

การศึกษาการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON DESIGN OF SLAB ON GROUND WITH POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED  
CONCRETE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน
โดย	นายสิริพงศ์ เกิดบุญมา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สิริพงศ์ เกิดบุญมา : การศึกษาการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน. ( STUDY ON DESIGN OF SLAB ON GROUND WITH POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. วิทิต ปานสุข

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนเป็นการศึกษาจากการทดสอบการดัดคานตัวอย่างที่มีสัดส่วนผสมที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กันทั้งหมด 10 กลุ่มตัวอย่าง โดยมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันคือ กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้โดยใช้ค่า 28 และ 32 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงดัดประลัยของเส้นใยโดยใช้ค่า 520 และ 640 ปาสคาล อัตราส่วนผสมเพิ่มของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มีค่าต่าง ๆ กันคือ 0, 2 และ 3 กิโลกรัม โดยผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดหลังการแตกร้าว กำลังรับแรงดัดประลัยของเส้นใยและอัตราส่วนส่งผลโดยตรงกับความสามารถในการต้านแรงดัดหลังการแตกร้าวของคานซึ่งบ่งบอกถึงความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใย และสำหรับการเปรียบเทียบหลักการออกแบบพื้นวางบนดินที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใย ผู้ศึกษาพบว่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่คำนวณได้จากหลักการออกแบบตามแนวทางของรายงานเชิงวิชาการ TR34 มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามแนวทางการออกแบบของมาตรฐาน ACI 360R ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของสัมประสิทธิ์ในสมการออกแบบที่ต่างกัน และสำหรับการรวบรวมค่าคุณสมบัติของดินภายในประเทศจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าโมดูลัสต้านการกดของดินในประเทศมีค่าตั้งแต่ 0.024 ถึง 0.157 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170302821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Fiber Reinforced Concrete, Slab-On-Ground, Polypropylene fiber

Siriphong Kerdboonma : STUDY ON DESIGN OF SLAB ON GROUND WITH  
POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE. Advisor: Assoc. Prof.  
WITHIT PANSUK, Ph.D.

Behavior study in bending moment of polypropylene reinforced concrete is a study of experiment that proceeded by bending 10 different proportion of composite sample beams. which are two differences of concrete's strength value (28,32 MPa) , three differences of ultimate tensile strength's fiber (520,640 Pa) , three differences in proportion of polypropylene fiber (0 2 3 kg). From the result of study, the increasing compressive strength have no effect on post cracking strength of bending moment, the ultimate tensile strength and proportion of fiber are directly effect to post cracking bending moment capacity which indicate to fiber reinforced concrete toughness. From comparation of the maximum load capacity between TR34 method and ACI 360R method, shows that TR34 has higher value than ACI 360R. Also the difference of equation's factor. The research of soil properties in Thailand found that the K-value are vary 0.024 to 0.157 MPa/mm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า นายสิริพงศ์ เกิดบุญมา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข อาจารย์  
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่สละเวลาและช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา ให้ความรู้

และการให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาและแนวทางในการดำเนินงาน อีกทั้งข้อคิดเห็นที่มี  
ประโยชน์ในการทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผศ. ดร.  
อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย

ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตั้งแต่โครงร่างวิทยานิพนธ์จนดำเนินงานวิจัย  
เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณหน่วยงานศูนย์ทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ และเจ้าหน้าที่ ที่ได้  
ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทดสอบ

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ที่ได้ช่วยเหลือในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพนิต ศุภศิริลักษณ์ และนางสุนี ศุภศิริลักษณ์ ผู้ที่ให้การ  
สนับสนุนทั้งทรัพยากรและกำลังใจผู้ทำวิจัยจัดทำงานวิจัยวิศวกรรมเล่มนี้ให้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

สิริพงศ์ เกิดบุญมา

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่1 บทนำ.....	12
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษาโครงการ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	13
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete).....	14
2.2 พื้นวางบนดิน (Slabs on Ground).....	20
2.3 ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน (Modulus of subgrade reaction).....	24
2.4 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต.....	26
2.4.1 การออกแบบหน้าตัดตามมาตรฐานACI.....	26
2.4.2 การออกแบบหน้าตัดอ้างอิงตามรายงานเชิงวิชาการ TR34.....	31
2.5 การทดสอบพฤติกรรมรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยสำหรับการใช้วิเคราะห์ออกแบบ ..	39

2.5.1	มาตรฐานการทดสอบการตัดสำหรับการออกแบบมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา [15]	39
2.5.2	มาตรฐานการทดสอบการตัดสำหรับการออกแบบมาตรฐานประเทศอังกฤษ [20]	42
บทที่ 3	ระเบียบวิจัย	44
3.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.3	ตัวแปรในการศึกษา	46
3.4	กระบวนการศึกษา	47
3.4.1	การทดสอบพฤติกรรมการตัดคานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเส้นใย	47
3.4.2	การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ห้ออกแบบพื้นวางบนดิน	47
3.4.3	ศึกษาและรวบรวมแนวทางการประเมินค่ากำลังรับแรงของดิน	47
3.4.4	ทดลองออกแบบโดยประยุกต์ใช้ข้อมูลการศึกษา	48
บทที่ 4	ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
4.1	อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงตัดของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใย	49
4.2	การเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบพื้นวางบนดินที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์	68
4.3	การรวบรวมค่าตัวแปรดินภายในประเทศ	70
4.4	การประยุกต์ค่าทดสอบ และมาตรฐานการออกแบบ	72
บทที่ 5	สรุปผล	77
5.1	สรุปผลการศึกษา	77
5.2	ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม		79
ภาคผนวก		81
ประวัติผู้เขียน		90



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยแก้วบางประเภท.....	15
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยสังเคราะห์บางประเภท.....	16
ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางประเภท.....	17
ตารางที่ 4 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยบางชนิด.....	17
ตารางที่ 5 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยบางชนิด(ต่อ).....	18
ตารางที่ 6 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบ [13].....	31
ตารางที่ 7 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบของวัสดุ (TR34).....	39
ตารางที่ 8 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบของน้ำหนักรบรรทุก (TR34).....	39
ตารางที่ 9 อัตราความเร็วในการเพิ่มน้ำหนักทดสอบตามมาตรฐานASTM C1609.....	40
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของเส้นใย.....	44
ตารางที่ 11 ตัวแปรในการศึกษา.....	46
ตารางที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักทดสอบที่สถานะที่สนใจในการศึกษา.....	62
ตารางที่ 13 ค่าข้อมูลดินภายในประเทศจากการรวบรวมงานวิจัยในอดีต.....	71

## สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กลักษณะแบบต่างๆ [2].....	15
รูปที่ 2 พฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใย [3].....	19
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์แรงกดและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยทดสอบ[9].....	20
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์แรงกดและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยทดสอบ[5].....	20
รูปที่ 5 ค่าปรับแก้สำหรับการใช้แผ่นทดสอบแรงกดขนาดต่างๆ[13].....	24
รูปที่ 6 การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดรับแรงดัดตามมาตรฐานACI[17] .....	27
รูปที่ 7 ตัวอย่างขนาดน้ำหนักล้อต่อแรงกระทำของรถบรรทุก[10].....	29
รูปที่ 8 การกระจายหน่วยแรงและความเครียดในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใย[13] .....	32
รูปที่ 9 ลักษณะเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตของพฤติกรรมแรงเฉือนทะเล[13] .....	34
รูปที่ 10 การประมาณพื้นที่แรงกระทำกรณีแรงสองจุดห่างกันไม่เกิน2h [13].....	35
รูปที่ 11 ลักษณะแรงกระทำบนพื้นที่มากกว่าหนึ่งจุดกระทำ [13] .....	36
รูปที่ 12 แรงกระทำแบบกระจายที่มีความกว้าง $\pi 2\lambda$ แบบ 1 จุด และแรงกระจายความกว้าง $\pi\lambda$ แบบ 2 จุด[13].....	38
รูปที่ 13 การติดตั้งเครื่องและคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย มาตรฐานASTM C1609/C1609M[6] .....	40
รูปที่ 14 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัว[15] .....	41
รูปที่ 15 การตั้งเครื่องและตัวอย่างคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย มาตรฐานEN 14651 .....	42
รูปที่ 16 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและความกว้างรอยร้าวทดสอบ(CMOD).....	43
รูปที่ 17 เครื่องผสมคอนกรีตขนาดความจุ 50 ลิตร .....	44
รูปที่ 18 เครื่องทดสอบแรงกดดัด AMSLER 20 TON .....	45
รูปที่ 19 ภาพการติดตั้งและการเตรียมทดสอบคานตัวอย่าง .....	49
รูปที่ 20 แผนภูมิแสดงน้ำหนักทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-NF .....	50



รูปที่ 45 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP-3 .....	65
รูปที่ 46 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP-2 .....	65
รูปที่ 47 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP-3 .....	65
รูปที่ 48 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52 .....	66
รูปที่ 49 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64 .....	67
รูปที่ 50 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52 .....	67
รูปที่ 51 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64 .....	67
รูปที่ 52 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่กระทำภายในพื้นที่พื้นสามารถรองรับได้จาก แนวทางของ TR34ต่อมาตรฐานACI.....	69
รูปที่ 53 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่กระทำที่ขอบ ที่พื้นสามารถรองรับได้จากแนวทาง ของ TR34ต่อมาตรฐานACI .....	69
รูปที่ 54 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่มุมพื้นที่พื้นสามารถรองรับได้จากแนวทางของ TR34ต่อมาตรฐานACI.....	70
รูปที่ 55 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ.....	73
รูปที่ 56 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ.....	73
รูปที่ 57 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ.....	74
รูปที่ 58 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาพร้อมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน.....	75
รูปที่ 59 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาพร้อมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน.....	75
รูปที่ 59 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาพร้อมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน.....	76

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษาโครงการ

เนื่องในปัจจุบันการพัฒนาโครงการก่อสร้างภายในประเทศที่มีทั้งโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน และโครงการก่อสร้างอาคารโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมมีจำนวนมากขึ้นตามการขยายตัวของภาคธุรกิจอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีการกระจายตัวไปยังพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศมากขึ้น และเมื่อพิจารณาทั้งโครงสร้างพื้นฐานที่มีเนื้อหางานส่วนใหญ่เป็นถนนหรือผิวจราจรที่มีปริมาณงานก่อสร้างที่มากกว่าโครงสร้างอื่นๆ และโครงการอาคารโรงงานอุตสาหกรรมนั้นก็จะมีการใช้คอนกรีตมากกว่าโครงสร้างอื่น โดยโครงสร้างพื้นของทั้ง 2 รูปแบบงานนั้นล้วนแต่เป็นโครงสร้างพื้นวางบนดิน (On Ground Slab) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นที่พิจารณาการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากพื้นอาคารลงสู่พื้นดินรองรับด้านใต้โดยตรง ในการวิเคราะห์ออกแบบในบางครั้งผู้ออกแบบมักจะพิจารณาให้พื้นดังกล่าววางอยู่บนพื้นดินแข็งที่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้การคำนวณออกแบบนั้นพิจารณาเพียงแค่การป้องกันการหลุดจากอุณหภูมิเพียงเท่านั้น ดังนั้นความหนาพื้นโครงสร้างจะถูกกำหนดตามความสามารถในการต้านทานการยึดหดตัวจากอุณหภูมิของพื้น หากผู้ออกแบบและก่อสร้างสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหดตัวจากอุณหภูมิของคอนกรีตได้ก็จะสามารถลดความหนาพื้นโครงสร้างที่ต้องใช้ได้ นั่นหมายถึงปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ในโครงการก่อสร้างเหล่านั้นจะลดลงส่งผลให้ค่าก่อสร้างที่ลดลงด้วยเช่นกัน

ในอีกด้านหนึ่งคอนกรีตเสริมเส้นใยได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจึงทำให้มีผลงานวิจัยหลายแหล่งที่สามารถยืนยันได้ว่าหากเลือกใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยจะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหดตัวจากอุณหภูมิ การต้านทานการแตกละเอียด การขีดสี และการกระแทกของคอนกรีตนั้น แต่หากมีแรงดัดเกิดขึ้นในหน้าตัดพื้นจากความไม่สมบูรณ์ใดๆ ของพื้นดินที่รองรับใต้โครงสร้างพื้นหรือแม้แต่การบรรทุกน้ำหนักที่ไม่เป็นน้ำหนักแผ่กระจายตามที่วิเคราะห์ออกแบบคอนกรีตเสริมเส้นใยก็จะสามารถรองรับแรงดัดนั้นได้มากกว่าโครงสร้างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป และเพื่อที่จะให้คอนกรีตเสริมเส้นใยเป็นวัสดุที่ลดต้นทุนได้สูงสุดผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาการใช้งานเส้นใยพลาสติกโพลีโพรพิลีน ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใยรูปแบบอื่น

แต่เนื่องจากการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยในงานก่อสร้างยังไม่มีมาตรฐานในโครงการก่อสร้างภายในประเทศไทย ดังนั้นจึงทำให้ยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยให้ชัดเจน หรือครอบคลุม

รูปแบบโครงสร้างทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษามาตรฐานทั้งการวิเคราะห์ ออกแบบพื้นวางบนจากคอนกรีตเสริมเส้นใย เพื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์และออกแบบพื้นวาง บนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยจากมาตรฐานต่างๆ และเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยพลาสติกโพลิโพรพิลีน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

1. ศึกษามาตรฐานการวิเคราะห์และออกแบบพื้นวางบนดินหน้าตัดคอนกรีตรับแรงดัดที่สร้าง จากคอนกรีตเสริมเส้นใยจากมาตรฐานต่างๆ ในต่างประเทศ
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในสัดส่วนมวลรวมที่มีผลต่อพฤติกรรมการดัดของคอนกรีต เสริมเส้นใยสังเคราะห์โพลิโพรพิลีน
3. ศึกษาการแปรผลค่าจากทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย และทำการรวบรวมผล และแนวทางการประเมินค่าตัวแปรเชิงวิศวกรรมของดินที่ใช้รองรับพื้นในรูปแบบต่างๆ เพื่อ ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดินที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนตาม มาตรฐานที่ศึกษา

## 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยคอนกรีตให้กำลังอัด ประลัยที่อายุ 28 วัน 28 เมกะปาสคาล และ 32 เมกะปาสคาล
2. เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยโพลิโพรพิลีน (Polypropylene fiber) มีความยาวเส้นใย 56-58 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้เส้นใยที่มีกำลังรับแรงดัดที่ค่าต่างกันคือ เส้นใยแบบที่ 1 มีกำลังรับแรง ดัด 520 เมกะปาสคาล เส้นใยแบบที่ 2 มีกำลังรับแรงดัด 640 เมกะปาสคาล
3. ศึกษามาตรฐานการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างพื้นวางบนดินของ ACI (ACI 360R) และ รายงานเชิงวิชาการของ Concrete Society (TR34: Concrete Industrial Floors)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบคุณสมบัติ และข้อดีของชั้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยพลาสติกโพลิ โพรพิลีน
2. ได้ทราบแนวทางการเลือกใช้มาตรฐานสำหรับการออกแบบพื้นวางบนดินที่ทำจากคอนกรีต เสริมเส้นใยพลาสติกโพลิโพรพิลีน
3. ได้ทราบการเลือกใช้หลักการประเมินค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบพื้นวางบนดิน ที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยพลาสติกโพลิโพรพิลีน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete)

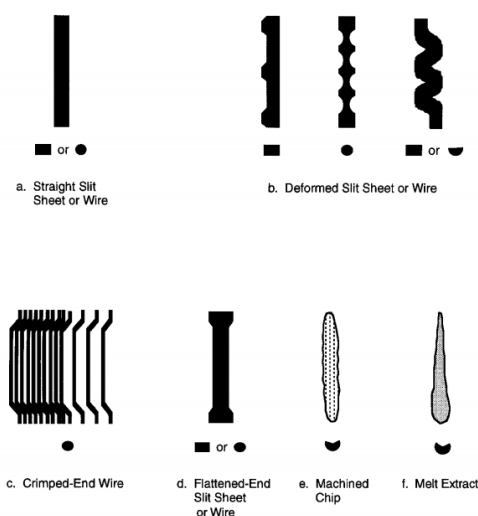
คอนกรีตเสริมเส้นใย คือคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยการใส่วัสดุอื่นๆ ลงไปในคอนกรีตระหว่างผสม เพื่อเสริมให้คอนกรีตที่จากเดิมที่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ เมื่อเทียบกับแรงอัดให้สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเกิดจากการดึง หรือการตัดภายใต้แนวคิดที่ว่าเมื่อคอนกรีตรับแรงดึงจนเกิดรอยร้าวขนาดเล็กๆ และทอดตัวผ่านเส้นใยที่ใส่เพิ่มเข้าไป เส้นใยนั้นๆ จะต้านแรงดึงที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังสามารถป้องกันการขยายตัวของรอยร้าวจากแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ หรือที่เรียกว่าพฤติกรรมหลังการเกิดรอยร้าว (Post Crack behavior) ที่ทำให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility)

เส้นใยที่ถูกประยุกต์ใช้ในการทำคอนกรีตเสริมเส้นใยนั้นมีหลายวัสดุด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็น เส้นใยเหล็ก เส้นใยธรรมชาติอย่างเส้นใยฟางข้าว หรือเส้นใยป่าน ปอ และเส้นใยสังเคราะห์เช่น เส้นใยเซรามิก เส้นใยแก้ว เส้นใยไนลอน หรือเส้นใยโพลีโพรพิลีน เป็นต้น โดยมาตรฐาน ASTM C1116(2015) ได้แบ่งประเภทของเส้นใยจากประเภทของวัสดุออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ประเภทที่ 1 เส้นใยเหล็ก, ประเภทที่ 2 เส้นใยแก้ว, ประเภทที่ 3 เส้นใยสังเคราะห์ และประเภทที่ 4 เส้นใยธรรมชาติ [1]

เส้นใยประเภทที่ 1 เส้นใยเหล็ก (Steel fibers ,TYPE I)

เป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้ในงานโครงสร้างเป็นอย่างมาก เนื่องจากเส้นใยเหล็กเป็นเส้นใยที่แข็งแรง มีกำลังรับแรงดึงสูงมาก และเนื่องจากเส้นใยเหล็กมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายจึงทำให้มีการพัฒนาให้มีรูปร่าง ขนาด และกำลังรับแรงดึงที่หลากหลาย โดยหน้าตัดและรูปร่างแบบต่างๆมีดังแสดงในรูปที่ 2.1 และคุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยเหล็กจะเป็นดังต่อไปนี้

- กำลังรับแรงดึงประลัย (Tensile Strength): 1240-2060 เมกะปาสคาล
- โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus): 200 จิกะปาสคาล
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity): 7.85



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กลักษณะแบบต่างๆ [2]

### เส้นใยประเภทที่ 2 เส้นใยแก้ว (Glass fibers ,Type II)

ความยาวของเส้นใยที่ใช้กันทั่วไปมีตั้งแต่ 13 มิลลิเมตรจนถึง 38 มิลลิเมตร และสามารถแบ่งกลุ่มจากขนาดเส้นใยได้ทั้งขนาดเล็ก (Micro fibers) และขนาดใหญ่ (Macro Fiber) เป็นเส้นใยที่มีความได้เปรียบเส้นใยเหล็กอยู่ในหลายด้าน ทั้งด้านความคงทนเพราะเส้นใยเหล็กนั้นทนต่อความชื้นได้มาก ,ด้านการตอบสนองต่ออุณหภูมิเพราะเส้นใยแก้วมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ออุณหภูมิต่ำ ทนความร้อนได้สูง อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาจึงมีข้อได้เปรียบในงานออกแบบเชิงโครงสร้าง แต่ข้อเสียของเส้นใยแก้วคือหากอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่โหดร้าย จะส่งผลโดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลของมัน คุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยแก้วบางประเภท

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	กำลังรับแรงดึง ประลัย (MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่น (GPa)	ความเครียด ประลัย (%)
E-Glass	2.58	3445	71.7	4.8
Cem-FIL AR-Glass	2.70	2480	80.0	3.6
NEG AR-Glass	2.74	2445	78.6	2.5



### เส้นใยประเภทที่3 เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers ,Type III)

เส้นใยสังเคราะห์ที่ถูกใช้งานและพัฒนาอย่างหลากหลาย แต่เส้นใยสังเคราะห์ที่ถูกนิยมใช้งานที่สุดคือเส้นใยไนลอน(Nylon) และเส้นใยโพลีพรพิลีน(Polypropylene) ขนาดของเส้นใยมีหลากหลายขนาดตั้งแต่ความยาว 6-64 มิลลิเมตร ด้วยความหลากหลายของขนาดนี้ทำให้สามารถแยกกลุ่มของเส้นใยตามขนาดได้ 2 กลุ่มคล้ายกับเส้นใยแก้วคือเส้นใยขนาดเล็ก(Micro fibers) ที่มีขนาดหน้าตัดเล็กกว่า 0.3 มิลลิเมตร และความยาวตั้งแต่ 12-20 มิลลิเมตรโดยถือว่าเส้นใยประเภทนี้ไม่เป็นเส้นใยสำหรับโครงสร้าง(non-structural fibers) เนื่องจากมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่สูงนักประมาณ 3000-5000 เมกะปาสคาล และเส้นใยอีกชนิดคือเส้นใยขนาดใหญ่(Macro Fiber) ที่มีหน้าตัดใหญ่กว่า 0.3 มิลลิเมตร ความยาวเส้นใยตั้งแต่ 25 มิลลิเมตรขึ้นไปและถือว่าเส้นใยประเภทนี้เป็นเส้นใยสำหรับโครงสร้าง(structural fibers) คุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยสังเคราะห์บางประเภทจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยสังเคราะห์บางประเภท

วัสดุ	ขนาดหน้าตัด (mm.)	ความถ่วงจำเพาะ	กำลังรับแรงดึงประลัย (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความเครียดประลัย (%)
อะคริลิก	0.01-0.1	1.16-1.18	270-1000	13.8-19.3	7.50-50.0
อะรามิด I	0.012	1.44	2930	62.0	4.4
ไนลอน	0.023	1.14	965	5.17	20
โพลีเอสเตอร์	0.020	1.34-1.39	225-1100	17.2	12-150
โพลีพรพิลีน	0.02-1.02	0.92-0.96	75.8-585	5.00	3-80

### เส้นใยประเภทที่4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers ,Type IV)

วัสดุที่ได้จากสิ่งที่เกิดขึ้นในธรรมชาติก็สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้คอนกรีตได้เช่นกัน เส้นใยชนิดนี้ได้เปรียบในเรื่องต้นทุนในกรณีที่ต้องการใช้ในปริมาณมากเนื่องจากหาได้จากธรรมชาติ แต่ในทางกลับกันเส้นใยอาจจะไม่มีความไม่แน่นอนของคุณสมบัติเชิงกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล เส้นใยธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้กันมีทั้ง เส้นใยไม้ไผ่ เส้นใยต้นไม้ เส้นใยป่านและเส้นใยมะพร้าว คุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติบางชนิดแสดงดังในตาราง 2.3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางประเภท

ชนิดเส้นใย	ขนาดหน้าตัด (mm.)	ความ ถ่วงจำเพาะ	กำลังรับแรงดึง ประลัย (MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่น (GPa)	ความเครียด ประลัย (%)
มะพร้าว	0.01-0.41	1.12-1.15	120-200	19.0-26.0	10-25
ชานอ้อย	0.20-0.41	1.2-1.3	180-290	15.0-19.0	N/A
ป่าน	N/A	N/A	275-565	13.0-26.0	3-5
ไม้ไผ่	0.05-0.41	1.5	350-500	33.0-40.0	N/A
ใยไม้	0.02-0.08	1.5	700	N/A	N/A

หมายเหตุ :N/A คุณสมบัติดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปค่าสำหรับใช้งานได้

สำหรับการใช้เส้นใยในคอนกรีตนั้นมีทั้งการใช้ในเชิงโครงสร้างและไม่เชิงโครงสร้าง สำหรับการ  
ใช้งานแบบไม่เชิงโครงสร้างนั้นเส้นใยมักจะถูกใช้เพื่อช่วยป้องกัน และควบคุมเรื่องการหดตัวพลาสติก  
ในคอนกรีต ส่วนการใช้ในเชิงโครงสร้างนั้นมักจะถูกใช้ให้เป็นตัวช่วยรับแรงดึงลำดับที่สอง หรือ  
กล่าวคือใช้ร่วมกับวัสดุรับแรงดึงอื่นที่เป็นตัวรับแรงดึงหลักเช่นเหล็กเสริม สัดส่วนผสมของเส้นใยใน  
คอนกรีตมีความหลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมันถูกใช้เพื่อจุดประสงค์ใด สำหรับการใช้เพื่อควบคุมการ  
หดตัวจะใช้เส้นใยในปริมาณน้อย โดยใช้สัดส่วนของเส้นใยประมาณร้อยละ0.1ถึง0.3ของปริมาตร  
และหากเส้นใยในคอนกรีตมีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ0.3จะเป็นการใช้สำหรับเพิ่มให้คอนกรีตมีกำลังรับ  
แรงดึงมากขึ้น [3] โดยคุณสมบัติเชิงกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และการประยุกต์ใช้เส้นใยคอนกรีต  
บางชนิดเป็นดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยบางชนิด

ชนิดเส้นใย	ขนาด หน้าตัด (mm.)	ความยาว เส้นใย (mm.)	กำลังรับแรงดึง ประลัย (MPa)	การใช้งานเส้นใย
เหล็ก	0.5-1.0	6-74	1100-2065	ผนังอุโมงค์,เสริมเสถียรภาพเนิน หิน,พื้นวางบนดิน และ โครงสร้างสะพาน
แก้ว	0.005- 0.15	13-38	1000-1695	วัสดุปิดผิวอาคาร หรือชิ้นส่วนที่ ต้องการความบางพิเศษ

ตารางที่ 5 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยบางชนิด(ต่อ)

ชนิดเส้นใย	ขนาดหน้าตัด (mm.)	ความยาวเส้นใย (mm.)	กำลังรับแรงดึงประลัย (MPa)	การใช้งานเส้นใย
โพลีโพรพิลีน	0.02-0.4	12-20	135-685	พื้นของอาคารพาณิชย์หรือโรงงานอุตสาหกรรม
ไนลอน	0.02-0.3	19-50	965	
โพลีเอสเตอร์	0.02-0.4	19-50	205-1205	พื้นวางบนดิน
บะซอลต์	0.01-0.65	12-100	1030-1375	โครงสร้างพื้น, ชั้นส่วนที่ต้องการความบางพิเศษ และชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

อิทธิพลต่อความสามารถในการต้านแรงภายในหน้าตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

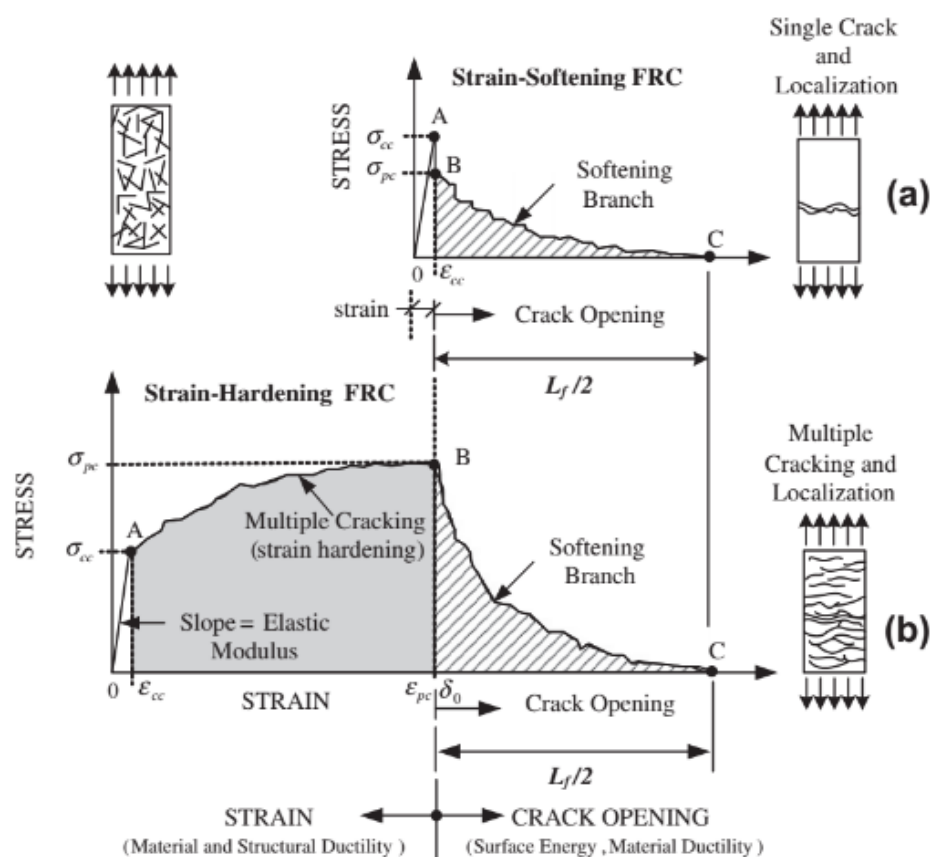
เนื่องจากคอนกรีตปกติจะมีความเปราะแตกจึงทำให้เมื่อมีการผสมเส้นใยเข้าไปในปริมาณที่มากพอจะทำให้คอนกรีตที่รับแรงอัดจนเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก(Micro Crack)ภายในเนื้อมวลรวม เส้นใยจะเป็นตัวช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวดังกล่าว(การเพิ่มเส้นใย 4% จะทำให้เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตได้ถึง 5-10%) แต่ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างแน่ชัดว่าปริมาณเส้นใยนั้นจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการรับแรงอัด [4], [5], [2], [6]

กำลังรับแรงดึง (Tensile strength)

