

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมงานคอนกรีตอัดแรงสำหรับโครงสร้างของอาคารหรือสิ่งก่อสร้างทั่วไป เช่น อาคารสูง ไซโล คลังสินค้า กำแพงกันดิน และสะพาน เป็นต้น ทั้งประเภทคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดก่อน (Pre-Tensioning) และคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดภายหลัง (Post-Tensioning)
- 1.2 มาตรฐานนี้ระบุไว้เพื่อให้การก่อสร้างอาคารและส่วนต่างๆ ของอาคารคอนกรีตอัดแรงเป็นไปตามหลักวิชาการ ประหยัด ปลอดภัย มีความมั่นคงแข็งแรงและคงทน
- 1.3 มาตรฐานนี้ใช้หน่วยสากล SI (International System Units) เป็นหลัก และใช้ค่าการแปลงหน่วยของแรง 1 กิโลกรัมแรงเท่ากับ 10 นิวตัน

2. นิยาม

“คอนกรีต” หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยส่วนผสมของวัสดุประสานเช่นปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอชโซลาน มวลรวมละเอียดเช่นทราย มวลรวมหยาบเช่นหินหรือกรวด และน้ำ โดยมีหรือไม่มีสารเคมีหรือแร่ผสมเพิ่ม

“คอนกรีตอัดแรง” หมายถึง คอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กเสริมรับแรงดึงสูงหรือวัสดุเสริมแรงอื่นๆ ที่ทำให้เกิดหน่วยแรง โดยมีขนาดและการกระจายของหน่วยแรงตามต้องการเพื่อที่จะหักล้างหรือลด หน่วยแรงดึงในคอนกรีตอันเกิดจากน้ำหนักบรรทุก

“กำลังอัดประลัยของคอนกรีต” หมายถึง กำลังอัดสูงสุดตามแกนยาวที่แท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร สามารถรับได้ หากไม่ได้ระบุเป็นอย่างอื่นกำลังอัดดังกล่าวในมาตรฐานนี้ ให้ใช้กำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์

“เหล็กเสริม” หมายถึง เหล็กที่ใช้ฝังในเนื้อคอนกรีตเพื่อเสริมกำลังขึ้น

“เหล็กเสริมอัดแรง (Prestressing Steel)” หมายถึง เหล็กเสริมกำลังสูงที่ใช้ฝังในเนื้อคอนกรีตเพื่อการอัดแรง อาจเป็นลวดเหล็กกล้า (Wire) ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว (Strand) เหล็กเส้นอัดแรง (Bar) ก็ได้

“การสูญเสียของการอัดแรง (Prestressing Losses)” หมายถึง การที่ลวดเหล็กหรือเหล็กเสริมที่ใช้อัดแรงชนิดอื่น ๆ สูญเสียหน่วยแรงดึงตามขั้นตอนต่าง ๆ เนื่องจากความโค้งงอของเหล็กเสริมอัดแรง การเข้าที่ของลิ่มสมอยึด การหดตัวอีลาสติก การคืบและหดตัวของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง

“การคลายแรงดึง (Relaxation)” หมายความว่า การสูญเสียแรงดึงตามระยะเวลาของเหล็กเสริมอัดแรงที่ถูกดึงให้มีระยะยืดคงที่ โดยคิดเป็นร้อยละของแรงดึงเริ่มแรกที่ทำให้กับเหล็กเสริมอัดแรง

“ลวดเหล็กกล้า (Wire)” หมายความว่า ลวดเหล็กคาร์บอนสูงที่สร้างขึ้นโดยวิธีดึงเย็น

“ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว (Strand)” หมายความว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำลวดเหล็กกล้าตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไป ตีเกลียวเข้าด้วยกันให้มีระยะช่วงเกลียวสม่ำเสมอและผ่านกระบวนการคลายหน่วยแรง (Stress-Relieved) ก่อนม้วนเป็นขด

“การคลายหน่วยแรง (Stress-Relieved)” หมายความว่า กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของลวดเหล็กกล้าเพื่อสำหรับใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง

“ระยะส่งถ่ายแรง (Transmission Length)” หมายความว่า ความยาวของชิ้นส่วนที่ต้องใช้ในการถ่ายแรงดึงเริ่มแรกจากเหล็กเสริมอัดแรง ไปสู่คอนกรีต

3. มาตรฐานอ้างอิง

3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงประกอบด้วย

3.1.1 มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ.1101: มาตรฐานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1.2 มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ.1106: มาตรฐานงานเสาเข็ม

3.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ (มาตรฐานบังคับ)

3.1.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 95: ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

3.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 420: ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

3.1.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1179: ข้อกำหนดในการทำคอนกรีตอัดแรง

3.1.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135: etailoyจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต

3.2 ยกเว้นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 ตามข้อ 3.1.3 หากจะนำมาตรฐานอื่นมาใช้ นอกเหนือจากที่ระบุในข้อ 3.1 มาตรฐานดังกล่าวต้องได้รับการรับรองจากคณะกรรมการควบคุมอาคารหรือสภาวิศวกร

3.3 หากข้อกำหนดในมาตรฐานนี้ขัดแย้งกับมาตรฐานที่อ้างอิงในแต่ละส่วน ให้ถือข้อกำหนดในมาตรฐานนี้เป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้จะต้องไม่ขัดกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 ตามข้อ 3.1.2 ซึ่งเป็นข้อกำหนดหลัก

4. ข้อกำหนดสำหรับวัสดุก่อสร้าง

4.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ต้องมีกำลังอัดประลัยไม่ต่ำกว่าที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง หากไม่ได้ระบุไว้ในแบบก่อสร้างให้ใช้ไม่ต่ำกว่า 40 เมกะปาสกาล (400 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดก่อน และ 32 เมกะปาสกาล (320 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดภายหลัง ทั้งนี้เมื่อทำการอัดแรง คอนกรีตต้องมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบ แต่ไม่น้อยกว่า 24 เมกะปาสกาล (240 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ดังนี้

4.1.1 ปูนซีเมนต์ ให้ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามมยพ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1.2 มวลรวมละเอียด ให้ใช้มวลรวมละเอียดที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามมยพ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1.3 มวลรวมหยาบ ให้ใช้มวลรวมหยาบที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามมยพ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1.4 น้ำ ให้ใช้น้ำสำหรับผสมคอนกรีตที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามมยพ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1.5 สารผสมเพิ่ม ให้ใช้สารผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามมยพ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.2 ลวดเหล็กกล้า

ลวดเหล็กกล้าที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงจะต้องมีความสะอาด ไม่เป็นสนิมขุม และมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.95: ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ลวดเหล็กกล้าชนิดไม่คลายหน่วยแรง ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมวลต่อเมตรเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและค่าลักษณะเฉพาะ

ของลวดเหล็กกล้าชนิดไม่คลายหน่วยแรง

(ข้อ 4.2.1)

เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ (มิลลิเมตร)	กำลังดึงประลัยระบุ ¹⁾ (นิวัตตันต่อตารางมิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัดระบุ (ตารางมิลลิเมตร)	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด		
			ค่าระบุ ³⁾ (กรัม)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (กรัม)	แรงดึงสูงสุด ⁴⁾ (กิโลนิวัตตัน)	แรงดึงพิสูจน์ ร้อยละ 0.1 (กิโลนิวัตตัน)	รัศมีการดัดโค้ง (มิลลิเมตร)
2.5	1,960	4.91	38.5	± 1.25	9.62	7.7	7.5
2.5	1,860	4.91	38.5	± 1.25	9.13	7.3	7.5
3	1,860	7.07	55.5	± 1.5	13.1	10.5	7.5
3	1,770	7.07	55.5	± 1.5	12.5	10.0	7.5
4	1,770	12.6	98.9	± 2.0	22.3	17.8	10
4	1,670	12.6	98.9	± 2.0	21.0	16.8	10
5	1,770	19.6	154	± 3.1	34.7	27.8	15

ตารางที่ 1 (ต่อ) เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและค่าลักษณะเฉพาะ
ของลวดเหล็กกล้าชนิดไม่คลายหน่วยแรง

(ข้อ 4.2.1)

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ระบุ (มิลลิเมตร)	กำลังดึง ประลัยระบุ ¹⁾ (นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้า ตัดระบุ (ตาราง มิลลิเมตร)	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด		
			ค่าระบุ ³⁾ (กรัม)	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อน (กรัม)	แรงดึง สูงสุด ⁴⁾ (กิโลนิวตัน)	แรงดึงพิสูจน์ ร้อยละ 0.1 (กิโลนิวตัน)	รัศมีการตัด โค้ง (มิลลิเมตร)
5	1,670	19.6	154	± 3.1	32.7	26.2	15
6	1,770	28.3	222	± 3.7	50.1	40.1	15
6	1,670	28.3	222	± 3.7	47.3	37.8	15
7	1,670	38.5	302	± 4.3	64.3	51.4	20
7	1,570	38.5	302	± 4.3	60.4	48.3	20
8	1,570	50.3	395	± 5.9	79.0	63.2	20
8	1,470	50.3	395	± 5.9	73.9	59.1	20

ที่มา : มอก. 95: ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

- หมายเหตุ**
- 1) กำลังดึงประลัยระบุใช้ประโยชน์เพื่อการเรียกเท่านั้น และคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดระบุกับค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด โดยพิเศษถึง 10 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรที่ใกล้เคียงที่สุด
 - 2) กำหนดให้ใช้ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงแทนกำลังดึงประลัยระบุ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อความยาวมีค่าน้อย
 - 3) ค่ามวลต่อความยาวคำนวณจากความหนาแน่นของเหล็กซึ่งยอมรับกันเท่ากับ 7.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 - 4) เพื่อการพิสูจน์ความเหมาะสมของวัสดุ ซึ่งมีการนำไปใช้เฉพาะงาน (ตัวอย่างเช่น ไม้หมอนรถไฟ เสาเข็ม หรือถังกู้) กำหนดให้แรงที่ร้อยละ 1 ของความยืดรวมต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด

4.2.2 ลวดเหล็กกล้าชนิดคลายหน่วยแรง ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมวลต่อเมตรเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและค่าลักษณะเฉพาะ
ของลวดเหล็กกล้าชนิดคลายหน่วยแรง
(ข้อ 4.2.2)

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ระบุ (มิลลิเมตร)	กำลังดึง ประลัยระบุ ¹⁾ (นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้า ตัดระบุ (ตาราง มิลลิเมตร)	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด			รัศมีการตัด โค้ง (มิลลิเมตร)
			ค่าระบุ ³⁾ (กรัม)	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อน (กรัม)	แรงดึง สูงสุด ⁴⁾ (กิโลนิว ตัน)	แรงดึงพิสูจน์		
						ร้อยละ ^{4) 5)} ⁶⁾ 0.1 (กิโลนิว ตัน)	ร้อยละ ^{4) 5)} ⁶⁾ 0.2 (กิโลนิว ตัน)	
4	1,770	12.6	98.9	± 2.0	22.3	18.5	19.0	10
4	1,670	12.6	98.9	± 2.0	21.0	17.5	17.9	10
5	1,770	19.6	154	± 3.1	34.7	28.8	29.5	15
5	1,670	19.6	154	± 3.1	32.7	27.2	27.8	15
6	1,770	28.3	222	± 3.7	50.1	41.6	42.6	15
6	1,670	28.3	222	± 3.7	47.3	39.3	40.2	15
7	1,670	38.5	302	± 4.3	64.3	53.4	54.7	20
7	1,570	38.5	302	± 4.3	60.4	50.1	51.3	20
8	1,670	50.3	395	± 5.9	84.0	69.7	71.4	20
8	1,570	50.3	395	± 5.9	79.0	65.6	67.1	20
9	1,470	63.6	499	± 7.2	93.5	74.8	76.7	25
10	1,570	78.5	617	± 8.6	123	98.6	101	25
10	1,470	78.5	617	± 8.6	115	92.3	94.3	25
12.2	1,570	117	918	± 10.5	184	147	151	30
12.2	1,470	117	918	± 10.5	172	138	141	30

ที่มา มอก. 95: ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

หมายเหตุ

- 1) กำลังดึงประลัยระบุใช้ประโยชน์เพื่อการเรียกเท่านั้น และคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดระบุกับค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด โดยปัดเศษถึง 10 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรที่ใกล้เคียงที่สุด
- 2) กำหนดให้ใช้ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงแทนกำลังดึงประลัยระบุ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อความยาวมีค่าน้อย
- 3) ค่ามวลต่อความยาวคำนวณจากความหนาแน่นของเหล็กซึ่งยอมรับกันเท่ากับ 7.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

- 4) สำหรับลวดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 8 มิลลิเมตร ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงที่ร้อยละ 0.1 และร้อยละ 0.2 จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับร้อยละ 80 และร้อยละ 82 ของค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุดตามลำดับ
- 5) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) อาจใช้ค่า 205 ± 10 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
- 6) แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.1 เป็นค่าที่ใช้ทดสอบ ส่วนแรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.2 เป็นเพียงข้อเสนอแนะ (ตาม ISO 6934-1) เว้นแต่แบบหรือรายการประกอบแบบจะระบุเป็นอย่างอื่น

4.3 ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว

ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงจะต้องมีความสะอาด ไม่เป็นสนิมขุม และมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.420: ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมวลต่อเมตรเป็นไปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและค่าลักษณะเฉพาะ
ของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว
(ข้อ 4.3)

