

บทที่ 5

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิจัย

การทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเหล็กหล่อเทา จะต้องมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาดต่าง ๆ ตามมาตรฐานที่กำหนด และทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบตามสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการ และนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

1.1 ผลการทดสอบการออกแบบส่วนผสมแบบ D-Optimal

จากอัตราส่วนผสมทั้งหมด 15 อัตราส่วนผสม ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็ง โดยทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 3 ชิ้นงานทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการออกแบบส่วนผสมแบบ D-Optimal

อัตรา ส่วนผสม ที่	x ₁ (%)	x ₂ (%)	x ₃ (%)	x ₄ (%)	ความต้านทานต่อแรงดึง (Kg/mm ²)			ความแข็ง (HB)		
					1	2	3	1	2	3
1	78.73	16.95	3.11	1.21	10.84	10.74	9.40	167.86	167.34	174.19
2	74.87	20.00	3.21	1.93	12.49	10.83	13.58	163.81	156.59	152.92
3	76.86	19.64	2.50	1.00	16.20	16.42	16.47	231.25	252.84	243.87
4	80.00	15.11	2.53	2.36	13.45	14.17	13.08	176.37	170.98	172.58
5	77.37	16.25	3.38	3.00	13.05	13.48	13.35	170.98	143.84	162.33
6	75.34	19.16	2.50	3.00	14.83	15.62	13.38	201.85	243.00	218.80
7	80.00	13.00	4.00	3.00	11.46	10.00	9.41	138.58	147.64	129.92
8	77.59	18.22	3.19	1.00	15.77	14.85	12.82	190.95	161.84	174.73
9	76.09	18.39	4.00	1.53	11.50	11.83	11.71	160.87	154.74	148.50
10	75.00	20.00	4.00	1.00	14.65	14.83	14.48	181.43	190.33	179.16
11	75.24	17.76	4.00	3.00	8.42	9.67	9.10	165.82	165.31	165.31
12	79.84	15.64	3.42	1.10	22.86	23.00	23.77	214.38	243.00	216.57
13	77.68	17.49	2.50	2.34	16.15	15.79	16.11	189.11	171.51	182.01
14	73.00	20.00	4.00	3.00	16.04	16.90	16.11	203.86	219.55	215.11
15	77.00	16.89	4.00	2.11	13.27	16.60	13.08	175.82	179.72	190.95

2. การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเหล็กหล่อเทาในตารางที่ 5.1 จะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแบบ D-Optimal ด้วยโปรแกรม Design-Expert เวอร์ชัน 8 ซึ่งมีจำนวนการทดลองซ้ำเท่ากับ 3 ซ้ำ โดยการทดลองซ้ำนี้มีไว้เพื่อ

- (1) ทำให้ผู้วิจัยสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้
- (2) ถ้าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างถูกใช้ในการประมาณอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง ดังนั้นการทดลองซ้ำจะทำให้ผู้วิจัยสามารถประเมินค่าของอิทธิพลนั้นได้

2.1 การวิเคราะห์หารูปแบบจำลองของสมการส่วนผสม

วิเคราะห์หารูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม 4 ชนิด คือ เศษเหล็กหล่อ (x_1) เศษเหล็กเหนียว (x_2) ผงคาร์บอน (x_3) และเฟอร์โรซิลิกอน (x_4) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์กระบวนการทดลองจากค่าผลตอบสนองเฉลี่ย ($\bar{y}_i$) ในตารางที่ 5.2 แสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ (Sequential model sum of squares) พบว่า รูปแบบสมการถดถอยที่เหมาะสมของส่วนผสม 4 ชนิด ที่ได้รับการยอมรับสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงตามผลลัพธ์ที่โปรแกรมแนะนำ (Suggested) คือ รูปแบบกำลังสามแบบพิเศษ (Special cubic model) มีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 ที่มีค่า Adjust R-Squared เท่ากับ 0.92 และรูปแบบสมการถดถอยที่เหมาะสมของส่วนผสม 4 ชนิด ที่ได้รับการยอมรับสำหรับค่าความแข็งตามผลลัพธ์ที่โปรแกรมแนะนำ คือ รูปแบบกำลังสามแบบพิเศษ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 ที่มีค่า Adjust R-Squared เท่ากับ 0.83 เช่นกัน ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึง

Summary (detailed tables shown below)					
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	0.0574	< 0.0001	0.104459	-0.00805	
Linear+Squared	0.0147	< 0.0001	0.283985	0.175876	
Quadratic	0.0044	< 0.0001	0.371253	0.249978	
Special Cubic	< 0.0001	0.0005	0.924527	0.893972	Suggested
Cubic	0.0005		0.948256	0.92062	Aliased

ตารางที่ 5.3 ผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษสำหรับค่าความแข็ง

Summary (detailed tables shown below)				
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared
Linear	0.0022	< 0.0001	0.245554	0.152384
Linear+Squared	0.0002	< 0.0001	0.526919	0.434583
Quadratic	< 0.0001	< 0.0001	0.674673	0.584212
Special Cubic	< 0.0001	0.0005	0.826699	0.756737
Cubic	0.0005		0.88155	0.818288

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง

ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่วัดได้นั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานต่อแรงดึง ในตารางที่ 5.4 พบว่ารูปแบบของส่วนผสม (Mixture model) มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p -value น้อยกว่า 0.05 (p value=0.0001) รูปแบบของส่วนผสมไม่มีเทอมของค่าคงที่หรือจุดตัด (Intercept term) เนื่องจากมีข้อจำกัด $\sum x_i = 1$ เมื่อพิจารณาผลของความสัมพันธ์ร่วมหรืออิทธิพลร่วม (Interaction effect) พบว่ามีอิทธิพลร่วมของเศษเหล็กหล่อและผงคาร์บอน (x_1x_3) ที่มีความสัมพันธ์ร่วมระหว่างกัน เนื่องจากมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 และอิทธิพลร่วมระหว่างเศษเหล็กเหนียวและเฟอร์โรซิลิกอน(x_2x_4) โดยผลลัพธ์ในโปรแกรมจะแทนค่าตัวแปรอิสระ x_1 คือ A แทนค่าตัวแปรอิสระ x_2 คือ B แทนค่าตัวแปรอิสระ x_3 คือ C และแทนค่าตัวแปรอิสระ x_4 คือ D

ตารางที่ 5.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสม 4 ส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	479.5834	13	36.89103	42.46061	< 0.0001	significant
Linear Mixture	83.83778	3	27.94593	32.16503	< 0.0001	
AB	1.67049	1	1.67049	1.922691	0.1755	
AC	42.67525	1	42.67525	49.1181	< 0.0001	
AD	0.142373	1	0.142373	0.163867	0.6884	
BC	11.02508	1	11.02508	12.68958	0.0012	
BD	100.0369	1	100.0369	115.1398	< 0.0001	
CD	0.131275	1	0.131275	0.151094	0.7001	
ABC	48.36408	1	48.36408	55.66579	< 0.0001	
ABD	29.87487	1	29.87487	34.3852	< 0.0001	
ACD	28.06491	1	28.06491	32.30198	< 0.0001	
BCD	8.387205	1	8.387205	9.653453	0.0040	
Residual	26.93371	31	0.868829			

ตารางที่ 5.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสม 4 ส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความแข็ง

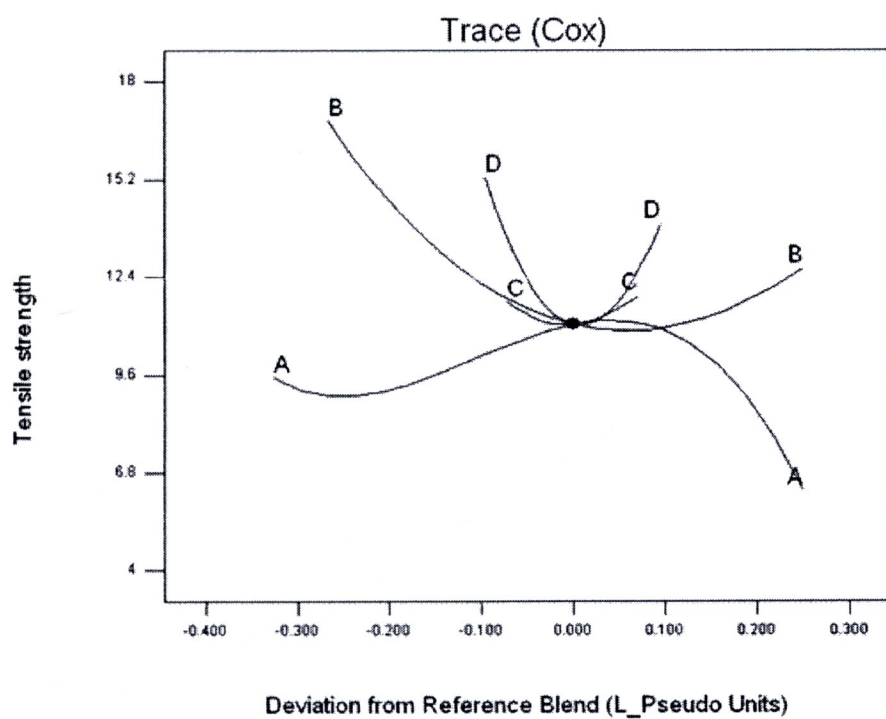
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	35089.39	13	2699.184	17.14571	< 0.0001	significant
Linear Mixture	11870.72	3	3956.907	25.135	< 0.0001	
AB	1017.164	1	1017.164	6.461214	0.0162	
AC	1412.566	1	1412.566	8.972879	0.0053	
AD	3148.28	1	3148.28	19.99845	< 0.0001	
BC	7830.026	1	7830.026	49.73776	< 0.0001	
BD	6835.425	1	6835.425	43.41987	< 0.0001	
CD	2052.621	1	2052.621	13.03862	0.0011	
ABC	367.9643	1	367.9643	2.337377	0.1364	
ABD	1386.728	1	1386.728	8.808749	0.0057	
ACD	112.0416	1	112.0416	0.711709	0.4053	
BCD	2106.719	1	2106.719	13.38226	0.0009	
Residual	4880.212	31	157.4262			

ในตารางที่ 5.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง พบว่า รูปแบบของส่วนผสมมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p -value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (p -value < 0.0001) มีอิทธิพลร่วมระหว่างเศษเหล็กหล่อและเฟอร์โรซิลิกอน (x_1x_4) ที่มีความสัมพันธ์ร่วมระหว่างกัน อิทธิพลร่วมระหว่างเศษเหล็กเหนียวและผงคาร์บอน (x_2x_3) และอิทธิพลร่วมระหว่างเศษเหล็กเหนียวและเฟอร์โรซิลิกอน (x_2x_4) เนื่องจากมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05

