_{co}$



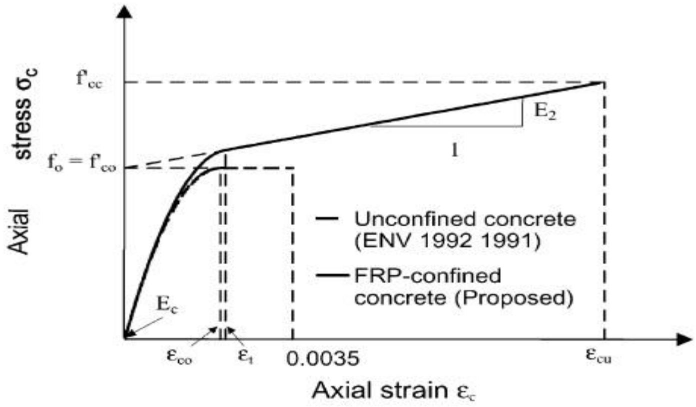
ค. รูปแบบลดลง (Decreasing type) โดยที่ $f'_{cu} < f'_{co}$

ภาพที่ 2.9 (ต่อ) รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเสนอโดย Lam และ Teng [16]

การเสริมกำลังโดยใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยในระดับที่มีอัตราส่วนการโอบรัดเพียงพอ (ซึ่งจะกล่าวต่อไปในส่วนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย) ส่งผลให้พฤติกรรมของคอนกรีตที่เสริมกำลังแล้ว มีลักษณะตามภาพที่ 2.9 ก. สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้โดยตรง และหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด เกิดขึ้นที่หน่วยการหดตัวประลัย หรือ ณ เวลาที่เสาเกิดการวิบัติพอดี ถึงแม้การโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีปริมาณเพียงพอตามข้อกำหนดในข้างต้น มีรายงาน [11] กล่าวถึงความเป็นไปได้ที่เสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มีพฤติกรรมดังภาพที่ 2.9 ข. ในทางปฏิบัติ กล่าวคือหน่วยแรงขณะเกิดการวิบัติมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด เนื่องจากผลของการผ่อนหน่วยแรง (Stress relaxation) เนื่องจากช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโครงสร้างรับกำลังและความเหนียวมากขึ้นจากเดิม ต่างจากภาพที่ 2.9 ค. แสดงถึงพฤติกรรม

ของเสาคอนกรีตโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่เพียงพอ โดยหน่วยแรงสุดท้ายที่เกิดขึ้นขณะวิบัติ มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อถูกโอบรัด

นอกจากนี้ Lam และ Teng [16] พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของเสาคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอย่างเพียงพอหรือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวในรูปแบบเพิ่มขึ้น โดยสมมติให้ช่วงก่อนหน่วยแรงในคอนกรีตถึงค่าประลัย มีความสัมพันธ์ในลักษณะพาราโบลาเกิดจากผลของการเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และเปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้นหลังเกิดค่าดังกล่าว ซึ่งพิกัดของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่เป็นจุดต่อระหว่างความสัมพันธ์ทั้งสองช่วงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน เมื่อลากเส้นความสัมพันธ์ในช่วงที่สองไปตัดกับแกนของหน่วยแรง สามารถอ่านค่าหน่วยแรงได้เท่ากับ หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต และเสามีการวิบัติในขณะที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อถูกโอบรัดจากสมมติฐานดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวเป็นไปดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด เสนอโดย Lam และ Teng [16]

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว ของ Lam และ Teng [16] มีรายละเอียดดังนี้

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f'_{co}} \varepsilon_c^2 \tag{2.18}$$

$$f_c = f'_{co} + E_2 \varepsilon_c \tag{2.19}$$

$$\varepsilon_t = \frac{2 f_{co}^{'}}{E_c - E_2} \quad (2.20)$$

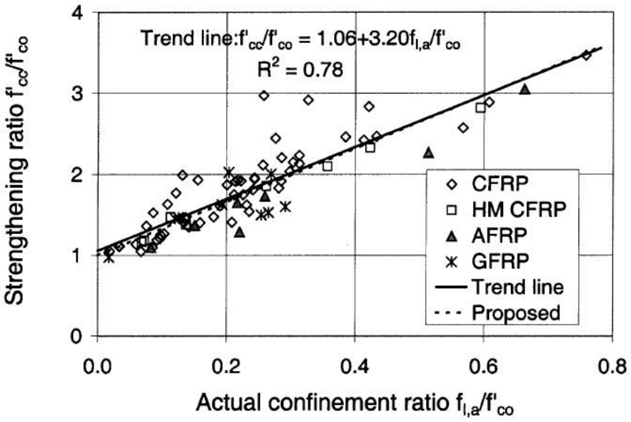
$$E_2 = \frac{f_{cc}^{'} - f_{co}^{'}}{\varepsilon_{cu}} \quad (2.21)$$

โดยที่	E_2	=	ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงที่สองของความสัมพันธ์ (เมกะปาสคาล)
	$f_{cc}^{'}$	=	หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)
	$f_{co}^{'}$	=	หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)
	ε_t	=	หน่วยการหดตัวส่งผ่าน
	ε_{cu}	=	หน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีต
		=	ε_{cc}

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงแรกและช่วงที่สอง เป็นไปดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ โดยมีค่าหน่วยแรงส่งผ่านในการแบ่งช่วงทั้งสอง คำนวณจากสมการที่ (2.20) รวมถึงความชันในช่วงที่สอง สามารถหาได้จากสมการที่ (2.21) และเมื่อนำสมการที่ (2.4) หารตลอดด้วย $f_{co}^{'}$ พบว่า สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในลักษณะของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งถูกทำให้เป็นมาตรฐาน (Normalization) ได้ ดังนี้

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f_{co}^{'}} \quad (2.22)$$

Lam และ Teng [16] ใช้ข้อมูลการทดลองที่ผ่านมา ในการเขียนรูป (Plotting) ความสัมพันธ์ระหว่าง ($f_{l,a}$ / $f_{co}^{'}$) และ ($f_{cc}^{'}$ / $f_{co}^{'}$) เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ k_1 ดังนี้



ภาพที่ 2.11 การคำนวณสัมประสิทธิ์ k_1 ของ Lam และ Teng [16]

โดยที่ $f_l \,/\, f_{co}^{'}$ = อัตราส่วนการโอบรัด

$f_{l,a} \,/\, f_{co}^{'}$ = อัตราส่วนการโอบรัดที่พิจารณาประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

= $0.63 f_l \,/\, f_{co}^{'}$

$f_{cc}^{'} \,/\, f_{co}^{'}$ = ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

Lam และ Teng [16] พบว่าสัมประสิทธิ์ k_1 ในสมการที่ (2.22) ที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ในภาพที่ 2.11 มีค่าเท่ากับ 3.3 ดังนั้น หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.23)

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} + 3.3 f_l \tag{2.23}$$

Lam และ Teng [16] คำนวณหน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดตามข้อเสนอของ Ottosen [17] ซึ่งกำหนดให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่า ดังนี้

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_{\sec}}\left(\sigma_r - \nu_{\sec}\left(\sigma_\theta + \sigma_z\right)\right) \tag{2.24}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E_{\sec}}\left(\sigma_\theta - \nu_{\sec}\left(\sigma_r + \sigma_z\right)\right) \tag{2.25}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_{\sec}}\left(\sigma_z - \nu_{\sec}\left(\sigma_r + \sigma_\theta\right)\right) \tag{2.26}$$

โดยที่	$E_{\sec}$	=	ซีแคนท์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)
		=	$f_{co}^{'} / \varepsilon_{co}$
	n	=	จำนวนชั้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกคอนกรีต (มม)
	t_{frp}	=	ความหนาระบุ (Nominal thickness) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)
	ε_{fu}	=	หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	ε_r	=	หน่วยการหดตัวตามแนวรัศมี (Radial strain)
	ε_z	=	หน่วยการหดตัวในแนวแกน (Axial strain)
	ε_θ	=	หน่วยการหดตัวตามแนวขอบ (Hoop strain)
	σ_r	=	หน่วยแรงตามแนวรัศมี (เมกะปาสคาล)
		=	$\dfrac{2E_{frp}nt_{frp}\varepsilon_{fu}}{D}$
	σ_z	=	หน่วยแรงในแนวแกน (เมกะปาสคาล)
		=	σ_a
	σ_θ	=	หน่วยแรงตามแนวขอบ (เมกะปาสคาล)
	$\nu_{\sec}$	=	อัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson's ratio)
		=	$\dfrac{(\sigma_r/\sigma_z)-(\varepsilon_r/\varepsilon_z)}{1-2(\sigma_r\varepsilon_r/\sigma_z\varepsilon_z)+(\sigma_r/\sigma_z)}$

Ottosen [17] พบว่าหน่วยแรงในแนวรัศมีและแนวขอบมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้หน่วยการหดตัวในแนวรัศมีและแนวขอบมีค่าเท่ากัน เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (2.24) ถึง (2.26) พบว่า

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_r\left(1-\nu_{\sec}-2\nu_{\sec}^2\right)}{E_{\sec}\nu_{\sec}} - \frac{\varepsilon_r}{\nu_{\sec}} \tag{2.27}$$

ในการคำนวณหน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีต พิจารณาสภาวะประลัย (Ultimate condition) พบว่าซีแคนท์โมดูลัสที่สภาวะประลัย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.28)

$$E_{\sec u} = \frac{E_{\sec}}{1+4x} \tag{2.28}$$

ตัวแปร x ในสมการที่ (2.28) เป็นไปตามสมการที่ (2.29)

$$x = \frac{\left(\sqrt{J_2} \,/\, f_{co}^{'}\right) - 1}{\sqrt{3}} \tag{2.29}$$

โดยที่ $J_2 = \frac{\left(f_{cc}^{'} - f_l\right)^2}{3}$

แทนสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.29) พบว่า

$$x = \frac{(k_1 - 1)}{\sqrt{3}}\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right) = \frac{(k_1 - 1)}{\sqrt{3}}\left(\frac{E_{frp}t}{E_{\sec}r}\right)\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right) \tag{2.30}$$

แทนสมการที่ (2.28) และ (2.30) ลงในสมการที่ (2.27) พิจารณาสภาวะประลัย (Ultimate condition) โดยกำหนดให้หน่วยการหดตัวในแนวแกนของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ หน่วยการหดตัวประลัย และอัตราปัวซองของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนปัวซองที่สภาวะประลัย พบว่า

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = {} & \frac{\varepsilon_{fe}}{\upsilon_{\sec u}\varepsilon_{co}} + \frac{\left(1 - \nu_{\sec u} - 2\nu_{\sec u}^2\right)}{\nu_{\sec u}}\left(\frac{E_{frp}t}{E_{\sec u}r}\right)\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right) \\ & + \frac{4(k_1 - 1)}{\sqrt{3}}\frac{\left(1 - \nu_{\sec u} - 2\nu_{\sec u}^2\right)}{\nu_{\sec u}}\left(\frac{E_{frp}t}{E_{\sec u}r}\right)^2\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right)^2 \end{aligned} \tag{2.31}$$

เนื่องจากอัตราส่วนปัวซองที่สภาวะประลัย ($\nu_{\sec u}$) ไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง Lam และ Teng [16] ทำการจัดรูปสมการใหม่ ดังนี้

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = c + k_2\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right)^{\beta} \tag{2.32}$$

Lam และ Teng [16] เขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right)^{\beta}$ และ $\left(\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}\right)$ โดยใช้ข้อมูลการทดสอบที่ผ่านมา พบว่า สมการทำนายหน่วยการหดตัวประลัยที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลการทดสอบมากที่สุด เป็นไปดังสมการที่ (2.33)

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 5.53\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.45} \tag{2.33}$$

โดยที่ $f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

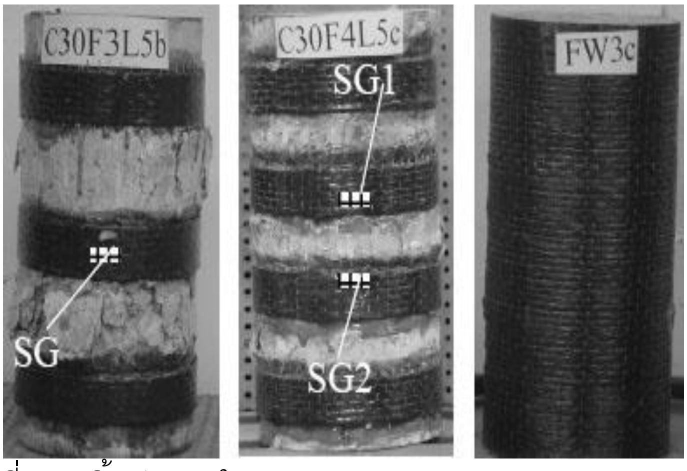
f_l = หน่วยแรงโอบรัด (เมกะปาสคาล)

ε_{co} = หน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

ε_{cu} = หน่วยการหดตัวประลัย

ε_{fe} = หน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ

Barros และ Ferreira [18] ศึกษาพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตเมื่อเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยพิจารณาการโอบรัดทั้งหมดและการโอบรัดบางส่วน ร่วมกับการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Barros และ Ferreira [18]

ตำแหน่ง SG ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.12 คือตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดหน่วยการหดตัว (Strain gauge) และจากการทดสอบของ Barros และ Ferreira [18] พบว่า ชิ้นตัวอย่างซึ่งมีแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอยู่ใกล้กันมาก มีประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง และประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว (Confinement effectiveness on ductility, $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$) ดีกว่าชิ้นตัวอย่างที่ระยะห่างระหว่างแถบมากกว่า รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด และกำลังรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ที่มีต่อประสิทธิผลการโอบรัดทั้งในด้านกำลังและความเหนียว โดย Barros และ Ferreira [18] แบ่งคอนกรีตออกเป็น 4 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางวัสดุของชิ้นตัวอย่างในการทดสอบของ Barros และ Ferreira [18]

ชื่อกลุ่ม	หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)	หน่วยแรงดึงประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)
C16S200	16	2219
C16S300	16	3894
C23S200	23	2219
C23S300	23	3894

จากการทดสอบพบว่า กลุ่ม C16S300 ให้ประสิทธิผลการโอบรัดทั้งในด้านกำลังและความเหนียวดีที่สุด และตรวจสอบความถูกต้องในการทดสอบคอนกรีตซึ่งโอบรัดบางส่วน จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย Mander และคณะ [9] ซึ่ง Barros และ Ferreira [18] ทำการปรับค่าตัวแปรในสมการเพื่อความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่โอบรัดบางส่วนโดยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยพิจารณาให้แถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่โอบรัดเสาคอนกรีต มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กปลอก ส่งผลให้ค่าที่เกี่ยวข้องกับเหล็กปลอกตามสมการที่ (2.11) ถูกปรับใช้เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับคุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามรายละเอียด ดังนี้

$$\rho_{st} = \frac{f_l}{f'_{co}} = \frac{4A_f}{Ds} = \frac{4(W_{frp} n t_{frp})}{D(W_{frp} + s_{frp})} \tag{2.34}$$

โดยที่ A_f = พื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีต (ตร. มม)

f_l = หน่วยแรงโอบรัด (เมกะปาสคาล)

n = จำนวนชั้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} = ความหนาระบุ (Nominal thickness) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

s_{frp} = ระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

W_{frp} = ความกว้างของแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

ในกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมในแนวแกน สามารถพิจารณาให้ค่าปริมาณการเสริมเหล็กในสมการที่ (2.10) มีค่าเท่ากับศูนย์ แทนค่าระยะห่างระหว่างขอบของเหล็กปลอกเกลียวด้วยระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย รวมทั้งการแทนค่าหน่วยแรงครากของเหล็กเพื่อคำนวณหาหน่วยแรงตามแนวขอบในสมการที่ (2.9) สามารถทำได้ ดังนี้

$$f_y = f_{frp} = E_{frp} k_c \varepsilon_{fu} \tag{2.35}$$

โดยที่ E_{frp} = โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)

f_{frp} = หน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)

k_c = สัมประสิทธิ์ลดหน่วยแรงประสิทธิผล

= 0.60 (การโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามชั้น)

= 0.40 (การโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยห้าชั้น)

ε_{fu} = หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

เนื่องจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำหน้าที่แทนเหล็กปลอก พิจารณาหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (f_{frp}) แทนหน่วยแรงครากของเหล็ก โดยเกิดขึ้นขณะที่เสาวิบัติหรือ ณ เวลาที่เกิดหน่วยการหดตัววิบัติ ซึ่ง Barros และ Ferreira [18] อ่านค่าดังกล่าวจากการทดสอบ เพราะหน่วยการหดตัวตลอดขอบของหน้าตัดเสา ไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมีสัมประสิทธิ์ลดหน่วยแรงประสิทธิผล (k_c) ในการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบระหว่างผลการ

ทดสอบและผลการวิเคราะห์ จากการตรวจสอบความถูกต้องพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ได้จากการทดสอบ มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ของ Mander และคณะ [9]

นอกเหนือไปจากการศึกษาดังกล่าว Barros และ Ferreira [19] พัฒนาการทดลองเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยทดสอบชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริมในแนวแกน และเหล็กปลอก ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มกำลังและความเหนียวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเช่นกัน อีกทั้งอัตราส่วนการโอบรัดและประสิทธิผลการโอบรัดทั้งในด้านกำลังและความเหนียวมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น กล่าวคือ การเพิ่มความหนาแน่นของการโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ก่อให้เกิดความสามารถในรับหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดได้โดยตรง รวมถึงทำการตรวจสอบความถูกต้องในการทดลองกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวที่เสนอโดย Lam และ Teng [16] ซึ่งทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ได้จากการทดลอง

Wu และคณะ [20] ทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตกำลังสูงที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดมีค่าอยู่ในช่วง 46 ถึง 102 เมกะปาสคาล ที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) รวมทั้งทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด ซึ่ง Wu และคณะพบว่าการเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดช่วยให้กำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด เกิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวลักษณะเดียวกับภาพที่ 2.9 ข. กล่าวคือ ทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัด เกิดช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้น และความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดไม่ขึ้นกับความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในลักษณะต่างๆภายใต้แรงอัด พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Lam และ Teng [16] มีความเหมาะสมต่อการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากสมการของ Lam และ Teng [16] สามารถทำนายพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ [19,21] ได้อย่างแม่นยำ รวมทั้ง ACI 440.2R-08 [3] เลือกใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของ Lam และ Teng [16] ซึ่งมีการ

ปรับแก้ตัวคูณประกอบลดกำลังเพื่อความเหมาะสมในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

2.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

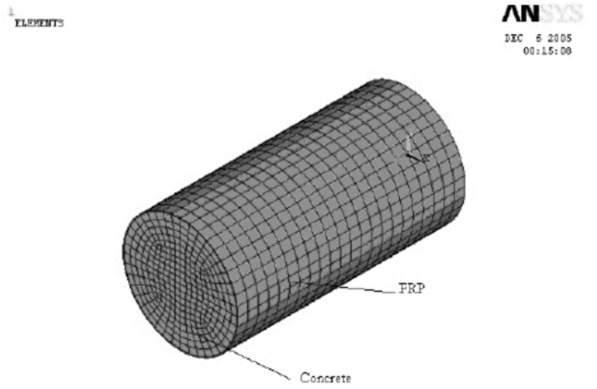
นอกเหนือไปจากการทำนายพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยใช้ผลเฉลยรูปแบบปิด (Closed-form solution) เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัว หรือแนวทางสังเกตรูปแบบการวิบัติโดยตรงจากผลทดสอบ ในปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์ได้ โดยแนวทางดังกล่าว เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อประมาณค่าของปัญหาทั่วไปซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์ย่อย มีประโยชน์ต่อการหาผลเฉลยโดยสังเขปจากปัญหาที่ไม่มีรายงานการแสดงผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมกำลังโดยการโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มีดังนี้

Becque [22] เสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยกำหนดให้คอนกรีตวิบัติภายใต้เกณฑ์การคราก Drucker-Prager ที่ไม่สอดคล้องกับกฎการไหล (Non-associative flow rule) รวมถึงคอนกรีตเกิดการหดตัวเมื่อรับหน่วยแรงอัดกระทำตามแนวแกนเนื่องจากมุมไดลาแทนซี (Dilatancy angle, φ_f) ของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย มีค่าน้อยกว่าศูนย์ โดย Becque พบว่า แบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ได้จากการทดลอง [22] มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการแบบจำลอง

Mirmiran และคณะ [23] พิจารณาเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ที่ไม่สอดคล้องกับกฎการไหล เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดย Mirmiran และคณะ [23] ศึกษาผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากมุมไดลาแทนซี จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของ

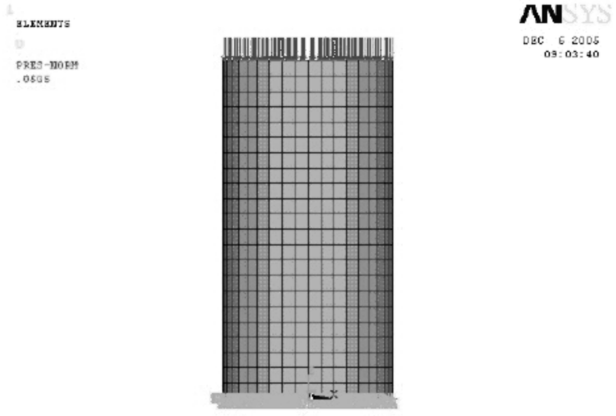
Mirmiran และคณะ [23] มีความเหมาะสมต่อการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ เมื่อมุมไดลาแทนซีมีค่าเท่ากับศูนย์

Volety และ คณะ [24] สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ในการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด สำหรับทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยสมมติให้คอนกรีตมีความยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear elastic) และคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง หรือวัสดุไอโซโทรปิค (Isotropic material) ภายใต้เกณฑ์การคราก Willam และ Warnke (Willam and Warnke failure criterion) [2] อีกทั้งจำลองพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวัสดุออโทโทรปิค (Orthotropic materials) ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ขึ้นอยู่กับทิศทางทั้งสามแกน และทำสร้างแบบจำลองสามมิติดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และ คณะ [24]

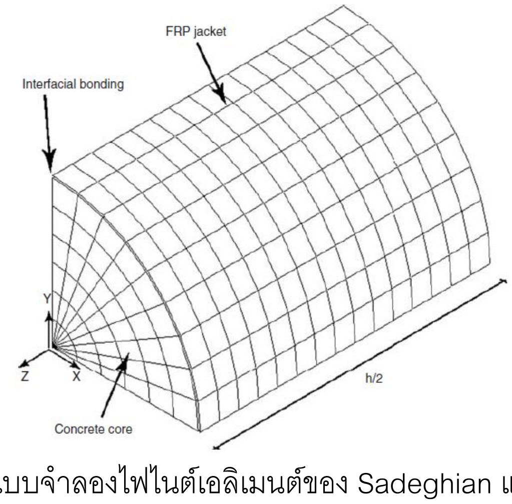
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และ คณะ [25] ตั้งสมมติฐานการใช้เงื่อนไขสภาวะขอบเขตเขตที่ใกล้เคียงกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของคอนกรีตโดยยึดรั้งดีกรีของความอิสระ (Degree of freedoms) ด้านล่างทั้งสามทิศทาง และมีแรงอัดกระทำด้านบนดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เงื่อนไขสภาวะขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และ คณะ [24]

นอกจากนี้ Volety และ คณะ [24] ทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อพัฒนาสมการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด ซึ่งมีการตรวจพบค่าความผิดพลาดประมาณ 0.2 - 6% เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดจากผลการทดสอบของ Xiao และ Wu [13] ร่วมกับ Rochette และ Labossière [14]

Sadeghian และคณะ [25] เสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หนึ่งในแปด โดยสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุไอโซโทรปิคและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวัสดุออโทโทรปิคเช่นเดียวกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Volety และ คณะ [24] อีกทั้งพิจารณาเกณฑ์การคราก Drucker-Prager และ Maximum tensile stress เพื่อใช้เป็นเกณฑ์การครากของคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ แบบจำลองของ Sadeghian และคณะ [25] แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sadeghian และคณะ [25]

จากการศึกษา Sadeghian และคณะ [25] พบว่า มุมไดลาแทนซีที่เหมาะสมต่อการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1/2 เท่าของมุมของความเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, φ) รวมทั้งการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่ผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัด

นอกเหนือจากการทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรับแรงอัดกระทำตามแนวแกน Wu และคณะ [20] ได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หนึ่งในแปด ซึ่งเป็นไปตามภาพที่ 2.16 โดยพิจารณาเกณฑ์การคราก Drucker-Prager [2] เป็นเกณฑ์การครากของคอนกรีต โดยไม่แสดงมุมไดลาแทนซีที่เลือกใช้ในแบบจำลองและสมมติให้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการวิบัติเมื่อหน่วยการหดตัวมีค่าเท่ากับ 65% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ ซึ่งจากการศึกษาได้อภิปรายผลว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดได้อย่างเหมาะสมเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ

ภาพที่ 2.16 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Wu และคณะ [20]