ชนิด ¹⁾	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ ¹⁾ (มิลลิเมตร)	กำลังดึง ประลัย ระบุ ¹⁾ (นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้า ตัดระบุ ²⁾ (ตาราง มิลลิเมตร)	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด		
				ค่าระบุ (กรัม)	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อน (ร้อยละ)	แรงดึง สูงสุด ^{2) 3) 4)} (กิโลนิว ตัน)	แรงดึงพิสูจน์ ²⁾	
							ร้อยละ ^{3) 4)} ⁵⁾ 0.1 (กิโลนิว ตัน)	ร้อยละ ^{4) 5)} 0.2 (กิโลนิว ตัน)
2 เส้น 2x2.90	5.8	1,910	13.2	104		25.2	21.4	22.3
3 เส้น 3x2.40	5.2	1,770	13.2	107		24.0	20.4	21.1
3x2.90	6.2	1,960				26.7	22.7	23.5
3x2.90	6.2	1,910	19.8	155	+4	37.8	32.1	33.2
3x3.50	7.5	1,770	29.0	228	-2	51.2	43.5	45.0
		1,860				54.0	45.9	47.0
7 เส้น	9.3	1,720	51.6	405		88.8	72.8	75.4
	9.5	1,860	54.8	432		102	83.6	86.6
	10.8	1,720	69.7	546		120	98.4	102

ตารางที่ 3 (ต่อ) เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตรและค่าลักษณะเฉพาะ
ของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว
(ข้อ 4.3)

ชนิด ¹⁾	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ ¹⁾ (มิลลิเมตร)	กำลังดึง ประลัย ระบุ ¹⁾ (นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้า ตัดระบุ ²⁾ (ตาราง มิลลิเมตร)	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด		
				ค่าระบุ (กรัม)	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อน (ร้อยละ)	แรงดึง สูงสุด ^{2) 3) 4)} (กิโลนิว ตัน)	แรงดึงพิสูจน์ ²⁾	
							ร้อยละ ^{3) 4)} ⁵⁾ 0.1 (กิโลนิว ตัน)	ร้อยละ ^{4) 5)} 0.2 (กิโลนิว ตัน)
	11.1	1,860	74.2	580		138	113	117
	12.4	1,720	92.9	729		160	131	136
	12.7	1,860	98.7	774		184	151	156
	15.2	1,720	139	1,101		239	196	203
	15.2	1,860	139	1,101		259	212	220
7 เส้น อัด แน่น	12.7	1,860	112	890	+4 -2	209	178	184
	15.2	1,820	165	1,295		300	255	264
	18.0	1,700	223	1,750		380	323	334
19 เส้น	17.8	1,860	208	1,652		387	317	329
	19.3	1,860	244	1,931		454	372	386
	20.3	1,810	271	2,149		491	403	417
	21.8	1,810	313	2,482		567	465	482

ที่มา มอก. 420: ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

- หมายเหตุ**
- ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ และกำลังดึงประลัยระบุใช้สำหรับเรียกชื่อเท่านั้น
 - กำลังดึงประลัยระบุได้จากการคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดระบุกับค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุด (ดูหมายเหตุ 5)
 - ผลทดสอบแต่ละค่าต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าลักษณะเฉพาะ
 - กำหนดให้ใช้ค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงแทนกำลังดึงประลัยระบุ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อความยาวมีค่าน้อย
 - แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.1 เป็นค่าที่กำหนดให้ใช้ทดสอบ ส่วนแรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.2 เป็นเพียงข้อเสนอแนะ (ตาม ISO 6934-1) เว้นแต่แบบหรือรายการประกอบแบบจะระบุเป็นอย่างอื่น

4.4 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (Reinforcing Steel)

คุณลักษณะของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงนอกเหนือจากเหล็กเสริมอัดแรงให้เป็นไปตาม มยผ. 1103: มาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

4.5 ท่อร้อยลวด (Sheathing)

ท่อร้อยลวดต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะคงรูป ไม่เสียหายขณะเทคอนกรีต สามารถกันน้ำจากภายนอกท่อร้อยลวดไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมอัดแรงได้ วัสดุที่ใช้ทำท่อร้อยลวดต้องไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีตโดยรอบท่อร้อยลวดหรือน้ำปูนภายในท่อร้อยลวดได้ ในกรณีสำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดภายหลังที่ผู้ออกแบบระบุให้มีการอัดน้ำปูนภายในท่อร้อยลวด (Bonded) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยลวดต้องใหญ่กว่าขนาดเหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตรและพื้นที่หน้าตัดภายในท่อร้อยลวดจะต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดสุทธิของเหล็กเสริมอัดแรง

4.6 น้ำปูน (Grouting)

น้ำปูนที่ใช้อัดในท่อร้อยลวดจะต้องมีกำลังอัดเพียงพอ เพื่อประโยชน์ในการถ่ายแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริมอัดแรง ต้องมีสมบัติไม่หดตัว ไม่ทำให้ความคงทนของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงต่ำลง และมีความสามารถในการไหลได้เพียงพอที่จะอัดน้ำปูนเข้าในท่อร้อยลวดจนเต็มได้ ในกรณีที่ท่อร้อยลวดมีพื้นที่หน้าตัดเกินกว่า 4 เท่าของเหล็กเสริมอัดแรง สามารถใช้มวลรวมละเอียดมาเป็นส่วนผสมได้แต่ต้องไม่มีสมบัติด้อยลงกว่าเดิม โดยส่วนผสมที่ใช้จะต้องมีสมบัติเป็นไปตาม มยผ. 1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก และน้ำปูนที่แข็งตัวแล้วต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 17 เมกะปาสกาล (170 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) ที่อายุ 7 วัน และ 28 เมกะปาสกาล (280 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) ที่อายุ 28 วัน เมื่อทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร

5. ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือในการก่อสร้าง

5.1 สมอยึด (Anchorage)

สมอยึดและอุปกรณ์ประกอบต้องสามารถถ่ายแรงได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของแรงดึงประลัยระบุของเหล็กเสริมอัดแรง และต้องสามารถยึดเหล็กเสริมอัดแรงไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งาน

5.2 หัวต่อ (Couple)

หัวต่อต้องสามารถถ่ายแรงได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของแรงดึงประลัยระบุของเหล็กเสริมอัดแรง และต้องสามารถยึดเหล็กเสริมอัดแรงไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งาน

5.3 อุปกรณ์ดึงเหล็กเสริมอัดแรง

อุปกรณ์ดึงเหล็กเสริมอัดแรงประกอบด้วย เครื่องปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) และแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ซึ่งต้องมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

5.3.1 ต้องจับยึดเหล็กเสริมอัดแรงได้อย่างปลอดภัยและมั่นคง

5.3.2 ในกรณีที่มีการดึงเหล็กเสริมอัดแรงพร้อมกันตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไป ต้องสามารถทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในลวดเหล็กแต่ละเส้นเท่ากัน

5.3.3 ต้องสามารถให้แรงดึงตามท่อนอกแบบไว้ได้และคงแรงดึงนั้นไว้ตลอดระยะเวลาที่ต้องการ

5.3.4 ต้องสามารถควบคุมการเพิ่มแรงดึงอย่างช้าๆ โดยไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงทุติยภูมิ (Secondary Stresses) ซึ่งเป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมอัดแรง สมอยึด หรือคอนกรีต

