

## สมบัติของเหล็กข้ออ้อยที่ผลิตผ่านกรรมวิธีทางความร้อน SD40T และ SD50T

เอนก ศิริพานิชกร

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร.

กรรมการจรรยาบรรณ และอนุกรรมการมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ สถาปนิก

ประธานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (กว.9) สมอ.

ประธานสาขาวิศวกรรมโยธา วสท.

เหล็กข้ออ้อยในปัจจุบันเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานบังคับ มอก. 24-2548 ซึ่งได้รับการปรับปรุงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย ที่ มอก.24-2536 สาระสำคัญประการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานของเหล็กข้ออ้อยในครั้งนี้ ได้แก่การอนุญาตให้มีการผลิตเหล็กข้ออ้อยโดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment rebar หรือ tempcored rebar) โดยกำหนดให้ผู้ผลิตต้องจัดทำเครื่องหมายที่เหล็กข้ออ้อยโดยใช้สัญลักษณ์ "T" ประทับเป็นตัวนูนถาวรบนเนื้อเหล็กตามหลังชั้นคุณภาพที่ผลิตขึ้น ดังนั้นเหล็กข้ออ้อยที่ผลิตด้วยกรรมวิธีนี้ในชั้นคุณภาพ SD40 และ SD50 จึงปรากฏสัญลักษณ์ตัวนูนเป็น SD40T และ SD50T ตามลำดับ ดังที่กำหนดไว้ตามข้อ 7.1 ในหมวดของเครื่องหมายและฉลากของมาตรฐานบังคับฉบับดังกล่าว

ภายหลังจากอนุญาตให้ผลิตเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐานนี้เมื่อปี พ.ศ. 2548 จนถึงปัจจุบัน ผู้ผลิตส่วนใหญ่ได้ปรับมาใช้วิธีการผลิตเหล็กข้ออ้อยด้วยกรรมวิธีความร้อนทั้งสิ้น ทำให้เหล็กข้ออ้อยการผลิตในชั้นคุณภาพ SD40 และ SD50 ที่ปราศจากตัวนูนอักษร "T" มีปริมาณน้อย การพิจารณาถึงข้อกำหนดในรายการประกอบแบบ (specification) ที่ระบุชั้นคุณภาพไว้เป็นเพียง SD40 และ SD50 จึงเป็นปัญหาด้านการยอมรับจากเจ้าของโครงการ ทั้งส่วนราชการและเอกชนที่เกี่ยวข้อง ทั้ง ๆ ที่การระบุอักษร "T" เป็นเพียงทำให้ผู้ใช้ทราบถึงกรรมวิธีการผลิตเท่านั้น ไม่ได้เป็นชั้นคุณภาพของเหล็กข้ออ้อยแต่อย่างใด ทั้งนี้มีประเด็นในข้อสงสัยประกอบไปด้วย การต่อเหล็กเส้น (bar splices) โดยการเชื่อมไฟฟ้า (welding) หรือ การทำเกลียวเพื่อทำข้อต่อทางกล (mechanical coupler) การดัดโค้ง (bending) และความทนทานต่อไฟ (fire resistance)

### 1. การผลิตเหล็กเส้นโดยกรรมวิธีความร้อน

หลักการผลิตและขั้นตอนการผลิตเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนนั้น จะเริ่มต้นด้วยกระบวนการรีดร้อนเช่นเดียวกับเหล็กข้ออ้อยปกติ โดยภายหลังจากการรีดร้อนแทนสุดท้ายที่ทำให้เหล็กข้ออ้อยมีขนาดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว เหล็กเส้นดังกล่าวจะผ่านกระบวนการทำให้เย็นโดยการฉีดสเปรย์น้ำ เหล็กเส้นจะเกิดการเย็นตัวเร็วกว่าการเย็นในอากาศปกติ จนได้การเย็นตัวที่เหมาะสมแล้วจึงหยุดการฉีดสเปรย์น้ำ โครงสร้างของเหล็กเส้นบริเวณขอบด้านนอกที่โดนน้ำจึงเกิดเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสที่มีความแข็งสูง ในขณะที่โครงสร้างบริเวณใจกลางของเหล็กเส้นจะยังคงมีความร้อนอยู่และยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส บริเวณแกนกลางของเหล็กเส้นก็จะเริ่มเย็นตัวในบรรยากาศ และแผ่ความร้อนจากด้านในออกมาบริเวณผิวของเหล็กข้ออ้อย ด้วยความร้อนดังกล่าวจึงทำให้เกิดกระบวนการอบคลายความเครียดของโครงสร้างบริเวณขอบของเหล็กเส้นที่มีความแข็ง ในขณะที่โครงสร้างบริเวณแกนกลางของเหล็กเส้นก็จะ

เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง และทำที่สุดจึงได้เหล็กเส้นที่มีสมบัติทางกลตามที่ต้องการ และเรียกเหล็กเส้นที่ผลิตชนิดนี้ว่าเป็น “TEMP-CORE” ซึ่งแสดงถึงกรรมวิธีที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณขอบ และอบคลายความเครียดตกค้างการแผ่ความร้อนจากแกนกลางออกมาด้านนอก จัดเป็นกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ประเภทหนึ่ง ด้วยกระบวนการผลิตดังที่กล่าวมานี้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหล็กเส้นที่มีการเติมธาตุ C และ Mn ที่น้อยกว่าการผลิตเหล็กข้ออ้อยด้วยการป้อนแต่งทางเคมีปกติ โดยที่เหล็กข้ออ้อยยังมีสมบัติทางกลทั้งในด้านความแข็งแรง และความเหนียวที่เท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตามเหล็กเส้นที่ผลิตจากกรรมวิธีทางความร้อนจะมีความแข็งแรงมากที่ขอบมากกว่าแกนใน จึงควรหลีกเลี่ยงการกลึงหรือลดขนาดเหล็กอย่างมากก่อนนำไปใช้งาน

## 2. การต่อเหล็กเส้น

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง วสท.1008-38 [3] ข้อ 4513 อนุญาตให้ทำการทาบเหล็ก (lapped splice) ได้เฉพาะเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่โตกว่า 36 มม. ซึ่งหากเหล็กเส้นมีขนาดโตกว่าที่กำหนดไว้ ต้องทำการต่อเหล็กเส้นด้วยการต่อเชื่อม (welding) หรือการใช้ข้อต่อทางกล (mechanical coupler) ซึ่งอาจมีผลกระทบโดยตรงหากใช้เหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

### 2.1 การต่อเชื่อมของเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (SD40T และ SD50T)

เหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน SD40 T และ SD50T จะใช้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กภายหลังการรีดร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในเหล็กเส้นแทนการเพิ่มธาตุผสมลงในเนื้อเหล็ก จึงทำให้มีส่วนประกอบทางเคมี ที่ได้แก่ Carbon และ Manganese ต่ำกว่าเหล็กข้ออ้อย SD40 และ SD50 ซึ่งในการเชื่อมเหล็กที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่า (carbon equivalent (CE) ได้แก่  $\%C + \%Mn/6$ ) สูง จะทำการเชื่อมได้ยากกว่าเหล็กที่มีค่า CE ต่ำ จึงทำให้เหล็กข้ออ้อย SD40T และ SD50T สามารถนำไปใช้ในงานเชื่อมได้ดีกว่าเหล็กข้ออ้อย SD40 และ SD50 อย่างไรก็ตามเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวของรอยเชื่อมในเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งรอยเชื่อมเย็นตัวเร็วกว่าการอบอ่อนจึงมีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยร้าวขนาดเหล็ก จึงควรพิจารณาดำเนินการป้องกันโดยการป้อนทั้งในช่วงก่อนให้ความร้อน (pre-heat) และหลังจากเสร็จสิ้นการเชื่อม (post-heat)

นอกจากนี้ ในการเชื่อมเหล็กนั้นกำลังของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับชนิดลวดเชื่อม วิธีการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม ความสามารถของผู้เชื่อม โดยปกติความแข็งแรงของจุดที่เชื่อมจะสูงกว่าความแข็งแรงของเหล็กเดิมมาก อันเนื่องมาจากเลือกใช้ลวดเชื่อม และสารเติม ที่เมื่อเชื่อมแล้วจะให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่าเหล็กเดิม โดยเมื่อทำการเชื่อม ลวดเชื่อมจะหลอมละลายรวมกับเนื้อเหล็กเดิม ทำให้ได้รอยเชื่อมที่แข็งแรงกว่าเนื้อเหล็กทั้งสองข้าง ซึ่งตรงกับข้อกำหนดของ วสท.1008-38 ข้อ 4513 (ค) 3 ที่ระบุว่า การต่อเชื่อมอย่างสมบูรณ์ต้องต่อชน (butt joint) ดังแสดงในรูปที่ 1 และเชื่อมเพื่อให้สามารถรับแรงดึงอย่างน้อยร้อยละ 125 ของกำลังครากระบุนของเหล็กเส้นนั้น ซึ่งจำเป็นที่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมให้ได้ตามที่ระบุไว้ดังกล่าวข้างต้นด้วย



รูปที่ 1 การเชื่อมชนของเหล็กข้ออ้อย [2] แบบร่องรูปอักษร V

## 2.2 การใช้ข้อต่อทางกลเพื่อต่อเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (SD40T และ SD50T)

จากความเข้าใจของผู้ใช้งานเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน พบว่าความแข็งแรงของเหล็กข้ออ้อยตามชั้นคุณภาพต้องใช้งานเต็มหน้าตัดของเหล็กเส้น เหล็กเส้นที่ผ่านการลดขนาดโดยการกลึงจะมีผลทำให้ได้กำลังเท่ากับกำลังของเหล็กด้านกลางภายในที่อาจมีกำลังที่ต่ำกว่า แต่จากเทคโนโลยีและการคำนวณเพื่อหาระยะเกลียวสั้นที่สุดที่ทำให้ระบบเกลียวมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้งานโดยไม่เกิดความเสียหายจากแรงต่าง ๆ โดยจะพิจารณาจากกำลังหรือความแข็งแรงของจุดต่อ ค่าความแข็งแรงและค่ากำลังดึงของจุดต่อที่ใช้ข้อต่อจะขึ้นอยู่กับขนาดของเกลียว ความแข็งแรงของเหล็กข้ออ้อย พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นในการรับแรงดึงและแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวของเกลียวเหล็กเส้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการต่อเหล็กเสริมโดยข้อต่อทางกลที่ได้รับความนิยม ได้แก่ ระบบ soft cold forging ซึ่งเป็นการขึ้นรูปเย็นที่ปลายชิ้นงานทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเดิม ก่อนจะนำไปทำเกลียว เพื่อชดเชยพื้นที่ในการรับแรงที่สูญเสียไปจากการทำเกลียว ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นเหล็ก SD40 SD50 หรือ SD40T SD50T จึงสามารถใช้การเชื่อมต่อโดยข้อต่อทางกลได้โดยไม่มีผลกระทบต่อองค์อาคารหรือโครงสร้างอาคาร ทั้งนี้การต่อเหล็กเสริมนี้ต้องปฏิบัติตามข้อ กำหนดของ วสท.1008-38 ข้อ 4513 (ค) 4 ที่ระบุว่า การต่อโดยใช้ข้อต่อทางกลอย่างสมบูรณ์ต้องสามารถรับแรงดึงหรือแรงอัดอย่างน้อยร้อยละ 125 ของกำลังครากกระบวนของเหล็กเส้นนั้นซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรอยต่อให้ได้ตามที่ระบุไว้ดังกล่าวข้างต้นด้วยเช่นกัน

## 3. การตัดโค้ง

การตัดเหล็กเส้นเพื่อทำเป็นของมาตรฐานในส่วนปลายของเหล็กเสริมเพื่อใช้ฝังยึดในคอนกรีตสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก วสท.1008-38 ข้อ 3403 (ก) กำหนดว่าต้องใช้วิธีดัดเย็น (cold bend) เท่านั้น และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กสุดของวงโค้งที่ดัดตาม วสท.1008-38 ข้อ 3402 ได้กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของการดัดเป็น 6 เท่า 8 เท่า และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นที่มีขนาด 6-25 มม. 28-36 มม. และ 44-57 มม. ตามลำดับ และมีขนาดโตกว่าที่กำหนดไว้สำหรับการทดสอบการดัดโค้ง (cold bend test) ที่ระบุใน ตารางที่ 9 ข้อ 9.6 ใน มอก.24-2548 ซึ่งหากการทดสอบการดัดโค้งตามข้อกำหนดของ มอก.24-2548 แล้ว สามารถใช้เป็นงานเหล็กเสริมคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย



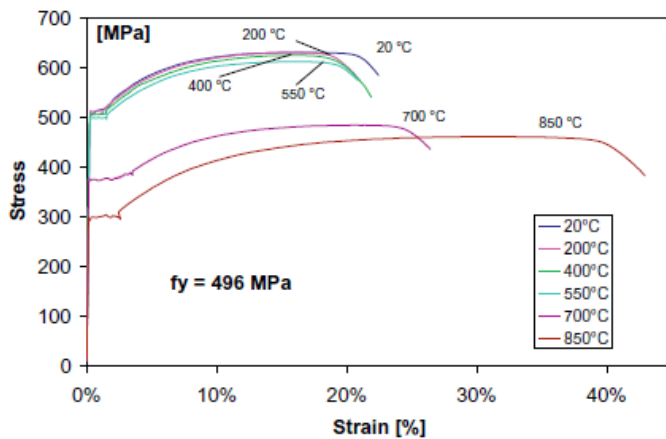
รูปที่ 2 การดัดโค้งของเหล็กข้ออ้อย

นอกจากนั้นสำหรับการกำหนดรอยต่อก่อสร้างขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก วสท. 1008-38 ข้อ 3403

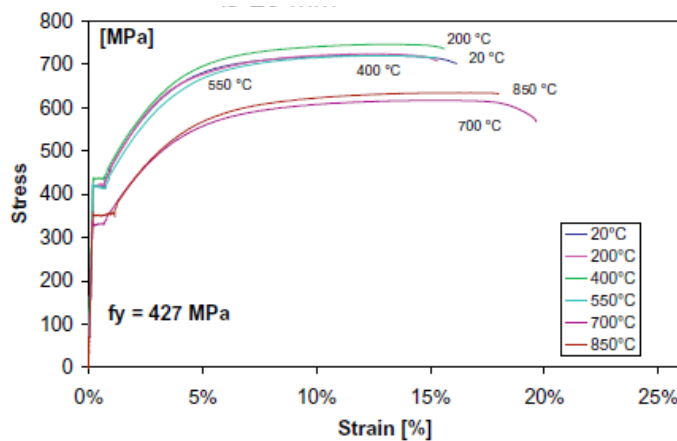
(ข) ยังห้ามไม่ให้มีการตัดปลายเหล็กเส้นข้างที่โผล่จากคอนกรีตในที่ นอกจากจะแสดงไว้ในแบบหรือวิศวกรอนุญาตเป็นพิเศษ

#### 4. ความทนทานต่อไฟ (fire resistance)

ผลงานวิจัยของ R.Felicetti [7] ที่ทำการศึกษาเพื่อหาค่ากำลังของเหล็กเส้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (tempered core rebar) เปรียบเทียบกับเหล็กเส้นที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel rebar) โดยนำไปอบ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ และปล่อยให้เย็นตัว จากนั้นจึงมาทำการทดสอบแรงดึง ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3



(ก) เหล็กเส้นที่ผลิตโดยกรรมวิธีความร้อน

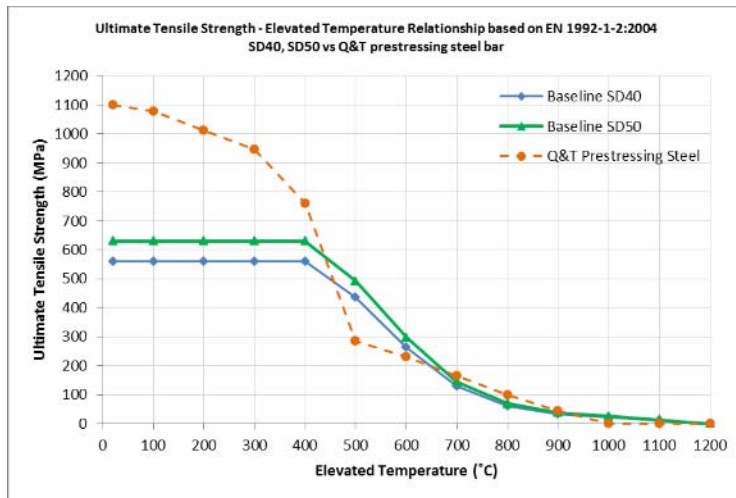


(ข) เหล็กเส้นที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน

รูปที่ 3 หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเส้นที่ถูกรอบ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 700°C และ 850°C กำลังดึงของเหล็กเส้นทั้ง 2 ประเภท จะลดลงมากเมื่อเทียบกับกำลังที่อุณหภูมิ 20°C โดยกำลังครากของเหล็กเส้นที่ผ่านกรรมวิธีความร้อน จะลดลงจาก 496 MPa เหลือประมาณ 300 MPa ที่อุณหภูมิ 850°C ส่วนกำลังครากของเหล็กเส้นผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนจะลดลงจาก 427 MPa เหลือ

ประมาณ 320 MPa ที่อุณหภูมิ 850°C ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะพบว่ากำลังของเหล็กเส้นทั้งสองประเภท หลังถูกอบที่ 850°C จะมีกำลังครากลดลงเหลือประมาณ 300-350 MPa จึงมีความแตกต่างด้านสมบัติการรับแรงดึงไม่มากอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4 กำลังดึงของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตกับลวดอัดแรง [6]

จากรูปที่ 4 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของเหล็กข้ออ้อยและลวดอัดแรง (prestressing wire) กำลังสูงมากที่ผลิตจากระบวนการลดขนาดดึงเย็น (cold drawn) ณ อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่า ค่ากำลังดึงของเหล็กข้ออ้อยจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และจะเริ่มลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C ในขณะที่กำลังของลวดอัดแรง จะลดลงตั้งแต่อุณหภูมิ 200 -300 °C ดังนั้นเหล็กเสริมคอนกรีตจึงมีสมบัติความทนทานต่อไฟได้ดีกว่าลวดอัดแรง

เมื่อนำเหล็กเส้นมาใช้เสริมกำลังของคอนกรีต และมีระยะหุ้ม (concrete covering) อย่างเพียงพอตามประเภทขององค์อาคารดังปรากฏอยู่ใน วสท. 1008-38 ข้อ 3407 แล้ว จะมีอัตราการทนทานต่อสภาพแวดล้อมเพียงพอและหากมีความจำเป็นที่ต้องการสมรรถนะต่อกรรณไฟ วสท. 1008-38 ข้อ 3407 (ข) ได้กำหนดให้มีระยะหุ้มไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด โดยบทบัญญัติเกี่ยวกับอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับกฎกระทรวงฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2549) [4] ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ที่กำหนดความหนาแน่นน้อยสุดของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมสำหรับแต่ละชนิดของโครงสร้างเอาไว้ เช่น เสาหรือคานต้องมีระยะหุ้ม 40 มม. เพื่อให้โครงสร้างหลักดังกล่าวมีอัตราการทนไฟได้ไม่น้อยกว่า สามชั่วโมง หรือแผ่นพื้นที่ต้องมีระยะหุ้มอย่างน้อย 20 มม. เพื่อให้มีอัตราการทนไฟได้ไม่น้อยกว่าสองชั่วโมง

## 5. ข้อเสนอแนะในการใช้เหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1. เหล็กข้ออ้อยที่มีสัญลักษณ์ตัวนูน "T" เป็นเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเท่านั้นโดยยังคงมีชั้นคุณภาพตามที่กำหนดไว้ใน มอก. 24-2548 ทุกประการ
2. สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งประกอบไปด้วยกำลังดึง ความยืด และการดัดโค้ง ไม่แตกต่างกับเหล็กข้ออ้อยที่ผลิตจากการปรุงแต่งด้วยธาตุ

3. สมรรถนะในการต่อเหล็กเส้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนไม่มีความแตกต่างกับเหล็กข้ออ้อยที่ผลิตจากการปรุงแต่งด้วยธาตุ ทั้งนี้ต้องปฏิบัติให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ และต้องจัดให้มีการทดสอบกำลังดึงของจุดต่อให้เป็นไปตามมาตรฐานและหลักปฏิบัติที่ดี
4. ความทนทานต่อไฟไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและหากนำไปใช้เสริมคอนกรีตและกำหนดระยะหุ้มให้เป็นไปตามมาตรฐานและกฎหมายจะมีสมรรถนะในการต้านทานไฟที่ดี ไม่แตกต่างกัน
5. ในคราวการปรับปรุงมาตรฐานผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตครั้งต่อไป คณะกรรมการวิชาการคณะที่ 9 จะพิจารณาขอขยายและการกำหนดสำหรับเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนให้ชัดเจนขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้มีความมั่นใจและเข้าใจผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ให้มากยิ่งขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- (1) มอก. 24-2548, “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต :เหล็กข้ออ้อย”, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, พ.ศ.2548
- (2) มยผ.1103-52, “ มาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีต”, กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, พ.ศ. 2522
- (3) วสท. 1008-38, “มาตรฐานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง”, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, พ.ศ.2538
- (4) กฎกระทรวง ฉบับที่ 60 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 123 ตอนที่ 70 ก, กรกฎาคม 2549
- (5) IFI Technical Bulletin, “Calculating Thread Strength” , The Industrial Fasteners Institute of Independence USA, March 2009.
- (6) European Standard EN 1992-1-2:2004 (E) : Eurocode 2,” Design of Concrete Structures – Part 1-2, General rules – Structural Fire Design, 2004.
- (7) R. Felicetti [2] et al., “Construction and Building Materials 23” page 3548, 2009.