Mostofinejad และ Saadatmand [26] สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ของคอนกรีตอันประกอบด้วย การยึดเหนี่ยวและมุมของความเสียดทานภายในขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และมุมไดลาแทนซีที่เหมาะสมต่อการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1/2 เท่าของมุมของความเสียดทานภายใน

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยใช้เกณฑ์การคราก Drucker-Prager สำหรับคอนกรีต ซึ่งถูกเสนอจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงถึงความหลากหลายของการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ของคอนกรีต ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัด ส่งผลให้งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพิจารณาแนวทางการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ที่เหมาะสมต่อการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบต่อไป

บทที่ 3
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามแนวทางของ ACI 440.2R-08

แนวทางของ ACI 440.2R-08 [3] ใช้สมการของ Lam และ Teng [16] ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเมื่อรับแรงอัด และใช้เป็นมาตรฐานคำนวณค่าหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด เพื่อใช้ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดวงกลม เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Lam และ Teng [16] สามารถคำนวณค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งการออกแบบเพื่อเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดวงกลมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$\phi P_n = 0.85\phi\left(0.85 f'_{cc}\left(A_g - A_s\right) + f_y A_s\right) \tag{3.1}$$

$$\phi P_n = 0.8\phi\left(0.85 f'_{cc}\left(A_g - A_s\right) + f_y A_s\right) \tag{3.2}$$

โดยที่ A_g = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต (ตร. มม)

A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว (ตร. มม)

f'_{cc} = หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

f_y = หน่วยแรงคราก (Yield strength) ของเหล็กเสริม

= f_{ys} (เมกะปาสคาล)

P_n = กำลังรับแรงอัดระบุ (Nominal compressive load) (นิวตัน)

ϕ = ตัวคูณลดกำลัง (Strength reduction factor)

= 0.65

แบ่งสมการตามลักษณะการเสริมเหล็กปลอกรัดรอบเสาคือ สมการที่ (3.1) และ (3.2) สำหรับออกแบบเสาสั้นปลอกเกลียวและปลอกเดี่ยว ตามลำดับ รวมทั้งมาตรฐานการโอบรัดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขั้นต่ำ เป็นไปตามสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$\frac{f_l}{f_c^{'}} \geq 0.08 \tag{3.3}$$

$$\frac{f_{fu} n t_f}{f_c^{'} D} \geq 0.073 \tag{3.4}$$

โดยที่ D = เส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัดเสา (มม)

= D_c

$f_c^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

= $f_{co}^{'}$

f_{fu} = หน่วยแรงดึงประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)

f_l = หน่วยแรงโอบรัด (เมกะปาสคาล)

n = จำนวนชั้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_f = ความหนาระบุ (Nominal thickness) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

= t_{frp}

หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด คำนวณได้ ดังนี้

$$f_{cc}^{'} = f_c^{'} + 3.3\psi_f \kappa_a f_l \tag{3.5}$$

โดยที่ κ_a = ตัวประกอบประสิทธิผลในการคำนวณหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

= 1.00

ψ_f = ตัวคูณประกอบกำลังของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

= 0.95

ตัวแปรอื่นที่มีผลต่อหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด คือ หน่วยแรงโอบรัดคำนวณได้จากสมการที่ (3.6)

$$f_l = \frac{2E_f n t_f \varepsilon_{fe}}{D} \tag{3.6}$$

โดยที่ E_f = โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)

= E_{frp}

t_f = ความหนาระบุ (Nominal thickness) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

= t_{frp}

ε_{fe} = หน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ

หน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ คือหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เกิดขึ้นจริงเมื่อโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีต โดยมีค่าต่ำกว่าหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ทดสอบได้จากการทดสอบรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย หรือค่าหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ระบุจากผู้ผลิต [16] ซึ่งประสิทธิภาพของ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีตหรือการซ้อนทับกันของเส้นใย [27] โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.7)

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \varepsilon_{fu} \tag{3.7}$$

โดยที่ ε_{fu} = หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการทดสอบรับแรงดึง

κ_ε = ตัวประกอบประสิทธิผล

= 0.55

นอกเหนือจากการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อรับกำลัง สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กันคือหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด โดย ACI 440.2R-08 [3] ได้กำหนดค่าหน่วยการหดตัวประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดตามข้อเสนอของสมาคมคอนกรีต [21] ดังนี้

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_c^{'}\left(1.50 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f_c^{'}}\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c^{'}}\right)^{0.45}\right) \leq 0.01 \tag{3.8}$$

โดยที่ $f_c^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

= $f_{co}^{'}$

$\varepsilon_c^{'}$ = หน่วยการหดตัวขณะเกิดหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตไม่ถูกโอบรัด

= ε_{co}

ε_{ccu} = หน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีต

= ε_{cu}

κ_b = ค่าตัวประกอบประสิทธิผลในการคำนวณหน่วยการหดตัวประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด

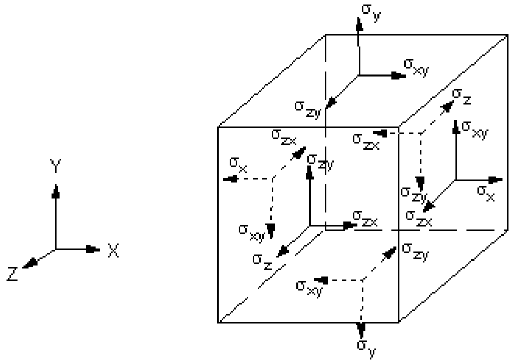
= 1.00

สมการดังกล่าวมีจุดประสงค์ในการป้องกันการเกิดรอยร้าวมากเกินไป เพื่อให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวเป็นไปตามที่เสนอในข้างต้น อย่างไรก็ตาม การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดวงกลมที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ไม่มีรายงานผลการยืนยันความเหมาะสมต่อการออกแบบโดยใช้คอนกรีตที่มีหน่วยแรงอัดประลัยสูงกว่า 70 เมกะปาสคาล ซึ่งพิจารณาสมการที่ (3.5) และ (3.8) เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่สภาวะวิบัติของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อไป

3.2 **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

ปัญหาทางกลศาสตร์โครงสร้างที่ไม่สามารถระบุโดเมน (Domain) ของปัญหาได้อย่างชัดเจน หรือไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) ได้โดยตรง มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาคำตอบโดยประมาณของปัญหา โดยใช้การวิยุต (Discretization) เพื่อให้ปัญหาถูกจำกัดอยู่ในรูปกลุ่มของเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยจุด (Node) และหาผลเฉลยทางกลศาสตร์ ณ ตำแหน่งใดๆ อันประกอบด้วย

หน่วยแรง หน่วยการยืดหดตัว และการเปลี่ยนตำแหน่ง เป็นต้น จากสมการทางกลศาสตร์ของวัสดุร่วมกับฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) ของเอลิเมนต์ที่พิจารณา



ภาพที่ 3.1 ระบบพิกัดของเอลิเมนต์สามมิติ [2]

พิจารณาระบบพิกัดของเอลิเมนต์สามมิติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์สามารถคำนวณได้ [2] ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_x = &\frac{E_x}{h}\left(1-\left(\nu_{yz}\right)^2\frac{E_z}{E_y}\right)\left(\varepsilon_x-\alpha_x\Delta t\right)+ \\ &\frac{E_y}{h}\left(\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{yz}\frac{E_z}{E_y}\right)\left(\varepsilon_y-\alpha_y\Delta t\right)+\frac{E_z}{h}\left(\nu_{xz}+\nu_{yz}\nu_{xy}\right)\left(\varepsilon_z-\alpha_z\Delta t\right)\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}\sigma_y = &\frac{E_y}{h}\left(\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{yz}\frac{E_z}{E_y}\right)\left(\varepsilon_x-\alpha_x\Delta t\right)+ \\ &\frac{E_y}{h}\left(1-\left(\nu_{xz}\right)^2\frac{E_z}{E_x}\right)\left(\varepsilon_y-\alpha_y\Delta t\right)+\frac{E_z}{h}\left(\nu_{yz}+\nu_{xz}\nu_{xy}\frac{E_y}{E_x}\right)\left(\varepsilon_z-\alpha_z\Delta t\right)\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}\sigma_z = &\frac{E_z}{h}\left(\nu_{xz}+\nu_{yz}\nu_{xy}\right)\left(\varepsilon_x-\alpha_x\Delta t\right)+ \\ &\frac{E_z}{h}\left(\nu_{yz}+\nu_{xz}\nu_{xy}\frac{E_y}{E_x}\right)\left(\varepsilon_y-\alpha_y\Delta t\right)+\frac{E_z}{h}\left(1-\left(\nu_{xy}\right)^2\frac{E_y}{E_x}\right)\left(\varepsilon_z-\alpha_z\Delta t\right)\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy} \tag{3.12}$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz}\varepsilon_{yz} \qquad (3.13)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz}\varepsilon_{xz} \qquad (3.14)$$

โดยที่ E_x = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง x

E_y = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง y

E_z = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง z

G_{xy} = โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ xy

G_{xz} = โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ xz

G_{yz} = โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่นบนระนาบ yz

h = $1-\left(\nu_{xy}\right)^2\frac{E_y}{E_x}-\left(\nu_{yz}\right)^2\frac{E_z}{E_y}-\left(\nu_{xz}\right)^2\frac{E_z}{E_x}-2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{xz}\frac{E_z}{E_x}$

α_x = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง x

α_y = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง y

α_z = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิในทิศทาง z

ε_x = หน่วยการหดตัวในทิศทาง x

ε_y = หน่วยการหดตัวในทิศทาง y

ε_z = หน่วยการหดตัวในทิศทาง z

ε_{xy} = หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ xy

ε_{xz} = หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ xz

ε_{yz} = หน่วยการหดตัวเฉือนบนระนาบ yz

σ_x = หน่วยแรงในทิศทาง x

σ_y = หน่วยแรงในทิศทาง y

σ_z = หน่วยแรงในทิศทาง z

σ_{xy} = หน่วยแรงเฉือนบนระนาบ xy

σ_{xz} = หน่วยแรงเฉือนบนระนาบ xz

σ_{yz} = หน่วยแรงเฉือนบนระนาบ yz

Δt = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สมการที่ (3.9) ถึง (3.14) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของเอลิเมนต์ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์และเวกเตอร์ [2] ได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \tag{3.15}$$

โดยที่ $[D]$ = เมตริกซ์สติฟเนสยืดหยุ่น (Elastic stiffness matrix)
$\{\varepsilon^{el}\}$ = เวกเตอร์หน่วยการหดตัวอิลาสติก
$\{\sigma\}$ = เวกเตอร์หน่วยแรง

หน่วยการหดตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.16)

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \tag{3.16}$$

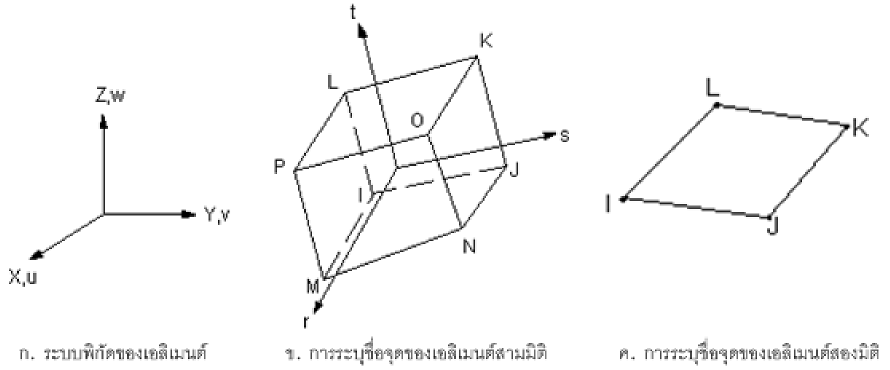
โดยที่ $[B]$ = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวและการเปลี่ยนตำแหน่ง
$\{u\}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง
$\{\varepsilon\}$ = เวกเตอร์หน่วยการหดตัวรวม

เวกเตอร์หน่วยการหดตัวรวมเกิดจากผลบวกของเวกเตอร์หน่วยการหดตัวอิลาสติก และหน่วยการหดตัวพลาสติก โดยที่การคำนวณหน่วยการหดตัวพลาสติกขึ้นอยู่กับเกณฑ์การครากของวัสดุที่เลือกใช้ ซึ่งมีกล่าวโดยละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 3.3 นอกจากนี้ การคำนวณเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง เป็นไปตามสมการที่ (3.17)

$$[K_e]\{u\} = \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \tag{3.17}$$

โดยที่ $\{F_e^{nd}\}$ = เวกเตอร์แรงที่กระทำลงจุด (Nodal force) ของเอลิเมนต์
$\{F_e^{pr}\}$ = เวกเตอร์หน่วยแรงที่กระทำต่อเอลิเมนต์
$[K_e]$ = เมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์
$\{u\}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวและการเปลี่ยนตำแหน่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเอลิเมนต์ ในการวิจัยนี้ได้พิจารณาเอลิเมนต์สามมิติจำนวน 8 จุด และเอลิเมนต์สองมิติจำนวน 4 จุด ซึ่งระบบพิกัดและการระบุชื่อจุด แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การระบุชื่อจุดของเอลิเมนต์สามมิติและเอลิเมนต์สองมิติ [2]

การเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละทิศทางของเอลิเมนต์สามมิติ เป็นไปตามสมการที่ (3.18) ถึง (3.20)

$$
\begin{aligned}
u = \frac{1}{8}(&u_I(1-s)(1-t)(1-r)+u_J(1+s)(1-t)(1-r)+\\
&u_K(1+s)(1+t)(1-r)+u_L(1-s)(1+t)(1-r)+\\
&u_M(1-s)(1-t)(1+r)+u_N(1+s)(1-t)(1+r)+\\
&u_O(1+s)(1+t)(1+r)+u_P(1-s)(1+t)(1+r))
\end{aligned}
\tag{3.18}
$$

$$
\begin{aligned}
v = \frac{1}{8}(&v_I(1-s)(1-t)(1-r)+v_J(1+s)(1-t)(1-r)+\\
&v_K(1+s)(1+t)(1-r)+v_L(1-s)(1+t)(1-r)+\\
&v_M(1-s)(1-t)(1+r)+v_N(1+s)(1-t)(1+r)+\\
&v_O(1+s)(1+t)(1+r)+v_P(1-s)(1+t)(1+r))
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

$$
\begin{aligned}
w = \frac{1}{8}(&w_I(1-s)(1-t)(1-r)+w_J(1+s)(1-t)(1-r)+\\
&w_K(1+s)(1+t)(1-r)+w_L(1-s)(1+t)(1-r)+\\
&w_M(1-s)(1-t)(1+r)+w_N(1+s)(1-t)(1+r)+\\
&w_O(1+s)(1+t)(1+r)+w_P(1-s)(1+t)(1+r))
\end{aligned}
\tag{3.20}
$$

ในทางเดียวกัน การเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละทิศทางของเอลิเมนต์สองมิติซึ่งแสดงในภาพที่ 3.2 ค. คำนวณได้จากสมการที่ (3.21) ถึง (3.23)

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{4}(&u_I(1-s)(1-t)+u_J(1+s)(1-t)+ \\ &u_K(1+s)(1+t)+u_L(1-s)(1+t)) \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned} v = \frac{1}{4}(&v_I(1-s)(1-t)+v_J(1+s)(1-t)+ \\ &v_K(1+s)(1+t)+v_L(1-s)(1+t)) \end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned} w = \frac{1}{4}(&w_I(1-s)(1-t)+w_J(1+s)(1-t)+ \\ &w_K(1+s)(1+t)+w_L(1-s)(1+t)) \end{aligned} \tag{3.23}$$

สมการที่ (3.18) ถึง (3.23) แสดงการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละทิศทางจากการเฉลี่ยการเปลี่ยนตำแหน่งทุกจุดบนเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปแจกแจงสมการที่ (3.16) ได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{3.24}$$

ตัวห้อย i และ j ในสมการที่ (3.24) มีค่าเท่ากับ 1 ถึง 3 กล่าวคือเลขดัชนี 1 ถึง 3 บ่งบอกทิศทางที่พิจารณาหรือทิศทาง x, y และ z ในขณะที่ u คือการเปลี่ยนตำแหน่งแต่ละทิศทาง ซึ่ง u_1 u_2 และ u_3 คือ u v และ w ตามลำดับ โดยที่ตัวแปร x ระบุทิศทางที่การเปลี่ยนตำแหน่งถูกนำมาเทียบในเชิงอนุพันธ์ย่อย กล่าวคือ x_1 x_2 และ x_3 คือ s t และ r ตามลำดับ หลังการแจกแจงสมการที่ (3.16) สามารถนำไปจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์และเวกเตอร์ที่แสดงในสมการที่ (3.16) เพื่อสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวและการเปลี่ยนตำแหน่ง สำหรับการใช้คำนวณเมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์และการเปลี่ยนตำแหน่งต่อไป

เนื่องจากเมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.17) เขียนอยู่เทอมของการเปลี่ยนตำแหน่งทั้งสามทิศทางที่ไม่ทราบค่า ส่งผลให้สมการที่ (3.17) เป็นระบบสมการ

ไร้เชิงเส้น ซึ่ง ANSYS ใช้ระเบียบวิธี Newton-Raphson [2] ในการแก้สมการไร้เชิงเส้น ซึ่งระเบียบวิธี Newton-Raphson เป็นไปตามสมการที่ (3.25) ถึง (3.26)

$$\left[K_i^T\right]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \tag{3.25}$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \tag{3.26}$$

โดยที่ $\{F^a\}$ = เวกเตอร์แรงทั้งหมดที่กระทำต่อเอลิเมนต์

$\{F_i^{nr}\}$ = เวกเตอร์แรงกลับคืน (Restoring load) ที่เกี่ยวข้องกับแรงภายในของเอลิเมนต์

$\left[K_i^T\right]$ = เมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ที่ถูกปรับตามการเปลี่ยนตำแหน่ง

$\{\Delta u_i\}$ = การเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง

สมมติให้ $\{u_i\} = \{0\}$ ก่อนเกิดรอบการคำนวณแบบทำซ้ำ $(i = 0)$ โดยนำไปแทนค่า $\{u_i\}$ ลงใน $\left[K_i^T\right]$ และ $\{F_i^{nr}\}$ เพื่อคำนวณ $\{\Delta u_i\}$ และ $\{u_{i+1}\}$ จากสมการที่ (3.25) และ (3.26) ตามลำดับ ซึ่งเกิดรอบการคำนวณแบบทำซ้ำไปมา และหยุดการทำซ้ำเมื่อ $\|\{\Delta u_i\}\|$ มีค่าน้อยกว่า 5% [2]

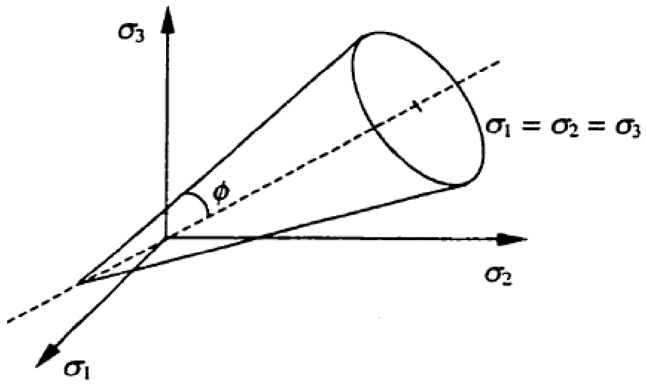
3.3 เกณฑ์การครากของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองปัญหาทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรับแรงอัดกระทำ มีวัสดุที่ต้องพิจารณา 3 ชนิดคือ คอนกรีต วัสดุประสาน และพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด เกิดความเสียหายในลักษณะที่แตกต่างกัน เพื่อให้การวิเคราะห์ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์ดำเนินไปในทิศทางในเหมาะสมและใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจริง การระบุเกณฑ์การครากและวิบัติของวัสดุแต่ละชนิดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1 คอนกรีต

เนื่องจากทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้รับผลของหน่วยแรงโอบรัดเพื่อทำให้มีหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่สภาวะวิบัติสูงขึ้น ส่งผลให้เวกเตอร์ของหน่วยแรง (Stress Vector, $\{\sigma\}$) ไม่อยู่ในลักษณะการรับแรงแกนเดียว (Uniaxial) ดังเช่นในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดรับแรงกระทำตามแนวแกนทรงกระบอก ซึ่งการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเปรียบเสมือนการรับแรงสามแกน (Triaxial) โดยสมมติให้คอนกรีตเกิดการไหลพลาสติก (Plastic flow) บนพื้นผิวการวิบัติ (Failure surface) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คล้ายกับวัสดุเหนียว (Ductile material) [28] รวมถึงคอนกรีตมีสภาพเป็นพลาสติกหลังจากหน่วยแรงกระทำตามแนวแกนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด [29]

การวิจัยนี้พิจารณาเกณฑ์การคราก Drucker-Prager เป็นเกณฑ์การครากของคอนกรีตเนื่องจากเกณฑ์การคราก Drucker-Prager มีการขยายตัวของพื้นผิวการวิบัติเมื่อเวกเตอร์หน่วยแรงเพิ่มขึ้น และเกิดการวิบัติเมื่อคอนกรีตมีเวกเตอร์หน่วยแรงที่สอดคล้องกับสมการเกณฑ์การคราก Drucker-Prager [2] สามารถวาดรูปพื้นผิวการครากของเกณฑ์การคราก Drucker-Prager บนระบบพิกัดของหน่วยแรงหลัก (Principal stresses) ทั้งสามแกนได้ ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 พื้นผิวการวิบัติของเกณฑ์การคราก Drucker-Prager [22]

เกณฑ์การคราก Drucker-Prager [2] เมื่อเขียนในเทอมเวกเตอร์หน่วยแรงและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager เป็นไปตามสมการที่ (3.27)

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{s\}^T[M]\{s\}\right]^{1/2} - \sigma_y = 0 \qquad (3.27)$$

โดยที่ F = ฟังก์ชันคราก (Yield function)

$[M]$ = $\begin{bmatrix} I_{3x3} & 0 \\ 0 & 2I_{3x3} \end{bmatrix}$

$\{s\}$ = เวกเตอร์หน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviatoric stress vector)

= $\{\sigma\} - \sigma_m\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$

β = ค่าคงที่ของวัสดุ

σ_m = หน่วยแรงเฉลี่ย (Mean stress)

= $\dfrac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

σ_y = หน่วยแรงคราก (Yield stress)

= f_y

ตัวแปร I_{3x3} ที่ปรากฏใน $[M]$ คือเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) ขนาด 3×3 และหน่วยแรงเฉลี่ยซึ่งปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.27) คำนวณจากการเฉลี่ยค่าหน่วยแรงหลักทั้งสามแกน นอกจากนี้ ค่าคงที่ของวัสดุและหน่วยแรงครากสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager 2 ตัวแปรคือ การยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) และมุมของความเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, φ) ซึ่งการคำนวณค่าคงที่ของวัสดุและหน่วยแรงคราก [2] มีรายละเอียด ดังนี้

$$\beta = \frac{2\sin(\varphi)}{\sqrt{3}\left(3 - \sin(\varphi)\right)} \qquad (3.28)$$

$$\sigma_y = \frac{6c\cos(\varphi)}{\sqrt{3}\left(3 - \sin(\varphi)\right)} \qquad (3.29)$$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager นอกจากการยึดเหนี่ยวและมุมของความเสียดทานภายในคือ มุมไดลาแทนซี (Dilatancy angle, φ_f) ซึ่งเป็นค่ากำหนดทิศทางการเกิด

หน่วยการหดตัวพลาสติก (Plastic strain) และความสอดคล้องกับกฎการไหล (Associated flow rule) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.30)

$$\left\{d\varepsilon^{pl}\right\} = \lambda\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} \tag{3.30}$$

โดยที่ $\left\{d\varepsilon^{pl}\right\}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติก

$\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันคราภเทียบกับสภาวะหน่วยแรง

λ = ตัวคูณพลาสติก (Plastic multiplier)

วัสดุที่มีความสอดคล้องกับกฎการไหลคือ วัสดุที่มีเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติกในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวการวิบัติ เกิดขึ้นเมื่อมุมไดลาแทนซีมีค่าเท่ากับมุมของความเสียดทานภายใน $\left(\varphi_f = \varphi\right)$ รวมถึงการขยายออกของปริมาตรวัสดุ (Volumetric expansion) โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันครากเทียบกับเวกเตอร์หน่วยแรงคำนวณได้ ดังนี้

$$\left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\} = \beta\left\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0\right\}^T + \frac{\{s\}}{\left[\frac{1}{2}\{s\}^T[M]\{s\}\right]^{1/2}} \tag{3.31}$$

โดยที่ F = ฟังก์ชันคราก (Yield function)

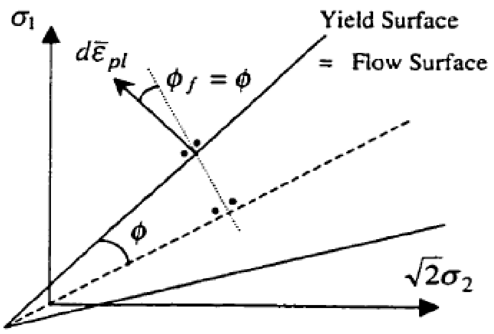
$[M]$ = $\begin{bmatrix} I_{3x3} & 0 \\ 0 & 2I_{3x3} \end{bmatrix}$

