

บทความวิจัย

การศึกษากำลังรับแรงอัด พฤติกรรมรับแรงดัด และการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์สูง

ชนพล ญาณวีรศักดิ์ พอจันทร์ ตูฐพิงษ์สวัสดิ์ และ บุราฉัตร กิตติกรจรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 5509 5695 อีเมล: burachat@eng.src.ku.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.001

รับเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2568 แก้ไขเมื่อ 16 เมษายน 2569 ตอบรับเมื่อ 8 มิถุนายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 5 ตุลาคม 2569

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเหล็กและระยะเวลาแช่ในสภาวะที่มีคลอไรด์สูงต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC) โดยพิจารณาปริมาณเส้นใย 30 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระยะเวลาแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% เป็นเวลา 100 และ 200 วัน ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 15–20% และค่ากำลังรับแรงดัดคงค้างรวมถึงค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นสะท้อนถึงพฤติกรรมหลังการแตกร้าวที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามหลังการแช่ในสารละลายคลอไรด์เป็นระยะเวลานานกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกกลุ่ม ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังของคอนกรีตในระยะยาวและการบ่มต่อเนื่องมากกว่าผลของคลอไรด์โดยตรง ในขณะที่สมรรถนะด้านการดัดโดยเฉพาะกำลังรับแรงดัดคงค้างมีแนวโน้มลดลงในตัวอย่างที่มีเส้นใยระดับปานกลางถึงสูง ซึ่งสัมพันธ์กับการกัดกร่อนของเส้นใยบริเวณผิวคอนกรีต ทั้งนี้ การทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์พบว่าคลอไรด์แทรกซึมในระดับความลึกประมาณ 3–6 มิลลิเมตร เท่านั้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่เหมาะสมสามารถเพิ่มสมรรถนะเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามในสภาวะที่มีคลอไรด์สูงการใช้เส้นใยในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะด้านการดัดในระยะยาว ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กควรพิจารณาทั้งปริมาณเส้นใยและมาตรการป้องกันการกัดกร่อนร่วมกัน

คำสำคัญ: การซึมผ่านของคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เส้นใยเหล็ก

การอ้างอิงบทความ: ชนพล ญาณวีรศักดิ์, พอจันทร์ ตูฐพิงษ์สวัสดิ์ และ บุราฉัตร กิตติกรจรัส, “การศึกษากำลังรับแรงอัด พฤติกรรมรับแรงดัด และการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์สูง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 1–21, ม.ค.-มี.ค. 2570. เลขที่บทความ 271-048354, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.001.



Research Article

Study on Compressive Strength, Flexural Behavior, and Chloride Penetration of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) under Chloride Environment

Thanapol Yanweerasak, Porjan Tuttipongsawat and Burachat Kittikornjarus*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Sriracha Campus Chonburi, Chon Buri, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 06 5509 5695 E-mail: burachat@eng.src.ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.001

Received 20 November 2025; Revised 16 April 2026; Accepted 8 June 2026; Published online: 5 October 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed to investigate the effects of steel fiber content and exposure duration under high chloride conditions on the compressive strength, flexural performance, and chloride penetration of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). Steel fiber contents of 30, 60 and 90 kg/m³ were investigated, and the specimens were immersed in a 10 wt% NaCl solution for 100 and 200 days. The experimental results showed that increasing the steel fiber content significantly improved both compressive strength and flexural performance. The compressive strength increased by approximately 15–20%, while the residual flexural strength and energy absorption capacity also increased, indicating improved post-cracking behavior. After prolonged exposure to the chloride solution, a slight increase in compressive strength was observed in all groups, which may be attributed to continued hydration and long-term curing effects rather than the direct influence of chloride. In contrast, flexural performance, particularly residual flexural strength, tended to decrease in specimens with medium to high fiber contents after exposure, which was associated with corrosion of steel fibers near the concrete surface. Chloride penetration testing revealed that chloride ions penetrated only to a shallow depth of approximately 3–6 mm. The findings suggest that an appropriate steel fiber dosage can enhance both the mechanical performance and durability of concrete. However, under high chloride conditions, excessive fiber content may adversely affect long-term flexural performance. Therefore, the design of SFRC should consider both steel fiber dosage and corrosion protection measures.

Keywords: Chloride Penetration, Compressive Strength, Flexural Strength, Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), Steel Fibers

Please cite this article as: T. Yanweerasak, P. Tuttipongsawat, and B. Kittikornjarus, "study on compressive strength, flexural behavior, and chloride penetration of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) under chloride environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 37, no. 1, pp. 1–21, Jan.–Mar. 2027 (in Thai), Art. no. 271-048354, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.10.001.

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายมากเนื่องจากมีต้นทุนที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตาม คอนกรีตก็ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือ มีความเปราะ และกำลังรับแรงดึงต่ำ ส่งผลให้เมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นแล้ว คอนกรีตจะสูญเสียสมรรถนะในการรับแรงได้อย่างรวดเร็ว และอาจนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างในระยะยาว [1]–[3] ดังนั้นการพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลและความทนทานที่ได้รับความสนใจมากคือ การผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) ลงในคอนกรีตเพื่อพัฒนาเป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC) ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่าการเสริมเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความเหนียว ความสามารถในการควบคุมรอยร้าว และสมรรถนะหลังการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]–[6] ซึ่งเส้นใยเหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายโอนแรงดึงระหว่างรอยแตกและช่วยจำกัดการกระจายตัวของรอยร้าว ส่งผลให้คอนกรีตมีความเหนียว และความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มค่ากำลังอัด กำลังดัด และความสามารถในการคงสมรรถนะหลังการแตกร้าวได้ดีขึ้น [7]–[11] SFRC ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างโดยเฉพาะองค์อาคารที่ต้องรับน้ำหนักโดยตรงในปริมาณมาก เส้นใยเหล็กจะช่วยให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กจำนวนมาก แทนที่จะเกิดรอยร้าวใหญ่เพียงไม่กี่รอย ส่งผลให้โครงสร้างยังคงสมรรถนะได้หลังจากโครงสร้างเริ่มมีรอยร้าว [4], [5] อย่างไรก็ตามแม้ SFRC จะให้ผลเชิงบวกต่อสมรรถนะทางกล แต่ประเด็นเรื่องความทนทานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงยังเป็นโจทย์ที่ต้องการ

คำตอบ โดยเฉพาะการสัมผัสกับคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการกัดกร่อนของเส้นใยเหล็ก โดยการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตมักเกิดผ่านรอยร้าวและรูพรุนภายใน ซึ่งอัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับความกว้างของรอยร้าว (Crack Width) เป็นสำคัญ ขณะเดียวกันการเข้าถึงของออกซิเจนมีบทบาทต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็ก เมื่อคลอไรด์และออกซิเจนสามารถเข้าถึงผิวโลหะได้พร้อมกันจะเร่งให้เกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เส้นใยเหล็กใน SFRC มีลักษณะกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตและบางส่วนอยู่ใกล้ผิวแตกต่างจากเหล็กเสริมทั่วไปที่มีระยะหุ้มคอนกรีต จึงอาจมีความเสี่ยงต่อการสัมผัสคลอไรด์และการกัดกร่อนได้เร็วกว่าในบางสภาวะ

งานวิจัยในด้านสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยเฉพาะด้านกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กสามารถปรับปรุงพฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วยเพิ่มค่ากำลังอัด โมดูลัส และความสามารถในการดูดซับพลังงาน รวมถึงทำให้พฤติกรรมหลังจุดสูงสุดมีความเหนียวมากขึ้น [12]–[15] กลไกสำคัญเกิดจากการที่เส้นใยเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายโอนแรงดึงระหว่างรอยแตก (Crack Bridging) และช่วยจำกัดการขยายตัวของรอยร้าว ส่งผลให้โครงสร้างสามารถคงกำลังได้ต่อเนื่องหลังการแตกร้าว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเส้นใยเหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณ รูปทรง และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) โดยมีรายงานว่าปริมาณเส้นใยในช่วงที่เหมาะสมสามารถเพิ่มกำลังอัดได้ประมาณ 4–19% แต่เมื่อปริมาณเส้นใยสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการกระจุกตัวและโพรงภายในส่งผลให้กำลังอัดลดลง [7], [8]

