



พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น

Parameter optimization of 7-wires strand process

ศุภัทร ศิลาลอย^{1*} ปริญา ศรีสัตยกุล² จิรวัดน์ ณ พัทลุง¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

²สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร จังหวัดกรุงเทพฯ 10120

Supat Silalay¹ Parinya Srisattayakul² Chirawat Na-Badalung¹

¹Department of Industrial Engineering and Logistics, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6, Bang Phra, Si Racha, Chon Buri, Thailand, 20110

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

*E-mail: supat_si@rmutto.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 06-3325-4941

Received: 4 August 2022, Revised: 15 September 2022, Accepted: 4 October 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น เพื่อให้สมบัติเชิงกลเป็นตามข้อกำหนดของลูกค้า ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ มากกว่า 234.6 กิโลนิวตัน แรงดึงสูงสุด มากกว่า 261 กิโลนิวตัน และการยืดตัว มากกว่า 5 % ในปัจจุบันสมบัติเชิงกลลวดตีเกลียว 7 เส้นที่ผลิตได้นั้น มีสมบัติเชิงกลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งเกิดจากความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตขั้นตอนตีเกลียว ได้แก่ ความตึงลวด และ อุณหภูมิ แนวทางในการปรับปรุงจะเป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น คือ ความตึงลวด 12980 kg และอุณหภูมิ 376 °C เมื่อนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลในกระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้นได้เพิ่มมากขึ้น ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ 250.6595 กิโลนิวตัน แรงดึงสูงสุด 277.4124 กิโลนิวตัน และการยืดตัว 5.1985 %

คำสำคัญ ลวดตีเกลียว 7 เส้น สมบัติเชิงกล การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD)

Abstract

The objective of this research is to study the optimal conditions of mechanical properties on 7-wires strand, to comply customer's need of mechanical properties conditions respectively; the yield load > 234.6 kN, the breaking load > 261 kN and the elongation > 5%. At the present, the mechanical property of 7-wires strand does not conform to the customer's specification, which was caused by parameters of 7-wires strand process inconsistency, e.g. tension and temperature. The proposed improvement was applying the Design of Experiment



(DOE) using Central Composite Design (CCD) technique where statistical results of optimization indicated the tension of 12980 kg and temperature of 376 °C. When the appropriate values of these parameters were used in the process, it was found that the mechanical properties were increased e.g. the yield load was at 250.6595 kN, the breaking load improved to 277.4124 kN, and the elongation was developed to 5.1985 %.

Keywords: 7-wires strand, mechanical properties, central composite design (CCD)

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเป็นกลุ่มธุรกิจหนึ่งที่มีอัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่อง และการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ผลิตจะต้องปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สร้างคุณภาพให้การบริหารภายในองค์กร เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตสินค้า และการแข่งขันทางการตลาด [1] เนื่องจากในการผลิตสินค้า ถ้าสินค้าไม่ได้คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ เกิดของเสียตั้งแต่การเริ่มผลิตครั้งแรก เพราะพนักงานขาดประสบการณ์ในงาน ย่อมทำให้องค์กรประสบปัญหาการผลิต ในการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษากระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ซึ่งกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของสินค้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าด้านสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)[2] ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load) แรงดึงสูงสุด (Breaking Load) และการยืดตัว (Elongation) โดยจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE) เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) ซึ่งบทสรุปสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้เหล่านี้ จะถูกนำไปสร้างเป็นมาตรฐานการทำงาน (Standard and Operation : S&OP) สำหรับเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเหล่านี้ ทำให้ทางผู้วิจัยมีความต้องการศึกษาหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อลดปัญหาด้านคุณภาพของสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) โดยดำเนินการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (DOE)

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในสภาวะปัจจุบันกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงเป็นภาคตัดขวางได้ดังรูปที่ 2 ประสบกับปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของสินค้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) ด้านสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ซึ่งข้อกำหนดของลูกค้าดังกล่าวนี้ คือ แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load) > 234.6 kN, แรงดึงสูงสุด (Breaking Load) > 261 kN และการยืดตัว (Elongation) > 5%[3] แนวทางในการปรับปรุงปัญหาจะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD)[4] โดยมีพารามิเตอร์สำคัญ 2 พารามิเตอร์ ที่ได้มาจากรายงานการผลิตและการวิเคราะห์เบื้องต้น (Pre-test) ได้แก่ ความตึงลวด (Tension : A) และอุณหภูมิ (Temperature : B)[5] สามารถแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับระดับของพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1[6] ได้จากการกำหนดระดับปัจจัยของโปรแกรม ส่วนผลตอบสนอง (Response) จะเลือกเป็นข้อกำหนดของลูกค้าโดยให้ความสำคัญกับ การยืดตัว (Elongation : Y3) แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load : Y1) และแรงดึงสูงสุด (Breaking Load : Y2) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำคัญตามการทดลอง CCD