$\{s\}$ = เวกเตอร์หน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviatoric stress vector)

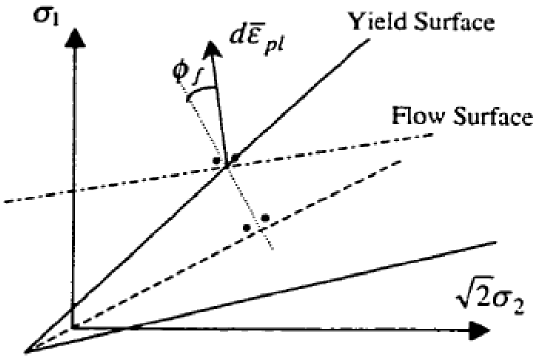
β = ค่าคงที่ของวัสดุ

หากค่าคงที่ของวัสดุที่เกิดจากการแทนค่ามุมของความเสียดทานภายใน ไม่เท่ากับ ค่าคงที่ของวัสดุที่เกิดจากการแทนค่ามุมไดลาแทนซี $\left(\beta|_{\varphi=\varphi} \neq \beta|_{\varphi=\varphi_f}\right)$ ส่งผลให้วัสดุไม่สอดคล้องกับกฎการไหล และการขยายออกของปริมาตรวัสดุมีค่าน้อยลงเมื่อลดค่ามุมไดลาแทนซี จนวัสดุไม่มีการขยายตัวออกด้านข้างเมื่อมุมไดลาแทนซีเท่ากับศูนย์ [2] ในขณะที่ Becque [22] พบว่าวัสดุเกิด

การหดตัวเมื่อมุมไดลาแทนซีมีค่าน้อยกว่าศูนย์ และทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติกในแต่ละกรณี เป็นไปตามภาพที่ 3.4



ก. วัสดุสอดคล้องกับกฎการไหล



ข. วัสดุไม่สอดคล้องกับกฎการไหล

ภาพที่ 3.4 ทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงหน่วยการหดตัวพลาสติกของวัสดุ [22]

ตารางที่ 3.1 แสดงแนวทางการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager และการเลือกใช้ค่ามุมไดลาแทนซีจากงานวิจัยในอดีต [20,22,23,25,26] ซึ่งพบว่าวิธีการคำนวณมีความแตกต่างกันและส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อีกทั้งแบบจำลองของงานวิจัยที่ผ่านมา [20,22,23,25,26] ไม่สอดคล้องกับกฎการไหล กล่าวคือ คอนกรีตมีการขยายออกของปริมาตรวัสดุไม่เต็มที่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับแก้มุมไดลาแทนซีจนกว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตหลังถูกโอบรัดจากผลการทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager จากงานวิจัยในอดีต

งานวิจัย	มุมของความเสียดทานภายใน	การยึดเหนี่ยว	มุมไดลาแทนซี
Becque [22]	$\sin^{-1}\left(\frac{k-1}{k+1}\right)$	$\frac{f_{co}^{'}\left(1-\sin(\varphi)\right)}{2\cos(\varphi)}$	$54.74-\tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{2}\mu}\right)$
Mirmiran และคณะ [23]	$\sin^{-1}\left(\frac{3}{1+0.4\left(\frac{f_{co}^{'}}{\sqrt{3}}\right)}\right)$	$\left(f_{co}^{'}-5\sqrt{3}\right)\left(\frac{3-\sin(\varphi)}{6\cos(\varphi)}\right)$	0
Sadeghian และคณะ [25]	$\sin^{-1}\left(\frac{3}{1+0.4\left(\frac{f_{co}^{'}}{\sqrt{3}}\right)}\right)$	$\left(f_{co}^{'}-5\sqrt{3}\right)\left(\frac{3-\sin(\varphi)}{6\cos(\varphi)}\right)$	0.5φ
Wu และคณะ [20]	$\sin^{-1}\left(\frac{11}{21}\right)$	$\frac{f_{co}^{'}\left(1-\sin(\varphi)\right)}{2\cos(\varphi)}$	ไม่ระบุ
Mostofinejad และ Saadatmand [26]	$2\left(\tan^{-1}\sqrt{k}-45\right)$	$\frac{f_{co}^{'}\left(1-\sin(\varphi)\right)}{2\cos(\varphi)}$	$[0,\varphi]$

Becque [22] ระบุว่า k และ μ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$k = 6\left(\frac{2t_f E_{frp}\varepsilon_h}{D}\right)^{-0.3} \tag{3.32}$$

$$\mu = -0.187\ln\left(\frac{2E_{hoop}t}{f_{co}^{'}D}\right)+0.881 \tag{3.33}$$

โดยที่ D = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกคอนกรีต (มม)

E_{frp} = โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสคาล)

E_h = โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในทิศตามแนวขอบ (เมกะปาสคาล)

$f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

t_f = ความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (มม)

ε_h = หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในขณะที่การคำนวณ k ของ Mostofinejad และ Saadatmand [26] เป็นไปตามสมการที่ (3.34)

$$k = \frac{f_{cc} - f_c^{'}}{f_l} \tag{3.34}$$

โดยที่ f_l = $\dfrac{2t_f E_{frp}\varepsilon_h}{D}$

ในเบื้องต้น การวิจัยนี้กำหนดให้แบบจำลองคอนกรีตมีความสอดคล้องกับการกฎการไหลและมีการขยายออกของปริมาตรวัสดุตามปกติเพื่อให้เป็นไปตามพฤติกรรมจริงของคอนกรีต โดยมุมไดลาแทนซีมีค่าเท่ากับมุมของความเสียดทานภายใน $\left(\varphi_f = \varphi\right)$ รวมถึงการยึดเหนี่ยวซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับเกณฑ์การครากของ Mohr-Coulomb [28] ดังสมการที่ (3.35)

$$c = \frac{f_{co}^{'}\left(1-\sin\left(\varphi\right)\right)}{2\cos\left(\varphi\right)} \tag{3.35}$$

โดยที่ $f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

φ = มุมของความเสียดทานภายใน (องศา)

ตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager คือมุมของความเสียดทานภายในคำนวณจากสมการความถดถอยซึ่งแสดงต่อไปในบทที่ 4

3.3.2 วัสดุประสาน

วัสดุประสานทำหน้าที่ยึดติดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเข้ากับทรงกระบอกคอนกรีต ซึ่งความสามารถในการยึดติดขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่ผิวสัมผัส สถานะการยึดเหนี่ยว และคุณสมบัติของวัสดุประสาน โดยที่ Sadeghian และคณะ [25] ศึกษาผลกระทบของสถานะการยึดเหนี่ยวของวัสดุประสานที่มีต่อกำลังความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่ง Sadeghian และคณะ [25] พบว่าสถานะการยึดเหนี่ยวของวัสดุประสานไม่ส่งผลต่อหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่สภาวะวิบัติของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดอย่างชัดเจน ส่งผลให้การวิจัยนี้ ไม่พิจารณาเกณฑ์การวิบัติของวัสดุประสาน

3.3.3 พอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิบัติของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคือการฉีกขาดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากหน่วยการหดตัวภายในเส้นใยถึงค่าหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในขณะที่ Realfonzo และ Napoli [30] แสดงถึงการวิบัติของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดจากหลากหลายการทดสอบที่หน่วยการหดตัวในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะเกิดการวิบัติ ต่ำกว่าหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยที่ Lam และ Teng [27] ระบุว่าประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีตหรือการซ้อนทับกันของเส้นใย ซึ่งแต่ละการทดสอบที่ปรากฏในงานวิจัยของ Realfonzo และ Napoli [30] มีประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่แตกต่างกัน กำหนดเกณฑ์การวิบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแบบจำลองโดยหยุดการวิเคราะห์ในลำดับขั้นของแรงกระทำ (Load step) ที่หน่วยการหดตัวตามแนวขอบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) โดยที่ตัวประกอบประสิทธิผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างหน่วยการหดตัวประลัยที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการทดลองสามารถทำนายได้จากสมการความถดถอยซึ่งแสดงรายละเอียดในบทที่ 4

3.4 การตรวจสอบเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประมาณค่าตอบของปัญหา เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแนวโน้มสูงในการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดจากการจำลองพฤติกรรมของเอลิเมนต์และระบุสภาวะขอบเขตของปัญหาที่ไม่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยนี้ พิจารณาปัญหาวัตถุทรงกระบอกถูกโอบรัดด้วยท่อผนังบางผนังบางรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน เพื่อหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น และประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับขั้นที่สูงขึ้นต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว เป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ โดยเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปแบบเทนเซอร์ (Tensor form) ได้ดังนี้

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{3.36}$$

โดยที่ C_{ijkl} = เมตริกซ์ประกอบ (Constitutive matrix) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว

ε_{ij} = สนามหน่วยการหดตัว (Strain field)

σ_{ij} = สนามหน่วยแรง (Stress field)

เมตริกซ์ประกอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวบ่งบอกลักษณะของวัสดุ มีค่าองค์ประกอบเมตริกซ์ 81 ค่า ในวัสดุทั่วไปซึ่งคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทางการรับแรง อุณหภูมิที่รับแรง และระยะเวลาในการรับแรง เพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ปัญหาและทำการทดลองในระดับสูงเพื่อคำนวณค่าคงที่ทั้ง 81 ค่าในเมตริกซ์ประกอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว หากพิจารณาให้วัสดุมีความสมมาตรในสามทิศทาง ส่งผลให้จำนวนค่าคงที่ยืดหยุ่นในเมตริกซ์ประกอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวลดลงเหลือ 12 ค่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุออโทโทรปิค สามารถเขียนความสัมพันธ์ผกผันในสมการที่ (3.36) ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} \qquad (3.37)$$

โดยที่ E_{ij} = โมดูลัสยืดหยุ่น

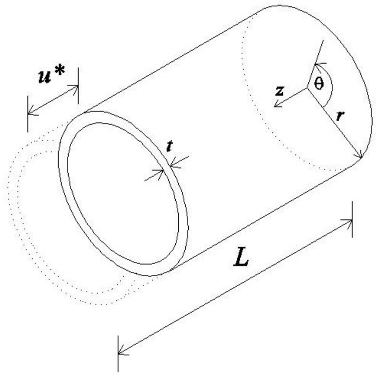
G_{ij} = โมดูลัสเฉือนยืดหยุ่น (Shear modulus of elasticity)

ν_{ij} = อัตราส่วนปัวซอง (Poisson’s ratio)

ค่าดัชนี *i* และ *j* ของเทนเซอร์ในสมการที่ (3.37) คือ 1, 2, และ 3 แสดงถึงการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุสำหรับปัญหาทางกลศาสตร์ในสามมิติ โดยระบุทิศทาง *x*, *y*, และ *z* ในระบบพิกัดคาร์ทีเชียน (Cartesian coordinate system) และระบุทิศทาง *r*, θ, และ *z* ตามระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate system) นอกเหนือจากนี้ สามารถลดความซับซ้อนในการคำนวณคุณสมบัติของวัสดุทั้งสามแกนโดยพิจารณาวัสดุไอโซโทรปิค กล่าวคือวัสดุที่มีคุณสมบัติความสมมาตรในทุกทิศทาง โดยสมการที่ (3.37) ลดรูปได้ ดังนี้

$$
\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} \tag{3.38}
$$

สมการที่ (3.38) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวและหน่วยแรงของวัสดุไอโซโทรปิค อธิบายค่าคงที่ในเมตริกซ์ประกอบผกผันโดยใช้คุณสมบัติทางวัสดุสองค่า คือ โมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง



ภาพที่ 3.5 วัตถุทรงกระบอกซึ่งโอบรัดด้วยท่อผนังบางรับแรงกระทำในลักษณะ
เพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง

พิจารณาวัตถุทรงกระบอกซึ่งมีรัศมี r และความยาว L เช่นเดียวกับปัญหาที่กล่าวไว้ในข้างต้น ถูกโอบรัดทั้งหมด โดยท่อผนังบางความหนา t รับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง u_z^* ดังภาพที่ 3.5 ภายใต้ระบบพิกัดทรงกระบอก เพื่อความสะดวกในการแก้ปัญหา โดยการกำหนดทิศทางของสนามหน่วยแรงในรูปเมตริกซ์ เป็นไปตามสมการที่ (3.39)

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

จากสภาวะขอบเขตที่เกิดขึ้น ผลของโอบรัดวัตถุทรงกระบอกด้วยท่อผนังบางก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดในแนวแกน P หน่วยแรงตามอัดแนวรัศมีและแนวขอบ Q ซึ่งไม่ทราบค่า เขียนเมตริกซ์สนามหน่วยแรงของวัตถุทรงกระบอก ($\sigma_{ij(1)}$)ได้ ดังนี้

$$\sigma_{ij(1)} = \begin{bmatrix} -Q & 0 & 0 \\ 0 & -Q & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

พิจารณาให้วัตถุทรงกระบอกเป็นวัสดุไอโซโทรปิค เพื่อแทนค่าสนามหน่วยแรงจากสมการที่ (3.40) ลงในสมการที่ (3.38) และไม่พิจารณาหน่วยการหดตัวเฉือนเนื่องจากวัตถุทั้งสองไม่มีการรับหน่วยแรงเฉือนกระทำทั้งสามทิศทาง ดังนั้น หน่วยการหดตัวตามแนวรัศมี หน่วยการหดตัวตามแนวขอบ และหน่วยการหดตัวในแนวแกน ของวัตถุทรงกระบอก เขียนให้อยู่ในรูปหน่วยแรงและคุณสมบัติของวัสดุได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{r(cyl)} = -\frac{Q}{E_{cyl}} + \frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}(P+Q) \tag{3.41}$$

$$\varepsilon_{\theta(cyl)} = -\frac{Q}{E_{cyl}} + \frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}(P+Q) \tag{3.42}$$

$$\varepsilon_{z(cyl)} = -\frac{P}{E_{cyl}} + \frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}(2Q) \tag{3.43}$$

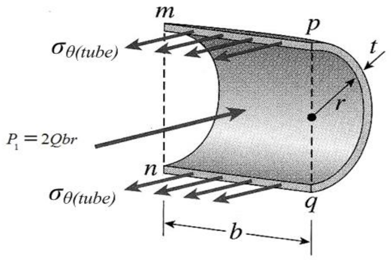
จากสมการที่ (3.42) สามารถหาการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของวัตถุทรงกระบอกได้ดังสมการ

$$u_{r(cyl)} = r\varepsilon_{\theta(cyl)} = r\left[-\frac{Q}{E_{cyl}} + \frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}(P+Q)\right] \tag{3.44}$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดของวัตถุทรงกระบอก มีความสม่ำเสมอตลอดความยาว คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของวัตถุทรงกระบอกได้ โดยคูณสมการที่ (3.43) ด้วยความยาวของวัตถุทรงกระบอก ดังนี้

$$u_{z(cyl)} = L\varepsilon_{z(cyl)} = L\left[-\frac{P}{E_{cyl}} + \frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}(2Q)\right] \tag{3.45}$$

พิจารณาท่อผนังบางเป็นท่อผนังบาง (Thin-walled tube) ซึ่งรับหน่วยแรงตามแนวรัศมี Q จากวัตถุทรงกระบอก ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงตามขอบขึ้น ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในท่อผนังบาง [31]

จากรูป [31] P_1 คือแรงกระทำสมมูลแบบจุดเนื่องจากหน่วยแรง Q กระทำรอบหน้าตัดตามแนวรัศมี มีค่าเท่ากับผลคูณของหน่วยแรง Q และพื้นที่หน้าตัดบนระนาบ *mnpq* ขนาด *2br* เขียนสมการสมดุลระหว่างแรงตามแนวขอบเนื่องจากหน่วยแรง $\sigma_{\theta(tube)}$ บนพื้นที่ขอบบนและขอบล่างร่วมกับแรง P_1 ได้ดังนี้

$$2\sigma_{\theta(tube)}(bt) - Q(2br) = 0 \tag{3.46}$$

แก้สมการที่ (3.46) เพื่อหาหน่วยแรงตามขอบของท่อผนังบาง ($\sigma_{\theta(tube)}$) ได้ ดังนี้

$$\sigma_{\theta(tube)} = \frac{Qr}{t} \tag{3.47}$$

เนื่องจากท่อผนังไม่มีแรงภายนอกกระทำในทิศตามแนวแกน ทำให้หน่วยแรงตามแนวแกนของท่อผนังบางมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่สนามหน่วยแรงของท่อผนังบางสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\sigma_{ij(tube)} = \begin{bmatrix} Q & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{Qr}{t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

จากทฤษฎีของท่อผนังบาง [32] จะได้

$$\sigma_{ij(tube)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{Qr}{t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

พิจารณาท่อผนังบางเป็นวัสดุที่มีสติฟเนสเฉพาะในแนวขอบ และแทนสนามหน่วยแรงในสมการที่ (3.49) ลงในสมการที่ (3.38) โดยไม่พิจารณาความสามารถในการรับแรงทิศทางอื่นนอกจากแนวขอบพบว่า

$$\varepsilon_{\theta(tube)} = \frac{Qr}{E_{tube}t} \tag{3.50}$$

โดยที่			
	E_{tube}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของท่อผนังบาง
	$\varepsilon_{\theta(tube)}$	=	หน่วยการหดตัวตามแนวขอบของท่อผนังบาง
	v_{tube}	=	อัตราส่วนปัวซองของท่อผนังบาง

จากสมการที่ (3.50) คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของท่อผนังบาง ($u_{r(tube)}$) จากสมการ ดังนี้

$$u_{r(tube)} = r\varepsilon_{\theta(tube)} = \frac{Qr^2}{E_{tube}t} \tag{3.51}$$

พิจารณาสภาวะความสอดคล้อง (Compatibility condition) ในปัญหานี้ พบว่าการโอบรัดวัตถุทรงกระบอกโดยท่อผนังบาง ส่งผลให้การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของวัตถุทั้งสองมีค่าเท่ากัน

$$u_{r(cyl)} = u_{r(tube)} \tag{3.52}$$

จากเงื่อนไขดังกล่าว ส่งผลให้สมการที่ (3.44) และ (3.51) มีค่าเท่ากัน ทำการจัดรูปสมการโดยแยกสัมประสิทธิ์ออกจากตัวแปรทั้งสองตัว

$$\left(\frac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}}\right)P + \left(\frac{\nu_{cyl}-1}{E_{cyl}} - \frac{r}{E_{tube}t}\right)Q = 0 \tag{3.53}$$

สภาวะขอบเขตอื่นที่เกี่ยวข้องคือ การรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง u_z^* ก่อให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนขึ้นในวัตถุทรงกระบอก

$$u_{z(cyl)} = u_z^* \tag{3.54}$$

ใช้เงื่อนไขสภาวะขอบเขตในสมการที่ (3.54) เข้ากับสมการที่ (3.43) และจัดรูปสมการเพื่อแยกสัมประสิทธิ์ออกจากตัวแปรทั้งสอง

$$\left(-\frac{1}{E_{cyl}}\right)P + \left(\frac{2\nu_{cyl}}{E_{cyl}}\right)Q = \frac{u_z^*}{L} \tag{3.55}$$

เขียนสมการที่ (3.53) และ (3.55) ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\nu_{cyl}}{E_{cyl}} & \dfrac{\nu_{cyl}-1}{E_{cyl}} - \dfrac{r}{E_{tube}t} \\ -\dfrac{1}{E_{cyl}} & \dfrac{2\nu_{cyl}}{E_{cyl}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dfrac{u_z^*}{L} \end{Bmatrix} \tag{3.56}$$

จากการคำนวณเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ผกผันในสมการที่ (3.56) เพื่อหาผลเฉลยของระบบสมการ

เชิงเส้น พบว่า

$$P = \frac{u_z^*}{C^* L}\left\{\frac{E_{cyl} r}{E_{tube} t} - \nu_{cyl} + 1\right\} \tag{3.57}$$

$$Q = \frac{u_z^* \nu_{cyl}}{C^* L} \tag{3.58}$$

โดยคำตอบของหน่วยแรงทั้งสอง มีค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ (Determinant of coefficient matrix, C^*) ในสมการที่ (3.57) และ (3.58) ซึ่งหาได้จากสมการ ดังนี้

$$C^* = \left\{\frac{\left(2\nu_{cyl} - 1\right)\left(\nu_{cyl} + 1\right)}{E_{cyl}} - \frac{r}{E_{tube} t}\right\} \tag{3.59}$$

หน่วยแรงตามแนวแกนและหน่วยแรงโอบรัดจากสมการที่ (3.57) และ (3.58) ตามลำดับ อีกทั้งหน่วยแรงตามแนวขอบของท่อผนังบางซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.49) ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขสภาวะขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัตถุทรงกระบอกถูกโอบรัดด้วยท่อผนังบางเพื่อรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อไป

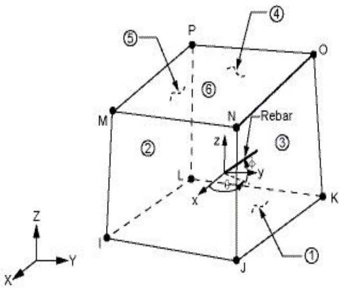
บทที่ 4
การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ถึงแม้ว่าการทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทำให้ทราบค่าหน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัด หากควบคุมการทดลองให้เป็นไปอย่างเหมาะสม แต่การทดสอบซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาแนวทางเสริมกำลังในลักษณะนี้ ไม่สามารถสรุปให้อยู่ในรูปสูตรคำนวณอย่างง่ายได้ตรงกันในการทดสอบของแต่ละงานวิจัย รวมถึงในปัจจุบัน ไม่มีรายงานการแสดงผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับการทำนายพฤติกรรมทรงกระบอกคอนกรีตที่โอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การประมาณผลการเสริมกำลังในลักษณะดังกล่าวโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรแกรม ANSYS [2] ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัด หรือถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยมีรายละเอียด ดังนี้

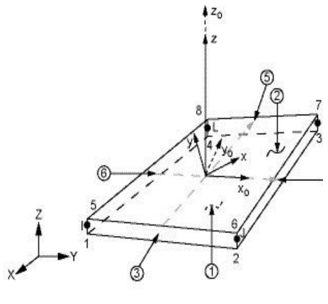
4.1 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรม ANSYS [2] มีความยืดหยุ่นต่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประมาณผลเฉลยของปัญหา มีรูปแบบของเอลิเมนต์และเกณฑ์การครากให้เลือกใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดและหน่วยการหดตัวที่สภาวะวิบัติซึ่งเพิ่มขึ้นในทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จัดเป็นปัญหากลศาสตร์โครงสร้าง (Structural mechanics) ภายใต้สภาวะสถิตย์ (Static) ซึ่งมีวัสดุที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้สามชนิดคือ คอนกรีต วัสดุประสาน และพอลิเมอร์เสริมเส้นใย งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติโดยใช้ SOLID65 [2] จำลองวัตถุทรงกระบอก เนื่องจากเป็นเอลิเมนต์ชนิดเดียวที่รองรับการพิจารณาเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ที่มีความเหมาะสมต่อการจำลองพฤติกรรมของคอนกรีต [2] และใช้ SHELL181 [2] ในการจำลองวัสดุประสาน เนื่องจากเป็นเอลิเมนต์ที่สามารถกำหนดความหนาของเนื้อวัสดุได้ในแต่ละชั้น รวมถึงการใช้ SOLID65 [2] ร่วมกับ SHELL181 [2] ส่งผลดีต่อการถ่ายแรงซึ่งกันและกัน เนื่องจากแต่ละจุดบนเอลิเมนต์มีจำนวนดีกรีของความอิสระ 3 ทิศทางเหมือนกัน ในขณะที่เอลิเมนต์ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถูกสร้างจาก REINF265 [2] ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มีสติฟเนสทิศทางเดียว (Unidirectional stiffness element) ที่มีความเหมาะสมต่อการจำลองพฤติกรรมของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยระบุ

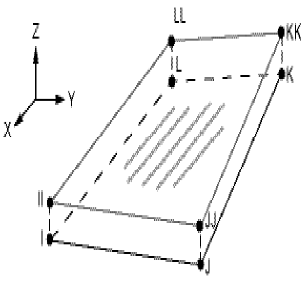
ความหนา ทิศทางการเรียงตัว (Orientation) และคุณสมบัติของเส้นใยใน แต่ละชั้นการเรียงตัวได้ [2] ซึ่งระบบพิกัด ตำแหน่งของจุดและลักษณะของเอลิเมนต์ แสดงดังภาพที่ 4.1



ก. SOLID65



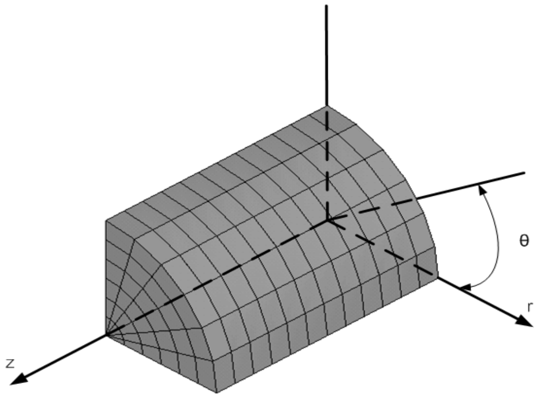
ข. SHELL181



ค. REINF265

ภาพที่ 4.1 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย [2]