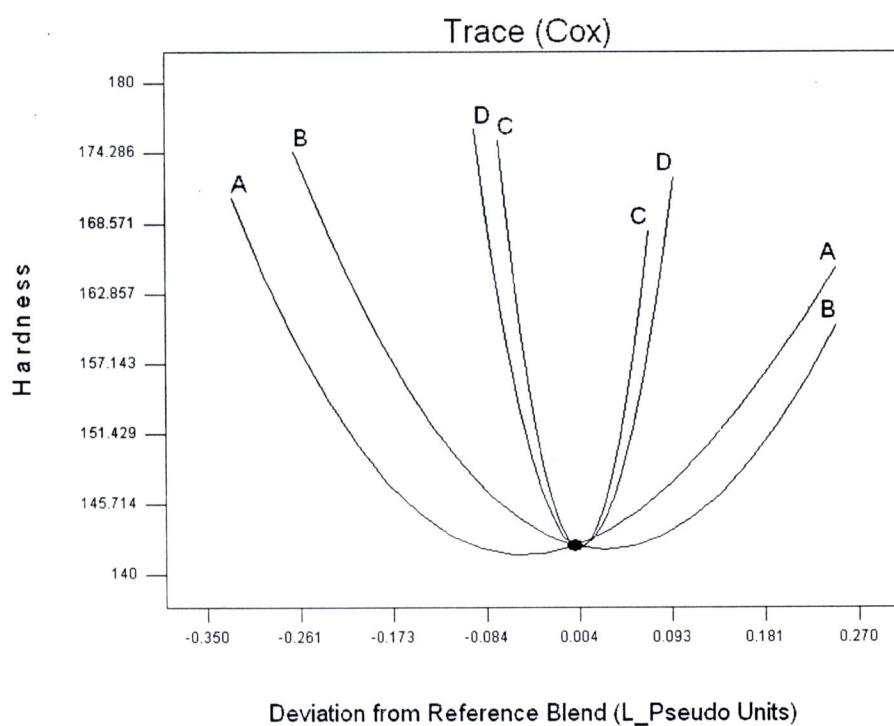
อย่างไรก็ตามแม้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะไม่แสดงค่า p -value ของปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัยนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ Trace plot ของค่าผลตอบสนองว่าปัจจัยหลักนั้นมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ ดังแสดงในภาพที่ 5.1 และภาพที่ 5.2

กราฟ Trace plot ของค่าผลตอบสนอง เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนของแต่ละส่วนผสมจากส่วนผสมที่อ้างอิง โดยอาศัยการพล็อตระหว่างค่าผลตอบสนองกับส่วนผสมทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนไปจากข้อจำกัดหรือขอบเขตที่กำหนด ถ้าในการทดลองมีส่วนผสมมากกว่า 3 ชนิด จะใช้กราฟ Trace plot ของค่าผลตอบสนองมาทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทั้งหมดว่าแต่ละส่วนผสมมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองมากน้อยเพียงใด (Design Expert 7 User's Guide, 2005) เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.1 ในช่วงแรกเมื่อปริมาณส่วนผสมของปัจจัย A เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อปริมาณส่วนผสมของปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของปัจจัยทั้ง 4 ชนิดขึ้น พบว่าปัจจัย A มีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง ในขณะที่ปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หมายความว่าปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D ที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงมาก ส่วนปัจจัย A ก็มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงเช่นกัน แต่ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง

กราฟ Trace plot ของค่าความแข็งในภาพที่ 5.2 พบว่า ในช่วงแรกเมื่อปริมาณส่วนผสมของปัจจัย A ปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของปัจจัยทั้ง 4 ชนิดขึ้นอีก พบว่าปัจจัย A ปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D มีผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.1 กราฟ Trace plot ของค่าความต้านทานต่อแรงดึง



ภาพที่ 5.2 กราฟ Trace plot ของค่าความแข็ง



ดังนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์การถดถอยมาใช้ในการสร้างสมการที่เหมาะสม และได้รับรูปแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดสำหรับค่าผลตอบสนอง คือ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ถูกทำนาย ($\hat{y}_1$) และค่าความแข็งที่ถูกทำนาย ($\hat{y}_2$) ที่มีส่วนผสมทั้ง 4 ชนิดถูกผสมในรูปแบบของกำลังสามแบบพิเศษ และตัวแปรอิสระ x_1 คือเศษเหล็กหล่อ x_2 คือเศษเหล็กเหนียว x_3 คือผงคาร์บอน และ x_4 คือเฟอร์โรซิลิกอน ที่ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ ตามสมการที่ (33) และสมการที่ (34) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 = & -42.97x_1 + 58.51x_2 + 55.33x_3 + 378.35x_4 - 20.65x_1x_2 + 1002.04x_1x_3 - 40.94x_1x_4 \\ & - 342.78x_2x_3 - 811.30x_2x_4 - 254.50x_3x_4 - 904.51x_1x_2x_3 + 514.32x_1x_2 \\ & - 6849.60x_1x_3x_4 + 2195.88x_2x_3x_4\end{aligned}\quad (33)$$

$$\begin{aligned}\hat{y}_2 = & 278.89x_1 + 410.35x_2 + 6924.53x_3 + 4748.94x_4 - 509.67x_1x_2 - 5765.01x_1x_3 \\ & - 6088.12x_1x_4 - 9134.94x_2x_3 - 6706.34x_2x_4 - 31824.58x_3x_4 \\ & - 2494.91x_1x_2x_3 + 3504.09x_1x_2x_4 + 13685.89x_1x_3x_4 + 34801.93x_2x_3x_4\end{aligned}\quad (34)$$

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยที่ (33) รูปแบบสมการถดถอยนี้แสดงถึงอิทธิพลโดยตรงของส่วนประกอบว่ามีนัยสำคัญ และมีความเพียงพอที่จะใช้ในการประมาณค่าความต้านทานต่อแรงดึง โดยตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์กันกับตัวแปรตามคือค่าความต้านทานต่อแรงดึง โดยจะเห็นว่า $\beta_4 > \beta_2 > \beta_3 > \beta_1$ ซึ่ง β_4 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 378.35 อธิบายได้ว่าเมื่อ x_4 คือเฟอร์โรซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น 1 หน่วยน้ำหนัก ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น 378.35 หน่วย เมื่อค่าสัดส่วนของส่วนผสมที่เหลือทั้ง 3 กลุ่มคงที่แสดงให้เห็นว่าเฟอร์โรซิลิกอนมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามมากกว่าอิทธิพลของตัวแปรอิสระอื่นๆ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วม พบว่า ค่า β_{13} เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างเศษเหล็กหล่อและผงคาร์บอน ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยของส่วนผสมบริสุทธิ์ทั้ง 4 ชนิด ในขณะที่ค่า β_{12} และ β_{14} เป็นลบแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างเศษเหล็กหล่อและเศษเหล็กเหนียว และระหว่างเศษเหล็กหล่อและเฟอร์โรซิลิกอนให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงแย่กว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยของส่วนผสมบริสุทธิ์ทั้ง 4 ชนิด สำหรับค่า β_{23} , β_{24} และ β_{34} มีค่าเป็นลบก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยที่ (34) แสดงถึงอิทธิพลโดยตรงของส่วนประกอบที่มีนัยสำคัญ ที่ใช้ในการประมาณค่าความแข็ง โดยตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันกับตัวแปรตาม คือ ค่าความแข็ง โดยจะเห็นว่า $\beta_3 > \beta_4 > \beta_2 > \beta_1$ ซึ่ง β_3 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6924.53 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงคาร์บอนมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามมากกว่าอิทธิพลของตัวแปรอิสระอื่น เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วม พบว่าค่า β_{12} เป็นลบ

แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างเศษเหล็กหล่อและเศษเหล็กเหนียว ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยของส่วนผสมบริสุทธิ์ทั้ง 4 ชนิด สำหรับค่า β_{14} , β_{13} , β_{24} และ β_{34} มีค่าเป็นลบก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

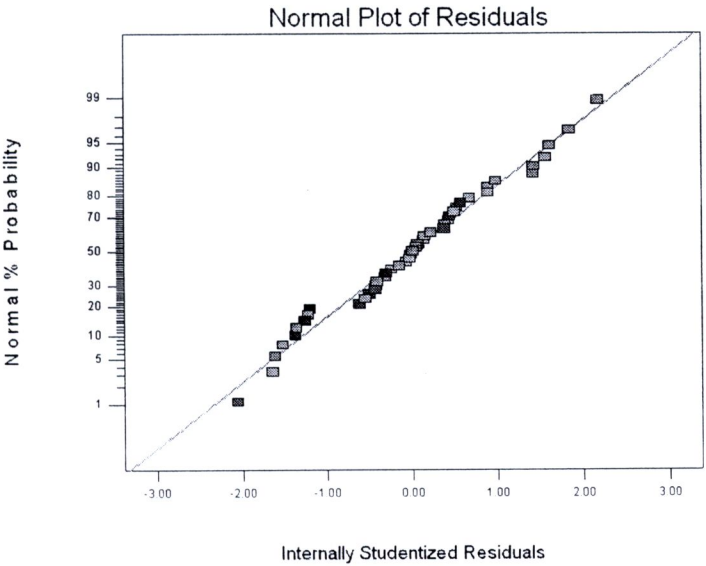
ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบในการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เพื่อให้แน่ใจว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา โดยจะใช้การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual analysis) หรือการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ที่แสดงความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงที่เก็บได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย และใช้กราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อน ถ้าหากรูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ถูกต้อง ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ก็จะต้องไม่มีรูปแบบใดๆ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบต่อไป

2.3 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบ

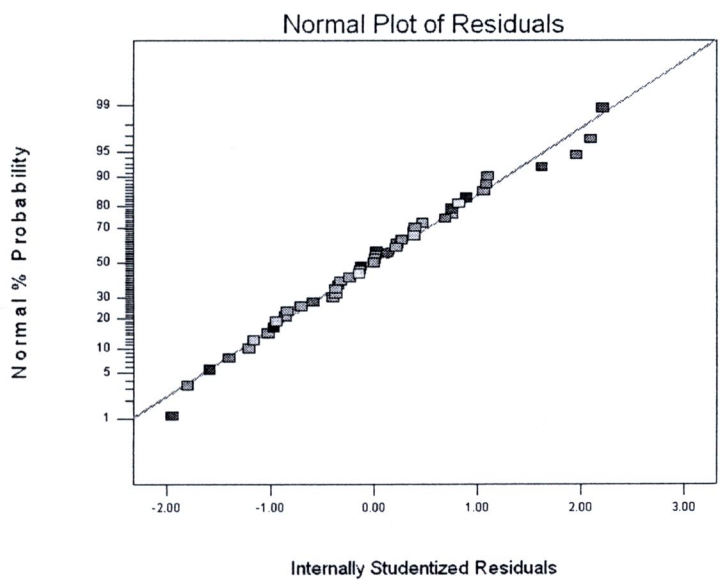
ตรวจสอบว่ารูปแบบของข้อมูลมีรูปแบบของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามสมมติฐาน $\epsilon \sim NID(0, \sigma^2)$ หรือไม่ ถ้าหากข้อมูลที่เก็บได้เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว ข้อมูลที่เก็บได้นั้นจะมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีการตรวจสอบตามสมมติฐาน 3 แบบดังนี้