5.4 เครื่องปัมน้ำปูน

เครื่องปัมน้ำปูนจะต้องสามารถอัดน้ำปูนเข้าสู่ท่อร้อยลวดได้อย่างสม่ำเสมอและสามารถคงแรงดันของเครื่องปัมน้ำปูนไว้ได้ตลอดระยะเวลาที่ต้องการ

6. ข้อกำหนดว่าด้วยหน่วยแรงที่ยอมให้และการสูญเสียของการอัดแรง

6.1 หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ให้ใช้ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตดังต่อไปนี้

6.1.1 หน่วยแรงอัดในคอนกรีตชั่วคราวทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริมอัดแรงก่อนการสูญเสียของการอัดแรง ต้องไม่เกินร้อยละ 60 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

6.1.2 หน่วยแรงอัดในคอนกรีตหลังการสูญเสียของการอัดแรง ต้องไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

6.2 หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ให้ใช้ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตดังต่อไปนี้

6.2.1 หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตในขณะที่มีการถ่ายแรงต้องไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 4 แต่ยอมให้เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 4 ได้ในระยะเวลาสั้นซึ่งไม่เกิน 48 ชั่วโมง และค่าดังกล่าวต้องไม่เกิน 2 เท่าของค่าที่กำหนดในตารางที่ 4 ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลพินิจของวิศวกรผู้ออกแบบ

ตารางที่ 4 ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะที่มีการถ่ายแรง

(ข้อ 6.2.1)

หน่วยเป็นเมกะปาสกาล (กก./ตร.ซม.)

U_t	หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะที่มีการถ่ายแรง
20	1.0 (10)
30	1.2 (12)
40	1.4 (14)
50	1.5 (15)

โดย U_t คือ ค่ากำลังอัดประลัยระบุของคอนกรีตเมื่อเริ่มถ่ายแรง

6.2.2 หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตเนื่องจากการตัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5 ค่าหน่วยแรงดึงเหล่านี้ใช้ได้สำหรับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (Monolithic) แต่ต้องไม่เกิดหน่วยแรงดึงที่รอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป

หน่วยแรงดึงที่กำหนดในตารางที่ 5 อาจยอมให้มีค่าเพิ่มขึ้นอีกไม่เกิน 1.75 เมกาปาสกาล (17.5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) โดยต้องมีผลการทดสอบที่แสดงว่าหน่วยแรงดึงที่ใช้ต้องไม่เกิน 3 ใน 4 ของหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักจนปรากฏรอยร้าวแรก และใช้ในกรณีดังต่อไปนี้

- 6.2.2.1 สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงล่วงหน้า ต้องมีค่าหน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่เกิดจากการดึงเหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่า 10 เมกาปาสกาล (100 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
- 6.2.2.2 เหล็กเสริมอัดแรงจะต้องกระจายแรงเป็นอย่างดี ตลอดภาคตัดบริเวณที่รับแรงดึง
- 6.2.2.3 สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงล่วงหน้า ในกรณีที่มีความจำเป็นส่วนคอนกรีตที่รับแรงดึงจะต้องเสริมเหล็กเพิ่มเติม

ตารางที่ 5 ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในคอนกรีตเนื่องมาจากแรงดัด
(ข้อ 6.2.2)

หน่วยเป็นเมกาปาสกาล (กก./ตร.ซม.)

ลักษณะของแรงกระทำ	ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เนื่องจากแรงดัด					
	ชนิดดึงล่วงหน้า U_w			ชนิดดึงล่วงหน้า U_w		
	40	50	60	40	50	60
สำหรับการใช้งานปกติ	2.2 (22)	2.5 (25)	2.8 (28)	1.4 (14)	1.5 (15)	1.6 (16)
สำหรับการขนส่งหรือการยกขึ้นหรือการใช้งานช่วงสั้นๆ	3.0 (30)	3.4 (34)	3.7 (37)	2.0 (20)	2.2 (22)	2.4 (24)

โดยที่ U_w คือ ค่ากำลังอัดประลัยระบุของคอนกรีต

6.2.3 หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงหล่อสำเร็จให้เป็นไปตาม มยพ.1106: มาตรฐานงานเสาเข็ม

6.3 หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ให้ใช้ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรงดังต่อไปนี้

- 6.3.1 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงต้องไม่เกินร้อยละ 80 ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง หรือร้อยละ 90 ของกำลังคราก แล้วแต่ค่าใดจะน้อยกว่า
- 6.3.2 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงทันทีที่ถ่ายแรงไปให้คอนกรีตต้องไม่เกินร้อยละ 70 ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง หรือร้อยละ 80 ของกำลังคราก แล้วแต่ค่าใดจะน้อยกว่า
- 6.3.3 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดดึงที่หลังที่สมอยึดและหัวต่อทันทีที่ถ่ายแรงจะต้องไม่เกินร้อยละ 70 ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง

6.4 การสูญเสียของการอัดแรง (Prestressing Losses)