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตปกติจะมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10-15 ของกำลังอัด แต่เมื่อมีการผสมเส้นใยเพิ่มเข้าไปจะทำให้เส้นใยที่อยู่บริเวณรอยร้าวทำหน้าที่ช่วยรับแรงดึงและทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้รอยร้าวดังกล่าวขยายตัวขึ้น จากการศึกษาด้วยการทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงแยก(split-cylinder tensile strength)ของ Yazici et al.(2006) [7] พบว่าเส้นใยเหล็กที่ใส่เพิ่มไปในคอนกรีตสามารถทำให้กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 11-54 จากการเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใยเหล็ก (ศึกษาสัดส่วนเส้นใยเหล็กสูงสุดที่ร้อยละ 1 ของปริมาตร) และการศึกษาของ Yurtseven (2004) [8] พบว่าการใส่เส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีนร้อยละ 0.6 จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงของ

คอนกรีตได้ร้อยละ 19.5 ส่วนการใช้เส้นใยสังเคราะห์คาร์บอนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตได้ร้อยละ 31.6

ในการพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตจะสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงอีลาสติก ช่วง strain hardening แสดงดังรูปที่ 2.2 (รูปบน) แต่หากมีปริมาณเส้นใยมากและเส้นใยสามารถรองรับแรงดึงได้ดี (คอนกรีตเสริมเส้นใยสมรรถนะสูง) พฤติกรรมจะแบ่งออกได้เป็นสามช่วงคือ ช่วงอีลาสติก ช่วง strain hardening และช่วง strain softening แสดงดังรูปที่ 2 (รูปล่าง)

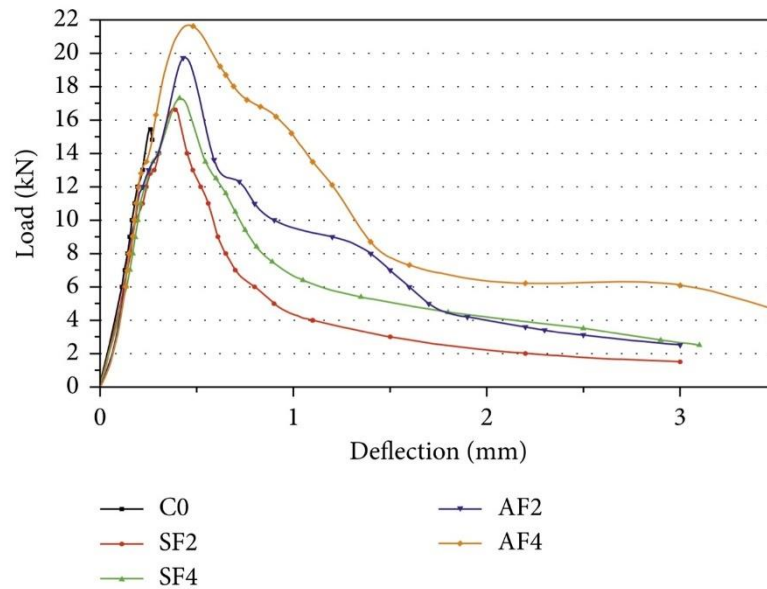


รูปที่ 2 พฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใย [3]

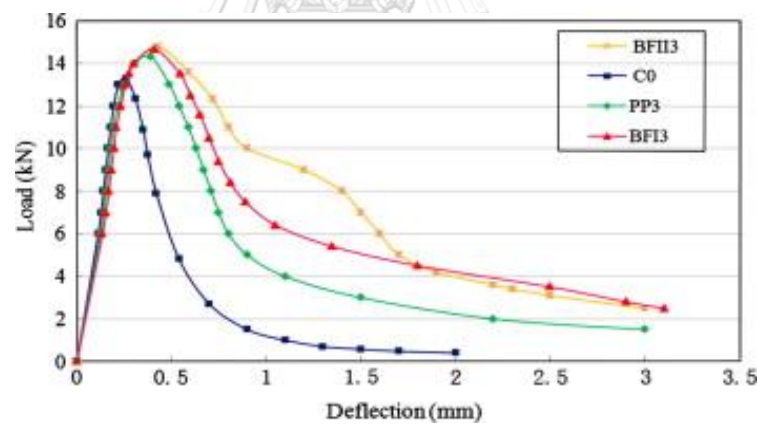
กำลังรับแรงดัด (Flexural strength)

จากการศึกษาการดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใยอะมอร์ฟัสอัลลอยด์ ของ Chaohua Jiang(2018) [9] พบว่าการใส่เส้นใยเหล็ก จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ร้อยละ 5.21-14.15 ที่สัดส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 0.2-1.0 ส่วนการใช้เส้นใยอะมอร์ฟัสอัลลอยด์ ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ร้อยละ 18.21-45.21 ที่สัดส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 0.2-1.0 ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และการศึกษาของ Jiang et al. (2014) [5] พบว่าผลที่ได้จากการผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนหรือเส้น

ใยบะซอลต์ที่ปริมาณผสมเพิ่มไม่เกินร้อยละ 0.3 ให้กำลังแรงดัดที่ไม่ต่างกันมากนัก แต่มีพฤติกรรมหลังการแตกร้าวที่ต่างกันดังที่แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์แรงกดและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยทดสอบ[9]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์แรงกดและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยทดสอบ[5]

## 2.2 พื้นวางบนดิน (Slabs on Ground)

เป็นระบบพื้นที่วางตัวอยู่บนพื้นดินก่อสร้าง และถ่ายน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นลงสู่พื้นดินด้านใต้โดยตรง โดยที่พื้นดินรองรับนั้นจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับทั้งน้ำหนักพื้นคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นได้ รวมไปถึงคอนกรีตที่ใช้สร้างพื้นนั้นจะต้องมีโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ที่เพียงพอจะกระจายน้ำหนักบรรทุกนั้นลงสู่พื้นดินด้านใต้ ระบบพื้นวางบนดินนี้สามารถใช้เป็นโครงสร้างรองรับ

รับน้ำหนักได้ทั้งที่เป็นพื้นภายในอาคาร พื้นภายนอกอาคาร หรือแม้กระทั่งพื้นผิวทางของโครงสร้างถนน

มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา(ACI 360R-06) ได้จัดประเภทของพื้นวางบนดินสำหรับงานก่อสร้างไว้ 4 ประเภท [10] ได้แก่

- พื้นคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก (Unreinforced concrete slab)
- พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อควบคุมรอยร้าว(Slabs reinforced for crack width control)ที่จะเกิดขึ้นจากการหดตัว ผลจากอุณหภูมิ และน้ำหนักบรรทุกที่มีความกว้างสูงสุดไม่เกินค่าที่ยอมให้ โดยการเสริมเหล็กจะต้อง มีการเสริมเหล็กเส้นโครงสร้างหรือการเสริมเส้นใย มีจุดต่อที่มีระยะห่างไม่มากเกินไป และจะต้องมีความต่อเนื่องกัน
- พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรองรับผลจากสภาวะใช้งาน(Slabs reinforced to prevent cracking)ทั้งจากน้ำหนักบรรทุก อุณหภูมิ และการหดตัวโดยที่ไม่เกิดรอยร้าว โดยการก่อสร้างพื้นประเภทนี้จะต้องคอนกรีตที่มีการชดเชยการหดตัว(Shrinkage-compensating concrete) และการเสริมเหล็กเป็นแบบอัดแรงภายหลัง(Post Tensioned)
- พื้นโครงสร้าง (Structural slabs (ACI 318))

**พื้นคอนกรีตไม่เสริมแรง (Unreinforced concrete slab)** จะต้องออกแบบด้วยการใช้ความหนาของตัวคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุอื่น ๆ ในการรองรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้น แต่อาจจะมีเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อด้วยเหล็กเดือย(Steel Dowels) ปูนซีเมนต์ที่ใช้การก่อสร้างพื้นประเภทนี้จะใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 หรือประเภทที่ 2 ก็ได้ และการออกแบบนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับการเกิดการหดตัวแบบแห้ง(Drying Shrinkage) และความสม่ำเสมอของชั้นดินเดิม (Sub Grade) ที่รองรับพื้นเป็นอย่างมาก

**พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบควบคุมความกว้างรอยร้าว (Slabs reinforced for crack width control)** จะต้องออกแบบโดยพยายามให้ไม่เกิดรอยร้าวเมื่อเกิดน้ำหนักบรรทุกขึ้นบนผิวพื้น และหากรอยร้าวจากการหดตัวเกิดขึ้น มันจะต้องถูกควบคุมด้วยเหล็กเสริมที่กระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีตที่ถูกวางไว้ที่ระยะ  $1/3$  ของความหนาหน้าตัดจากผิวบน พื้นประเภทนี้สามารถเสริมแรงได้ด้วยเหล็กเส้นโครงสร้าง เหล็กตระแกรง เส้นใยเหล็ก หรือเส้นใยพอลิเมอร์ขนาดใหญ่

ในการออกแบบหน้าตัดด้านผลของน้ำหนักบรรทุก จะใช้การออกแบบคล้ายกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็ก หรือใช้เหล็กเส้นหรือเหล็กทรงแครงที่เสริมเข้าไปในคอนกรีตในการช่วยรับแรงดัดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดที่เกิดรอยร้าว โดยการออกแบบขนาดและปริมาณเหล็กเสริมสำหรับช่วยรับแรงดัดให้อ้างอิงทฤษฎีการออกแบบใน ACI318 แต่ทั้งนี้มาตรฐานการออกแบบดังกล่าวจะยังไม่ครอบคลุมถึงการใช้เส้นใยเหล็กหรือเส้นใยพอลิเมอร์ช่วยในการรับแรงดัด

**พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรองรับผลจากสภาวะใช้งาน (Slabs reinforced to prevent cracking)** ในการออกแบบเหล็กอัดแรงที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่ต้านการเกิดรอยร้าวจากน้ำหนักบรรทุก อุณหภูมิ และการหดตัวต่างๆ มาตรฐาน ASTM C845 กำหนดคอนกรีตชนิดเซกการหดตัวจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ประเภท K ในการก่อสร้าง คอนกรีตประเภทนี้จะมีการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อเริ่มก่อสร้าง เพื่อชดเชยการหดตัวที่จะเกิดขึ้นภายหลังขณะคอนกรีตแข็งตัว พื้นประเภทนี้จะต้องใส่เหล็กเสริมป้องกันการแตกร้าวจากการขยายตัวที่ตำแหน่งความลึกจากผิวเป็นระยะ 1/3 ของความลึก และพื้นดังกล่าวจะต้องแยกตัวออกจากโครงสร้างอื่นเช่นเสาและฐานราก

**พื้นโครงสร้าง (Structural slabs)** พื้นประเภทนี้เป็นพื้นที่ใช้รองรับและกระจายน้ำหนักจากโครงสร้างอื่นๆลงสู่พื้นดินด้านใต้ สำหรับการออกแบบจะต้องอ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 318

ในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างพื้นวางบนดินนั้น จะมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาและออกแบบดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของชั้นรองรับแผ่นพื้น (Properties of Slab Support)
- น้ำหนักบรรทุก (Load)
- แผ่นพื้น (Slab)
- รอยต่อ (Joint)

#### **คุณสมบัติของชั้นรองรับแผ่นพื้น (Properties of Slab Support)**

คุณสมบัติของชั้นดินรองรับพื้นที่ต้องพิจารณาในการออกแบบพื้นวางบนดินที่รองรับน้ำหนักบรรทุกนั้นมีเพียงค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน (Modulus of subgrade reaction) [11, 12] ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดต่อการหดตัวของดินที่พิจารณานั้นเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น

### น้ำหนักบรรทุก (Load)

รูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่สนใจในการพิจารณาออกแบบนั้นจะมีหลายรูปแบบด้วยกัน มาตรฐาน ACI 360R-06 [10] และรายงานวิชาการของ Concrete Society (TR34: Concrete Industrial Floors) [13] ระบุไว้ว่าน้ำหนักบรรทุกที่จะกระทำกับพื้นวางบนดินคือ น้ำหนักจากล้อของยานพาหนะ , น้ำหนักแบบจุดที่เกิดจากการวางชั้นวางอุตสาหกรรม(น้ำหนักที่ขาตั้งชั้น) , น้ำหนักกระจายแบบเส้นที่อาจจะเกิดจากผนังหรือขาตั้งชั้นวางของที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง , น้ำหนักกระจายแบบแผ่นที่อาจเกิดจากการวางสิ่งของหรือเครื่องจักรลงบนพื้นโดยตรง , น้ำหนักที่เกิดขึ้นระหว่างก่อสร้างที่มีรูปแบบคล้ายกับน้ำหนักบรรทุกก่อนหน้าที่กล่าวถึง เพียงแต่มีช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำเพียงช่วงเวลาสั้นๆ และผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมเช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบพื้นที่ ทิศตัวของชั้นดินที่รองรับพื้น และการหดตัวที่ไม่เท่ากันของผิวบนและล่างของแผ่นพื้น

### แผ่นพื้น (Slab)

สำหรับการออกแบบแผ่นพื้นแบบที่เสริมเหล็กหรือวัสดุอื่นเพื่อช่วยในการต้านแรงดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกนั้นจะต้องรองรับได้ทั้งสถานะที่วัสดุถึงจุดประลัย(Ultimate Strength) และสถานะการใช้งานที่ปลอดภัย(Serviceability) โดยจะต้องคำนึงถึงกำลังรับแรงดัดของหน้าตัด(Moment Capacity) และกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด(Shear Capacity) โดยกำลังต้านแรงภายในทั้งสองแบบนี้จำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เลือกใช้ก่อน และถ้าหากผู้ออกแบบเลือกใช้พื้นวางบนดินที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญอย่างเช่น กำลังรับความเค้นค้ำงการดัด(Residual Flexural Tensile Strength)ของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่สนใจ โดยจะต้องทำการทดสอบวัสดุเพื่อจะได้มาซึ่งค่าดังกล่าวเพื่อใช้ประกอบการคำนวณวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด

### รอยต่อ (Joint)

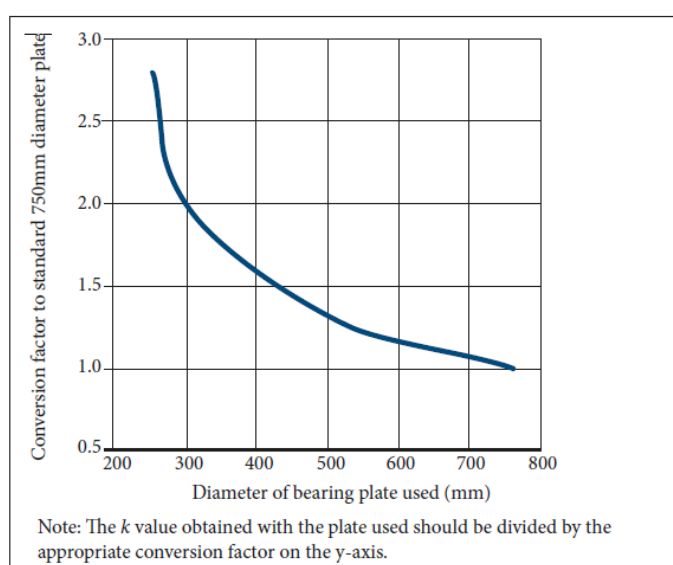
สำหรับการถ่ายแรงระหว่างแผ่นพื้นของพื้นวางบนดินนั้นจำเป็นต้องถ่ายผ่านรอยต่อระหว่างแผ่นพื้น หากรอยต่อนั้นไม่แข็งแรง หรือมีคุณสมบัติสำหรับการส่งผ่านแรงที่เกิดขึ้นไม่เพียงพออาจทำให้ระบบพื้นที่ออกแบบจะมีพฤติกรรมการรับแรงไม่ตรงตามที่ต้องการ รวมไปถึงอาจทำให้เกิดความเสียหายกับระบบพื้นได้ ดังนั้นในการออกแบบพื้นวางบนดิน จึงไม่ควรละเลยการวิเคราะห์ความแข็งแรง และความสามารถในการส่งผ่านแรงของรอยต่อว่าเพียงพอหรือไม่



### 2.3 ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน (Modulus of subgrade reaction)

เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของดินชั้นรองแผ่นพื้นก็เป็นส่วนสำคัญที่เป็นตัวกำหนดกำลังรับแรงจากน้ำหนักบรรทุกของระบบพื้นวางบนดินทั้งระบบ จึงทำให้การวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆของดินชั้นรองจึงมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดิน จากเนื้อหาที่กล่าวในข้างต้นนั้นค่าตัวแปรที่สำคัญของชั้นดินสำหรับการออกแบบพื้นวางนั้นคือค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน ที่ไม่เพียงบ่งบอกถึงความสามารถในการรองรับน้ำหนักของชั้นดินได้แผ่นพื้นเพียงอย่างเดียว ในการรองรับน้ำหนักบรรทุกบางรูปแบบของพื้นวางบนดินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชั้นรองแผ่นพื้นจะมีผลต่อการกระจายแรงของน้ำหนักบรรทุก และส่งผลถึงการตัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดพื้นด้วย โดยระบุรายละเอียดเหล่านี้ไว้ในเนื้อหาส่วนการประเมินน้ำหนักบรรทุกที่จะถูกกล่าวถึงถัดไป

มาตรฐานACI 360R-06 กล่าวว่าถ้าการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินชั้นรองรับพื้นสามารถทำได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของพื้นดิน(Plate Bearing Test) ตามมาตรฐานAASHTO T 222-81ซึ่งจะแปลผลการทดสอบและได้ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินโดยตรง ตัวอย่างการทดสอบที่กดน้ำหนักด้วยแผ่นกดทดสอบขนาด250มม.ได้ผลดังแสดงในรูปที่2.5 ที่การความเค้นทดสอบ0.8MPa การทรุดตัวของดินมีค่าเท่ากับ 1.25มม. ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินจะมีค่าเท่ากับ $0.8/1.25$ ซึ่งเท่ากับ $0.64\text{MPa/mm}$ . และเมื่อปรับแก้ค่าเนื่องจากขนาดของแผ่นกดทดสอบตามที่Westergaardกำหนดไว้แสดงในรูปที่ 5 ( $0.64/2.55$ )จะได้ว่าค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินที่ทดสอบเท่ากับ  $0.25\text{MPa/mm}$



รูปที่ 5 ค่าปรับแก้สำหรับการใช้แผ่นทดสอบแรงกดขนาดต่างๆ[13]

แต่เนื่องจากการทดสอบนี้จะต้องใช้น้ำหนักกดที่มีค่าสูงทำให้จำเป็นต้องใช้งบประมาณในการทดสอบสูง ในโครงการบางโครงการจึงอาจไม่คุ้มต้องงบประมาณที่เสียไป มาตรฐาน ACI 360R-06 จึงระบุทางเลือกที่จะประเมินค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน ซึ่งมีความสะดวกและใช้งบประมาณการทดสอบน้อยกว่าตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASSHTO ด้วยการมาจกค่าโมดูลัสการคืนตัวของดินชั้นรองรับพื้น (resilient modulus of the subgrade) ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของดินในการรับแรงกดอัด (California Bearing Ratio, CBR) ของมาตรฐาน ASTM D1883

ค่าโมดูลัสการคืนตัวของดินสามารถหาได้การประมาณจากค่าความแข็งแรงของดินในการรับแรงกดอัดตามที่แสดงในสมการที่ 2.1 และการประมาณค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินนั้นสามารถประมาณได้จากสมการที่ 2.2

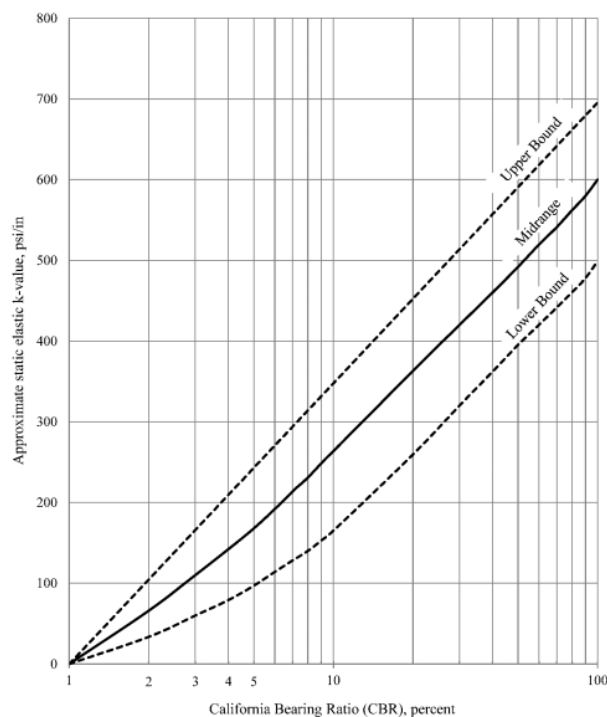
$$M_R = 10,324 \cdot CBR \quad (2.1)$$

$$k = M_R \cdot 2.03 \quad (2.2)$$

โดยที่  $M_R$  โมดูลัสการคืนตัวของดิน (kPa)      CBR ค่าความแข็งแรงของดินในการรับแรง

และ  $k$  ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน ( $\text{kN/m}^3$ )

หรือสามารถหาได้จากสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดินและค่า CBR อ้างอิงตามคู่มือการออกแบบพื้นคอนกรีตผิวทางหมวด 1 เอกสารหมายเลข FHWA-RD-96-198 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่า CBR และ K เพื่อการพยากรณ์ค่า K [14]

ส่วนมาตรฐานEurocode7(EN 1997-1) ระบุว่าในการประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับการออกแบบพื้นวางบนดินนั้นจำเป็นต้องได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของพื้นดิน(Plate Bearing Test) ตามมาตรฐานEN 1997-2 ภายในรายงานเชิงวิชาการของ Concrete Society (TR34) ระบุไว้ว่า “ประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากค่าความแข็งแรงของดินในการรับแรงกดอัดนั้นไม่อาจเป็นค่าที่ประมาณให้ยอมรับได้”

ในปัจจุบันมาตรฐาน รายงานวิชาการ และงานวิจัยที่กล่าวถึงการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยขนาดใหญ่ที่มีการเผยแพร่อย่างเป็นทางการแล้วนั้น มีเพียง 2 แหล่ง นั่นคือมาตรฐานACI 360R-06 และรายงานเชิงวิชาการของ Concrete Society (TR34) ดังนั้นเนื้อหาการอธิบายรายละเอียดการวิเคราะห์ออกแบบในส่วนการประมาณน้ำหนักบรรทุก การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต และการออกแบบรอยต่อจะทำการพิจารณาอ้างอิงเพียงมาตรฐานการวิเคราะห์เพียงสองมาตรฐานที่กล่าวถึงในข้างต้น

## 2.4 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต

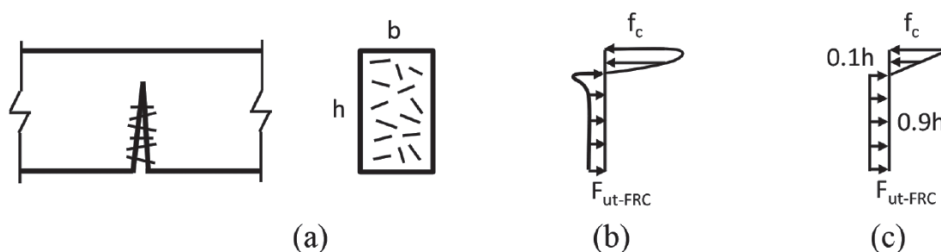
ในการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษามุ่งเน้นการศึกษาการประยุกต์ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีนในการออกแบบเป็นพื้นวางบนดิน ดังนั้นในการวิเคราะห์รายละเอียดตามมาตรฐานการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดินในแต่ละส่วนนั้นผู้ศึกษาจึงจะหยิบยกเนื้อหาเฉพาะส่วนที่ระบุถึงการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่เพียงเท่านั้น

### 2.4.1 การออกแบบหน้าตัดตามมาตรฐานACI

มาตรฐานACI 360-06ระบุว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่จะต้องใส่เส้นใยสังเคราะห์ในมวลรวมประมาณร้อยละ0.3-1.0 เพื่อใช้ควบคุมการหดตัวแบบแห้ง และช่วยเพิ่มกำลังรับความเค้นคงค้างหลังการแตกร้าว(Post-cracking residual strength)ให้กับหน้าตัดพื้นวางบนดิน

ในการคำนวณออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่จะใช้หลักการคิดเดียวกันกับการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยจะต้องอาศัยค่าความเหนียวการดัด(Flexural toughness) ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานJSCF SF4 ASTM C1399 หรือASTM C1609 [15, 16] ค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้จากการทดสอบคือ ค่าตัวประกอบกำลังรับความเค้นคงค้าง(Residual Strength Factor,  $R_{e,3}$ ) ส่วนค่าตัวแปรที่จำเป็นต่อการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของหน้าตัดรับแรงดัดทั่วไปของคอนกรีตเสริมเส้นใยคือค่ากำลังรับความเค้นคงค้างที่ทำให้คานทดสอบมีการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ  $L/150$  (Residual Strength,  $f_{150}^D$ )

ในการพิจารณากำลังรับกำลังดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่จะอ้างอิงการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดรับแรงดัดที่สภาวะประลัยจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 โดยค่ากำลังรับแรงดัดประลัยของคอนกรีตเสริมเส้นใย และกำลังรับแรงดัดประลัยของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 6 การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดรับแรงดัดตามมาตรฐาน ACI [17]

$$f_{ut-FRC} = 0.37 f_{150}^D \quad (2.3)$$

$$M_{n-FRC} = f_{150}^D \times \frac{bh^2}{6} \quad (2.4)$$

การคำนวณผลของน้ำหนักบรรทุกและการออกแบบหน้าตัดพื้นวางบนดินมี 3 วิธี ได้แก่

- วิธีการกำหนดความหนาแน่นของ PCA/WRI และ COE
- วิธีอีลาสติก (Elastic Method)
- วิธีแนวเส้นคราก (Yield line method)

โดยในการศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาการออกแบบวิธีที่อิทธิพลของการเสริมเส้นใยในคอนกรีตนั้นช่วยเพิ่มกำลังรับแรงของหน้าตัด นั่นคือวิธีอีลาสติก และวิธีแนวเส้นคราก

### วิธีอีลาสติก (Elastic Method)

การวิเคราะห์วิธีนี้จะคิดภายใต้สภาวะที่คอนกรีตยังคงอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น ดังนั้นการแรงภายในที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกจะต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ ในที่นี้ตัวแปรที่สนใจคือความเค้นแรงดึงจากการดัด (flexural tensile stress) โดยค่าความเค้นแรงดึงจากการดัดที่ยอมให้สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$f_b = R_{e,3} / 100 \cdot f_r \quad (2.5)$$

โดยที่  $f_b$  ค่าความเค้นแรงดึงที่ยอมให้ (MPa)  $R_{e,3}$  ค่าตัวประกอบกำลังรับความเค้นค้ำ (%)

และ  $f_r$  ค่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีต (MPa) โดย อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI จะมีค่าเท่ากับ  $0.62\lambda\sqrt{f_c}$  หน่วย MPa (จากมาตรฐาน ACI 318 สมการที่ 19.2.3.1) โดยที่  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับคอนกรีตมวลปกติ

โดยแรงภายในจากน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นนั้นจะคิดจากน้ำหนักกดจากล้อหรือน้ำหนักกระทำแบบจุดที่ทำให้การตอบสนองของพื้นดินด้านใต้แผ่นพื้นไม่เท่ากับพื้นที่อื่น ๆ จนเกิดแรงดัดขึ้นในแผ่นพื้น โดยน้ำหนักกระทำดังกล่าวมี 4 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 น้ำหนักกระทำแบบจุดที่มุมแผ่นพื้น

ซึ่งจะทำให้เกิดการดัดลบหรือแรงดัดที่ทำให้เกิดความเค้นการดึงขึ้นที่ส่วนบนของหน้าตัด หากพื้นที่กระทำของน้ำหนักบรรทุกทุกนั้นมีค่าน้อยมาก ค่าความเค้นการดึงที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 แต่ถ้าพื้นที่กระทำเป็นพื้นที่กว้างเป็นรัศมี  $a$  เมตร ค่าความเค้นการดึงที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$f_t = \frac{3P}{h^2} \quad (2.6)$$

$$f_t = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{L} \right)^{0.6} \right] \quad (2.7)$$

โดยที่  $f_t$  ค่าความเค้นการดึง (Pa)  $a$  รัศมีพื้นที่รองรับแรงกระทำ (m)

$h$  ความหนาพื้น (m) และ  $L$  รัศมีความแข็งสัมพันธ์ (m.) คำนวณจากสมการที่ 2.8

$$L = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $E$  ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Pa)  $\mu$  อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต (0.15)

และ  $k$  ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของดิน ( $\text{kN/m}^3$ )

กรณีที่ 2 น้ำหนักกระทำแบบจุดห่างจากขอบพื้น

แรงดัดที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นแรงดึงที่ส่วนล่างของหน้าตัดและค่าสูงสุดของแรงดัดจะเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางพื้นที่ของแรงกระทำ ค่าความเค้นการดึงที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$f_b = 0.316 \frac{P}{h^2} \left[ \log(h^3) - 4 \log(\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h) - \log(k) + 6.48 \right] \quad (2.9)$$

กรณีที่3 น้ำหนักกระทำแบบจุดกระทำที่ขอบพื้น

แรงดัดที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นแรงดัดที่ส่วนล่างของหน้าตัดโดยค่าความเค้นการดัดที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่2.10

$$f_b = 0.572 \frac{P}{h^2} \left[ \log(h^3) - 4 \log(\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h) - \log(k) + 5.77 \right] \quad (2.10)$$

กรณีที่4 น้ำหนักกระจายที่กระทำบางส่วนบนพื้น

ในโรงงานอุตสาหกรรมมักวางน้ำหนักบรรทุกลงบนพื้นโดยตรง และมีการเว้นพื้นที่ไว้เพื่อเป็นทางเดิน ดังนั้นน้ำหนักกระจายที่เกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นนั้นจะทำให้เกิดแรงดัดลบขึ้นที่กึ่งกลางทางเดินนั้น โดย Rice(1957) [18] ระบุว่าค่าแรงดัดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดพื้นที่กึ่งกลางทางเดินนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่2.11

$$M_c = \frac{w}{2\lambda^2} e^{-\lambda a} [\sin(\lambda a)] \quad (2.11)$$

ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นมาจากรถบรรทุก หรือรถยกต่างๆ ค่าขนาดของน้ำหนักบรรทุก และขนาดพื้นที่รองรับแรงกระทำสามารถประมาณได้จากชนิด ขนาดและจำนวนเพลลาของล้อซึ่งอาจจะเทียบได้จากที่มาตรฐาน ASSHTO สมาคมรถบรรทุกอุตสาหกรรม(The Industrial Truck Association) หรือมาตรฐานอื่นๆที่กล่าวถึงขนาดน้ำหนักของรถแต่ละชนิด ดังตัวอย่างแผนภูมิความสัมพันธ์ขนาดน้ำหนักและขนาดพื้นที่แรงกระทำในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวอย่างขนาดน้ำหนักล้อต่อแรงกระทำของรถบรรทุก[10]