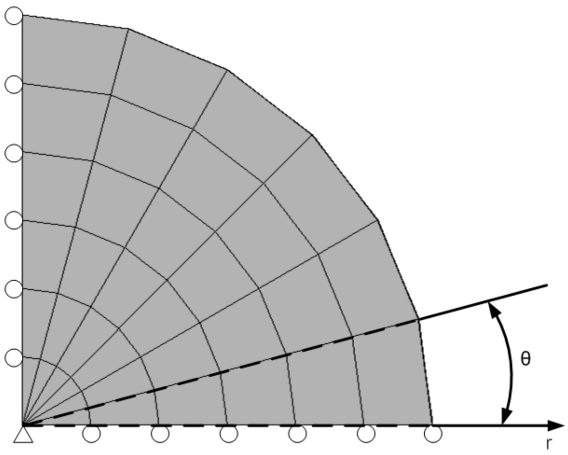
เนื่องจากคุณสมบัติความสมมาตรของปัญหาที่วิเคราะห์ ส่งผลให้วัตถุทรงกระบอกถูกลดรูปเป็นหนึ่งในแปดส่วนของวัตถุทรงกระบอก ทำการสร้างเอลิเมนต์สามมิติเพื่อจำลองทรงกระบอกคอนกรีตโดยใช้ SOLID65 [2] โดยที่เอลิเมนต์ของวัตถุทรงกระบอกและระบบพิกัดทรงกระบอกซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลอง แสดงดังภาพที่ 4.2



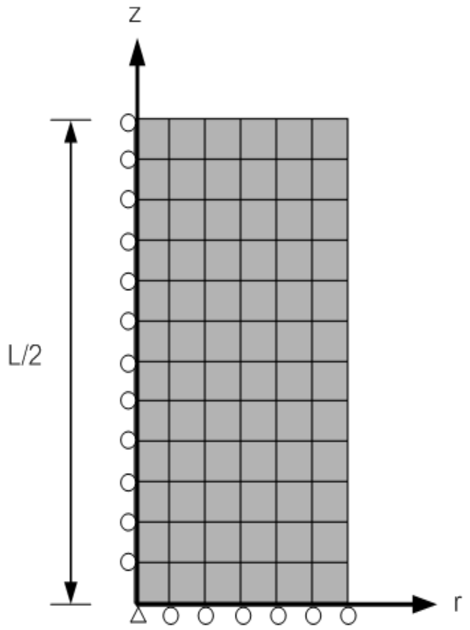
ภาพที่ 4.2 เอลิเมนต์ของวัตถุทรงกระบอกและระบบพิกัดที่ใช้

สร้างเอลิเมนต์เปลือก (Shell elements) บนพื้นที่ผิวโค้งของวัตถุทรงกระบอกโดยใช้ SHELL181 [2] เพื่อจำลองวัสดุประสานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรงกระบอกคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และทำการยึดรั้งระบบโครงสร้างโดยต้านการเคลื่อนที่แบบสมมาตร [2] บนระนาบ $z=0$ $\theta=0$ และ $\theta=90$ อีกทั้งรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งที่ระนาบ $z=L/2$ เมื่อ

ส่งผ่านเงื่อนไขสภาวะขอบเขตจากวัตถุสู่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาพที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งในมุมมองตามขวางและมุมมองตามยาว



ก. มุมมองตามขวาง



ข. มุมมองตามยาว

ภาพที่ 4.3 เงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

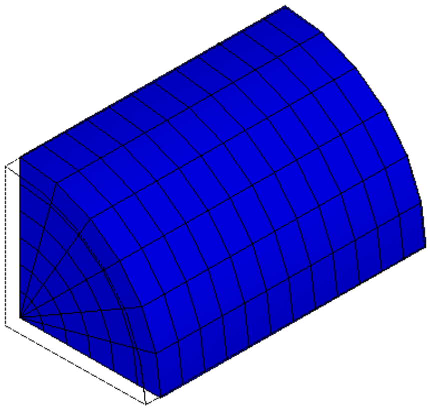
4.2 การทดสอบการลู่เข้า

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุทั้งสามชนิดอันประกอบด้วย ทรงกระบอกคอนกรีต วัสดุประสาน และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมใยคือ การตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขสภาวะขอบเขตร่วมกับการทดสอบการลู่เข้าของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย โดยพิจารณาสนามหน่วยแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งจากแบบจำลองวัสดุทรงกระบอกยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ถูกโอบรัดด้วยท่อผนังบางซึ่งมีสติฟเนสเฉพาะตามแนวขอบรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งแสดงในบทที่ 3 โดยแทนค่าเชิงตัวเลข ดังตารางที่ 4.1

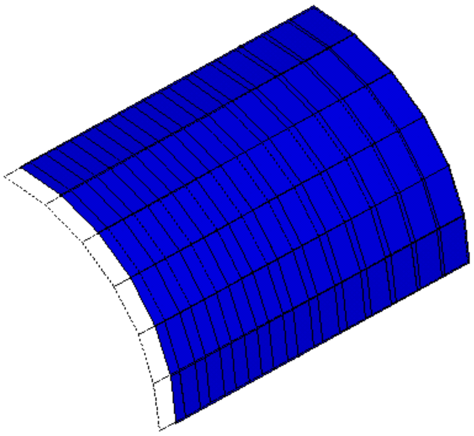
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

D	0.15 ม	E_{cyl}	200 เมกะปาสคาล
L	0.3 ม	E_{tube}	5 กิกะปาสคาล
t	0.3 มม	ν_{cyl}	0.20
u_z^*	-1 ซม	ν_{tube}	0.30

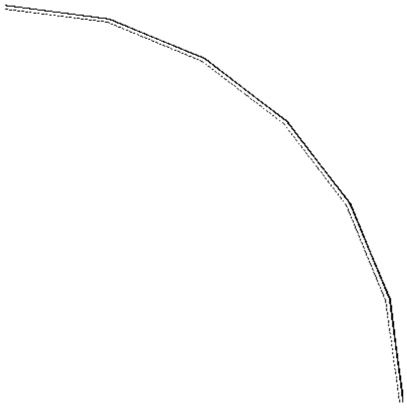
พิจารณาความคลาดเคลื่อนจากผลต่างระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ [33] ในการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัตถุทรงกระบอกและท่อผนังบางเมื่อรับแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่ง เป็นไปตามภาพที่ 4.4 โดยที่ เส้นประขอบในและเส้นทึบขอบนอกซึ่งปรากฏในภาพที่ 4.4 ค. แสดงแนวขอบของท่อผนังบางก่อนและหลังรับแรง ตามลำดับ



ก. การเปลี่ยนรูปของวัตถุทรงกระบอก



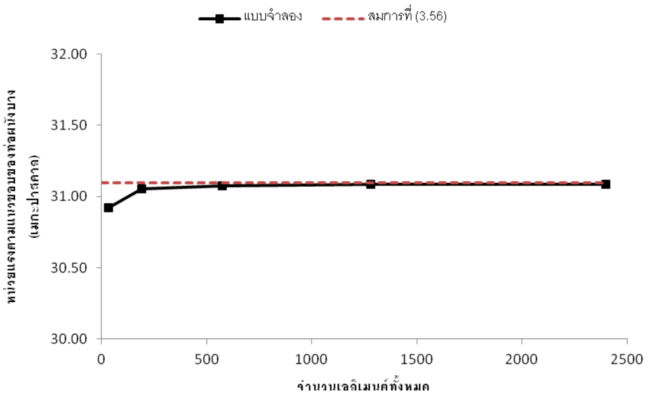
ข. การเปลี่ยนรูปของท่อผนังบาง (มุมมองด้านข้าง)



ค. การเปลี่ยนรูปของท่อผนังบาง (มุมมองตามขวาง)

ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนรูปของวัตถุในแบบจำลอง

ตรวจสอบจำนวนเอลิเมนต์ที่ทำให้แบบจำลอง มีสนามหน่วยแรงสอดคล้องกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ โดยพิจารณาหน่วยแรงตามแนวขอบของท่อผนังบาง ($\sigma_{\theta(tube)}$) เพื่อทดสอบการลู่เข้า (Convergence test) ซึ่งผลการทดสอบการลู่เข้าของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบความเหมาะสมของเงื่อนไขสภาวะขอบเขต

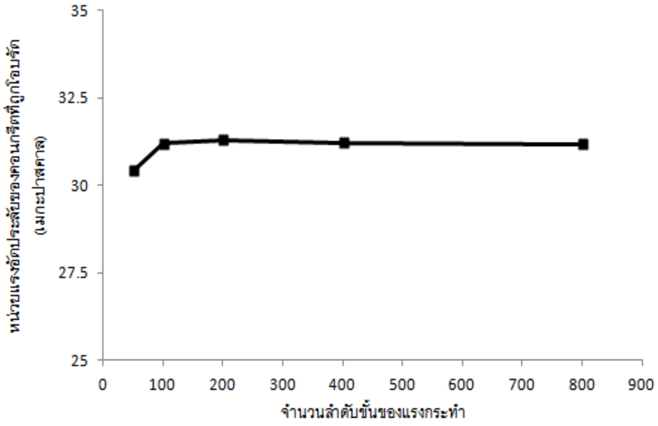
จากการทดสอบพบว่า จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คือ 576 เอลิเมนต์ เนื่องจากหน่วยแรงตามแนวขอบของท่อผนังบางมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบสนามหน่วยแรง ระหว่างผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สนามหน่วยแรงของวัตถุทรงกระบอกที่โอบรัดด้วยท่อผนังบาง

หน่วยแรง	ผลการวิเคราะห์ (เมกะปาสคาล)	ผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
		ค่าที่ได้ (เมกะปาสคาล)	ความคลาดเคลื่อน (%)
$\sigma_{r(cyl)}$	-0.12	-0.13	0.81
$\sigma_{\theta(cyl)}$	-0.12	-0.13	0.81
$\sigma_{z(cyl)}$	-6.72	-6.72	8.67×10^{-3}
$\sigma_{\theta(tube)}$	31.09	31.08	5.80×10^{-2}

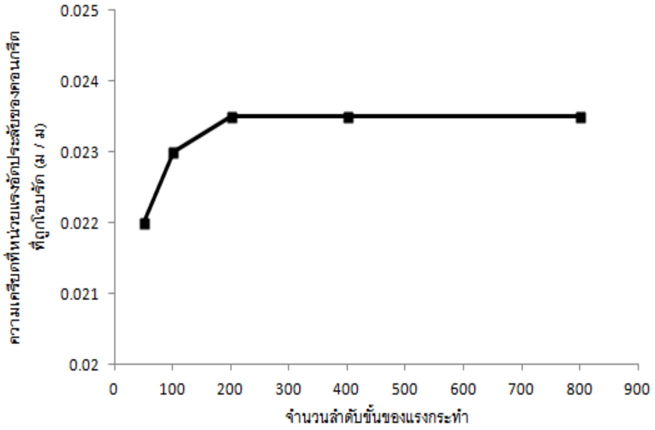
หน่วยแรงที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในตารางที่ 4.2 วัดตามขอบของวัตถุทรงกระบอกซึ่งมีค่าเท่ากันตลอดทุกเอลิเมนต์ในแบบจำลอง โดยพิจารณาหน่วยแรง ที่พิกัด $(D/2, 45, L/2)$ จากผลที่เกิดขึ้น พบว่าสนามหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัตถุทรงกระบอกและท่อผนังบาง เป็นไปตามผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3

นอกเหนือจากการทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนลำดับขั้นของแรงกระทำถือเป็นอีกขั้นตอนตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนนำไปใช้ทำนายปัญหาต่อไป จากการใช้แบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อทดสอบการลู่เข้าของจำนวนลำดับขั้นของแรงกระทำจากการให้แรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด 0.1 ม/ม พบว่าการให้แรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งมากกว่า 200 ลำดับขั้น มีความแตกต่างของค่าหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวน้อยมาก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.6 ส่งผลให้งานวิจัยนี้ให้แรงกระทำต่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งเท่ากับ 200 ลำดับขั้นต่อการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด 0.1 ม/ม



(ก) ความแตกต่างของหน่วยแรง

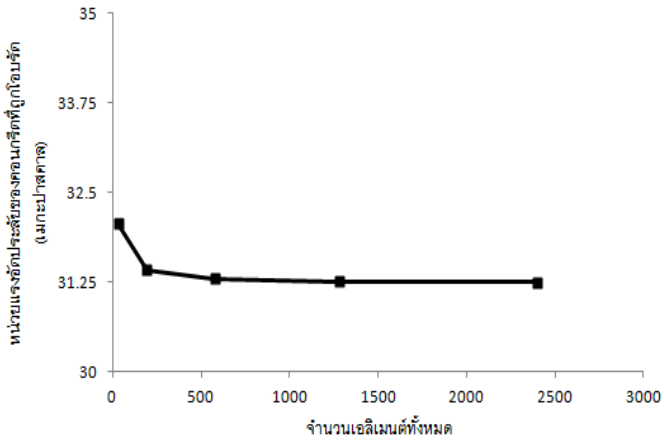
ภาพที่ 4.6 การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ของจำนวนลำดับขั้นของแรงกระทำจากการให้แรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด 0.1 ม/ม



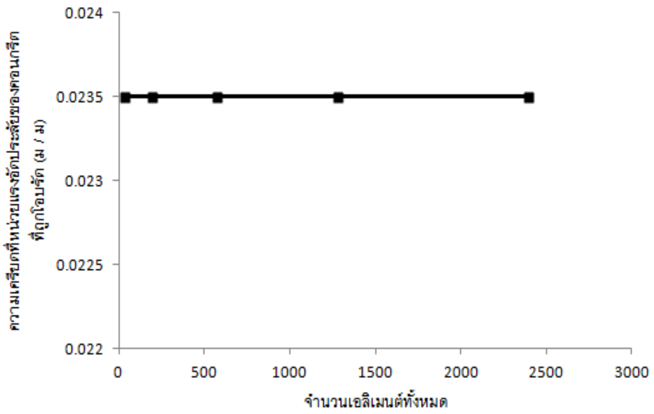
(ข) ความแตกต่างของหน่วยการหดตัว

ภาพที่ 4.6 (ต่อ) การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ของจำนวนลำดับขั้นของแรงกระทำจากการให้แรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด 0.1 ม/ม

ในทำนองเดียวกัน การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่เหมาะสมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถูกพิจารณาโดยใช้แบบจำลองควบคุม ซึ่งพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่เหมาะสมสำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับ 576 และ 624 เอลิเมนต์ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดให้มากกว่า 576 เอลิเมนต์สำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และ 624 เอลิเมนต์สำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำให้ค่าความแตกต่างของค่าหน่วยแรงน้อยมาก รวมถึงไม่ปรากฏความแตกต่างของหน่วยการหดตัวจากการเพิ่มเอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตทั้งที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ถูกแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5

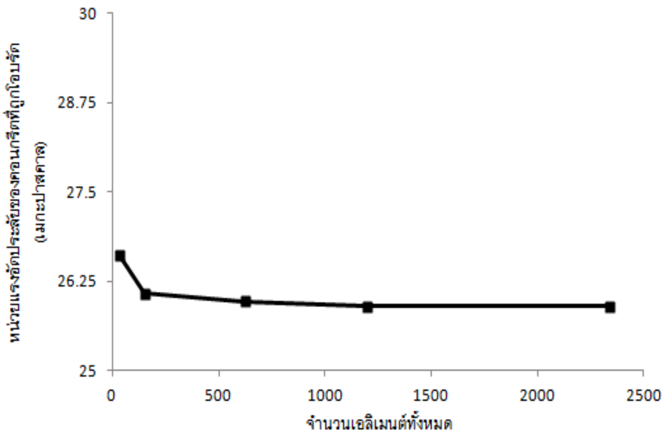


(ก) ความแตกต่างของหน่วยแรง

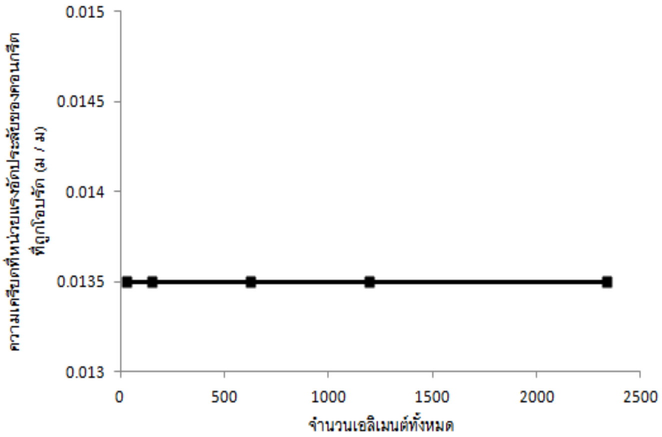


(ข) ความแตกต่างของหน่วยการหดตัว

ภาพที่ 4.7 การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



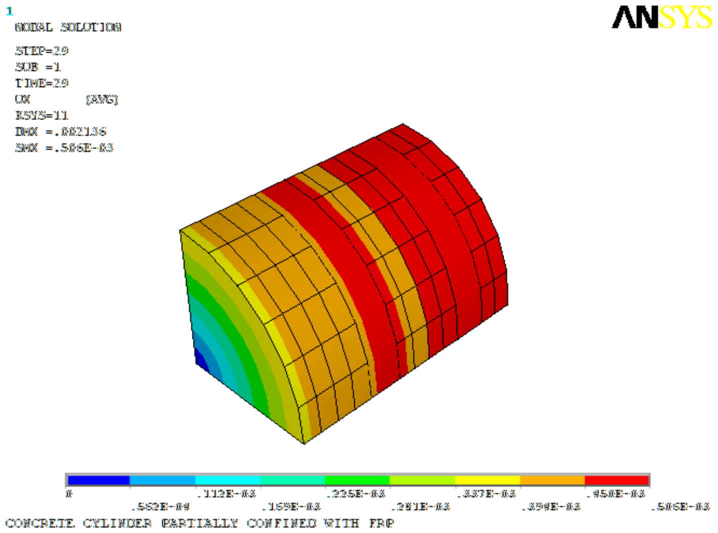
(ก) ความแตกต่างของหน่วยแรง



(ข) ความแตกต่างของหน่วยการหดตัว

ภาพที่ 4.8 การทดสอบการลู่เข้าของจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมีของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

งานวิจัยในอดีต [20,22,23,25,26] สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นภายใต้เกณฑ์การคราก Drucker-Prager ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีตเป็นค่าคงที่ตลอดจนคอนกรีตเกิดหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดมีความโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตรับหน่วยแรงอัดกระทำสูงขึ้น [28] งานวิจัยนี้กำหนดให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับซีแคนท์โมดูลัส โดยหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดคำนวณได้จากหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดซึ่งเสนอโดย Popovics [4] ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4.1)

$$E_c = E_{sec} = \frac{f'_{co}}{\left(\frac{f'_{co}}{E_c}\frac{n}{n-1}\right)} = \frac{E_c(n-1)}{n} = \frac{\left(6900+3320\sqrt{f'_{co}}\right)(n-1)}{n} \qquad (4.1)$$

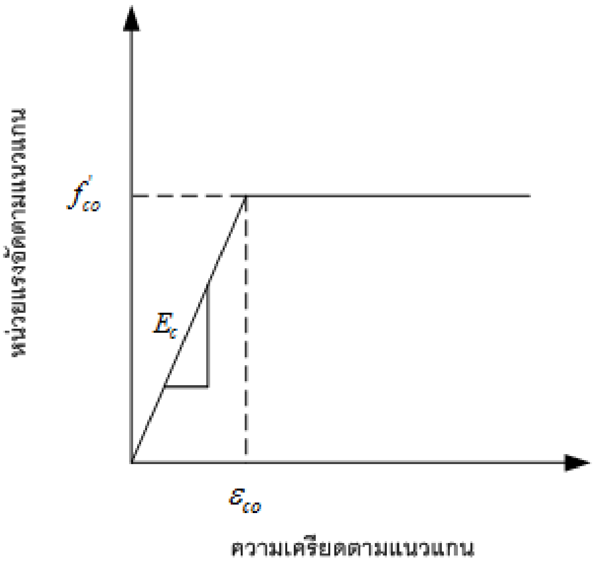
โดยที่ f'_{co} = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

E_{sec} = ซีแคนท์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)

n = $0.8+\dfrac{f'_{co}}{17}$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของคอนกรีต

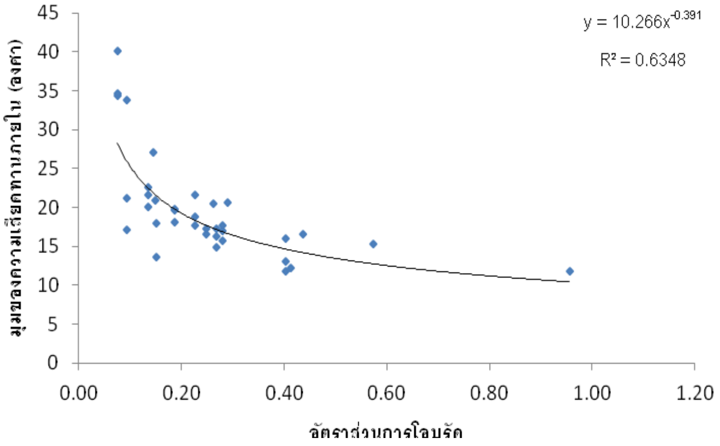
การเพิ่มหน่วยแรงอัดกระทำต่อคอนกรีตส่งผลให้อัตราส่วนปัวซองมีค่ามากกว่า 0.5 [28] ซึ่งแนวทางปรับอัตราส่วนปัวซองตามลำดับขั้นของแรงกระทำในลักษณะเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งเช่นเดียวกับการปรับโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตส่งผลให้สมาชิกบางค่าของสติฟเนสเมตริกซ์โครงสร้างเป็นค่าอนันต์ [2] งานวิจัยนี้ไม่ทำการปรับอัตราส่วนปัวซองตามแรงอัดกระทำที่เพิ่มขึ้นและคำนวณอัตราส่วนปัวซองโดยขึ้นอยู่กับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด [34] ตามสมการที่ (4.2)

$$v_c = 0.035\sqrt{f_{co}^{'}} \tag{4.2}$$

โดยที่ $f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

v_c = อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ในเบื้องต้นคำนวณได้จากสมการที่ (3.35) และทำนายมุมของความเสียดทานภายในโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ได้จากการทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตขนาดมาตรฐาน (15×30 ซม) ที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของ Xiao และ Wu [13] Barros และ Ferreira [18] และ Shehata และคณะ [35] รวมทั้งสิ้น 36 จุดข้อมูล โดยตั้งสมมติฐานว่าอัตราส่วนการโอบรัดส่งผลต่อมุมของความเสียดทานภายใน และใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับระเบียบวิธี False Position method [33] เพื่อวิเคราะห์ค่ามุมของความเสียดทานภายในที่เหมาะสมกับแต่ละชิ้นตัวอย่างทดสอบมากที่สุด รวมถึงความชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงที่สองของความสัมพันธ์จากผลการทดสอบ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับความชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวในช่วงที่สองของความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการวิเคราะห์ความถดถอยพบว่าสมการความถดถอยเลขยกกำลังเป็นรูปแบบสมการความถดถอยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient of determination, r^2) สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.63 ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของความเสียดทานภายในและอัตราส่วนการโอบรัด

จากวิเคราะห์ความถดถอยดังภาพที่ 4.11 มุมของความเสียดทานภายในสามารถทำนายได้โดยใช้สมการความถดถอยเลขยกกำลังซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4.3)

$$\varphi = 10.266\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{-0.391} \tag{4.3}$$

โดยที่ f_l = หน่วยแรงโอบรัด (เมกะปาสคาล)

$f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

φ = มุมของความเสียดทานภายใน (องศา)

