

การประเมินความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

Relaxation Assessment of Steel Wire Strand for Prestressing of Concrete

ศิวะ ลิทธิพงษ์^{1*} ประสาลน์ บุญเพชร¹ ลิทธิพงษ์ โลหวิกรณ์¹ ศุภชัย ชัยณรงค์²
และ ชัยยุทธ มีงาม²

Siva Sitthipong^{1*}, Prasaln Boonpachr¹, Sittipong Lohwirakorn¹,
Suppachai Chainarong² and Chaiyoot Meengam²

¹ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ Industrial Metrology and Testing Service Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research

² Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

*E-mail: siva@tistr.or.th โทร. 083-1951382

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง ประเภทความผ่อนคลายต่ำ ชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.3, 12.7 และ 15.2 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.420-2540 ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้แรงดึงเริ่มต้น 60%, 70% และ 80% ของค่าแรงดึงสูงสุด ตามลำดับ ค่าความผ่อนคลายสูงสุดที่ 1,000 ชั่วโมง จะมีค่าต่ำกว่า 1%, 2.5% และ 4.5% ตามลำดับ สอดคล้องตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.420-2540

คำสำคัญ : ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว ความผ่อนคลาย สถิติ มอก.420-2540

Abstract

This research aimed to study the relaxation of stranded steel wire for prestressed concrete (7 wire PC strand, low relaxation type) with a diameter of 9.3, 12.7, 15.2 mm. respectively, using the test method according to the Thailand Industrial Standard, TIS 420-2540. The results revealed that when using the initial tensile strength 60%, 70% and 80% of the maximum tensile, respectively, the maximum relaxation value at 1,000 hours was lower than 1%, 2.5% and 4.5% respectively. Thus, the results from this research were in compliance with TIS. 420-1997.

Keywords : Steel wire strand, Relaxation, Statistics, TIS 420-1997

1. บทนำ

ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทความผ่อนคลายธรรมดา กับ ประเภทความผ่อนคลายต่ำ Torill *et al.* (1962) จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าลวดชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นจำนวนมาก Suarez *et al.* (2012) ซึ่งค่าความผ่อนคลายของลวดส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตอัดแรง มีผลต่อโครงสร้าง Zdenek *et al.* (2013) ดังนั้นขอบเขตงานวิจัยนี้คือศึกษาความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงประเภทความผ่อนคลายต่ำ ชนิด 7 เส้น ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.3, 12.7 และ 15.2 มิลลิเมตร เพราะเป็นชนิดที่มีปริมาณการใช้งานค่อนข้างสูง โดยวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 420-2540 ค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เพื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลที่ได้จากงานวิจัย และอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อค่าความผ่อนคลาย Zeren *et al.* (2003) และการพิจารณาผลข้อมูลทางสถิติจะถูกนำมาทวนสอบความถูกต้องของข้อมูล เพื่อทวนสอบความถูกต้องในการปฏิบัติงานของบุคลากรทดสอบ

ของห้องปฏิบัติการ 17025 และสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เสนอแนะ หรือสนับสนุน ให้กับคณะกรรมการ ในการพิจารณาร่างมาตรฐานวาระต่อ ๆ ไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ศึกษาคือ ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง ประเภทความอ่อนคลายต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งลวดเหล็กกล้าชนิดนี้มีส่วนผสมทางเคมีและค่ามาตรฐานสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

Material/Elements	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
Compacted Strand 7 Wire	0.78	0.25	0.75	0.035	0.035

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานสมบัติเชิงกลของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น

Diameter (mm)	Maximum Strength (N/mm ²)	Area (mm ²)	Mass per Meter		Maximum Value of Characterization		
			Mass (g)	Error (%)	Maximum Force (kN)	Proof Force (0.1%) (kN)	Proof Force (0.2%) (kN)
9.3	1720	51.6	405	+/-4-2	88.8	72.8	75.4
12.7	1860	98.7	774	+4-2	184	151	156
15.2	1860	139	1101	+4-2	259	212	220