ส่วนในกรณีน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากขาตั้งชั้นวางสินค้า น้ำหนักดังกล่าวจะเป็นน้ำหนักกระทำแบบจุดที่สามารถหาขนาดแรงกระทำได้จากการคำนวณน้ำหนักชั้นวาง และน้ำหนักของสินค้าหรือของที่วางอยู่บนชั้นนั้น ส่วนขนาดพื้นที่ของแรงกระทำจะต้องพิจารณาจากความหนาของแผ่นรองขาตั้งด้วย เนื่องจากหากแผ่นรองมีความหนาไม่มากพอน้ำหนักที่กระจายลงจากขาตั้งชั้นวางจะกระจายไม่เต็มแผ่นรองนั้น

### วิธีแนวเส้นคราก(Yield line method)

การวิเคราะห์นี้เป็นการคิดภายใต้สภาวะที่เกิดสภาวะประลัยหรือสภาวะพลาสติกแล้ว โดยจำลองให้พื้นเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในตำแหน่งที่เกิดแรงดัดสูงสุด การออกแบบวิธีนี้จะอ้างอิงถึงงานศึกษาของ Meyerhof [19] โดยพิจารณาแรงกระทำ 3 กรณีและได้ทำการเสนอสมการสำหรับพิจารณาแรงกระทำสูงสุดที่หน้าตัดพื้นรองรับได้ในแต่ละกรณีเอาไว้ดังต่อไปนี้

กรณีที่1 แรงกระทำที่กลางพื้นขนาดใหญ่

แรงกดสูงสุดที่หน้าตัดรับได้ที่สภาวะประลัยคำนวณได้จากสมการ2.12

$$P_o = 6 \left[ 1 + \frac{2a}{L} \right] M_o \quad (2.12)$$

$$\text{ในกรณีนี้ } M_o = M_n + M_p = \left[ 1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right] \times \frac{f_r \times b \times h^2}{6} \quad (2.13)$$

กรณีที่2 แรงกระทำที่ขอบพื้น

แรงกดสูงสุดที่หน้าตัดรับได้ที่สภาวะประลัยคำนวณได้จากสมการ2.14

$$P_o = 3.5 \left[ 1 + \frac{3a}{L} \right] M_o \quad (2.14)$$

$$\text{ในกรณีนี้ } M_o = M_n + M_p = \left[ 1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right] \times \frac{f_r \times b \times h^2}{6}$$

กรณีที่3 แรงกระทำที่มุมพื้น

แรงกดสูงสุดที่หน้าตัดรับได้ที่สภาวะประลัยคำนวณได้จากสมการ2.15

$$P_o = 2 \left[ 1 + \frac{4a}{L} \right] M_o \quad (2.15)$$

$$\text{ในกรณีนี้ } M_o = M_n = \frac{f_r \times b \times h^2}{6} \quad (2.16)$$

ในสมการด้านบนนั้น

a รัศมีเทียบเท่าของพื้นที่สัมผัสของแรงกระทำ

$f_r$  ค่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีต

h ความหนาพื้น

L รัศมีความแข็งสัมพัทธ์

$M_n$  กำลังรับแรงดัดลบของหน้าตัด

และ  $M_p$  กำลังรับแรงดัดบวกของหน้าตัด

### ตัวประกอบความปลอดภัย (Factors Of Safety)

มาตรฐาน ACI 360R-06 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของการออกแบบจะเป็นไปตามประเภทการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบ [13]

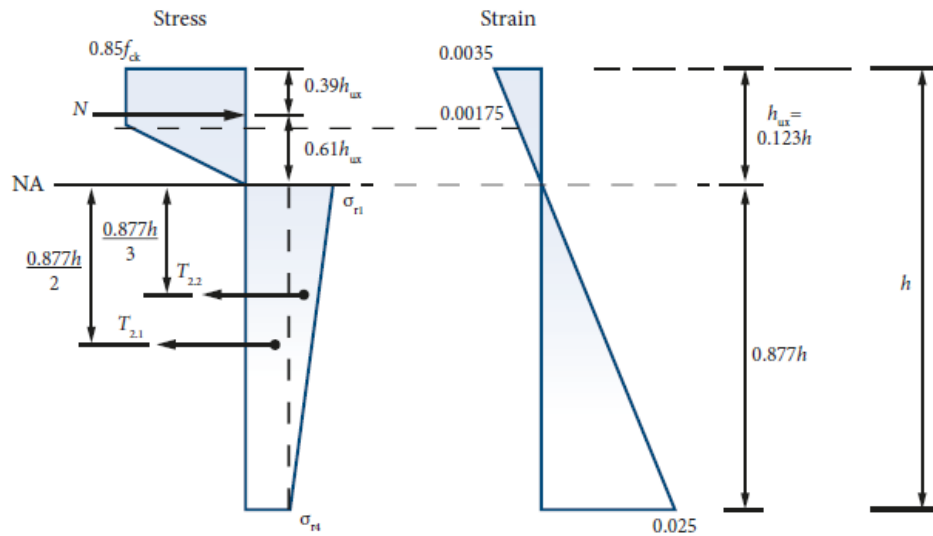
รูปแบบน้ำหนักบรรทุก	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย ที่นิยมใช้
น้ำหนักจากล้อที่เคลื่อนที่	1.7-2.0
น้ำหนักแบบจุดที่กระทำค้างอยู่เป็นเวลานาน เช่น น้ำหนักจากขาตั้งชั้นวางฯ	1.7-2.0
น้ำหนักกระจายแบบแผ่	1.7-2.0
น้ำหนักกระจายแบบเส้น	1.7
น้ำหนักบรรทุกระหว่างก่อสร้าง	1.4-2.0

#### 2.4.2 การออกแบบหน้าตัดอ้างอิงตามรายงานเชิงวิชาการ TR34

ในรายงานเชิงวิชาการ TR34 ระบุไว้ว่าการออกแบบพื้นวางบนดินจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่ นั้น จะต้องใช้ค่าการทดสอบการตัดตามมาตรฐาน EN 14651 โดยค่าที่สำคัญที่ต้องใช้จากการทดสอบการตัดตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย คือค่าความเค้นคงค้างค่าที่ 1, 2, 3 และ 4 ที่เป็นค่าความเค้นคงค้างที่ทำให้เกิดค่าความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ในการพิจารณากำลังรับกำลังดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดใหญ่จะอ้างอิงการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดรับแรงดัดที่สภาวะประลัยจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 เอกสาร TC 162-TDF(2002) ของ RILEM ที่ระบุว่าค่าความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ส่วนรับแรงดัดที่ประมาณได้จากค่าความเค้นคงค้างที่ทำให้เกิดค่า  $CMOD_1(0.5)$  และ  $CMOD_4(3.5)$  ( $f_{R1}$  และ  $f_{R4}$ ) ตามที่แสดงในสมการที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ





รูปที่ 8 การกระจายหน่วยแรงและความเครียดในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใย[13]

$$\sigma_{r1} = 0.45f_{R1} \quad (2.17)$$

$$\sigma_{r4} = 0.37f_{R4} \quad (2.18)$$

โดยที่  $f_{ck}$  กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$\sigma_{r1}$  ค่าความเค้นที่ตำแหน่งแกนสะเทิน

$f_{R1}$  ความเค้นคงค้างของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ทำให้เกิด  $CMOD_1(0.5)$  (จากการทดสอบ)

$\sigma_{r4}$  ค่าความเค้นที่ตำแหน่งขอบหน้าตัดรับแรงดึง

และ  $f_{R4}$  ความเค้นคงค้างของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ทำให้เกิด  $CMOD_1(3.5)$  (จากการทดสอบ)

เมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นบนหน้าตัดรับแรงดึงในรูปที่ 8 หากแรงภายในหน้าตัดจะสมดุลได้ ผลรวมแรงดึงจะต้องมีค่าเท่ากับค่าผลรวมแรงอัดดังที่แสดงในสมการที่ 2.19 โดยที่ค่าผลรวมแรงอัดและแรงดึงจะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.20 , 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ

$$N \geq T_{2,1} + T_{2,2} \quad (2.19)$$

$$N = 0.123h \times 0.75 \times 0.85 \times f_{ck} = 0.078h \times f_{ck} \quad (2.20)$$

$$T_{2,1} = 0.88h \sigma_{r4} \quad (2.21)$$

$$T_{2,2} = 0.44h (\sigma_{r1} - \sigma_{r4}) \quad (2.22)$$

และเมื่อคำนวณเป็นแรงดึงจะได้เป็นกำลังรับแรงดึงของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยที่พิจารณา ออกแบบดังที่แสดงในสมการที่ 2.23

$$M_u = \left[ T_{2,1} \left( \frac{0.877h}{2} + 0.075h \right) + T_{2,2} \left( \frac{0.877h}{3} + 0.075h \right) \right] / \gamma_m \quad (2.23)$$

หรือ

$$M_u = \frac{h^2}{\gamma_m} (0.29\sigma_{r4} + 0.16\sigma_{r1}) \quad (2.24)$$

โดยที่  $M_u$  กำลังรับแรงดัดของหน้าตัด และ  $\gamma_m$  ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุ  
 รายงานเชิงวิชาการ TR34 ระบุว่า การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนทะเลของหน้าตัดนั้นอ้างอิงตาม  
 มาตรฐาน Eurocode2 ซึ่งกำหนดให้หน้าจะต้องพิจารณาการรับแรงเฉือนที่สองตำแหน่งคือ ที่  
 ตำแหน่งพื้นที่รองรับน้ำหนัก และที่ตัดวิกฤต โดยหน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนทะเลจะเปิดขึ้นที่ตำแหน่ง  
 ห่างจากพื้นที่กระทำของน้ำหนักบรรทุกเป็นระยะสองเท่าของความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด แต่  
 เนื่องจาก Eurocode2 กำหนดนิยามของความลึกประสิทธิผลไว้เพียงของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก  
 ดังนั้นรายงานเชิงวิชาการ TR34 จึงกำหนดให้ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยที่  
 ไม่มีเหล็กเสริมอื่นมีค่าเป็นร้อยละ 75 ของความลึกหน้าตัด  
 การพิจารณาแรงเฉือนที่ตำแหน่งรองรับน้ำหนักบรรทุกจะต้องมีค่าไม่เกินค่าแรงเฉือนสูงสุดที่หน้าตัด  
 รองรับได้ ที่คำนวณตามสมการที่ 2.25

$$P_{p,max} = v_{max} u_0 d \quad (2.25)$$

โดยที่  $P_{p,max}$  น้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับรองรับแรงเฉือนที่พิจารณาที่รอบพื้นที่รองรับน้ำหนัก

$v_{max}$  ความเครียดสูงสุดที่หน้าตัดรองรับได้เมื่อพิจารณาที่รอบพื้นที่รองรับน้ำหนัก

และ  $u_0$  ความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่กระทำของน้ำหนักบรรทุก

โดยที่  $v_{max}$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.26

$$v_{max} = 0.5k_2 f_{cd} \quad (2.26)$$

โดยที่  $f_{cd}$  ค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบของคอนกรีต ( $f_{ck}/\gamma_m$ )

$$\text{และ } k_2 = 0.6(1 - f_{ck}/250) \quad (2.27)$$

การพิจารณาแรงเฉือนทะเลที่หน้าตัดวิกฤตจะอ้างอิงแนวทางของ RILEM และ Eurocode2 โดยจะแบ่ง  
 กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่มาจากคอนกรีต และ  
 ส่วนที่เพิ่มเติมมาจากการเสริมเส้นใย โดยกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จาก  
 สมการ 2.28

$$V_{Rdc,min} = 0.035k_s^{1.5}f_{ck}^{0.5} \quad (2.28)$$

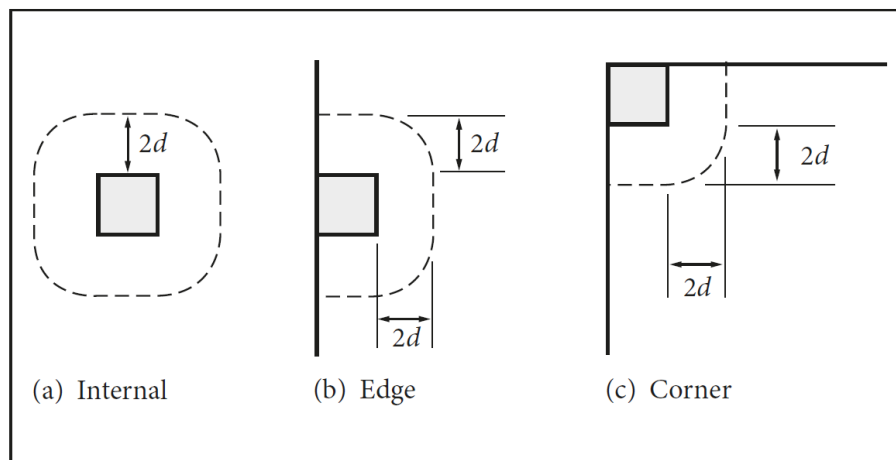
$$\text{โดยที่ } k_s = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2 \quad (2.29)$$

$V_{Rdc,min}$  ค่ากำลังรับความเค้นการเฉือนของคอนกรีตที่ไม่เสริมแรง

$P_{p,max}$  ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่รองรับได้จากการพิจารณาแรงเฉือนทะลุ

$u_1$  ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤต

โดยเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตสามารถพิจารณาตามตำแหน่งที่เกิดแรงกระทำได้ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตของพฤติกรรมแรงเฉือนทะลุ[13]

แนวคิดในการวิเคราะห์ผลของแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกของรายงานเชิงวิชาการ TR34 อังอิงทฤษฎี เช่นเดียวกับกับ ACI 360R-06 นั่นคือหากพิจารณาการรับแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดนั้นจะพิจารณาภายใต้สภาวะประลัยของวัสดุซึ่งอ้างอิงการวิเคราะห์วิธีแนวเส้นคราก และการพิจารณาแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกระจายทั้งเป็นแนวเส้นและแบบแผ่จะพิจารณาภายใต้สภาวะยึดหยุ่นซึ่งอ้างอิงการวิเคราะห์วิธีอีลาสติก

สำหรับการวิเคราะห์ผลของน้ำหนักบรรทุก ค่าที่สำคัญต้องวิเคราะห์นอกเหนือจากน้ำหนักบรรทุก ก็คือค่ารัศมีความแข็งสัมพัทธ์ ( $I$ ) ของพื้นซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 เช่นเดียวกับกับที่มาตรฐาน ACI 360R-06 แนะนำ แต่ในรายงานเชิงวิชาการ TR34 ระบุว่าค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่แนะนำคือ 0.2 แต่เมื่อแทนค่าลงในพจน์  $1-\mu^2$  ผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงอาจทำให้ค่ารัศมีความแข็งสัมพัทธ์มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดที่เกิดขึ้นทั้งจะสามารถคำนวณได้ตามกรณีดังต่อไปนี้

เมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นแบบจุดเดี่ยวเกิดขึ้นภายในพื้น

กรณีที่ขนาดพื้นที่กระทำต่อรัศมีความแข็งสัมพัทธ์มีค่าน้อยมากๆ ( $a/l=0$ )

$$P_{u,0}=2\pi(M_p+M_n) \quad (2.30)$$

กรณี  $a/l \geq 0.2$

$$P_{u,0.2}=4\pi(M_p+M_n)/[1-(a/3l)] \quad (2.31)$$

เมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นแบบจุดเดี่ยวเกิดขึ้นขอบพื้น

กรณี  $a/l=0$

$$P_{u,0}=[\pi(M_p+M_n)/2]+2M_n \quad (2.32)$$

กรณี  $a/l \geq 0.2$

$$P_{u,0.2}=[\pi(M_p+M_n)+4M_n]/[1-(2a/3l)] \quad (2.33)$$

เมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นแบบจุดเดี่ยวเกิดขึ้นมุมพื้น

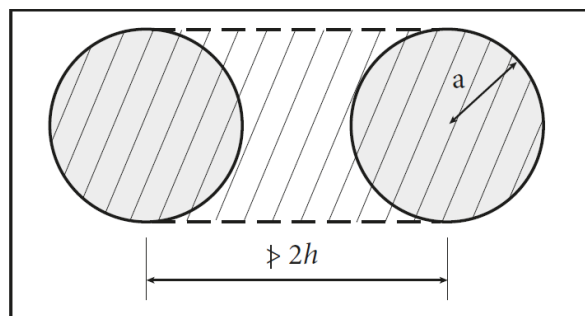
กรณี  $a/l=0$

$$P_{u,0}=2M_n \quad (2.34)$$

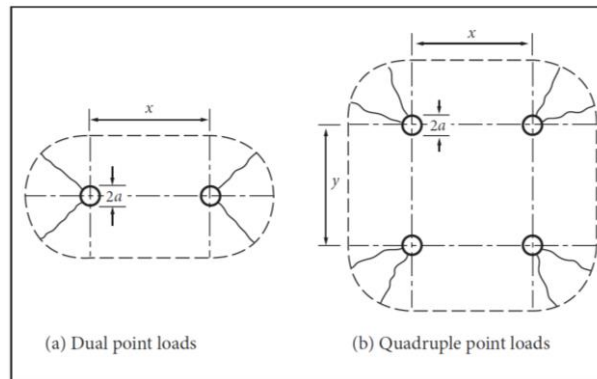
กรณี  $a/l \geq 0.2$

$$P_{u,0.2}=4M_n/[1-(a/l)] \quad (2.35)$$

ถ้าหากน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นแรงกระทำแบบจุด 2 จุดที่มีตำแหน่งใกล้กันมากกว่าระยะ 2 เท่าของความหนาพื้น ให้ประมาณได้น้ำหนักที่เกิดขึ้นเป็นแบบจุดเดี่ยวที่มีพื้นที่กระทำของแรงเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 10 แต่ถ้าระยะห่างระหว่างแรงกระทำมีค่ามากกว่านั้น หรือมีจำนวนจุดแรงกระทำมากกว่า 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 11 ให้คำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดที่เกิดขึ้นทั้งจะสามารถคำนวณได้ตามกรณีดังต่อไปนี้



รูปที่ 10 การประมาณพื้นที่แรงกระทำกรณีแรงสองจุดห่างกันไม่เกิน  $2h$  [13]



รูปที่ 11 ลักษณะแรงกระทำบนพื้นที่มากกว่าหนึ่งจุดกระทำ [13]

เมื่อนำหน้าบรรทุกทุกเป็นแรงแบบจุดสองจุดห่างกันเป็นระยะ  $x$

กรณี  $a/l = 0$

$$P_{u,0} = [2\pi + (1.8x/l)] [M_p + M_n] \quad (2.36)$$

กรณี  $a/l \geq 0.2$

$$P_{u,0.2} = \left[ \frac{4\pi}{1-(a/3l)} + \frac{1.8x}{l-(a/2)} \right] / [M_p + M_n] \quad (2.37)$$

เมื่อนำหน้าบรรทุกทุกเป็นแรงแบบจุดสี่จุดห่างกันเป็นระยะ  $x$  ในแนวนอนและห่างกันเป็นระยะ  $y$  ในแนวตั้ง

กรณี  $a/l = 0$

$$P_{u,0} = [2\pi + (1.8(x+y)/l)] [M_p + M_n] \quad (2.38)$$

กรณี  $a/l \geq 0.2$

$$P_{u,0.2} = \left[ \frac{4\pi}{1-(a/3l)} + \frac{1.8(x+y)}{l-(a/2)} \right] / [M_p + M_n] \quad (2.39)$$

โดยที่

$a$  รัศมีเทียบเท่าของพื้นที่สัมผัสของแรงกระทำ

$h$  ความหนาพื้น

$L$  รัศมีความแข็งสัมพัทธ์

$M_n$  กำลังรับแรงดัดลบของหน้าตัด

และ  $M_p$  กำลังรับแรงดัดบวกของหน้าตัด

เมื่อพิจารณานำหน้าบรรทุกทุกแบบกระจายเป็นแนวเส้นและแบบแผ่จะอ้างอิงหลักการคิดตามผลการศึกษาของ Hetenyi จะพิจารณาหน้าตัดรับแรงที่สภาวะยึดหยุ่น โดยจะอาศัยค่าเอกลักษณ์ของระบบพื้น (Characteristic of system,  $\lambda$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.40

$$\lambda = \left( \frac{3k}{E_{cm} h^3} \right)^{0.25} \quad (2.40)$$

โดยที่  $k$  ค่าโมดูลัสต้านทานการกดของดิน  $E_{cm}$  ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

และ  $h$  ความหนาพื้น

และน้ำหนักกระจาย (น้ำหนักต่อความยาวหนึ่งหน่วย) สูงสุดที่พื้นรองรับได้ในกรณีที่แรงดังกล่าวกระทำห่างจากขอบพื้นหรือรอยต่อไม่น้อยกว่าระยะ  $3/\lambda$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.41 ส่วนในกรณีที่แรงกระทำอยู่ใกล้ขอบหรือรอยต่อน้อยกว่า  $1/\lambda$  ความสามารถในการรองรับน้ำหนักกระจายสูงสุดจะคำนวณได้จากสมการ 2.42 และแรงกระทำอยู่ห่างจากขอบพื้นหรือรอยต่ออยู่ระหว่างระยะ  $1/\lambda$  และ  $3/\lambda$  ให้ทำการเทียบอัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากขอบหรือรอยต่อ กับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.41 และสมการ 2.42

$$P_{lin} = 4\lambda M_{un} \quad (2.41)$$

$$P_{lin} = 3\lambda M_{un} \quad (2.42)$$

โดยที่  $M_{un}$  ค่ากำลังรับแรงดัดของหน้าตัดคอนกรีตไม่เสริมแรง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.43

$$M_{un} = f_{ctd,fl} (h^2/6) \quad (2.43)$$

สำหรับน้ำหนักกระจายแบบแผ่จะพิจารณาเพียงกรณีที่น้ำหนักแผ่กระทำที่ภายในแผ่นพื้น เนื่องจาก การพิจารณาแรงที่กระทำที่ขอบพื้นหรือใกล้รอยต่อจะมีความซับซ้อนในการพิจารณามาก โดยการพิจารณาจะแบ่งออกเป็นสองกรณีดังต่อไปนี้

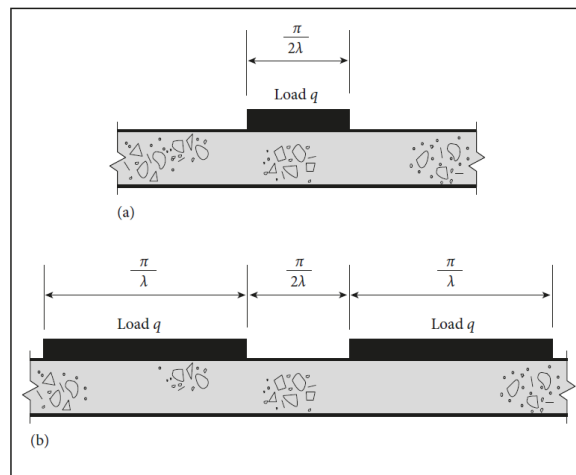
เมื่อน้ำหนักกระทำมีความกว้างพื้นที่กระทำเป็นค่า  $\frac{\pi}{2\lambda}$  หรือน้ำหนักกระทำ 2 จุดที่ทั้ง 2 จุดมีพื้นที่กระทำกว้าง  $\frac{\pi}{\lambda}$  ห่างกัน  $\frac{\pi}{2\lambda}$  ดังแสดงในรูปที่ 12 ค่าแรงดัดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกรณีนี้จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ จะมีความแตกต่างกันคือกรณีที่มีแรงกระทำจุดเดียวแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงดัดบวกหรือพื้น จะเกิดการว่าลง ส่วนกรณีที่มีแรงกระทำสองจุดค่าแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นเป็นแรงดัดลบหรือพื้นจะนูนขึ้นที่ตรงกลางระหว่างแรงกระทำสองจุดนั้น เมื่อพิจารณาแรงดัดที่เกิดขึ้นโดยกำหนดให้ไม่เกินค่ากำลังของหน้าตัดพื้น จะได้ว่าน้ำหนักกระจายสูงสุดที่หน้าตัดต้านทานได้จะมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.44

$$q = 5.95 \lambda^2 M_n \quad (2.44)$$

โดยที่  $q$  น้ำหนักกระจายสูงสุดที่พื้นรองรับได้

$M_n$  ค่ากำลังรับแรงดัดของหน้าตัดคอนกรีตไม่เสริมแรง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.43

โดยที่  $f_{ctd,fl}$  ค่ากำลังรับแรงดึงที่เกิดจากการดัดออกแบบของคอนกรีต (design concrete flexural tensile strength)



รูปที่ 12 แรงกระทำแบบกระจายที่มีความกว้าง  $\frac{\pi}{2\lambda}$  แบบ 1 จุด และแรงกระจายความกว้าง  $\frac{\pi}{\lambda}$  แบบ 2 จุด [13]

เมื่อน้ำหนักกระทำมีความกว้างพื้นที่กระทำมีค่า  $2c$  แรงดัดที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงดัดบวกได้แรงที่กระทำนั้น เมื่อพิจารณาแรงดัดที่เกิดขึ้นโดยกำหนดให้ไม่เกินค่ากำลังของหน้าตัดพื้น จะได้ว่าน้ำหนักกระจายสูงสุดที่หน้าตัดด้านทานได้จะมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.45

$$q = \frac{2}{B_{\lambda c}} \lambda^2 M_p \quad (2.45)$$

$$\text{โดยที่ } B_{\lambda c} = e^{-\lambda c} \sin(\lambda c) \quad (2.46)$$

และ  $e$  ค่าฐานของลอการิทึมธรรมชาติ (2.7182)

### ตัวประกอบความปลอดภัย (Factors Of Safety)

ตามคำแนะนำของรายงานเชิงวิชาการ TR34 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของการออกแบบจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุ และความต่อตัวประกอบความปลอดภัยของน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาน้ำหนักบรรทุกกระจายทั้งแบบเส้นและแบบแผ่ หากผู้ออกแบบทำการปรับค่าความปลอดภัยของวัสดุด้วยตัวประกอบความปลอดภัย (1.5) แล้วไม่จำเป็นต้องทำการปรับค่าความปลอดภัยของน้ำหนักบรรทุก

ตารางที่ 7 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบของวัสดุ (TR34)

วัสดุ	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
คอนกรีต	1.5
คอนกรีตเสริมเส้นใย	1.5
คอนกรีตเสริมเหล็ก	1.15

ตารางที่ 8 ค่าตัวประกอบความปลอดภัยการออกแบบของน้ำหนักบรรทุก (TR34)

รูปแบบน้ำหนักบรรทุก	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
น้ำหนักจากขาตั้งชั้นวางของ	1.2
น้ำหนักบรรทุกที่เคลื่อนที่	1.6
อื่นๆ	1.5

## 2.5 การทดสอบพฤติกรรมรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยสำหรับการใช้วิเคราะห์ออกแบบ

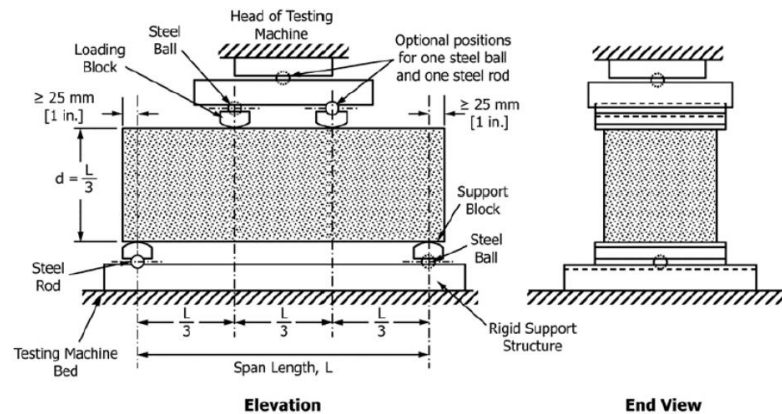
สำหรับการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างรองรับแรงดัดที่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าความเค้นคงค้าง(Residual Stress) จากการทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดัดและการโก่งตัวของดัดคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีชนิดเส้นใย คุณสมบัติเชิงกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย และสัดส่วนผสมเพิ่มของเส้นใยเดียวกันกับที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ

2.5.1 มาตรฐานการทดสอบการดัดสำหรับการออกแบบมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา [15] มาตรฐานการวิเคราะห์ออกแบบของมาตรฐานACI ระบุว่า การใช้ค่าความเค้นคงค้างในการออกแบบจะอ้างอิงจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1609

การทดสอบการดัดตามมาตรฐานASTM C1609นั้นจะทำให้ได้ทราบค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด(First Peak strength) ,กำลังรับความเค้นคงค้าง(Residual Strength) และความเหนียว(Toughness) โดยตัวอย่างคานทดสอบที่ใช้ทดสอบนั้นจะมี2ขนาด เลือกใช้ขนาดใดก็ได้ นั่นคือ คานขนาดหน้าตัด 4 นิ้ว x 4 นิ้ว (100มม.x100มม.) ระยะห่างจุดรองรับ 14 นิ้ว (350มม.) และคานขนาดหน้าตัด6นิ้วx6นิ้ว (150มม.x150มม.) ระยะห่างจุดรองรับ 20 นิ้ว (500มม.) โดยตัวอย่างทดสอบนั้นจะหล่อขึ้นโดยตรงหรือจะตัดจากโครงสร้างชิ้นที่ใหญ่กว่าก็ได้ ให้ใช้การทดสอบดัดงอแบบสี่จุด(กदन้ำหนักกดลงที่ระยะ