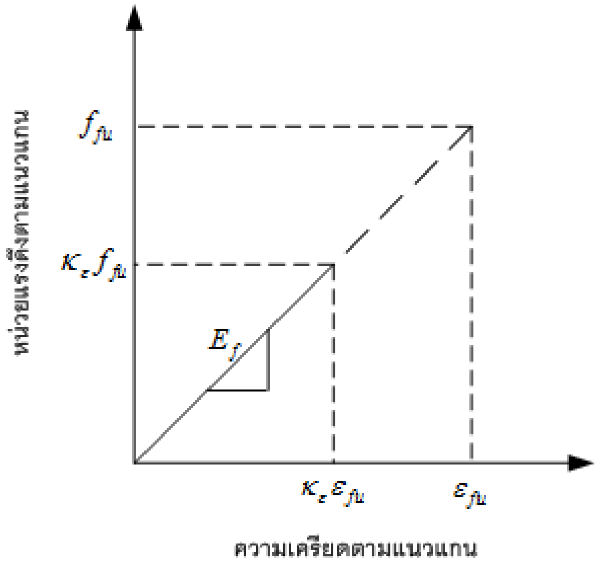
เนื่องจากสมการที่ (4.3) มีที่มาจากการวิเคราะห์ความถดถอยของฐานข้อมูลในกลุ่มปิด ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้สมการที่ (4.3) ขอบเขตการประยุกต์ใช้สมการที่ (4.3) โดยจำกัดคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องคือทรงกระบอกคอนกรีต พอลิเมอร์เสริมเส้นใย และอัตราส่วนการโอบรัดได้แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าขอบเขตของฐานข้อมูลที่ Lam และ Teng [16] ใช้วิเคราะห์หาสมการความถดถอยเพื่อทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตหลังถูกโอบรัดอีกทั้งสมการความถดถอยดังกล่าวของ Lam และ Teng [16] ถูกปรับปรุงและใช้เป็นสมการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของเสาคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ขอบเขตการใช้งานสมการความถดถอยเพื่อทำนายมุมของความเสียดทานภายในและประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ค่าขอบเขต	D (ม)	L (ม)	$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	t_f (มม)	E_{frp} (กิกะปาสคาล)	ε_{fu} (ม / ม)	$f_l / f_{co}^{'}$
ขอบเขตล่าง	0.15 (0.10)	0.30 (0.20)	17.45 (26.20)	0.1650 (0.1110)	105 (13.6)	0.0105 (0.0022)	0.0752 (0.0898)
ขอบเขตบน	0.15 (0.20)	0.30 (0.79)	57.51 (55.20)	1.1430 (5.0400)	251 (629.6)	0.0155 (0.0462)	0.9563 (1.1794)

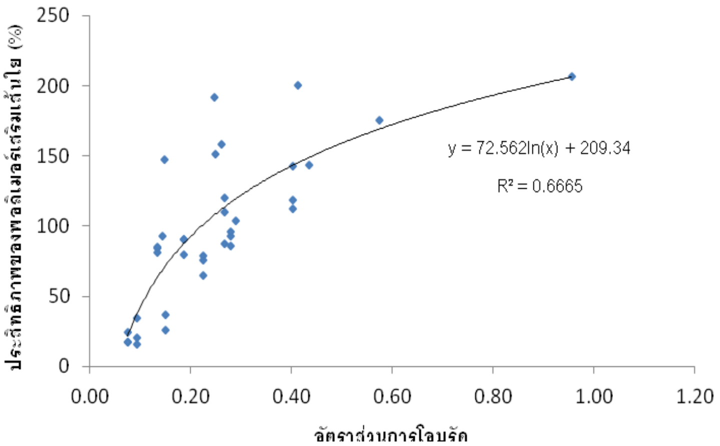
นอกจากนี้ มุมไดลาแทนซีในเบื้องต้น ซึ่งเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับมุมของความเสียดทานภายในเพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับกฎการไหล [2] กล่าวคือ มุมไดลาแทนซีสามารถทำนายได้จากสมการที่ (4.3) เช่นเดียวกับการทำนายค่ามุมของความเสียดทานภายใน

ในการจำลองชั้นวัสดุประสานและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สมมติให้อัตราส่วนปัวซองของพอลิเมอร์เสริมใยและวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.3 รวมทั้งวัสดุประสานและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีความหนาเท่ากัน โดยที่ความหนาและโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นไปตามข้อมูลซึ่งระบุในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [13,18,35] ในขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุประสานถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับ 1 ปาสคาล เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุประสานไม่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตหลังถูกโอบรัด [25] และเพื่อป้องกันการลู่ออก (Divergence) ของผลเฉลยเนื่องจากการป้อนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุต่ำเกินไป [2] มีเกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ในลำดับขั้นของแรงกระทำก่อนหน้าที่เกิดหน่วยการหดตัวตามแนวขอบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากกว่าหรือเท่ากับหน่วยการหดตัวประสิทธิผลของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขณะวิบัติ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงดังภาพที่ 4.12



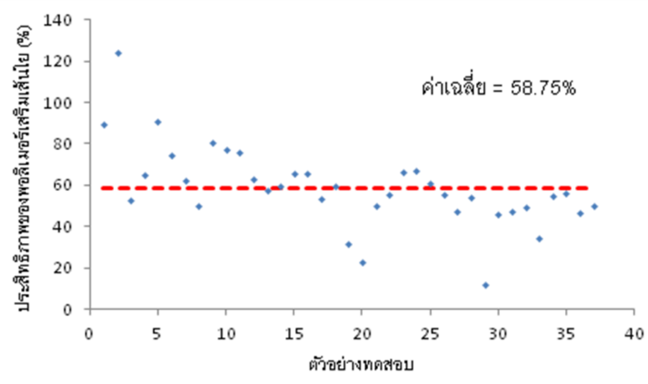
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงตามแนวแกนและหน่วยการยืดตัวตามแนวแกนของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตัวประกอบประสิทธิผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างหน่วยการหดตัวประลัยที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการทดลองสามารถทำนายได้จากสมการความถดถอยซึ่งเกิดจากการวัดค่าตัวประกอบดังกล่าวที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีค่ามุมของความเสียดทานในเบื้องต้นซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4.3) ในการวิเคราะห์ความถดถอยซึ่งสมมติให้อัตราส่วนการโอบรัดส่งผลต่อประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความหมายเดียวกันกับตัวประกอบประสิทธิผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างหน่วยการหดตัวประลัยที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการทดลอง พบว่าสมการความถดถอยเชิงลอการิทึมมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย [33] เท่ากับ 0.67 จัดเป็นรูปแบบสมการความถดถอยที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอัตราส่วนการโอบรัดแสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอัตราส่วนการโอบรัด

เนื่องจากประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยดังภาพที่ 4.13 ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบ [13,18,35] ซึ่งโดยส่วนใหญ่พบว่า ประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าน้อยกว่า 100% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำให้งานวิจัยนี้พิจารณาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบจริง [13,18,35] เพื่อใช้เป็นเกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ต่อไป ภาพที่ 4.14 แสดงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยจากผลการทดสอบ [13,18,35] มีค่าเท่ากับ 58.75%



ภาพที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบ

จากการปรับเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แนวทางการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต [22,23,25] ตารางที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของแบบจำลองเทียบกับผลทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ด้วยวิธีต่างๆเทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager	ความแตกต่างสัมบูรณ์เทียบกับผลทดสอบ (%)			
	f'_{cc}		ε_{cc}	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
สมการที่ (3.35) และ (4.3)	27.41	15.66	57.31	61.84
Becque [22]	20.26	11.09	156.79	167.01
Mirmiran และคณะ [23]	22.14	11.03	102.50	159.09
Sadeghian และคณะ [25]	22.08	11.08	82.34	123.73

จากการตรวจสอบความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากแบบจำลองเทียบกับผลทดสอบ [18] ในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งจะ

แสดงต่อไปในหัวข้อที่ 4.4 พบว่าการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker-Prager ตามข้อเสนอของ Mirmiran และคณะ [23] มีความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่ำที่สุด ส่งผลให้งานวิจัยนี้พิจารณาข้อเสนอของ Mirmiran และคณะ [23] เพื่อคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager สำหรับการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดต่อไป

ตารางที่ 4.5 แสดงการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของผลการทดสอบในอดีต [18] จำนวน 8 ตัวอย่างทดสอบจากความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลทดสอบ โดยพิจารณาเกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเท่ากับ 58.75% และพิจารณาความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากสมการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] เทียบกับผลทดสอบ และพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวจากผลทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ใกล้เคียงกับการใช้สมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3]

ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากแบบจำลองเทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การทำนาย $f_{cc}^{'}$ และ ε_{cc}	ความแตกต่างสัมบูรณ์เทียบกับผลทดสอบ				κ_{FRP} (%)
	$f_{cc}^{'}$		ε_{cc}		
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	
ข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3]	30.07	5.81	27.64	14.76	55.00
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	32.61	8.22	32.03	11.01	58.75

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองในข้างต้น งานวิจัยนี้กำหนดเกณฑ์หยุดการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อหน่วยการหดตัวตามแนวขอบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับร้อยละ 58.75 ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ได้ดังนี้

$$c = \left(f_{co}^{'} - 5\sqrt{3} \right) \left(\frac{3 - \sin(\varphi)}{6\cos(\varphi)} \right) \tag{4.4}$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{3}{1 + 0.4\left(\frac{f_{co}^{'}}{\sqrt{3}} \right)} \right) \tag{4.5}$$

$$\varphi_f = 0 \tag{4.6}$$

โดยที่ c = การยืดเหนี่ยว (เมกะปาสคาล)

$f_{co}^{'}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

φ = มุมของความเสียดทานภายใน (องศา)

φ_f = มุมไดลาแทนซี (องศา)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ถูกแสดงรายละเอียดการตรวจสอบความเหมาะสมไว้ในภาคผนวก ก

4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้เกณฑ์การคราก Drucker- Prager ซึ่งคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องอันประกอบด้วยการยึดเหนี่ยวจากสมการที่ (3.35) มุมของความเสียดทานภายในและมุมไดลาแทนซีจากสมการที่ (4.3) เทียบกับการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager จากงานวิจัยอื่น [22,23,25] และใช้เกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ที่ 58.75% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยที่ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ [18] แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งได้จากการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ด้วยวิธีต่างๆเทียบกับผลทดสอบในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager	ความแตกต่างสัมบูรณ์เทียบกับผลทดสอบ			
	f'_{cc}		ε_{cc}	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
สมการที่ (3.35) และ (4.3)	30.81	13.66	52.39	11.03
Becque [22]	22.71	12.11	80.38	20.39
Mirmiran และคณะ [23]	19.83	7.22	24.34	14.89
Sadeghian และคณะ [25]	20.15	7.05	39.72	21.30

งานวิจัยนี้คำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ตามข้อเสนอของ Mirmiran และคณะ [23] และใช้เกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ที่ 58.75% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ [18] ต่ำที่สุด

นอกจากนี้ การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้มีการแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ตามข้อเสนอของ Mirmiran และคณะ [23] และใช้เกณฑ์หยุดการวิเคราะห์ที่ 58.75% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่งผลให้ความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ [18] มีค่าเท่ากับ 19.83% และ 24.34% ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ [18] มีค่าเท่ากับ 7.22 และ 14.89 ตามลำดับ

บทที่ 5

การศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียว

5.1 ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

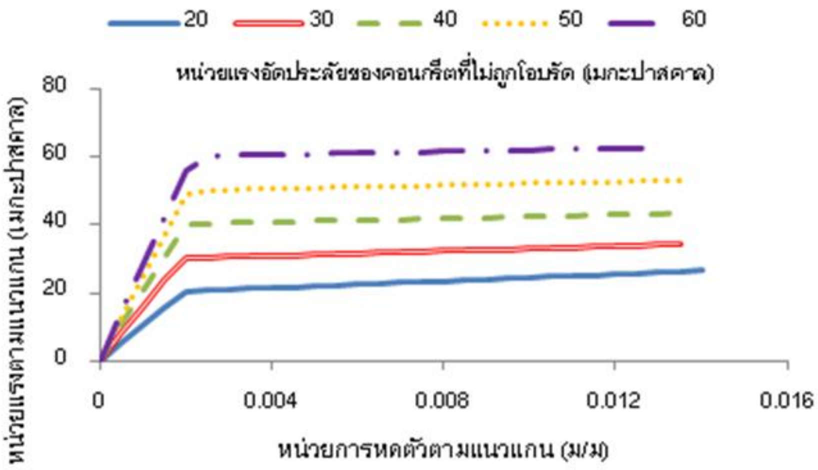
ตัวแปรที่ทำการศึกษาในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประกอบด้วย หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความหนาและหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ต่อค่าหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่สภาวะวิบัติของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยมีรายละเอียดการแปรผันข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ 5.1 และกำหนดให้แบบจำลองควบคุมเป็นทรงกระบอกคอนกรีตกำลังอัดต่ำ มีหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดเท่ากับ 20 เมกะปาสคาล ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยความหนา 0.2 มม ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยการหดตัวประลัยเท่ากับ 120 กิกะปาสคาล และ 0.0105 ม/ม ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการแปรผันข้อมูลป้อนเข้าเพื่อทำการศึกษาตัวแปรต่างๆในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

f'_{co} (เมกะปาสคาล)	t_f (มม)	E_{frp} (กิกะปาสคาล)	ε_{fu} (ม / ม)
20	0.2	120	0.01050
30	0.3	180	0.01575
40	0.4	240	0.02100
50	0.5	300	0.02625
60	0.6	360	0.03150

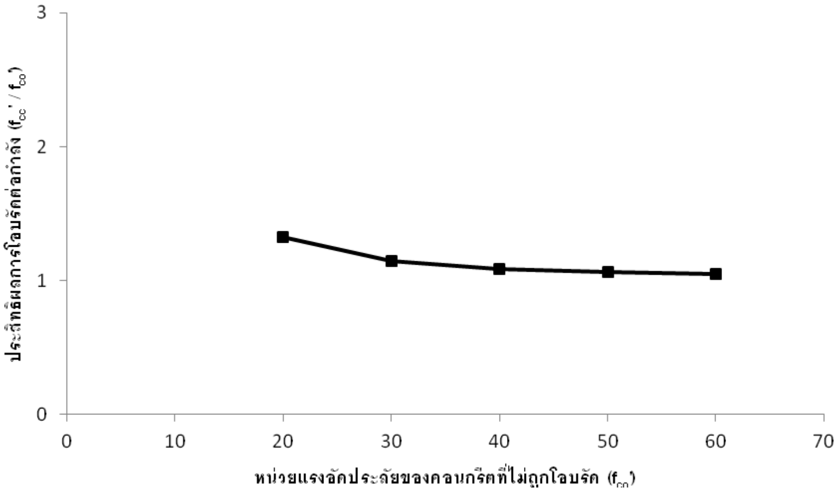
5.1.1 ผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

พิจารณาคุณสมบัติหลักของคอนกรีตที่เป็นข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คือหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดเป็นตัวแปรต้นในการศึกษาตัวแปรต่างๆ ในขณะที่ข้อมูลป้อนเข้าค่าอื่นที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วยอัตราส่วนปัวซอง โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น และหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ซึ่งขึ้นกับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดทั้งสิ้น ส่งผลให้ไม่มีการศึกษาข้อมูลป้อนเข้าค่าอื่นที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของคอนกรีต จากการแปรผันหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดในช่วง 20 ถึง 60 เมกะปาสคาล ดังสดมภ์ที่ 1 ในตารางที่ 5.1 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 5 แบบจำลองที่ค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่างกันแสดงดังภาพที่ 5.1

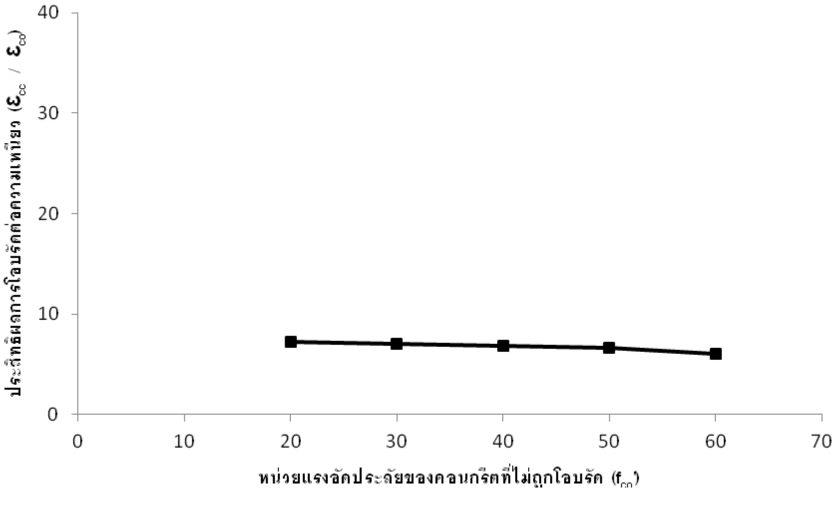


ภาพที่ 5.1 ผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวแสดงดังภาพที่ 5.2 และพบว่าการเพิ่มหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุม ส่งผลให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวลดลงเหลือ 79.04% และ 83.87% ตามลำดับ



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

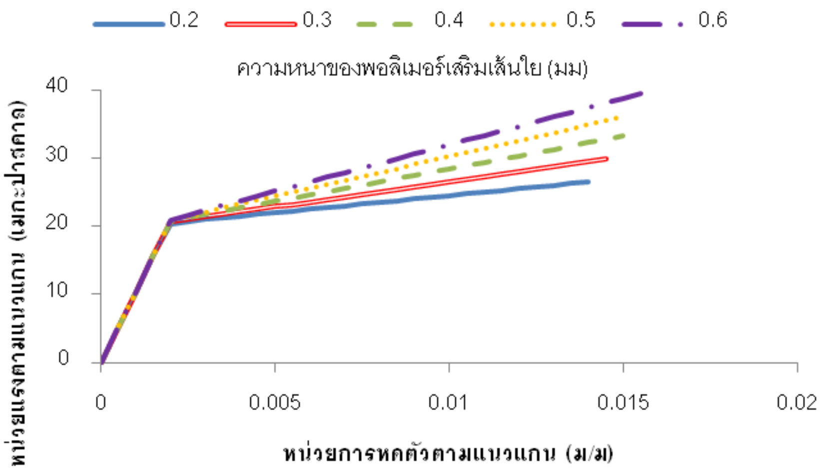


(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.2 ผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด

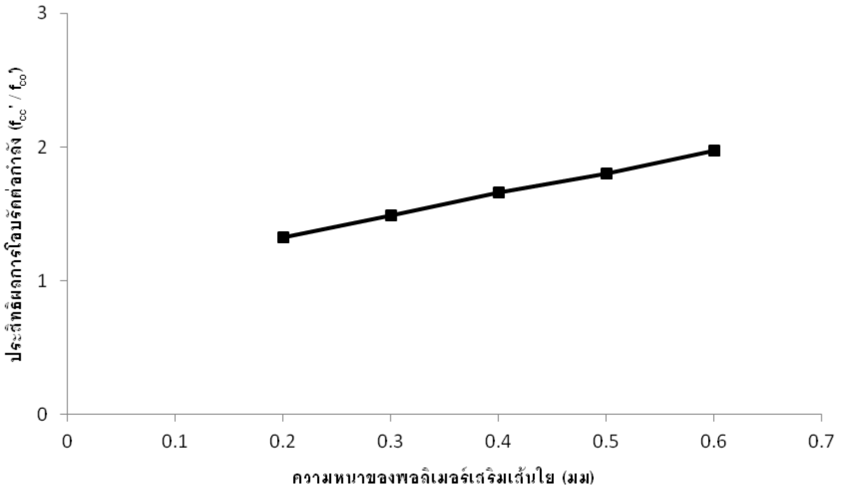
5.1.2 ผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งในทางปฏิบัติคือการเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยให้อัตราส่วนการโอบรัดสูงขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงโอบรัดมีค่ามากขึ้น ภาพที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีความหนาต่างกันโดยแปรผันค่าความหนาในช่วง 0.2 ถึง 0.6 มม ดังสดมภ์ที่ 2 ในตารางที่ 5.1

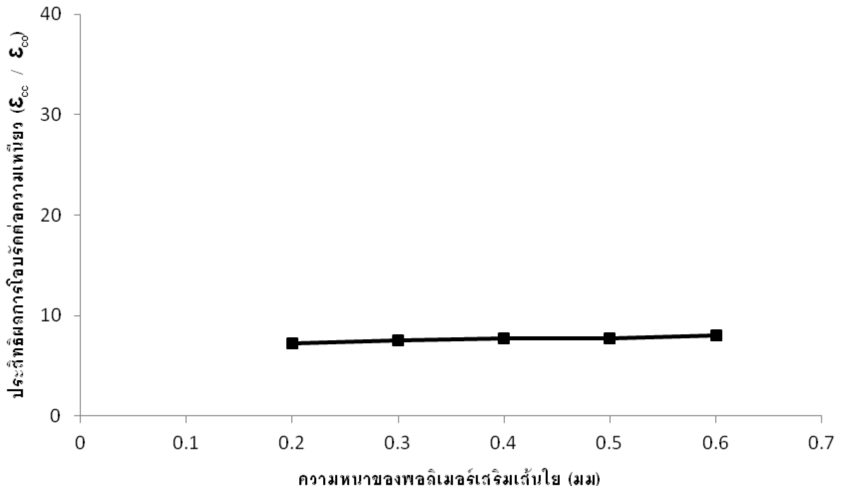


ภาพที่ 5.3 ผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ภาพที่ 5.4 แสดงการเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุม ส่งผลให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวเพิ่มขึ้นเป็น 148.61% และ 110.71% ตามลำดับ



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง



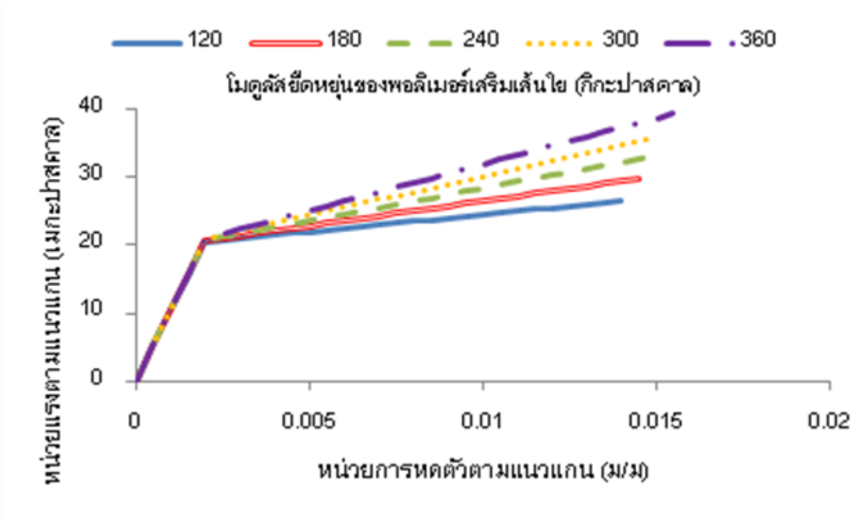
(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.4 ผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัด ในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด

5.1.3 ผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

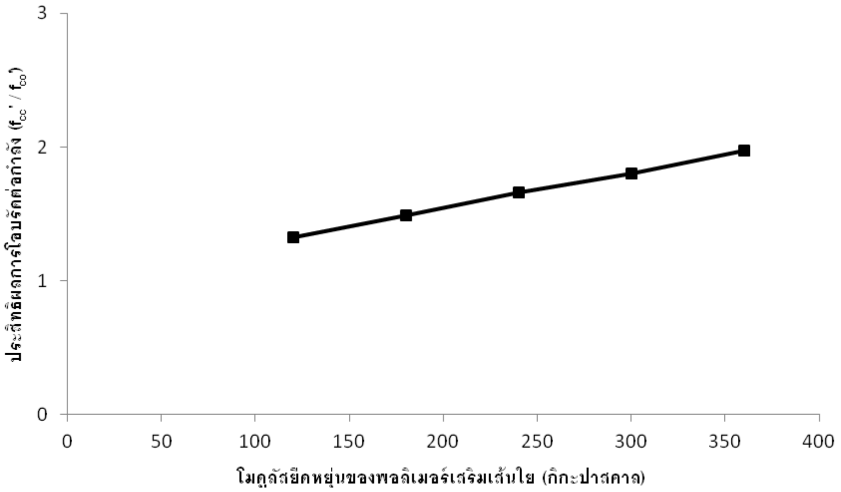
การเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทำให้หน่วยแรงโอบรัดเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยที่เลือกใช้ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างกัน มีการแปรผันค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วง 120 ถึง 360 กิกะปาสคาล ดังสดมภ์ที่ 3 ในตารางที่ 5.1 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและ

หน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างกันแสดงดังภาพที่ 5.5

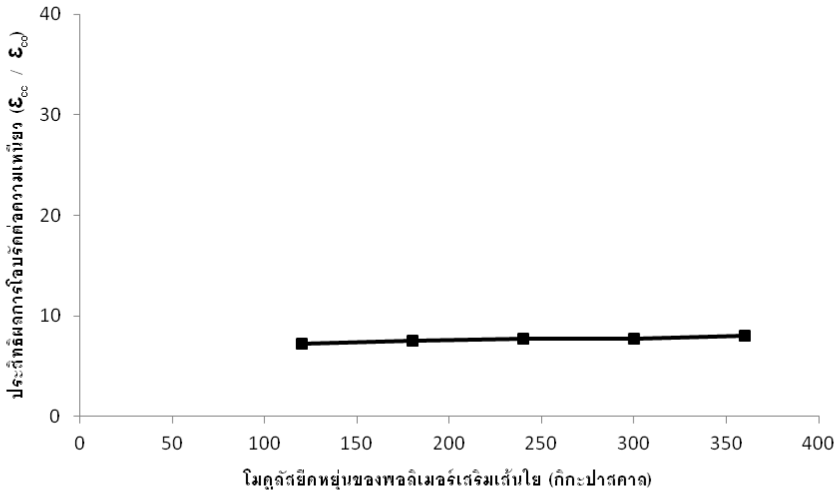


ภาพที่ 5.5 ผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ประสิทธิผลการโอบรัดทั้งในด้านกำลังและความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น 148.61% และ 110.71% ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุม แสดงดังภาพที่ 5.6 ซึ่งมีผลในทำนองเดียวกับการเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุม



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

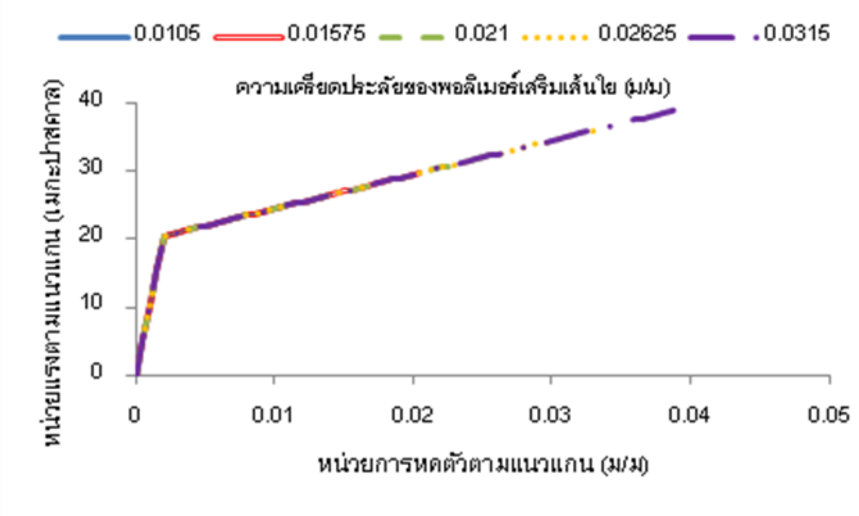


(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.6 ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด

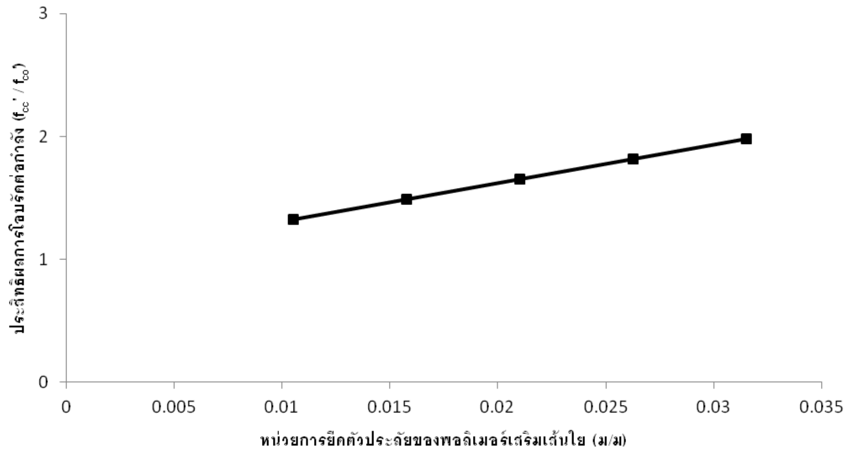
5.1.4 ผลกระทบของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยอาจส่งผลให้หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ภาพที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีหน่วยการหดตัวประลัยต่างกันและแปรผันหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วง 0.0105 ถึง 0.0315 ม/ม ดังสดมภ์ที่ 4 ในตารางที่ 5.1



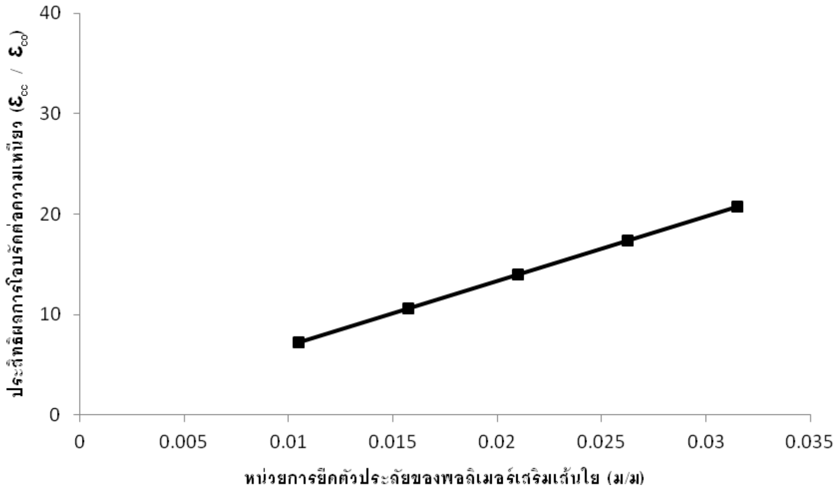
ภาพที่ 5.7 ผลกระทบของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อ
ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูก
โอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ภาพที่ 5.8 แสดงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวซึ่งมีค่าเท่ากับ 149.26% และ 285.71% ตามลำดับ จากการเพิ่มหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุม จัดเป็นตัวแปรต่างๆที่มีผลมากที่สุดต่อการเพิ่มประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียว



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

ภาพที่ 5.8 ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการ
โอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด



(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

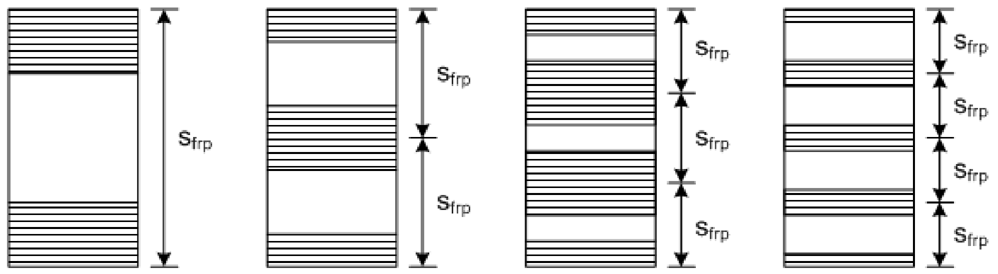
ภาพที่ 5.8 (ต่อ) ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมด

5.2 ทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยเมื่อเทียบกับการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตตลอดความยาวด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ความหนาเท่ากัน ในขณะเดียวกัน พอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งถูกลดปริมาณก่อให้เกิดประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในการศึกษาตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กำหนดให้ทรงกระบอกคอนกรีตมีหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดเท่ากับ 20 เมกะปาสคาล โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยความหนา 0.2 มม โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยการหดตัวประลัยเท่ากับ 120 กิกะปาสคาล และ 0.0105 ม/ม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองควบคุมในกรณีที่โอบรัดทั้งหมด และทำการลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในลักษณะต่างๆ ยกเว้นในกรณีศึกษาผลจากตัวแปรต่างๆนอกเหนือจากการลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งแสดงในหัวข้อย่อยที่ 5.2.2 เป็นต้นไป

5.2.1 ผลกระทบของปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ลดลง

ศึกษาผลกระทบของปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ลดลงต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีรูปแบบการโอบรัดแตกต่างกันดังภาพที่ 5.9 ซึ่งแบ่งตามอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความยาวของทรงกระบอกคอนกรีตซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 0.5 0.33 และ 0.25 ตามลำดับ



$s_{frp}/L = 1$ $s_{frp}/L = 0.5$ $s_{frp}/L = 0.33$ $s_{frp}/L = 0.25$

ภาพที่ 5.9 รูปแบบการโอบรัดทรงกระบอกคอนกรีตบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาผลกระทบของปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ลดลง ประกอบด้วยปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่หายไป และการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมด ($\frac{\Delta S_p}{\Delta S_f}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

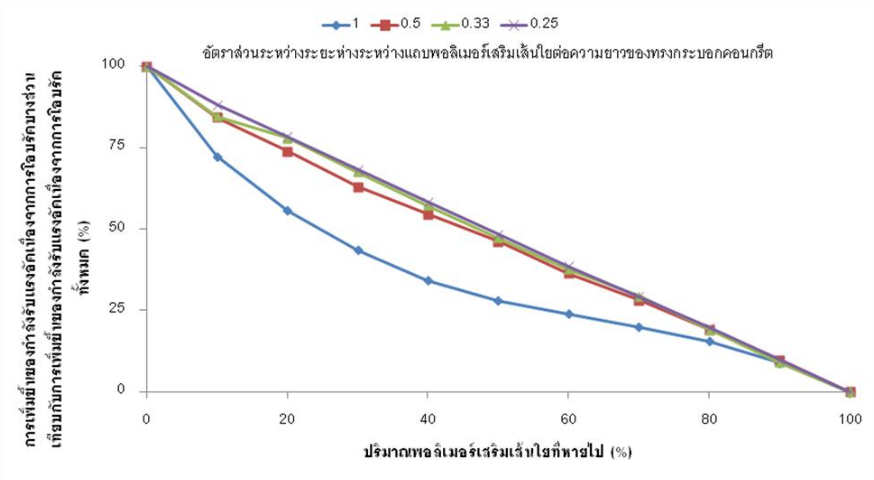
$$\frac{\Delta S_p}{\Delta S_f} = \frac{f'_{cc(p)} - f'_{co}}{f'_{cc(f)} - f'_{co}} \times 100 \qquad (5.1)$$

โดยที่ f'_{co} = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (เมกะปาสคาล)

$f'_{cc(f)}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมด (เมกะปาสคาล)

$f'_{cc(p)}$ = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน (เมกะปาสคาล)

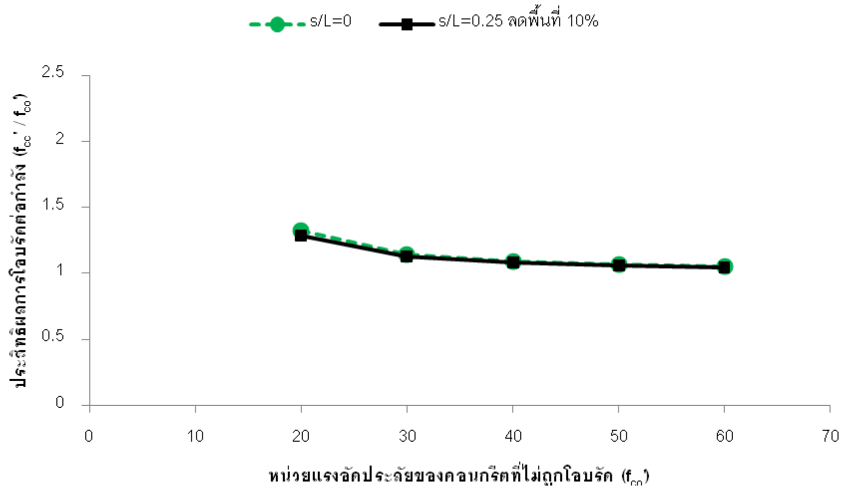
จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความยาวของทรงกระบอกคอนกรีตเท่ากับ 1 การลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมดลดลงมากที่สุดและแตกต่างน้อยลงเมื่อลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากกว่า 80% เทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมดในขณะที่การลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับกรณีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความยาวของทรงกระบอกคอนกรีตเท่ากับ 0.33 และ 0.25 ไม่ปรากฏความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมดอย่างชัดเจน ยกเว้นการลดปริมาณของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 10% เทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 5.10 สำหรับในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความยาวของทรงกระบอกคอนกรีตเท่ากับ 0.25 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมดที่ลดลงน้อยที่สุด ส่งผลให้งานวิจัยนี้พิจารณารูปแบบการโอบรัดดังกล่าวเป็นแบบจำลองควบคุมสำหรับศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวสำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งแสดงต่อไปในหัวข้อที่ 5.2.2



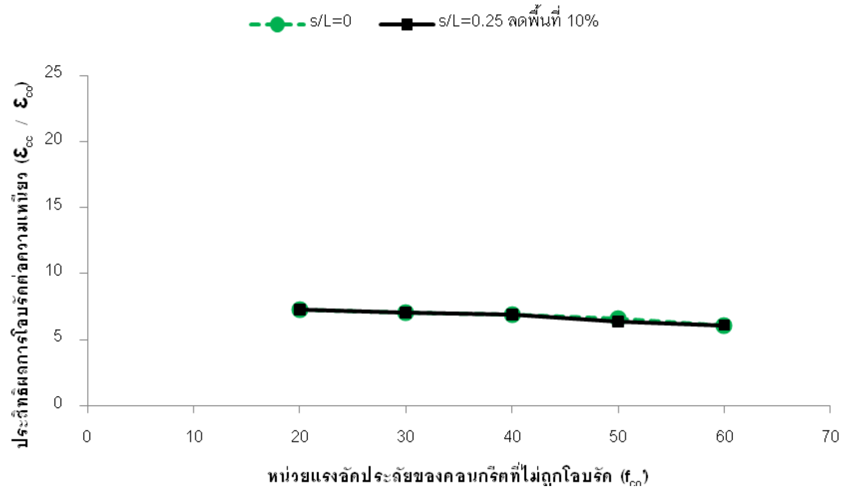
ภาพที่ 5.10 ผลของการลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดบางส่วนเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดทั้งหมด

5.2.2 ผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

กำหนดให้แบบจำลองทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยที่อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อความยาวของทรงกระบอกคอนกรีตเท่ากับ 0.25 และลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลง 10% เทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมด เป็นแบบจำลองควบคุมเนื่องจากมีประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังสูงที่สุดจากการศึกษาตัวแปรต่างๆในหัวข้อย่อยที่ 5.2.1 โดยแปรผันหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดระหว่าง 20 ถึง 60 เมกะปาสคาล ดังที่แสดงในสดมภ์ที่ 1 จากตารางที่ 5.1



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง



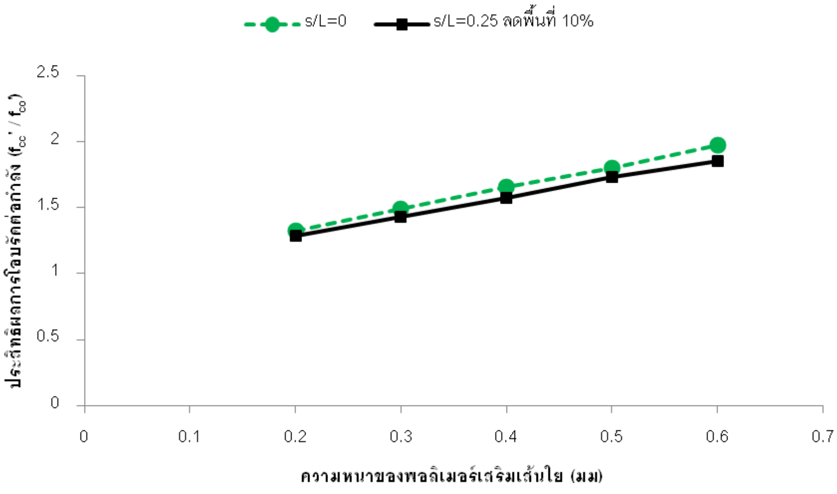
(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.11 ผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดทั้งหมดและผลของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วนดังภาพที่ 5.11 พบว่าการเพิ่มหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวมีค่าลดลงเหลือ 80.50% และ 83.64% ตามลำดับ

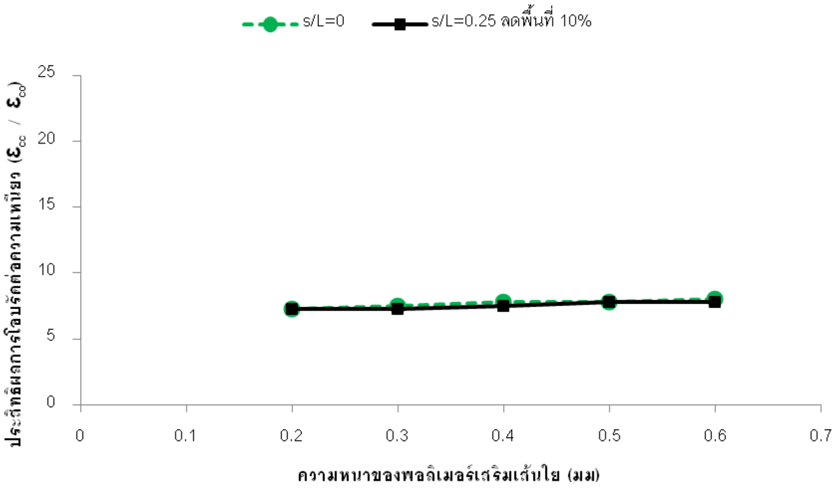
5.2.3 ผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

พิจารณาแบบจำลองควบคุมเช่นเดียวกับหัวข้อย่อยที่ 5.2.2 เพื่อศึกษาผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนในช่วงความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่าง 0.2 ถึง 0.6 มม ดังสดมภ์ที่ 2 ในตารางที่ 5.1 และพบว่าประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวสูงขึ้นคิดเป็น 143.77% และ 107.14% ของประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เมื่อเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเป็นไปตามภาพที่ 5.12



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

ภาพที่ 5.12 ผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน

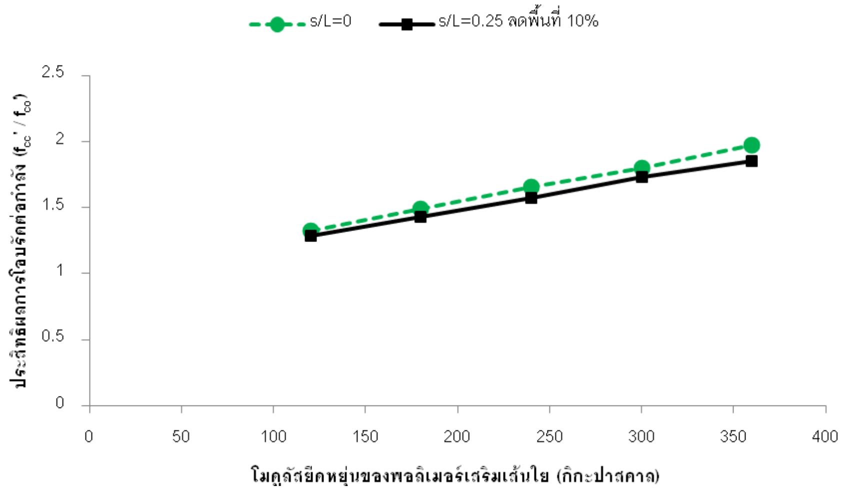


(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

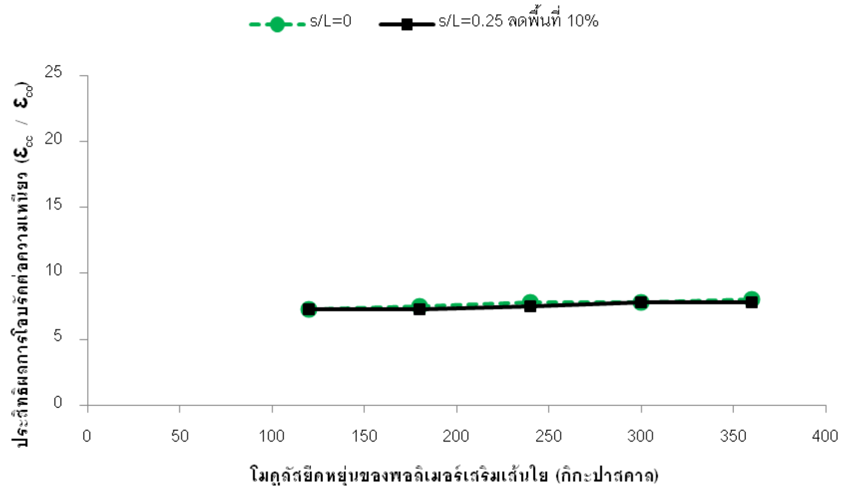
ภาพที่ 5.12 (ต่อ) ผลของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน

5.2.4 ผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ศึกษาผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนจากแบบจำลองควบคุมดังที่แสดงไว้ในหัวข้อย่อยที่ 5.2.2 และพิจารณาโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในช่วง 120 ถึง 360 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นไปตามสดมภ์ที่ 3 จากตารางที่ 5.1 โดยพบว่าเกิดความแตกต่างระหว่างประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนมากขึ้น คิดเป็น 143.77% และ 107.14% ของประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จากโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สูงขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งพบว่าประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวที่สูงขึ้นหลังเพิ่มโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มีค่าเท่ากับในกรณีที่ความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถูกเพิ่มขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูก โอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังภาพที่ 5.13



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง



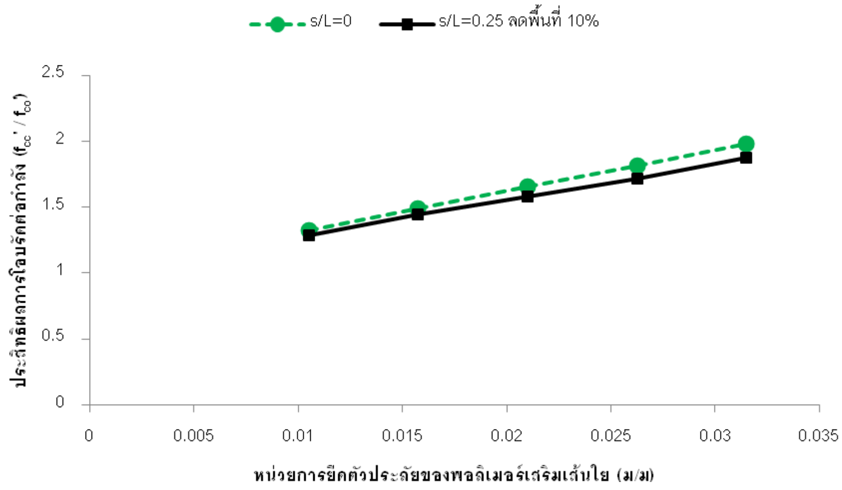
(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.13 ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน

5.2.5 ผลกระทบของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

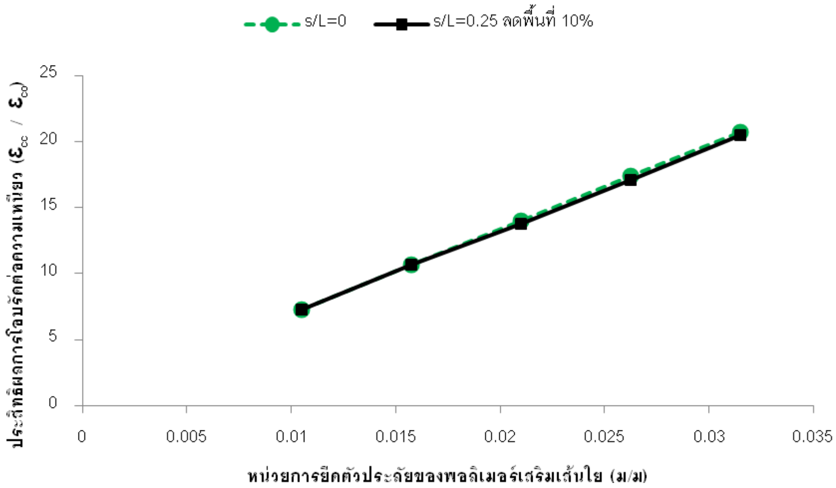
หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ทำการศึกษาผลต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนใช้ค่าอยู่ในช่วงเดียวกับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคือ 0.0105 ถึง 0.0315 ม/ม ซึ่งเป็นไปตามสดมภ์ที่ 4 ในตารางที่ 5.1 และภาพที่ 5.14 แสดงประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวที่กรณีต่างๆเมื่อแปรผันค่าหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่

เพิ่มขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่งผลให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวมีค่าสูงขึ้น คิดเป็น 145.31% และ 282.14% ตามลำดับ ของประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุมในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แสดงถึงอิทธิพลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากที่สุด



(ก) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลัง

ภาพที่ 5.14 ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน



(ข) ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว

ภาพที่ 5.14 (ต่อ) ผลของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวภายหลังคอนกรีตถูกโอบรัดบางส่วน

จากการศึกษาตัวแปรต่างๆต่อค่าหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตทั้งที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดมากที่สุดคือ หน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พิจารณาจากภาพที่ 5.8 และ 5.14 ซึ่งมีแนวโน้มสูงต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิผลการโอบรัดโดยเฉพาะประสิทธิผลการโอบรัดในด้านความเหนียว อีกทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวในลำดับรองลงมาคือ ความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวเท่ากัน ในขณะที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดแปรผกผันกับประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียว กล่าวคือ ทรงกระบอกคอนกรีตกำลังต่ำให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวดีกว่าทรงกระบอกคอนกรีตกำลังที่สูงกว่า และจากการศึกษาผลของการลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่า รูปแบบการโอบรัดที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยน้อยที่สุด ซึ่งตรงกับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจำนวน 5 แถบ และการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดจะเป็น

สัดส่วนกับปริมาณของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย รวมทั้งประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวในแต่ละกรณีที่ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัด ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำนายกำลังรับแรงอัดและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เกณฑ์การคราก Drucker-Prager ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การครากอันประกอบด้วยการยึดเหนี่ยว มุมของความเสียดทานภายใน และมุมไดลาแทนซี และจากการศึกษาหลักการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามข้อกำหนดของสถาบันคอนกรีตของอเมริกา ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิจัยซึ่งแสดงในบทที่ 4 รวมถึงการศึกษาตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตทั้งที่ถูกโอบรัดทั้งหมดและถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังที่ปรากฏในบทที่ 5 สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

6.1.1 การออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์โดยใช้สมการออกแบบตามข้อกำหนดของสถาบันคอนกรีตของอเมริกามีหลักการคล้ายคลึงกับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ ซึ่งข้อแตกต่างจากการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปคือ การใช้ค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแทนด้วยค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด โดยค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการโอบรัดและอัตราส่วนระหว่างหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและหน่วยการหดตัวประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

6.1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกณฑ์การคราก Drucker-Prager เป็นเกณฑ์การครากของคอนกรีต โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager ประกอบด้วยการยึดเหนี่ยว มุมของความเสียดทานภายในขึ้นอยู่กับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด มุมไดลาแทนซีมีค่าเท่ากับศูนย์ และหยุดการวิเคราะห์เมื่อหน่วยการยืดตัวตามแนวขอบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับ 58.75% ของหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ โดยได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูก

โอบรัดทั้งหมดและถูกโอบรัดบางส่วนจำนวน 8 และ 16 ชิ้นงาน ตามลำดับ ก่อนทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆในการเสริมกำลัง

6.1.3 จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยใช้แบบจำลองควบคุม พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดมากที่สุดคือหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งการเพิ่มหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 เท่าเทียบกับหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ในแบบจำลองควบคุมส่งผลให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวหลังเพิ่มหน่วยการยืดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเทียบกับประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุมเพิ่มขึ้นเป็น 149.27% และ 285.71% ตามลำดับ รองลงมาคือ ความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เส้นใย โดยที่การเพิ่มความหนาหรือโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับความหนาหรือโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากแบบจำลองควบคุมพบว่า ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวสูงขึ้นเป็น 148.61% และ 110.71% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุม ในขณะที่การเพิ่มกำลังรับแรงอัดที่ไม่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีต 3 เท่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ไม่ถูกโอบรัดของแบบจำลองควบคุม ส่งผลให้ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวต่ำลงเป็น 79.04% และ 83.87% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวของแบบจำลองควบคุม และการโอบรัดบางส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือรูปแบบการโอบรัดที่มีระยะห่างระหว่างแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยน้อยที่สุด ซึ่งตรงกับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยแถบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจำนวน 5 แถบ ซึ่งในกรณีนี้ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการโอบรัดจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในข้างต้น มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

6.2.1 การหาตัวแปรต้นที่เหมาะสมเพื่อสร้างฟังก์ชันทำนายค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคราก Drucker- Prager อันประกอบด้วยการยึดเหนี่ยว มุมของความเสียดทานภายในและมุมไดลาแทนซี อาจนำไปสู่การทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.2.2 การพิจารณาช่วงที่หน่วยแรงลดลงเมื่อหน่วยการหดตัวเพิ่มขึ้นในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยรับแรงอัดกระทำ และเกณฑ์การวิบัติของคอนกรีตที่สามารถจำลองการเกิดรอยร้าวและการแตกละเอียดได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์หน่วยแรงเพียงอย่างเดียว ช่วยให้ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำและใกล้เคียงสภาวะจริงมากขึ้น

6.2.3 การทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งควบคุมความเครียดประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้เส้นใยชนิดเดียวกันได้ สามารถตรวจสอบข้อสรุปจากการวิจัยซึ่งระบุว่าความเครียดประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยส่งผลต่อประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังและความเหนียวมากที่สุด และนำไปสู่การเสริมกำลังเสาคอนกรีตตามแนวทางที่เหมาะสมต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] Megalooikonomou, K. G., Modelling of FRP-confinement of rectangular RC sections. Master dissertation, European school for advanced studies in reduction of seismic risk, 2007.