นอกจากนี้การใช้เส้นใยที่มีอัตราส่วนความยาวต่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางสูงและรูปทรงปลายเกี่ยว (Hooked-end) ยังช่วยเพิ่มค่าความเหนียว และค่าความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดได้อย่างชัดเจน [14], [15] อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางกลของ SFRC ภายใต้สภาวะปกติ โดยยังขาดการพิจารณาผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง โดยเฉพาะการสัมผัสกับคลอไรด์ ซึ่งสามารถเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและการกัดกร่อนของเส้นใยเหล็กได้ในระยะยาว ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของ SFRC ภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินสมรรถนะและความทนทานของวัสดุในสภาพการใช้งานจริง

งานวิจัยในด้านพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า การเสริมเส้นใยเหล็กสามารถเพิ่มสมรรถนะหลังการแตกร้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงดัดคงค้าง (Residual Flexural Strength) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน ซึ่งสะท้อนถึงความเหนียวของวัสดุที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าค่ากำลังดัดสูงสุดอาจเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก [10], [16] กลไกสำคัญเกิดจากการที่เส้นใยเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายโอนแรงระหว่างรอยแตก (Fiber Bridging) และต้านทานการเปิดของรอยร้าวผ่านกระบวนการดึงหลุด (Pull-out) ส่งผลให้โครงสร้างสามารถคงสมรรถนะได้หลังการแตกร้าว ประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณ รูปทรง และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยพบว่าการใช้เส้นใยในช่วงประมาณ 0.75–1.5% โดยปริมาตร และการเลือกใช้เส้นใยชนิดปลายเกี่ยวสามารถเพิ่มค่ากำลังดัดคงค้าง และค่าการดูดซับพลังงานได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับทั้งงานวิจัยพื้นฐาน [7], [17], [18] และงานวิจัยล่าสุด

[19], [20] ที่รายงานผลในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ค่า L/D ที่สูงยังช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนแรงส่งผลให้กำลังดัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [8] ทั้งนี้ งานวิจัยล่าสุดยังชี้ให้เห็นว่า ค่า L/D และรูปทรงของเส้นใยมีผลโดยตรงต่อกลไกการดึงหลุดของเส้นใย และสมรรถนะหลังการแตกร้าวของ SFRC [21], [22] ซึ่งเน้นบทบาทของกลไกการถ่ายโอนแรงผ่านรอยร้าวอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นพฤติกรรมกรรมการรับแรงดัดภายใต้สภาวะปกติ โดยยังขาดการพิจารณาผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่น การสัมผัสคลอไรด์ ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของเส้นใยเหล็ก และสมรรถนะหลังการแตกร้าวในระยะยาว

เมื่อพิจารณาถึงความทนทานและการซึมผ่านของคลอไรด์พบว่าเส้นใยเหล็กในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีลักษณะกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต ทำให้บางส่วนของเส้นใยอยู่ใกล้ผิวและอาจสัมผัสกับคลอไรด์โดยตรง ซึ่งแตกต่างจากเหล็กเสริมทั่วไปที่มีระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลให้เส้นใยเหล็กมีความเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่าในบางสภาวะ [4], [23] กลไกการเสื่อมสภาพดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านรอยร้าว และรูพรุนภายในคอนกรีต ซึ่งอัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับความกว้างของรอยร้าว เป็นสำคัญ รวมถึงการเข้าถึงของออกซิเจนซึ่งมีบทบาทต่อกระบวนการกัดกร่อนเมื่อคลอไรด์และออกซิเจนสามารถเข้าถึงผิวเส้นใยได้พร้อมกันจะเร่งให้เกิดการกัดกร่อนและลดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงและยึดรั้งรอยร้าว ส่งผลให้สมรรถนะหลังการแตกร้าวลดลง แม้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติของเส้นใยเหล็ก (ประมาณ 0.8–1.0% โดยน้ำหนักซีเมนต์) จะสูงกว่าเหล็กเสริมทั่วไป (≈ 0.4 – 0.6%) แต่การที่เส้นใยอยู่ใกล้ผิวคอนกรีตทำให้สามารถเสื่อมสภาพได้รวดเร็ว

ในสภาวะที่มีคลอไรด์สูง งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านความหนาของชั้นทดสอบ ระยะเวลาในการสัมผัสคลอไรด์ และสภาพรอยร้าวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการแพร่ของคลอไรด์ และการสูญเสียสมรรถนะทางกลในระยะยาว [24]–[26] นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กอาจช่วยลดการแพร่ของคลอไรด์ในบางกรณี แต่ประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวของเส้นใยและสภาพของรอยร้าวเป็นสำคัญ [27]–[29] อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการศึกษาความทนทานของ SFRC แยกจากสมบัติเชิงกล หรือพิจารณาเพียงพฤติกรรมในระยะเวลากำกัด โดยยังขาดการศึกษาเชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงระหว่างปริมาณเส้นใยเหล็ก ระยะเวลาในการสัมผัสคลอไรด์ และพฤติกรรมหลังการแตกร้าอย่างเป็นระบบ

จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้นพบว่าแม้งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาผลของการเสริมเส้นใยเหล็กต่อกำลังอัด กำลังดัด และความทนทานของคอนกรีตมาแล้ว แต่ส่วนใหญ่ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ มักเน้นวิเคราะห์สมบัติเชิงกลในระยะสั้น หรือประเมินเฉพาะการซึมผ่านของคลอไรด์โดยไม่ได้เชื่อมโยงกับสมบัติเชิงกลอย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังขาดการศึกษาที่พิจารณาผลกระทบร่วมกันของปริมาณเส้นใยเหล็กและระยะเวลาในการสัมผัสคลอไรด์ภายใต้สภาวะแบบเร่ง ในการศึกษาที่ตั้งสมมติฐานว่าปริมาณเส้นใยเหล็กมีผลต่อทั้งสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์สูง โดยเฉพาะพฤติกรรมหลังการแตกร้าและการแทรกซึมของคลอไรด์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการสัมผัสคลอไรด์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยใช้ปริมาณเส้นใย 3 ระดับ (30 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

และระยะเวลาแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% (by weight of solution) เป็นเวลา 100 และ 200 วัน ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะแบบเร่ง (Accelerated Condition) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด พฤติกรรมหลังการแตกร้า และการซึมผ่านของคลอไรด์ในเชิงเปรียบเทียบ ผลการศึกษานี้คาดว่าจะช่วยอธิบายบทบาทของปริมาณเส้นใยเหล็กภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์ได้อย่างเป็นระบบ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสม SFRC สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อการกัดกร่อน เพื่อให้ได้ทั้งความแข็งแรงและความทนทานในระยะยาว

2. วิธีการทดลอง

2.1 ตัวแปรการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็กและระยะเวลาในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์สูงที่มีต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นตัวแปรต้น ได้แก่ 30 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่ระยะเวลาที่ตัวอย่างถูกแช่อยู่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% ถูกกำหนดไว้ที่ 100 และ 200 วัน โดยสารละลาย NaCl ความเข้มข้นดังกล่าวถูกใช้เพื่อจำลองสภาวะแบบเร่ง สำหรับศึกษาผลกระทบของคลอไรด์ในระยะยาวภายใต้ระยะเวลาทดลองที่จำกัด ตัวอย่างทุกชุดได้รับการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ก่อนเริ่มการทดลอง จากนั้นตัวอย่างบางส่วนถูกนำไปแช่ในสารละลาย NaCl เพิ่มเติมเป็นเวลา 100 และ 200 วัน ขณะที่ชุดควบคุมใช้เพื่ออ้างอิงสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้น ทั้งนี้ การวิเคราะห์ผลลัพธ์