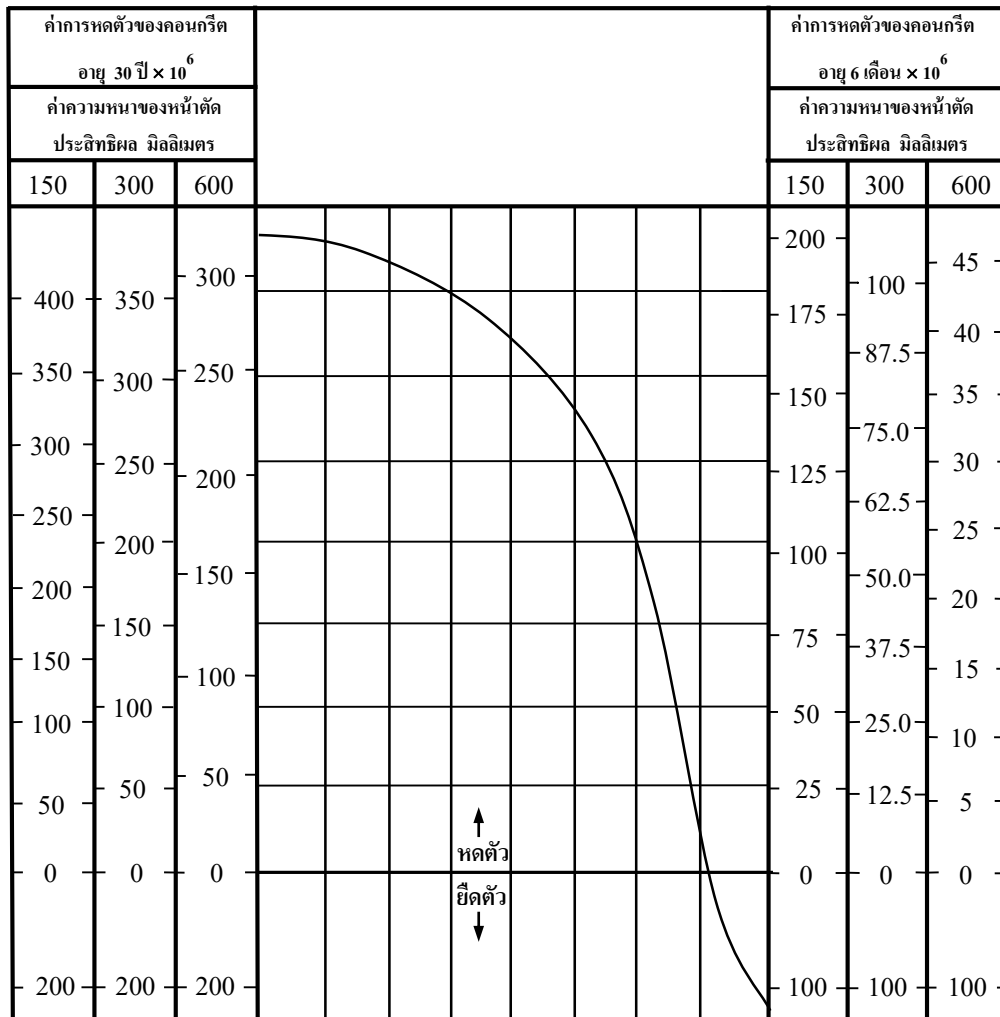
6.4.1 การเสื่อมแรงดึงในลวดเหล็กเนื่องจากการคลายแรงดึง (Relaxation) ในการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง ให้ใช้ค่าการเสื่อมแรงระยะยาวในการดึงเหล็กเสริมอัดแรง โดยคำนวณจากผลคูณของค่าการคลายแรงดึงที่ได้จากการทดสอบของลวดเหล็กที่ 1,000 ชั่วโมงกับตัวประกอบคงที่ของการคลายแรงที่กำหนดในตารางที่ 6 วิธีทดสอบหาค่าการคลายแรงให้เป็นไปตามภาคผนวก ก. ของมอก. 1179 เล่ม 3 โดยตัวประกอบค่าคงที่ของการคลายแรงนี้ได้พิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการคลายแรงดึงของลวดเหล็กตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ผลจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการคืบ (Creep) ของคอนกรีต ในกรณีที่เป็นงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดก่อนจะรวมถึงผลของการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของคอนกรีตเมื่อเริ่มถ่ายแรง สำหรับการเสื่อมแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ผิดปกติ (Abnormal Relaxation) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณี เช่น เมื่อเหล็กเสริมอัดแรงมีอุณหภูมิสูงหรือรับแรงในแนวขวางสูง ในกรณีนี้ให้ยึดถือข้อมูลจากเอกสารซึ่งเป็นที่ยอมรับหรือขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเป็นพิเศษ

ตารางที่ 6 ตัวประกอบค่าคงที่ของการคลายแรง

(ข้อ 6.4.1)

ชนิดของงานคอนกรีตอัดแรง	ตัวประกอบค่าคงที่ของการคลายแรง
ชนิดดึงลวดก่อน	1.5
ชนิดดึงลวดภายหลัง	2.0

6.4.2 การเสื่อมแรงดึงในลวดเหล็กเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ให้คำนวณค่าดังกล่าวจากค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของเหล็ก ในกรณีที่ผู้ผลิตลวดเหล็กไม่ได้กำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ให้ใช้ค่านี้เท่ากับ 205 ± 10 จิกะปาสกาล โดยใช้ค่าการหดตัวของคอนกรีตตามรูปที่ 1 ค่าการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและระยะเวลาการหดตัว โดยสมมติขั้วมือเป็นค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาการหดตัว 6 เดือน ส่วนสมมติขั้วมือเป็นค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาการหดตัว 30 ปี รูปนี้สามารถใช้กับความหนาของหน้าตัดประสิทธิผลตั้งแต่ 150 ถึง 600 มิลลิเมตร



ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ เป็นร้อยละ

รูปที่ 1 ค่าการหดตัวของคอนกรีต

(ข้อ 6.4.2)

6.4.3 การเสื่อมแรงดึงเนื่องจากการคืบ (Creep) ของคอนกรีต ความเครียดของคอนกรีตที่อายุ 30 ปี (ϵ_{cc}) หาได้จากสมการดังนี้

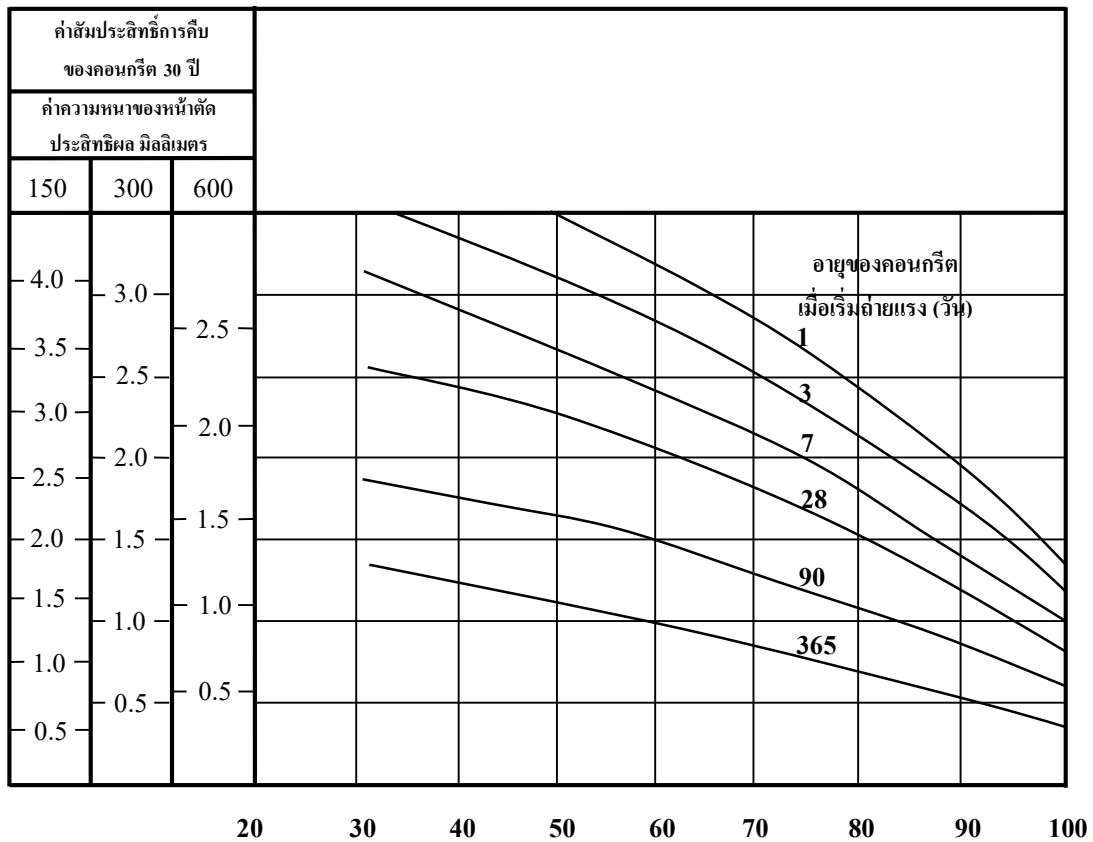
$$\epsilon_{cc} = \frac{\text{หน่วยแรงอัดของคอนกรีต} \times \alpha}{E_t} \quad (1)$$