ระดับพารามิเตอร์	ความตึงลวด (kg.) : A	อุณหภูมิ (°C) : B
ระดับ 1	12120	376
ระดับ 2	12440	380
ระดับ 3	13220	390
ระดับ 4	14000	400
ระดับ 5	14320	404

กรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนตีเกลียว (Stranding Process), ขั้นตอนอบอ่อน (Annealing Process) และขั้นตอนการลวด (Winding Process)

-ขั้นตอนตีเกลียว (Stranding Process) เป็นการนำลวดเส้นเดียวจำนวน 7 เส้น มาตีรวมกันเป็นลวดเส้นเดียว รูปที่ 3 Pay off & skip unit สำหรับใส่ลวดทั้ง 7 เส้น ใช้ก้านหน้า (First Capstan) รูปที่ 4 และก้านหลัง (Second Capstan) รูปที่ 5 ดึงลวดให้ยืดยาว โดยใช้แรงดึงระหว่างก้านหน้าและก้านหลังเพื่อให้เกิดความตึงลวดในระหว่างการผลิตที่กำหนดในแผนการทดลอง

-ขั้นตอนอบอ่อน (Annealing Process) เป็นการอบคลายความเค้นลวด [7] ณ อุณหภูมิ 370-400 °C โดยใช้อุณหภูมิที่กำหนดในแผนการทดลอง รูปที่ 6 Induction furnace และรูปที่ 7 Cooling system

-ขั้นตอนการลวด (Winding Process) เป็นการกรอกลวดเพื่อเตรียมส่งลูกค้า แสดงข้อมูลดังรูปที่ 8

หลังจากผลิตเสร็จแล้ว นำมาทดสอบหาสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ดังแสดงในรูปที่ 9 ข้อมูลจากการดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองเชิงสถิติด้วยเทคนิค CCD ของกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ดำเนินการทดลองตามพารามิเตอร์ในกระบวนการตีเกลียว ผ่านกระบวนการดึงลวดระหว่างก้านหน้าและก้านหลัง ผ่านกระบวนการอบอ่อนตามลำดับ ซึ่งจะแสดงกระบวนการผลิตดังรูปที่ 10 [8]



รูปที่ 1 ลักษณะลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำเร็จรูป



รูปที่ 2 ภาควัดขวางของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น



รูปที่ 3 Pay off & skip unit



รูปที่ 4 First capstan



รูปที่ 5 Second capstan



รูปที่ 6 Induction furnace



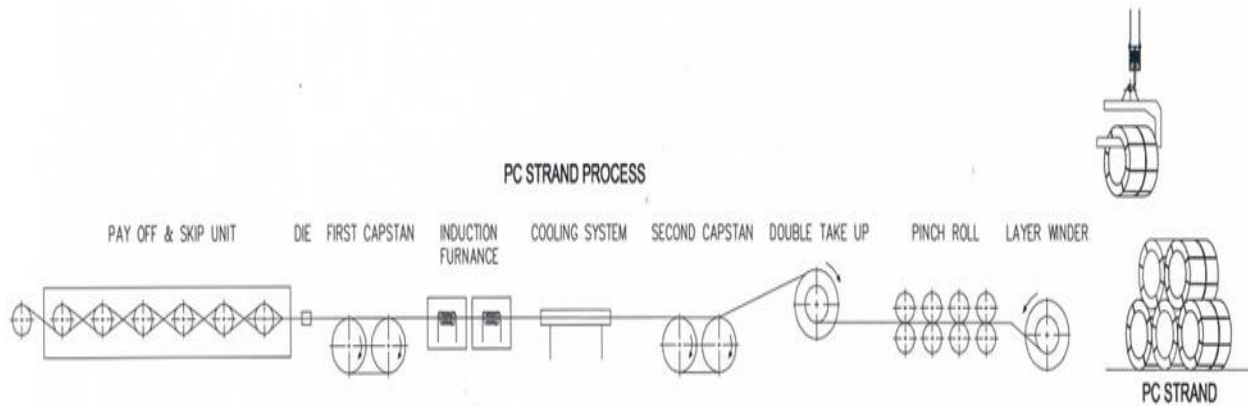
รูปที่ 7 Cooling system



รูปที่ 8 Layer Winder



รูปที่ 9 การทดสอบแรงทอสมบัติเชิงกล



รูปที่ 10 กระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

หลังจากได้ข้อมูลจากการทดลอง ดังตารางที่ 2 นำมาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง CCD

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามการทดลอง CCD

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความ ตึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึง พิสูจน์ (kN)	แรงดึง สูงสุด (kN)	การ ยืดตัว (%)
1	12440	380	252.90	280.50	4.43
2	14000	380	240.70	265.40	5.67
3	12440	400	247.10	278.10	4.79
4	14000	400	239.30	266.90	5.90
5	13220	390	243.70	273.60	5.74
6	13220	390	245.90	275.40	5.56
7	13220	390	244.50	273.90	5.79
8	12120	390	248.60	279.80	4.52
9	14320	390	241.20	268.70	5.77
10	13220	376	250.40	277.60	5.46
11	13220	404	240.70	272.60	5.80
12	13220	390	245.80	275.00	5.62
13	13220	390	246.20	274.10	5.73
14	13220	390	244.30	275.80	5.81
15	12440	380	251.60	279.40	4.61
16	14000	380	242.60	267.20	5.52
17	12440	400	248.60	279.30	4.71
18	14000	400	240.60	268.00	5.77

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามการทดลอง CCD (ต่อ)

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความ ตึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึง พิสูจน์ (kN)	แรงดึง สูงสุด (kN)	การ ยืดตัว (%)
19	13220	390	244.50	273.70	5.65
20	13220	390	245.70	274.00	5.71
21	13220	390	246.10	274.80	5.78
22	12120	390	247.90	278.50	4.40
23	14320	390	242.40	269.20	5.81
24	13220	376	251.00	277.90	5.54
25	13220	404	241.30	272.50	5.78
26	13220	390	245.40	275.30	5.59
27	13220	390	247.20	275.10	5.71
28	13220	390	244.80	274.60	5.80

การวิเคราะห์ผลแรงดึงพิสูจน์สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงพิสูจน์ (Y1) ได้ดังตารางที่ 3 โดยเมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความตึงลวด (A) และอุณหภูมิ (B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value < α หรือ $0.001 < 0.05$ นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความตึงลวดและอุณหภูมิยิ่งมากมีผลทำให้แรงดึงพิสูจน์ (Y1) ลดลง ดังสมการที่ 1



Yield Load = 1190 - 0.0311 Tension

$$3.39 \text{ Temperature} - 0.000000 \text{ Tension} * \text{Tension} \\ + 0.00256 \text{ Temperature} * \text{Temperature} \\ + 0.000087 \text{ Tension} * \text{Temperature} \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแรงดึงพิสูจน์

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	294.031	49.005	19.31	< 0.001
A	1	190.744	190.744	75.14	< 0.001
B	1	97.804	97.804	38.53	< 0.001
A*A	1	0.391	0.391	0.15	0.699
B*B	1	0.940	0.940	0.37	0.549
A*B	1	3.645	3.645	1.44	0.244
Error	21	53.307	2.538		
Total	27	347.339			

การวิเคราะห์ผลแรงดึงสูงสุด สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงสูงสุด (Y2) ได้ดังตารางที่ 4 เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความตึงลวด (A) จะมีอิทธิพล อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value < α หรือ 0.001 < 0.05 นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความตึงลวดยิ่งมากมีผลทำให้แรงดึงสูงสุด (Y2) ลดลง ดังสมการที่ 2

$$\text{Breaking Load} = 440 - 0.0079 \text{ Tension} - \\ 0.27 \text{ Temperature} - 0.000001 \text{ Tension} * \text{Tension} \\ - 0.00108 \text{ Temperature} * \text{Temperature} + \\ 0.000077 \text{ Tension} * \text{Temperature} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแรงดึงสูงสุด

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	419.347	69.891	29.07	< 0.001
A	1	386.622	386.622	160.82	< 0.001
B	1	13.754	13.754	5.72	0.026
A*A	1	6.318	6.318	2.63	0.120
B*B	1	0.166	0.166	0.07	0.795
A*B	1	2.880	2.880	1.20	0.286
Error	21	50.485	2.404		
Total	27	469.833			