2.2 รายละเอียด

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เลือกลวดเหล็กกล้าตีเกลียวที่ปราศจากรอยปริ รอยแตกร้าว และรอยแยกตามความยาวซึ่งลึกไม่ถึงร้อยละ 4 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดแต่ละเส้นที่นำมาประกอบ ในลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น ลวดแต่ละเส้นอาจมีรอยต่อด้วยการเชื่อมได้ แต่เมื่อเป็นลวดตีเกลียวแล้ว ต้องไม่มีรอยต่อมากกว่า 1 รอย ในลวดตีเกลียว 45 เมตร การเลือกลวดดังกล่าวมานี้ใช้วิธีการตรวจพินิจ จากนั้นนำมาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบให้ได้ความยาว 1.5 เมตร 15 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางละ 5 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดแกนกลางและขดแกนย่อย

ขดแกนกลาง	ขดแกนย่อย	ร้อยละเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นแกนใหญ่กว่าเส้นรอบแกน 5 ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางแกน 9.3 มิลลิเมตร	ขดที่ 1	2.53, 2.22, 2.22, 2.53, 2.53
	ขดที่ 2	2.22, 2.22, 2.53, 2.22, 2.22
	ขดที่ 3	2.53, 2.22, 2.53, 2.53, 2.22
	ขดที่ 4	2.53, 2.53, 2.53, 2.22, 2.53
	ขดที่ 5	2.53, 2.22, 2.22, 2.22, 2.53
	ขดที่ 6	2.53, 2.22, 2.22, 2.53, 2.53
เส้นผ่านศูนย์กลางแกน 12.7 มิลลิเมตร	ขดที่ 1	2.31, 2.07, 2.31, 2.31, 2.07
	ขดที่ 2	2.31, 2.31, 2.31, 2.31, 2.07
	ขดที่ 3	2.51, 2.31, 2.31, 2.31, 2.07
	ขดที่ 4	2.31, 2.07, 2.07, 2.07, 2.31
	ขดที่ 5	2.31, 2.31, 2.31, 2.31, 2.31
	ขดที่ 6	2.07, 2.31, 2.07, 2.31, 2.31
เส้นผ่านศูนย์กลางแกน 15.2 มิลลิเมตร	ขดที่ 1	2.51, 2.70, 2.51, 2.70, 2.51
	ขดที่ 2	2.70, 2.51, 2.51, 2.51, 2.70
	ขดที่ 3	2.51, 2.51, 2.51, 2.51, 2.70
	ขดที่ 4	2.70, 2.51, 2.70, 2.70, 2.51
	ขดที่ 5	2.70, 2.70, 2.70, 2.70, 2.70
	ขดที่ 6	2.70, 2.70, 2.70, 2.51, 2.70

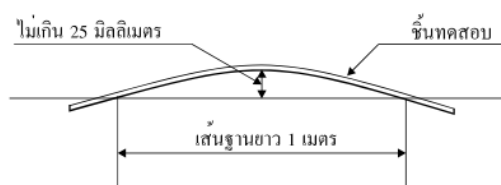
2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) การทดสอบมวลต่อเมตร TIS.420 (1997)

วัดความยาวชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร และชั่งมวลชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นให้ละเอียดถึง 1 กรัม และคำนวณมวลต่อเมตรแต่ละชิ้นให้ละเอียดถึงทศนิยม 3 ตำแหน่ง บันทึกผล

2) การทดสอบความโค้ง TIS.420 (1997)

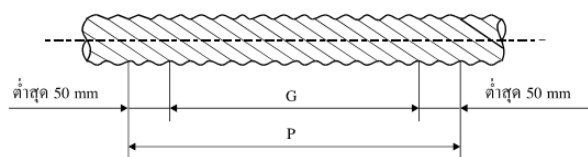
นำชิ้นทดสอบวางบนพื้นราบอย่างอิสระ ความโค้งของชิ้นทดสอบวัดจากระยะที่มากที่สุดที่ตั้งฉากกับเส้นฐาน ซึ่งยาว 1 เมตร ตามภาพที่ 2 บันทึกผล



ภาพที่ 2 การวัดความโค้ง

3) การทดสอบแรงดึงสูงสุด แรงดึงพิสูจน์ ความยืด TIS.420 (1997)