L/3จากตำแหน่งรองรับ) ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยให้น้ำหนักทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามการโก่งตัว (Deflection Control)ของคานตัวอย่างตามที่แสดงในตารางที่ 9 และระหว่างทดสอบให้ทำการวัดและบันทึกค่าแรงกดและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบ



รูปที่ 13 การติดตั้งเครื่องและคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย มาตรฐานASTM C1609/C1609M[6]

ตารางที่ 9 อัตราความเร็วในการเพิ่มน้ำหนักทดสอบตามมาตรฐานASTM C1609

ขนาดคานตัวอย่าง	ช่วงการทดสอบ	
	การโก่งตัวน้อยกว่า $L/900$	การโก่งตัวมากกว่า $L/900$
หน้าตัด 100 มม. x 100 มม. คานยาว 350 มม.	0.025-0.075 มม. / นาที	0.05-0.2 มม. / นาที
หน้าตัด 150 มม. x 150 มม. คานยาว 500 มม.	0.035-0.10 มม. / นาที	0.05-0.30 มม. / นาที

หมายเหตุ : สำหรับการทดสอบคานหน้าตัดและขนาดอื่นๆ ให้ทำการทดสอบภายใต้อัตราการเพิ่มน้ำหนักทดสอบให้คานทดสอบถึงสภาวะรับน้ำหนักสูงสุด (First-Peak Load) ภายใน 40 - 100 วินาทีนับตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักทดสอบ และอัตราการเพิ่มน้ำหนักทดสอบช่วงหลังจากที่การโก่งตัวมากกว่า  $L/900$  ต้องไม่เกิน 8 เท่าของอัตราการเพิ่มน้ำหนักในช่วงทดสอบแรก

การพิจารณาค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องให้พิจารณาจากการเขียนแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและค่าการโก่งตัวของคานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 14 โดยความเค้นคงค้างที่สภาวะใดๆ สามารถหาได้จากการคำนวณจากน้ำหนักทดสอบที่ทำให้เกิดการโก่งตัวในสภาวะที่สนใจ ตามสมการที่ 2.47

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.47)$$

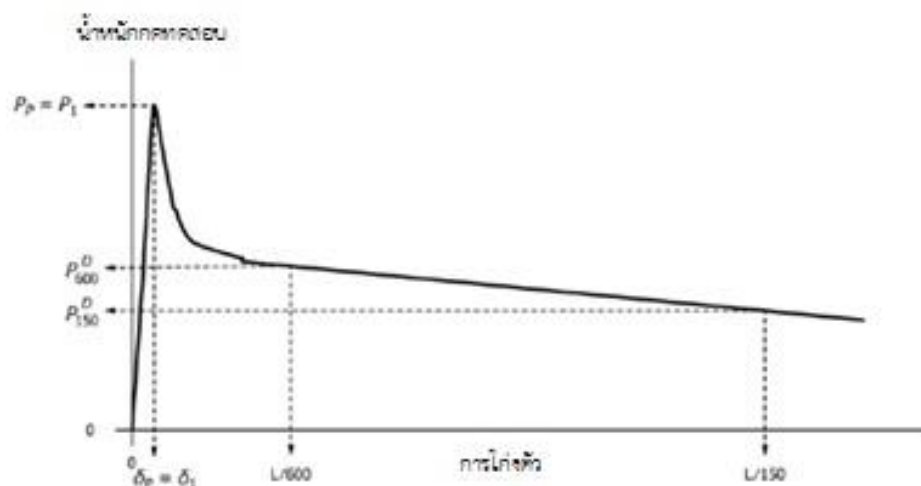
โดยที่  $f$  ความเค้นค้ำค่าที่สนใจ  $P$  น้ำหนักทดสอบ ณ สภาวะที่พิจารณา  
 $L$  ระยะห่างระหว่างจุดรองรับคานทดสอบ  $b$  ความกว้างหน้าตัดคานทดสอบ  
 และ  $d$  ความลึกหน้าตัดคานทดสอบ

สภาวะที่สนใจในการศึกษาการตัดเป็นดังแสดงในรูปที่ 14 อันได้แก่ สภาวะรับน้ำหนักสูงสุด (First-Peak Load) หรือสภาวะที่เป็นจุดแรกที่มีความชันของแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัวมีค่าเป็นศูนย์ ,สภาวะที่ค่าการโก่งตัวของคานเท่ากับ  $L/600$  ,สภาวะที่ค่าการโก่งตัวของคานเท่ากับ  $L/150$

ความเหนียว (Toughness,  $T_{150}^D$ ) สามารถหาได้จากการหาพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์ของน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัวของการทดสอบตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงสภาวะการโก่งตัวเท่ากับ  $L/150$

อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดเทียบเท่า (Equivalent flexural strength ratio,  $R_{T,150}^D$ ) ซึ่งเป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหน้าตัดรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย สามารถหาได้จากการใช้ค่าความเค้นค้ำค่าที่สภาวะรับน้ำหนักสูงสุด (First peak strength) และค่าความเหนียวคำนวณในสมการที่ 2.48

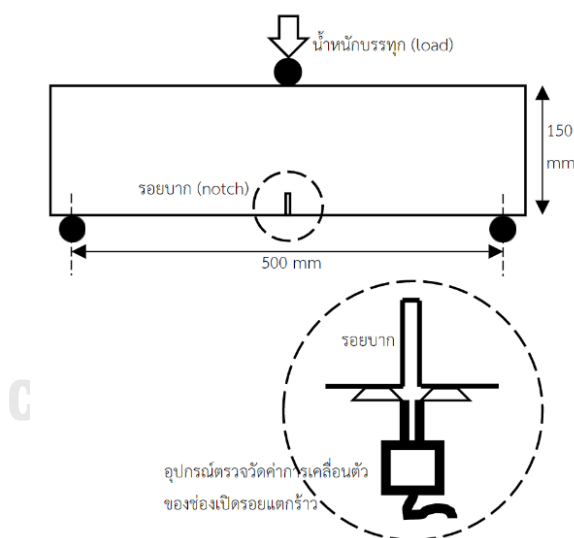
$$R_{T,150}^D = \frac{150 \cdot T_{150}^D}{f_1 \cdot b \cdot d^2} \cdot 100\% \quad (2.48)$$



รูปที่ 14 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัว[15]

### 2.5.2 มาตรฐานการทดสอบการตัดสำหรับการออกแบบมาตรฐานประเทศอังกฤษ [20]

รายงานวิชาการ TR34 ระบุว่ากรวิเคราะห์ห้ออกแบบจะต้องใช้ใช้ค่าความเค้นคงค้างในการออกแบบจะอ้างอิงจากการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 14651 โดยการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเช่นเดียวกับมาตรฐาน ASTM C1609 คือการทดสอบการตัดและทำการวัดและบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัวของคานทดสอบ แต่คานทดสอบที่ใช้จะเป็นคานบากขนาดหน้าตัด 6 นิ้ว x 6 นิ้ว (150 มม. x 150 มม.) ยาว 22 นิ้ว (550 มม.) ระยะห่างจุดรองรับ 20 นิ้ว (500 มม.) และทำการบากที่ท้องคานทดสอบที่ระยะกึ่งกลางคาน กว้างไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตร ลึก 25 มิลลิเมตร ในการทดสอบจะใช้การตัดแบบสามจุด (กดน้ำหนักทดสอบลงที่กึ่งกลางความยาวของคานทดสอบ) และทำการติดตั้งเครื่องวัดน้ำหนักทดสอบ (Load cell) เครื่องวัดความกว้างรอยร้าวดิจิทัล (Digital Clip on Gages) สำหรับวัดความกว้างรอยบากที่ท้องคานทดสอบหรือเทียบเท่าการวัดความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้น (Crack mouth opening displacement, CMOD) และเครื่องวัดการเคลื่อนตัว (Linear variable differential transformer, LVDT) ใช้สำหรับวัดการโก่งตัว ดังที่แสดงในรูปที่ 15



#### รูปที่ 15 การตั้งเครื่องและตัวอย่างคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย มาตรฐาน EN 14651

การให้น้ำหนักทดสอบให้ทำการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามการขยายตัวเพิ่มขึ้นของรอยร้าวความกว้างรอยบากที่ท้องคาน (CMOD control) และระหว่างการทดสอบให้ทำการวัดและบันทึกค่าน้ำหนักทดสอบและความกว้างรอยบาก

การพิจารณาค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องให้พิจารณาจากการเขียนแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและค่าความกว้างรอยบากของคานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 16

ความเค้นค้ำที่สภาวะใดๆสามารถหาได้จากการคำนวณจากน้ำหนักทดสอบที่ทำให้เกิดการโก่งตัวในสภาวะที่สนใจ ตามสมการที่ 2.49

$$f_R = \frac{3F_R L}{2bh_{sp}^2} \quad (2.49)$$

โดยที่  $f_R$  ความเค้นค้ำค่า ณ สภาวะที่สนใจ

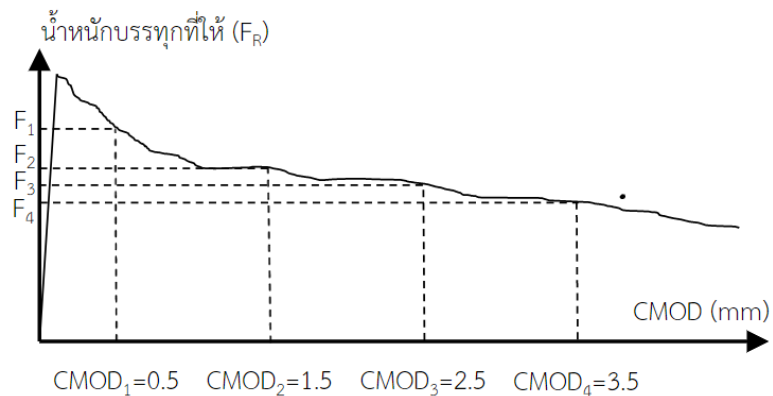
$F_R$  น้ำหนักทดสอบ ณ สภาวะที่พิจารณา

$L$  ระยะห่างระหว่างจุดรองรับคานทดสอบ(500มม.)

$b$  ความกว้างหน้าตัดคานทดสอบ (150มม.)

และ  $h_{sp}$  ความลึกของหน้าตัดจนถึงปลายรอยบาก (125มม.)

สภาวะที่สนใจในการศึกษาการตัดเป็นดังแสดงในรูปที่ 16 อันได้แก่ สภาวะที่ทำให้เกิดค่า  $CMOD_1$ ,  $CMOD_2$ ,  $CMOD_3$  และ  $CMOD_4$  หรือความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 16 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและความกว้างรอยร้าวทดสอบ(CMOD)

### บทที่ 3 ระเบียบวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, มวลรวม ,น้ำ สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษ และเส้นใยประเภทต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย (เส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) 2 แบบที่มีกำลังรับแรงดึงประลัยแตกต่างกัน) โดยคุณสมบัติของเส้นใยแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของเส้นใย

เส้นใย	รูปแบบผิวเส้นใย	ความยาวเส้นใย (ม.ม.)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	ความถ่วงจำเพาะ
PP52	Embossing	56	520-550	4,200-5,500	0.92
PP64	Embossing	58	640	>10,000	0.91

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.2.1 เครื่องผสมคอนกรีตเสริมเส้นใย

เครื่องผสมคอนกรีตขนาดความจุ 50 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 เครื่องผสมคอนกรีตขนาดความจุ 50 ลิตร

### 3.2.2 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบแรงดัด

ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบหล่อขนาดหน้าตัดกว้าง 150 มิลลิเมตร ลึก 150 มิลลิเมตร และมีความยาวความ 550 มิลลิเมตร เพื่อหล่อคานสำหรับทดสอบแรงดัด คานคอนกรีตเสริมเส้นใยตามมาตรฐาน EN 14651 (ให้มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 500 มิลลิเมตร)

### 3.2.3 เครื่องทดสอบแรงดัดคาน

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องทดสอบ AMSLER 20 TON ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 เครื่องทดสอบแรงกดดัด AMSLER 20 TON

### 3.2.4 เครื่องวัดความกว้างแบบดิจิตอล (Digital Clip-on Gages)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความกว้างแบบดิจิตอล ในการวัดความกว้างรอยร้าว (Crack Opening Displacement: COD) ที่ห้องคานทดสอบขณะทดสอบแรงดัด

### 3.2.5 เครื่องวัดการเคลื่อนตัว (Linear variable differential transformer, LVDT)

### 3.2.6 เครื่องแปลงผลและบันทึกค่าทดสอบ (Data Logger)

ในการทดสอบนี้ ใช้เครื่อง Data Logger ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ และทำการแปลงผลเพื่อบันทึกค่าตามที่กำหนด

### 3.3 ตัวแปรในการศึกษา

#### 3.3.1 กำลังอัดคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคอนกรีต และคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันต่างกัน 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ 1 มีกำลังอัด 28 เมกะปาสคาล และกลุ่มที่ 2 มีกำลังอัด 32 เมกะปาสคาล โดยเป็นกำลังอัดคอนกรีตที่นิยมใช้ในการออกแบบและก่อสร้างพื้นวางบนดินในประเทศ

#### 3.3.2 กำลังรับแรงดึงประลัยของเส้นใย (Tensile Strength of Fiber)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มีกำลังรับแรงดึงประลัย (Tensile Strength) แตกต่างกัน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้เส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงประลัย 520-550 เมกะปาสคาล และกลุ่มที่ 2 ใช้เส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงประลัย 640 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นกลุ่มของเส้นใยที่มีการผลิตและวางจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด

#### 3.3.3 ปริมาณเส้นใย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปริมาณเส้นใยผสมลงในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม คือ 0, 2 และ 3 กิโลกรัมต่อปริมาณคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 0, 0.22 และ 0.33 โดยปริมาตรตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีต่อพฤติกรรมการตัดของโครงสร้าง

ดังนั้นสามารถแจกแจงตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ 10 แบบดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ตัวแปรในการศึกษา

ชื่อกลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีต (MPa)	กำลังรับแรงดึงของเส้นใย (MPa)	ปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ (กก/ลบ.ม.)
280-NF	28	-	0
320-NF	32	-	0
280-PP52-2	28	520	2
280-PP52-3	28	520	3
280-PP64-2	28	640	2
280-PP64-3	28	640	3
320-PP52-2	32	520	2
320-PP52-3	32	520	3
320-PP64-2	32	640	2
320-PP64-3	32	640	3

### 3.4 กระบวนการศึกษา

#### 3.4.1 การทดสอบพฤติกรรมการตัดคานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเส้นใย

1. ผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมให้มีคุณสมบัติต่างๆ ตามการแบ่งกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษาดังที่แสดงในตารางที่ 11 จากนั้นทำการเทคอนกรีตที่ผสมแล้วลงในแบบหล่อตัวอย่าง
2. เมื่อคานคอนกรีตตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ให้นำคานตัวอย่างคอนกรีตทำการบากที่ท้องคาน ให้มีความกว้างรอยบาก 5 มิลลิเมตร และมีความลึกรอยบาก 25 มิลลิเมตร (อ้างอิงมาตรฐาน BS EN 14651) ดังแสดงในรูปที่ 15
3. นำตัวอย่างคานบากขึ้นติดตั้งเครื่องวัดความกว้างที่ปากรอยบากที่ท้องคานตัวอย่าง และทำการวางคานตัวอย่างบนจตุรรองรับให้มีระยะจตุรรองรับ 500 มิลลิเมตร
4. ทำการตั้งค่าเครื่องบันทึกค่าทดสอบให้ทำการเก็บค่าแรงกด การเคลื่อนตัวของคาน และความกว้างช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (Crack mouth Opening Displacement: CMOD) และเริ่มทำการทดสอบกดแรงลงบนคานตัวอย่างโดยให้อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกดคงที่ตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าว (CMOD Control)
5. นำค่าแรงที่กดตัวอย่างและค่าความกว้างช่องเปิดที่ปากรอยแตกร้าวที่บันทึกได้มาเขียนแผนภูมิความสัมพันธ์เพื่อให้เห็นอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อผลการทดสอบ

#### 3.4.2 การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดิน

ในการศึกษาส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบรายละเอียดการพิจารณาในส่วนต่างๆ ของมาตรฐานการออกแบบพื้นวางบนดินจากคอนกรีตเสริมเส้นใยตามมาตรฐาน ACI (ACI 360R) และรายงานเชิงวิชาการ TR34 เพื่อวิเคราะห์ความความคุ้มค่าต่องบประมาณของการเลือกใช้งานมาตรฐานที่ใช้ประกอบการออกแบบ โดยอ้างอิงอัตราส่วนของแรงกดสูงสุดที่พื้นรองรับได้ในแต่ละกรณีจากที่คำนวณได้จากแนวทางการออกแบบตามรายงานเชิงวิชาการ TR34 ต่อค่าที่คำนวณได้จากการใช้มาตรฐานการออกแบบ ACI เป็นหลัก

#### 3.4.3 ศึกษาและรวบรวมแนวทางการประเมินค่ากำลังรับแรงของดิน

ผู้ศึกษาจะทำการรวบรวมค่าการทดสอบดินจากงานวิจัยในอดีต โดยทำการแปรผลจากค่าทดสอบ CBR ให้เป็นค่าโดมดูลัสต้านทานแรงกดของดินกราฟเส้นสำหรับการประมาณค่ารูปที่ 6 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ออกแบบพื้นวางบนดินภายในพื้นที่ในประเทศ



#### 3.4.4 ทดลองออกแบบโดยประยุกต์ใช้ข้อมูลการศึกษา

ผู้ศึกษาจะทำการทดลองออกแบบพื้นวางบนดินโดยใช้ข้อมูลค่ากำลังรับแรงดัดที่จำเป็นต่อการออกแบบจากการแปรผลตัวแทนค่าตามหัวข้อการทดสอบของแต่ละสัดส่วนผสม และข้อมูลค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินที่แปรผลจากการรวบรวมค่าทดสอบ CBR จากงานวิจัยในอดีต โดยอ้างอิงคุณลักษณะทางโครงสร้างของพื้นวางบนดินที่ใช้นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศ จากนั้นทำการสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสต้านการกดของดิน กับแรงกดสูงสุดที่พื้นรองรับได้ของแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อให้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบการเลือกใช้งานสัดส่วนผสมที่เหมาะสมต่อความต้องการของผู้ออกแบบต่อไป



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดลอง

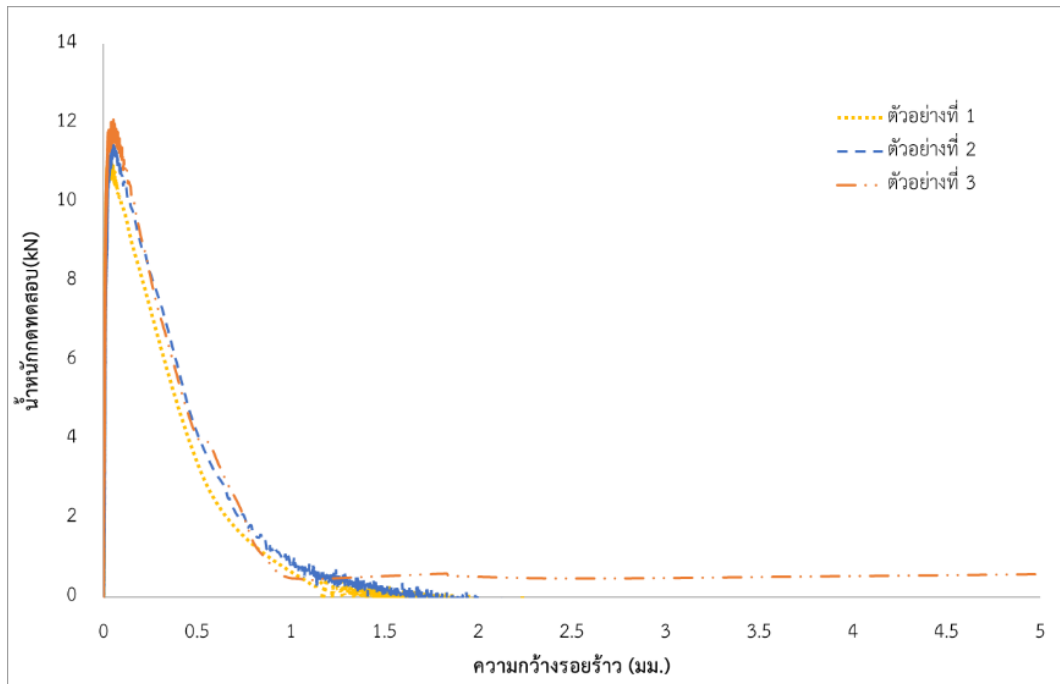
ในบทความนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน และนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของการเลือกใช้มาตรฐานการออกแบบพื้นวางบินดินที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนในสภาวะใช้งานต่างๆ

#### 4.1 อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใย

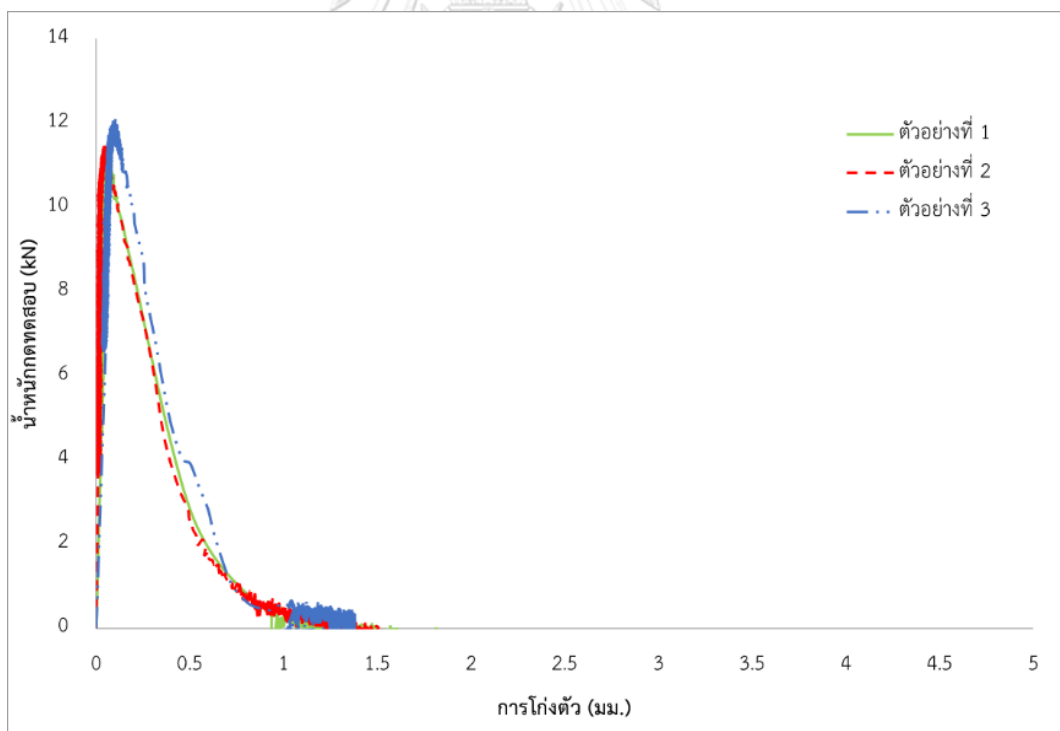
ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยด้วยการทดสอบคานตัวอย่างขนาดหน้าตัด กว้าง 150 มม. ลึก 150 มม. ระยะติดตั้งจุดรองรับ 500 มม. บากที่ห้องคานบริเวณกลางความยาวช่วงทดสอบกว้าง 5 มม. ลึก 25 มม. ทดสอบคานในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง(ตัวแปรสัดส่วนผสมแต่ละรูปแบบ)กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง โดยทดสอบการดัดตามข้อกำหนดของมาตรฐาน BS EN 14651 ระหว่างการดัดผู้ทดสอบทำการวัดค่าแรงกดทดสอบ ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางความยาวคาน และค่าความกว้างรอยร้าวที่ตั้งที่แสดงในรูปที่ 19 ผลการทดสอบและค่าความสัมพันธ์จากการทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 20-39



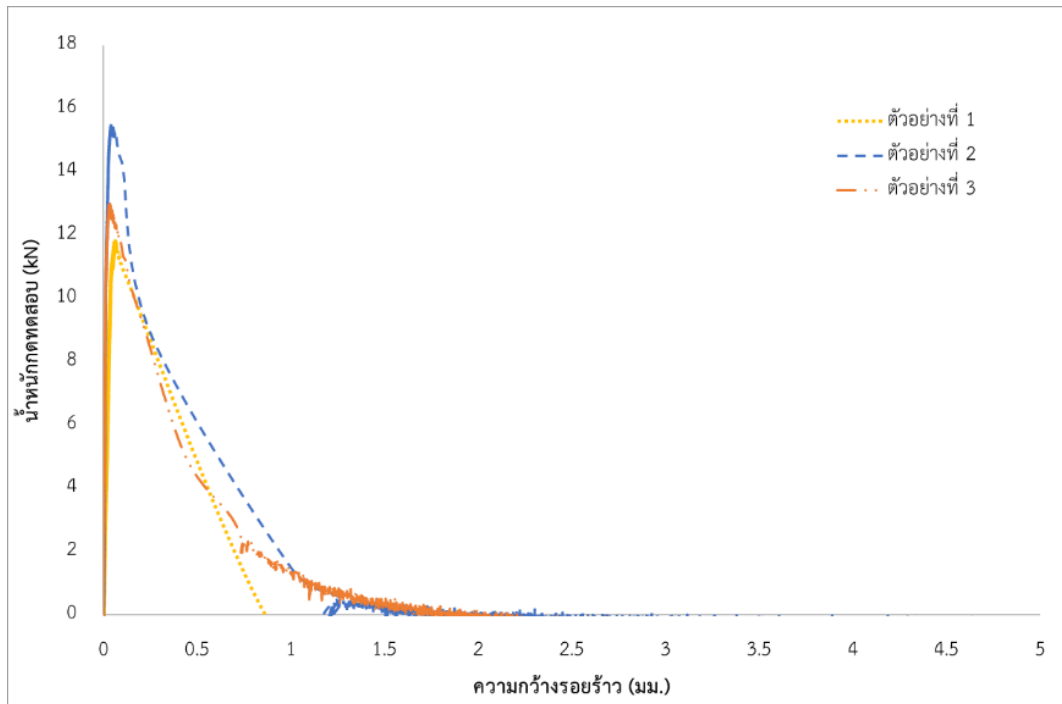
รูปที่ 19 ภาพการติดตั้งและการเตรียมทดสอบคานตัวอย่าง



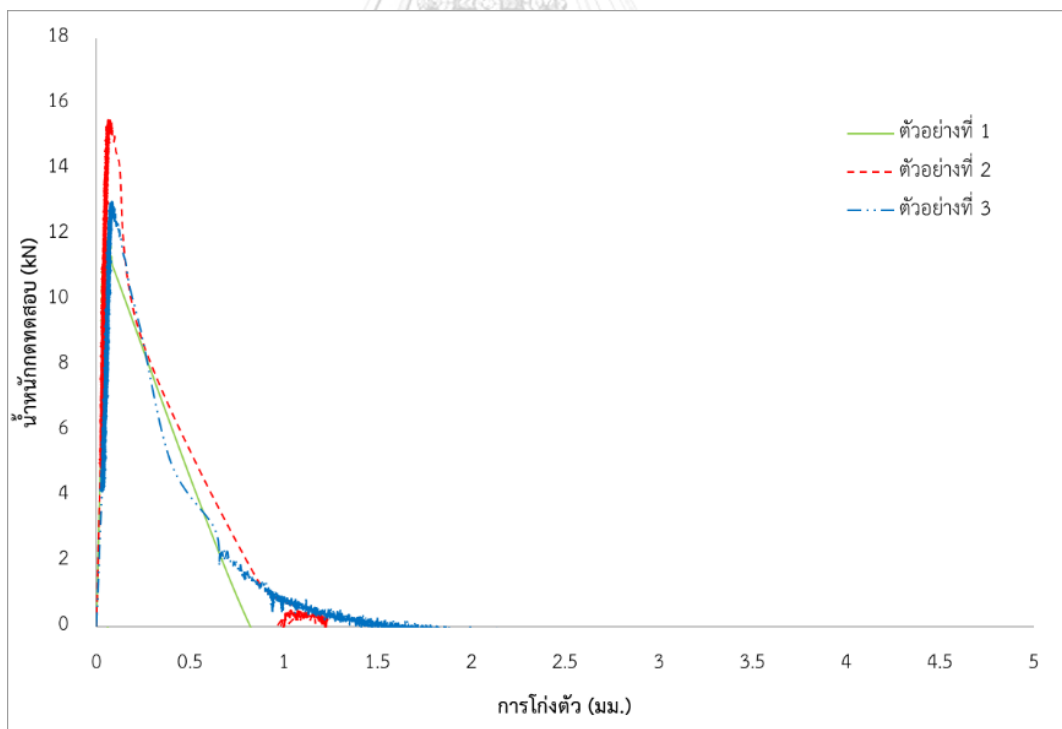
รูปที่ 20 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-NF