[2] ANSYS Inc., Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications (Release 12.1). Canonsburg, PA, 2009.

[3] ACI Committee 440, Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08). Michigan : American concrete institute, 2008.

[4] Popovics, S., A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete. Cement and concrete research 3, 5, (1973) : 583-599.

[5] Park, R., and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1975.

[6] Hognestad, E., A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. Engineering Experimental Station. Bulletin No.399, University of Illinois, Urbana, 1951.

[7] Wight, J.K., and MacGregor, J.G., Reinforced concrete mechanics & design. New Jersey : Pearson education, Inc., 2009.

[8] Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., A study of failure of concrete under combined compressive stresses. Engineering Experimental Station. Bulletin No.185, University of Illinois, Urbana, 1928.

[9] Mander, J. B., Priestly, M. J. N, and Park, R., Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering (ASCE) 114, 8, (1988) : 1804-1826.

[10] Mander, J. B., Priestly, M. J. N, and Park, R., Observed stress-strain behavior of confined concrete. Journal of structural engineering (ASCE) 114, 8, (1988) : 1827-1849.

[11] Nanni, A., and Bradford, N. M., FRP jacketed concrete under uniaxial compression. Construction and building materials 9, 2, (1995) : 115-124.

[12] Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., Model of concrete confined by fiber composites. Journal of structural engineering (ASCE) 124, 9, (1998) : 1025-1031.

[13] Xiao, Y. and Wu, H., Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. Journal of materials in civil engineering (ASCE) 12, 2, (2000) : 139-146.

[14] Rochette, P., and Labossière, P., Axial testing of rectangular column models confined with composites. Journal of composites in construction 4, 3, (2000) : 129-136.

[15] Rochette, P., and Labossière, P., A plasticity approach for concrete columns confined with composite materials. Proceedings of the second international conference on advance composites materials in bridges and structures. Montreal, 359-366, 1996.

[16] Lam, L. and Teng, J. G., Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and building materials 17, 6-7, (2003) : 471-489.

[17] Ottosen, N. S., Constitutive model for short-time loading of concrete. Journal of engineering mechanics division (ASCE) 105, 1, (1979) : 127-141.

[18] Barros, J. A. O., and Ferreira, D. R. S. M., Partial versus full wrapping confinement systems for concrete columns. International conference on concrete repair, rehabilitation and retrofitting, South Africa, 2005.

[19] Barros, J. A. O., and Ferreira, D. R. S. M., Confinement efficacy of partially and fully wrapped CFRP systems in RC column prototypes. Second international fib congress, Article 10-20 in CD, Naples, 2006.

[20] Wu, H.L.,Wang, Y.F., Yu, L., and Li, X.R., Experimental and computational studies on high-strength concrete circular columns confined by aramid fiber-reinforced polymer sheets. Journal of composites for construction (ASCE) 13, 2, (2009) : 125-134.

[21] Concrete society, Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials. Technical report No. 55, Second edition, Surrey, 2004.

[22] Becque, J., Analytical modeling of concrete columns confined by FRP. Master thesis, University of Manitoba, 2000.

[23] Mirmiran, A., Zagers, K., and Yuan, W., Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites. Finite element in analysis and design 35, (2000) : 79-96.

[24] Volety, I. V., Li, G., and Ram, Y., Confinement model for FRP confined concrete cylinders. Proceedings of the 2006 ASEE Gulf-Southwest annual conference. Southern university, 2006.

[25] Sadeghian, P., Rahai, A.R., and Ehsani, M.R., Numerical modeling of concrete cylinders confined with CFRP composites. Journal of reinforced plastics and composites 27, (2008) : 1309-1321.

[26] Mostofinejad, D., and Saadatmand, H., A Procedure for predicting the behavior of FRP confined concrete using the FE method. Transaction A: Civil engineering 17, 6, (2010) : 472-482.

[27] Lam, L., and Teng, J.G., Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete. Journal of composites for construction (ASCE) 8, 6, (2004) : 539-548.

[28] Chen, W. F., Plasticity in reinforced concrete. McGraw-Hill book company, 1982.

[29] Ibrahim, M. A., and Mahmood, S. M., Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates. European journal of scientific research 30, 4, (2009) : 526-541.

[30] Realfonzo, R., and Napoli, A., Concrete confined by FRP systems: Confinement efficiency and design strength models. Composites: Part B 42, 4, (2011) : 736-755.

[31] Gere, J. M., Mechanics of materials. Thomson Canada Ltd., Ontario, 2006.

[32] Hearn, E. J., Mechanics of materials, Volume 1 – An introduction to the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials. Elsevier, Musselburgh, 1997.

[33] Chapra, S. C., and Canale, R. P., Numerical methods for engineers: with programming and software application. McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.

[34] Klink, S.A., Actual Poisson Ratio of Concrete. ACI Journal, (1985) : 813-817.

[35] Shehata, I. A. E. M., Carneiro, L. A. V., and Shehata, L. C. D., Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. Materials and Structures 35, (2002) : 50-58.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวสำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

พิจารณาผลการทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากงานวิจัยของ Barros และ Ferreira [18] ในการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยที่คุณสมบัติของวัสดุซึ่งเกี่ยวข้องกับทรงกระบอกคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับทรงกระบอกคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	E_{frp} (กิกะปาสคาล)	t_f (มม)	ε_{fu} (ม/ม)	D (มม)	L (มม)
1	Barros	23.07	211	0.351	0.0105	150	300
2		23.07	211	0.585	0.0105	150	300
3	และ	17.45	251	0.351	0.0155	150	300
4		17.45	251	0.585	0.0155	150	300
5	Ferreira	38.19	211	0.351	0.0105	150	300
6		38.19	211	0.585	0.0105	150	300
7	[18]	38.27	251	0.351	0.0155	150	300
8		38.27	251	0.585	0.0155	150	300

ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากผลการทดสอบ [18] โดยพบว่าความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากแบบจำลองเทียบกับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 32.61% และ 8.22 ตามลำดับและความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากแบบจำลองเทียบกับหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากผลการทดสอบเท่ากับ 32.03% และ 11.01 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของความแตกต่างสัมบูรณ์ในแต่ละตัวอย่างทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับค่าจากผลการทดสอบ

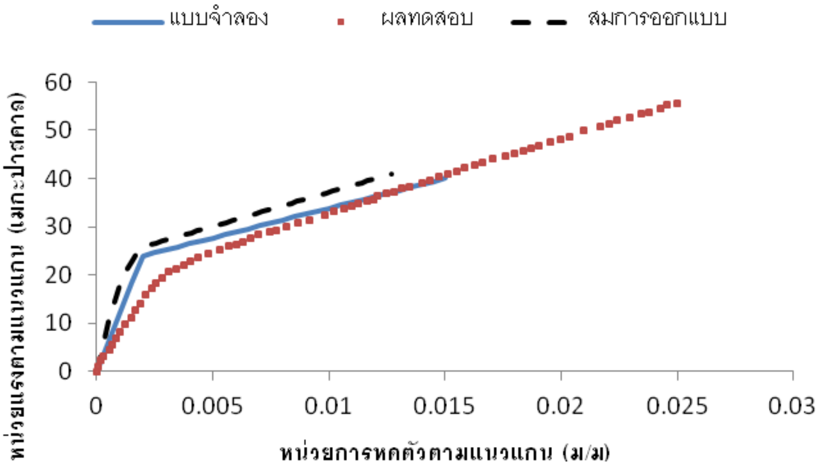
ลำดับที่	แบบจำลอง		ผลการทดสอบ		ความแตกต่างสัมบูรณ์ (%)	
	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc}	ε_{cc}
1	40.03	0.0150	55.63	0.0250	28.05	40.00
2	51.19	0.0160	76.93	0.0311	33.46	48.53
3	59.87	0.0245	74.78	0.0359	19.94	31.66
4	88.24	0.0280	116.88	0.0495	24.51	43.46
5	49.61	0.0140	73.83	0.0168	32.81	16.63
6	57.28	0.0145	90.42	0.0198	36.65	26.87
7	58.48	0.0205	104.67	0.0266	44.13	22.91
8	71.44	0.0210	121.74	0.0284	41.32	26.17

นอกจากนี้ การศึกษาความเหมาะสมของสมการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] ในการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของคอนกรีตหลังถูกโอบรัดได้ถูกพิจารณาเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดซึ่งทำนายจากสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] เทียบกับผลการทดสอบที่ผ่านมา [18] โดยพบว่าความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากสมการออกแบบกับเทียบกับผลการทดสอบ [18] มีค่าเท่ากับ 30.07% และ 5.81 ตามลำดับ อีกทั้งความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากสมการออกแบบเทียบกับผลการทดสอบ [18] เท่ากับ 27.64% และ 14.76 ตามลำดับ และความแตกต่างสัมบูรณ์ของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดเทียบกับค่าจากผลทดสอบ [18] แสดงดังตารางที่ 3

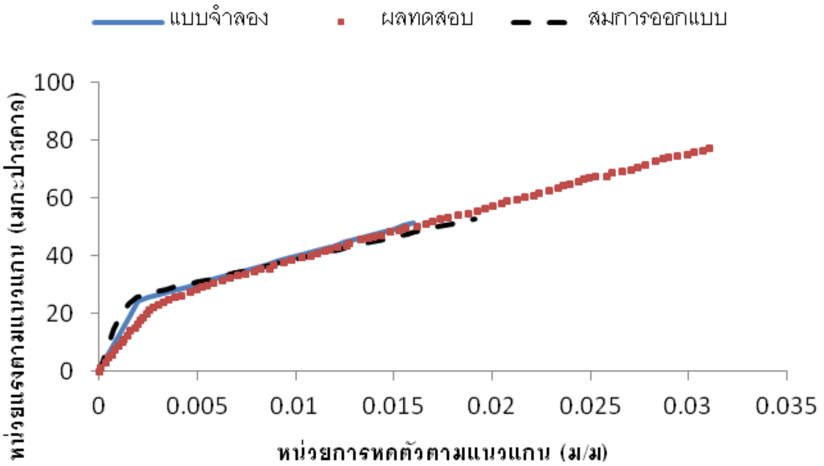
ตารางที่ 3 ค่ากำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดทำนายจากสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 เทียบกับค่ากำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดจากผลการทดสอบ

ลำดับที่	สมการออกแบบ		ผลการทดสอบ		ความแตกต่างสัมบูรณ์ (%)	
	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc}	ε_{cc}
1	40.95	0.0127	55.63	0.0250	26.40	49.27
2	52.86	0.0191	76.93	0.0311	31.29	38.54
3	48.85	0.0273	74.78	0.0359	34.68	23.76
4	69.78	0.0438	116.88	0.0495	40.30	11.58
5	56.07	0.0106	73.83	0.0168	24.06	36.86
6	67.99	0.0151	90.42	0.0198	24.81	24.04
7	69.67	0.0179	104.67	0.0266	33.44	32.72
8	90.60	0.0272	121.74	0.0284	25.58	4.36

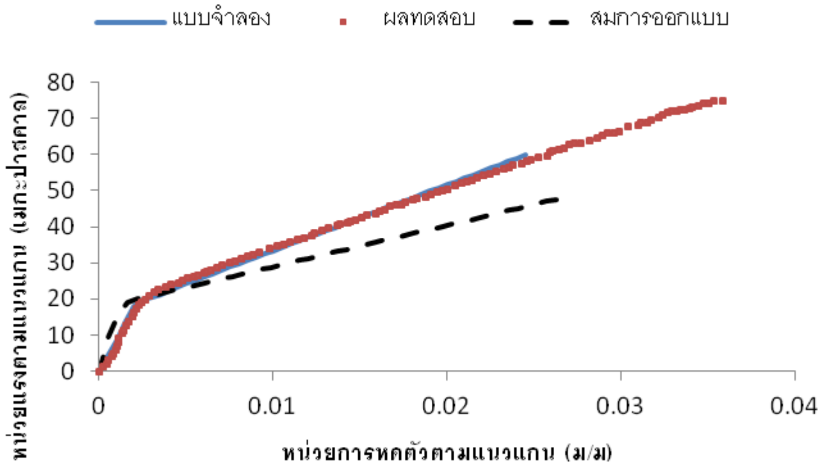
จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดได้ใกล้เคียงกับสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] พิจารณาจากความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดเทียบกับค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากการทดสอบ มีค่าไม่แตกต่างจากความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยของการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] เทียบกับค่าหน่วยแรงอัดประลัยและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากการทดสอบ และภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวแกนและหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลการทดสอบ [18] และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งทำนายจากสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3]



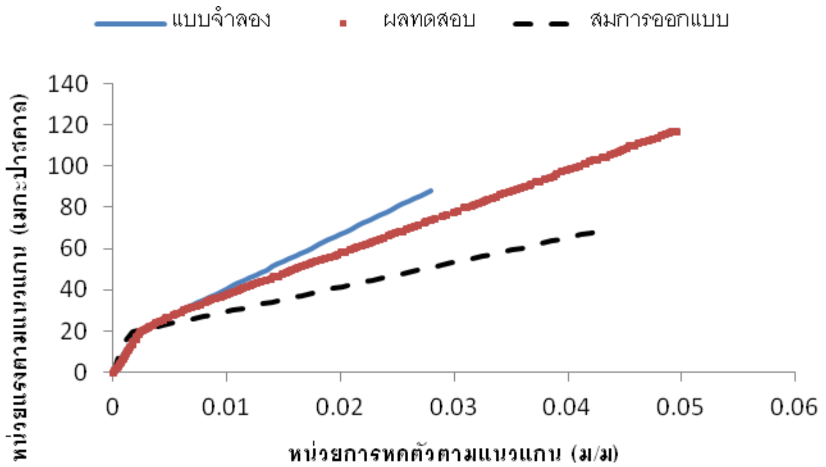
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 1



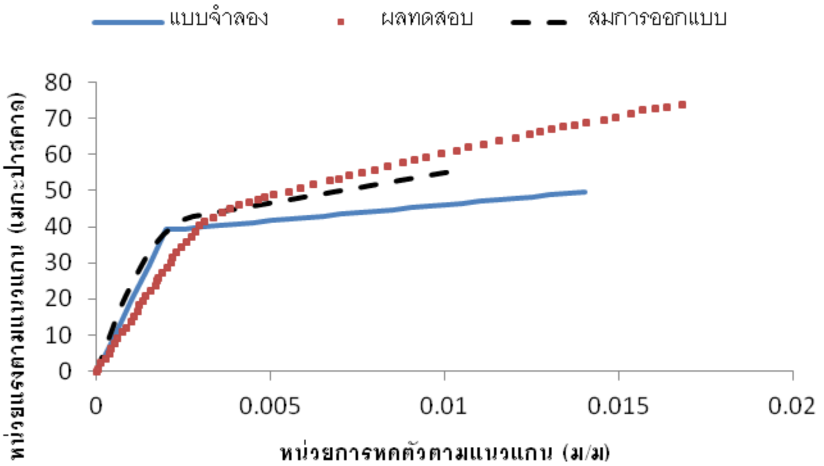
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 2



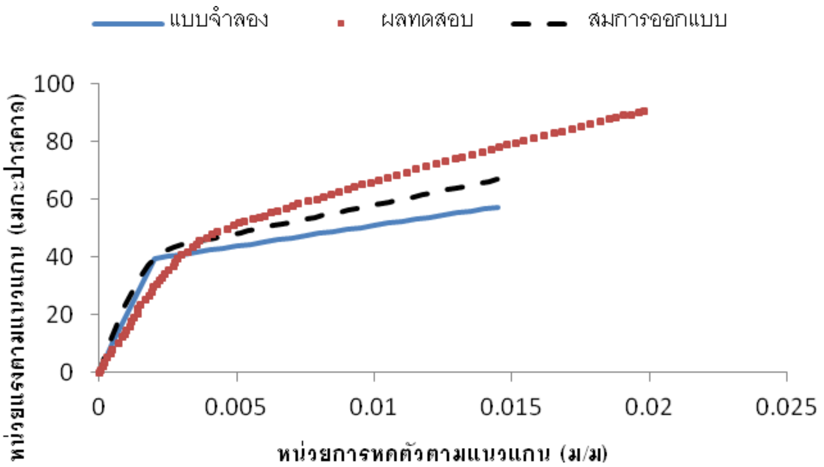
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3



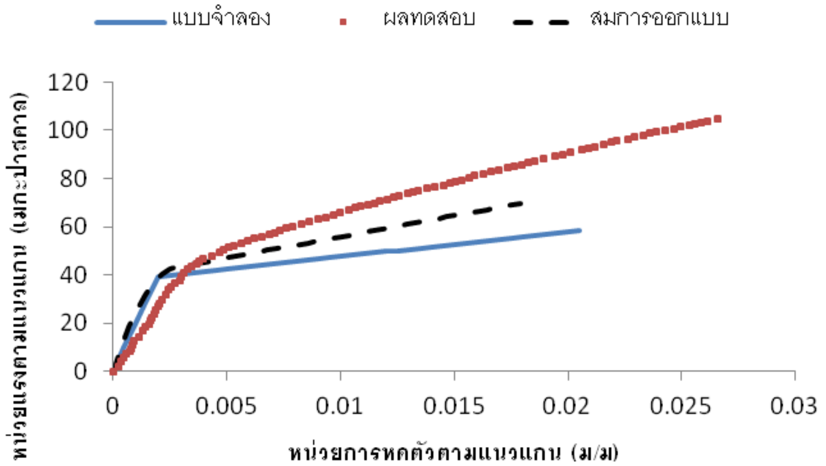
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 4



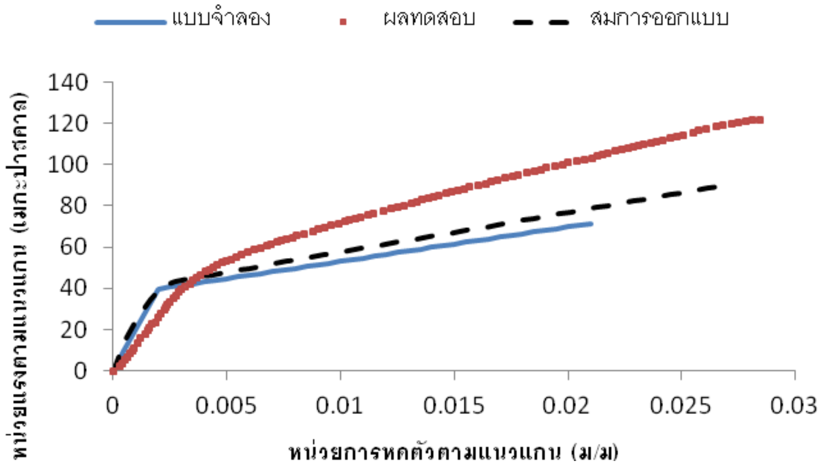
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 5



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 6



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 7



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 8

ภาคผนวก ข

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวสำหรับกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

เนื่องจากสมการออกแบบตามข้อกำหนดของ ACI 440.2R-08 [3] ไม่สามารถทำนายหน่วยแรงและความเครียดของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ ส่งผลให้การวิจัยนี้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประมาณค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยต่อไป ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติของวัสดุจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [18] ในกรณีทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับทรงกระบอกคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	f'_{co} (เมกะปาสคาล)	E_{frp} (กิกะปาสคาล)	t_f (มม)	ε_{fu} (ม/ม)	W_{frp} (มม)	D (มม)	L (มม)
1		23.00	211	0.351	0.0105	45	150	300
2	Barros	23.00	211	0.585	0.0105	45	150	300
3		22.59	211	0.351	0.0105	60	150	300
4		22.59	211	0.585	0.0105	60	150	300
5	และ	17.83	251	0.351	0.0155	45	150	300
6		17.83	251	0.585	0.0155	45	150	300
7		17.29	251	0.351	0.0155	60	150	300
8	Ferreira	17.29	251	0.585	0.0155	60	150	300
9		38.06	211	0.351	0.0105	45	150	300
10		38.06	211	0.585	0.0105	45	150	300
11	[18]	38.23	211	0.351	0.0105	60	150	300
12		38.23	211	0.585	0.0105	60	150	300

ตารางที่ 1 (ต่อ) คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับทรงกระบอกคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลทดสอบของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

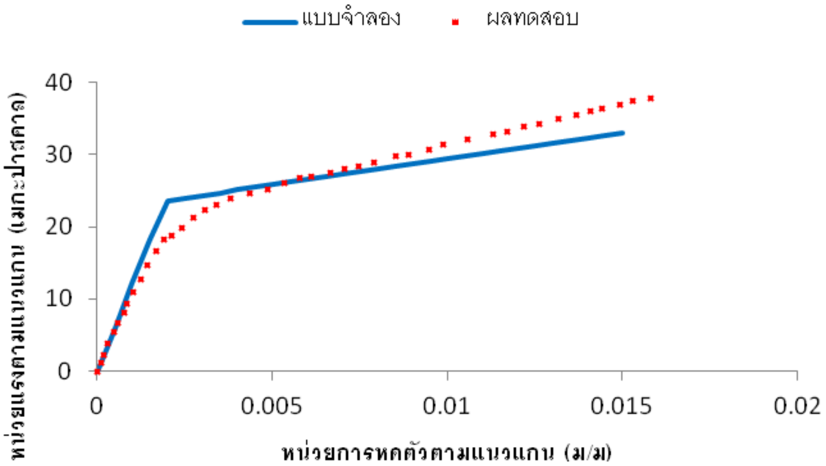
ลำดับที่	ผลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	f'_{co} (เมกะปาสคาล)	E_{frp} (กิกะปาสคาล)	t_f (มม)	ε_{fu} (ม/ม)	W_{frp} (มม)	D (มม)	L (มม)
13	Barros	39.28	251	0.351	0.0155	45	150	300
14	และ	39.28	251	0.585	0.0155	45	150	300
15	Ferreira	40.67	251	0.351	0.0155	60	150	300
16	[18]	40.67	251	0.585	0.0155	60	150	300

จากการทำนายหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยพิจารณาเกณฑ์หยุดการวิเคราะห์แบบจำลองเมื่อหน่วยการหดตัวตามแนวขอบของ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเท่ากับ 58.75% ของหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และพบว่าความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากแบบจำลองเทียบกับหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 19.83% และ 7.22 ตามลำดับ และความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากแบบจำลองเทียบกับหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 24.34% และ 14.89 ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างสัมบูรณ์ในแต่ละตัวอย่างทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 2

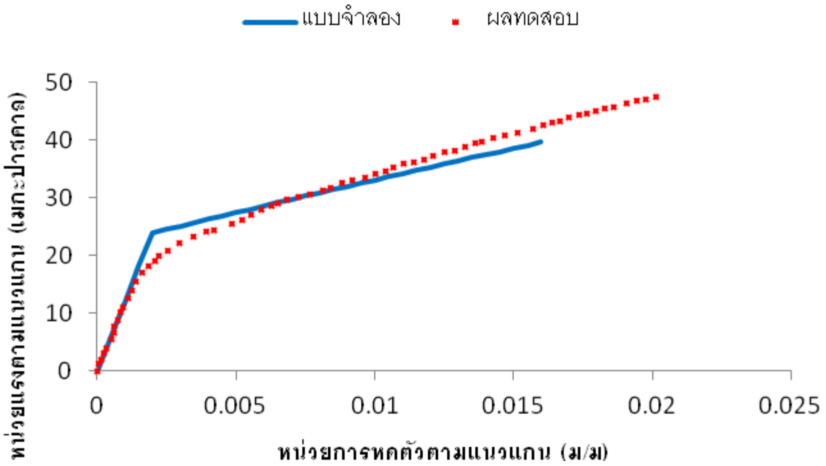
ตารางที่ 2 ค่ากำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับค่ากำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนจากผลการทดสอบ

ลำดับที่	แบบจำลอง		ผลการทดสอบ		ความแตกต่างสัมบูรณ์ (%)	
	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc} (เมกะปาสคาล)	ε_{cc} (ม/ม)	f'_{cc}	ε_{cc}
1	33.04	0.0150	37.83	0.0158	12.67	5.07
2	39.57	0.0160	47.48	0.0201	16.65	20.48
3	32.38	0.0150	37.32	0.0153	13.22	2.13
4	38.47	0.0160	47.71	0.0238	19.37	32.84
5	41.55	0.0235	56.36	0.0365	26.28	35.66
6	57.66	0.0265	70.76	0.0479	18.51	44.64
7	40.59	0.0235	46.26	0.0364	12.25	35.42
8	55.66	0.0265	61.43	0.0601	9.39	55.93
9	44.75	0.0140	52.98	0.0113	15.54	24.02
10	49.07	0.0145	69.64	0.0163	29.53	10.96
11	44.71	0.0140	52.99	0.0108	15.62	29.75
12	48.74	0.0145	62.18	0.0142	21.62	2.44
13	50.68	0.0205	65.40	0.0171	22.50	19.85
14	58.40	0.0220	92.05	0.0289	36.55	23.75
15	51.41	0.0205	65.05	0.0272	20.97	24.72
16	57.91	0.0215	78.82	0.0275	26.53	21.75

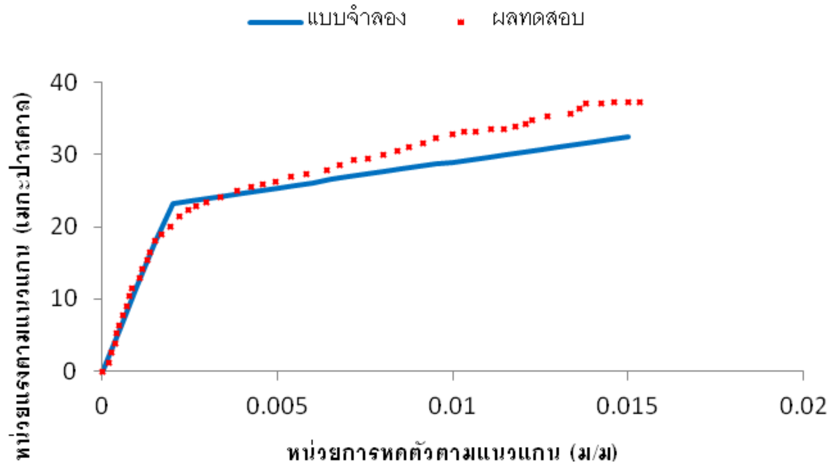
ภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากผลการทดสอบ



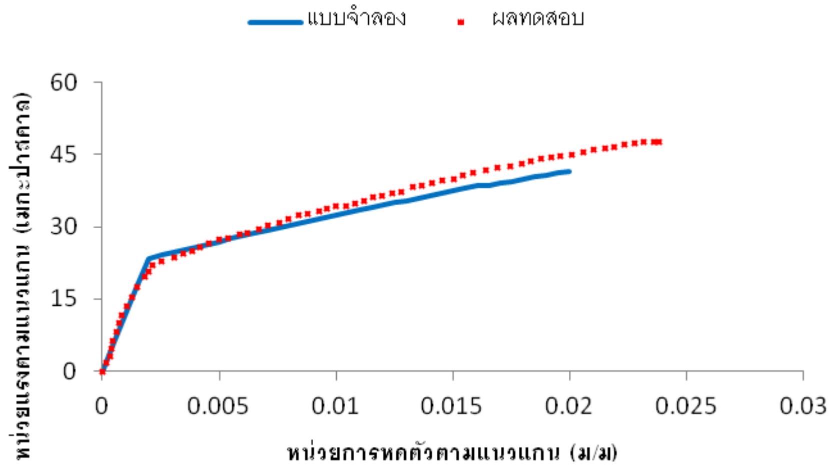
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 1



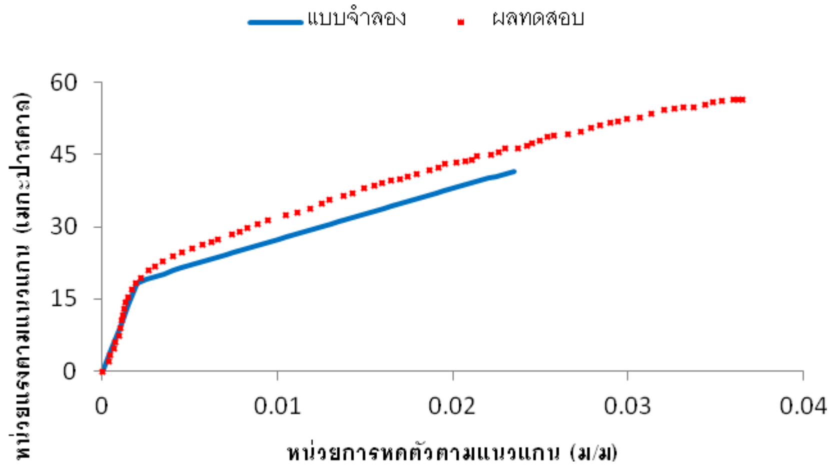
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 2



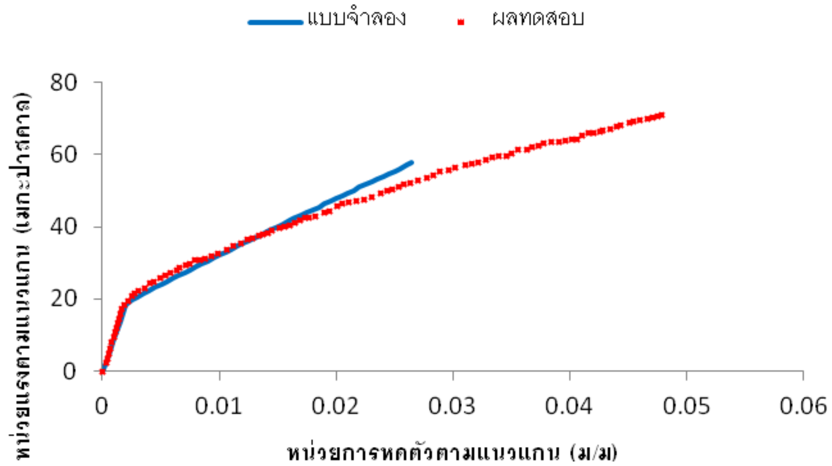
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3



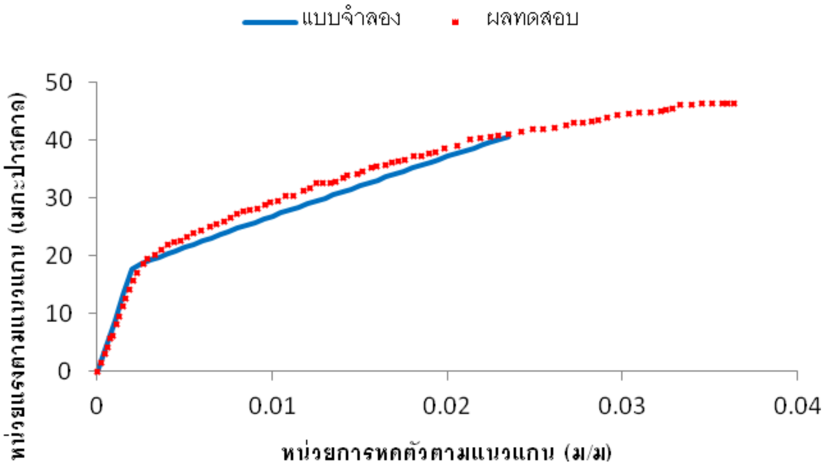
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 4



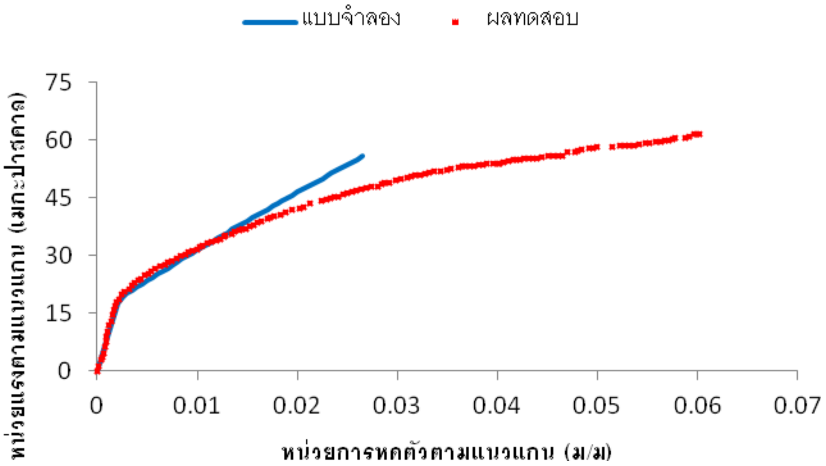
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 5



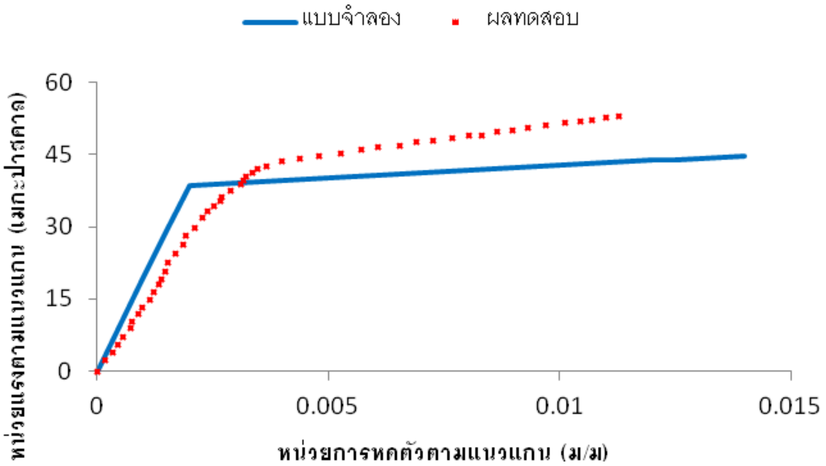
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 6



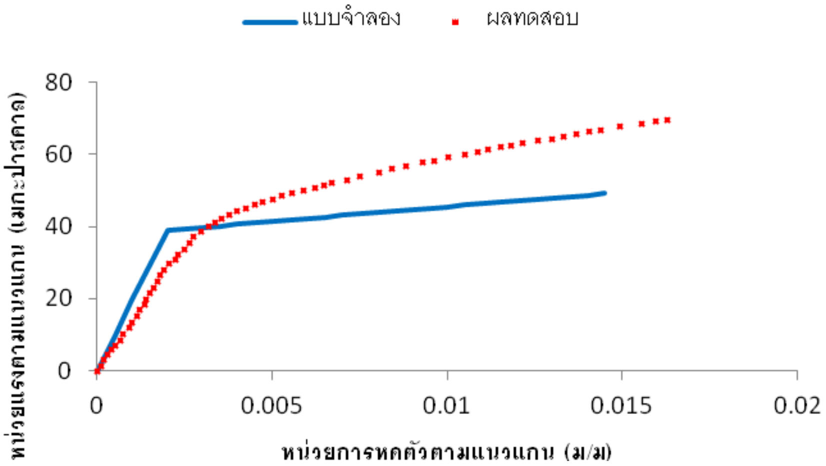
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 7



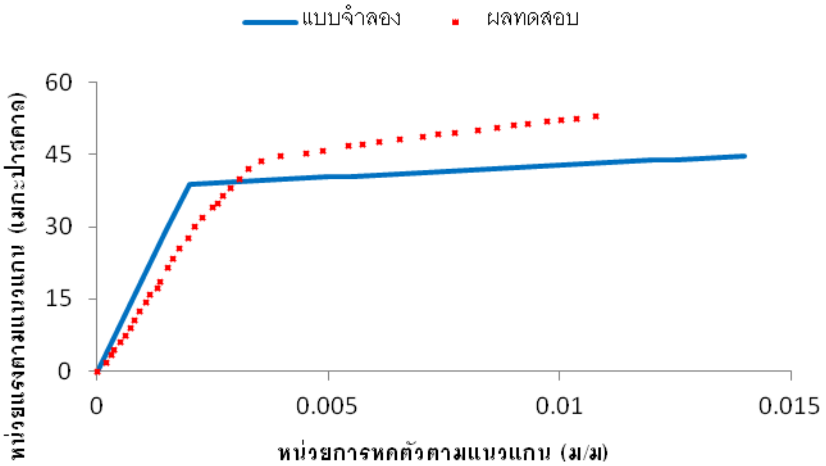
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 8



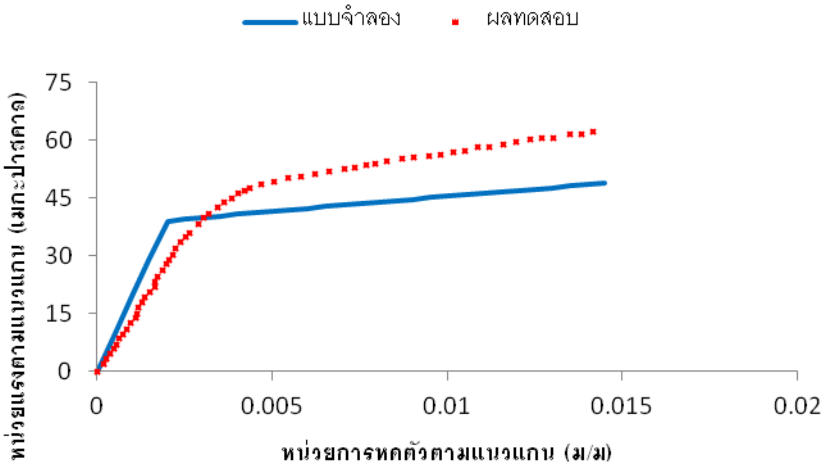
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 9



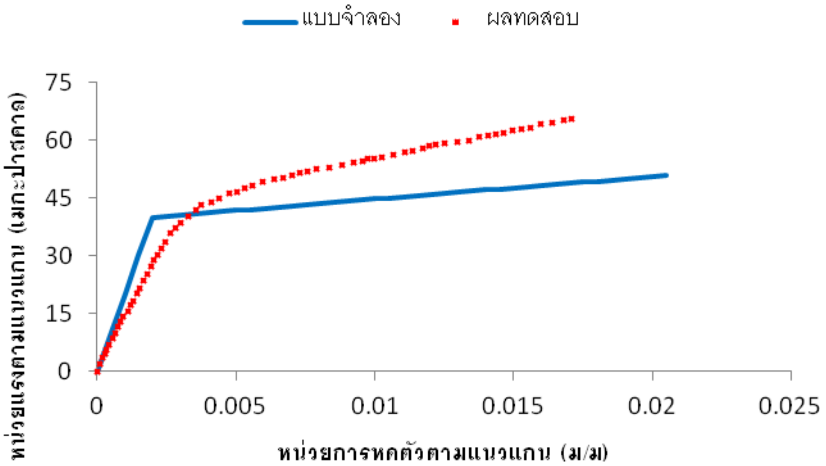
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 10



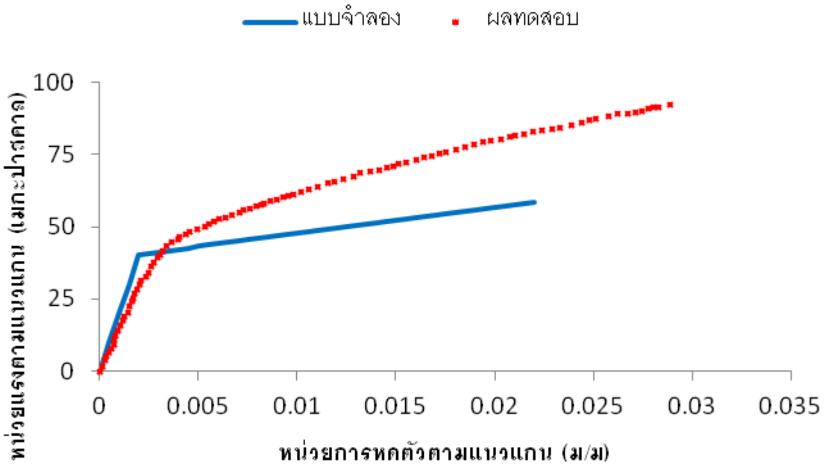
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 11



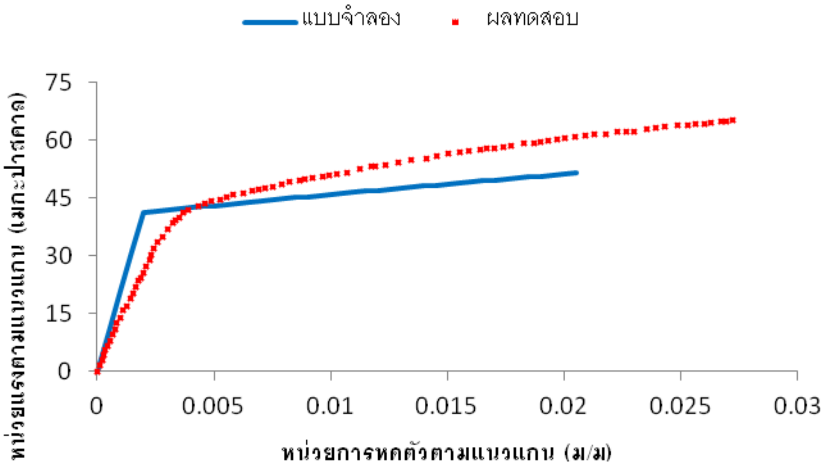
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 12



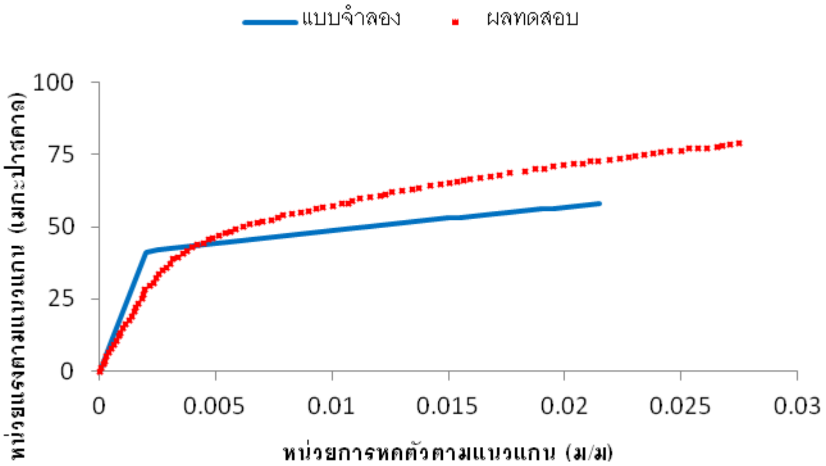
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 13



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 14



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 15



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 16

ภาคผนวก ค

ตารางที่ 1 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
f'_{co} (เมกะปาสคาล)	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
f'_{cc} / f'_{co}	1.33	1.14	1.09	1.06	1.05
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.07	6.87	6.59	6.09
$f'_{cc} / f'_{cc(ctrl)}$	-	0.86	0.82	0.80	0.79
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	0.97	0.95	0.91	0.84

ตารางที่ 2 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**0.6**
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
f'_{co} (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
f'_{cc} / f'_{co}	1.33	1.49	1.66	1.80	1.97
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.52	7.78	7.78	8.04
$f'_{cc} / f'_{cc(ctrl)}$	-	1.12	1.25	1.36	1.49
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.04	1.07	1.07	1.11

ตารางที่ 3 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
$f_{cc}^{'} / f_{co}^{'}$	1.33	1.49	1.66	1.80	1.97
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.52	7.78	7.78	8.04
$f_{cc}^{'} / f_{cc(ctrl)}^{'}$	-	1.12	1.25	1.36	1.49
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.04	1.07	1.07	1.11

ตารางที่ 4 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดทั้งหมดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	**0.0105**	**0.01575**	**0.021**	**0.02625**	**0.0315**
$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
$f_{cc}^{'} / f_{co}^{'}$	1.33	1.49	1.65	1.82	1.98
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	10.63	14.00	17.37	20.74
$f_{cc}^{'} / f_{cc(ctrl)}^{'}$	-	1.12	1.25	1.37	1.49
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.46	1.93	2.39	2.86

ตารางที่ 5 ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังเทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมดของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนเมื่อลดปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ลดลงเทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมด (%)	ประสิทธิผลการโอบรัดในด้านกำลังเทียบกับกรณีโอบรัดทั้งหมด (%)			
	s / L = 1	s / L = 0.5	s / L = 0.33	s / L = 0.25
0	100.00	100.00	100.00	100.00
10	72.25	84.35	84.61	88.22
20	55.74	73.84	77.87	78.43
30	43.56	62.98	67.48	68.29
40	34.27	54.66	57.24	58.34
50	28.05	46.14	47.29	48.31
60	23.92	36.41	37.67	38.66
70	19.89	28.16	29.40	29.18
80	15.58	19.18	19.21	19.71
90	8.82	9.83	9.08	9.81
100	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 6 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
$f_{cc}^{'} / f_{co}^{'}$	1.29	1.13	1.08	1.06	1.04
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.07	6.87	6.35	6.09
$f_{cc}^{'} / f_{cc(ctrl)}^{'}$	-	0.88	0.84	0.82	0.81
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	0.97	0.95	0.87	0.84

ตารางที่ 7 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**0.6**
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
$f_{co}^{'}$ (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
$f_{cc}^{'} / f_{co}^{'}$	1.29	1.43	1.58	1.73	1.85
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.26	7.52	7.78	7.78
$f_{cc}^{'} / f_{cc(ctrl)}^{'}$	-	1.11	1.22	1.34	1.44
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.00	1.04	1.07	1.07

ตารางที่ 8 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**
ε_{fu} (ม/ม)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
f'_{co} (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
f'_{cc} / f'_{co}	1.29	1.43	1.58	1.73	1.85
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	7.26	7.52	7.78	7.78
$f'_{cc} / f'_{cc(ctrl)}$	-	1.11	1.22	1.34	1.44
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.00	1.04	1.07	1.07

ตารางที่ 9 ข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบของหน่วยการหดตัวประลัยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังและความเหนียวของทรงกระบอกคอนกรีตหลังถูกโอบรัดบางส่วนด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

t_{frp} (มม)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
E_{frp} (กิกะปาสคาล)	120	120	120	120	120
ε_{fu} (ม/ม)	**0.0105**	**0.01575**	**0.021**	**0.02625**	**0.0315**
f'_{co} (เมกะปาสคาล)	20	20	20	20	20
f'_{cc} / f'_{co}	1.29	1.44	1.58	1.72	1.87
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$	7.26	10.63	13.74	17.11	20.48
$f'_{cc} / f'_{cc(ctrl)}$	-	1.12	1.23	1.33	1.45
$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc(ctrl)}$	-	1.46	1.89	2.36	2.82

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทศพร ประเสริฐศรี เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนไผทอุดมศึกษา ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนหอวัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 จวบจนปัจจุบัน