เมื่อ E_t คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อเริ่มถ่ายแรง โดยนับอายุเป็นวัน

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่อายุ 30 ปี หาได้จากรูปที่ 2

ในรูปที่ 2 ได้ระบุค่าความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ ในกรณีที่เป็นหน้าตัดสม่ำเสมอ คำนีให้คำนวณจาก 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดขวางหารด้วยเส้นรอบรูป ถ้ามีความจำเป็นต้องการหาค่าการคืบของคอนกรีตที่อายุน้อยกว่า ให้ใช้สมมุติฐานว่าคอนกรีตมีค่าการคืบคิดเป็นร้อยละ 40 60 และ 80

ของค่าการคืบของคอนกรีตอายุ 30 ปีที่ช่วงเวลา 1 เดือน 6 เดือน และ 30 เดือนหลังจากเริ่มถ่ายแรง ตามลำดับ ทั้งนี้คอนกรีตต้องอยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่คงที่



ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ เป็นร้อยละ

รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีต

(ข้อ 6.4.3)

6.4.4 การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทาน

สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดภายหลัง การเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมอัดแรงทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงและท่อร้อย หรือตัวคั่นต่างๆ ในขณะที่เหล็กเสริมอัดแรง ความเสียดทานนี้ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะของตำแหน่งลวดเหล็กที่ห่างจากเครื่องดึง

นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อร้อย อาจเกิดจากแนวการวางตัวของท่อร้อยคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดไว้โดยไม่ได้ตั้งใจ ในทางปฏิบัติมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากแนวระดับที่กำหนดไม่ว่าแนวของเหล็กเสริมอัดแรงในท่อร้อยจะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งหรือทั้งเส้นตรงและเส้นโค้ง ซึ่งทำให้เกิดจุดสัมผัสเพิ่มขึ้นระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับผนังของท่อร้อย

ทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (P_{jx}) ที่ระยะ x เมตร ห่างจากเครื่องดึง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{jx} = P_j e^{-Kx} \quad (2)$$

เมื่อ P_j คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เครื่องดึง

e คือ ฐานของลอการิทึมแบบเนเปียร์ (Napierian Logarithms) มีค่าเท่ากับ 2.718

K คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณการสูญเสียของแรงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทาน (ขึ้นอยู่กับประเภทของท่อร้อยหรือปลอกหุ้มและอื่นๆ) ซึ่งค่า K ต่อความยาว 1 เมตรในสมการ (2) โดยทั่วไปต้องไม่น้อยกว่า 33×10^{-4} แต่ถ้าเป็นท่อหรือปลอกหุ้มที่แข็งแรงและยึดอย่างแน่นหนาและสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวในระหว่างเทคอนกรีต ให้ใช้ค่า K เท่ากับ 17×10^{-4} สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงเคลือบจารบีร้อยในท่อพลาสติกอาจจะใช้ค่า K เท่ากับ 25×10^{-4} ได้ ส่วนค่าอื่นๆ นอกจากที่ได้กล่าวมานี้ อาจจะใช้ได้โดยมีผลการทดสอบที่เหมาะสมประกอบ

6.4.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากความโค้งของเหล็กเสริมอัดแรง

ค่าแรงในเหล็กเสริมอัดแรง (P_{cx}) ที่ระยะ x เมตรใดๆ ตามความโค้งที่วัดจากจุดสัมผัสเริ่มต้น โค้งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$P_{cx} = P_c e^{-\mu x/R} \quad (3)$$

เมื่อ P_c คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่จุดสัมผัสเริ่มต้น โค้งด้านใกล้เครื่องดึง

e คือ ฐานของลอการิทึมแบบเนเปียร์ (Napierian Logarithms) มีค่าเท่ากับ 2.718

R คือ รัศมีความโค้งของเหล็กเสริมอัดแรง เป็นเมตร

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดย μ มีค่าดังต่อไปนี้

= 0.55 สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงในท่อร้อยที่เป็นคอนกรีต

= 0.30 สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงในท่อร้อยที่เป็นเหล็กกล้า

= 0.25 สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงในท่อร้อยที่เป็นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี

= 0.20 สำหรับลวดเหล็กไร้สนิมในท่อร้อยที่เป็นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี

= 0.12 สำหรับลวดเหล็กไร้สนิมในท่อร้อยพลาสติก

6.4.6 การสูญเสียแรงดึงในลวดเหล็กเนื่องจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของคอนกรีต

ให้คำนวณหาค่าดังกล่าวเมื่อเริ่มถ่ายแรง ค่านี้ขึ้นอยู่กับค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดสอบหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตให้ใช้ค่าที่กำหนดในตารางที่ 7 แทน ในกรณี

ที่ผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงไม่ได้กำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ให้ใช้ค่านี้เท่ากับ $205,000 \pm 10,000$ เมกาปาสกาล

ตารางที่ 7 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

(ข้อ 6.4.6)

หน่วยเป็นเมกาปาสกาล (กก./ตร.ซม.)

ชนิดของคอนกรีต	กำลังอัดประลัยต่ำสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก $\varnothing 150 \times 300$ มม.	ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ¹⁾
ค4	24 (240)	23,000 ¹⁾ (230,000)
ค4-5	25 (250)	23,500 ¹⁾ (235,000)
ค5	28 (280)	24,900 ¹⁾ (249,000)
ค6	30 (300)	25,800 ¹⁾ (258,000)
ค7	32 (320)	26,600 ¹⁾ (266,000)
ค8	35 (350)	27,800 ¹⁾ (278,000)
ค9	38 (380)	29,000 ¹⁾ (290,000)
ค10	40 (400)	29,100 ³⁾ (291,000)
ค11	45 (450)	29,200 ²⁾ (292,000)
ค12	50 (500)	30,400 ²⁾ (304,000)

หมายเหตุ 1) จำนวนจากสูตรใน *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-M)*

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \quad (\text{หน่วยเป็นเมกาปาสกาล})$$

2) จำนวนจากสูตรของ *Carrasquillo, Nilson และ Slate*

$$E_c = 3,320 \sqrt{f'_c} + 6,900 \quad (\text{หน่วยเป็นเมกาปาสกาล})$$

3) ค่าเฉลี่ยระหว่างช่วง (*Interpolation*) ของค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ค9 และ ค11

6.4.6.1 สำหรับงานคอนกรีตชนิดดิ่งลวดก่อน ค่าการสูญเสียแรงดิ่งในเหล็กเสริมอัดแรงเมื่อเริ่มถ่ายแรงให้คำนวณจากผลคูณของอัตราส่วนมอดูลาร์ (*Modular Ratio*) และค่ากำลังอัดของคอนกรีต