มุ่งเน้นการพิจารณาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงภายในแต่ละกลุ่มมากกว่าการเปรียบเทียบเชิงตรงระหว่างช่วงอายุที่แตกต่างกันเพื่อสนับสนุนการตีความผลในเชิงความทนทาน (Durability) ภายใต้สภาวะคลอไรด์สูง ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวแปรการทดสอบและชุดตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 ตัวแปรการทดสอบและชุดตัวอย่างทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเส้นใยเหล็ก (กก./ลบ.ม.)	สภาวะคลอไรด์ การบ่มน้ำ 28 วัน
SF30	30	-
SF60	60	-
SF90	90	-
SF30-100D	30	แช่ NaCl 10 wt%, 100 วัน
SF60-100D	60	แช่ NaCl 10 wt%, 100 วัน
SF90-100D	90	แช่ NaCl 10 wt%, 100 วัน
SF30-200D	30	แช่ NaCl 10 wt%, 200 วัน
SF60-200D	60	แช่ NaCl 10 wt%, 200 วัน
SF90-200D	90	แช่ NaCl 10 wt%, 200 วัน

หมายเหตุ

1. “บ่มน้ำ 28 วัน” หมายถึง การบ่มตัวอย่างในน้ำสะอาดก่อนการทดสอบหรือก่อนเริ่มการแช่คลอไรด์
2. กลุ่ม “-100D/-200D” หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มน้ำ 28 วัน แล้วจึงแช่สารละลาย NaCl เพิ่มเติมเป็นเวลา 100 หรือ 200 วันตามลำดับ
3. ชุดทดสอบ: ลูกบาศก์ 150 มิลลิเมตร (กำลังอัด), คาน 150×150×600 มิลลิเมตร (กำลังดัด)
4. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างชุดตัวอย่างเน้นการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกผลกระทบของคลอไรด์ออกจากผลของอายุคอนกรีตโดยตรง

2.2 วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศไทย โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland

Cement; OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 น้ำประปาทั่วไปใช้สำหรับผสมและบ่ม มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำที่มีโมดูลัสความละเอียด (FM) เท่ากับ 2.73 และมวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดใหญ่สุด 19 มิลลิเมตร แร่ผสมเพิ่มเป็นเถ้าลอยชนิดแคลเซียมต่ำ (Class F fly ash) จากโรงไฟฟ้าระยอง ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการพัฒนากำลังในระยะยาว สารลดน้ำที่ใช้เป็นชนิด Polycarboxylic Ether (PCE) ตามมาตรฐาน ASTM C494 Type F เส้นใยเหล็กที่ใช้เป็นชนิดปลายตะขอ (Hooked-end Steel Fiber) มีความยาว 35 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 54 และมีกำลังรับแรงดึงประมาณ 1000 เมกะปาสคาล แสดงไว้ในตารางที่ 2 มวลรวมทั้งหมดถูกทำความสะอาดและคัดขนาดก่อนใช้งาน เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่สม่ำเสมอในการทดลอง ส่วนตารางที่ 3 แสดงรูปร่างและสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังของคอนกรีต ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 150 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [30] และคานคอนกรีตขนาด 150×150×600 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ซึ่งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1609 [31] โดยทำการหล่อขึ้นตามอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่แสดงไว้ในตารางที่ 4 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตเริ่มจากการผสมปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยให้เข้ากันในเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมมวลรวมหยาบลงไปและผสมต่ออีก 2 นาที จึงทำการเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำไว้ล่วงหน้าแล้วลงไปในส่วนผสมและผสมต่ออีก 2 นาที จนได้คอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) ตาม ASTM C150 (ผลิตในประเทศไทย)
น้ำ	น้ำประปาทั่วไป (Tap Water) สำหรับผสมและบ่ม
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำ ความถ่วงจำเพาะ 2.65; ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4; โมดูลัสความละเอียด (FM) = 2.73
มวลรวมหยาบ	หินปูน ขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4; ขนาดใหญ่สุด 19 มม.; ความถ่วงจำเพาะ 2.60
แร่ผสมเพิ่ม (ปอซโซลาน)	เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ (Low-Calcium Fly Ash; Class F) จากโรงไฟฟ้าระยอง ตามมาตรฐาน ASTM C618
สารลดน้ำ	สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิด Poly-carboxylic Ether (PCE) ตามมาตรฐาน ASTM C494; ความถ่วงจำเพาะ 1.08

ตารางที่ 3 รูปร่างและสมบัติของเส้นใยเหล็ก

ประเภทเส้นใยเหล็ก	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความยาว (มม.)	อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D)	กำลังรับแรงดึง (MPa)
เส้นใยเหล็กปลายตะขอ (Hooked-end Steel Fiber)	0.65	35	54	1000

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กก./ลบ.ม.)
น้ำ	163
ปูนซีเมนต์	475
ปอซโซลาน (เถ้าลอย)	60
มวลรวมละเอียด	1050
มวลรวมหยาบ	536
เส้นใยเหล็ก	30, 60, 90
สารลดน้ำ (PCE)	6.25

ขั้นตอนสุดท้ายคือการใส่เส้นใยลงไปในส่วนผสม และผสมต่อจนเส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อคอนกรีต โดยหลีกเลี่ยงการเกิดเส้นใยเกาะตัวกันเป็นก้อน (Fiber Balling) ภายหลังการผสมจะทำการทดสอบค่าการไหลของคอนกรีตโดยวิธี Slump Flow ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [32] โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าการไหลของคอนกรีตอยู่ในช่วง 500–600 มิลลิเมตร โดยมีการ

ปรับปริมาณสารลดน้ำ (Superplasticizer) ให้เหมาะสมกับปริมาณเส้นใยในแต่ละส่วนผสม เพื่อให้ได้ค่าการไหลอยู่ในช่วงที่กำหนด เพื่อให้สามารถเทลงในแบบหล่อได้สะดวก ลดความเสี่ยงในการกระจุกตัวของเส้นใยเหล็ก และป้องกันการแยกตัวของมวลรวมในกรณีที่คอนกรีตไหลมากเกินไป หลังจากเทคอนกรีตลงในแบบหล่อแล้วจะปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงถอดแบบและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำสะอาดเป็นระยะเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำขึ้นจากสภาพบ่มหรือแช่และปล่อยให้มีความผิวแห้ง (Surface-dry Condition) ภายใต้อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สภาวะความชื้นใกล้เคียงกันมากที่สุด ตัวอย่างในกลุ่ม SF30, SF60 และ SF90 (ตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในสารละลายคลอไรด์) จะถูกนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ขณะที่ตัวอย่างกลุ่ม SF30-100D, SF30-200D, SF60-100D,

SF60-200D, SF90-100D และ SF90-200D จะถูกนำไปแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10% (โดยน้ำหนัก) ซึ่งถูกใช้เพื่อจำลองสภาวะแบบเร่งสำหรับศึกษาผลกระทบของคลอไรด์ในระยะยาว เป็นระยะเวลา 100 และ 200 วัน ตามลำดับ ก่อนจะนำไปทดสอบสมบัติทางกลและความทนทาน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต รูปที่ 1 แสดงรูปตัวอย่างของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด



รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด

2.3 การทดสอบ

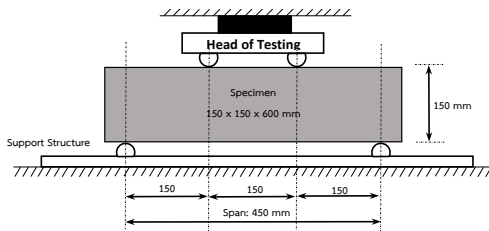
2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากที่ลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 150 มิลลิเมตร ถูกบ่มในน้ำสะอาดครบตามระยะเวลาที่กำหนด ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำขึ้นจากสภาพบ่มหรือแช่ และปล่อยให้ มีสภาวะผิวแห้งภายใต้อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สภาวะ ความชื้นใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงถูกนำมาทดสอบกำลัง

รับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [30] การทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดแบบไฮดรอลิกกำลังอัดสูงสุด 2000 กิโลนิวตัน โดยควบคุมอัตราการเพิ่มของแรงกด โดยควบคุมอัตราการให้แรงในรูปของหน่วยแรง (Stress Rate) ให้อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบ กำลังอัดคอนกรีต จนกว่าตัวอย่างทดสอบจะวิบัติ ค่า กำลังรับแรงอัดจะคำนวณจากอัตราส่วนของแรงกด สูงสุดที่ตัวอย่างรับได้ต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกบาศก์ที่ ทดสอบ

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

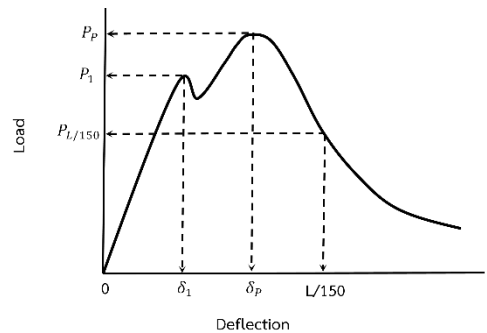
หลังจากที่คานคอนกรีตถูกบ่มทั้งในน้ำสะอาดหรือในสารละลาย NaCl ครบตามระยะเวลาที่กำหนด ก่อนการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดถูกนำขึ้นจากสภาพบ่มหรือแช่ และปรับให้อยู่ในสภาวะผิวแห้ง ภายใต้อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 [31] โดยการทดสอบดำเนินการภายใต้การควบคุมการโก่งตัว (Displacement controlled Loading) โดยตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัด 150×150 มิลลิเมตร และความยาวช่วงทดสอบ (Span Length) เท่ากับ 450 มิลลิเมตร การทดสอบใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 500 กิโลนิวตัน โดยติดตั้งในรูปแบบการรับแรงดัดแบบสี่จุด (Four-point Loading) ดังแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบควบคุมด้วยการโก่งตัว (Displacement Control) ที่อัตรา 0.1 มิลลิเมตร/นาที ตลอดการทดสอบมีการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและค่าการโก่งตัว (Load deflection Relationship) อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ได้มีการตรวจวัดขนาดของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางช่วงคานด้านรับแรงดึง โดยใช้ Crack Width Gauge โดยจะทำการวัดรอยร้าว ณ การโก่งตัวที่เท่ากับ L/600, L/300 และ L/150 ตามลำดับ การทดสอบจะ



รูปที่ 2 ลักษณะการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน
ASTM C1609 [31]

สิ้นสุดเมื่อการโก่งตัวของคานถึง $L/75$ มิลลิเมตร ทั้งนี้ ผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาใช้วิเคราะห์แรงดัดสูงสุด ความเหนียว พฤติกรรมหลังการแตกร้าวและขนาดของรอยร้าวในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) และการโก่งตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบ กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตามมาตรฐาน ASTM C1609 [31] โดยในกราฟได้กำหนดตัวแปรสำคัญ ได้แก่ P_1 คือ แรงกระทำสูงสุดครั้งแรก (First Peak Load) P_p คือ แรงกระทำสูงสุด (Peak Load) และ $P_{L/150}$ คือ แรงกระทำค้าง ณ ตำแหน่งที่คานมีการโก่งตัวเท่ากับ $L/150$ ขณะที่ δ_1 และ δ_p หมายถึง ค่าการโก่งตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุดครั้งแรกและตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดครั้งแรก (First Peak Strength, f_1), กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Peak Strength, f_p) และกำลังรับแรงดัดค้าง ณ การโก่งตัว $L/150$ (Residual Flexural Strength at Deflection $L/150$, $f_{L/150}$) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) โดยใช้ค่า P_1 , P_p และ $P_{L/150}$ ตามลำดับ โดยที่ b และ h คือ ความกว้างและความลึกของหน้าตัดคานทดสอบ นอกจากนี้ค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, T_{150}^D) หรือ ความเหนียว (Toughness) สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ



รูปที่ 3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ
Deflection และตัวแปรต่าง ๆ จากการทดสอบ
กำลังรับแรงดัด

โก่งตัวตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงตำแหน่งที่การโก่งตัวเท่ากับ $L/150$ ส่วนค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดเทียบเท่า (Equivalent Flexural Strength Ratio, $R_{T,150}^D$) ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญในการออกแบบหน้าตัดคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$f = \frac{PL}{bh^2} \quad (1)$$

$$R_{T,150}^D = \frac{150 \times T_{150}^D}{f_1 bh^2} \times 100\% \quad (2)$$

2.3.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

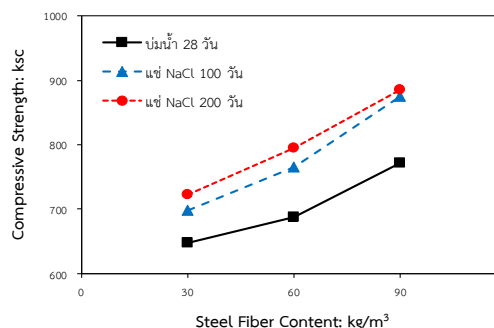
เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมผ่านของคลอไรด์ ลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 150 มิลลิเมตร ถูกนำไปแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% ถูกใช้เพื่อจำลองสภาวะแบบเร่งเป็นเวลา 100 และ 200 วัน หลังจากครบกำหนดเวลา ตัวอย่างถูกทำให้แห้งในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตโดยการเจาะด้วยสว่านที่ระดับความลึก 3, 6, 9 และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผงคอนกรีตที่ได้ถูกนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดด้วยวิธีไทเทรตในห้องปฏิบัติการ

เคมี โดยใช้สารละลาย AgNO_3 ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [33] ผลการทดสอบที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ตรวจพบกับระดับความลึกในเนื้อคอนกรีต (มิลลิเมตร) เพื่อใช้ประเมินแนวโน้มการแพร่กระจายของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตภายใต้สภาวะเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างในช่วงความลึกดังกล่าวมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมการแทรกซึมของคลอไรด์ในบริเวณใกล้ผิว (Near-surface Zone) และใช้สำหรับการเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ระหว่างชุดตัวอย่างโดยไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงลึก หน่วยกำลังในงานวิจัยนี้รายงานในรูป ksc (kg/cm^2) ซึ่งสามารถแปลงเป็นหน่วย SI ได้โดยที่ 1 เมกะปาสคาล ≈ 10.2 ksc ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบกับงานวิจัยสากล

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลของกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (ksc) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m^3) จะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจาก 30 เป็น 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สะท้อนให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในปริมาณเส้นใยระดับกลางถึงสูงที่ทำให้โครงสร้างเนื้อคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น ทั้งนี้ แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของกราฟไม่ได้เป็นเส้นตรงสมบูรณ์ แต่แสดงถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นที่ชะลอตัวเมื่อปริมาณเส้นใยสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อเส้นใยมีปริมาณมากเกินไปอาจเกิดการกระจุกตัวทำให้เกิดโพรงในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (ksc) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m^3)

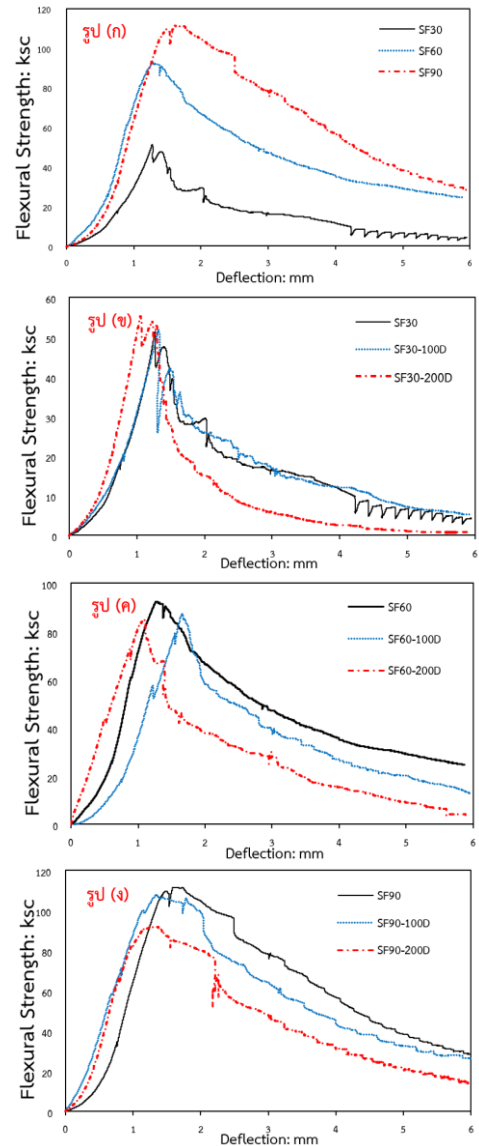
และจำกัดการพัฒนากำลังอัดโดยรวม ผลการศึกษาของ [7] พบว่าปริมาณเส้นใยเหล็กในช่วง 0.5–1% โดยปริมาตร ช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ที่ระดับ 1.5% กำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และที่ระดับ 2% กำลังอัดกลับลดลงเนื่องจากการเกิดการกระจุกตัวของเส้นใยในเนื้อคอนกรีต ผลลัพธ์นี้ยังสอดคล้องกับงาน [14] ที่พบว่าการผสมเส้นใยเหล็กในช่วง 0.5–1.5% โดยปริมาตร ช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยผลการทดลองในส่วนนี้ควรตีความในเชิงแนวโน้ม

สำหรับผลของการแช่ตัวอย่างในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% เป็นเวลา 100 และ 200 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่แช่คลอไรด์มีแนวโน้มสูงกว่าชุดควบคุมในทุกปริมาณเส้นใยที่ทดสอบ อย่างไรก็ตามความแตกต่างดังกล่าวอาจเป็นผลจากการพัฒนากำลังในระยะยาวของคอนกรีตที่มีเกลืออยู่ร่วมกับผลของสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ จึงไม่สามารถสรุปได้โดยตรงว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเกิดจากคลอไรด์เพียงปัจจัยเดียว นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (หัวข้อ 3.3) พบว่าการแทรกซึมของคลอไรด์ส่วนใหญ่จำกัดอยู่ในบริเวณใกล้ผิวของตัวอย่าง

จึงไม่น่าจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดโดยรวมของชิ้นงานทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดที่เกิดขึ้นได้จึงควรพิจารณาในลักษณะของผลรวมจากหลายปัจจัย เช่น อายุคอนกรีตและสภาวะแวดล้อม แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [20], [4] ที่รายงานว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมปอซโซลานสามารถเพิ่มขึ้นได้ในช่วงอายุที่ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวควรตีความร่วมกับผลของอายุคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามหากระยะเวลาในการสัมผัสคลอรีนยาวนานขึ้น อาจส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงได้จากการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ ผลการทดลองในส่วนนี้ควรตีความในเชิงแนวโน้ม เนื่องจากมีข้อจำกัดของการทดลอง เช่น ความแตกต่างของอายุคอนกรีตระหว่างชุดตัวอย่าง

3.2 ผลของกำลังรับแรงดัด

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) และการโก่งตัวของคานแรงดัดสูงสุดครั้งแรก (f_1) หลังจากนั้นกราฟเข้าสู่ช่วงที่กำลังรับแรงดัดสูงสุด (f_p) ซึ่งในหลายกรณีค่า f_1 และ f_p จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อคานเกิดการแตกร้าวกราฟจะแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัว (Softening Behavior) โดยลักษณะการลดลงของกราฟจะขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็ก รูปที่ 5 (ก) แสดงผลของปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมการโก่งตัวและกำลังรับแรงดัดพบว่าคานที่เสริมเส้นใย 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังดัดลดลงอย่างมากหลังเกิดการแตกร้าวสะท้อนว่าสมรรถนะการคงกำลังดัดหลังการแตกร้าวมีจำกัด ในขณะที่คานที่มีปริมาณเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงกราฟที่มีลักษณะราบกว่าหลังจาก



หมายเหตุ: รายละเอียดของแต่ละเส้นกราฟสามารถอ้างอิงได้จาก

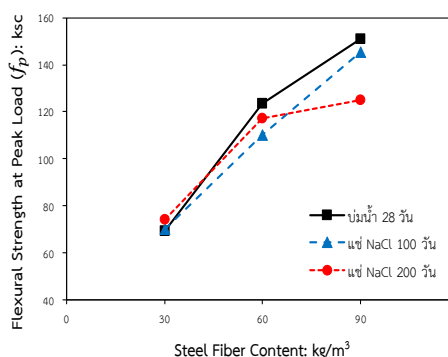
Legend ของรูป

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัด (ksc) และการโก่งตัว (mm)

กราฟถึงจุดสูงสุด โดยยังคงรักษากำลังรับแรงดัดคงค้างไว้ได้ แสดงถึงบทบาทของเส้นใยในการยึดรั้งรอยร้าวและช่วยเพิ่มความเหนียวให้โครงสร้างรูปที่ 5 (ข)-(ง)

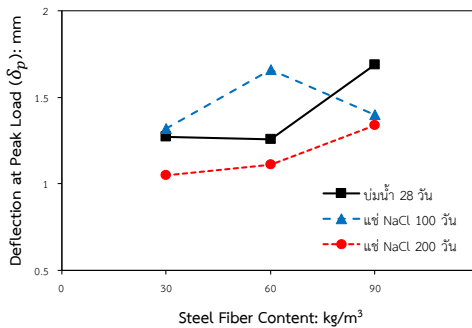
แสดงผลของการเสื่อมสภาพภายใต้การแช่ NaCl ที่ 100 และ 200 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ SF30-100D, SF60-100D และ SF90-100D พบว่าแม้อคอนกรีตที่มีปริมาณเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเริ่มต้นด้วยค่ากำลังดัดสูง แต่หลังแตกร้าวกราฟมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่ากรณีที่มีม่านน้ำเปล่า ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพของเส้นใยเหล็กในบริเวณใกล้ผิว ซึ่งแตกต่างจาก SF30-100D ที่แม้จะมีกำลังโดยรวมต่ำกว่าแต่ความเสียหายจากการกักร่อนยังไม่รุนแรง จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบกราฟมากนัก ผลของการแช่ NaCl ที่ 200 วัน พบว่ามีแนวโน้มแสดงผลกระทบของการเสื่อมสภาพที่เด่นชัดขึ้น โดยเฉพาะใน SF60-200D และ SF90-200D กราฟหลังจากจุดสูงสุดลดลงด้วยความชันมากกว่ากรณีแช่ NaCl 100 วัน และกำลังรับแรงดัดคงค้าง ลดลงชัดเจน ขณะที่ SF30-200D ยังคงแสดงแนวโน้มที่คล้ายกับช่วง 100 วัน แต่ค่ากำลังดัดสูงสุดอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า การเปรียบเทียบผลการทดลองจึงมุ่งเน้นการพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลโดยสรุป กราฟทั้งหมดสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการคงกำลังรับแรงดัดหลังการแตกร้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเสื่อมสภาพจากการสัมผัสคลอไรด์เป็นเวลานานประสิทธิภาพของเส้นใยในการถ่ายโอนแรงจึงอาจลดลงภายใต้สภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยปานกลางถึงสูง (60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ไวต่อการกักร่อนมากกว่า เนื่องจากมีเส้นใยจำนวนมากอยู่ใกล้ผิวสัมผัสกับภายนอก รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยเหล็กพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการ

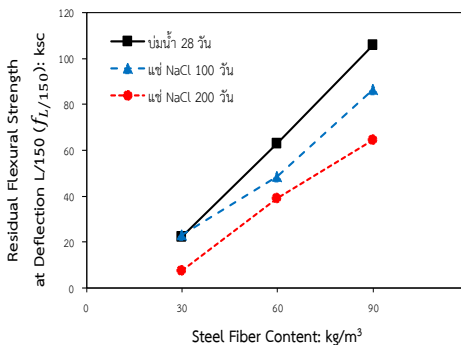


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุด (ksc) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)

แช่สารละลาย NaCl พบว่าในกรณีคานที่เสริมเส้นใย 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระยะเวลาแช่ไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังดัดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในกรณีคานที่เสริมเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่ากำลังดัดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาแช่ใน NaCl เพิ่มขึ้น รูปที่ 7 แสดงค่าการโก่งตัวที่ตำแหน่งแรงสูงสุด (δ_p) พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้คานมีค่าการโก่งตัวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ยกเว้นคานที่ใส่เส้นใย 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่แช่ใน NaCl 100 วัน ซึ่งค่าการโก่งตัวลดลง) แสดงให้เห็นถึงบทบาทของเส้นใยในการยึดรั้งรอยร้าว และทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมการเสียรูปที่เหนียวมากขึ้นทำให้คานยังคงสามารถรับแรงได้ และโก่งตัวต่อไปได้โดยไม่แตกหักอย่างฉับพลันเหมือนคานคอนกรีตธรรมดา ขณะที่รูปที่ 8 แสดงค่ากำลังรับแรงดัดคงค้างที่การโก่งตัว L/150 (fL/150) พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้ค่า fL/150 เพิ่มขึ้น แต่การแช่ใน NaCl ทำให้ค่า fL/150 ลดลง โดยเฉพาะในกรณีของคานที่เสริมเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาจมีความเกี่ยวข้องกับการกักร่อนของเส้นใยที่โซนรับ



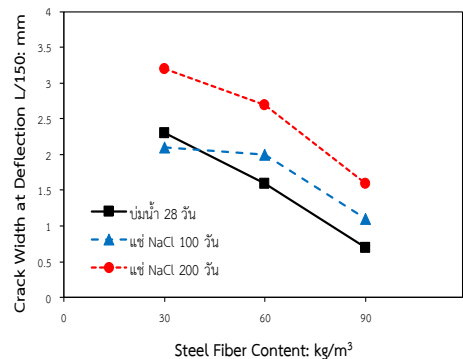
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด (mm) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดคงค้าง ณ ตำแหน่งการโก่งตัว L/150 (ksc) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)

แรงดึง ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตคราบสนิมบริเวณผิว อย่างไรก็ตามหลักฐานดังกล่าวเป็นเพียงการสังเกตภายนอก และยังไม่สามารถยืนยันกลไกการเสื่อมสภาพของเส้นใยในระดับจุลภาคได้โดยตรง (รูปที่ 12)

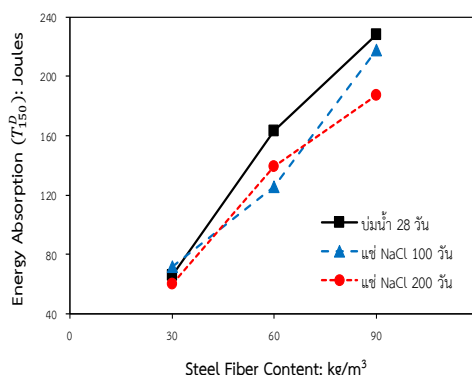
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยร้าวที่การโก่งตัว L/150 กับปริมาณเส้นใยพบว่าความกว้างของรอยร้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแสดงให้เห็นถึงบทบาทของเส้นใยในการจำกัดการกระจายและการขยายตัวของรอยร้าวขณะ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยร้าว ณ ตำแหน่งการโก่งตัว L/150 (mm) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)

เกิดการโก่งตัวไม่ขยายกว้างจนสูญเสียสมรรถนะการรับแรงดัดอย่างไรก็ตามเมื่อคานถูกแซ่ในสารละลาย NaCl เป็นระยะเวลานานขึ้น ความกว้างของรอยร้าวกลับมีค่ามากขึ้นแม้จะมีเส้นใยในปริมาณสูง ซึ่งอธิบายได้ว่าอาจสัมพันธ์กับการกัดกร่อนของเส้นใยที่อยู่ใกล้ผิวโดยตรงแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยล่าสุดที่รายงานว่าพฤติกรรมการแตกร้าวมีบทบาทสำคัญต่อความทนทานของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ [34], [35] นอกจากนี้ [20] รายงานว่าภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ ระยะเวลาในการแช่ย้งานมีแนวโน้มว่าอาจเกิดการกัดกร่อนเส้นใยมากขึ้น และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความกว้างรอยร้าวในคาน SFRC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่พบคราบสนิมบริเวณท้องคาน (รูปที่ 12) และสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากำลังดัดคงค้างและค่าการดูดซับพลังงานที่ลดลง

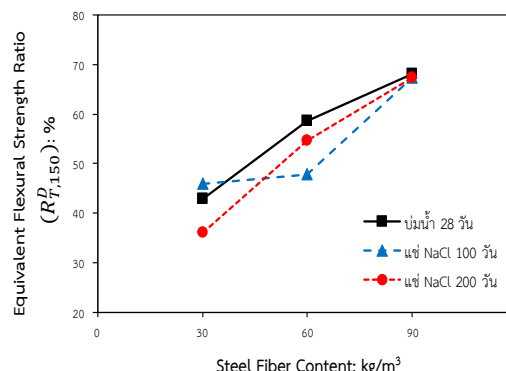
รูปที่ 10 แสดงค่าการดูดซับพลังงาน (Toughness; T_{150}^D) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ Load-deflection ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้คานสามารถดูดซับพลังงานได้สูงขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับพลังงาน (Joules) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)

แสดงถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับคานที่เสริมเส้นใยในปริมาณสูง (60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกแช่ในสารละลาย NaCl พบว่าค่าการดูดซับพลังงานกลับลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่บ่มน้ำธรรมดา อธิบายได้ว่าการสัมผัสกับคลอไรด์ทำให้เส้นใยที่อยู่ใกล้ผิวเกิดการกัดกร่อนบางส่วน แม้ว่าโครงสร้างคอนกรีตภายในยังคงมีความหนาแน่นสูงก็ตาม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะหลังการแตกร้าวในระยะยาวโดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เส้นใยในปริมาณมาก

รูปที่ 11 แสดงอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดเทียบเท่า ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินความเหนียวและความสามารถในการคงสมรรถนะของคอนกรีตหลังแตกร้าว ผลการทดสอบพบว่าค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นแสดงให้เห็นถึงบทบาทของเส้นใยในการยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวและเพิ่มพลังงานที่คานสามารถดูดซับได้หลังแตกร้าว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างตัวอย่างที่บ่มน้ำและตัวอย่างที่แช่ในสารละลาย NaCl ไม่พบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับระยะเวลาในการแช่



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดเทียบเท่า (%) และปริมาณเส้นใยเหล็ก (kg/m³)

ซึ่งสะท้อนว่าการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์ในระยะเวลา 100–200 วัน ยังไม่เพียงพอที่จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเหนียวในภาพรวม แต่การกัดกร่อนของเส้นใยที่ผิว ซึ่งสังเกตได้ภายหลังการทดสอบอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในระยะยาว หากมีการสัมผัสคลอไรด์ต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่านี้

ตารางที่ 5 แสดงสรุปค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังรับแรงดัดที่ศึกษา จากตารางพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กช่วยให้ทุกพารามิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะค่า $f_{L/150}$ และ T_{150}^D ที่สะท้อนถึงความเหนียวและความสามารถในการคงสมรรถนะหลังการแตกร้าว ขณะที่การแช่ใน NaCl แม้ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังสูงสุดมากนัก แต่กลับทำให้ค่าที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมหลังการแตกร้าว เช่น $f_{L/150}$, T_{150}^D และ $R_{T,150}^D$ ลดลงในคานที่เสริมเส้นใยในปริมาณสูง (60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตการเกิดสนิมบนเส้นใยที่ท้องคาน ทั้งนี้ การอภิปรายผลในส่วนนี้เป็นการศึกษาเชิงพรรณนาจากข้อมูลการทดสอบเชิงกล เนื่องจากไม่มีการตรวจสอบเชิงจุลภาคของเส้นใย จึงควรพิจารณาผลในเชิงแนวโน้มมากกว่าการสรุปเชิงกลไกโดยตรง



(ก) SF90-200D



(ข) SF50-200D



(ค) SF30-200D

รูปที่ 12 คราบสนิมของเส้นใยเหล็กบริเวณผิวของท่อนคอนกรีต (ภาพนี้ใช้เพื่อการอ้างอิงเชิงคุณภาพเท่านั้น และไม่ได้ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ)

ตารางที่ 5 สรุปค่าต่างๆจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด

ชื่อตัวอย่าง	f'_c (ksc)	f_p (ksc)	δ_p (mm)	$f_{L/150}$ (ksc)	รอยร้าว ณ การแอ่นตัว $L/150$ (mm)	ค่าการดูดซับ พลังงาน, T_{150}^D (จูล)	$R_{T,150}^D$ (%)
SF30	648	69.23	1.27	22.25	2.3	65.98	42.81
SF60	688	123.34	1.26	62.99	1.6	163.05	58.63
SF90	772	151.01	1.69	105.83	0.7	228.23	68.14
SF30-100D	698	69.91	1.32	23.04	2.1	71.57	45.83
SF60-100D	765	110.28	1.66	48.62	2.0	125.73	47.89
SF90-100D	875	145.23	1.40	86.62	1.1	217.69	67.41
SF30-200D	722	74.16	1.05	7.71	3.2	59.92	36.05
SF60-200D	795	117.18	1.11	38.98	2.7	139.10	54.57
SF90-200D	885	124.91	1.34	64.65	1.6	187.28	67.43

หมายเหตุ: 1 MPa $\approx$ 10.2 ksc

3.3 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1152 [33] โดยทำการเก็บผงคอนกรีตที่ระดับความลึก 3, 6, 9 และ 12 มิลลิเมตร ผลการทดสอบสรุปในตารางที่ 6

ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับระดับความลึก จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นมีแนวโน้มสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณคลอไรด์ที่ตรวจพบในบริเวณใกล้ผิวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างส่วนใหญ่ตรวจพบคลอไรด์เพียงที่ระดับความลึก 3 และ 6

ธนพล ญาณวีรศักดิ์ และคณะ, “การศึกษากำลังรับแรงอัด พฤติกรรมรับแรงดัด และการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กภายใต้สภาวะที่มีคลอไรด์สูง.”

ตารางที่ 6 ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ

ตัวอย่างทดสอบ	ปริมาณคลอไรด์ (% by weight of cement)			
	ระดับความลึก (มม.)			
	3 มม.	6 มม.	9 มม.	12 มม.
SF30-100D	0.32	0.10	0	0
SF30-200D	0.47	0.18	0	0
SF60-100D	0.20	0.05	0	0
SF60-200D	0.32	0.11	0	0
SF90-100D	0.12	0	0	0
SF90-200D	0.19	0.08	0	0

มิลลิเมตร เท่านั้น แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยล่าสุดที่แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการแตกร้าวและโครงสร้างเนื้อคอนกรีตมีอิทธิพลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญ [35] การผสมเส้นใยเหล็กช่วยลดการซึมผ่านและการแพร่กระจายของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเนื้อคอนกรีตจากการเติมเส้นใย อย่างไรก็ตาม กลไกดังกล่าวยังมีโครงสร้างเนื้อคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงมากจนการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในเนื้อคอนกรีตทำได้ยาก ส่งผลให้กระบวนการกัดกร่อนของเส้นใยไม่สามารถดำเนินไปได้เต็มที่ [4] ผลการศึกษาของ [4] พบว่าในตัวอย่าง SFRC ที่แช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% เป็นเวลา 180 วัน การกัดกร่อนของเส้นใยเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวแต่ไม่พบการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลภายใน ระยะการซึมไม่สามารถยืนยันได้โดยตรงจากการทดลองนี้ เนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์จึงถือว่าจำกัดเพียงขั้นต้น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ที่พบว่าการ

แทรกซึมของคลอไรด์ใน SFRC มักจำกัดอยู่ในบริเวณใกล้ผิวในช่วงระยะเวลาการทดสอบ ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้ ($\approx 0.05-0.47\%$ โดยน้ำหนักซีเมนต์) อยู่ในช่วงใกล้เคียงหรือต่ำกว่าค่าขีดวิกฤติที่รายงานในวรรณกรรม ($\approx 0.4-1.0\%$) ซึ่งเป็นช่วงที่อาจเริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีต ทั้งนี้ ผลการทดลองในช่วงเวลา 100-200 วัน ยังไม่แสดงให้เห็นการเสื่อมสภาพของสมบัติเชิงกลอย่างชัดเจนที่พบการกัดกร่อนที่ระดับเพียง 1 มิลลิเมตร เท่านั้น ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนว่า SFRC มีกลไกการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ดี เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยลดความพรุนในระดับจุลภาค อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเส้นใยเหล็กกระจายตัวตั้งแต่ผิวจนถึงภายในโครงสร้างส่วนที่อยู่ใกล้ผิวมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนมากกว่าเพราะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรง

การตรวจสอบหลังการทดสอบกำลังดัดพบการสนิมบริเวณผิวของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 12 (ก)-(ค) โดยตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยสูงมีแนวโน้มพบการสนิมบริเวณผิวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของเส้นใยบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต อย่างไรก็ตาม หลักฐานดังกล่าวเป็นเพียงการสังเกตเชิงคุณภาพ และยังไม่สามารถยืนยันระดับการเสื่อมสภาพของเส้นใยในเชิงปริมาณหรือเชิงจุลภาคได้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบเชิงกล (กำลังอัดและกำลังดัด) แสดงแนวโน้มของการเสื่อมสภาพอย่างชัดเจนภายในช่วงระยะเวลาการทดสอบในช่วงเวลา 200 วัน ซึ่งยืนยันว่าผลกระทบของคลอไรด์ยังจำกัดอยู่ในขั้นต้นเท่านั้น โดยสรุปผลการทดสอบและการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยเหล็กอาจมีส่วนช่วยในการปรับปรุงพฤติกรรมทางด้านทาน

การแทรกซึมของคลอไรด์ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ควรตีความผลในเชิงแนวโน้มภายใต้ข้อจำกัดของการทดลอง ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างในช่วงความลึก 3-12 มิลลิเมตร มุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมการแทรกซึมของคลอไรด์ในบริเวณใกล้ผิว และไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการแพร่ในเชิงลึกของวัสดุ

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็ก (30 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และระยะเวลาแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% (100 และ 200 วัน) ต่อสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลของเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัด: การเพิ่มปริมาณเส้นใยมีแนวโน้มทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงปริมาณเส้นใยระดับปานกลางถึงสูง (60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างที่แช่ในสารละลายคลอไรด์ ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจได้รับอิทธิพลจากผลรวมของอายุคอนกรีตและสภาวะแวดล้อม จึงไม่สามารถสรุปได้โดยตรงว่าคลอไรด์เป็นปัจจัยที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

2. ผลของเส้นใยต่อกำลังรับแรงดัด: การเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตดีขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งในแง่ของค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด ค่าการดูดซับพลังงาน อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า และความกว้างของรอยร้าวที่ลดลง เส้นใยจึงมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการขยายรอยร้าวและเพิ่มความเหนียวของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ปริมาณเส้นใยน้อย (30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ค่ากำลังรับแรงดัดจะลดลงทันทีหลังการแตกร้าวและลดลง

อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยสูงกว่า

3. ผลของการแช่ในสารละลายคลอไรด์ต่อสมบัติเชิงดัด: เมื่อคอนกรีตถูกแช่ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 10 wt% ระยะเวลาที่นานพบว่าค่ากำลังดัดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่เสริมเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรขณะที่ค่ากำลังอัดกลับสูงขึ้น ส่งผลให้ Stiffness ของกราฟ Load-deflection สูงขึ้น แต่สมรรถนะหลังการแตกร้าวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการถ่ายโอนแรงระหว่างรอยร้าว อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถยืนยันกลไกเชิงจุลภาคได้โดยตรง แม้ว่าค่ากำลังดัดคงค้างและค่าความเหนียวจะลดลงในบางกรณี แต่ระดับการลดลงดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่โครงสร้างสามารถคงสมรรถนะได้ อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานระยะยาวภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ควรพิจารณาปัจจัยด้านความทนทานร่วมด้วยในการออกแบบ

4. ปริมาณเส้นใยที่สูงขึ้นมีแนวโน้มสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณคลอไรด์ที่ตรวจพบในบริเวณใกล้ผิวของตัวอย่าง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเนื้อคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นอาจเพิ่มโอกาสที่เส้นใยบางส่วนจะกระจายตัวใกล้ผิวและสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้สามารถสังเกตคราบสนิมบริเวณผิวได้ ทั้งนี้ หลักฐานดังกล่าวเป็นเพียงการสังเกตเชิงคุณภาพ และยังไม่สามารถยืนยันระดับการเสื่อมสภาพของเส้นใยในเชิงปริมาณได้

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงกำลังอัด กำลังดัด



และความเหนียวของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีแนวโน้มช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง สมรรถนะของเส้นใยเหล็กอาจมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะในด้านสมรรถนะหลังการแตกร้าว ทั้งนี้ จากข้อมูลในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถยืนยันกลไกการเสื่อมสภาพในเชิงจุลภาคได้โดยตรง ดังนั้นในการใช้งานจริงโดยเฉพาะโครงสร้างในเขตชายฝั่งหรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงจากคลอไรด์ ควรพิจารณาทั้งปริมาณเส้นใยและมาตรการป้องกันในระดับโครงสร้าง เช่น การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตหรือการป้องกันผิวคอนกรีต เพื่อให้โครงสร้างมีความทนทานในระยะยาว โดยจากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 7–20% เมื่อระยะเวลาแช่คลอไรด์เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่ากำลังดัดค้ำและค่าการดูดซับพลังงานในตัวอย่างที่มีเส้นใย 60 และ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มลดลงประมาณ 10–30% ในกรณีที่แช่คลอไรด์เป็นเวลา 200 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณโครงการวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ปีงบประมาณ 2569 รหัสโครงการวิจัย KUSRCBR69-3001

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Bindiganavile, N. Banthia, and B. Aarup, "Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite," *ACI Materials Journal*, vol. 99, no. 6, pp. 543–548, 2002, doi: 10.14359/12363
- [2] D.-Y. Yoo, N. Banthia, S.-W. Kim, and Y.-S. Yoon, "Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading," *Composite Structures*, vol. 126, pp. 233–245, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.02.058.
- [3] S. Zhang, B. Han, H. Xie, M. An, and S. Lyu, "Brittleness of concrete under different curing conditions," *Materials*, vol. 14, no. 24, 2021, Art. no. 7865, doi: 10.3390/ma14247865.
- [4] S. Abbas, A. M. Saleem, and M. L. Nehdi, "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 429–441, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017.
- [5] V. Marcos-Meson, G. Fischer, C. Edvardsen, T. L. Skovhus, and A. Michel, "Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review," *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 490–501, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051.
- [6] T. Simões, H. Costa, D. Dias-Da-Costa, and E. Julio, "Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced

- concrete matrixes,” *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 548–556, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.104.
- [7] P. S. Song and S. Hwang, “Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 9, pp. 669–673, 2004, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.
- [8] Ş. Yazıcı, 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*, vol. 21, no. 6, pp. 1250–1253, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.
- [9] Y. Ding, H. Liu, F. Pacheco-Torgal, and S. Jalali, “Experimental investigation on the mechanical behaviour of the fiber reinforced high-performance concrete tunnel segment,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 4, pp. 1284–1289, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.10.006.
- [10] M. N. Soutsos, T. T. Le, and A. P. Lampropoulos, “Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres,” *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 704–710, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.
- [11] X. Jian-he, G. Yong-chang, L. Li-sha, and X. Zhi-hong, “Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber,” *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 263–272, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036.
- [12] A. S. Ezeldin and P. N. Balaguru, “Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 415–429, 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:4(415).
- [13] S.-C. Lee, J.-H. Oh, and J.-Y. Cho, “Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers,” *Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 1442–1458, 2015, doi: 10.3390/ma8041442.
- [14] M. C. Nataraja, N. Dhang, and A. P. Gupta, “Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, no. 5–6, pp. 383–390, 1999, doi: 10.1016/S0958-9465(99)00021-9.
- [15] F. Köksal, F. Altun, İ. Yiğit, and Y. Şahin, “Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1874–1880, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017.
- [16] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk,



- and S. Amziane, "Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading," *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 253–262, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035
- [17] P. Soroushian and Z. Bayasi, "Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 88, no. 2, pp. 129–134, 1991, doi:10.14359/1883.
- [18] P. Balaguru, R. Narahari, and M. Patel, "Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 89, no. 6, pp. 541–546, 1992, doi: 10.14359/4019
- [19] C. Ding, D. Gao, and A. Guo, "Analytical methods for stress-crack width relationship and residual flexural strengths of 3D/4D/5D steel fiber reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 346, 2022, Art. no. 128438, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128438.
- [20] V. Afroughsabet and T. Ozbakkaloglu, "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 73–82, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
- [21] D. Y. Yoo and N. Banthia, "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 73, pp. 267–280, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001.
- [22] D.-Y. Yoo, Y.-S. Yoon, and N. Banthia, "Predicting the post-cracking behavior of normal- and high-strength steel-fiber-reinforced concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 477–485, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.006.
- [23] S. Pyo, H. K. Kim, and B. Y. Lee, "Effect of chloride content on mechanical properties of ultra-high performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 84, pp. 175–187, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.006.
- [24] S. Pyo, T. Koh, M. Tafesse, and H.-K. Kim, "Chloride-induced corrosion of steel fiber near the surface of ultra-high performance concrete and its effect on flexural behavior with various thickness," *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 206–213, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.063.
- [25] V. Marcos-Meson, G. Fischer, A. Solgaard, C. Edvardsen, and A. Michel, "Mechanical performance of steel fibre reinforced concrete exposed to wet-dry cycles of chlorides and carbon dioxide," *Materials*, vol. 14, no. 10, 2021, Art. no. 2642,

- doi: 10.3390/ma14102642.
- [26] S. C. Paul, G. P. A. G. van Zijl, and B. Šavija, “Effect of fibers on durability of concrete: A practical review,” *Materials*, vol. 13, no. 20, 2020, Art. no. 4562, doi: 10.3390/ma13204562.
- [27] N. Banthia and A. Bhargava, “Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement,” *ACI Materials Journal*, vol. 104, no. 1, pp. 70–76, 2007, doi: 10.14359/18497.
- [28] G. G. Vaishali and H. S. Rao, “Strength and permeability characteristics of fiber reinforced high performance concrete with recycled aggregates,” *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 55–77, 2012.
- [29] C. Frazão, A. Camões, J. Barros, and D. Gonçalves, “Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 155–166, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.061.
- [30] ASTM C109/C109M-21, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.
- [31] ASTM C1609/C1609M-19, *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019.
- [32] ASTM C1611/C1611M-18, *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2018.
- [33] ASTM International, *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*, ASTM Standard C1152/C1152M-20, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [34] D. Gao, Z. Cao, L. Yang, X. Yang, G. Sun, Y. Li, Y. Zhang, and Y. Zhang, “Performance of steel fiber reinforced concrete mixed with chloride solution and exposed to high humidity environment,” *Construction and Building Materials*, vol. 393, 2023, Art. no. 132122, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132122.
- [35] L. Yang, Z. Zhang, D. Gao, J. Tang, H. Chang, and G. Liu, “Mechanical property evolution and chloride transport of steel fiber-reinforced concrete exposed to simulated marine environments,” *Materials and Structures*, vol. 55, no. 4, pp. 1, 2022, doi: 10.1617/s11527-021-01806-7.