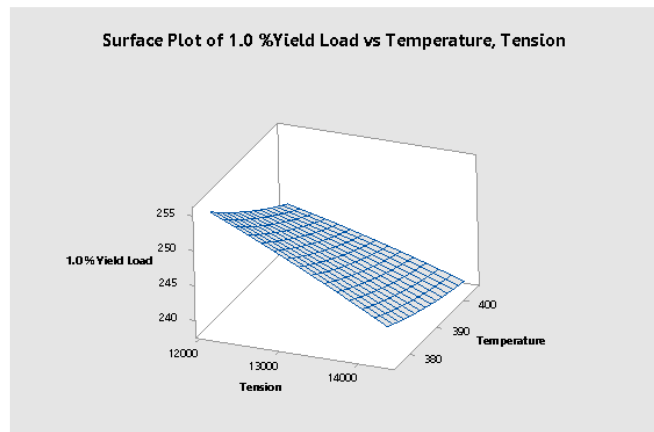
การวิเคราะห์ผลการยึดตัว สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการยึดตัว (Y3) ได้ดังตารางที่ 5 โดยเมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความตึงลวด (A) และอุณหภูมิ (B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value < α หรือ 0.001 < 0.05 นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความตึงลวดและอุณหภูมิยิ่งมากมีผลทำให้การยึดตัว (Y3) เพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 3

$$\text{Elongation} = -234.2 + 0.01545 \text{ Tension} \\ + 0.674 \text{ Temperature} - 0.000001 \text{ Tension} \\ * \text{Tension} - 0.000855 \text{ Temperature} \\ * \text{Temperature} + 0.000000 \text{ Tension} * \text{Temperature} \quad (3)$$

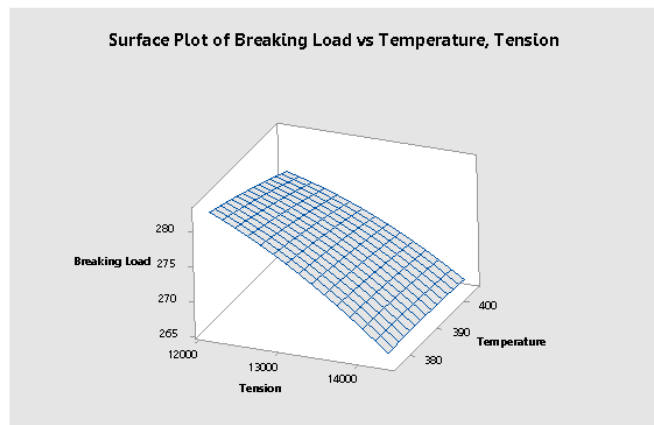
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของการยึดตัว

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	6.17573	1.02929	97.95	< 0.001
A	1	4.08225	4.08225	388.47	< 0.001
B	1	0.19378	0.19378	18.44	< 0.001
A*A	1	1.74258	1.74258	165.82	< 0.001
B*B	1	0.10475	0.10475	9.97	0.005
A*B	1	0.00005	0.00005	0.00	0.946
Error	21	0.22068	0.01051		
Total	27	6.39641			

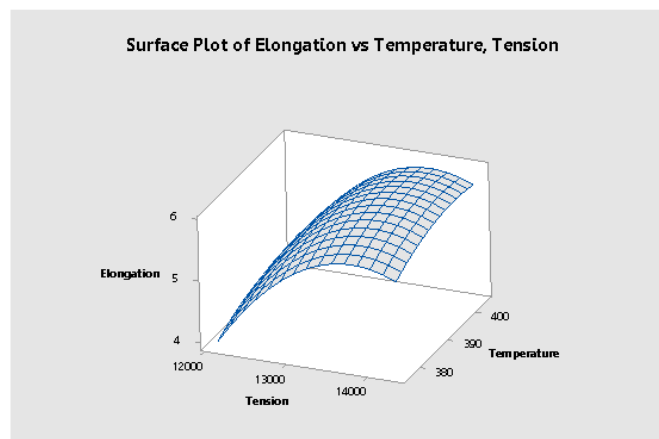
ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง ในรูปที่ 11 และ 12 ระหว่างความตึงลวดและอุณหภูมิของแรงดึงพิสูจน์ และแรงดึงสูงสุด จะเห็นว่าเมื่อความตึงลวดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรงดึงพิสูจน์และแรงดึงสูงสุดลดลง ในส่วนของอุณหภูมิส่งผลต่อแรงดึงพิสูจน์และแรงดึงสูงสุดไม่มาก ในรูปที่ 13 สามารถวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างความตึงลวดและอุณหภูมิของการยึดตัว พบว่าเมื่อความตึงลวดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การยึดตัวเพิ่มขึ้น ในส่วนของอุณหภูมิส่งผลต่อการยึดตัวไม่มาก