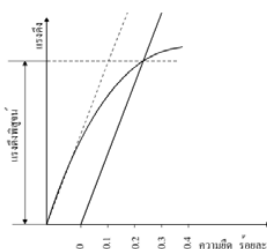
นำชิ้นทดสอบมาทำเครื่องหมายความยาวพิกัดตรงส่วนกลางชิ้นทดสอบให้มีความยาวพิกัด (G) ตามที่กำหนด สำหรับแต่ละการทดสอบ และมีระยะระหว่างหัวจับ (P) ห่างจากจุดพิกัดข้างละไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตรตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ชิ้นทดสอบ

จากนั้นควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบให้เท่ากับอุณหภูมิห้องทดสอบ จับชิ้นทดสอบในลักษณะที่ทำให้ชิ้นทดสอบได้รับแรงดึงตามแนวแกนของชิ้นทดสอบโดยตลอด ดึงโดยอัตราการให้แรงดึงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 30 เมกะพาสคัลต่อวินาที หลังจากหาแรงดึงพิสูจน์แล้ว อัตราการให้แรงดึงอาจเพิ่มอีกได้ แต่ไม่เกิน 100 เมกะพาสคัลต่อวินาที การเพิ่มแรงดึงจะต้องคงที่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนการหาแรงดึงพิสูจน์คือ จับมาตรวัดความยืดที่จุดพิงก์ 2 จุด ที่ชิ้นทดสอบ โดยใช้ความยาวพิงก์ 100 มิลลิเมตร จากนั้นปรับเข็มบนหน้าปัดของมาตรวัดความยืดให้อ่านที่ศูนย์ แล้วเพิ่มแรงดึงโดยสม่ำเสมอ บันทึกค่าแรงดึงบนเครื่องทดสอบทุก ๆ 0.05 มิลลิเมตรของความยืดของชิ้นทดสอบ และเขียนกราฟความยืด-แรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 4 แล้วลากเส้นตรงจากจุดความยืดร้อยละ 0.1 บนแกนความยืดให้ขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟไปตัดกับกราฟแรงดึงที่ตรงกับจุดตัดของเส้นทั้งสองคือ แรงดึงพิสูจน์ที่ความยืดร้อยละ 0.1

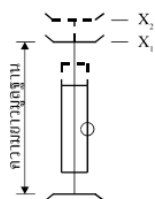


ภาพที่ 4 การหาแรงดึงพิสูจน์

ขั้นตอนการหาค่าความยืด เริ่มจากจับยึดชิ้นทดสอบและเครื่องทดสอบ โดยติดตั้งเครื่องวัดการยืดกับชิ้นทดสอบที่มีความยาวพิงก์ 600 มิลลิเมตร ค่อย ๆ เพิ่มแรงดึงอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งเครื่องวัดการยืดชี้บอกค่าความยืดร้อยละ 1 ให้วัดระยะระหว่างหัวจับกับความยาวมูลฐาน (X_1) ถอดเครื่องวัดการยืดออกจากชิ้นทดสอบ แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงดึงให้แก่ชิ้นทดสอบจนถึงจุดขาด หาค่าความแตกต่างระหว่างระดับหัวจับตัวบน เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงจนลวดเหล็กเส้นใดเส้นหนึ่งขาด (X_2) กับระดับหัวจับตัวบนเมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงยึดได้ร้อยละ 1 ตามภาพที่ 5 หาค่าความยืดจากสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละความยืดสูงสุด} = \left[\frac{(X_2 - X_1) \times 100}{\text{ความยาวมูลฐาน}} \right] + 1 \quad (1)$$

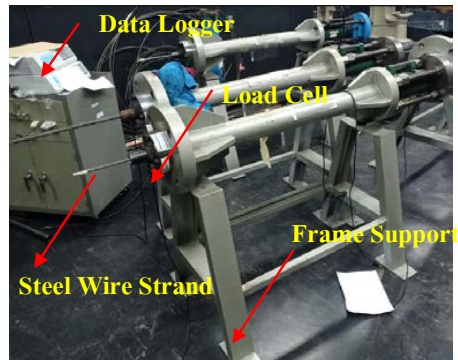
โดยความยาวมูลฐานคือ ความยาวเดิมของลวดเหล็กกล้าที่เกี่ยวระหว่างหัวจับ เมื่อเข้มนบนหน้าปัดของเครื่องวัดการยืดชี้ตรงกับเลขศูนย์เป็นมิลลิเมตร