2.3.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

พิจารณารูปแบบการกระจายแบบปกติของข้อมูล โดยอาศัยการพล็อตข้อมูลลงบนกราฟทดสอบการกระจายแบบปกติของความแตกต่างระหว่างข้อมูลเฉลี่ยแต่ละค่ากับค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 5.3 การกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานต่อแรงดึง

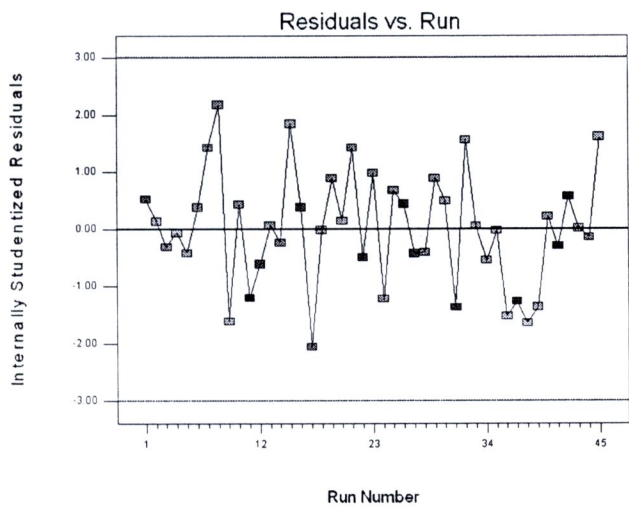


ภาพที่ 5.4 การกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็ง

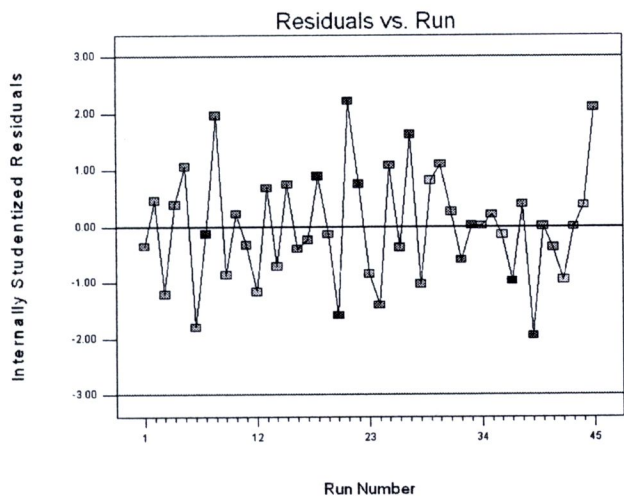
เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.3 และภาพที่ 5.4 แนวโน้มของกราฟทั้งสองมีลักษณะการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง และมีกระจายตัวตามแนวของเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งมีการแจกแจงแบบปกติ

2.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากสมมติฐานที่ว่าค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน โดยอาศัยการพล็อตข้อมูลระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนและลำดับที่ของการเก็บข้อมูล



ภาพที่ 5.5 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ของการเก็บข้อมูลของค่าความต้านทานต่อแรงดึง

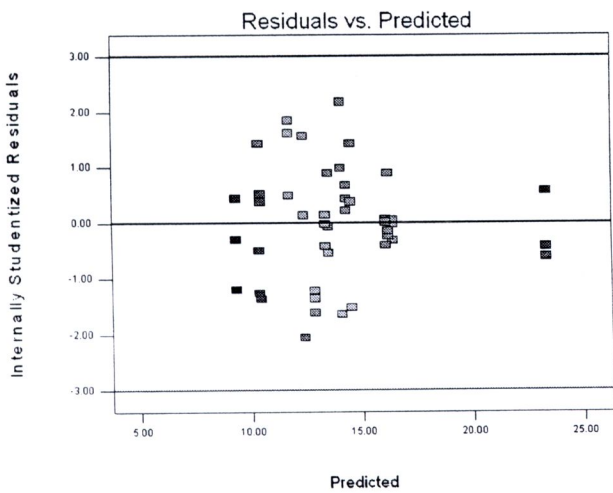


ภาพที่ 5.6 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ของการเก็บข้อมูลของค่าความแข็ง

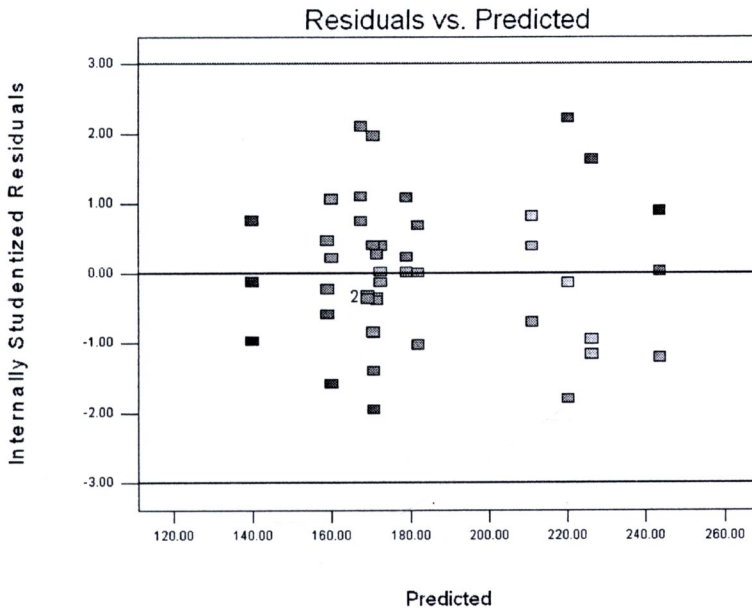
เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.5 และภาพที่ 5.6 กราฟทั้งสองมีลักษณะการกระจายของข้อมูลไม่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับการเก็บข้อมูล

2.3.3 การตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละระดับ

จากสมมติฐานที่ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ โดยอาศัยการพล็อตข้อมูลระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนและค่าประมาณการ



ภาพที่ 5.7 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณการของค่าความต้านทานต่อแรงดึง



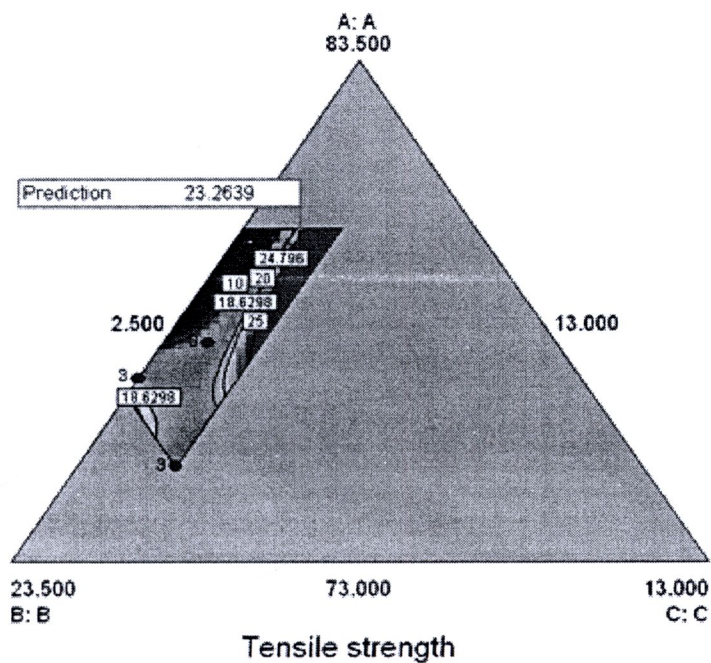
ภาพที่ 5.8 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณการของค่าความแข็ง

เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.7 และภาพที่ 5.8 กราฟทั้งสองมีลักษณะการกระจายของข้อมูลไม่เป็นรูปแบบใดๆ นั่นคือไม่มีลักษณะของการเกิดแนวโน้มหรือเป็นเส้นโค้ง และมีจุดความคลาดเคลื่อนจากแนวเส้นศูนย์กลางทั้งด้านบนและด้านล่างใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมข้อมูลที่ได้มา และค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่

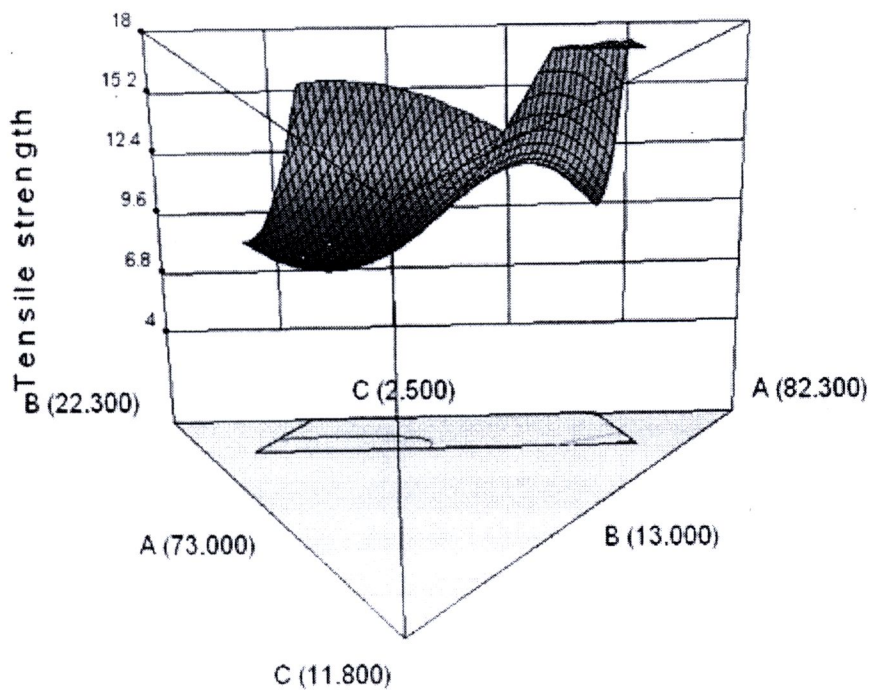
จากการตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบทั้งสามรูปแบบข้างต้น จึงกล่าวได้ว่ารูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้มีความพอเพียงที่จะถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งได้ และจากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่ดีที่สุดต่อไป

2.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็ง

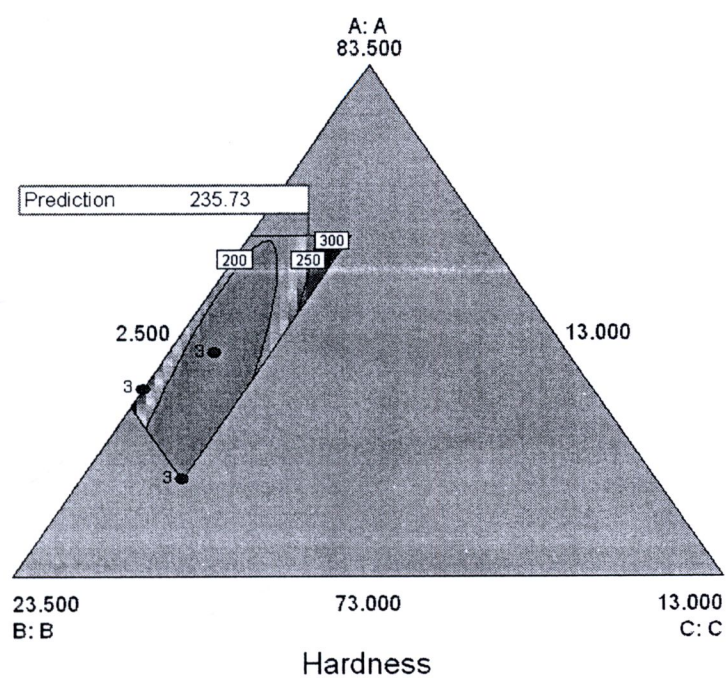
สมการที่ (33) และสมการที่ (34) จะถูกนำมาพล็อตพื้นผิวผลตอบสนองแบบโครงร่าง (Contour plot) ของค่าความต้านทานต่อแรงดึง ดังภาพที่ 5.9 และภาพที่ 5.10 และพื้นผิวผลตอบสนองแบบโครงร่างของค่าความแข็ง ดังภาพที่ 5.11 และภาพที่ 5.12



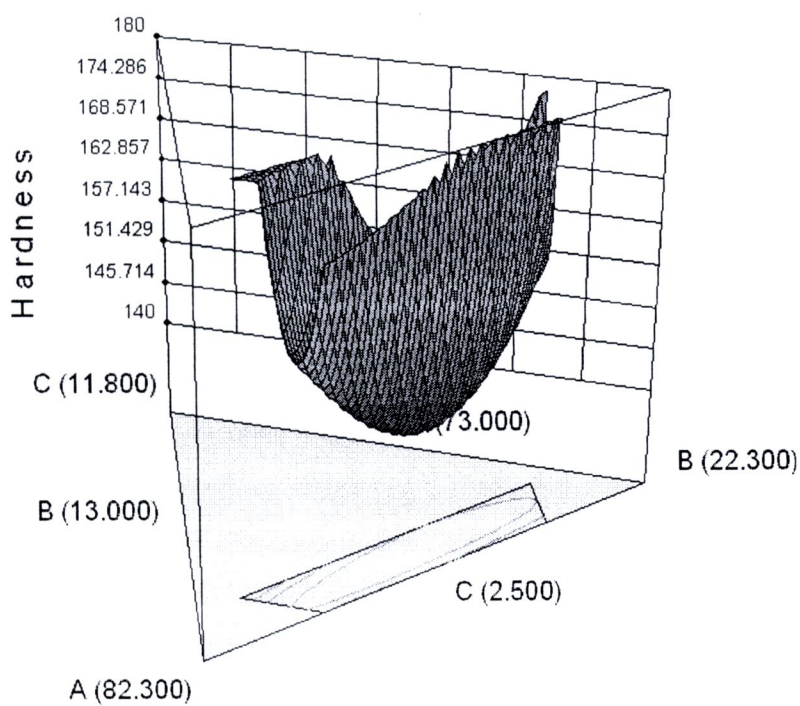
ภาพที่ 5.9 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงดึง



ภาพที่ 5.10 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติของค่าความต้านทานต่อแรงดึง



ภาพที่ 5.11 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความแข็ง



ภาพที่ 5.12 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติของค่าความแข็ง

จากภาพที่ 5.9 และ ภาพที่ 5.11 พิจารณาพื้นผิวผลตอบสนองที่เป็นภาพสี่เหลี่ยมภายในภาพสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่เป็นไปตามข้อกำหนดหรือข้อจำกัด พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ทำนายได้เท่ากับ 23.3 Kg/mm² และค่าความแข็งที่ทำนายได้เท่ากับ 235.7 HB

ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ การนำพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งมาวางทับซ้อนกัน เพื่อหาบริเวณที่มีความสอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของผลตอบสนองทั้งสอง พบว่า ที่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระดับอัตราส่วนผสมของ x_1 ร้อยละ 80 x_2 ร้อยละ 15.6 x_3 ร้อยละ 3.4 และ x_4 ร้อยละ 1 ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เท่ากับ 23.3 Kg/mm² และค่าความแข็งที่ทำนายได้เท่ากับ 235.7 HB โดยให้ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจสูงสุดเท่ากับ 0.71 ดังแสดงตารางที่ 5.6 โดยมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัด คือ $73 \leq x_1 \leq 80, 13 \leq x_2 \leq 20, 2.5 \leq x_3 \leq 4$ และ $1 \leq x_4 \leq 3$

ตารางที่ 5.6 ระดับปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็ง

Solutions	A	B	C	D	Tensile	Hardness	Desirability	
1	80.00	15.62	3.38	1.00	23.27	235.74	0.71	Selected

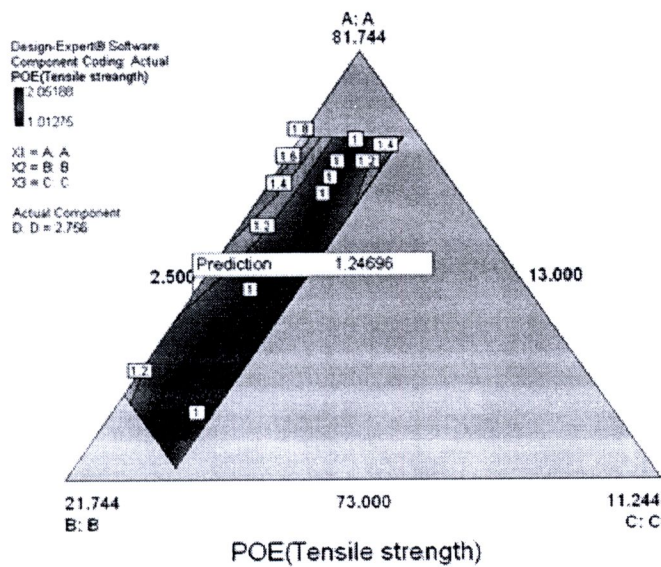
2.5 การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

ในการดำเนินกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการทดลองซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้นนี้ควรที่จะมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์ความแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนด้วยโปรแกรม Design-Expert เวอร์ชัน 8 ซึ่งเป็นการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนไปยังผลลัพธ์ของการคำนวณจากขั้นตอนต่างๆของการทดลอง ไปยังผลการทดลองสุดท้าย สามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าตอบสนองต่างๆในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบสนองต่างๆ

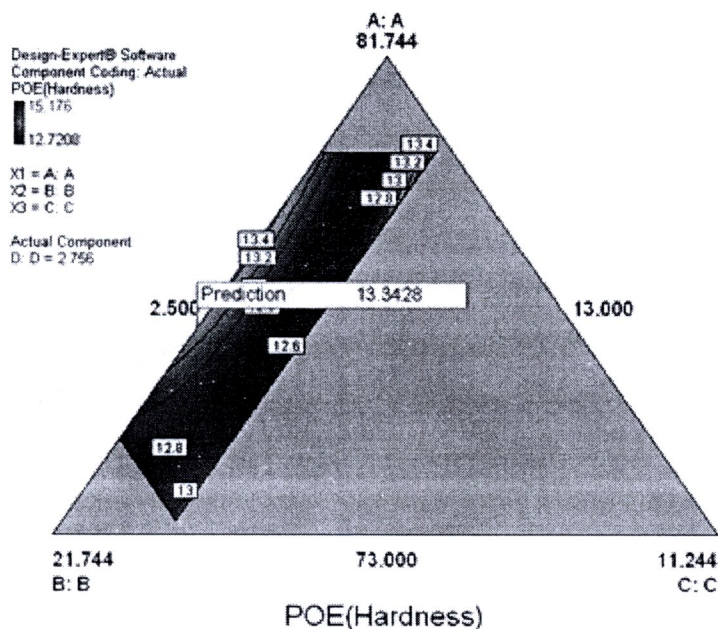
ชื่อ	หน่วย	ชนิด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ต่ำ	สูง
เศษเหล็กหล่อ	%	ส่วนผสม	0.175	73	80
เศษเหล็กเหนียว	%	ส่วนผสม	0.175	13	20
ผงคาร์บอน	%	ส่วนผสม	0.035	2.5	4
เฟอร์โรซิลิกอน	%	ส่วนผสม	0.05	1	3
ค่าความต้านทานต่อแรงดึง	Kg/mm ²	ผลตอบสนอง	0.932	8.42	23.77
ค่าความแข็ง	HB	ผลตอบสนอง	12.547	129.92	252.84

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนจะต้องให้ส่วนผสมต่างๆ มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองน้อยที่สุด โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะถูกนำมาพล็อตพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึง ดังภาพที่ 5.13 แสดงพื้นผิวผลตอบสนองของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดแบบเส้นโครงร่างสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่า พื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างมีค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 1.25 โดยพิจารณาได้จากบริเวณพื้นที่ที่เป็นสีเข้ม ยิ่งสีเข้มมากเท่าใดก็แสดงว่ามีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 5.13 พื้นผิวผลตอบสนองของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึง

ภาพที่ 5.14 แสดงพื้นผิวผลตอบสนองของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดแบบเส้นโครงร่างสำหรับค่าความแข็ง พบว่า พื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างมีค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 13.3 โดยพิจารณาได้จากบริเวณพื้นที่ที่เป็นสีเข้ม ซึ่งจะทำให้มีความผันแปรของปริมาณส่วนผสมต่างๆน้อยที่สุด



ภาพที่ 5.14 พื้นผิวผลตอบสนองของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความแข็ง

ผลสรุปที่ได้จากโปรแกรมดังตารางที่ 5.8 พบว่า ผลการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่ให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ประกอบด้วยเศษเหล็กหล่อร้อยละ 76.79 เศษเหล็กเหนียวร้อยละ 17.96 ผงคาร์บอนร้อยละ 2.5 และเฟอร์โรซิลิกอนร้อยละ 2.76 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของค่าความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 1.3 และค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของค่าความแข็งเท่ากับ 13.3 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เท่ากับ 20 Kg/mm² และค่าความแข็งที่ทำนายได้เท่ากับ 204.8 HB โดยให้ค่าความพึงพอใจที่ระดับ 0.8

ตารางที่5.8 ระดับปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมที่สุด สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความแข็งที่ทำให้มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

Solutions	A	B	C	D	Tensile	POE (Tensile)	Hardness	POE (Hardness)	Desir- ability
1	76.79	17.96	2.5	2.76	20	1.247	204.8	13.34	0.797

2.6 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดนั้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาว่าอัตราส่วนผสมใดที่เหมาะสมที่สุดทั้งทางด้านคุณภาพและต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนผสมที่ทำการวิจัย โดยเลือกใช้เทคนิคมอนติคาร์โล ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อหาค่าคาดหวังของต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจะพิจารณาจากราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ เศษเหล็กหล่อ เศษเหล็กเหนียว ผงคาร์บอน และเฟอร์โรซิลิกอน ในปัจจุบัน (ปี 2553) ดังแสดงตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.10 การวิเคราะห์ต้นทุนรวมโดยเฉลี่ย เพื่อประกอบการตัดสินใจในการทำการผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อเทาของผู้ประกอบการต่อไป

ตารางที่ 5.9 ราคาเศษเหล็กหล่อ เศษเหล็กเหนียว ผงคาร์บอน และเฟอร์โรซิลิกอน

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต	ราคา(บาทต่อกิโลกรัม)
เศษเหล็กหล่อ	14
เศษเหล็กเหนียว	12
ผงคาร์บอน	50
เฟอร์โรซิลิกอน	48

ทำการวิเคราะห์ตามเทคนิคมอนติคาร์โล โดยใช้การแจกแจงความน่าจะเป็นขององค์ประกอบที่มีความไม่แน่นอน เนื่องจากปกติข้อมูลต่างๆในระบบงานจะเป็นข้อมูลที่มีความผันแปรไม่แน่นอน และมีการแปรเปลี่ยนตามเวลา และกำหนดตัวเลขสุ่ม (Random Number: R) ซึ่งจะอยู่ในช่วง [0, 1] โดยโอกาสที่ตัวเลขที่ถูกสุ่มออกมาจะมีค่าใดค่าหนึ่งในช่วง [0, 1] จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในการนำเลขสุ่มไปใช้กับระบบต่างๆจึงต้องแปลงเลขสุ่มไปเป็นเลขในช่วงที่ต้องการ

ตัวแบบจำลองสถานการณ์ของข้อมูลปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทาถูกสร้างโดยใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel เวอร์ชัน 2007 จำลองสถานการณ์ปริมาณการผลิตใน 31 วัน เพื่อหาค่าคาดหวังของต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนผสมตามภาพที่ 5.9

ตารางที่ 5.10 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของแต่ละอัตราส่วนผสม

อัตรา ส่วนผสมที่	$x_1(\%)$	$x_2(\%)$	$x_3(\%)$	$x_4(\%)$	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาทต่อกิโลกรัม)
1	78.73	16.95	3.11	1.21	15.19
2	74.87	20.00	3.21	1.93	15.41
3	76.86	19.64	2.50	1.00	14.85
4	80.00	15.11	2.53	2.36	15.41
5	77.37	16.25	3.38	3.00	15.91
6	75.34	19.16	2.50	3.00	15.54
7	80.00	13.00	4.00	3.00	16.20
8	77.59	18.22	3.19	1.00	15.12
9	76.09	18.39	4.00	1.53	15.59
10	75.00	20.00	4.00	1.00	15.38
11	75.24	17.76	4.00	3.00	16.10
12	79.84	15.64	3.42	1.10	15.29
13	77.68	17.49	2.50	2.34	15.34
14	73.00	20.00	4.00	3.00	16.06
15	77.00	16.89	4.00	2.11	15.82



ข้อมูลของปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทาของโรงงานกรณีศึกษาที่ได้มาจากอดีตในเดือนสิงหาคม 2553 (ตารางที่ 5.11) แสดงการแจกแจงความถี่ ความน่าจะเป็น ความน่าจะเป็นสะสม และช่วงของความน่าจะเป็น ดังแสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.11 ปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทาของโรงงานกรณีศึกษา เดือนสิงหาคม 2553

วันที่ผลิต	ปริมาณการผลิต (กิโลกรัม)	ค่าประมาณปริมาณการผลิต (กิโลกรัม)
1	3,562.2	3,600
2	3,783	3,800
3	0	0
4	5,826	5,800
5	2,418	2,400
6	6,326	6,300
7	5,372	5,400
8	4,784	4,800
9	3,764	3,800
10	5,342	5,300
11	4,460	4,500
12	0	0
13	4,368	4,400
14	3,346	3,300
15	2,786	2,800
16	3,364	3,400
17	4,365	4,400
18	5,327	5,300
19	6,630	6,600
20	5,380	5,400
21	5,298	5,300
22	0	0
23	5,678	5,700
24	2,980	3,000
25	3,886	3,900
26	4,760	4,800
27	3,928	3,900
28	4,460	4,500
29	5,388	5,400
30	5,296	5,300
31	5,650	5,700

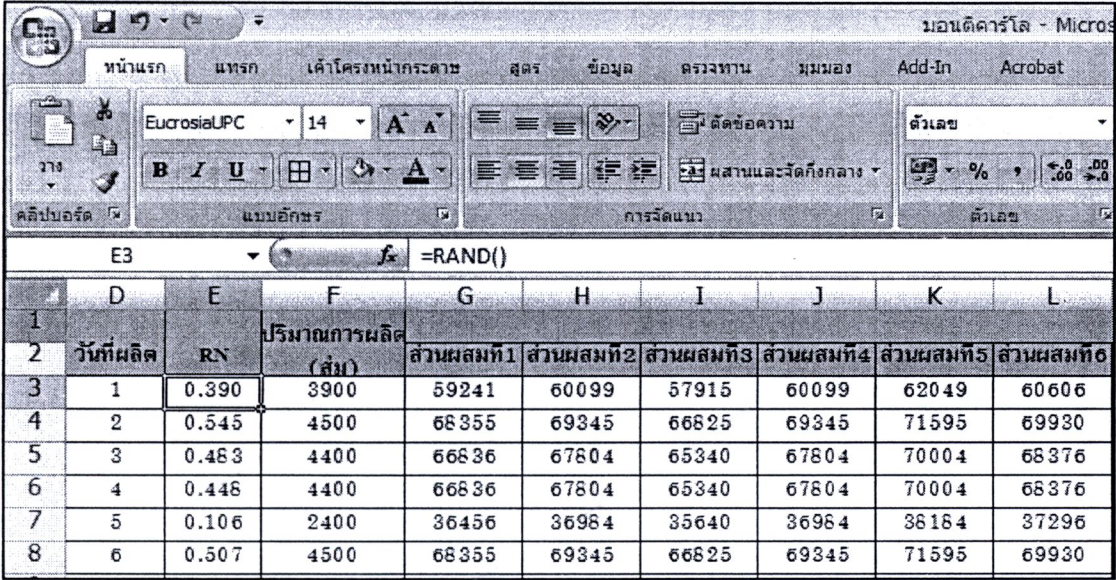
ตารางที่ 5.12 การแจกแจงความถี่ ความน่าจะเป็น ความน่าจะเป็นสะสม และช่วงของความน่าจะเป็นของปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทา

ปริมาณการผลิต (กิโลกรัม)	ความถี่ (ครั้ง)	ความน่าจะเป็นของ ปริมาณการผลิต	ความน่าจะเป็นสะสม	ช่วงของความน่า จะเป็น
0	3	0.10	0.10	0.00-0.10
2400	1	0.03	0.13	0.11-0.13
2800	1	0.03	0.16	0.14-0.16
3000	1	0.03	0.19	0.17-0.19
3300	1	0.03	0.23	0.20-0.23
3400	1	0.03	0.26	0.24-0.26
3600	1	0.03	0.29	0.27-0.29
3800	2	0.06	0.35	0.30-0.35
3900	2	0.06	0.42	0.36-0.42
4400	2	0.06	0.48	0.43-0.48
4500	2	0.06	0.55	0.49-0.55
4800	2	0.06	0.61	0.56-0.61
5300	4	0.13	0.74	0.62-0.74
5400	3	0.10	0.84	0.75-0.84
5700	2	0.06	0.90	0.85-0.90
5800	1	0.03	0.94	0.91-0.94
6300	1	0.03	0.97	0.95-0.97
6600	1	0.03	1.00	0.98-1.00

กำหนดตัวเลขสุ่มโดยจะใช้สูตร RAND () ในการสุ่มตัวเลขจากช่วงของความน่าจะเป็นสะสมของปริมาณการผลิต (ภาพที่ 5.10) และใช้สูตร VLOOKUP ในการหาค่าคอลัมน์แรกทางด้านซ้าย ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิง (ความน่าจะเป็นสะสมของปริมาณการผลิต) เพื่อหาค่าตรรกะที่ต้องการให้ VLOOKUP ค้นหาการจับคู่ที่ตรงกัน หรือการจับคู่ที่เหมาะสมหรือไม่ของความน่าจะเป็นสะสมของปริมาณการผลิตกับปริมาณการผลิตต่อวัน ดังแสดงในภาพที่ 5.11

วันที่เกิด		E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
วันที่เกิด		RN	ปริมาณการผลิต	ส่วนสมที่1	ส่วนสมที่2	ส่วนสมที่3	ส่วนสมที่4	ส่วนสมที่5	ส่วนสมที่6	ส่วนสมที่7	ส่วนสมที่8	ส่วนสมที่9	ส่วนสมที่10	ส่วนสมที่11	ส่วนสมที่12	ส่วนสมที่13	ส่วนสมที่14	ส่วนสมที่15
1	1	0.848	5700	86583	87837	84645	87837	90687	86578	92340	86184	88863	87666	91770	87153	87438	91542	90174
2	2	0.842	3300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
3	3	0.330	3800	57722	58558	56430	58558	60458	59052	61560	57456	59242	58444	61180	58102	58292	61028	60116
4	4	0.613	4800	72912	73968	71280	73968	76368	74592	77760	72376	74832	73824	77280	73392	77088	75936	75936
5	5	0.013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	6	0.246	3400	51646	52394	50490	52394	54094	52836	55080	51408	53006	52292	54740	51986	52156	54604	53788
7	7	0.961	6300	95697	97083	93555	97083	100233	97902	102060	95256	98217	96894	101430	98327	96642	101178	99666
8	8	0.737	5300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
9	9	0.906	5800	88102	89378	86130	89378	92278	90132	93960	87696	90422	89204	93380	96327	96642	101178	99666
10	10	0.711	5300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
11	11	0.987	6600	100254	101706	98010	101706	105006	102564	108920	99792	102894	101508	106260	100914	101244	105996	104412
12	12	0.096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	13	0.925	5800	85102	89378	86130	89378	92278	90132	93960	87696	90422	89204	93380	96327	96642	101178	99666
14	14	0.699	5300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
15	15	0.952	6300	95697	97083	93555	97083	100233	97902	102060	95256	98217	96894	101430	98327	96642	101178	99666
16	16	0.157	2800	42532	43148	41580	43148	44548	43512	45360	42336	43652	43064	45080	42812	42952	44968	44296
17	17	0.555	4800	72912	73968	71280	73968	76368	74592	77760	72376	74832	73824	77280	73392	77088	75936	75936
18	18	0.244	3400	51646	52394	50490	52394	54094	52836	55080	51408	53006	52292	54740	51986	52156	54604	53788
19	19	0.190	3000	45570	46230	44550	46230	47730	46620	48600	45360	46770	46140	48300	45870	46020	48180	47460
20	20	0.203	3300	50127	50853	49005	50853	52503	51282	53460	49896	51447	50754	53130	50457	50622	52998	52206
21	21	0.724	5800	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
22	22	0.159	2800	42532	43148	41580	43148	44548	43512	45360	42336	43652	43064	45080	42812	42952	44968	44296
23	23	0.620	5400	82026	83214	80190	83214	85914	83916	87480	81648	84186	83052	86940	82566	82836	86724	85428
24	24	0.232	3400	51646	52394	50490	52394	54094	52836	55080	51408	53006	52292	54740	51986	52156	54604	53788
25	25	0.876	5700	86583	87837	84645	87837	90687	86578	92340	86184	88863	87666	91770	87153	87438	91542	90174
26	26	0.811	5400	82026	83214	80190	83214	85914	83916	87480	81648	84186	83052	86940	82566	82836	86724	85428
27	27	0.061	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	28	0.913	5800	88102	89378	86130	89378	92278	90132	93960	87696	90422	89204	93380	96327	96642	101178	99666
29	29	0.337	3800	57722	58558	56430	58558	60458	59052	61560	57456	59242	58444	61180	58102	58292	61028	60116
30	30	0.181	3000	45570	46230	44550	46230	47730	46620	48600	45360	46770	46140	48300	45870	46020	48180	47460
31	31	0.622	5300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
32	32	0.987	6600	100254	101706	98010	101706	105006	102564	108920	99792	102894	101508	106260	100914	101244	105996	104412
33	33	0.096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	34	0.925	5800	85102	89378	86130	89378	92278	90132	93960	87696	90422	89204	93380	96327	96642	101178	99666
35	35	0.699	5300	80507	81673	78705	81673	84323	82362	85860	80136	89267	81514	85330	81037	81302	85118	83846
ทั้งหมด		2018751	2047989	1973565	2047989	2114439	2065266	2152980	2009448	2071911	2044002	213690	2032041	2038686	2134374	68851	67822	67822
ต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวัน		65121	66064	63663	66064	68208	66621	69451	64821	66836	65936	69022	65550	65764	68851	67822	67822	67822

ภาพที่ 5.15 การจำลองสถานการณ์การผลิตชิ้นส่วนเหล็กหล่อภายใน 31 วัน



มอเนดิคาร์โล - Microsoft Excel

หน้าแรก แทรกเค้าโครงหน้ากระดาษ สูตร ข้อมูล ตรวจสอบ มุมมอง Add-In Acrobat

EurosiaLPC 14 A A

B I U

คลิกป้อนสูตร

แบบอักษร

การจัดแนว

จัดข้อความ

ผสานและจัดกึ่งกลาง

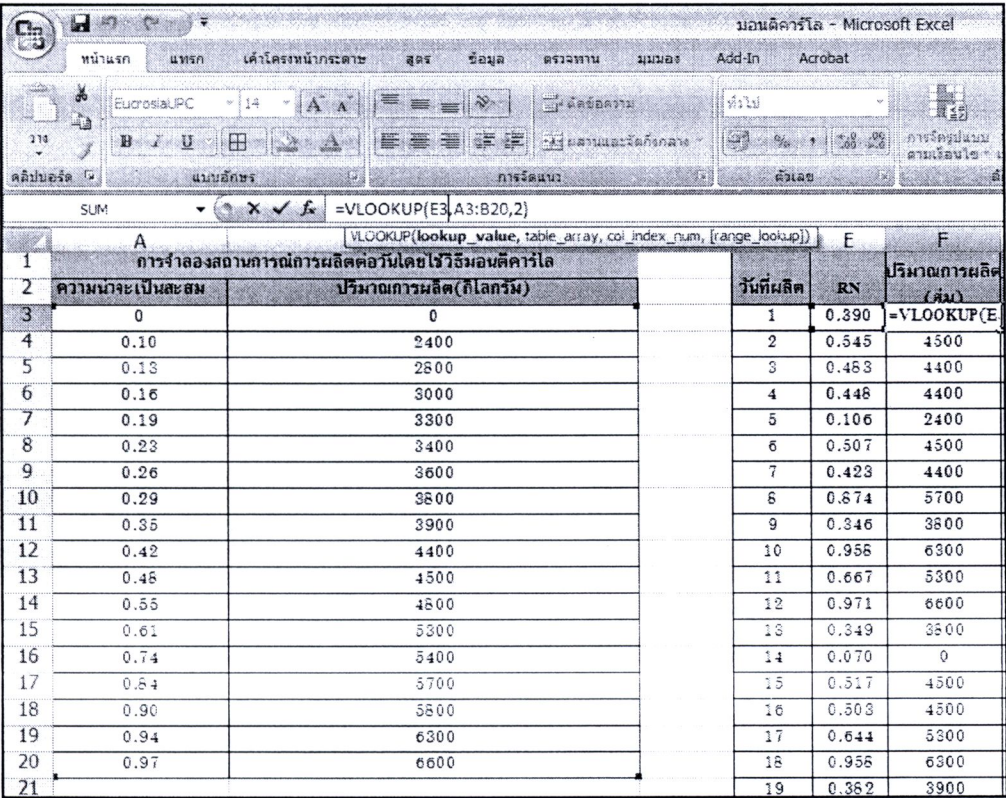
ตัวเลข

ตัวเลข

E3 =RAND()

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	วันที่ผลิต	RN	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ส่วนผสมที่1	ส่วนผสมที่2	ส่วนผสมที่3	ส่วนผสมที่4	ส่วนผสมที่5	ส่วนผสมที่6
3	1	0.390	3900	59241	60099	57915	60099	62049	60606
4	2	0.545	4500	66855	69345	66825	69345	71595	69930
5	3	0.463	4400	66836	67804	65340	67804	70004	68376
6	4	0.448	4400	66836	67804	65340	67804	70004	68376
7	5	0.106	2400	36456	36964	35640	36964	38164	37296
8	6	0.507	4500	66855	69345	66825	69345	71595	69930

ภาพที่ 5.16 การกำหนดตัวเลขสุ่มโดยใช้สูตร RAND ()



มอเนดิคาร์โล - Microsoft Excel

หน้าแรก แทรกเค้าโครงหน้ากระดาษ สูตร ข้อมูล ตรวจสอบ มุมมอง Add-In Acrobat

EurosiaLPC 14 A A

B I U

คลิกป้อนสูตร

แบบอักษร

การจัดแนว

จัดข้อความ

ผสานและจัดกึ่งกลาง

ตัวเลข

ตัวเลข

SUM

=VLOOKUP(E3,A3:B20,2)

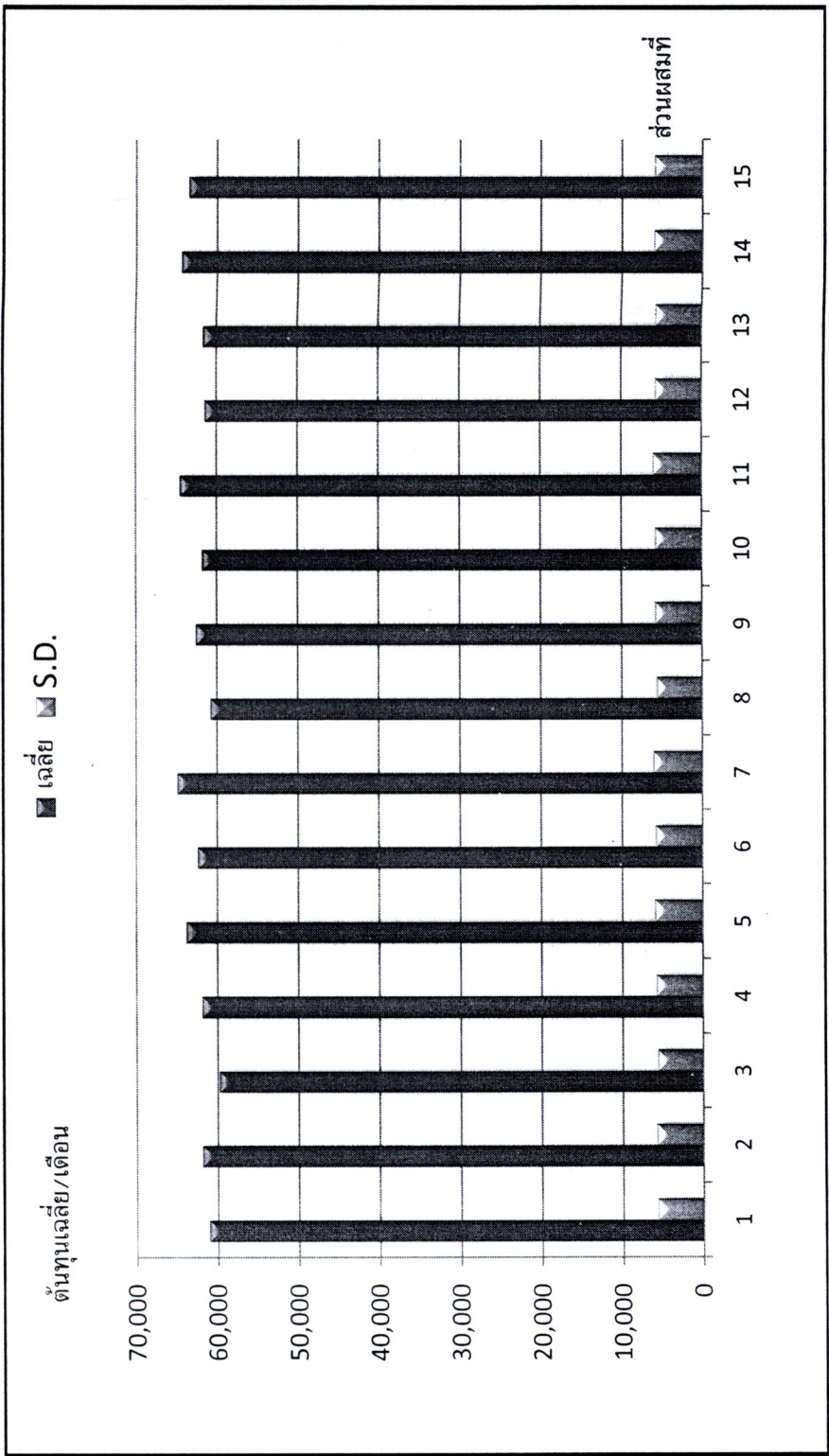
	A		E	F
1	การจำลองสถานการณ์การผลิตด้วยวิธีมอนติคาร์โล		วันที่ผลิต	ปริมาณการผลิต (ตัน)
2	ความน่าจะเป็นสะสม	ปริมาณการผลิต(กิโลกรัม)	RN	
3	0	0	1	=VLOOKUP(E3,A3:B20,2)
4	0.10	2400	2	0.545
5	0.13	2600	3	0.463
6	0.16	3000	4	0.448
7	0.19	3300	5	0.106
8	0.23	3400	6	0.507
9	0.26	3600	7	0.423
10	0.29	3800	8	0.674
11	0.35	3900	9	0.346
12	0.42	4400	10	0.956
13	0.48	4500	11	0.667
14	0.55	4600	12	0.971
15	0.61	5300	13	0.349
16	0.74	5400	14	0.070
17	0.84	5700	15	0.517
18	0.90	5800	16	0.503
19	0.94	6300	17	0.644
20	0.97	6600	18	0.956
21			19	0.362

ภาพที่ 5.17 การใช้สูตร VLOOKUP ค้นหาการจับคู่ที่ตรงกันของความน่าจะเป็นสะสมของปริมาณการผลิตกับปริมาณการผลิตต่อวัน

จากนั้นกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบจำลองสถานการณ์ของปริมาณการผลิต โดยคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตต่อวัน (ค่าในโปรแกรมอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขสุ่มโดยการกด F9) ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบผลการวิเคราะห์ซ้ำเป็นจำนวน 20 ครั้ง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5.13 สรุปผลการจำลองสถานการณ์การผลิตเหล็กหล่อเทา ข้ำ 20 ครั้ง

ทดลอง		ต้นทุนโดยเฉลี่ยของอัตราส่วนผสมที่														
ครั้งที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	64974	65915	63520	65915	68054	66471	66471	69294	64675	66685	65787	68866	65402	65616	68695	67669
2	76440	77547	74729	77547	80063	78201	78201	81523	76088	78453	77396	81019	76943	77195	80818	79610
3	56007	56818	54753	56818	58662	57297	57297	59731	55749	57482	56708	59362	56376	56560	59215	58330
4	58996	59850	57675	59850	61792	60355	60355	62919	58724	60550	59734	63530	59384	59579	62375	61443
5	67914	68898	66394	68898	71133	69479	69479	72430	67601	69702	68763	71983	68361	68585	71804	70731
6	59241	60099	57915	60099	62049	60606	60606	63180	58968	60801	59982	62790	59631	59826	62634	61698
7	60221	61093	58873	61093	63075	61609	61609	64225	59943	61807	60974	63829	60617	60816	63670	62719
8	64484	65418	63041	65418	67541	65970	65970	68772	64187	66182	65291	68347	64909	65121	68177	67158
9	59682	60546	58346	60546	62511	61057	61057	63650	59407	61254	60429	63257	60075	60271	63100	62157
10	62769	63678	61364	63678	65744	64215	64215	66943	62480	64422	63554	66529	63182	63389	66364	65372
11	64092	65020	62657	65020	67130	65569	65569	68354	63797	65780	64894	67932	64514	64725	67763	66750
12	51107	51847	49963	51847	53529	52285	52285	54505	50871	52453	51746	54169	51443	51612	54034	53227
13	50911	51648	49771	51648	53324	52084	52084	54296	50676	52252	51548	53961	51246	51414	53827	53023
14	57281	58111	55999	58111	59996	58601	58601	61090	57017	58789	57997	60713	57658	57847	60562	59657
15	59927	60795	58586	60795	62768	61308	61308	63912	59651	61505	60677	63517	60322	60519	63359	62412
16	63259	64175	61843	64175	66257	64717	64717	67465	62967	64925	64050	67049	63675	63884	66882	65883
17	56791	57614	55520	57614	59483	58100	58100	60567	56529	58286	57501	60193	57165	57352	60044	59146
18	64239	65169	62801	65169	67284	65719	65719	68510	63943	65931	65043	68087	64662	64873	67918	66903
19	59682	60546	58346	60546	62511	61057	61057	63650	59407	61254	60429	63257	60075	60271	63100	62157
20	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259	63259
เฉลี่ย	61063.8	61902.39	59767.8	61902.39	63808.28	62397.92	62397.92	64913.69	60796.98	62588.51	61788.04	64532.51	61444.98	61635.57	64380.04	63465.22
รวม	1221276	1238048	1195356	1238048	1276166	1247958	1247958	1298274	1215940	1251770	1235761	1290650	1228900	1232711	1287601	1269304
S.D.	5694	5761	5604	5761	5940	5804	5804	6060	5674	5821	5751	6017	5723	5739	6001	5905



ภาพที่ 5.18 แผนภาพสรุปผลการจำลองสถานการณ์การผลิตเหล็กหล่อเทา ข้ำ 20 ครั้ง

จากการจำลองสถานการณ์ของปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทาใน 31 วัน ทดลองซ้ำ 20 ครั้ง
ดังแสดงในตารางที่ 5.13 และภาพที่ 5.12 เมื่อวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของ
ต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวัน ดังในสมการที่ (35) และสมการที่ (36)

$$\bar{y} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{35}$$

จะได้

$$\bar{y} - 2.093 \frac{s}{\sqrt{20}} \leq \mu \leq \bar{y} + 2.093 \frac{s}{\sqrt{20}} \tag{36}$$



พบว่า ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ปริมาณการผลิตเหล็กหล่อเทาใน 31 วัน และ
ทดลองซ้ำ 20 ครั้ง จะมีต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 59,703 บาท ถึง 65,148 บาท ดัง
แสดงในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวัน

อัตราส่วนผสมที่	ต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยต่อวัน	ค่าต่ำ	ค่าสูง
1	61,064	58,399	63,728
2	61,902	59,206	64,599
3	59,768	57,145	62,390
4	61,902	59,206	64,599
5	63,808	61,028	66,588
6	62,398	59,681	65,114
7	64,914	62,078	67,750
8	60,797	58,142	63,452
9	62,589	59,864	65,313
10	61,788	59,096	64,480
11	64,533	61,716	67,349
12	61,445	58,766	64,124
13	61,636	58,950	64,321
14	64,380	61,572	67,188
15	63,465	60,701	66,229
เฉลี่ย	62,426	59,703	65,148

จากตารางที่ 5.14 พิจารณาต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวันของอัตราส่วนผสมทั้ง 15 อัตราส่วนผสม จากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล พบว่า อัตราส่วนผสมที่มีต้นทุนเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด คือ อัตราส่วนผสมที่ 3 ซึ่งมีต้นทุนเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 59,768 บาท ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 16.4 Kg/mm² และค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 242.7 HB รองลงมาคืออัตราส่วนผสมที่ 8 ซึ่งมีต้นทุนเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 60,797 บาท ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 14.5 Kg/mm² และค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 175.8 HB และส่วนผสมที่ 1 ซึ่งมีต้นทุนเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 61,064 บาท ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 10.3 Kg/mm² และค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 169.8 HB ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 อัตราส่วนผสมที่ให้ต้นทุนโดยเฉลี่ยต่อวันต่ำสุด 3 อันดับ

อัตราส่วนผสมที่	ต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยต่อวัน(บาท)	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงโดยเฉลี่ย (Kg/mm ²)	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย(HB)
3	59,768	16.4	242.7
8	60,797	14.5	175.8
1	61,064	10.3	169.8

จากตารางที่ 5.15 จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ อัตราส่วนผสมที่ 3 ที่ประกอบด้วยเศษเหล็กหล่อร้อยละ 76.9 เศษเหล็กเหนียวร้อยละ 19.6 ผงคาร์บอนร้อยละ 2.5 และเฟอร์โรซิลิกอนร้อยละ 1 ซึ่งมีต้นทุนเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 59,768 บาท ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 16.4 Kg/mm² และค่าแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 242.7 HB

ดังนั้นจึงนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ อัตราส่วนผสมที่ 3 มาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริงของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็ง โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบธาตุทางเคมีต่อไป

2.7 การเปรียบเทียบความแข็ง ส่วนผสมทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) ระหว่างชิ้นงานจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการเชิงเศรษฐศาสตร์และชิ้นงานของโรงงานกรณีศึกษา

2.7.1 การเปรียบเทียบความแข็ง

ทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ อัตราส่วนผสมที่ 3 กับชิ้นงานจริงของโรงงานกรณีศึกษา โดยทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ค่าความแข็งของชิ้นงานของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ และชิ้นงานจริงของโรงงาน

ขั้นตอนทดสอบที่	ค่าความแข็ง(HB)	
	ส่วนผสมที่ดีที่สุดเชิงเศรษฐศาสตร์	โรงงานกรณีศึกษา
1	239.68	212.24
2	216.26	203.28
3	253.27	195.23
4	244.39	211.46
5	218.48	199.87
6	239.27	218.66
7	241.64	211.32
8	233.74	209.76
9	240.07	214.74
10	228.45	199.96
เฉลี่ย	235.53	207.65

จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดเชิงเศรษฐศาสตร์ และชิ้นงานของโรงงานกรณีศึกษา โดยทำการทดสอบอัตราส่วนผสมซ้ำ 10 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 5.17 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด ให้ค่าความแข็งดีกว่าของโรงงาน โดยทำการวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของค่าความแข็ง ตามสมการที่ (37)

$$\bar{y} - t_{0.025,9} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + t_{0.025,9} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(37)

ตารางที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์หาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของค่าความแข็ง

อัตราส่วนผสม	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย (HB)	ค่าต่ำ	ค่าสูง
ส่วนผสมที่ดีที่สุดเชิง เศรษฐศาสตร์	235.53	227.27	243.78
โรงงานกรณีศึกษา	207.65	202.22	213.08

พบว่า ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการศึกษาคู่กับ 235.53 HB ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของค่าความแข็ง โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จะมีค่าอยู่ในช่วง 227.27 HB ถึง 243.78 HB และค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานของโรงงานการศึกษา คู่กับ 207.65 HB ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของค่าความแข็ง มีค่าอยู่ในช่วง 202.22 HB ถึง 213.08 HB

2.7.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมีของชิ้นงานเหล็กหล่อ จากกลุ่มอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการศึกษาคู่กับ และชิ้นงานของโรงงาน โดยใช้เครื่อง Spectrometer พบว่า ชิ้นงานที่หล่อจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการศึกษาคู่กับ มีปริมาณธาตุผสมโดยเฉลี่ย คือ 3.54%C 2.32%Si 0.35%Mn 0.25%P และ 0.06%S และชิ้นงานจากโรงงานปริมาณธาตุผสมโดยเฉลี่ย คือ 3.75%C 1.95%Si 0.39%Mn 0.07%P และ 0.09%S ดังแสดงในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 ปริมาณธาตุของชิ้นงานหล่อจากกลุ่มอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดและชิ้นงานของโรงงาน

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (%)							
	อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการศึกษาคู่กับ				โรงงานการศึกษา			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
C	3.67113	3.16294	3.78192	3.53866	3.71228	3.90117	3.63736	3.75027
Si	2.15253	2.40352	2.40856	2.32154	2.2365	2.08481	1.86423	1.95291
Mn	0.25282	0.43893	0.36298	0.35158	0.39218	0.38506	0.38164	0.38629
P	0.04242	0.05542	0.66432	0.25405	0.07043	0.07358	0.06760	0.07054
S	0.05926	0.06234	0.06921	0.0636	0.10092	0.08988	0.07920	0.09000

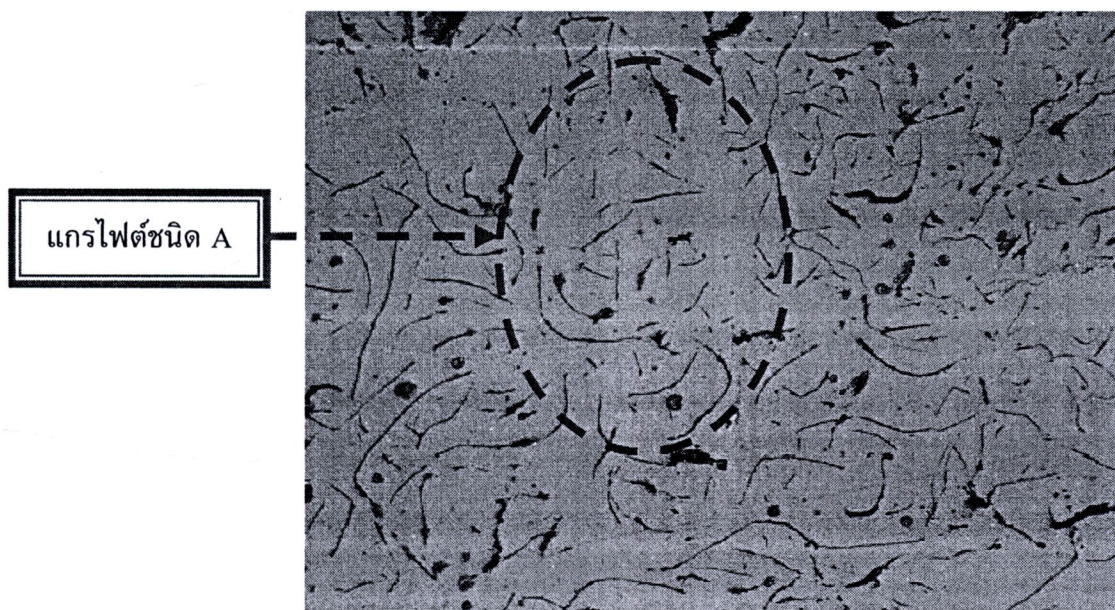
2.7.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro structure)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา ทำโดยการขัดและการกัดผิวด้วยวิธีการทางโลหะวิทยาและศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง Olympus BX60M และอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) JEOL JSM- 5410LV

1) โครงสร้างเกรไฟต์

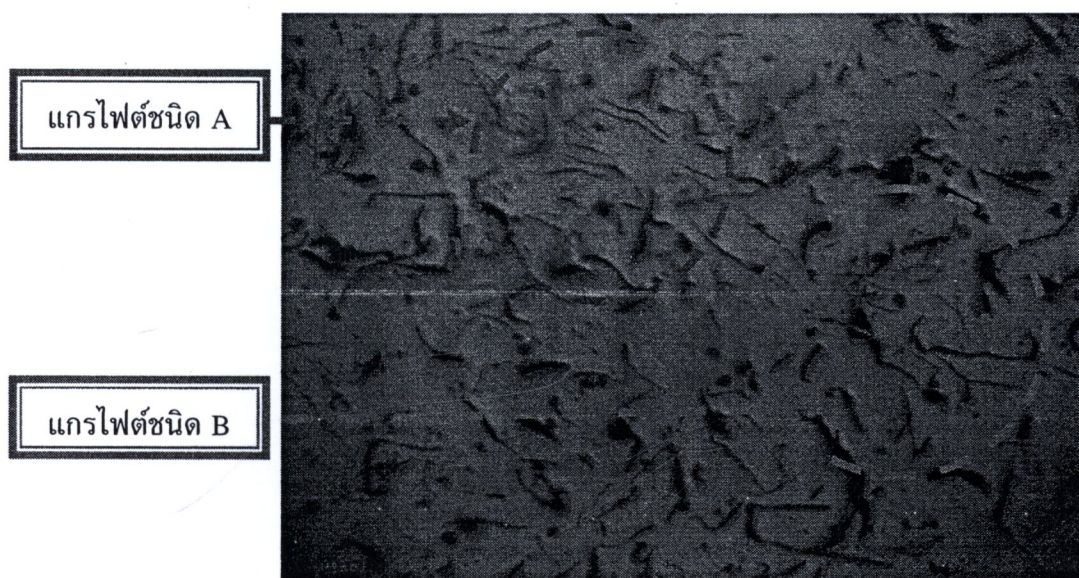
ลักษณะของเกรไฟต์จะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ชิ้นงานที่หล่อด้วยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการศึกษาคู่กับ จะพบโครงสร้างเกรไฟต์ชนิด A มีลักษณะของเกล็ดเกรไฟต์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และ

การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Random orientation flake type graphite) แกรไฟต์ชนิดนี้ปรากฏในเหล็กหล่อคุณภาพดี และแกรไฟต์ที่มีขนาดเหมาะสมกระจายอยู่ทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 5.13 การที่แกรไฟต์มีภาพร่างโค้งงอมีส่วนทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงสูงขึ้น



ภาพที่ 5.19 ลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์ของชิ้นงานจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า

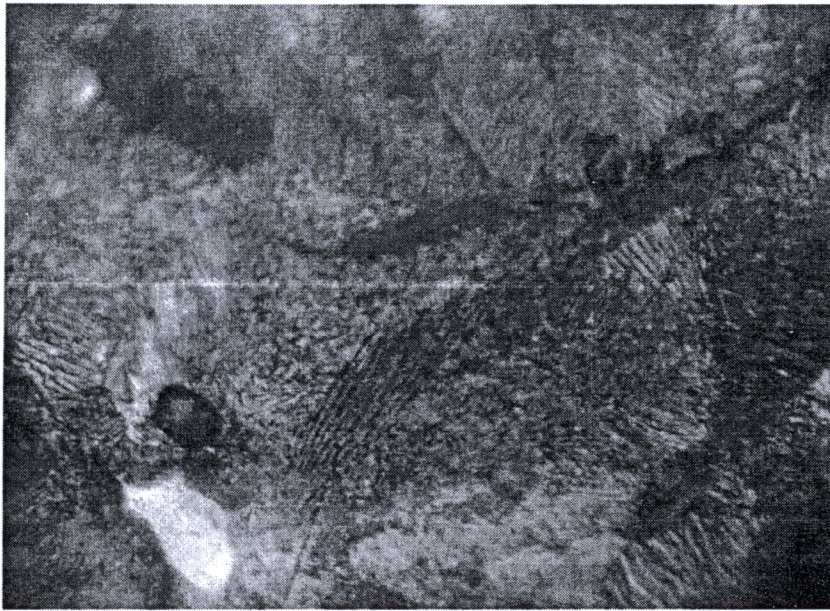
สำหรับชิ้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา จะพบโครงสร้างแกรไฟต์ชนิด A และชนิด B กระจายสลับกันอยู่ ดังแสดงดังภาพที่ 5.14 ซึ่งแกรไฟต์ชนิด B เกิดแกรไฟต์กระจายเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มกระจายออกตามแนวรัศมี การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งมีกลุ่มแกรไฟต์เล็กๆอยู่ตรงกลางและแกรไฟต์ขนาดใหญ่กว่าอยู่รอบๆตามแนวรัศมี การเกิดแกรไฟต์ชนิด B มีผลทำให้ความแข็งแรงของเหล็กหล่อลดลง ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของเหล็กหล่อจากชิ้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษาน้อยกว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่มีโครงสร้างแกรไฟต์ชนิด A เพียงชนิดเดียว



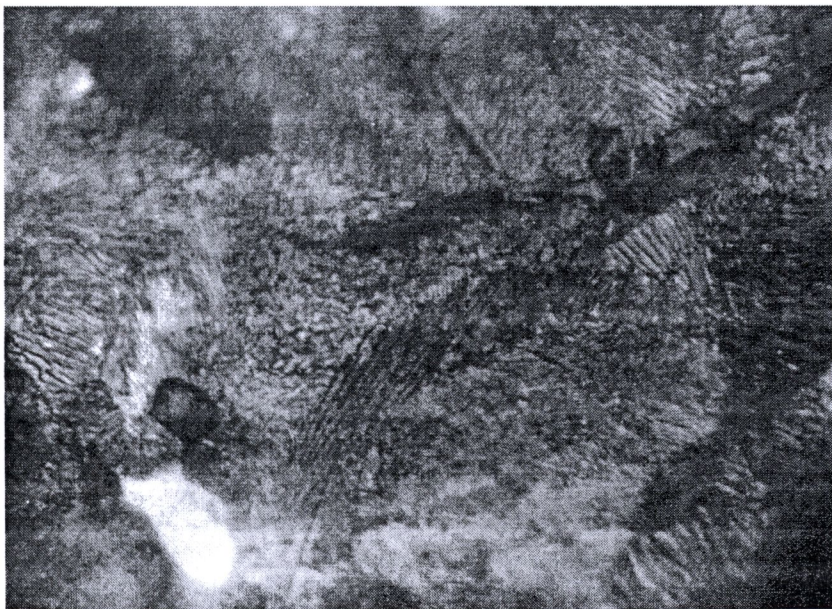
ภาพที่ 5.20 ลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์ของชิ้นงานจากโรงงาน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

2) โครงสร้างพื้นฐาน

จากการทดสอบโครงสร้างพื้นฐาน พบว่า ทั้งชิ้นงานที่หล่อด้วยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดเชิงเศรษฐศาสตร์และชิ้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา จะพบโครงสร้างพื้นฐาน 2 ลักษณะได้แก่ โครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นชั้นๆ สลับกันกับเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ดังแสดงในภาพที่ 5.15 และภาพที่ 5.16 โดยโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ จะมีคุณสมบัติอ่อน ทำให้เหล็กมีความเหนียวสูง ซึ่งเฟอร์ไรต์ของเหล็กหล่อที่มีซิลิกอนละลายอยู่ที่ร้อยละ 1-3 จะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงและการทนต่อการสึก และเพิ่มความแข็ง ที่สำคัญคือเฟอร์ไรต์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการตบแต่งด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นสิ่งที่ต้องการให้มีในเหล็ก ส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลต์จะมีลักษณะเป็นชั้นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์สลับกัน จะเห็นว่าเฟอร์ไรต์ที่มีคุณสมบัติอ่อน ขณะที่คาร์ไบด์มีคุณสมบัติที่แข็ง ทำให้เหล็กนี้มีความแข็งแรงทนต่อแรงดึง ซึ่งถ้าโครงสร้างเพิร์ลไลต์มีมาก จะส่งผลให้ความแข็งแรงของเหล็กหล่อเทาเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะที่เพิร์ลไลต์ยิ่งละเอียดก็จะส่งผลให้เหล็กยิ่งมีความแข็งแรงมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์จะเป็นโครงสร้างพื้นฐานปกติที่พบในเหล็กหล่อเทา



ภาพที่ 5.21 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของชั้นงานจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในเชิง
เศรษฐศาสตร์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 5.22 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของชั้นงานจากชั้นงานจากโรงงาน ที่กำลังขยาย
500 เท่า

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างชั้นงานหล่อจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการเชิงเศรษฐศาสตร์และชั้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา ผลการทดลองโดยสรุป พบว่า ชั้นงานหล่อจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการเชิงเศรษฐศาสตร์มีลักษณะแกรไฟต์ชนิด A ส่วนลักษณะโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ส่วนชั้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษามีลักษณะแกรไฟต์ชนิด A และชนิด B ส่วนลักษณะโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์