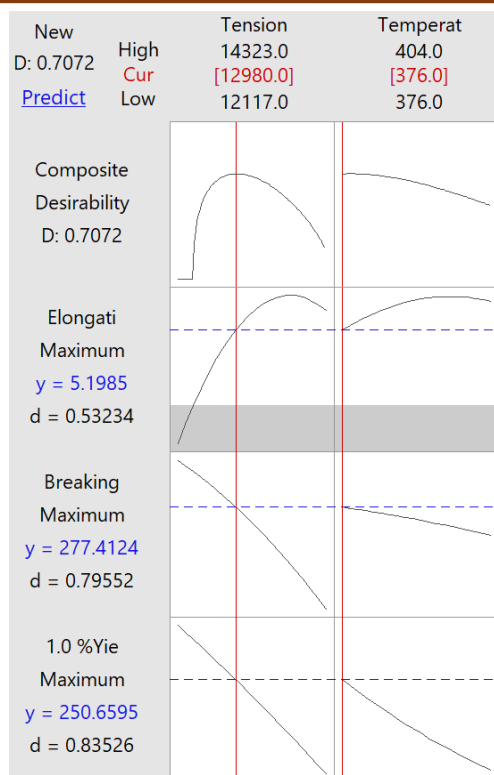
รูปที่ 11 Response surface for interaction effect of tension and temperature on yield load



รูปที่ 12 Response surface for interaction effect of tension and temperature on breaking load



รูปที่ 13 Response surface for interaction effect of tension and temperature on elongation



รูปที่ 14 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

หลังจากได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้ว ดังรูปที่ 14 ความตึงลวด 12980 kg. และ อุณหภูมิ 376 °C ผู้วิจัยจึงนำพารามิเตอร์ไปดำเนินการผลิตจริง เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ สรุปร่วมกันในที่ประชุมบริษัทกำหนดให้ทดลองผลิตจริงจำนวน 3 ครั้ง ดังนี้

- ครั้งที่ 1 จำนวน 10 ตัวอย่าง
- ครั้งที่ 2 จำนวน 10 ตัวอย่าง
- ครั้งที่ 3 จำนวน 10 ตัวอย่าง

มีเงื่อนไขการทดลอง ตรวจสอบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลตัวอย่างหลังจากผลิตเสร็จสิ้นและทำรายงานการทดลองแต่ละครั้งที่ทดลองเสร็จสิ้น ถ้าครั้งที่ 1 หรือ 2 ไม่ผ่านให้หยุดการทดลองทั้งหมดทันที ซึ่งจากการทดลองเสร็จสิ้นทั้ง 3 ครั้งผลสรุปผลทดสอบสมบัติเชิงกลผ่านตามเกณฑ์ที่ลูกค้าต้องการดังตารางที่ 6 ข้อมูลการทดลองซ้ำของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จำนวน 30 ตัวอย่าง ของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

ตารางที่ 6 ข้อมูลการทดลองซ้ำของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจำนวน 30 ตัวอย่าง

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความ ตึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึง พิสูจน์ (kN)	แรงดึง สูงสุด (kN)	การ ยืดตัว (%)
1	12980	376	252.30	276.60	5.14
2	12980	376	250.00	275.90	5.15
3	12980	376	250.22	276.00	5.19
4	12980	376	252.10	278.00	5.24
5	12980	376	251.10	277.30	5.20
6	12980	376	251.80	279.20	5.10
7	12980	376	249.80	276.20	5.21
8	12980	376	250.70	275.70	5.28
9	12980	376	250.20	276.20	5.21
10	12980	376	251.20	277.10	5.27
11	12980	376	250.00	275.90	5.18
12	12980	376	250.30	276.50	5.22
13	12980	376	249.80	276.10	5.17
14	12980	376	249.50	276.10	5.23
15	12980	376	251.20	277.30	5.22
16	12980	376	250.90	278.20	5.20
17	12980	376	252.10	278.60	5.21
18	12980	376	249.30	277.20	5.18
19	12980	376	249.50	277.00	5.24
20	12980	376	249.10	275.90	5.20
21	12980	376	249.90	275.90	5.21
22	12980	376	249.00	275.70	5.16
23	12980	376	250.60	277.20	5.22
24	12980	376	249.70	275.50	5.19
25	12980	376	249.00	275.20	5.24
26	12980	376	249.00	276.10	5.17
27	12980	376	249.80	275.80	5.27
28	12980	376	249.90	275.40	5.20
29	12980	376	249.90	276.20	5.22
30	12980	376	250.10	276.00	5.20