ภาพที่ 5 การหาความยืด

4) การทดสอบความผ่อนคลาย TIS.420 (1997)

ซึ่งขึ้นงานทดสอบด้วยแรงดึงทดสอบเท่ากับร้อยละ 60, 70 และ 80 ของค่าลักษณะเฉพาะแรงดึงสูงสุดตามที่กำหนดในตารางที่ 2 ตามลำดับ เพิ่มแรงดึงอย่างสม่ำเสมอจนถึงค่าแรงดึงทดสอบ ภายในระยะเวลา 5 นาที แล้วคงตำแหน่งหัวจับไว้ ณ ที่นั้น หลังจากที่ได้แรงดึงทดสอบแล้ว 1 นาที อ่านค่าแรงดึงเริ่มแรกและเมื่อครบ 1,000 ชั่วโมง อ่านค่าแรงดึงอีกครั้งหนึ่ง ทำการทดสอบค่าละ 10 ชั่วโมง โดยการทดสอบนี้ต้องทำในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ มี data logger สำหรับบันทึกค่าแรงดึงและเวลา ตลอดระยะเวลาการทดสอบ และระยะระหว่างปลายหัวจับลวดทดสอบจะต้องมากกว่า 60 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตีเกลียว ดังแสดงในภาพที่ 6 หาค่าความผ่อนคลายจากสมการที่ 1 และทวนสอบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4



ภาพที่ 6 ลักษณะการจับยึดขึ้นงานทดสอบ

หาค่าความผ่อนคลายจากสมการที่ 2

$$\text{ร้อยละความผ่อนคลาย} = \frac{(\text{แรงดึงเริ่มแรก} - \text{แรงดึงที่อ่านได้เมื่อครบ 1,000 ชั่วโมง}) * 100}{\text{แรงดึงเริ่มแรก}} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 ค่ามาตรฐานความผ่อนคลาย (มอก.420-2540)

Initial Force (% of Maximum Force)	Types	
	Maximum Value of Normal Relaxation (%)	Maximum Value of Low Relaxation (%)
60	4.5	1.0
70	8.0	2.5
80	12.0	4.5

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดสอบมวลต่อเมตรค่าความโค้งระหว่างเกลียวของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว และร้อยละความผ่อนคลายแสดงในตารางที่ 5 และผลการทดสอบแรงดึง แรงดึงพิสูจน์ ความยืดหยุ่นของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว และความผ่อนคลายแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบมวลต่อเมตรค่าความโค้งระยะช่วงเกลียวของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว และ ร้อยละความผ่อนคลาย

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางแกน	มวลต่อเมตร 5 ค่า	ความโค้งต่อเมตร 5 ค่า	ระยะช่วงเกลียว 5 ค่า	ร้อยละความผ่อนคลาย 5 ค่า
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	9.3 mm	412.89, 413.55, 412.68, 413.44, 412.96	2.86, 6.54, 4.82, 12.56, 6.44	15.02, 15.11, 14.69, 15.88, 14.93	0.59, 0.59, 0.61, 0.61, 0.62
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	12.7 mm	780.50, 783.90, 779.50, 782.40, 781.70	5.62, 4.86, 9.86, 4.32, 2.97	14.59, 14.83, 15.10, 14.96, 14.72	1.83, 1.84, 1.84, 1.83, 1.85
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	15.2 mm	1112.50, 1113.30, 1112.80, 1113.90, 1113.60	2.86, 6.54, 4.82, 12.56, 6.44	14.59, 14.83, 15.10, 14.96, 14.72	2.14, 2.15, 2.14, 2.16, 2.18

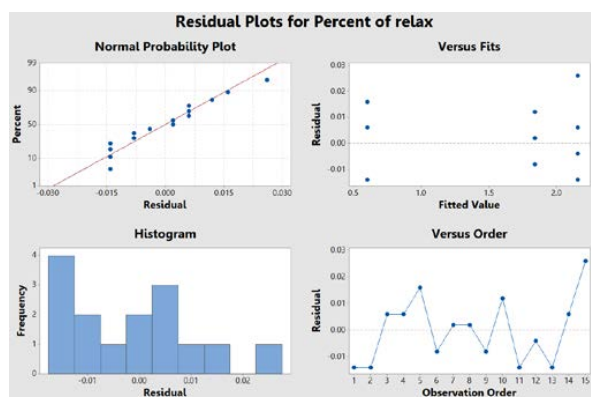
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงดึง แรงดึงพิสูจน์ ความยืดหยุ่นของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว และความผ่อนคลาย