รูปที่ 21 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 280-NF



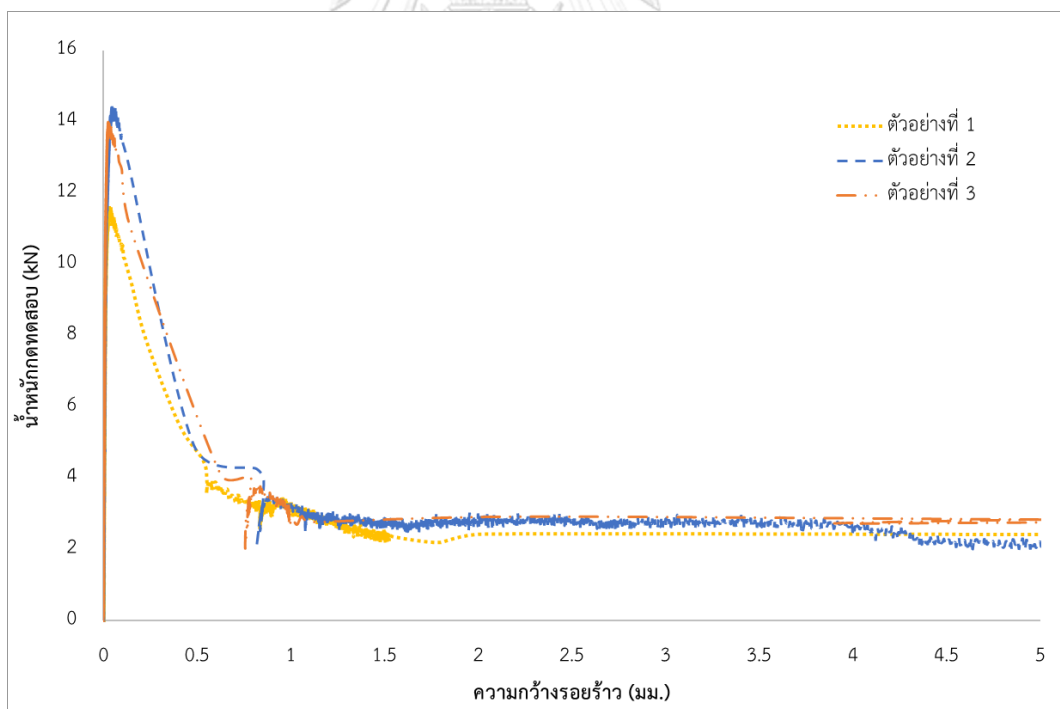
รูปที่ 22 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 320-NF



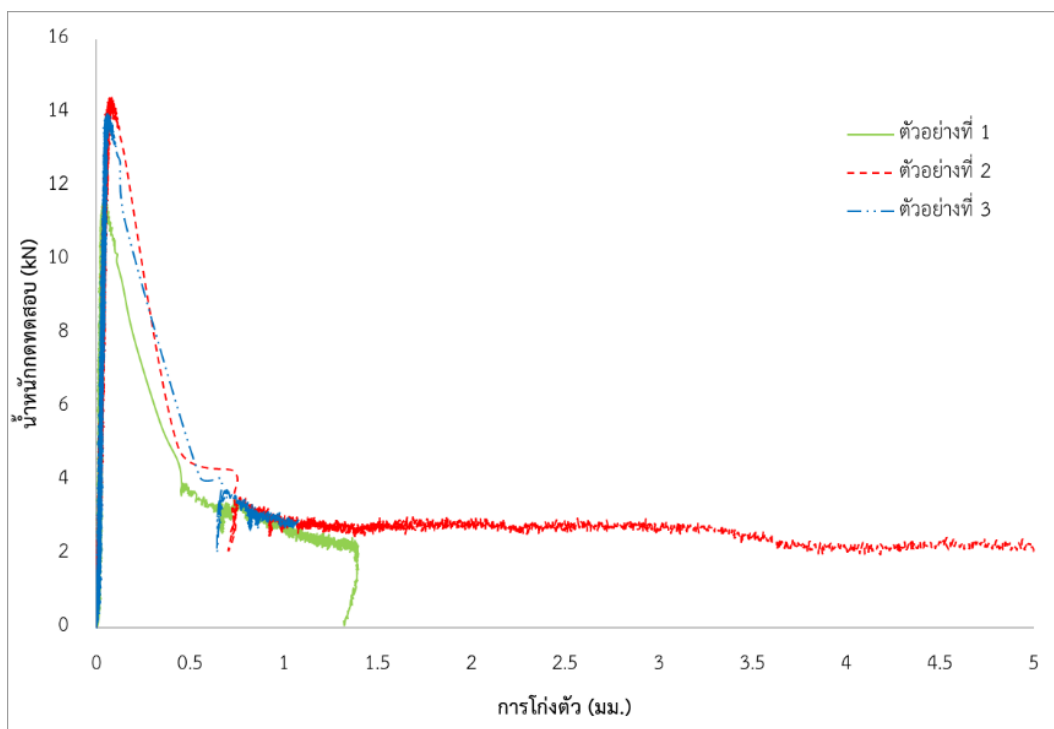
รูปที่ 23 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 320-NF

ผลการทดสอบการตัดในกลุ่มคานตัวอย่างที่ไม่มีการผสมเส้นใยสังเคราะห์เพิ่มนั้นคานจะมีพฤติกรรมเปราะ รองรับแรงตัดได้เพียงเล็กน้อย เมื่อเกิดรอยแตกร้าวจะทำให้คานไม่สามารถต้านทานการตัดได้ต่อ เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว และเส้นความสัมพันธ์ของแรงและความกว้างรอยร้าวจึงมีค่าหักลงมาจนถึงจุดที่แรงกดทดสอบมีค่าเท่ากับศูนย์ทันทีหลังคานรองรับน้ำหนักกดสูงสุด ดังที่แสดงในรูปที่ 20-23 แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดยังคงเก็บค่าต่อเนื่องอยู่จึงทำให้เมื่อคานหักลงมาและไม่สามารถรองรับแรงได้แล้วเส้นความสัมพันธ์ยังคงลากต่อเนื่องมาหาจุดที่แรงกดทดสอบมีค่าเป็นศูนย์

สำหรับผลการทดสอบการตัดของคานตัวอย่างที่มีการผสมเส้นใยสังเคราะห์เข้าไปนั้นจะพบว่าหลังจากที่ทดสอบน้ำหนักกดจนถึงค่าสูงสุดที่คานรองรับได้แล้วนั้นคานจะเกิดการฉีกออกเล็กน้อยสังเกตได้จากค่าความกว้างรอยร้าว (CMOD) ที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงต้านแรงกดได้อยู่ซึ่งมีค่าลดลงจากจุดสูงสุดและยังคงตามแรงกดค่านั้นได้อยู่เป็นระยะเวลาหนึ่ง ดังที่แสดงในรูปที่ 24-39 ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมที่อธิบายถึงถึงความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยได้เป็นอย่างดี

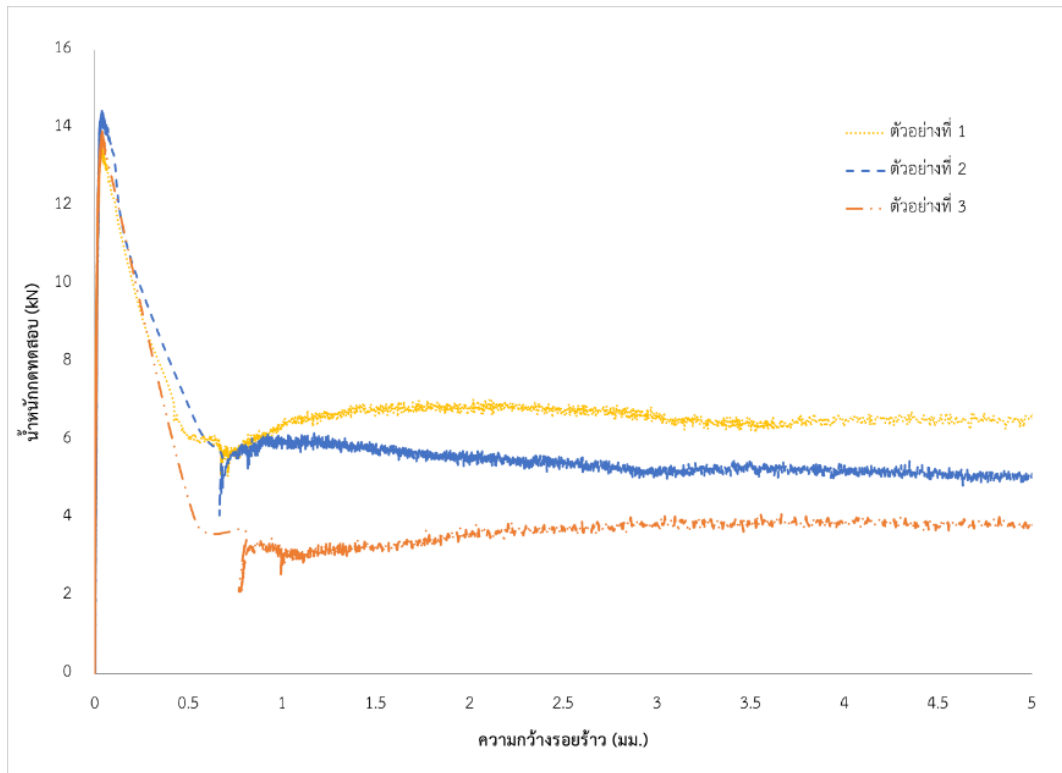


รูปที่ 24 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-2

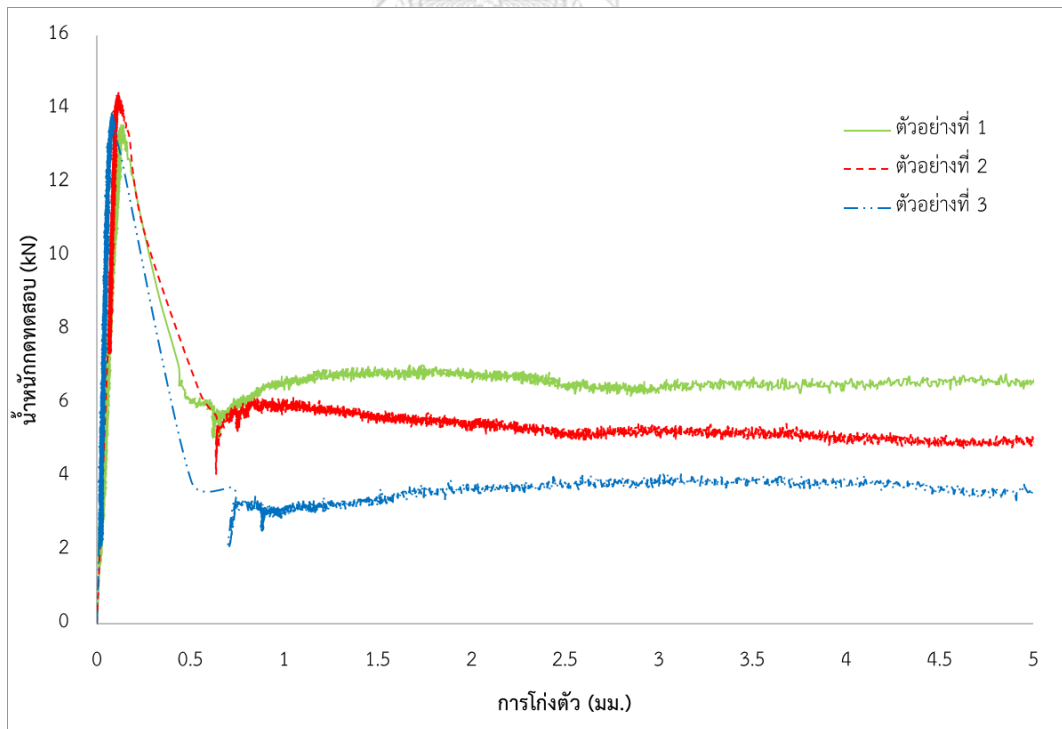


รูปที่ 25 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-2

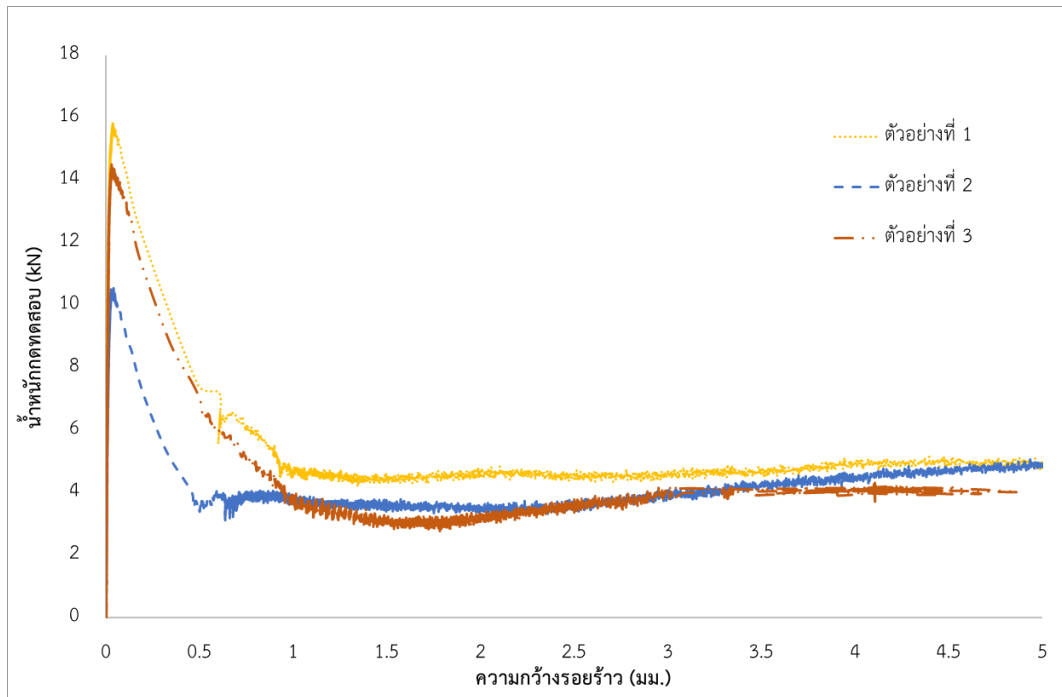
หากพิจารณาผลการทดสอบของคานตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ในบางกลุ่มตัวอย่างจะพบว่าในกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเดียวกันในบางกลุ่มนั้นจะมีพฤติกรรมหรือความสามารถในการรองรับแรงดัดหลังการแตกร้าวของคานที่ไม่ใกล้เคียงกัน ดังเช่นผลการทดสอบการดัดของคานตัวอย่างกลุ่ม 280-PP52-3 (รูปที่ 26 และ 27), 320-PP52-3 (รูปที่ 34 และ 35), และ 320-PP64-3 (รูปที่ 38 และ 39) ที่จะเห็นได้ว่าเส้นความสัมพันธ์ของแรงกดทดสอบกับการโก่งตัวและความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นจะมีค่าการต้านแรงดัดหลังการแตกร้าวที่ไม่เท่ากัน มีทั้งในแบบที่ทั้ง 3 ตัวอย่างให้ค่าต้านแรงกดที่ไม่ใกล้เคียงกันเลย หรือแบบที่บางมีเพียงบางตัวอย่างเท่านั้นที่มีค่าการต้านแรงกดไม่เท่ากับตัวอย่างอื่นอีก 2 ตัวอย่าง ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของเส้นใยสังเคราะห์ที่ใส่เพิ่ม หากเส้นใยสามารถกระจายตัวในเนื้อคอนกรีตได้อย่างสม่ำเสมอจะทำให้ตัวอย่างมีพฤติกรรมการดัดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากหน้าตัดรับแรงมีคุณสมบัติและปริมาณวัสดุต้านแรงดัดที่เหมือนกัน แต่หากเส้นใยกระจายได้ไม่สม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตจะทำให้หน้าตัดอาจทำให้บางตัวอย่างมีปริมาณหน้าตัดเส้นใยในหน้าตัดรับแรงดัดมาก บางตัวอย่างอาจมีหน้าปริมาณตัดเส้นใยในหน้าตัดรับแรงดัดน้อยจึงทำให้ความสามารถด้านการดัดของแต่ละตัวอย่างไม่เท่ากัน



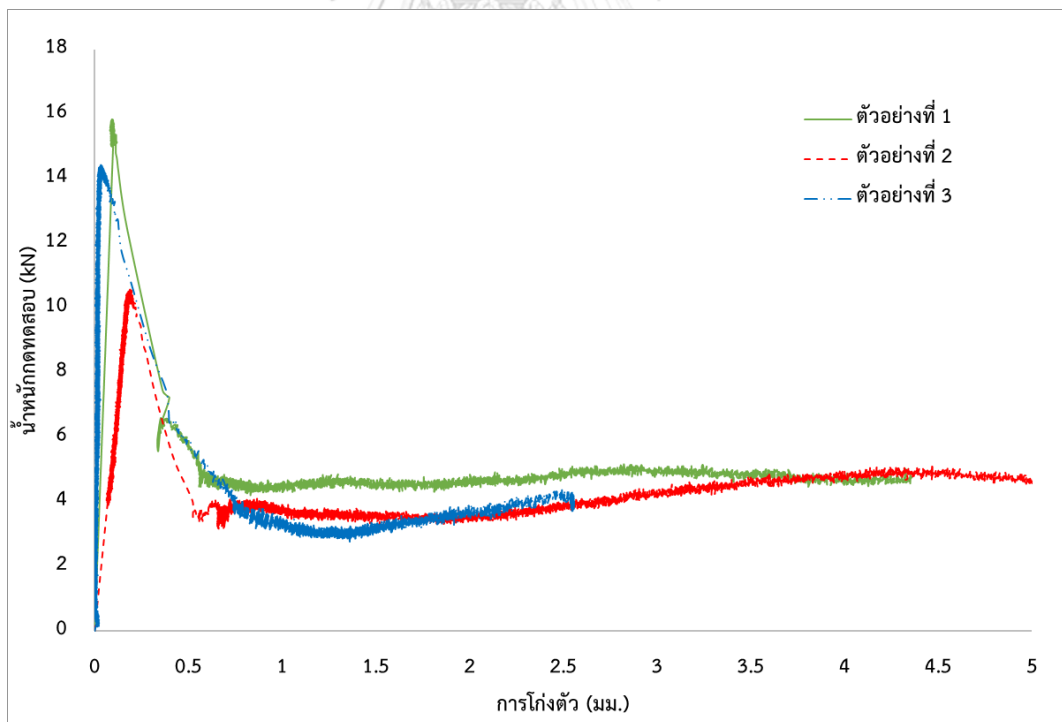
รูปที่ 26 แผนภูมิแสดงน้ำหนักทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-3



รูปที่ 27 แผนภูมิแสดงน้ำหนักทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-3



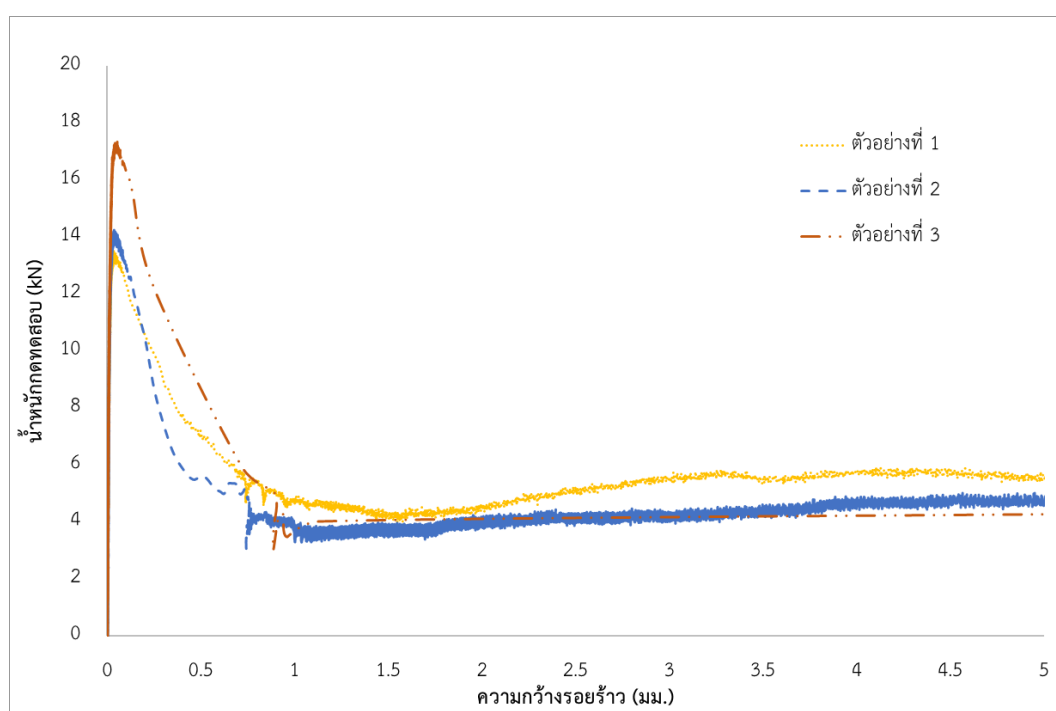
รูปที่ 28 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกักตดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-2



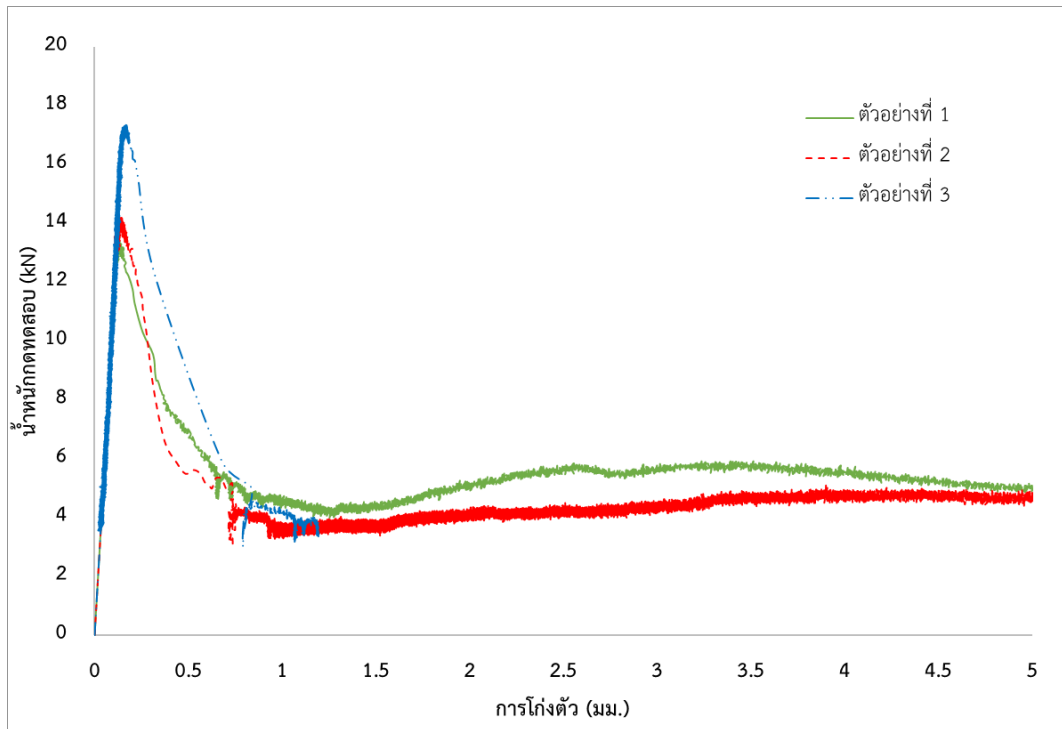
รูปที่ 29 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกักตดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-2



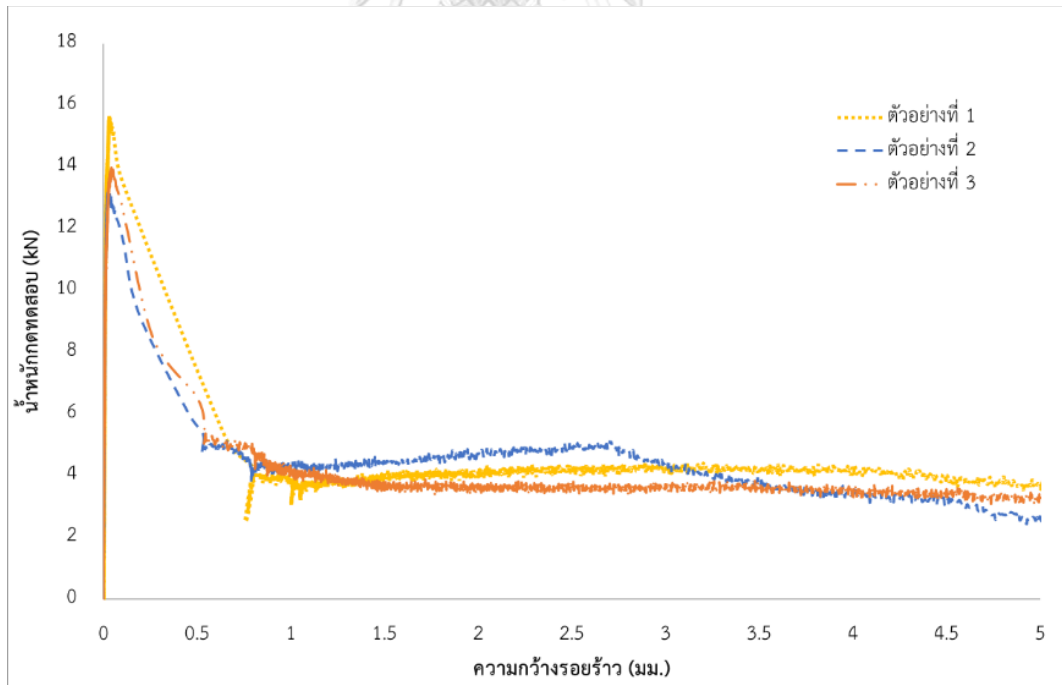
สำหรับตัวอย่างที่มีพฤติกรรมหลังการแตกร้าวที่มีเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวและความกว้างรอยร้าววางตัวยาวไปไม่ถึงค่าขอบเขตสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ เช่น ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1 ของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-2 (รูปที่ 23 และ 24), ตัวอย่างที่ 3 ของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-2 (รูปที่ 27 และ 28), ตัวอย่างที่ 3 ของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-3 (รูปที่ 29 และ 30) และ ตัวอย่างที่ 3 ของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64-2 (รูปที่ 35 และ 36) คาดว่าเกิดจากเส้นใยสังเคราะห์หลุดออกจากเนื้อคอนกรีตก่อนที่แรงดัดที่จะพัฒนาไปจนถึงจุดที่ทำให้แรงดึงในเส้นใยมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่ารับแรงดึงประลัยของเส้นใย



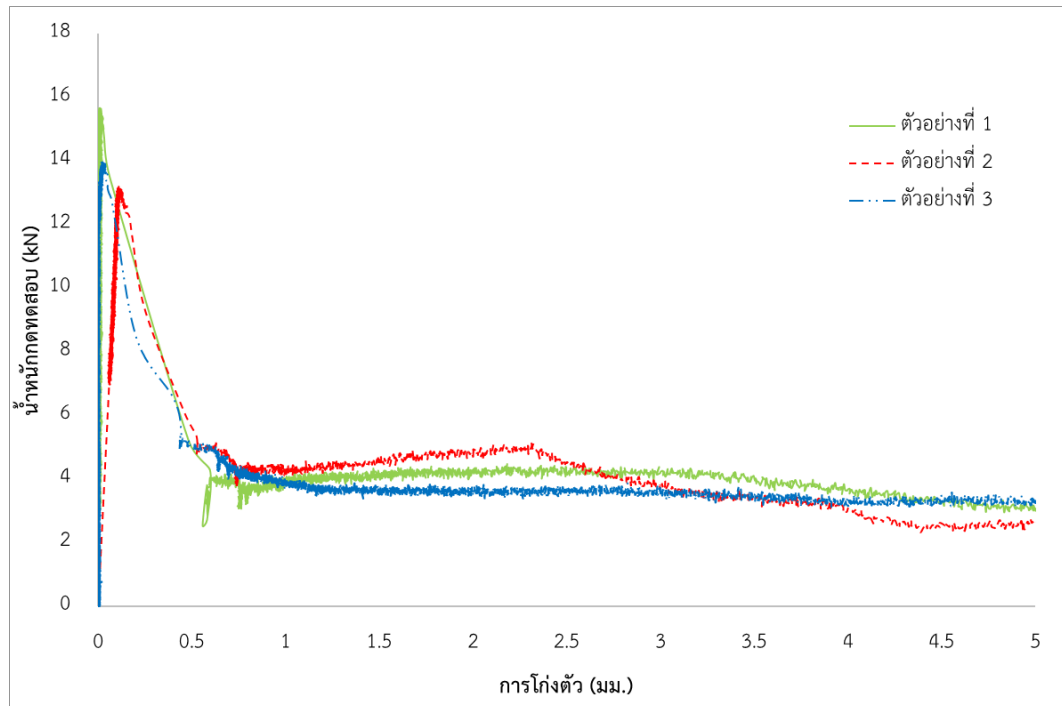
รูปที่ 30 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-3



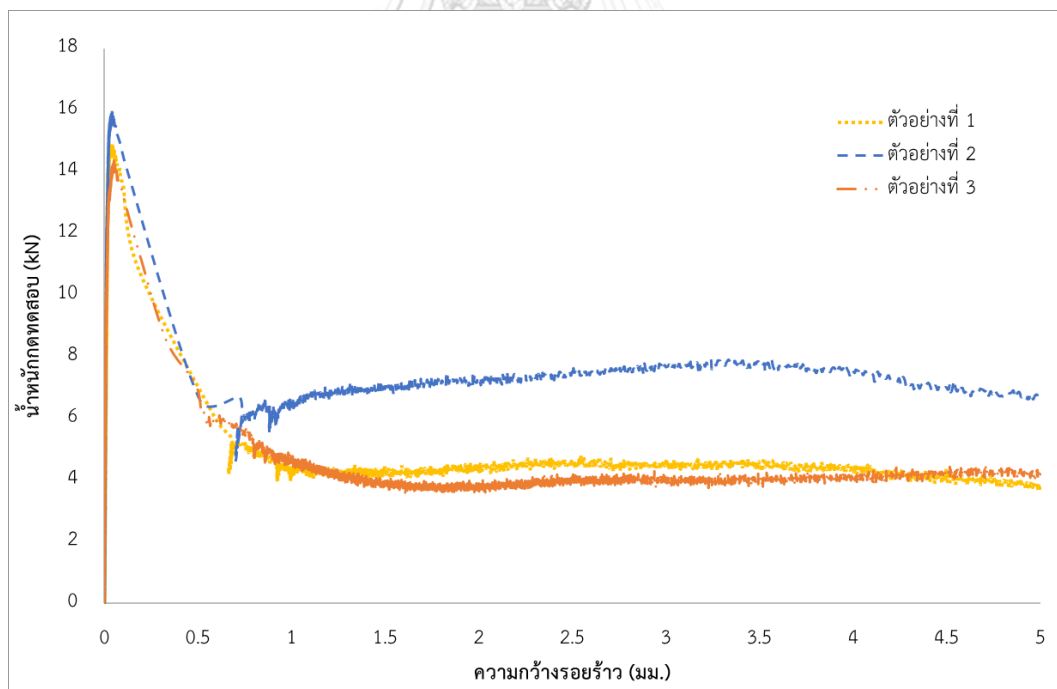
รูปที่ 31 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-3