ตารางที่ 7 One-Sample Yiled Load

Null hypothesis	$H_0: \mu = 250.659$
T-Value	P-value
-0.05	0.957

ตารางที่ 7 การประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.957 ซึ่งมีค่ามากกว่า α 0.05 ซึ่งยอมรับ H_0 นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 250.618

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า 1% Yiled Load คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า Yiled Load ที่สูงสุด คือ 250.659 kN

ตารางที่ 8 One-Sample Breaking Load

Null hypothesis	$H_0: \mu = 277.412$
T-Value	P-value
-1.68	0.104

ตารางที่ 8 จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.104 ซึ่งมีค่ามากกว่า α 0.05 ซึ่งยอมรับ H_0 นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 277.351

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า Breaking Load คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า 1% Breaking Load ที่สูงสุด คือ 277.412 kN

ตารางที่ 9 One-Sample Elongation

Null hypothesis	$H_0: \mu = 5.198$
T-Value	P-value
1.63	0.113

ตารางที่ 9 จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.113 ซึ่งมีค่ามากกว่า α

0.05 ซึ่งยอมรับ H_0 นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 5.210

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า Elongation คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า Elongation ที่สูงสุด คือ 5.198 kN

5. สรุป

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัย ทั้ง 2 ปัจจัย คือ ความตึงและอุณหภูมิ มีผลต่อแรงดึงสูงสุด แรงดึงพิสูจน์ และการยืดตัว ตามลำดับเมื่อนำสถานะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ (Parameters Optimization) สำหรับกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น คือ ความตึง (Tension : A) 12980 kg และอุณหภูมิ (Temperature : B) 376 °C และนำมาทดลองอีก 3 ครั้ง จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าค่าระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 95% ทำให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่มีค่าสูงสุด (Maximum) ซึ่งค่าผลตอบสนองทั้ง 3 จะมีค่าสูงมากกว่าข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) [9] โดยสามารถประเมินเป็นความพึงพอใจ (Satisfaction) โดยรวมได้ 70.72 % หลังจากนั้นสร้างเป็นมาตรฐานการทำงาน (Standard and Operation : S&OP) สำหรับเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาด 15.2 มม.

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่กรุณาให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือด้านการการเก็บรวบรวมข้อมูลทดลองการผลิต และการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบหาสมบัติเชิงกลของลวดตีเกลียว 7 เส้น ขนาด 15.2 มม. และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม Minitab V.18 สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Supawat M, Jeerawat P. Defects reduction in metal Parts production process. Kasem Bundit Engineering Journal. 2016;6: 91-106.Thai
- [2] Jin Kook K, Jeong-Su K, Seung Hee K. Mechanical Properties of a new pre-stressing strand with ultimate strength of 2160 MPa. KSCE Journal of Civil Engineering (2014) 18(2): 607-615.
- [3] Thai Industrial Standards. TIS.420-2540(1997). Steel Wires Strands for Prestressed Concrete. Bangkok: TIS; 1997
- [4] Prapaisri S, Pongchanun L. Design and Analysis of Experimen. Bangkok: Top Publishing;2008
- [5] Dan T. The effect of stress relieving treatment condition on the quality of pressed concrete wire in Progressively Drawn Pearlitic Steel. PhD thesis. Kasetsart University; 2012.
- [6] Phumin S. Siam Prestressed Material Co.,Ltd. Stranding Data Report date: 17th February 2019.
- [7] Norasit A. Study of the Annealing Process for the Drawn Fine Copper. Master thesis. Chulalongkorn University;1999.
- [8] Quality Procedure Production, Siam Prestressed Material Co.,Ltd. Document number: QP-PD-01, 2018.
- [9] ASTM International Standards Institution. A416: 12. Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Pre-stressed Concrete. United States: ASTM; 2012