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางแกน	แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 0.1 5 ครั้ง	ความต้านแรงดึงสูงสุด 5 ครั้ง	ร้อยละความยืด 5 ครั้ง	ร้อยละความผ่อนคลาย 5 ค่า
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	9.3 mm	91.37, 90.42, 91.35, 90.57, 91.12	101.28, 99.99, 101.67, 103.54, 100.02	12.53, 11.12, 11.70, 11.66, 11.53	0.59, 0.59, 0.61, 0.61, 0.62
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	12.7 mm	170.07, 170.30, 170.09, 170.21, 170.29	192.80, 192.92, 192.36, 194.23, 191.19	12.82, 11.10, 12.92, 12.73, 11.87	1.83, 1.84, 1.84, 1.83, 1.85
7 เส้น ธรรมดา ความผ่อนคลายต่ำ	15.2 mm	235.44, 235.41, 234.40, 235.39, 234.87	266.20, 270.63, 265.51, 269.68, 273.13	8.85, 13.07, 11.88, 12.56, 10.43	2.14, 2.15, 2.14, 2.16, 2.18

อภิปรายผลการทดสอบตามการออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง one-way ANOVA ซึ่งเป็นการออกแบบของปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยสิ่งที่ผู้วิจัยสนใจ คือ ร้อยละความผ่อนคลาย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ร้อยละความยืดมวลต่อเมตร ความโค้งต่อเมตร และระยะช่วงเกลียว โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ one-way ANOVA มีการเก็บข้อมูลมาทั้งหมด 5 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสถิติหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ โดยข้อมูลที่เก็บมาได้ตามตารางที่ 5, 6

นำผลการทดลองไปตรวจสอบว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (independent test), การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (normality test) และ การทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (variance stability test) จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ค่าเฉลี่ยเหลือที่นำมาวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูลมีการกระจายรูปร่างแบบไม่มีแนวโน้ม เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นปกติของข้อมูล พบว่า มีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็น และไม่มีหลักฐานใดมาสนับสนุนว่าข้อมูลไม่มีเสถียรภาพ สรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ คือ มีความเป็นอิสระของข้อมูล มีความเป็นปกติของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูลดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การตรวจสอบความถูกต้องตามสมมติฐาน

เมื่อทดสอบคุณสมบัติของข้อมูลทั้งหมดแล้วนั้น จึงนำข้อมูล เช่น ร้อยละความผ่อนคลาย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ร้อยละความยืด มวลต่อเมตร ความโค้งต่อเมตร และระยะช่วงเกลียว มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) ต่อไป สามารถแสดงผลตามตารางที่ 7-12

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าร้อยละความผ่อนคลาย

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	6.70852	3.35426	18986.38	0.000
Error	12	0.00212	0.00018		
Total	14	6.71014			

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าร้อยละความผ่อนคลายที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละความผ่อนคลายอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	70599.5	35299.7	4422.78	0.000
Error	12	95.8	8.0		
Total	14	70695.3			

จากตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าร้อยละการยืด

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	2.206	1.103	0.86	0.446
Error	12	15.319	1.277		
Total	14	17.525			

จากตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าร้อยละการยืดที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ไม่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยืดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่ามวลต่อเมตร

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	1220138	610069	103703.12	0.000
Error	12	71	6		
Total	14	1220209			

จากตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่ามวลต่อเมตรที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง มีอิทธิพลต่อค่ามวลต่อเมตรอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความโค้งต่อเมตร

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	4.166	2.083	0.19	0.831
Error	12	132.618	11.051		
Total	14	136.784			

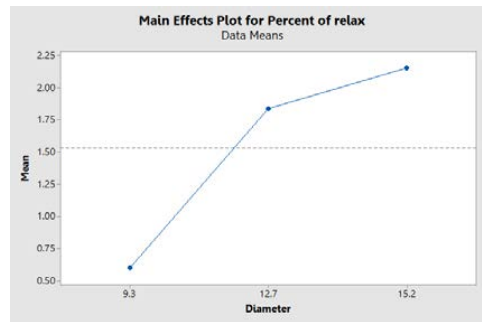
จากตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าความโค้งต่อเมตรที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความโค้งต่อเมตรอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าระยะช่วงเกลียว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	2	0.02465	0.01233	0.07	0.937
Error	12	2.24652	0.18721		
Total	14	2.27117			

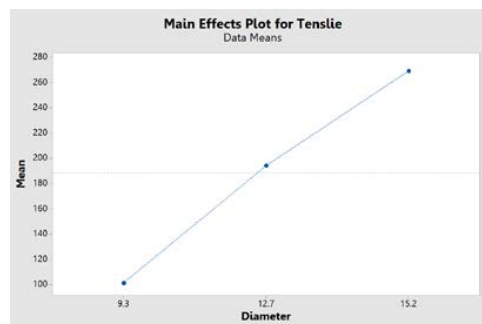
จากตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าระยะช่วงเกลียวที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ไม่มีอิทธิพลต่อค่าระยะช่วงเกลียวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05

จากตารางที่ 7-12 พบว่า เมื่อนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับร้อยละความอ่อนคลาย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ร้อยละความยืด มวลต่อเมตร ความโค้งต่อเมตร และระยะช่วงเกลียว ทำให้ทราบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็กกล้ามีผลต่อค่าร้อยละความอ่อนคลาย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมวลต่อเมตร แต่ไม่มีผลต่อ มวลต่อเมตร ความโค้งต่อเมตร และระยะช่วงเกลียว เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลให้นำเชื่อถือยิ่งขึ้นทางผู้วิจัยจึงนำปัจจัยหลัก คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไปวิเคราะห์เพื่อที่จะจำแนกได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใดที่ส่งผลต่อค่าสมบัติของลวดเหล็กกล้าที่นำมาทดลอง แสดงดังภาพที่ 8-13



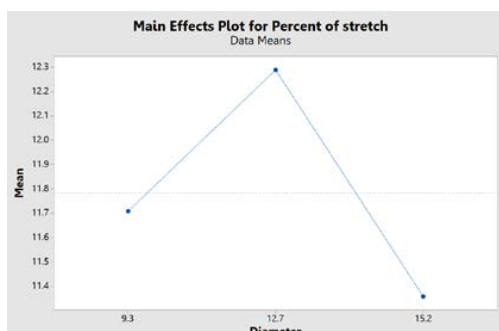
ภาพที่ 8 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละความผ่อนคลาย

จากภาพที่ 8 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละความผ่อนคลาย โดยค่าร้อยละความผ่อนคลายในการศึกษามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 15.2 มิลลิเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีอิทธิพลโดยตรงกับค่าร้อยละความผ่อนคลาย

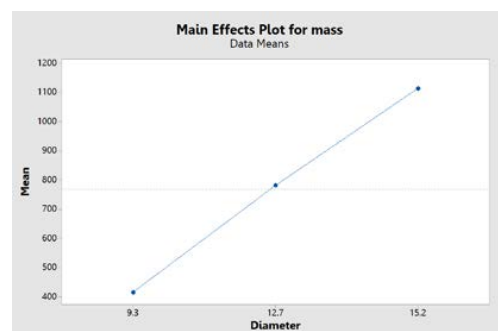


ภาพที่ 9 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

จากภาพที่ 9 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในการศึกษามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 15.2 มิลลิเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีอิทธิพลโดยตรงกับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

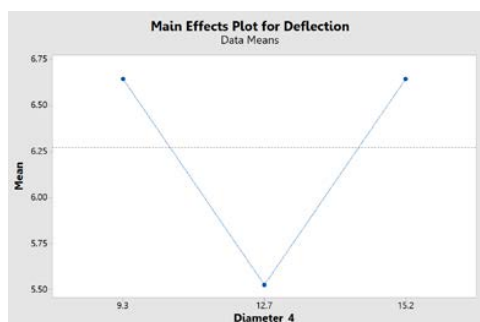


ภาพที่ 10 ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อค่าร้อยละการยืด



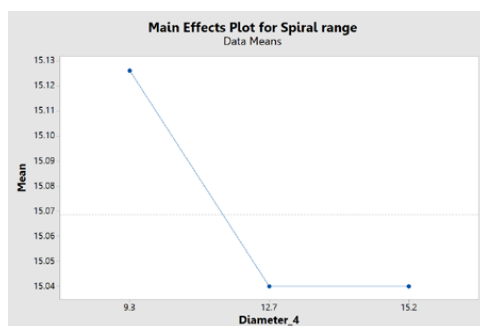
ภาพที่ 11 ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อค่ามวลต่อเมตร

จากภาพที่ 10 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยืด โดยค่าร้อยละการยืดในการศึกษามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 12.7 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้มากกว่า 12.7 มิลลิเมตร จะทำให้ร้อยละการยืดลดลง และจากภาพที่ 11 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่ามวลต่อเมตร โดยค่ามวลต่อเมตรในการศึกษามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 15.2 มิลลิเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีอิทธิพลโดยตรงกับค่ามวลต่อเมตร



ภาพที่ 12 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความโก่งต่อเมตร

จากภาพที่ 12 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความโก่งต่อเมตร โดยค่าความโก่งต่อเมตรในการศึกษามีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 12.7 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่ามากกว่า 12.7 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าความโก่งต่อเมตรเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 13 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าระยะช่วงเกลียว

จากภาพที่ 13 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าระยะช่วงเกลียว โดยค่าระยะช่วงเกลียวในการศึกษามีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 9.3 มิลลิเมตร ไปยัง 12.7 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่ามากกว่า 12.7 มิลลิเมตร ค่าระยะช่วงเกลียวจะมีค่าคงที่

4. สรุปผล

เมื่อนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมาวิเคราะห์โดยแยกเป็น 9.3, 12.7 และ 15.2 มิลลิเมตร พบว่า คุณสมบัติของลวดเหล็กกล้า เช่น ร้อยละความอ่อนคลาย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมวลต่อเมตร มีผลต่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมด เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะทำให้ค่าทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้นสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอาจจะไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทั้งสามที่กล่าวถึง คือ ร้อยละความยืด ความโก่งต่อเมตร และระยะช่วงเกลียว ซึ่งดูได้จากภาพที่ 3, 5, 6 ข้างต้น โดยพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีผลดีที่สุดต่อค่าร้อยละความยืด คือ 12.7 มิลลิเมตร เพราะ ยืดได้นานที่สุด ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีผลดีที่สุดต่อค่าความโก่ง คือ 12.7 มิลลิเมตร เพราะโก่งน้อยที่สุด เมื่อเทียบต่อเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีผลดีที่สุดต่อค่าระยะช่วงเกลียว คือ 9.3 มิลลิเมตร และค่าความอ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าที่เกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.3, 12.7 และ 15.2 มิลลิเมตรที่วิเคราะห์ได้ คือ 0.61 1.84 และ 2.16 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด มอก.420-2540 คือมีค่าต่ำกว่า 1%, 2.5% และ 4.5% ตามลำดับ

5. เอกสารอ้างอิง

Suarez, F., J. Galvez, J. Atienza, D. Cendon and M. Elices. 2012. Influence of the storage conditions on prestressing steel relaxation losses. Materials de Construction. 62: 531-546.

- Thailand Industrial Standard. 1997. **TIS 420-1997: Stranded Wire for Prestressed Concrete**. Thailand Industrial Standard Institute., Thailand. (in Thai)
- Torill, Y., H. Iwata and T. Katsumata. 1962. **Relaxation of PC Steel Wire**. Journal of the Japan Society for Testing Materials. 11: 768-774.
- Zdenek, P., M. Hon and Q. Yu. 2013. **Relaxation of prestressing steel at varying strain and temperature: viscoplastic constitutive Relation**. Journal of Engineering Mechanics. 139: 814-823.
- Zeren, A. and M. Zeren. 2003. **Stress relaxation properties of prestressed steel wires**. Journal of Materials Processing Technology. 141: 86-92.

(Received: 11/Jun/2019, Revised: 21/May/2020, Accepted: 28/May/2020)