6.4.6.2 สำหรับงานคอนกรีตชนิดดิ่งลวดภายหลัง ถ้ามีการดิ่งเหล็กเสริมอัดแรงไม่พร้อมกัน จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดิ่งในเหล็กเสริมอัดแรงในอัตราที่ก้าวหน้าระหว่างการถ่ายแรงเนื่องจากแรงดิ่งที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ให้คำนวณค่านี้จากกึ่งหนึ่งของผลคูณของอัตราส่วนมอดูลาร์และค่ากำลังอัดของคอนกรีตหรือคำนวณจากค่าการสูญเสียแรงดิ่งในเหล็กเสริมอัดแรงโดยพิจารณาถึงลำดับการดิ่งลวดเหล็กเป็นสำคัญ

6.4.7 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดจากสมอยึดเหล็กเสริมอัดแรง (Anchorage Take-Up)

สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดภายหลัง ควรเผื่อค่าการสูญเสียแรงดึงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมอัดแรงในสมอยึดเมื่อเกิดการถ่ายแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับชิ้นส่วนสั้นๆ ค่าที่เผื่อควรมีการตรวจสอบในขณะที่ก่อสร้างด้วย

6.5 ระยะส่งถ่ายแรง (Transmission Length) ในงานคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดก่อนองค์ประกอบที่มีผลต่อระยะส่งถ่ายแรงมีดังต่อไปนี้

- (1) การอัดแน่นของคอนกรีต
- (2) ขนาดและประเภทของเหล็กเสริมอัดแรง
- (3) กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต
- (4) การผิดรูปและสภาพผิวของเหล็กเสริมอัดแรง

6.5.1 ระยะส่งถ่ายแรงอาจจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับสภาพของหน้างานหรือโรงงานที่ผลิต ถ้าเป็นไปได้ ระยะส่งถ่ายแรงควรได้จากการทดสอบสำหรับสภาพหน้างาน หรือ โรงงานที่ผลิตนั้นๆ

6.5.2 ในกรณีที่ไม่ต้องทำให้เหล็กเสริมอัดแรงเกิดการยึดหน่วงหรือยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตที่ปลายทั้งสองข้าง อาจทำได้โดยใช้ท่อร้อยหรือพันเทป โดยระยะส่งถ่ายแรงให้คิดจากปลายของส่วนที่ไม่มีการยึดหน่วงหรือยึดเหนี่ยว

6.5.3 ในกรณีที่ไม่มีหลักฐานการทดสอบสำหรับคำนวณระยะส่งถ่ายแรง ระยะส่งถ่ายแรงสำหรับแรงดึงเริ่มแรกของเหล็กเสริมอัดแรงไม่เกินร้อยละ 75 ของความต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่จุดคราก เมื่อคอนกรีตที่ปลายทั้งสองของชิ้นส่วนอัดแน่นดี สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$l_t = \frac{K_t \phi}{\sqrt{f_{ci}}} \quad (4)$$

เมื่อ l_t คือ ระยะส่งถ่ายแรง เป็นมิลลิเมตร

f_{ci} คือ กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเมื่อเริ่มถ่ายแรง เป็นเมกะปาสกาล

ϕ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางระบุของเหล็กเสริมอัดแรง เป็นมิลลิเมตร

K_t คือ สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายแรง ขึ้นอยู่กับประเภทของเหล็กเสริมอัดแรงดังนี้

- (1) ลวดเหล็กแบบธรรมดา แบบมีรอยย้า และแบบมีรอยหยัก ให้ใช้เท่ากับ 600
- (2) ลวดเหล็กแบบมีรอยหยักและมีความสูงของรอยหยักไม่น้อยกว่า 0.15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ให้ใช้เท่ากับ 400
- (3) ลวดเหล็กตีเกลียวชนิด 7 เส้นหรือมากกว่า ให้ใช้เท่ากับ 240

6.6 ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมอัดแรง

ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงในชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงทุกชนิดจะต้องมากเพียงพอที่จะให้มวลรวมขนาดใหญ่สุดสามารถแทรกผ่านไปได้ทุกจุดในแบบหล่อเมื่อทำการสั่น

6.6.1 สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดค้ำจุนล่วงหน้าก่อน ให้ใช้ข้อกำหนดเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมในงานคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท.1001 – 34 ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงระยะส่งถ่ายแรงให้เพียงพอตามที่กล่าวในข้อ 6.5 ด้วย

6.6.2 สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงชนิดค้ำจุนภายหลัง

6.6.2.1 กรณีวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวตรง ระยะห่างระหว่างท่อน้อยกว่าค่าน้อยกว่าค่ามากที่สุดของค่าดังต่อไปนี้

(1) ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ + 5 มิลลิเมตร

(2) ขนาดภายในตามแนวตั้งของท่อน้อยกว่าค่ามากที่สุด

(3) ขนาดภายในตามแนวราบของท่อน้อยกว่าค่ามากที่สุด

ในกรณีที่มีการใช้เครื่องสั่นคอนกรีตชนิดหัวจี้ ควรเผื่อระยะห่างระหว่างท่อน้อยกว่าค่ามากที่สุด เพื่อให้หัวจี้ของเครื่องสั่นคอนกรีตสอดผ่านเข้าไปได้ กรณีมีท่อน้อยกว่า 2 ชั้นขึ้นไป ควรจัดท่อน้อยกว่าให้อยู่ในแนวตั้งเดียวกันเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อความสะดวกในการทำงาน

6.6.2.2 กรณีวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวโค้ง ให้ใช้ระยะห่างระหว่างท่อน้อยกว่าค่าน้อยกว่าค่าดังต่อไปนี้ในการป้องกันคอนกรีตระหว่างท่อน้อยกว่าค่ามากที่สุด

(1) ในระนาบของท่อน้อยกว่าค่า ให้ใช้ระยะที่มากกว่าระหว่างค่าที่กำหนดตามตารางที่ 8 หรือค่าที่กำหนดไว้ในข้อ 6.6.2.1

(2) ในแนวตั้งฉากกับระนาบของท่อน้อยกว่าค่า ให้ใช้ค่าที่กำหนดไว้ในข้อ 6.6.2.1

6.6 ระยะหุ้มเหล็กเสริมอัดแรง

ระยะหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงของงานคอนกรีตอัดแรงทั้งชนิดค้ำจุนล่วงหน้าก่อนและค้ำจุนภายหลัง ให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

7. ข้อกำหนดในการก่อสร้าง

7.1 คอนกรีต

การทำงานคอนกรีต ให้ปฏิบัติตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

7.2 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

การทำงานเหล็กเสริมคอนกรีต ให้ปฏิบัติตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1103: มาตรฐานงานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

7.3 เหล็กเสริมอัดแรง

7.3.1 การติดตั้งเหล็กเสริมอัดแรงและท่อน้อยกว่า ให้ติดตั้งตามแบบก่อสร้างโดยให้คลาดเคลื่อนได้ดังนี้