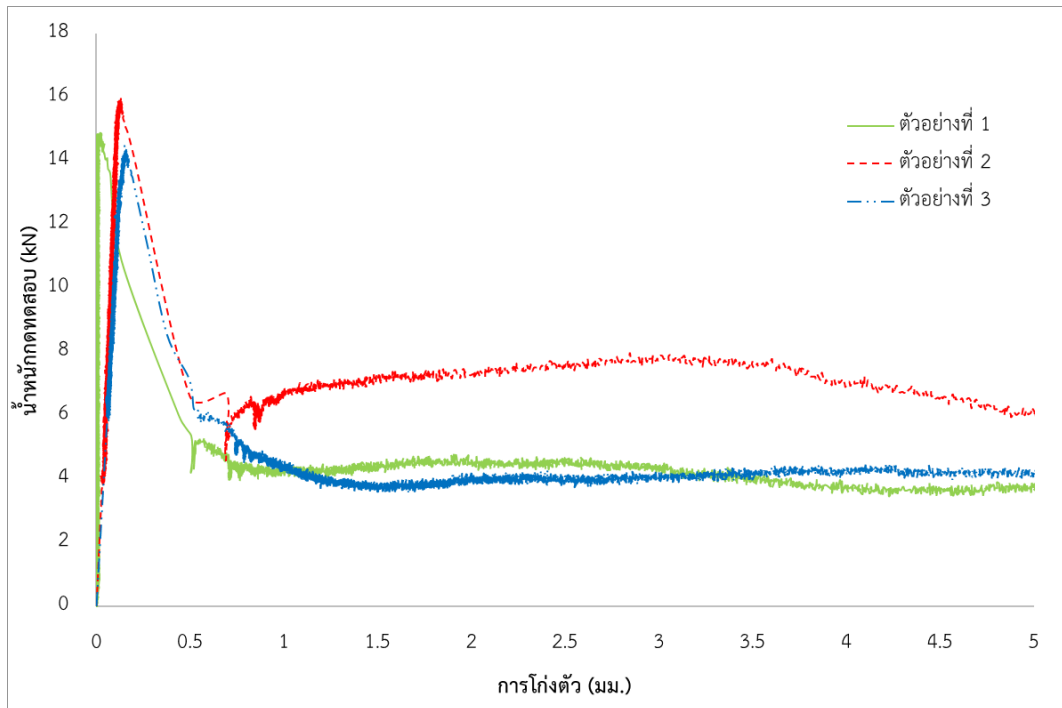
รูปที่ 32 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52-2



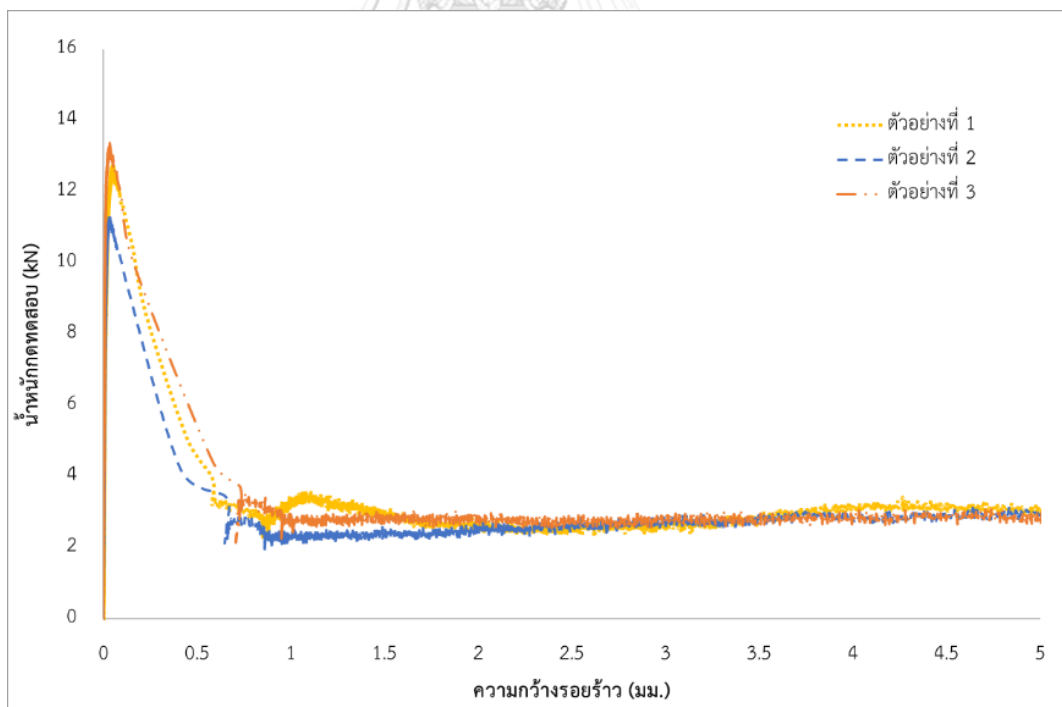
รูปที่ 33 แผนภูมิแสดงน้ำหนักดูดซับและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52-2



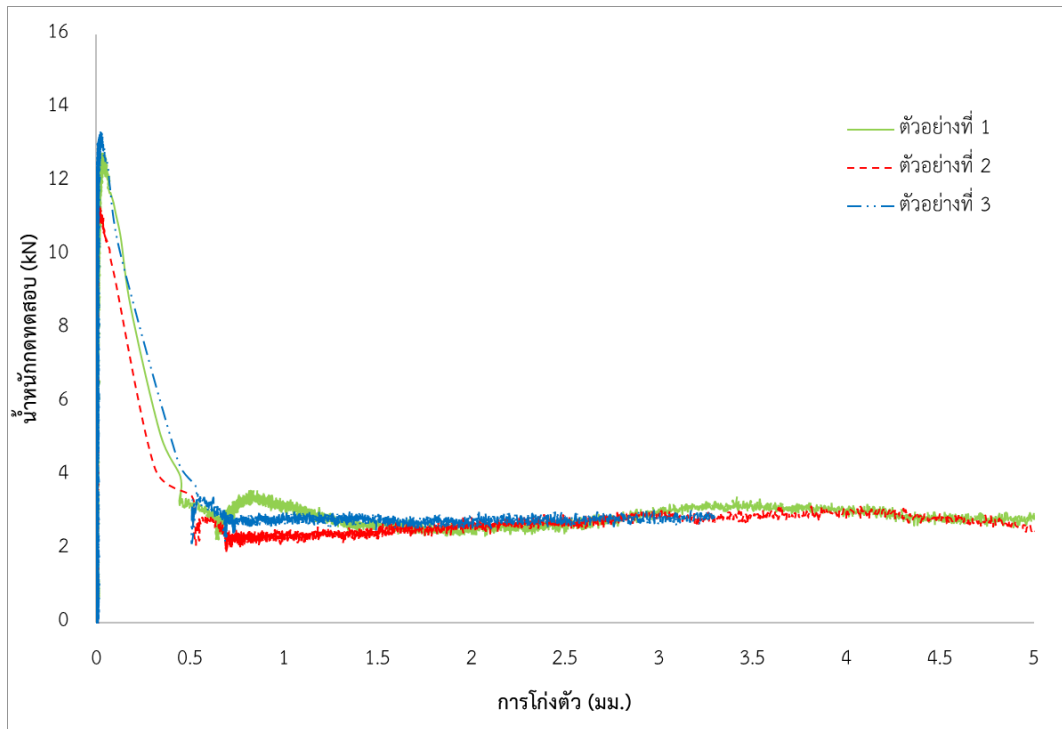
รูปที่ 34 แผนภูมิแสดงน้ำหนักดูดซับและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52-3



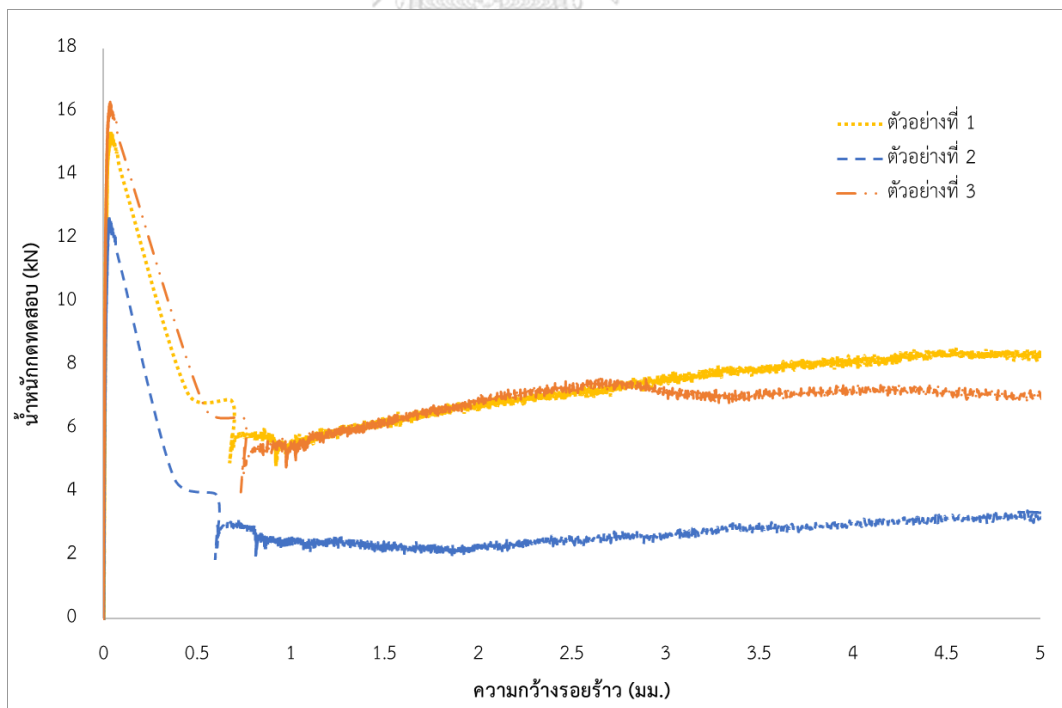
รูปที่ 35 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52-3



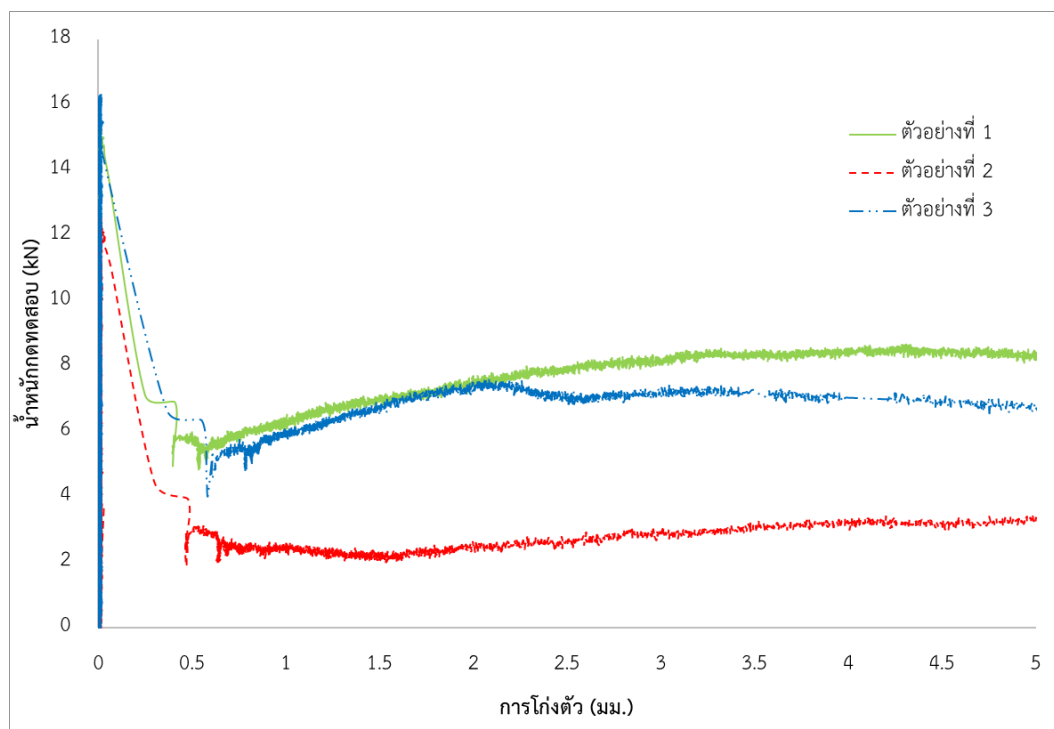
รูปที่ 36 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64-2



รูปที่ 37 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64-2



รูปที่ 38 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและความกว้างรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64-3



รูปที่ 39 แผนภูมิแสดงน้ำหนักกดทดสอบและการโก่งตัวของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64-3

การแปลผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าตัวแทนของการทดสอบในแต่ละกลุ่มสำหรับการเปรียบเทียบและศึกษา ทำโดยเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างในกลุ่ม สำหรับกรณีที่ค่ามีความใกล้เคียงกัน หรือมีความแตกต่างกันในทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังเช่น กลุ่มตัวอย่าง 280-NF, 320-NF, 280-PP52-2, 280-PP64-2, 280-PP64-3, 320-PP52-2 และ 320-PP64-2 ที่ค่าผลการทดสอบของตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52-3 ที่ค่าผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างแตกต่างกันไม่มีค่าใดใกล้เคียงกันเลย

แต่สำหรับกรณีที่ค่าการทดสอบของตัวอย่างอย่างน้อย 2 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าของตัวอย่างหนึ่งมีค่าที่แตกต่างออกไปมากผู้ศึกษาจะทำการเฉลี่ยค่าทดสอบเพียง 2 ตัวอย่างที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังเช่นกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52-3 และ 320-PP64-3 ที่มีตัวอย่างที่ 2 มีค่าทดสอบแตกต่างจากค่าการทดสอบของตัวอย่างที่ 1 และ 3

สำหรับกรณีที่เส้นความสัมพันธ์ของน้ำหนักกดทดสอบกับการโก่งตัวหรือความกว้างรอยร้าววางตัวไม่ถึงขอบเขตที่พิจารณาจะทำการเฉลี่ยค่าการทดสอบจากทั้ง 3 ตัวอย่าง เฉพาะส่วนที่มีค่าการทดสอบนั้น และส่วนที่ไม่มีค่าการทดสอบจะทำการเฉลี่ยค่าจากค่าทดสอบของตัวอย่างที่เหลืออยู่ ดังเช่นตัวอย่างที่ 280-PP52-2 (ตัวอย่างที่ 1) และ 280-PP64-3 (ตัวอย่างที่ 3) ที่การทดสอบสิ้นสุดก่อนที่แรงกดทดสอบจะทำให้รอยร้าวมีความกว้างถึง 1.5 มม. (CMOD2) ค่าผลการทดสอบที่เฉลี่ยจะทำการเฉลี่ยผลจาก 3 ตัวอย่างตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงค่าที่แรงทดสอบทำให้

ความกว้างรอยร้าวมีค่าเท่ากับ 0.5 มม. (CMOD1) หลังจากนั้นจะทำการเฉลี่ยค่าการทดสอบสนใจจากการทดสอบตัวอย่างที่ 2 และ 3 เท่านั้น สำหรับกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64-2 และ 320-PP64-2 ตัวอย่างที่ 3 การทดสอบสิ้นสุดก่อนที่แรงกดทดสอบจะทำให้ความกว้างรอยร้าวมีค่าเท่ากับ 3.5 มม. (CMOD4) เฉลี่ยค่าการทดสอบหลังจากนั้น (ค่า CMOD4) จึงเฉลี่ยจากค่าการทดสอบของตัวอย่างที่ 1 และ 3

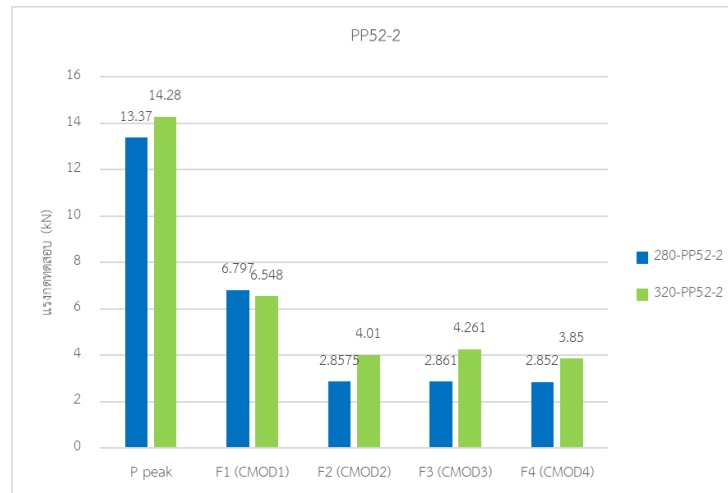
ตารางที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักทดสอบที่สภาวะที่สนใจในการศึกษา

กลุ่มตัวอย่าง	ผลเฉลี่ยการทดสอบ				
	$P_p$ (kN)	$F_1$ (kN)	$F_2$ (kN)	$F_3$ (kN)	$F_4$ (kN)
280-NF	11.54	-	-	-	-
320-NF	13.46	-	-	-	-
280-PP52-2	13.37	6.797	2.858	2.861	2.852
280-PP52-3	13.99	5.884	5.265	5.322	5.193
280-PP64-2	13.64	5.939	3.679	3.983	4.406
280-PP64-3	15.03	7.140	3.963	4.660	4.888
320-PP52-2	14.28	6.548	4.010	4.261	3.850
320-PP52-3	14.68	6.916	4.116	4.321	4.248
320-PP64-2	12.51	5.519	2.729	2.661	2.870
320-PP64-3	15.96	7.262	6.143	7.191	7.456

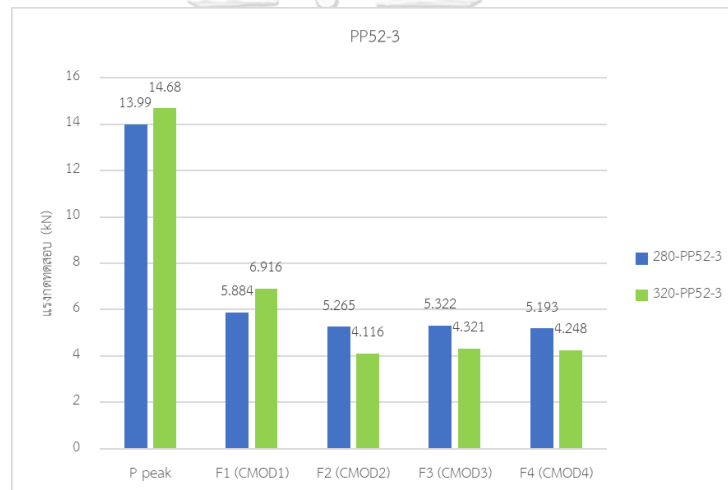
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.1.1 อิทธิพลของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

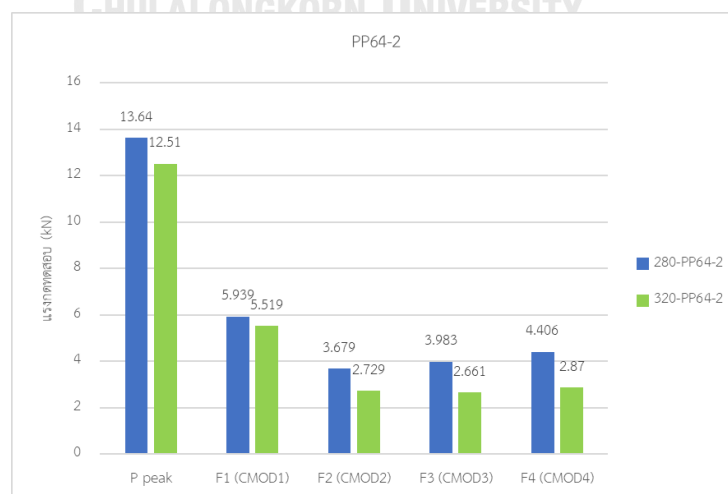
เมื่อพิจารณากลุ่มตัวอย่างที่มีการควบคุมตัวแปรด้านกำลังรับแรงดึงประลัยของเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของคานคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีเปรียบเทียบของกลุ่มตัวอย่าง PP64-2 แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมหลังการแตกร้าวของคานนั้นจะพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของคานตัวอย่างที่กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น นั้นมีค่าที่ลดลงในการเปรียบเทียบในกลุ่ม PP52-3 และกลุ่ม PP64-2 ดังแสดงในรูปที่ 41 และ 42 ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นในกลุ่มการเปรียบเทียบในกลุ่ม PP52-2 และ PP64-3 ดังแสดงในรูปที่ 40 และ 43 ตามลำดับ



รูปที่ 40 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง PP52-2

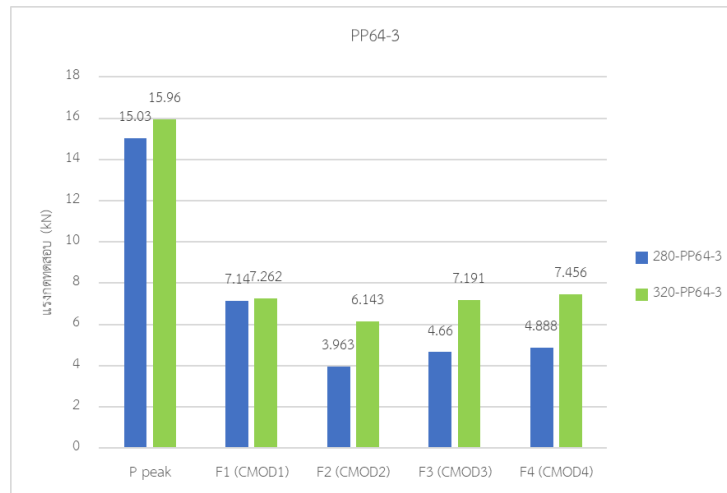


รูปที่ 41 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง PP52-3



รูปที่ 42 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง PP64-2



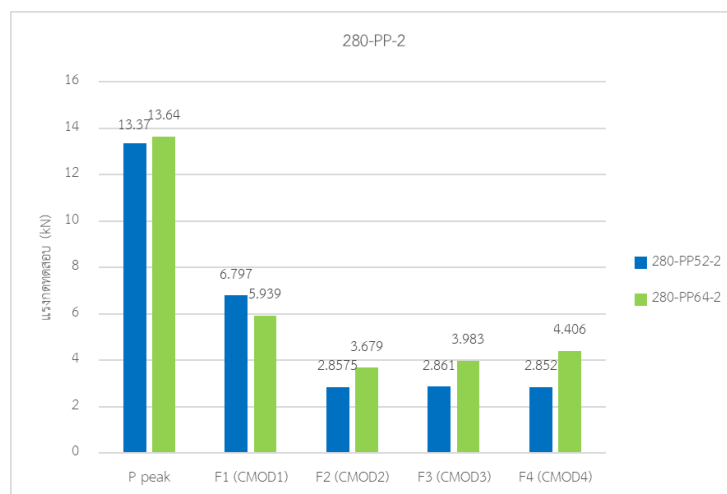


รูปที่ 43 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง PP64-3

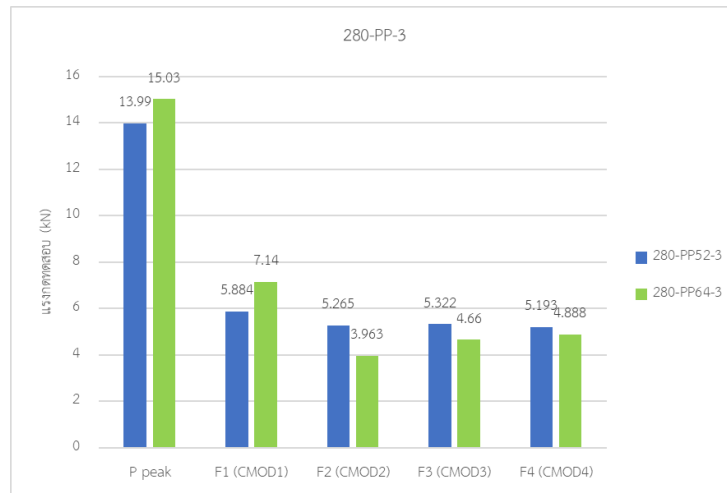
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตส่งผลให้ความสามารถในการรองรับแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีนัยต่อพฤติกรรมหลังการแตกร้าวของคาน

#### 4.1.2 อิทธิพลของกำลังแรงดัดประลัยของเส้นใยโพลิโพรพิลีน

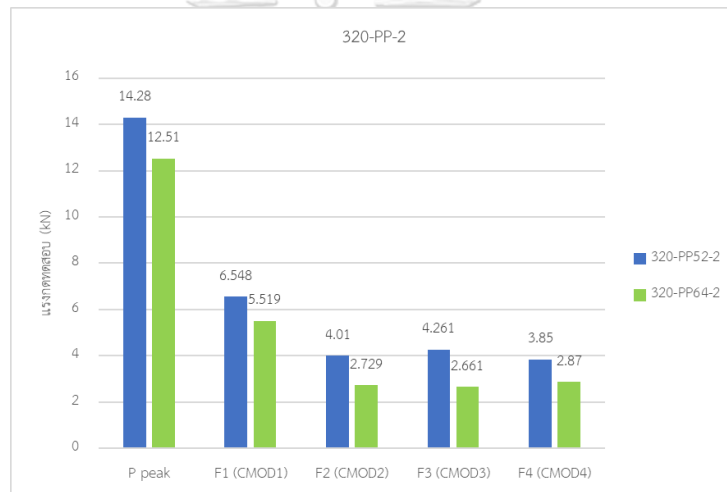
เมื่อพิจารณากลุ่มตัวอย่างที่มีการควบคุมตัวแปรด้านกำลังอัดของคอนกรีต และปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน จะพบว่าในกลุ่มการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่าง 280-PP-2 และ 320-PP-3 ทั้งแรงกดสูงสุดและความสามารถในการต้านแรงดัดหลังการแตกร้าวของคานที่ใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีกำลังรับแรงดัดประลัย 640 เมกะปาสคาลจะมีค่าสูงกว่าของคานที่ใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดประลัย 520 เมกะปาสคาล แต่ในกลุ่มการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่าง 280-PP-3 และ 320-PP-2 ค่าจากการทดสอบของคานที่ใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดประลัย 520 เมกะปาสคาล มีความสามารถในการต้านแรงดัดสูงกว่าคานตัวอย่างอีกกลุ่มหนึ่ง



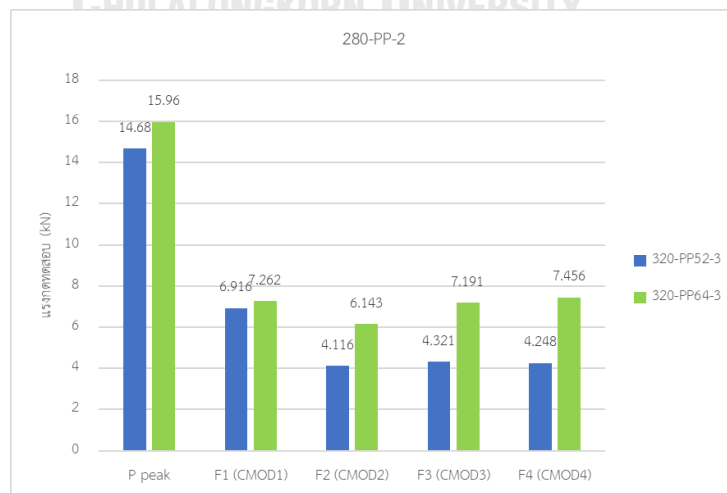
รูปที่ 44 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP-2



รูปที่ 45 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP-3



รูปที่ 46 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP-2



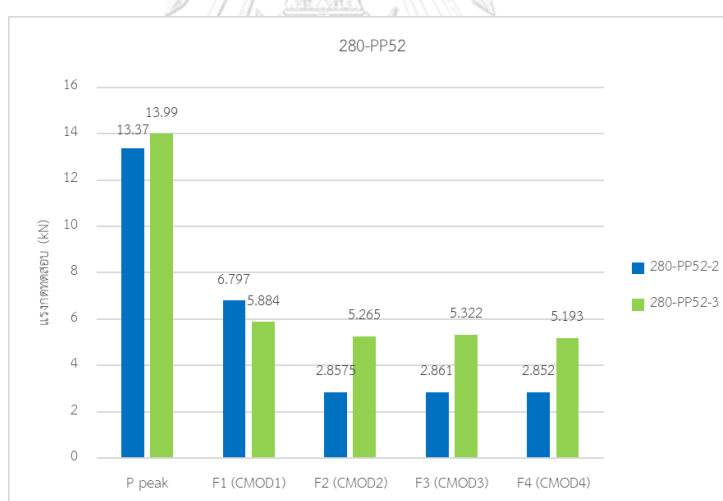
รูปที่ 47 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP-3

ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากพฤติกรรมที่ไม่แน่นอนของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่การวิบัติของคานาอาจจะเกิดได้ทั้งการที่เส้นใยถูกดึงจนขาดจากการตัด หรือเส้นใยอาจครูดออกจากเนื้อคอนกรีต

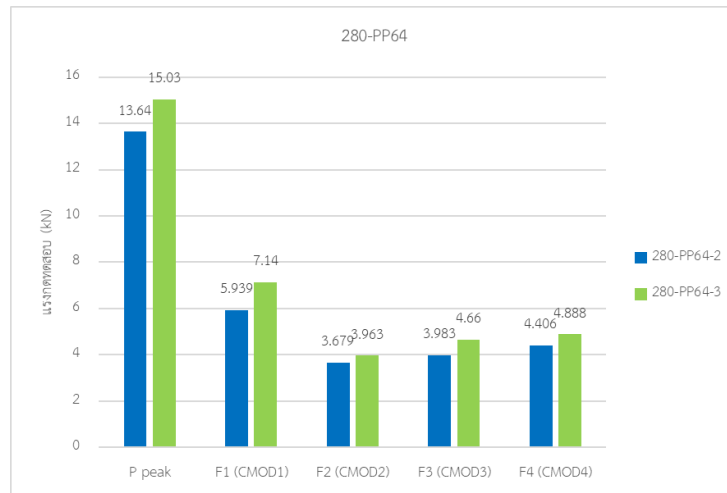
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดสอบแลเปรียบเทียบอติพลของกำลังรับแรงดึงประลัยของเส้นใยสังเคราะห์นั้นไม่สามารถสรุปได้ แต่หากคานตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบและถูกควบคุมให้คานทั้งหมดวิบัติจากการตัดจนเส้นใยขาดทั้งหมดได้ การเปรียบเทียบอาจเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ และอาจทำให้ทราบแนวโน้มและอิทธิพที่มีของตัวแปรกำลังรับแรงดึงประลัยของเส้นใยสังเคราะห์ได้

#### 4.1.3 อติพลของปริมาณเส้นใย

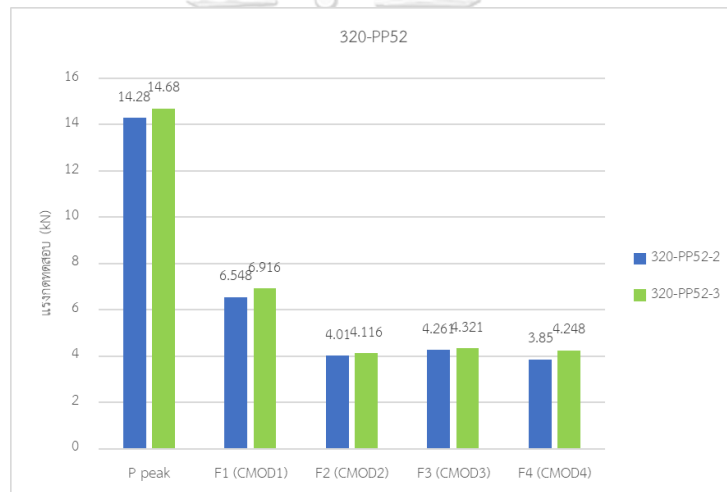
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคานทดสอบตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตกำลังอัดเท่ากัน และใช้เส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงเท่ากันจะพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสังเคราะห์จะทำให้ความสามารถในการต้านแรงดัด ทั้งแรงกดสูงสุดและพฤติกรรมหลังการแตกร้าวมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยยะ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเส้นใยส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการต้านแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยทั้งสภาวะก่อนและหลังการแตกร้าว



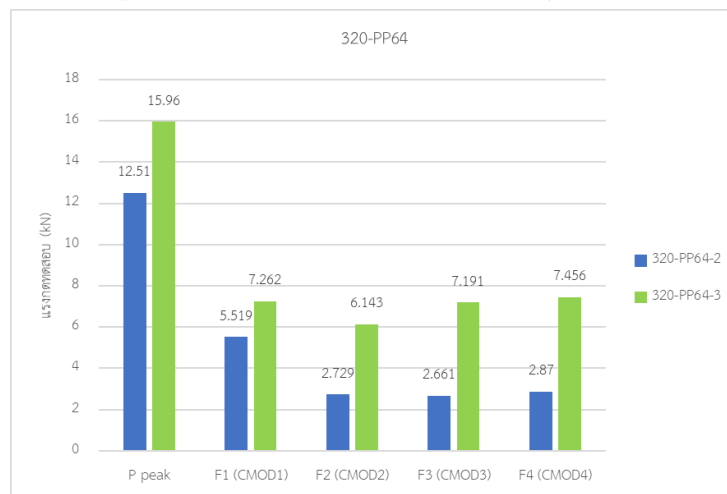
รูปที่ 48 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP52



รูปที่ 49 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 280-PP64



รูปที่ 50 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP52



รูปที่ 51 เปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของกลุ่มตัวอย่าง 320-PP64

## 4.2 การเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบพื้นวางบนดินที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการพิจารณาการออกแบบพื้นวางบนดินเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างและความคุ้มค่าต้องบประมาณในการเลือกใช้งานมาตรฐานการออกแบบผู้ศึกษาจึงทำการเปรียบเทียบรายละเอียดการวิเคราะห์และคำนวณออกแบบโดยแยกแต่ละส่วนพิจารณาดังต่อไปนี้

### 4.2.1 นำหนักบรรทุกสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากการพิจารณาหน้าตัดรับแรงดัด

เนื่องจากสมมติฐานการกระจายความเค้นในหน้าตัดของทั้ง 2 มาตรฐานมีสมมติฐานที่ต่างกัน ตัวแปรที่ใช้กำหนดจะรองรับน้ำหนักทดสอบที่พิจารณาประกอบการออกแบบต่างกัน ดังนั้นผู้ศึกษาจึงมุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่รองรับได้ของพื้นวางบนดินจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ที่สมมติให้ความสามารถในการต้านแรงดัดของหน้าตัดมีค่าเท่ากัน แล้วจึงเปรียบเทียบจากตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาแทน

#### 4.2.1.1 ผลต่างรัศมีความแข็งสัมพันธ์

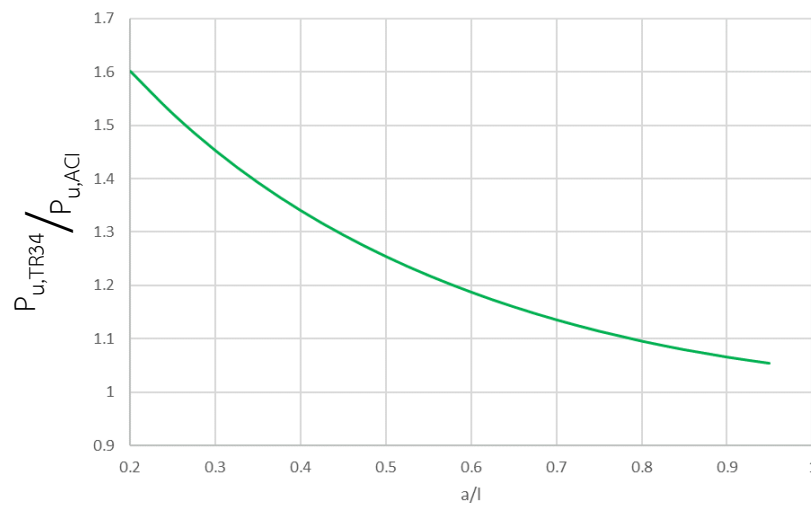
เนื่องจากการหาค่ารัศมีความแข็งสัมพันธ์ของมาตรฐานการออกแบบทั้ง 2 มาตรฐานใช้หลักการและสมการเดียวกัน (สมการ 2.8) แต่ค่าอัตราส่วนปัวซองของแต่ละมาตรฐานกำหนดให้ใช้มีค่าไม่เท่ากัน มาตรฐาน ACI ระบุให้ใช้อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.15 แต่สำหรับมาตรฐานการออกแบบตามรายงานวิชาการ TR34 ระบุให้ใช้อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.20 ดังนั้นค่ารัศมีความแข็งสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากมาตรฐาน ACI จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณตามแนวทาง TR34 ประมาณร้อยละ 0.45

#### 4.2.1.2 ผลต่างจากค่าสัมประสิทธิ์สมการค่าแรงสูงสุดที่พื้นรองรับได้

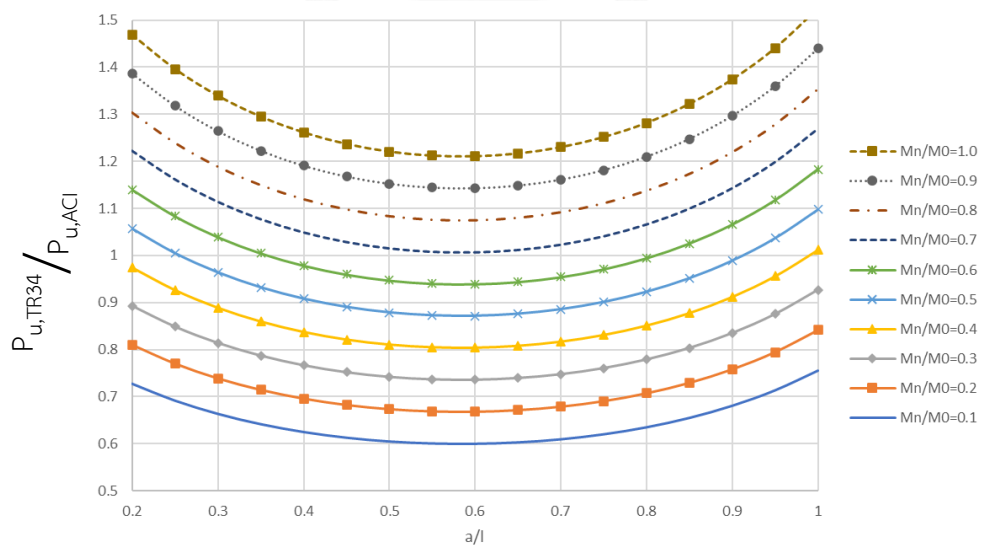
พิจารณาด้วยสมมติฐานว่าค่าความสามารถในการต้านแรงดัดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากัน ( $M_n + M_p = M_{o,ACI} = M_{o,TR34}$ ) และอ้างอิงค่ารัศมีความแข็งสัมพันธ์ตามที่หัวข้อ 4.2.1.1 คือค่ารัศมีความแข็งสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากการอ้างอิงมาตรฐาน ACI มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 94.1 ของค่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 ( $L_{ACI} = 0.995 L_{TR34}$ ) จะพบว่าค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดที่พื้นวางบนดินที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงมาตรฐาน ACI

สำหรับแรงที่กระทำภายในพื้น ค่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 มีค่ามากกว่าการคำนวณจากมาตรฐาน ACI อยู่ประมาณร้อยละ 0.52 ถึงร้อยละ 60.1 แปรผันตามค่าอัตราส่วนขนาดประสิทธิผลของพื้นที่แรงกระทำต่อรัศมีความแข็งสัมพันธ์ ที่อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.95 ดังที่แสดงในรูปที่ 52

สำหรับแรงกระทำที่ขอบพื้น ค่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 จะมีค่าต่ำกว่า ค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI ในช่วงที่ค่าความสามารถในการต้านแรงดัดจากการคำนวณ คอนกรีตล้วน ( $M_n$ ) มีค่าประมาณร้อยละ 60 ของค่าความสามารถในการต้านแรงดัด ( $M_o$ ) แต่เมื่อค่าความสามารถในการต้านแรงดัดจากการคำนวณคอนกรีตล้วนมีค่ามากกว่าร้อยละ 60 ของค่าความสามารถในการต้านแรงดัดค่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 จะมีค่า สูงกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI ดังแสดงในรูปที่ 53

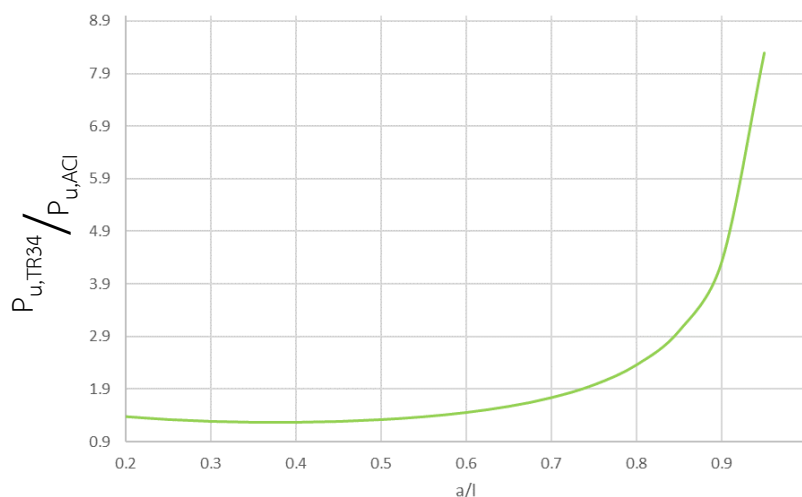


รูปที่ 52 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่กระทำภายในพื้น ที่พื้นสามารถรองรับได้จาก แนวทางของ TR34 ต่อมาตรฐาน ACI



รูปที่ 53 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่กระทำที่ขอบ ที่พื้นสามารถรองรับได้จากแนวทาง ของ TR34 ต่อมาตรฐาน ACI

สำหรับแรงที่กระทำที่มุมพื้น ค่าที่คำนวณได้จากการอ้างอิงแนวทางตาม TR34 มีค่ามากกว่า การคำนวณจากมาตรฐาน ACI อยู่ประมาณ 1.39 เท่า ถึง 8.30 เท่า แปรผันตามค่าอัตราส่วน ขนาดประสิทธิผลของพื้นที่แรงกระทำต่อรัศมีความแข็งสัมพัทธ์ ที่อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.95 ดังที่ แสดงในรูปที่ 54



รูปที่ 54 อัตราส่วนผลการคำนวณแรงกดสูงสุดที่มุมพื้น ที่พื้นสามารถรองรับได้จากแนวทางของ TR34 ต่อมาตรฐาน ACI

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ ให้มีความคุ้มค่าต้องประมาณงานก่อสร้าง การเลือกใช้แนวทางการออกแบบตามรายงานเชิงวิชาการ TR34 จะเป็นการออกแบบที่คุ้มค่ามากกว่า เนื่องจากค่าแรงกระทำสูงสุดที่พื้นรองรับได้ มีค่าสูงกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3 การรวบรวมค่าตัวแปรดินภายในประเทศ

สำหรับการออกแบบพื้นวางบนดินนั้นค่าโมดูลัสต้านทานการกดของดินมีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเนื่องจากค่าที่ถูกระบุให้เป็นค่าที่แนะนำให้ใช้ภายในมาตรฐานนั้นจะเป็นค่าที่มีช่วงกว้างอยู่พอสมควร และอาจทำให้ผู้ที่ต้องการออกแบบและเลือกใช้งานค่าจากค่าที่แนะนำในมาตรฐานจะมีความสับสน และอาจไม่มั่นใจว่าค่าที่เลือกใช้มีความใกล้เคียงกับสภาพดินเดิมจริงในในพื้นที่ที่เลือกก่อสร้างหรือไม่ ดังนั้นผู้ศึกษาจึงจากการรวบรวมค่าทดสอบ California bearing ratio (CBR) ของดินภายในประเทศทั้งจากเอกสารทดสอบของหน่วยงานราช และงานวิจัยที่เคยมีผู้ศึกษาและรวบรวมเอาไว้ จากนั้นคำนวณเป็นค่าโมดูลัสต้านทานการกดของดินตามเส้นพยากรณ์ความสัมพันธ์ค่าประมาณค่า CBR และค่าโมดูลัสต้านทานการกดของดินตามรูปที่ 6 โดยค่าที่รวบรวมและแปลผลได้เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 13 ค่าข้อมูลดินภายในประเทศจากการรวบรวมงานวิจัยในอดีต

พื้นที่	CBR (%)	โมดูลัสต้านการกดของดิน (N/mm <sup>3</sup> )
ดินเหนียว บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น	28.1	0.111
ดินลมหอบ บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น	19.0	0.096
ที่มาข้อมูล:รายงานการวิจัย คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบขอนแก่นบดอัด [21]		
อ.พุแค จ.สระบุรี	7.2	0.060
ที่มาข้อมูล:รายงานการทดสอบดินชั้นSubbase ตัวอย่างที่ C-443 (G-22) กรมทางหลวง		
ตัวแทนดินถนน เลย-ท่าลี่-ปากห้วย	16.9	0.091
ที่มาข้อมูล:รายงานการทดสอบดินชั้นSubgrade ตัวอย่างที่ C-443 (G-22) กรมทางหลวง		
ค่าเฉลี่ยหลุมทดสอบ TP1-TP11 พื้นที่อำเภอคำม่วง	2.3	0.024
ค่าเฉลี่ยหลุมทดสอบ TP11-TP22 พื้นที่อำเภอเมืองลพบุรี	3.5	0.032
ที่มาข้อมูล:รายงานการทดสอบดินเดิม สํารวจตามแนวโครงการทางเลี่ยงเมืองลพบุรีด้านเหนือ ปี2565 กรมทางหลวง		
อ. คิชฌกูฏ จ.จันทบุรี	23.0	0.103
อ.โป่งน้ำร้อน จ.จันทบุรี	8.0	0.063
อ.นายายอาม จ.จันทบุรี	30.0	0.114
อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี	27.0	0.110
อ.แก่งหางแมว จ.จันทบุรี	33.0	0.118
ที่มาข้อมูล:รายงานการวิจัย คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในเขตพื้นที่จังหวัดจันทบุรี [22]		
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินบางคล้า	9.3	0.070
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินเชียงคาน	14.7	0.087
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินชุมพร	14.3	0.084
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินห้วยยอด	11.7	0.074
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินหาดใหญ่	10.7	0.073
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินกบินทร์บุรี	10.0	0.071
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินคลองซาก	10.3	0.071
ดินภายในภาคตะวันออก ชุดดินมวกเหล็ก	17.7	0.092



พื้นที่	CBR (%)	โมดูลัสด้านการกดของดิน (N/mm <sup>3</sup> )
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินแมริม	20.0	0.098
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินหนองคล้า	21.7	0.100
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินอัน	12.3	0.078
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินเพ็ญ	6.3	0.054
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินโพธิ์สัย	11.5	0.076
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินพะไ้ะ	22.7	0.103
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินระนอง	36.7	0.122
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินสกล	24.3	0.106
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินสะท้อน	5.3	0.048
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินสวี	7.3	0.060
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินตากลิ	3.0	0.030
ดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชุดดินท่ายาง	44.7	0.157
ที่มาข้อมูล:รายงานการศึกษา และวินิจฉัยของดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กรมพัฒนาที่ดิน [23]		

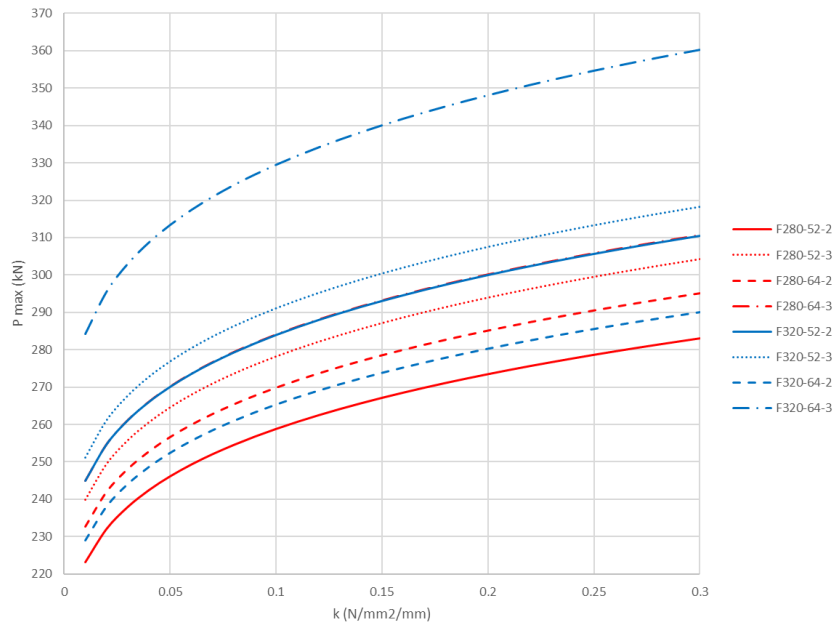
จากตารางข้างต้นจะพบว่าการกระจายตัวของค่าโมดูลัสด้านการกดของดินมีค่าอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.157 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตร ทั้งนี้การกระจายตัวที่ต่างกันนั้นเป็นผลจากในแต่ละพื้นที่มีอายุดิน ประเภท และรูปแบบการเกิดที่แตกต่างกันจึงมีความแข็งและแน่นที่ต่างกัน

#### 4.4 การประยุกต์ค่าทดสอบ และมาตรฐานการออกแบบ

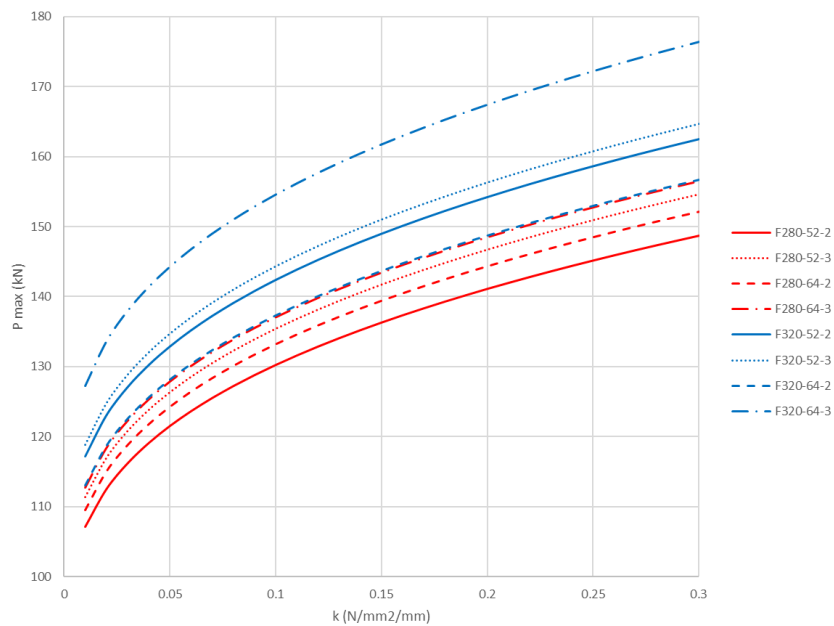
จากผลการทดสอบการตัดตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ในแต่ละสัดส่วนผสม โดยใช้ค่าตัวแทนข้อมูลตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตามหัวข้อที่ 4.1 ตารางที่ 13 และข้อมูลการกระจายตัวของค่าโมดูลัสการต้านแรงกดของดินที่รวบรวมตามหัวข้อที่ 4.3 ผู้ศึกษาจึงทำการทดลองออกแบบพื้นวางบนดินจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์จากข้อมูลข้างต้น และพิจารณาความสามารถที่พื้นรองรับได้สูงสุดในแต่ละกรณีเป็นหลัก

สำหรับพื้นวางบนที่มีความหนา 250 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาพื้นที่ถูกเลือกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง และฐานรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกขนาด 150 x 150 มิลลิเมตร ตามขนาดฐานรองรับเสาชั้นวางอุตสาหกรรม และพิจารณาตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินในช่วง 0.01 ถึง 0.30 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตรที่เป็นค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินที่

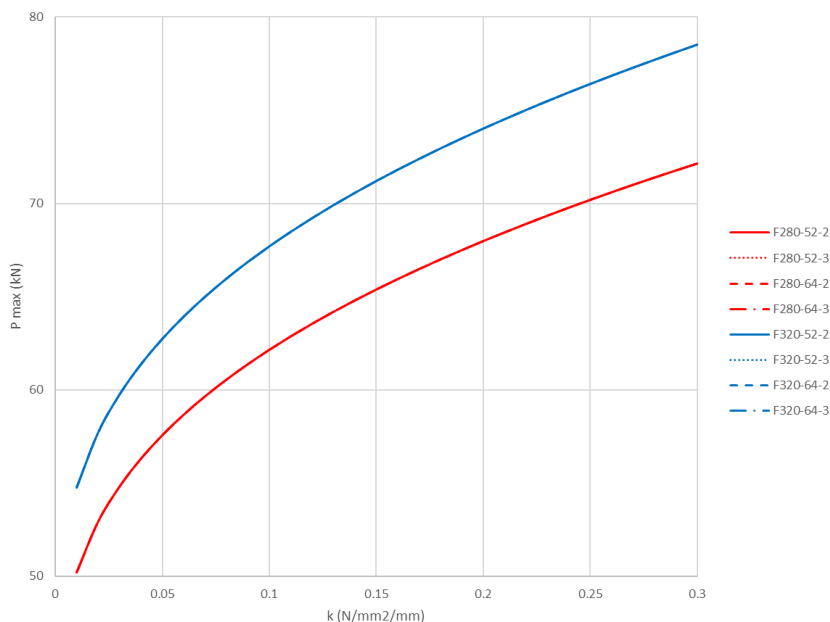
ครอบคลุมในทุกประเภทของดินที่เป็นไปได้ ความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดเดียวที่กระทำภายในพื้น ขอบพื้น และมุมพื้นที่พิจารณาจากความสามารถในการต้านแรงดัดของหน้าตัดเพียงอย่างเดียว จะมีค่าในแต่ละกรณีดังที่แสดงในรูปที่ 55, 56 และ 57 ตามลำดับ



รูปที่ 55 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ



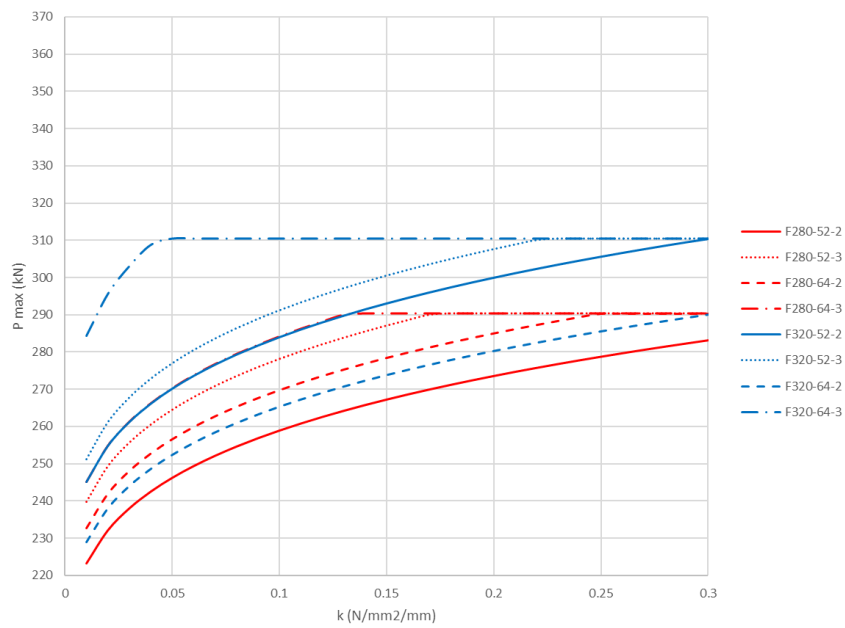
รูปที่ 56 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ



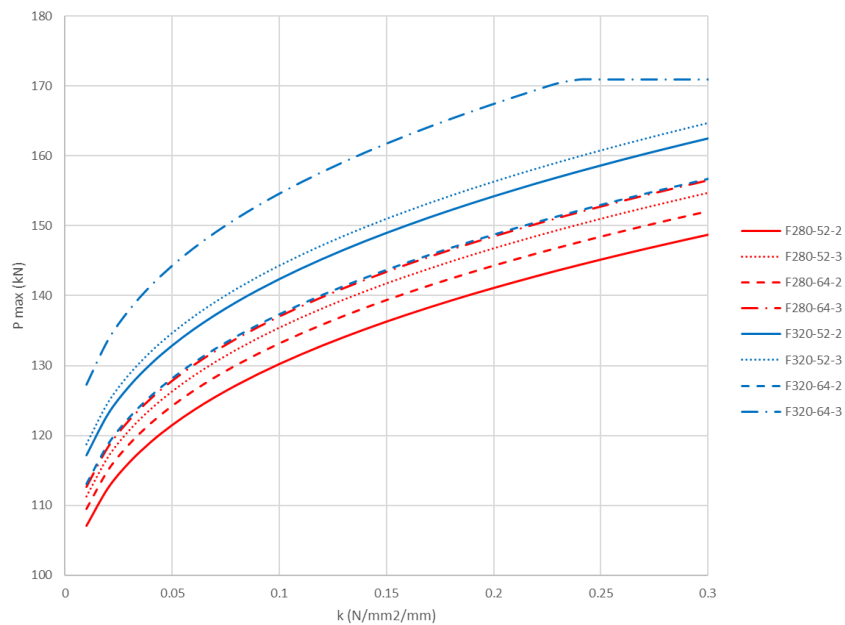
รูปที่ 57 คำนวณน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้ ตามค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินค่าต่างๆ

จากค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่พื้นรองรับได้ข้างต้นจะเห็นได้ว่าความสามารถในการรองรับน้ำหนักของพื้นจะแปรผันกับค่าโมดูลัสต้านทานการกดของดินสูงขึ้น โดยค่าที่เป็นได้ของค่าน้ำหนักกดสูงสุดที่พื้นรองรับได้ประมาณ 222 ถึง 333 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ภายในพื้น 106 ถึง 176 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น และ 50 ถึง 78 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในกรณีที่แรงกระทำที่ภายในพื้นและขอบพื้นนั้นความสามารถในการรองรับแรงกระทำของคอนกรีตเสริมเส้นใยแต่ละสัดส่วนจะมีค่าแตกต่างกันความมากหรือน้อยจะเรียงไปตามค่าที่ทดสอบได้จากตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเส้นใย แต่สำหรับกรณีที่แรงกระทำที่มุมพื้นแรงที่รองรับได้ของพื้นที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากันจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักเท่ากันโดยผลของการใช้สัดส่วนผสมของเส้นใยที่แตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มุมพื้นแต่อย่างใด ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลจากพิจารณาความสามารถในการรองรับน้ำหนักของพื้นในกรณีนี้นั้นพิจารณาจากความสามารถในการต้านแรงดัดของของพื้นที่แบบไม่เสริมเส้นใย ( $M_n$ )

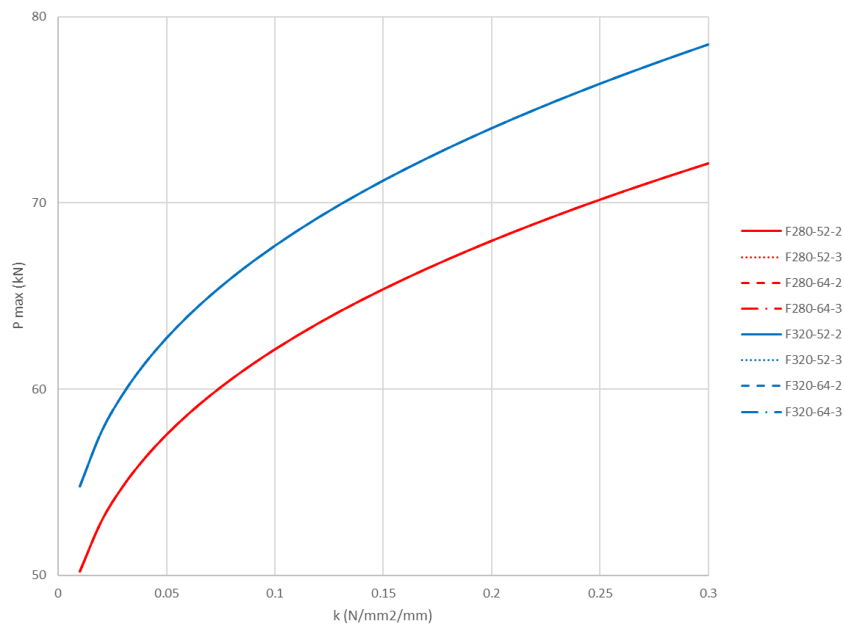
เมื่อพิจารณาค่าความสามารถรองรับน้ำหนักของพื้นที่พิจารณาความสามารถในการรองรับแรงเฉือนร่วมด้วยนั้นจะมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเดี่ยวที่กระทำภายในพื้น ขอบพื้น และมุมพื้นในแต่ละกรณีดังที่แสดงในรูปที่ 58, 59 และ 60 ตามลำดับ



รูปที่ 58 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาร่วมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน



รูปที่ 59 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาร่วมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน



รูปที่ 60 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 250 มิลลิเมตร รองรับได้เมื่อพิจารณาร่วมกับความสามารถในการรองรับแรงเฉือน

เนื่องจากความสามารถในการรองรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์จะเป็นค่าที่พิจารณาจากความสามารถในการรองรับแรงเฉือนของคอนกรีตล้วน ที่ไม่เสริมเส้นใยเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากันจะพบว่าความสามารถในการรองรับแรงเฉือนของพื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีสัดส่วนผสมของเส้นใยที่ต่างกันจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสามารถในการรองรับน้ำหนักของพื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยแล้วนั้นจะได้ว่าค่าที่เป็นได้ของค่าน้ำหนักกดสูงสุดที่พื้นรองรับได้ประมาณ 222 ถึง 310 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ภายในพื้น (ลดลงร้อยละ 6.9) 106 ถึง 171 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น (ลดลงร้อยละ 2.8) และ 50 ถึง 78 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น (ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงในช่วงค่าโมดูลัสต้านการกดของดิน 0.01-0.30 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตร)

## บทที่ 5

### สรุปผล

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้คอนกรีตกำลังอัด 280 กก/ตร.ซม. และ 320 กก/ตร.ซม., เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงประลัย 520 เมกะปาสคาล และ 640 เมกะปาสคาล ที่มีอัตราส่วนผสมเส้นใย 0, 2 และ 3 กิโลกรัม ( ร้อยละ 0, 0.22 และ 0.33 โดยปริมาตร) ตามมาตรฐานการทดสอบการดัด BS EN 14651 จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบความคุ้มค่าการออกแบบจากมาตรฐานแนวทางการออกแบบพื้นวางบนดิน ACI 360R และแนวทางการออกแบบตามรายงานเชิงวิชาการ TR 34 เพื่อเลือกใช้กับการประยุกต์ใช้กับการออกแบบพื้นวางบนดินที่อ้างอิงค่าจากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่อยู่ในการศึกษาครั้งนี้ และการรวบรวมค่าโมดูลัสด้านการกดของดินภายในประเทศเพื่อใช้เป็นแนวทางการเลือกใช้งานและออกแบบพื้นวางบนดินที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

##### 5.1.1 อิทธิพลที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใย สำหรับกำลังรับแรงดึงประลัยของเส้นใยสังเคราะห์นั้นมีความไม่แน่นอนจึงไม่อาจสรุปผลได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวมีผลต่อพฤติกรรมรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยหรือไม่ และสัดส่วนผสมของเส้นใยสังเคราะห์มีผลให้ความสามารถในการรองรับแรงดัดหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลให้คอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์มีความสามารถในการรองรับแรงดัดหลังการแตกร้าวได้ดีขึ้น

##### 5.1.2 การเปรียบเทียบการออกแบบพื้นวางบนดินที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใย

จากการความสามารถในการรองรับน้ำหนักของพื้นวางบนดินจากการออกแบบตามมาตรฐาน ACI และการออกแบบจากแนวทางการออกแบบตามรายงานเชิงวิชาการ TR34 พบว่าความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นวางบนดินที่คำนวณได้จากแนวทางของรายงานเชิงวิชาการ TR34 มีค่ามากกว่าที่คำนวณจากมาตรฐานการออกแบบ ACI 360R ดังนั้นการเลือกใช้มาตรฐานการออกแบบพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ด้วยแนวทางการออกแบบ TR34 จะมีความคุ้มค่าต้องประมาณมากกว่า

##### 5.1.3 การรวบรวมค่าตัวแปรดินภายในประเทศ

จากการรวบรวมค่าโมดูลัสการต้านทานการกดของดินจากงานวิจัยและผลการทดสอบต่างๆ ของประเทศไทยพบว่าค่าโมดูลัสการต้านทานการกดของดินในประเทศไทยมีการกระจายตัวเป็น

อย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากดินในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยมีลักษณะแตกต่างกันตามท้องถิ่น และลักษณะการเกิดดินในแต่ละแหล่ง โดยค่าโมดูลัสด้านการกวดของดินที่รวบรวมได้ภายในประเทศมีค่าอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.157 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตร

#### 5.1.4 การประยุกต์มาตรฐานการออกแบบ และค่าโมดูลัสการต้านการกวดของดิน

จากการทดลองออกแบบพื้นวางบนดินที่มีความหนา 250 มิลลิเมตร ที่อยู่ในพื้นที่ที่พื้นดินเดิมที่มีโมดูลัสการต้านการกวดของดินในช่วง 0.01 ถึง 0.30 เมกะปาสคาลต่อมิลลิเมตร และออกแบบจากการพิจารณาความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดของพื้นโดยพิจารณาว่าระหว่างความสามารถในการรองรับแรงดัดและแรงเฉือน จะได้ว่าพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ในกลุ่มที่ทดสอบการดัดในการศึกษาครั้งนี้มีความสามารถในการรองรับแรงกวดอยู่ที่ประมาณ 222 ถึง 310 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ภายในพื้น, 106 ถึง 171 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น และ 50 ถึง 78 กิโลนิวตันสำหรับกรณีแรงกระทำที่ขอบพื้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 เนื่องจากในปัจจุบัน มีการผลิตเส้นใยหลากหลายชนิด อาจมีเส้นใยบางชนิดที่ทำให้ประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมเส้นใยมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังนั้นการศึกษาคัดเลือกของคอนกรีตเสริมเส้นใยในอนาคตอาจอ้างอิงกลุ่มเส้นใยที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติมหลังจากนี้ด้วย
- 5.2.2 การรวบรวมข้อมูลดินภายในประเทศยังคงมีความไม่หลากหลาย ดังนั้นหากสามารถทำการทดสอบเพื่อแปรผลหรือหาค่าโมดูลัสด้านการกวดของดินโดยตรงที่สนามจะทำให้การออกแบบมีความสมบูรณ์มากกว่าการใช้ค่าอ้างอิงตามพื้นที่

## บรรณานุกรม

1. *ASTM C1116 Standard specification for Fiber-Reinforced Concrete*. 2015, American Society for Testing and Materials (ASTM): West Conshohocken, PA.
2. Institute, A.C., *544.1R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. 1996, American Concrete Institute (ACI). Farmington Hills, MI.
3. Banthia, N., et al., *Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products*. PCI journal, 2012. **57**(3).
4. Ayub, T., N. Shafiq, and M.F. Nuruddin, *Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers*. Procedia Engineering, 2014. **77**: p. 131-139.
5. Jiang, C., et al., *Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete*. Materials & Design, 2014. **58**: p. 187-193.
6. Kizilkanat, A.B., et al., *Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study*. Construction and Building Materials, 2015. **100**: p. 218-224.
7. Yazıcı, Ş., G. İnan, and V. Tabak, *Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(6): p. 1250-1253.
8. Yurtseven, A.E., *Determination of mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete*. 2004, Middle East Technical University.
9. Jiang, C., et al., *Experimental Study on the Mechanical Properties of Amorphous Alloy Fiber-Reinforced Concrete*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. **2018**.
10. 360, A.C., *Design of Slabs-on-Ground*. 2006.
11. Westergaard, H.M., *Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis*. Public roads, 1926.
12. Westergaard, H., *On the design of slabs on elastic foundation with special reference to stresses in concrete pavements*. Ingenioren, 1923. **12**.



13. Society, C., *Concrete Industrial Ground Floors: A Guide to Design and Construction*. 2003: Concrete Society.
14. Specifications, I.S.U.D.a., *SUDAS Design Manual, in Roadway Design*. 2023.
15. *ASTM C1609 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*. 2012, American Society for Testing and Materials (ASTM): West Conshohocken, PA.
16. *ASTM C1399 Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced*. 2010, American Society for Testing and Materials (ASTM): West Conshohocken, PA.
17. (ACI), A.C.I., *544.4R-08: Guide for Specifying, Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*. 2018, ACI Committee 544. : Farmington Hills, MI.
18. Rice, P.F. *Design of concrete floors on ground for warehouse loadings*. in *Journal Proceedings*. 1957.
19. Meyerhof, G., *Load-carrying capacity of concrete pavements*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1962. **88**(3): p. 89-116.
20. *EN 14651 Test method for metallic fibred concrete - Measuring the flexural tensile strength (Limit of Proportionality (LoP), Residual)*. 2005, European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.
21. คำภาหาล้า, ด.ท.อ.อ.น. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินสมหอบขอนแก่นบดอัด. in *The 4th RSU International Research Conference on Science and Technology, Social Science, and Humanities 2019*. 2562. มหาวิทยาลัยรังสิต: มหาวิทยาลัยรังสิต.
22. ยง, ส.ว.ส.บ.ท. and ส.อ.โ.ล.น.น. ท. คุณสมบัติ ทาง วิศวกรรม ของ ดิน ลูกรัง ใน เขต พื้นที่ จังหวัด จันทบุรี. in *Proceeding National & International Conference*. 2018.
23. สมปอง นิลพันธ์, ส.ศ.ณ.อ., สุจิตรา สุวรรณสถิตกุล, การศึกษาและวินิจฉัยคุณสมบัติของดินปนหินหรือกรวด ลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่ยีสืบชุดดิน เพื่อประโยชน์ในงานสร้างทาง. 1996.

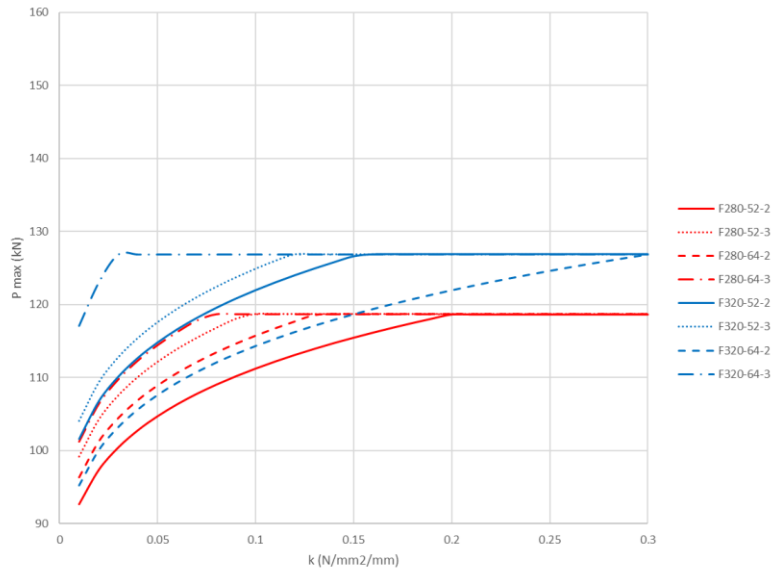


ภาคผนวก

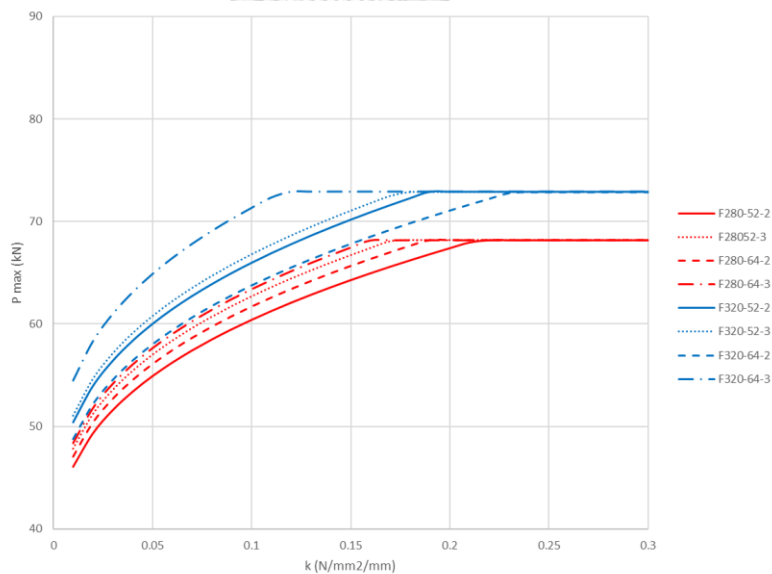
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

การประมาณความสามารถในการรองรับน้ำหนักของพื้นวางบนดินที่สร้างจากคอนกรีตเสริมเส้นใย ในในกลุ่มความหนาพื้นแต่ละค่าในช่วง 150 ถึง 300 มิลลิเมตร เป็นดังที่แสดงในรูปที่ ก1-ก12

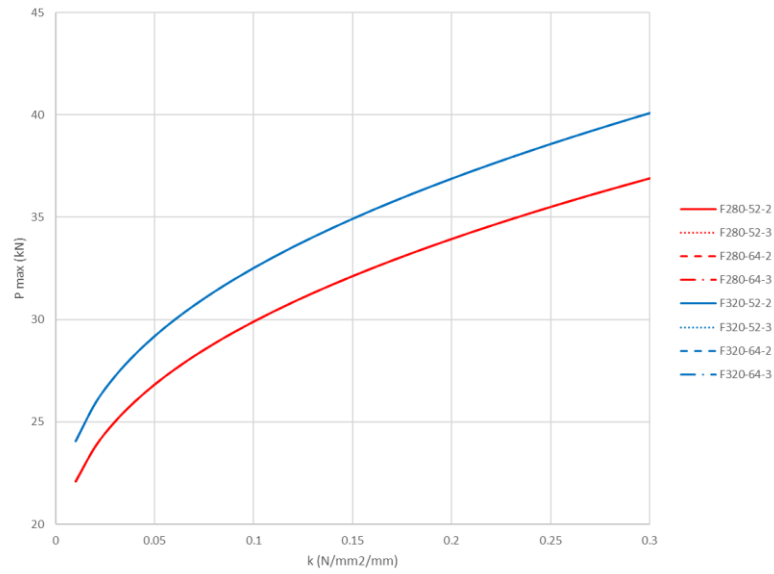
- ผลการประมาณการออกแบบพื้นวางบนดิน หนา 150 มิลลิเมตร



รูปที่ ก 1 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ หนา 150 มิลลิเมตรรองรับได้



รูปที่ ก 2 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ หนา 150 มิลลิเมตรรองรับได้

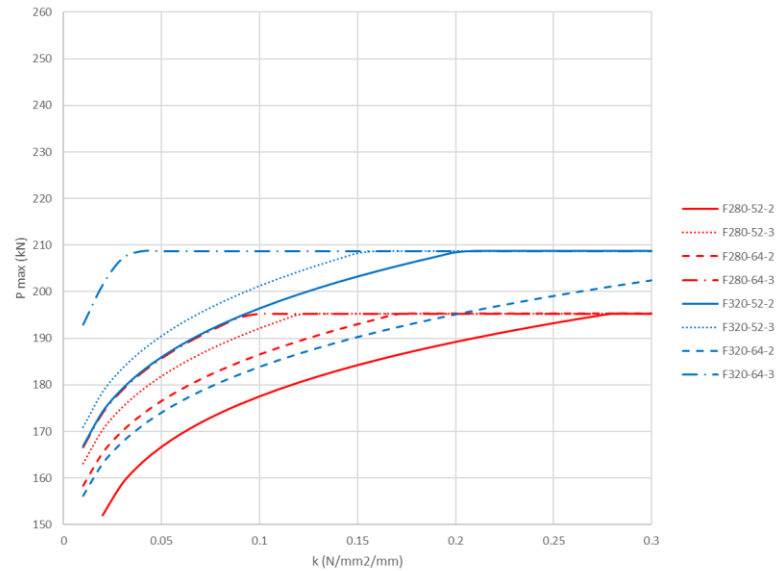


รูปที่ 3 คำนวณหาค่าแรงกดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา

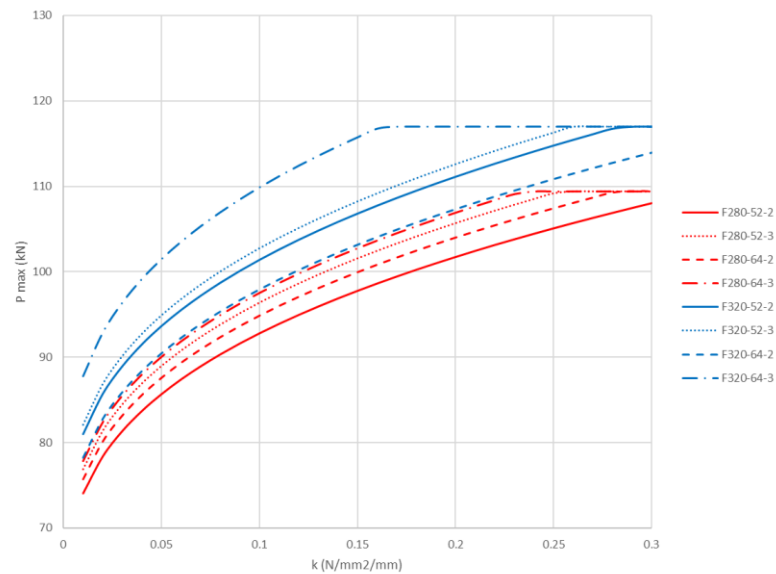
150 มิลลิเมตรรองรับได้



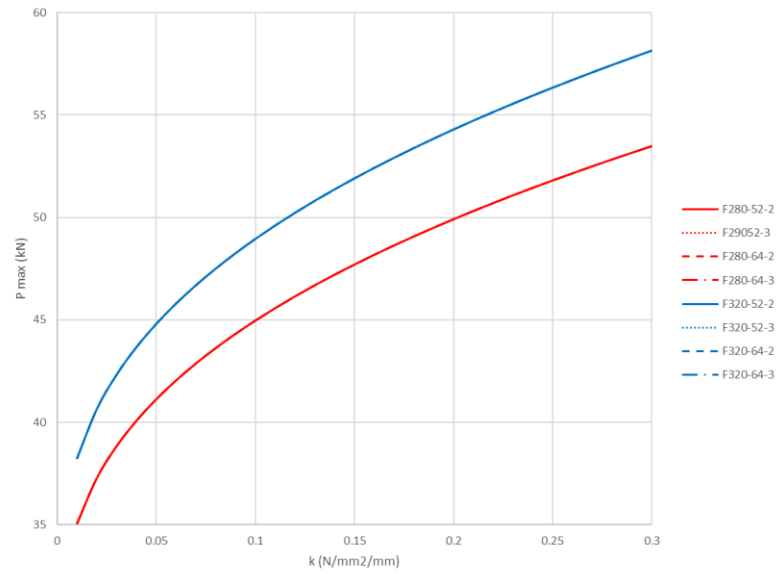
- ผลการประมาณการออกแบบพื้นวางบนดิน หนา 200 มิลลิเมตร



รูปที่ ก 4 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 200 มิลลิเมตรรองรับได้



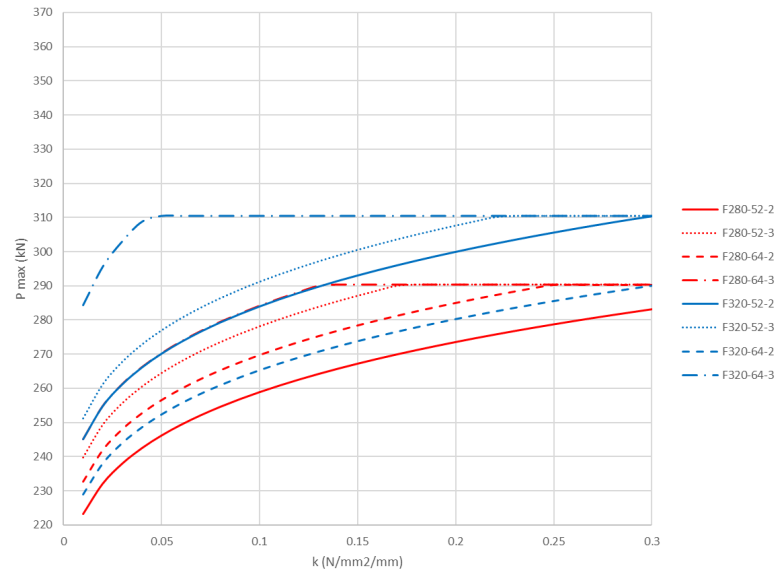
รูปที่ ก 5 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 200 มิลลิเมตรรองรับได้



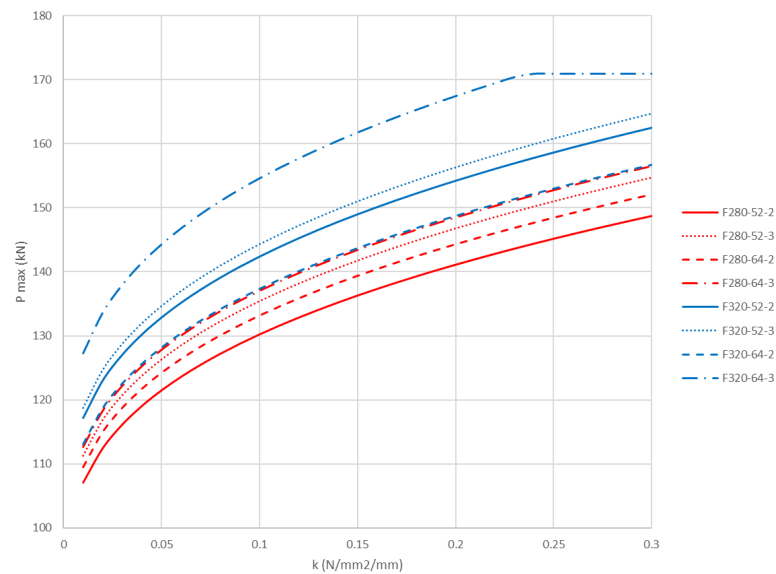
รูปที่ 6 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา 200 มิลลิเมตรรองรับได้



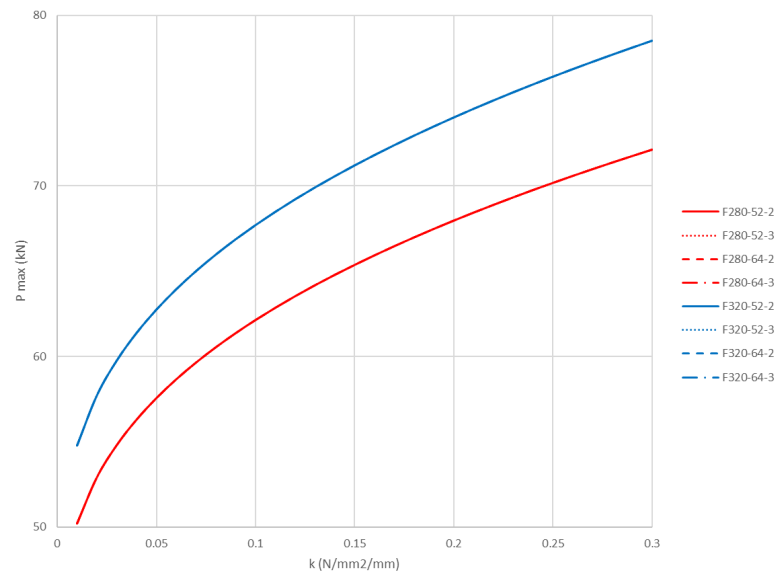
- ผลการประมาณการออกแบบพื้นวางบนดิน หนา 250 มิลลิเมตร



รูปที่ ก 7 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 250 มิลลิเมตรรองรับได้



รูปที่ ก 8 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 250 มิลลิเมตรรองรับได้



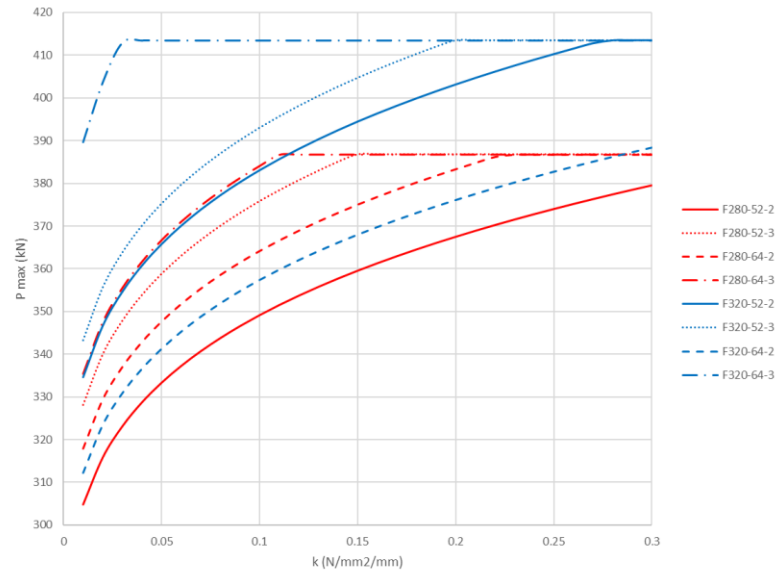
รูปที่ 9 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์หนา

250 มิลลิเมตรรองรับได้

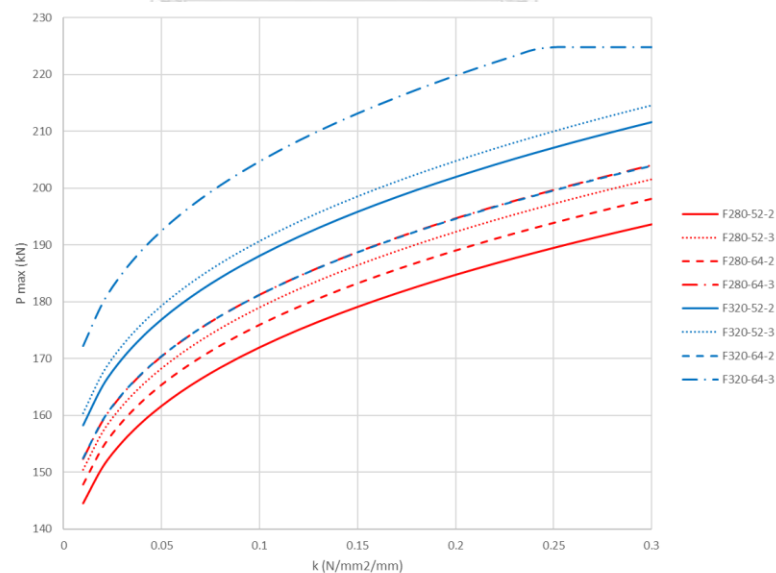




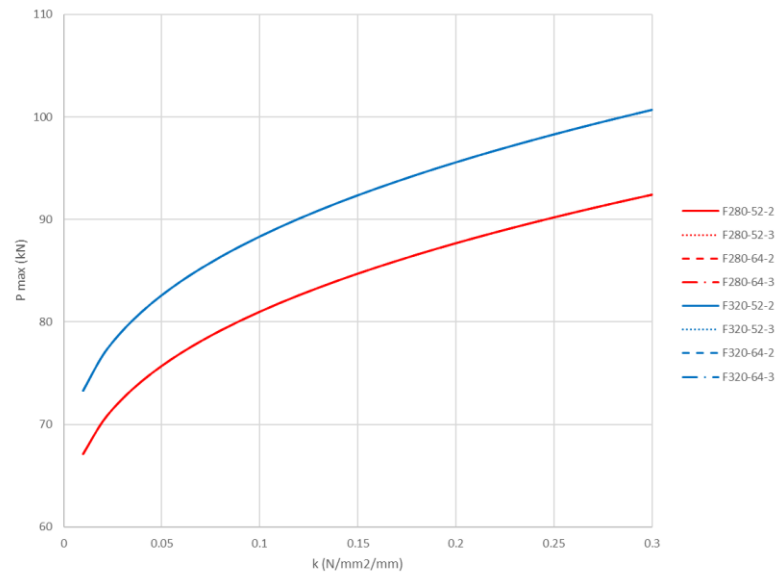
- ผลการประมาณการออกแบบพื้นวางบนดิน หนา 300 มิลลิเมตร



รูปที่ ก 10 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งภายในพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 300 มิลลิเมตรรองรับได้



รูปที่ ก 11 คำนวณน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งขอบพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 300 มิลลิเมตรรองรับได้



รูปที่ ก 12 ค่าน้ำหนักแบบจุดสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งมุมพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์  
หนา 300 มิลลิเมตรรองรับได้

วิธีการใช้งาน คือ เลือกความหนาพื้นที่ใช้ จากนั้นทำการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่จะเกิดขึ้น และประมาณค่าโมดูลัสการต้านการกดของดินในพื้นที่ก่อสร้างจากนั้นลากเส้นตัดกันในกราฟ ความสามารถรองรับน้ำหนักสูงสุดกับค่าโมดูลัสการต้านการกดของดิน เพื่อดูสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีความสามารถในการรองรับแรงกดที่สูงกว่าจุดตัด

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิริพงศ์ เกิดบุญมา
วัน เดือน ปี เกิด	4 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดสุโขทัย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	24/78 ซอยเกษมสันต์ ถนนพระราม1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY