



การวิเคราะห์ความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

RELAXATION ANALYSIS OF STEEL WIRE FOR PRESTRESSED CONCRETE

ศิวะ สิทธิพงษ์^{1*} ประสาธน์ บุญเพชร² สิทธิพงษ์ โล่วิกรณ์³ ศุภชัย ชัยณรงค์⁴ และชัยยุทธ มีงาม⁵

^{1,2}นักวิชาการ, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

³ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการ, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

^{4,5}ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

*Corresponding author: siva@tistr.or.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการวิเคราะห์ความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงจากวิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 95-2540 และพิสูจน์ความมีนัยยะของอัตราการยืดตัวของลวดแต่ละขนาด ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้แรงดึงเริ่มต้น 70% ของค่าแรงดึงสูงสุด ลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีขนาดแรงดึงเริ่มต้นสูงกว่า โดยอัตราการลดลงของแรงดึงแปรผกผันกับระยะเวลาถึง ช่วง 10 ชั่วโมงแรกอัตราการลดลงของแรงดึงมีค่าสูงสุด ทั้งนี้การทดสอบลวดเหล็กกล้าชนิดบั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 5 มิลลิเมตร และชนิดมีรอยย่น 7 มิลลิเมตร ให้ค่าความผ่อนคลายเฉลี่ยที่ 1,000 ชั่วโมงคือ 2.63%, 2.06% และ 2.03% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ โดยช่วง 10 ชั่วโมงแรก อัตราการยืด ของลวดทั้ง 3 ขนาดมีค่าสูงถึง $0.8 \times 10^{-4} - 3.7 \times 10^{-4}$ ต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่วง 100 ชั่วโมง และ 1000 ชั่วโมงคือ $0.8 \times 10^{-5} - 3.2 \times 10^{-5}$ % ต่อชั่วโมง และ $1 \times 10^{-9} - 1.6 \times 10^{-9}$ % ต่อชั่วโมง ตามลำดับ รายละเอียดวิธีการและผลของการทดลองนี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเสนอข้อคิดเห็นในการพัฒนามาตรฐาน

คำสำคัญ: ลวดเหล็กกล้า; คอนกรีตอัดแรง; ความผ่อนคลาย

ABSTRACT

This research focuses on analyzing the relaxation value of steel wire for prestressed concrete from the testing method according to the Thai Industrial Standards TIS 95-2540 and proving the significance of the wire strain rate. The test results showed that When the initial pulling force is 70% of the maximum pull force Wires with larger diameters have a higher initial pulling force. The rate of pulling force is inversely proportional to the duration. For the first 10 hours, The rate of pulling force has the highest value. The testing of 4, 5 mm diameter chevron wires and 7 mm stress mark types provides an average relaxation of 1,000 hours, which is 2.63%, 2.06% and 2.03% respectively, which is in line with the criteria. For the first 10 hours, Strain rate of all 3 sizes of wire are as high as $0.8 \times 10^{-4} - 3.7 \times 10^{-4}$ % per hour which is higher than the range of 100 hours and 1000 hours which is 0.8×10^{-5}

Siva Sitthipong^{1*} Prasatn Boonpachr² Sittipong Lohwirakorn³ Suppachai Chainarong⁴ and Chaiyoot Meengam⁵

^{1,2}Technical Officer, Thailand Institute of Scientific and Technological Research

³Director of Laboratory, Thailand Institute of Scientific and Technological Research

^{4,5}Assistant Professor, Songkhla Rajabhat University

- $3.2 \times 10^{-5} \% \text{ per hour}$ and $1 \times 10^{-9} - 1.6 \times 10^{-9} \% \text{ per hour}$, respectively Details on the methodology and results of the trial will be used as a reference for the standard improvement

KEYWORD: Steel Wire; Prestressed Concrete; Relaxation

1. บทนำ

ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงถูกใช้ในงานก่อสร้างมาโดยตลอด ซึ่งคำว่าลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หมายถึง ลวดที่ทำขึ้นโดยวิธีดึงเย็นเหล็กลวดต้นคาร์บอนสูงผ่านคายหรือถูกกลึงเป็นลวด มี 4 ชนิด คือ ลวดกลมแบบเรียบ ลวดกลมแบบมีรอยย่น ลวดกลมแบบหยัก และลวดแบบบั้ง โดยลวดกลมแบบเรียบมีลักษณะเฉพาะคือ พื้นผิวที่ภาคตัดขวางสม่ำเสมอ พื้นผิวและแนวแกนไม่เปลี่ยนแปลงเป็นคาบตลอดความยาว ส่วนลวดกลมแบบมีรอยย่นมีลักษณะเฉพาะคือ ผิวมีรอยย่นเป็นระยะเท่าๆกันตลอดความยาว และลวดกลมแบบหยักมีลักษณะเฉพาะคือ เปลี่ยนแปลงแนวแกนอย่างสม่ำเสมอในระนาบเดียวหรือในรูปของเกลียว ซึ่งเกิดขึ้นโดยกรรมวิธีทางกลหลังการดึงเย็น สุดท้ายคือลวดแบบมีบั้ง โดยลวดทั้ง 4 ชนิดดังที่กล่าวมานี้จะถูกแบ่งย่อยเป็นลวดไม่คลายความเค้น คือ ลวดที่อยู่ในสภาพที่ได้จากการดึงเย็น มีสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดึงเย็นหล่ออยู่ที่ผิว กับ ลวดคลายความเค้น คือลวดดึงเย็นซึ่งผ่านขบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีการใดกรรมวิธีหนึ่งตลอดความยาวของเส้น ได้แก่ การนำลวดผ่านชุดเครื่องคัดตรงแล้วอบร้อนระยะเวลาสั้น หรือ อบร้อนระยะเวลาสั้นในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาพให้ความเครียดตามแนวแกน และลวดคลายความเค้นมี 2 ประเภท คือ ประเภทความผ่อนคลายธรรมชาติ กับ ประเภทความผ่อนคลายต่ำ จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าลวดเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 7 มิลลิเมตร แบบบั้ง ลวดเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร แบบมีรอยย่น ถูกนำมาใช้ในในอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งค่าความผ่อนคลายของลวดส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตอัดแรง มีผลต่อโครงสร้าง ดังนั้นขอบเขตงานวิจัยนี้คือศึกษาความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงประเภทความผ่อนคลายต่ำที่มีปริมาณการใช้งานค่อนข้างสูง คือ ประเภทความผ่อนคลายต่ำ ชนิดคลายความเค้นแบบมีบั้ง เส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 7 มิลลิเมตร และ ชนิดคลายความเค้นแบบมีรอยย่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 95-2540 ค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เพื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลที่ได้จากงานวิจัยและอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลต่อค่าความผ่อนคลาย [1-4] และการพิจารณาผลข้อมูลทางสถิติจะถูกนำมาทวนสอบความถูกต้องของข้อมูล จะถูกใช้ยืนยันผลความถูกต้องหรือข้อผิดพลาดของวิธีการทดสอบตามมอก. 95-2540 และอาจใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเสนอข้อคิดเห็นร่าง มอก. ต่อคณะกรรมการวิชาการรายสาขาต่อไป

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้ศึกษาคือ ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง ประเภทความผ่อนคลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งลวดเหล็กกล้าชนิดนี้มีส่วนผสมทางเคมีและค่ามาตรฐานสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

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

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานสมบัติเชิงกลของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง

Diameter (mm)	Maximum Strength (N/mm ²)	Area (mm ²)	Mass per Meter		Minimum Value of Characterization			
			Mass (g)	Error (%)	Maximum Force (kN)	Proof Force (0.1%) (kN)	Proof Force (0.2%) (kN)	Bending Radius Curve (mm)
4	1770	12.6	98.9	+2.0	22.3	18.5	19.0	10
5	1770	19.6	154	+3.1	34.7	28.8	29.5	15
7	1670	38.5	302	+4.3	64.3	53.4	54.7	20

2.2. วิธีการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ทำได้โดยการเลือกลวดเหล็กกล้าที่ปราศจากรอยปริ รอยแตก ร้าว และรอยแยกตามความยาวซึ่งลึกไม่ถึงร้อยละ 4 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด โดยลวดแต่ละเส้นต้องไม่มีรอยต่อ การเลือกลวดดังกล่าวมานี้ให้ใช้วิธีการตรวจพินิจจากนั้นนำมาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบให้ได้ความยาว 1.5 เมตร ชนิดละ 5 เส้น 3 ชนิด รวม 15 เส้น เพื่อนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบความอ่อนคลาย โดยวิธีการทดสอบมีลักษณะการจับยึดชิ้นงานแสดงในรูปที่ 2 วิธีการคือจึงชิ้นงานทดสอบด้วยแรงดึงทดสอบเท่ากับร้อยละ 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 โดยการทำแบบนี้ต้องทำในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ มี data logger สำหรับบันทึกค่าแรงดึงและเวลา ตลอดระยะเวลาการทดสอบ และระยะระหว่างปลายหัวจับลวดทดสอบจะต้องมากกว่า 60 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ศึกษา



รูปที่ 2 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานทดสอบ

การหาค่าความผ่อนคลายจากสมการที่ 1

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

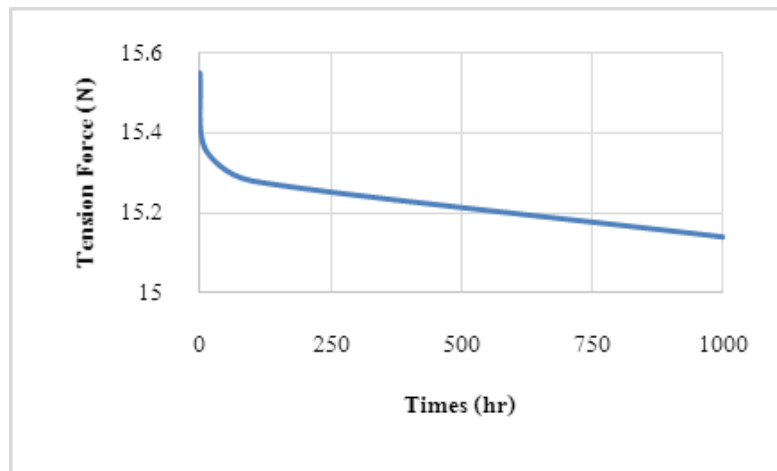
ทวนสอบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ามาตรฐานความผ่อนคลาย

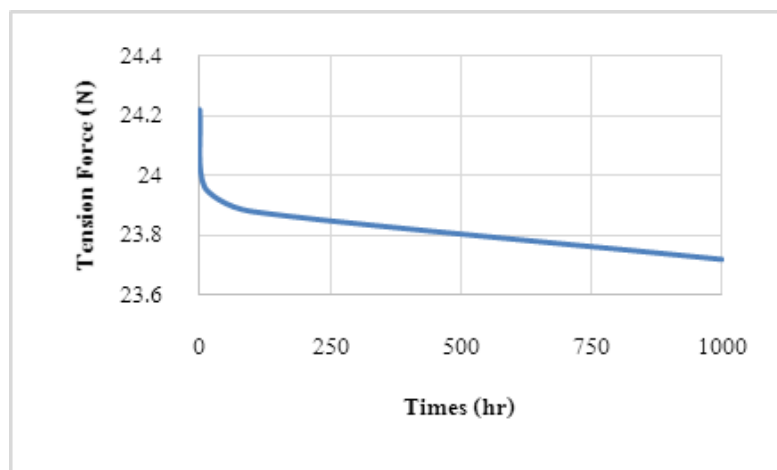
Initial Force (% of Maximum Force)	Types	
	Maximum Value of Normal Relaxation (%)	Maximum Value of Low Relaxation (%)
60	4.5	1.0
70	8.0	2.5
80	12.0	4.5

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการทดสอบความผ่อนคลายของลวดคลายความเค้น แบบมีบั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาในกราฟภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบความผ่อนคลายของลวดคลายความเค้นแบบมีรอยขี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาในกราฟรูปที่ 5 และเมื่อนำข้อมูลขนาดแรงดึงเริ่มต้นและขนาดแรงดึงช่วงสุดท้ายมาคำนวณตามสมการที่ 1 จะได้ค่าความผ่อนคลายดังแสดงในตารางที่ 4

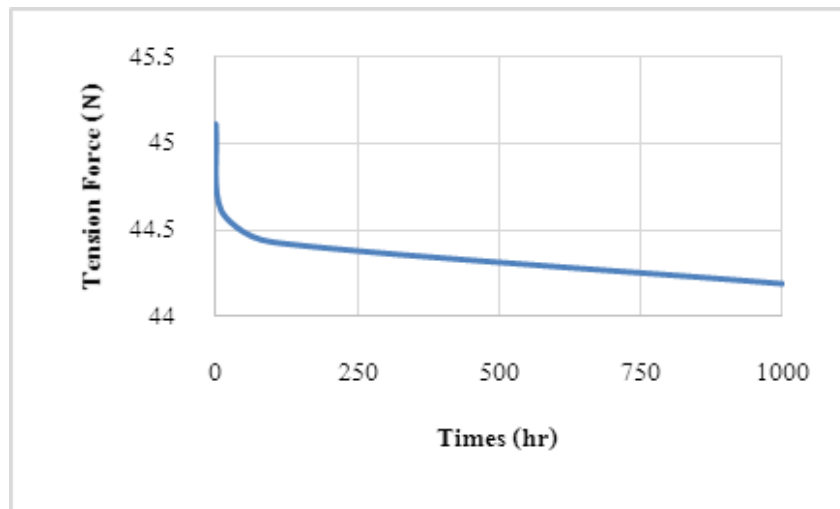


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาของ ลวดเหล็กกล้าแบบมีบั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาของ ลวดเหล็กกล้าแบบมีบั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด 5 มิลลิเมตร

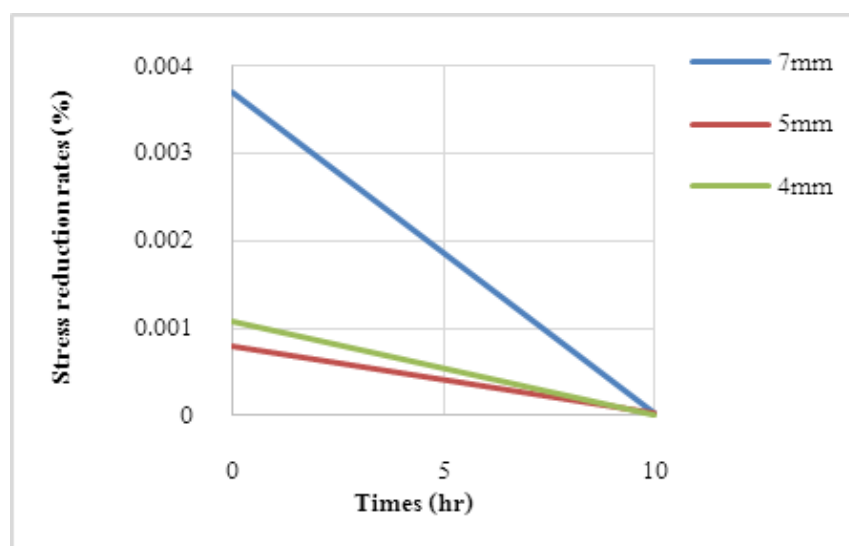
ส่วนกราฟรูปที่ 5-7 แสดงรายละเอียด strain rate ในแต่ละช่วงเวลา ของลวดทั้ง 3 ชนิด โดยกราฟรูปที่ 5 เป็น strain rate ช่วง 10 ชั่วโมงแรกมีค่า $0.8 \times 10^{-4} - 3.7 \times 10^{-4} \%$ ต่อชั่วโมง กราฟรูปที่ 6 เป็น strain rate ช่วง 10 ถึง 100 ชั่วโมงมีค่า $0.8 \times 10^{-5} - 3.2 \times 10^{-5} \%$ ต่อชั่วโมง และกราฟรูปที่ 7 เป็น strain rate ช่วง 100 ถึง 1,000 ชั่วโมง มีค่า $1 \times 10^{-9} - 1.6 \times 10^{-9} \%$ ต่อชั่วโมง



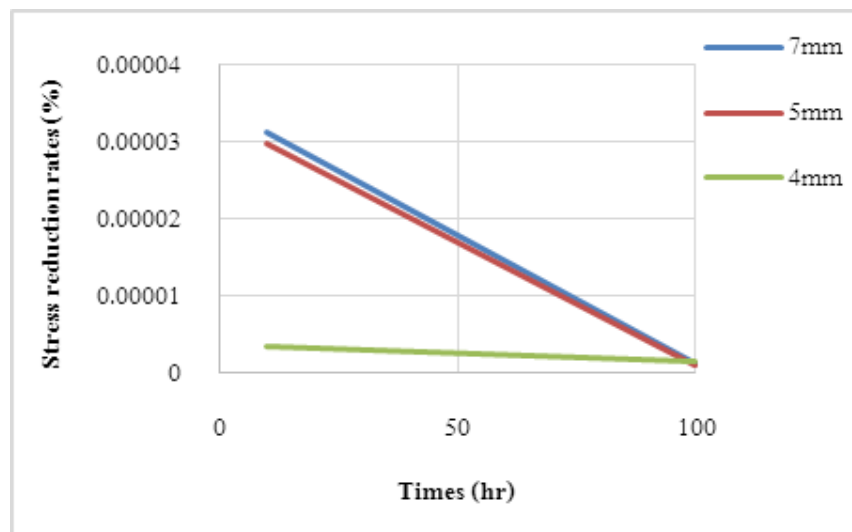
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาของ ลวดเหล็กกล้าแบบมียอย้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด 7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4 ตัวแปรของความผ่อนคลายและค่าความผ่อนคลาย

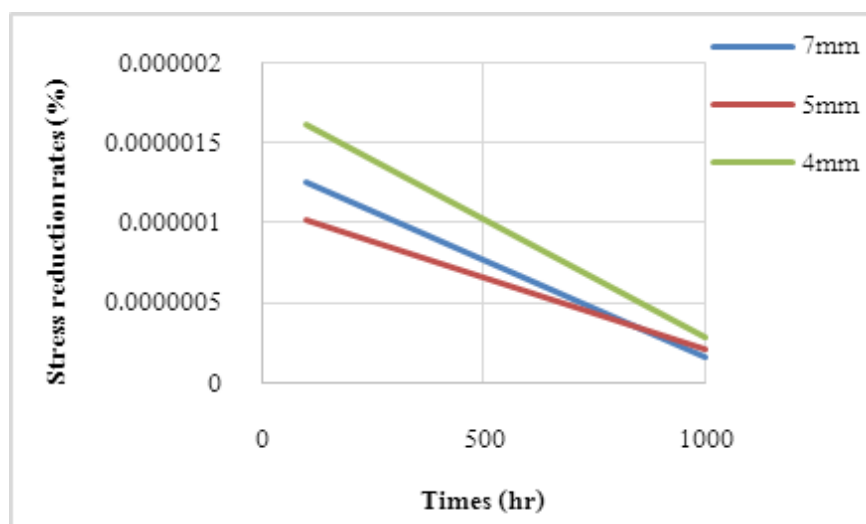
Diameter (mm)	Initial Force (N)	End Force (N)	Relaxation (%)
4	15.55	15.14	2.63
5	24.22	23.72	2.06
7	45.11	44.19	2.03



รูปที่ 6 อัตราการลดลงของแรงดึง ในช่วง 10 ชั่วโมงแรก ของลวดทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 7 อัตราการลดลงของแรงดึง ในช่วง 10 ถึง 100 ชั่วโมง ของลวดทั้ง 3 ชนิด



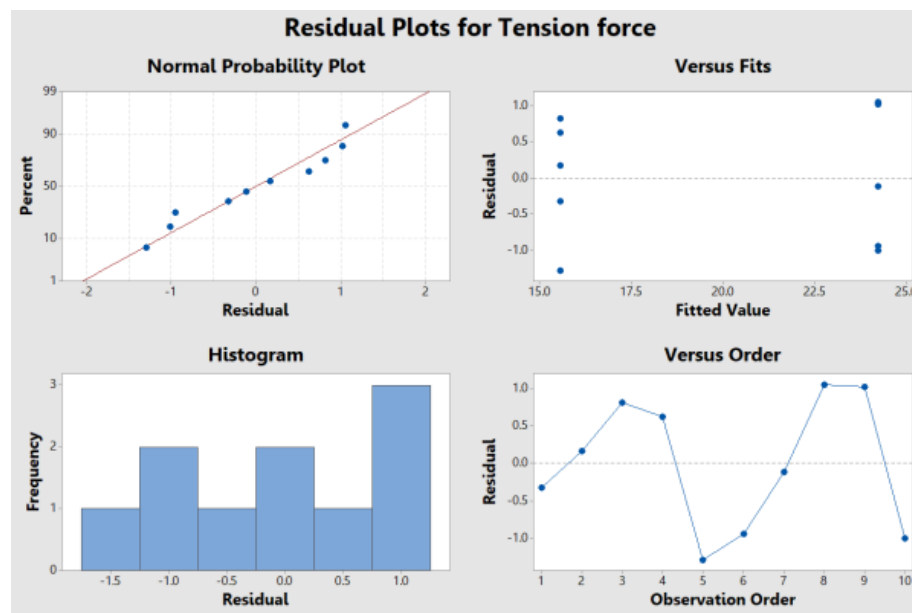
รูปที่ 8 อัตราการลดลงของแรงดึง ในช่วง 100 ถึง 1000 ชั่วโมง ของลวดทั้ง 3 ชนิด

การทดสอบข้างต้นนี้ได้ผ่านการทวนสอบ One-way ANOVA ซึ่งเป็นการทวนสอบการออกแบบการทดลองปัจจัยเดียว คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีระดับของการทดลอง คือ 4 และ 5 มิลลิเมตร โดยการออกแบบการทดลองแบบ One-way ANOVA นี้ ใช้โปรแกรมทางสถิติในการออกแบบการทดลอง 1 ปัจจัย 2 ระดับ และมีการทดลอง 5 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลำดับการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ One-way ANOVA

Diameter (mm)	Tension force (N)
4	15.23
4	15.72
4	16.37
4	16.18
4	14.26
5	23.27
5	24.10
5	25.27
5	25.24
5	23.21

หลังจากทำการทดลองตามตัวแปรที่กำหนด นำผลการทดลองไปตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test), การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และ การทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การตรวจสอบความถูกต้องตามสมมติฐาน

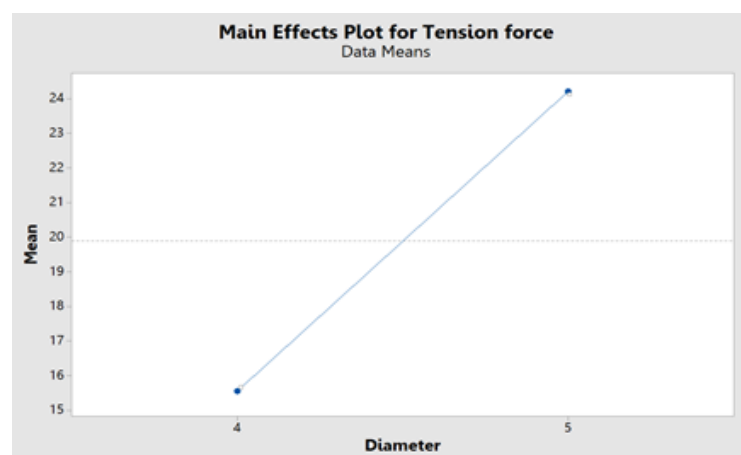
จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ค่าเฉลี่ยเหลือที่นำมาวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบไม่มีแนวโน้ม เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นปกติของข้อมูล พบว่า มีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็น และไม่มีหลักฐานใดมาสนับสนุนว่าข้อมูลไม่มีเสถียรภาพ สรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ คือ มีความเป็นอิสระของข้อมูล มีความเป็นปกติของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูล และเมื่อทดสอบคุณสมบัติของข้อมูลแล้ว จึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of Variance : ANOVA) แสดงผลตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความต้านทานแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diameter	1	187.749	187.749	216.28	0.000
Error	8	6.945	0.868		
Total	9	194.693			

R-sq 96.43% R-sq (adj) 95.99%

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ปัจจัยของค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq เท่ากับ 96.43% หมายความว่า ความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 96.43% ส่วนที่เหลือประมาณ 3.57% เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) โดยเป็นความผันแปรจำนวนน้อยมากที่ไม่สามารถอธิบายได้ และสามารถมองไปถึงค่า R-sq (adj) เท่ากับ 95.99% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R-sq เป็นการยืนยันให้สมมุติฐานว่าแบบจำลองหรือผลวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยค่าความต้านทานแรงดึงในการศึกษามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจาก 4 มิลลิเมตร ไปยัง 5 มิลลิเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีอิทธิพลโดยตรงกับค่าความต้านทานแรงดึง ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Torill และ Zeren [5-7]

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการลดลงของแรงดึงแปรผกผันกับระยะเวลาดึง โดยอัตราการลดลงของแรงดึงช่วง 10 ชั่วโมงแรกค่า strain rate ของลวดทั้ง 3 ขนาดมีค่าสูงถึง $0.8 \times 10^{-4} - 3.7 \times 10^{-4} \%$ ต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่วง 100 ชั่วโมง และ 1000 ชั่วโมงคือ $0.8 \times 10^{-5} - 3.2 \times 10^{-5} \%$ ต่อชั่วโมง และ $1 \times 10^{-9} - 1.6 \times 10^{-9} \%$ ต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยลวดเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีแรงดึงเริ่มต้นสูงกว่าลวดเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า สอดคล้องกับผลทางสถิติที่ชี้ชัดว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดมีผลอย่างมีนัยสำคัญกับแรงดึงลวด และผลการคำนวณได้ค่าความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าชนิดนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร คือ 2.63% และ 2.06% ตามลำดับ และได้ค่าความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าชนิดมีรอยย้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร คือ 2.03% ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าค่าความผ่อนคลายของลวดแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดและแปรผกผันกับขนาดของแรงดึง ทั้งนี้แนะนำให้ใช้ความเร็วขึ้นแน่นอนเดียวกันในช่วงติดตั้ง และสภาพยึดตัวได้เป็นอีกตัวแปรที่ควรต่อขอศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทดสอบนี้จะถูกเสนอในรูปแบบเสนอขอคิดเห็นการจัดทำร่างมาตรฐานแก่คณะกรรมการวิชาการ ร่างมาตรฐานลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง เพื่อใช้เป็นข้อมูลการพัฒนาร่างมาตรฐานการทดสอบผลิตภัณฑ์ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jose, M. and Elics, M. Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires. *Journal of Materials and Structure*, 2004, 37(5), pp. 301-304.
- [2] Ravera, P. et al. Influence of aging on the relaxation and internal friction properties of cold drawn pearlites. *Scripta Metallurgica*, 1984, 18(11), pp. 1313-1318.
- [3] Suarez, F. et al. Influence of the storage conditions on prestressing steel relaxation losses. *Materials de Construction*, 2012, 62(308), pp. 531-546.
- [4] Zdenek, P. et al. Relaxation of prestressing steel at varying strain and temperature: viscoplastic constitutive Relation. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139, pp. 814-823.
- [5] Sithipong, S. et al. Relaxation Assessment of Steel Wire Strand for Prestressing of Concrete. *Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal*, 2020, 13(1), pp. 71-81.
- [6] Torill, Y. et al. Relaxation of PC Steel Wire. *Journal of the Japan Society for Testing Materials*, 1962, 11(111), pp. 768-774.
- [7] Zeren A. and Zeren M. Stress relaxation properties of prestressed steel wires. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141, pp. 86-92.