7.3.1.1 ให้ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่กำหนดในแนวราบไม่เกิน 20 มิลลิเมตร และในแนวตั้งไม่เกิน 5 มิลลิเมตร

7.3.1.1 พื้นที่แบกทานระหว่างสมอชิดกับคอนกรีตต้องตั้งฉากกับเหล็กเสริมอัดแรง คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 1 องศา

7.3.2 การดึงเหล็กเสริมอัดแรง (Stressing)

7.3.2.1 การดึงลวดเหล็กและลวดเหล็กตีเกลียว ในกรณีที่เป็นแบบดึงเหล็กภายหลัง ถ้าความยาวของลวดเหล็กและลวดเหล็กตีเกลียวยาวเกิน 30 เมตร ให้ดึงทั้งสองปลายและให้ดึงพร้อมๆ กัน หากไม่ได้มีการระบุในแบบรายละเอียดให้ทำการดึงด้วยแรงดึงร้อยละ 75 ของแรงดึงประลัย และระยะยึดจากการดึงที่วัดได้กับที่คำนวณไว้จะผิดพลาดได้ไม่เกินร้อยละ ± 7 หากระยะยึดที่วัดได้น้อยกว่าร้อยละ 7 ให้ดึงเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มระยะยึดได้ แต่ทั้งนี้แรงดึงจะต้องไม่เกินร้อยละ 80 ของแรงดึงประลัย ในกรณีที่ต้องการดึงเหล็กปลายเดียวยาวเกินกว่า 30 เมตรต้องได้รับความเห็นชอบจากวิศวกรผู้ควบคุมงาน ถ้าเป็นแบบดึงเหล็กก่อนให้ดึงเหล็กปลายเดียวได้

7.3.2.2 ส่วนยึดของเหล็กเสริมอัดแรงที่ดึงจะต้องได้ความยาวตามที่ได้ระบุไว้ในแบบรายละเอียด ในระหว่างการดึงเหล็กเสริมอัดแรงนั้นให้ตรวจสอบความยาวของเหล็กเสริมอัดแรงที่ดึงยึดออกมากับมาตรวัดแรงอัด (Pressure Gauge) ของเครื่องมือที่ใช้สำหรับดึงเหล็กเสริมอัดแรงนั้นด้วย

7.3.2.3 กรณีเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กภายหลัง การดึงเหล็กเสริมอัดแรง จะทำได้ต่อเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยไม่ต่ำกว่า 24 เมกะปาสกาล (240 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)

7.3.2.4 การดึงเหล็กเสริมอัดแรงให้คำนึงถึงลำดับของการดึงเหล็กเสริมในแต่ละกลุ่มหรือแต่ละเส้น รวมถึงผลของการเหี่ยวรั้งกับชิ้นส่วนต่างๆ เช่น การยึดรั้งกับเสา หรือ กำแพง เป็นต้น

7.3.2.5 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกและแม่แรงไฮดรอลิกจะต้องทำงานให้เกิดแรงดึงได้อย่างสม่ำเสมอตลอดการทำงาน และชุดอุปกรณ์จะต้องมีรายงานการสอบเทียบ (Calibration and Test Report) มาแสดงก่อนใช้ชุดอุปกรณ์ดังกล่าว โดยใบรายงานต้องมีอายุไม่เกิน 6 เดือน และต้องได้รับการรับรองจากสถาบันการศึกษาหรือส่วนราชการที่เชื่อถือได้

7.3.3 การตัดปลายเหล็กเสริมอัดแรง

กรณีเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กภายหลัง การตัดปลายเหล็กเสริมอัดแรงให้ตัดด้วยเครื่องตัดใบไฟเบอร์ โดยให้เหลือปลายไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ห้ามใช้เปลวไฟ หรือความร้อนตัดเหล็กเสริมอัดแรงโดยเด็ดขาด หลังจากตัดปลายเหล็กเสริมแล้วให้ปิดสมอชิดด้วยปูนทรายอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่งทันที ในกรณีที่ยังปิดด้วยปูนทรายไม่ได้ ให้ทาปลายเหล็กเสริมส่วนที่สัมผัสอากาศด้วยสีกันสนิมหรือวัสดุอื่นที่เหมาะสม

7.3.4 การตัดโค้งเหล็กเสริมอัดแรง

7.3.4.1 กรณีเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน รัศมีการตัดโค้งจะต้องไม่น้อยกว่า 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็กกล้า หรือไม่น้อยกว่า 10 เท่าของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว และมุมตัดต้องไม่เกิน 15 องศา

- 7.3.4.2 กรณีเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กภายหลัง รัศมีการค้ำโค้งจะต้องไม่น้อยกว่า 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อร้อยลวด หรือมุมค้ำโค้งไม่เกิน 15 องศา ถ้ารัศมีการค้ำโค้งมีค่าน้อยกว่าหรือมุมค้ำโค้งมากกว่าค่าที่กำหนด จะต้องมีการหาค่าการสูญเสียของการอัดแรงจากการค้ำโค้งด้วย

7.4 การอัดน้ำปูน

กรณีเป็นการอัดแรงแบบดึงเหล็กภายหลังระบบยึดเหนี่ยว (Bonded System) ให้อัดน้ำปูนตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 7.4.1 ก่อนการอัดน้ำปูนจะต้องปิดสมอยึดด้วยปูนทราย และทำความสะอาดภายในท่อร้อยลวด รวมทั้งตรวจสอบการรั่วซึมโดยใช้น้ำอัดฉีดเข้าไปในท่อ
- 7.4.2 ทำการอัดน้ำปูนเข้าไปในท่อร้อยลวด ผ่านรูที่สมอยึดด้านหนึ่งจนกระทั่งน้ำปูนไหลออกที่ปลายสมอยึดอีกด้านหนึ่ง แล้วจึงทำการปิดรูที่ปลายสมอยึดด้านท้าย และให้อัดน้ำปูนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดหน่วยแรงดันประมาณ 0.5 เมกาปาสกาล (5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) แล้วทำการอุดท่อทางเข้าน้ำปูนโดยไม่ให้สูญเสียแรงดันภายในท่อ

7.5 การเก็บตัวอย่างเหล็กเสริมอัดแรงเพื่อการทดสอบ

- 7.5.1 การเก็บตัวอย่างลวดเหล็กกล้า ให้เก็บ 3 ตัวอย่าง ทุก ๆ 3.0 ตัน
- 7.5.2 การเก็บตัวอย่างลวดเหล็กกล้าตีเกลียว ให้เก็บ 3 ตัวอย่าง ทุก ๆ 3.0 ตัน
- 7.5.3 การเก็บตัวอย่างลวดเหล็กกล้าดิ่งเย็น (CDR) และเหล็กปลอกเสาเข็มอัดแรง ให้เก็บ 3 ตัวอย่าง ทุก ๆ 1.0 ตัน

8. เอกสารอ้างอิง

- (1) มาตรฐาน มขช. 102-2533 มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรง กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2533
- (2) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 95: ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- (3) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 420: ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม