

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

การดำเนินการวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ถูกกำหนดให้เป็นไปตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในบทที่ 3 จนแล้วเสร็จ กล่าวคือ ได้ทำการเตรียมชิ้นงานขึ้นจากสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน ตามแผนการทดลองตารางที่ 3.1 และ 3.2 แล้วนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และ เชิงกล ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (tensile strength) เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และความแข็ง (hardness) ของชิ้นงาน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต และ ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของการนำซีรีคลอมาทดแทน DOP ดังนั้นจึงได้แบ่งผลการทดลอง และการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. ผลการตรวจสอบรูปทรง และ การกระจายของขนาด ของผงพีวีซีเรซิน และ แคลเซียมคาร์บอเนต
 - 1.1) ผลการตรวจสอบรูปทรงผงวัสดุ
 - 1.2) ผลการตรวจสอบการกระจายของขนาดผงวัสดุ
2. ผลการทดลองสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต
 - 2.1) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล
 - 2.2) การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ
3. ผลการทดลองสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ ซีรีคลอ
 - 3.1) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล
 - 3.2) การวิเคราะห์หาจุดการทดแทนที่เหมาะสม
4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ
5. สรุปผลตารางการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบรูปทรง และการกระจายของขนาด ผงพีวีซีเรซิน และ แคลเซียมคาร์บอเนต

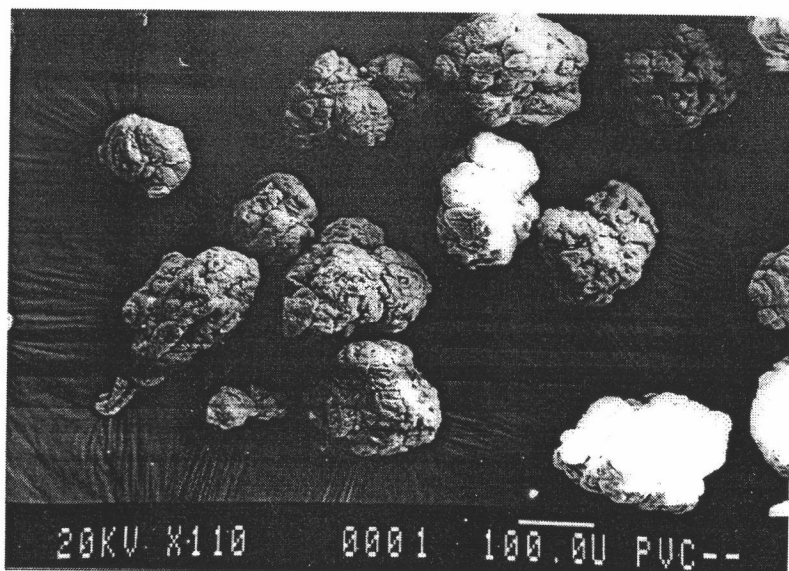
4.1.1 รูปทรงผงวัสดุ

จากภาพถ่ายของผงพีวีซีเรซิน ที่มีค่าดัชนีหักเหของน้ำหนักโมเลกุล (K) = 71 ในรูปที่ 4.1 และภาพถ่ายของผงแคลเซียมคาร์บอเนต ในรูปที่ 4.2 ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 110 และ 7500 เท่าตามลำดับ ทำให้ทราบรายละเอียดของผงพีวีซีเรซินและผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยพบว่า ผงพีวีซีเรซินมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยประมาณ 150 ไมโครเมตร ส่วนผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น มีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน และมีขนาดของผงโดยประมาณ 3.5 ไมโครเมตร

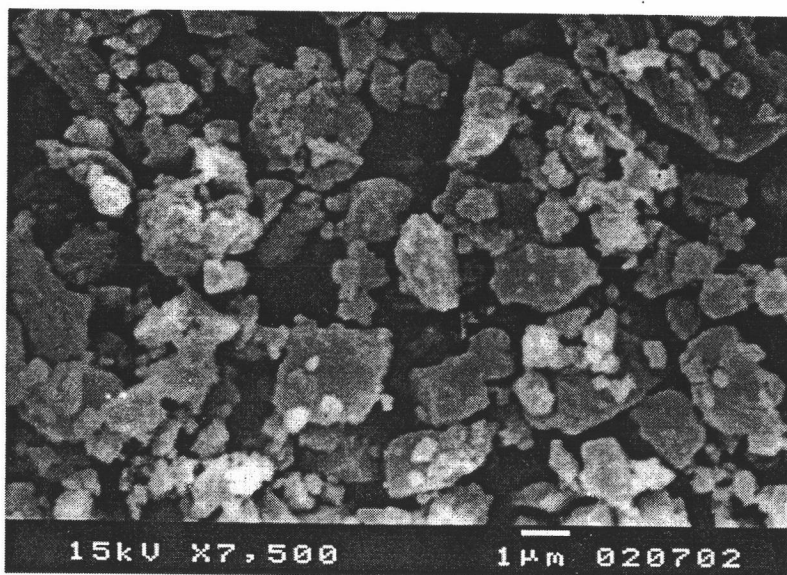
4.1.2 การกระจายของขนาดผงวัสดุ

ผลที่ได้จากการตรวจสอบการกระจายของขนาดของผงพีวีซีเรซิน และ แคลเซียมคาร์บอเนต ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผง กับเปอร์เซ็นต์ของผงที่มีขนาดอยู่ในช่วง จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า ขนาดของผงพีวีซีเรซิน จะมีการกระจายค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.11 - 301.68 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย ($D[4,3]$) เท่ากับ 141.29 ไมโครเมตร ค่ามัธยฐาน ($D(v,0.5)$) เท่ากับ 137.19 ไมโครเมตร มีรูปแบบของการกระจายใกล้เคียงกับการกระจายแบบปกติ (normal distribution) และสำหรับการกระจายของขนาดผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น พบว่า มีการกระจายของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 - 140.58 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ย ($D[4,3]$) เท่ากับ 4.35 ไมโครเมตร ค่ามัธยฐาน ($D(v,0.5)$) เท่ากับ 2.71 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของผงพีวีซีเรซิน
กำลังขยาย 110 เท่า



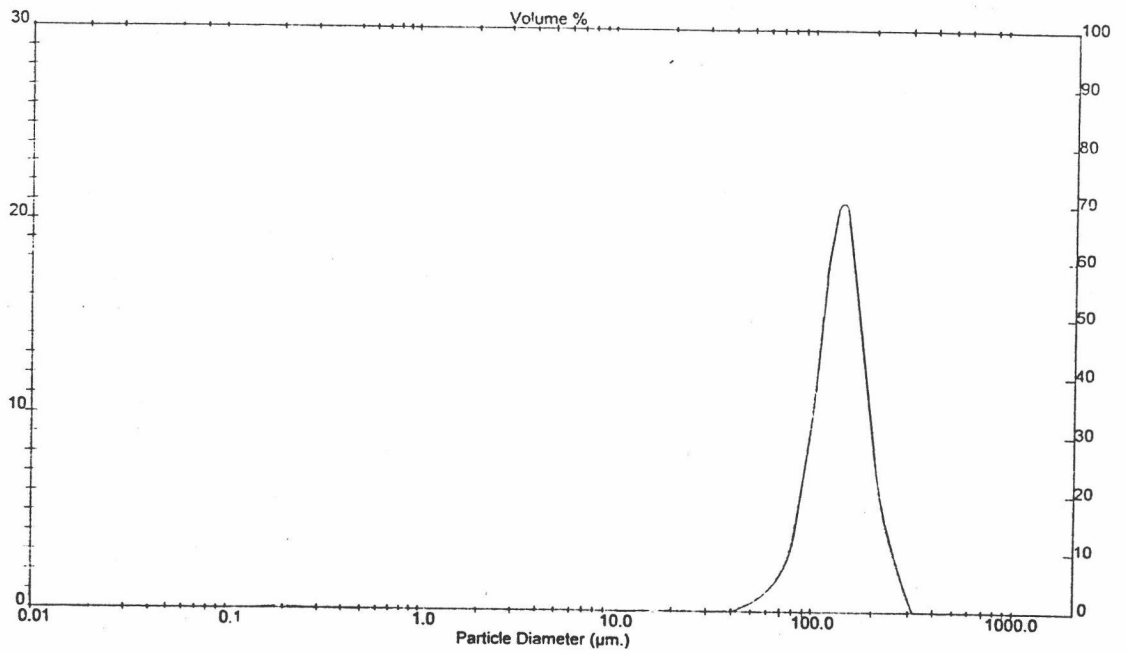
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของผงเคลือบคาร์บอน
กำลังขยาย 7,500 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจสอบการกระจายของขนาดผงพีวีซีเรซิน

Distribution Type: Volume				Result Statistics			
Mean Diameters:				Density = 1.000 g / cub. cm			
D[4, 3] = 141.29 um				Concentration = 0.0208 %Vol			
				D(v, 0.1) = 89.78 um			
				D(3, 2) = 23.57 um			
				D(v, 0.5) = 137.19 um			
				Span = 8.118E-01			
				Specific S.A. = 0.2546 sq. m / g			
				D(v, 0.9) = 201.15 um			
				Uniformity = 2.598E-01			
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.00	7.72	0.77
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.01	9.00	0.78
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.02	10.48	0.80
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.03	12.21	0.83
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.05	14.22	0.88
0.11	0.01	0.13	0.01	14.22	0.07	16.57	0.95
0.13	0.04	0.15	0.05	16.57	0.09	19.31	1.04
0.15	0.10	0.17	0.14	19.31	0.10	22.49	1.14
0.17	0.14	0.20	0.28	22.49	0.08	26.20	1.22
0.20	0.13	0.23	0.41	26.20	0.06	30.53	1.28
0.23	0.10	0.27	0.51	30.53	0.05	35.56	1.33
0.27	0.08	0.31	0.58	35.56	0.11	41.43	1.45
0.31	0.07	0.36	0.65	41.43	0.27	48.27	1.71
0.36	0.06	0.42	0.71	48.27	0.55	56.23	2.26
0.42	0.04	0.49	0.75	56.23	1.05	65.51	3.31
0.49	0.01	0.58	0.76	65.51	2.05	76.32	5.36
0.58	0.00	0.67	0.77	76.32	4.20	88.91	9.56
0.67	0.00	0.78	0.77	88.91	8.55	103.58	18.11
0.78	0.00	0.91	0.77	103.58	15.10	120.67	33.21
0.91	0.00	1.06	0.77	120.67	20.20	140.58	53.42
1.06	0.00	1.24	0.77	140.58	19.95	163.77	73.37
1.24	0.00	1.44	0.77	163.77	13.38	190.80	86.74
1.44	0.00	1.68	0.77	190.80	7.64	222.28	94.38
1.68	0.00	1.95	0.77	222.28	3.95	258.95	98.34
1.95	0.00	2.28	0.77	258.95	1.66	301.68	100.00
2.28	0.00	2.65	0.77	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.00	3.09	0.77	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.00	3.60	0.77	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.00	4.19	0.77	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.00	4.88	0.77	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.00	5.69	0.77	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.00	6.63	0.77	754.23	0.00	878.67	100.00

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบการกระจายของขนาดผงแคลเซียมคาร์บอเนต

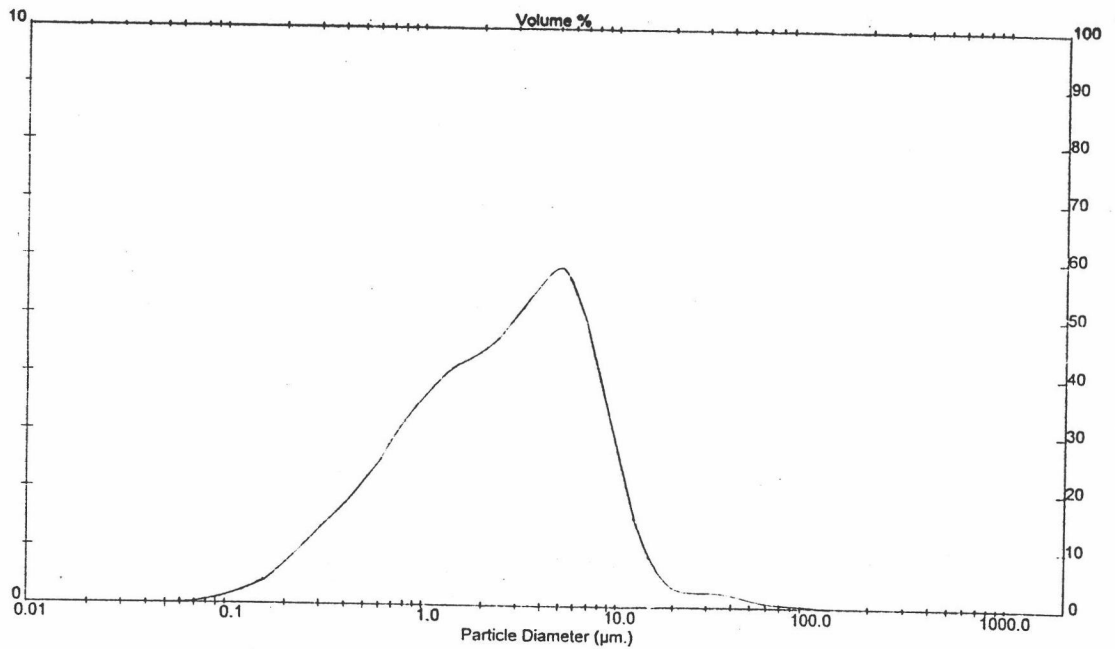
Distribution Type: Volume				Result Statistics			
Mean Diameters:				Concentration = 0.0013 %Vol			
D[4.3] = 4.35 um				D(v, 0.1) = 0.50 um			
				D[3.2] = 1.21 um			
				Density = 1.000 g / cub. cm			
				D(v, 0.5) = 2.71 um			
				Span = 3.080E+00			
				D(v, 0.9) = 8.85 um			
				Specific S.A. = 4.9568 sq. m / g			
				Uniformity = 1.162E+00			
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.01	0.06	0.01	6.63	4.80	7.72	86.45
0.06	0.03	0.07	0.04	7.72	3.93	9.00	90.38
0.07	0.05	0.08	0.09	9.00	2.97	10.48	93.35
0.08	0.08	0.09	0.18	10.48	2.07	12.21	95.42
0.09	0.13	0.11	0.31	12.21	1.32	14.22	96.74
0.11	0.20	0.13	0.51	14.22	0.79	16.57	97.53
0.13	0.29	0.15	0.80	16.57	0.47	19.31	98.00
0.15	0.41	0.17	1.21	19.31	0.32	22.49	98.32
0.17	0.57	0.20	1.78	22.49	0.28	26.20	98.60
0.20	0.77	0.23	2.55	26.20	0.28	30.53	98.88
0.23	1.02	0.27	3.57	30.53	0.27	35.56	99.15
0.27	1.26	0.31	4.83	35.56	0.24	41.43	99.38
0.31	1.47	0.36	6.30	41.43	0.19	48.27	99.57
0.36	1.66	0.42	7.96	48.27	0.13	56.23	99.70
0.42	1.91	0.49	9.87	56.23	0.09	65.51	99.79
0.49	2.22	0.58	12.09	65.51	0.07	76.32	99.86
0.58	2.50	0.67	14.60	76.32	0.06	88.91	99.92
0.67	2.87	0.78	17.47	88.91	0.04	103.58	99.97
0.78	3.18	0.91	20.65	103.58	0.03	120.67	99.99
0.91	3.50	1.06	24.14	120.67	0.01	140.58	100.00
1.06	3.78	1.24	27.92	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	3.99	1.44	31.91	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	4.14	1.68	36.05	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	4.26	1.95	40.31	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	4.40	2.28	44.71	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	4.60	2.65	49.30	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	4.86	3.09	54.16	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	5.15	3.60	59.31	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	5.42	4.19	64.73	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	5.65	4.88	70.38	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	5.82	5.69	76.20	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	5.45	6.63	81.65	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel:0684 892456 Fax:0684 892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.11
 Serial Number: 32734/42

รูปที่ 4.3 การกระจายของขนาดผงพีวีซีเรซิน



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel:0684 892456 Fax:0684 892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.11
 Serial Number: 32734/42

รูปที่ 4.4 การกระจายของขนาดผงแคลเซียมคาร์บอเนต

4.2 ผลการทดลองสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

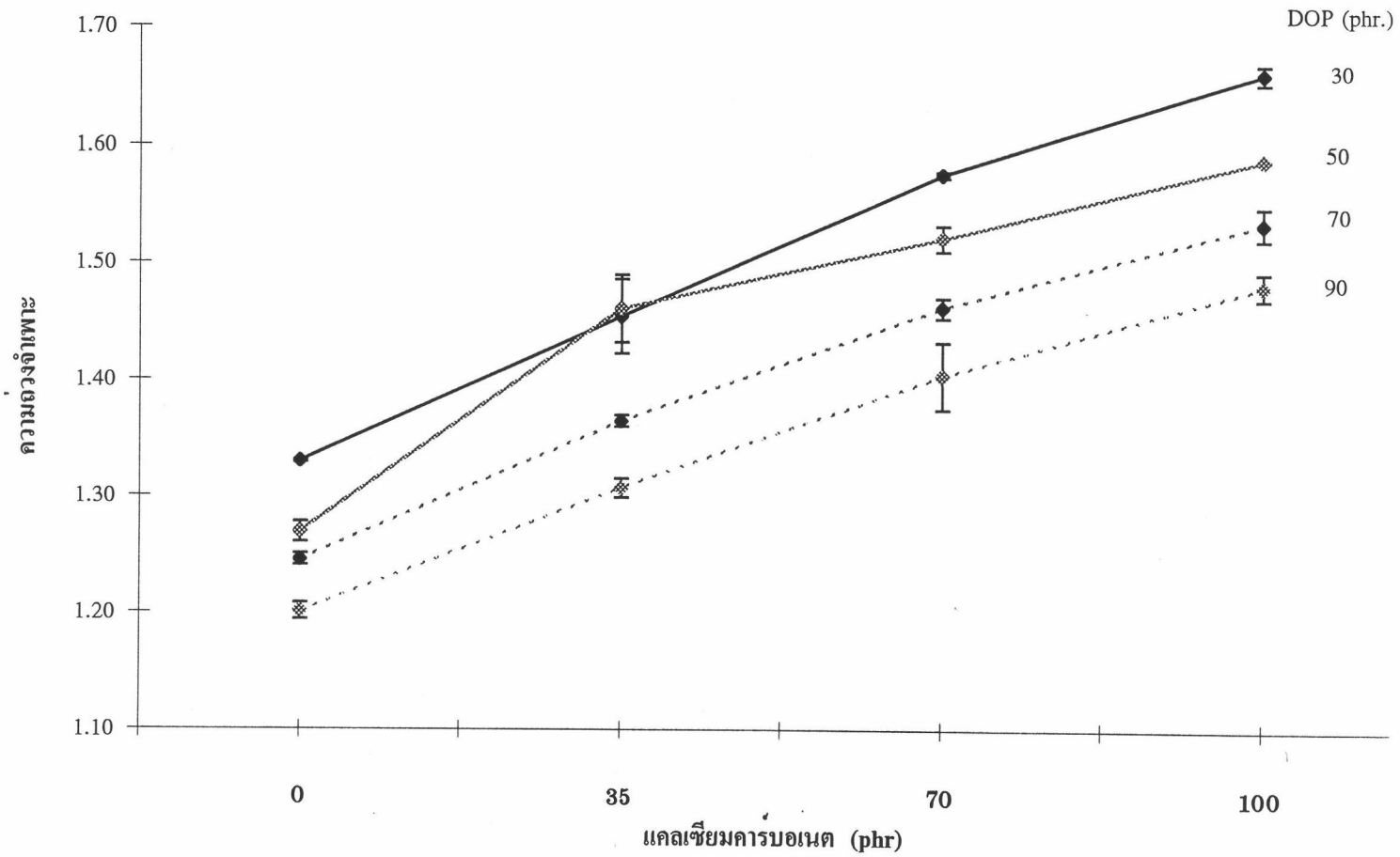
4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

4.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน จำนวน 64 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 30-90 phr. และแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่าง 0-100 phr. ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซี นั่นคือ เมื่อปริมาณของ DOP มากขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีจะมีค่าลดลง และสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น พบว่าเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของ พลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะได้นำผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีนี้ ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การทดลอง ครั้งที่	DOP (phr)			
		30	50	70	90
0	1	1.3287	1.2629	1.2416	1.2056
	2	1.3300	1.2748	1.2489	1.1959
	ค่าเฉลี่ย	1.3294 ± 0.0009	1.2689 ± 0.0084	1.2452 ± 0.0051	1.2007 ± 0.0069
35	1	1.4306	1.4395	1.3671	1.3119
	2	1.4756	1.4801	1.3601	1.3004
	ค่าเฉลี่ย	1.4531 ± 0.0318	1.4598 ± 0.0287	1.3636 ± 0.0050	1.3062 ± 0.0081
70	1	1.5719	1.5116	1.4662	1.4226
	2	1.5756	1.5270	1.4541	1.3818
	ค่าเฉลี่ย	1.5738 ± 0.0026	1.5193 ± 0.0109	1.4601 ± 0.0086	1.4022 ± 0.0288
100	1	1.6532	1.5860	1.5419	1.4707
	2	1.6647	1.5865	1.5223	1.4868
	ค่าเฉลี่ย	1.6590 ± 0.0081	1.5863 ± 0.0003	1.5321 ± 0.0138	1.4787 ± 0.0114



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่เฉพาะ กับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

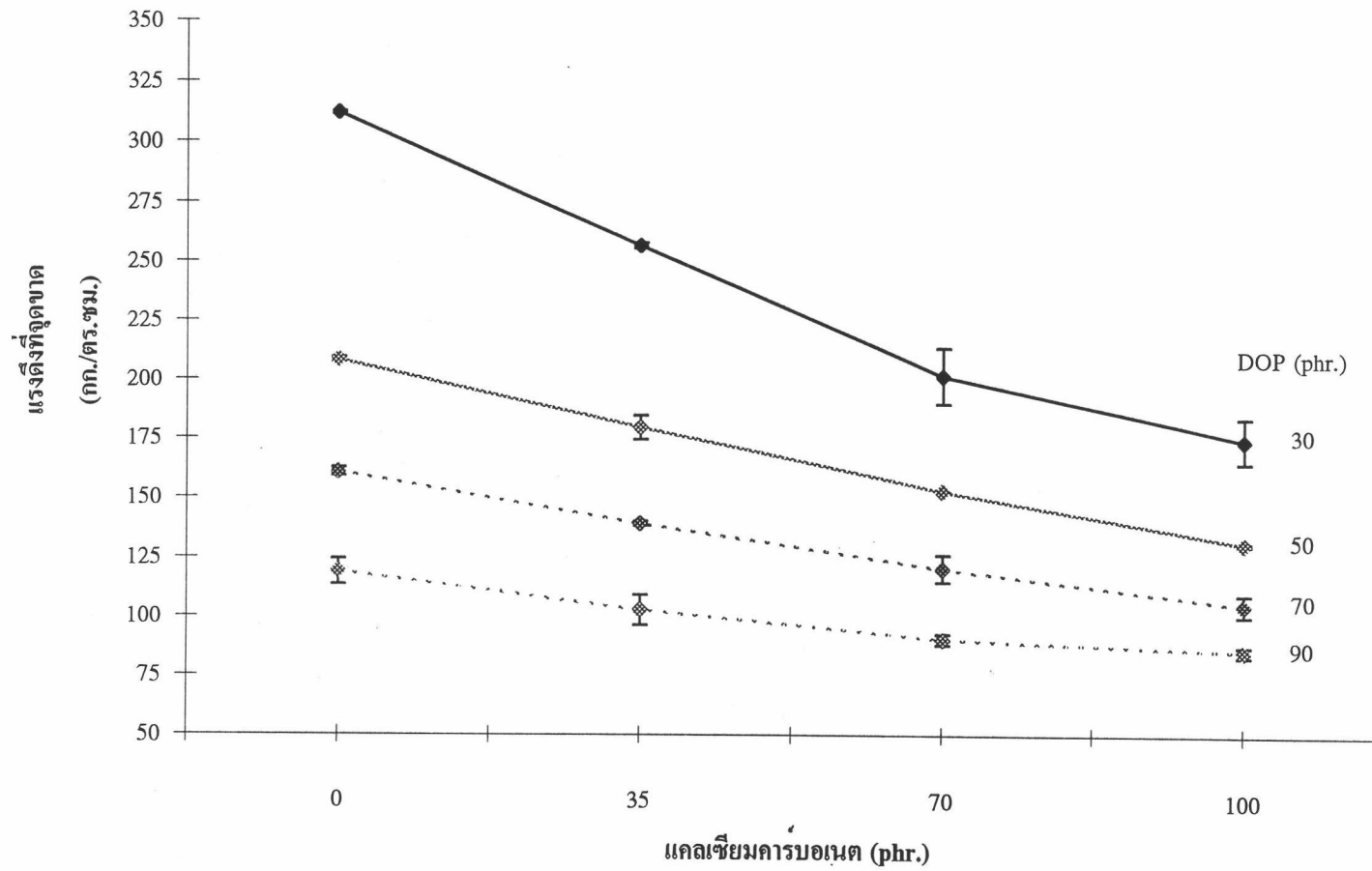
4.2.1.2) แรงดึงที่จุดขาด (Tensile Strength)

จากการทดสอบหาค่าแรงดึงที่จุดขาดของชิ้นงานจำนวน 160 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 30-90 phr. และแคลเซียมคาร์บอเนต อยู่ระหว่าง 0-100 phr. ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากตารางที่ 4.4 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซี นั่นคือ เมื่อปริมาณของ DOP มากขึ้น ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีจะมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 phr. ในขณะที่ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลงเช่นกัน โดยจะได้นำผลของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีนี้ ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.4 ผลของค่าแรงดึงที่จุดขาด (tensile strength) ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

หน่วย : กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

แคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การทดลอง ครั้งที่	DOP (phr)			
		30	50	70	90
0	1	312.25	208.67	159.36	114.83
	2	311.43	207.42	161.78	122.55
	ค่าเฉลี่ย	311.84 ± 0.58	208.04 ± 0.89	160.57 ± 1.71	118.69 ± 5.46
35	1	255.26	175.52	138.10	97.76
	2	256.99	182.51	139.41	106.90
	ค่าเฉลี่ย	256.12 ± 1.22	179.02 ± 4.95	138.76 ± 0.93	102.33 ± 6.46
70	1	192.54	152.19	115.83	88.30
	2	209.27	152.06	123.93	91.55
	ค่าเฉลี่ย	200.91 ± 11.83	152.13 ± 0.09	119.88 ± 5.73	89.93 ± 2.30
100	1	167.00	130.77	101.15	83.49
	2	180.16	130.11	107.61	86.47
	ค่าเฉลี่ย	173.58 ± 9.30	130.44 ± 0.47	104.38 ± 4.57	84.98 ± 2.11



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

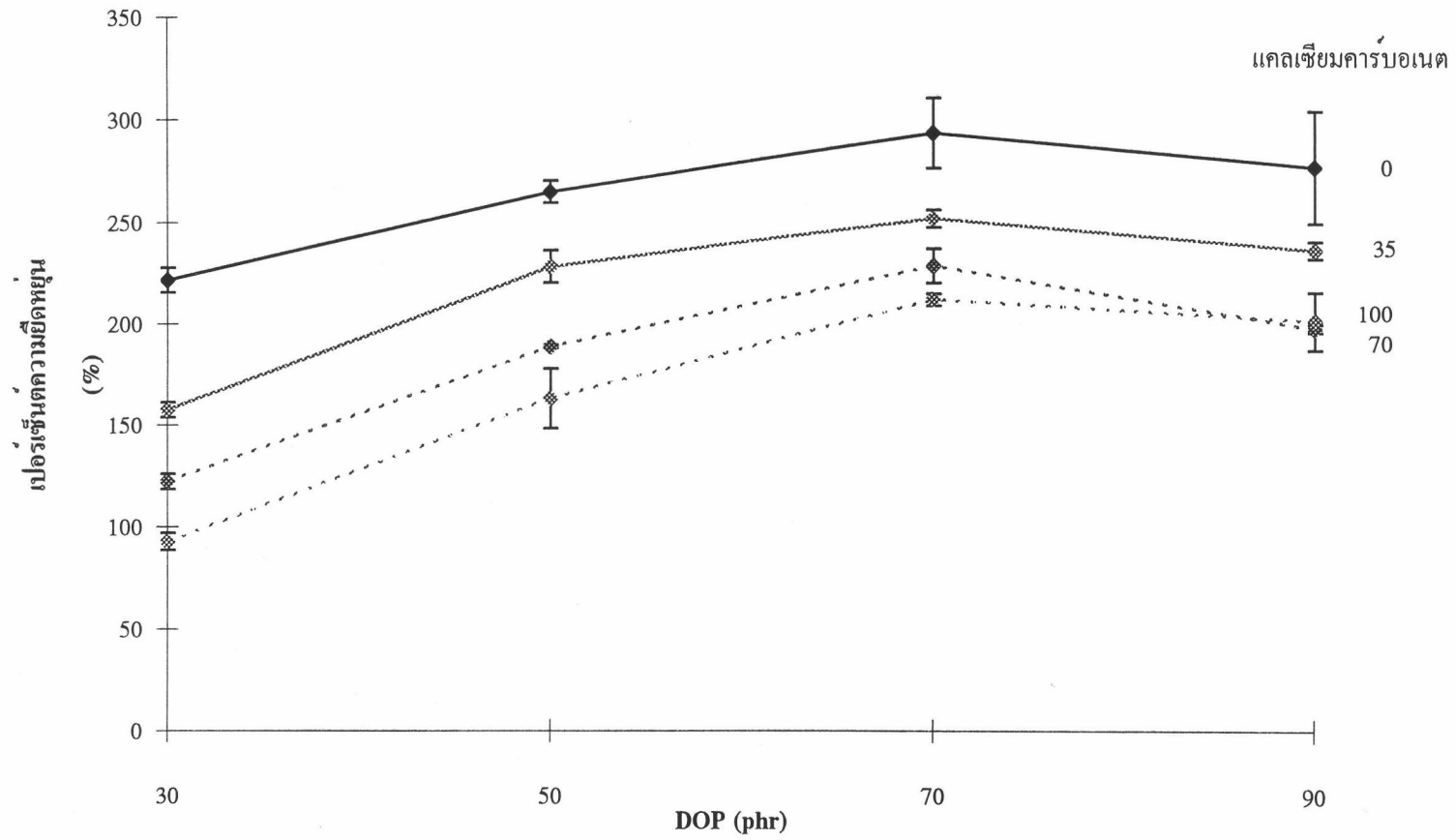
4.2.1.3) เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% Elongation)

จากการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของชิ้นงาน จำนวน 160 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 30-90 phr. และแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่าง 0-100 phr. ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากตารางที่ 4.5 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี นั่นคือ เมื่อปริมาณของ DOP มากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 phr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นมากกว่าในช่วงอื่นๆ และเมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 70-90 phr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจึงมีแนวโน้มที่จะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น ได้ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลง ซึ่งจะได้นำผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีนี้ ไปทำการวิเคราะห์ ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.5 ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% elongation) ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

แคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การทดลอง ครั้งที่	DOP (phr)			
		30	50	70	90
0	1	225.75	268.40	304.60	256.20
	2	217.25	260.80	280.50	295.00
	ค่าเฉลี่ย	221.50 ± 6.01	264.60 ± 5.37	292.55 ± 17.04	275.60 ± 27.44
35	1	160.00	222.20	247.80	237.80
	2	154.60	233.40	254.00	232.00
	ค่าเฉลี่ย	157.30 ± 3.82	227.80 ± 7.92	250.90 ± 4.38	234.90 ± 4.10
70	1	124.60	189.00	221.60	198.00
	2	119.36	187.80	233.50	195.00
	ค่าเฉลี่ย	121.98 ± 3.71	188.40 ± 0.85	227.55 ± 8.41	196.50 ± 2.12
100	1	95.70	152.00	209.00	190.00
	2	89.68	173.20	213.25	210.25
	ค่าเฉลี่ย	92.69 ± 4.26	162.60 ± 14.99	211.13 ± 3.01	200.13 ± 14.32



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น กับ ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอน

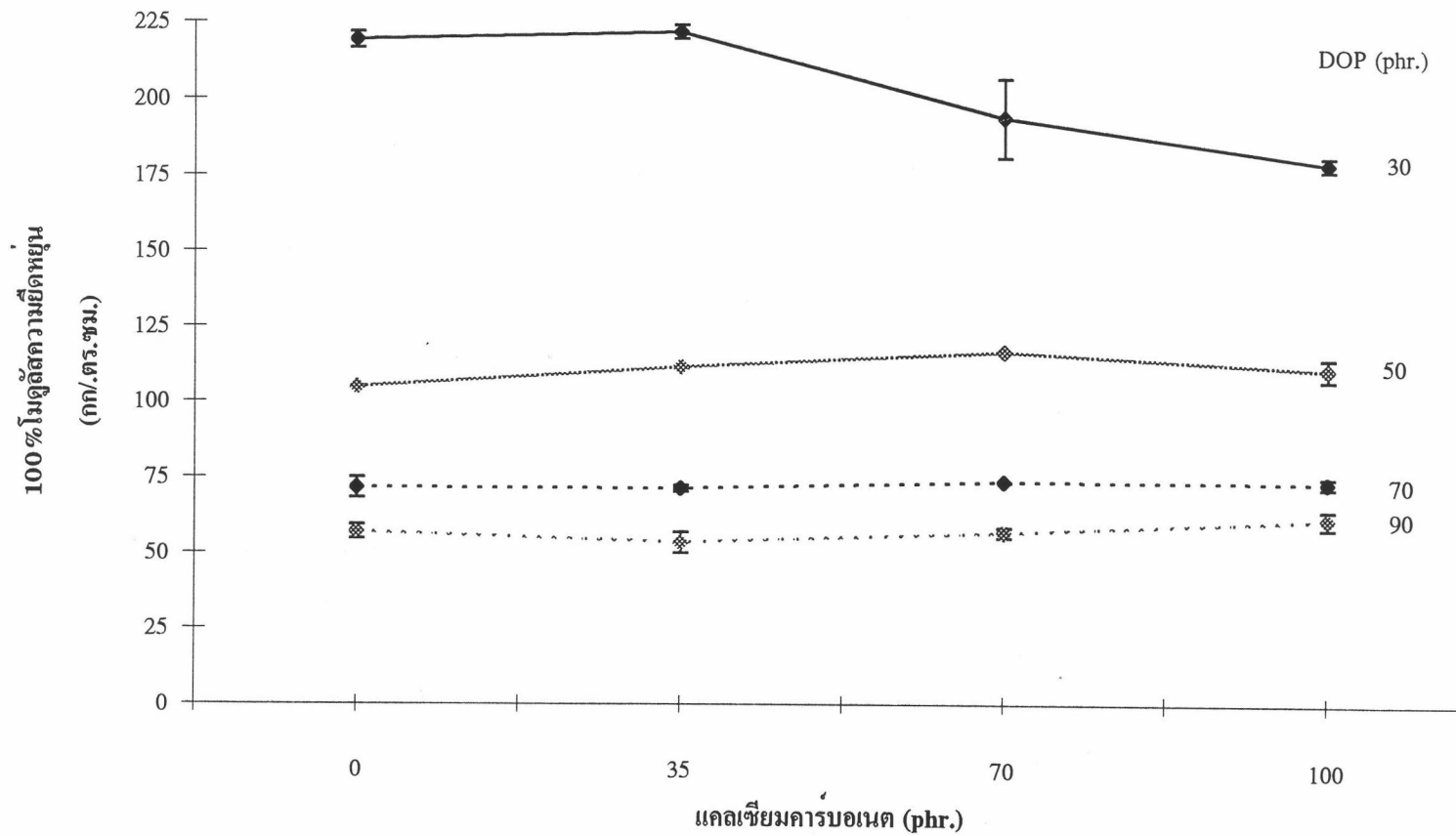
4.2.1.4) 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น (100% Elastic Modulus)

จากการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นงาน จำนวน 160 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 30-90 phr. และแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่าง 0-100 phr. ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากตารางที่ 4.6 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี นั่นคือ เมื่อปริมาณของ DOP มากขึ้น ค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีจะมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 phr. ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงมากกว่าในช่วงอื่นๆ และสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นพบว่า เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการลดลงเนื่องจาก DOP ซึ่งจะได้นำผลกระทบของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีนี ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.6 ผลของค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น (100% elastic modulus) ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

หน่วย : กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

แคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การทดลอง ครั้งที่	DOP (phr)			
		30	50	70	90
0	1	217.20	104.90	69.13	58.62
	2	220.82	104.54	73.94	55.41
	ค่าเฉลี่ย	219.01 ± 2.56	104.72 ± 0.25	71.54 ± 3.40	57.02 ± 2.27
35	1	219.77	111.22	71.74	50.83
	2	222.80	110.76	70.37	55.78
	ค่าเฉลี่ย	221.29 ± 2.15	110.99 ± 0.32	71.06 ± 0.97	53.31 ± 3.50
70	1	183.87	115.94	73.23	55.46
	2	202.06	115.93	73.01	57.78
	ค่าเฉลี่ย	192.96 ± 12.86	115.94 ± 0.01	73.12 ± 0.15	56.62 ± 1.64
100	1	179.29	112.25	71.56	58.60
	2	176.28	107.20	73.94	62.81
	ค่าเฉลี่ย	177.79 ± 2.12	109.72 ± 3.57	72.75 ± 1.68	60.71 ± 2.98



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

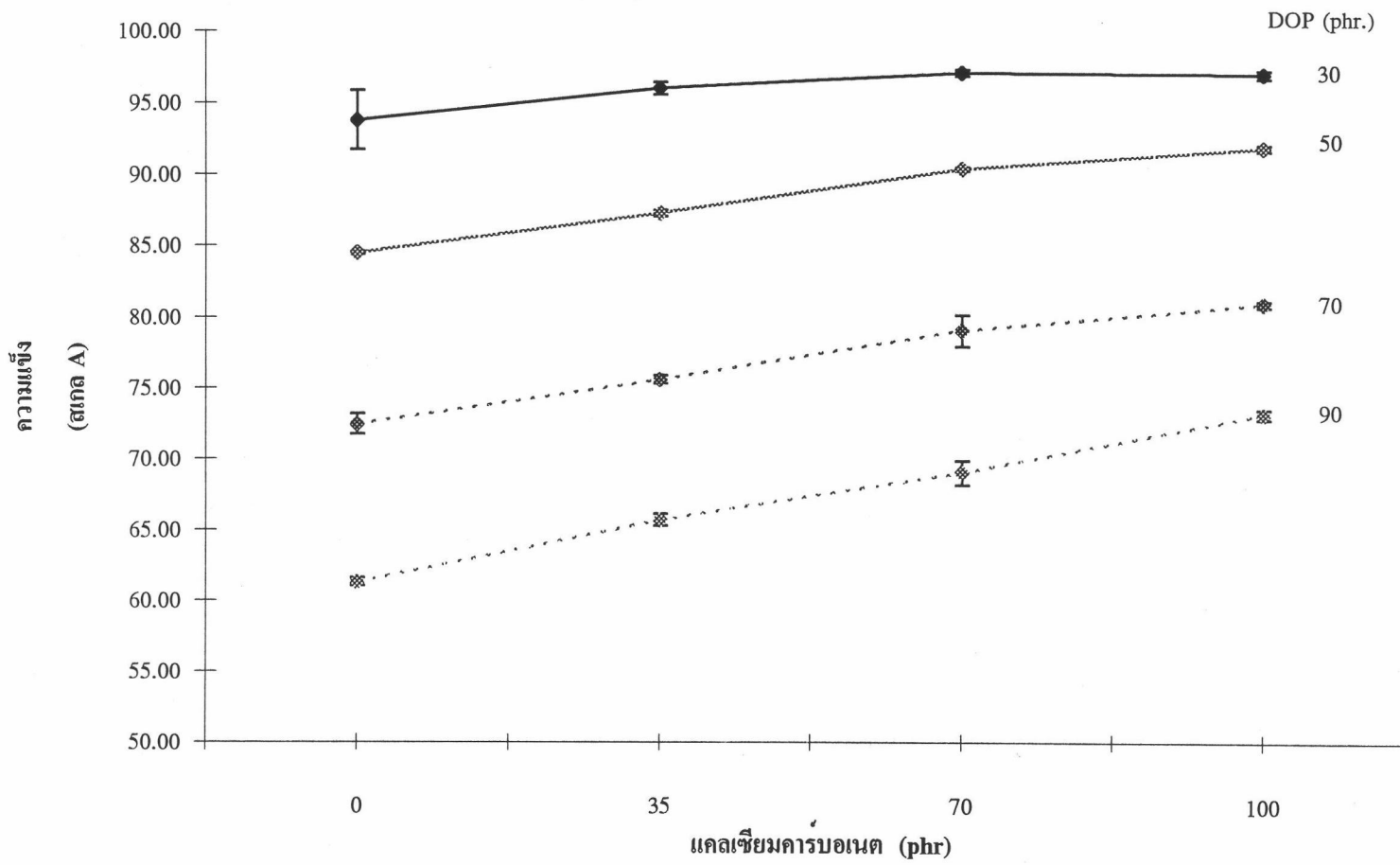
4.2.1.5) ความแข็ง (Hardness)

จากการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงาน จำนวน 32 ชิ้น ที่เตรียมขึ้น จากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 30-90 phr. และแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่าง 0-100 phr. ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากตารางที่ 4.7 และกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซี นั่นคือ เมื่อปริมาณของ DOP มากขึ้น ความแข็งของพลาสติกพีวีซี จะมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 30-50 phr. ค่าความแข็งของพลาสติกจะลดลงมากกว่าในช่วงอื่นๆ และสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น พบว่าเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการลดลงเนื่องจาก DOP โดยจะได้นำผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีนี้ ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.7 ผลของค่าความแข็ง (hardness) ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

หน่วย : ชอร์ A

แคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การทดลอง ครั้งที่	DOP (phr)			
		30	50	70	90
0	1	92.30	84.40	71.90	61.10
	2	95.20	84.50	72.90	61.50
	ค่าเฉลี่ย	93.75 ± 2.05	84.45 ± 0.07	72.40 ± 0.71	61.30 ± 0.28
35	1	95.60	87.00	75.70	65.30
	2	96.20	87.30	75.30	65.90
	ค่าเฉลี่ย	95.90 ± 0.42	87.15 ± 0.21	75.50 ± 0.28	65.60 ± 0.42
70	1	96.80	90.10	78.10	68.30
	2	97.10	90.30	79.70	69.50
	ค่าเฉลี่ย	96.95 ± 0.21	90.20 ± 0.14	78.90 ± 1.13	68.90 ± 0.85
100	1	96.60	91.50	80.90	73.20
	2	97.00	91.80	80.60	72.70
	ค่าเฉลี่ย	96.80 ± 0.28	91.65 ± 0.21	80.75 ± 0.21	72.95 ± 0.35

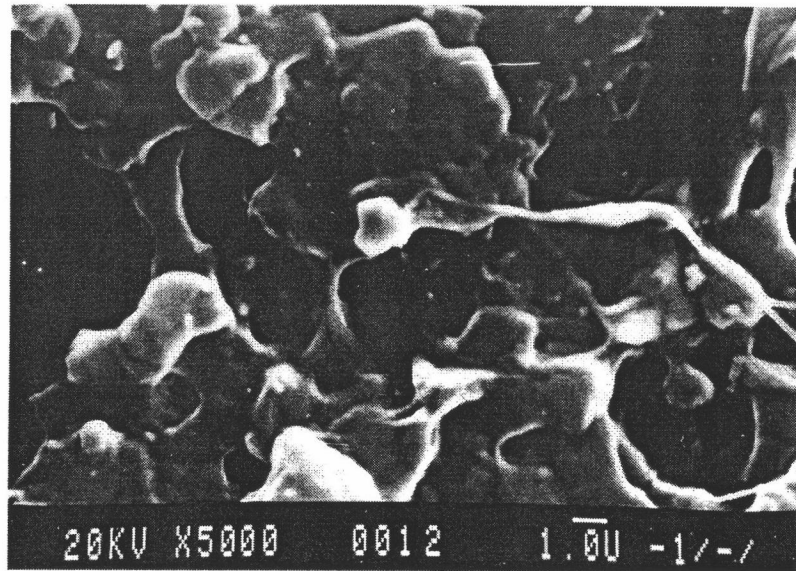


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง กับ ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

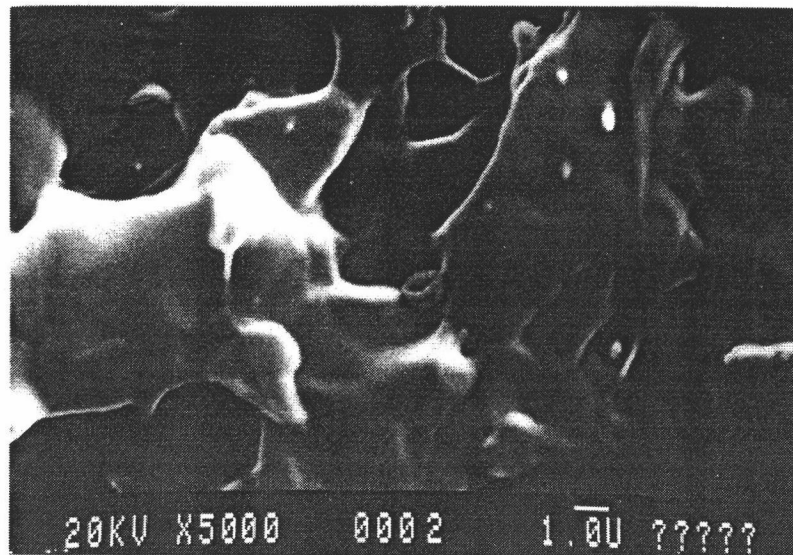
4.2.1.6 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกพีวีซี ภาย หลังการดึง

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบหาค่าแรงดึงของชิ้นงาน ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแล้ว นำชิ้นงานส่วนที่ถูกดึงขาด บริเวณที่เป็นพื้นที่ผิวหน้าตัดของรอยขาดที่เกิดจากการดึง ไปส่องดูด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า จะได้ภาพซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่แตกต่างกันของโครงสร้างของพลาสติกพีวีซี ที่มี DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 - 4.16

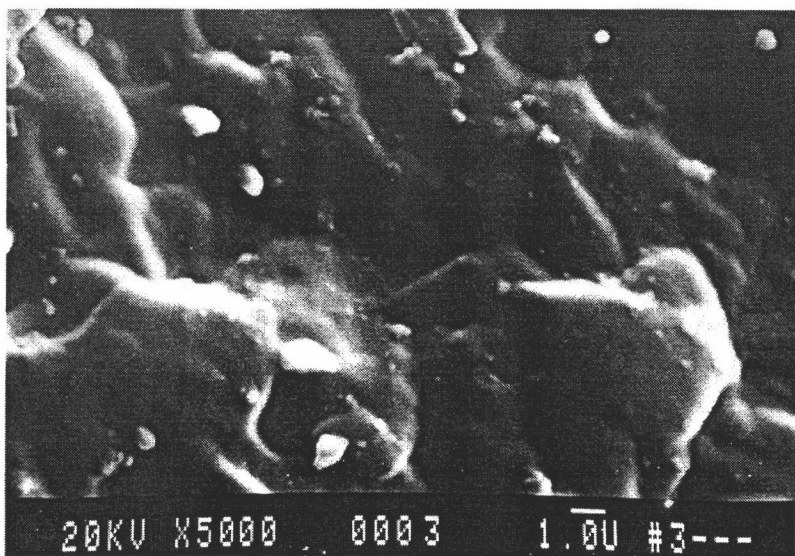
รูปที่ 4.10 - 4.13 เป็นภาพของชิ้นงานที่ไม่มีแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ แต่มี DOP ผสมอยู่ในสัดส่วน 30 50 70 และ 90 phr. ตามลำดับ จากภาพ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ ของ DOP มากขึ้น พื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นงานจะมีลักษณะเรียบและสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้พลาสติกพีวีซีมีความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดีขึ้น เมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่ามากขึ้นนั่นเอง และสำหรับรูปที่ 4.10 4.14 4.15 และ 4.16 นั้น เป็นการเปรียบเทียบภาพถ่ายของชิ้นงานที่มี DOP ผสมอยู่ในสัดส่วนเท่ากับ 30 phr. และมี แคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ในปริมาณ 0 35 70 และ 100 phr. ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะ โครงสร้างของพลาสติกพีวีซี ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ใน สัดส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ชัดว่า เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น โครงสร้างของพลาสติกพีวีซีจะมีความแข็งแรงน้อยลง กล่าวคือ มีรูพรุนมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้คุณสมบัติเชิงกลหลายๆด้านของพีวีซีต่ำลง เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น



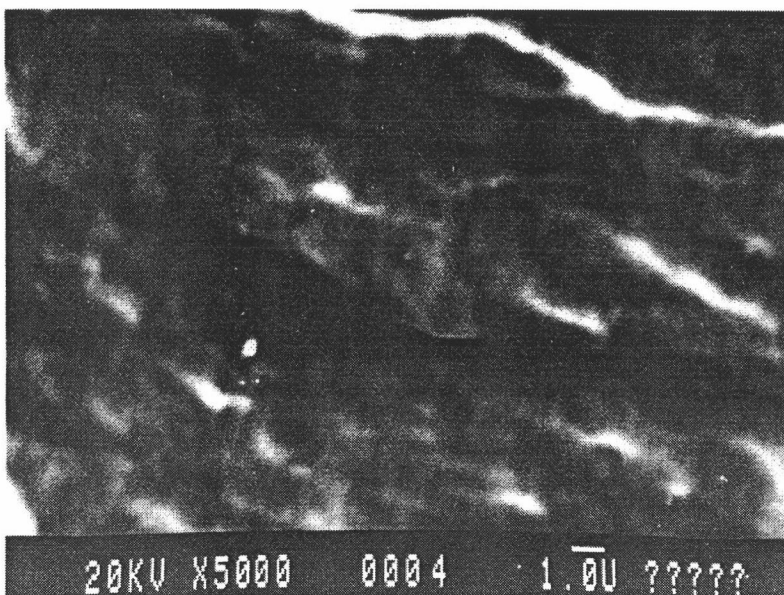
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี ที่มี แคลเซียมคาร์บอเนต 0 phr. และ DOP 30 phr .
กำลังขยาย 5,000 เท่า



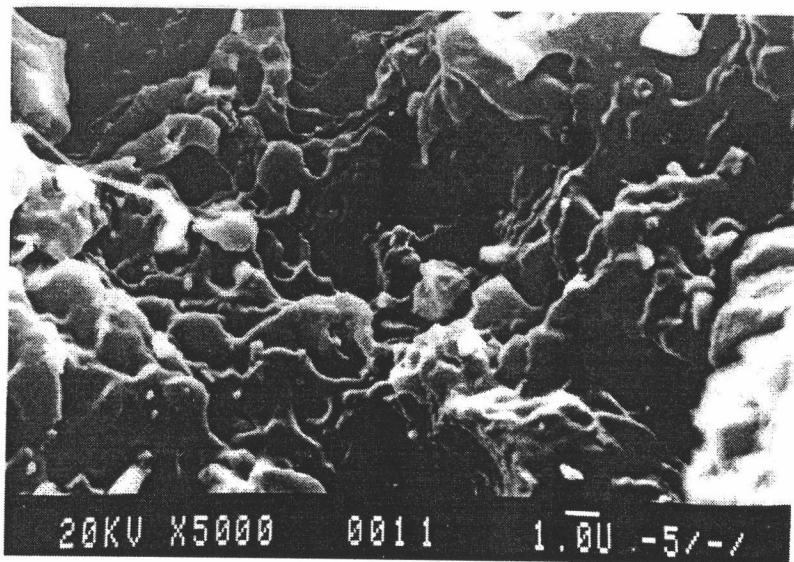
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี ที่มี แคลเซียมคาร์บอเนต 0 phr. และ DOP 50 phr .
กำลังขยาย 5,000 เท่า



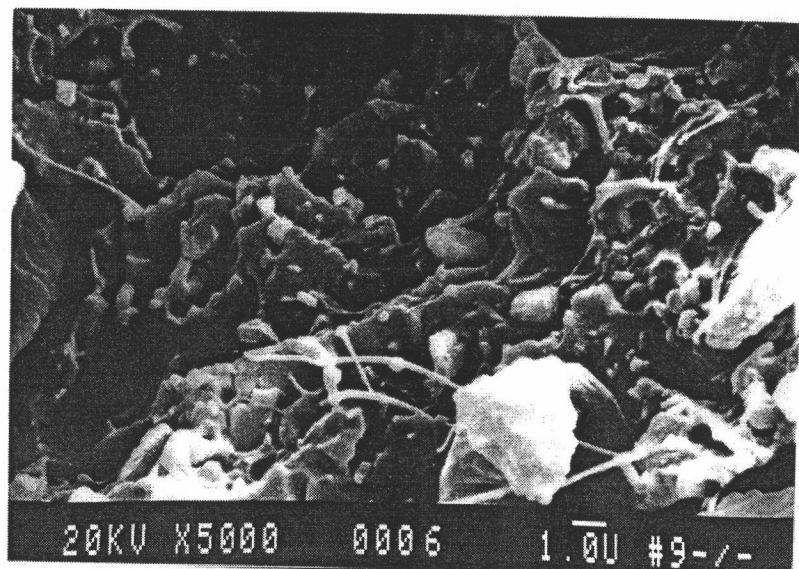
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี
ที่มี แคลเซียมคาร์บอเนต 0 phr. และ DOP 70 phr .
กำลังขยาย 5,000 เท่า



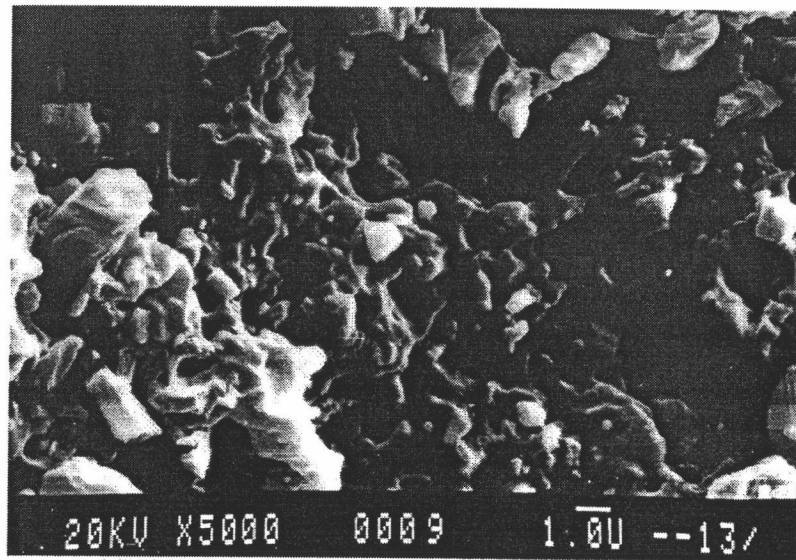
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี
ที่มี แคลเซียมคาร์บอเนต 0 phr. และ DOP 90 phr .
กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี ที่มี DOP 30 phr. และ แคลเซียมคาร์บอเนต 35 phr. กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี ที่มี DOP 30 phr. และ แคลเซียมคาร์บอเนต 70 phr. กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยขาด ของพลาสติกพีวีซี ที่มี DOP 30 phr. และ แคลเซียมคาร์บอเนต 100 phr. กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.2.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.2.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

เมื่อนำผลทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพลาสติกพีวีซีที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SAS (Statistical Analysis System) ช่วยในการวิเคราะห์ จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 4.3 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ก็ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ

Dependent variable : Sp.Gr.

Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
X1	3	0.1121	0.0374	171.22 ^{S1}
X2	3	0.4089	0.1363	624.67 ^{S1}
X1*X2	9	0.0066	0.0007	3.34 ^{S2}
Error	16	0.0035	0.0002	
Corrected Total	31	0.5311		

R-Sq = 0.993426

C.V. = 1.0349136

Root MSE = 0.01477229

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)

X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)

^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

^{S2} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 97.5%

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.5 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแรงดึงที่จุดขาด (tensile strength)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าแรงดึงที่จุดขาดในตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.9 จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ก็ส่งผลต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

และจากกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.6 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.9 จะสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพีวีซี ได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณการใช้ DOP มากขึ้น จะ ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 30-50 phr. ค่าแรงดึงที่จุดขาดจะลดลงมากกว่าในช่วงอื่น และสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น พบว่าเมื่อปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแรงดึงที่จุดขาด

Dependent variable : Strength

Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
X1	3	82638.42396	27546.14132	1122.74 ^{S1}
X2	3	26944.69511	8981.56504	366.07 ^{S1}
X1*X2	9	7284.88015	809.43113	32.99 ^{S1}
Error	16	392.55695	24.53481	
Corrected Total	31	117260.55617		

R-Sq = 0.996652

C.V. = 3.1305368

Root MSE = 4.9532625

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)
 X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)
 -^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% elongation)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นในตารางที่ 4.5 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต จะไม่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

Dependent variable : Elongation

Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
X1	3	42603.4593	14201.1531	128.51 ^{S1}
X2	3	43902.1527	14634.0509	132.43 ^{S1}
X1*X2	9	2210.3717	245.5969	2.22 ^{S2}
Error	16	1768.1265	110.5079	
Corrected Total	31	90484.1102		

R-Sq = 0.980459

C.V. = 5.0568345

Root MSE = 10.512274

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)
 X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)
^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%
^{S2} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

และจากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นกับปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.7 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณการใช้ DOP มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 phr. นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า เมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 70-90 phr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพีวีซีจึงเริ่มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงในทางลดลง ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น สามารถสรุปได้ว่า เมื่อปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น
(100% elastic modulus)

เมื่อนำผลการทดสอบค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น ในตารางที่ 4.6 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.11 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนตก็ ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น

Dependent variable : 100% Modulus

Source	DF	Sum of Sq	Mean Sq	F Value
X1	3	102858.5695	34286.1898	2301.55 ^{S1}
X2	3	386.7774	128.9258	8.65 ^{S2}
X1*X2	9	2455.1952	272.7995	18.31 ^{S1}
Error	16	238.3521	14.8970	
Corrected Total	31	105938.8942		

R-Sq = 0.997750

C.V. = 3.4918816

Root MSE = 3.8596640

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)
 X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)
 -^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%
 -^{S2} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.5%

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น กับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.8) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.11 สามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณการใช้ DOP มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดย

เฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 phr. ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีจะลดลงมากกว่าในช่วงอื่นๆ และสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากขึ้น ได้ส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วย

5) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง (hardness)

เมื่อนำผลการทดสอบค่าความแข็งในตารางที่ 4.7 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.12 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ก็ส่งผลต่อค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.9 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.12 จะสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซี ได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณการใช้ DOP มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่ง ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความแข็งของพลาสติกพีวีซี ในขณะที่การใช้ DOP มาเป็นสารเติมแต่งในพลาสติกพีวีซี จะทำให้ค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง

Dependent variable : Hardness

Source	DF	Sum of Sq	Mean Sq	F Value
X1	3	3822.6484	1274.2162	2670.26 ^{S1}
X2	3	261.1134	87.0378	182.40 ^{S1}
X1*X2	9	42.5678	4.7298	9.91 ^{S1}
Error	16	7.6350	0.4772	
Corrected Total	31	4133.9647		

R-Sq = 0.998153

C.V. = 0.84168614

Root MSE = 0.69078759

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)

X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)

^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

4.2.2.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และ เชิงกล

เมื่อนำข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของพลาสติกพีวีซีที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SAS (Statistical Analysis System) ช่วยในการวิเคราะห์ และใช้วิธี stepwise เป็นวิธีการในการเลือกตัวแปรนำเข้า จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

เมื่อนำข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะที่วัดได้ในตารางที่ 4.3 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.13

จากตารางที่ 4.13 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{Y}_1 &= 1.3937 - 0.0022X_1 + 0.0046X_2 - 0.00001X_2^2 \\ &\quad - 0.0000089X_1X_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{Y}_1 &= \text{ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะ} \\ X_1 &= \text{ปริมาณการใช้ DOP (phr.)} \\ X_2 &= \text{ปริมาณการใช้ CaCO}_3 \text{ (phr.)} \end{aligned}$$

สมการถดถอยสมการที่ (4.1) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 98.31% และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, C.V.) เท่ากับ 1.28

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ

Dependent Variable : Sp.Gr.				
Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
Model	4	0.5221	0.1305	393.53 ^{S1}
Error	27	0.0090	0.0003	
Corrected Total	31	0.5311		
	R-Square	C.V.	Root MSE	
	0.983137	1.2759380	0.01821266	
Parameter	Estimate	T for H0 : Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	1.393724047	87.47	0.0001	0.01593
X1	-0.002185681	-8.96	0.0001	0.00024
X2	0.004565845	11.94	0.0001	0.00038
X4	-0.000010345	-3.52	0.0016	0.00000
X5	-0.000008938	-2.33	0.0277	0.00000

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)

X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)

X4 หมายถึง X2²

X5 หมายถึง X1*X2

^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

2) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าแรงดึงที่จุดขาด (tensile strength)

เมื่อนำข้อมูลค่าแรงดึงที่จุดขาดที่วัดได้ในตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.14

จากตารางที่ 4.14 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับ ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{Y}_2 &= 456.8505 - 5.8298X_1 - 2.0103X_2 + 0.0227X_1^2 + 0.0021X_2^2 \\ &\quad + 0.0171X_1X_2 \end{aligned} \dots\dots\dots(4.2)$$

เมื่อ

\bar{Y}_2 = ค่าเฉลี่ยแรงดึงที่จุดขาด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

X_1 = ปริมาณการใช้ DOP (phr.)

X_2 = ปริมาณการใช้ CaCO_3 (phr.)

สมการถดถอยสมการที่ (4.2) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 98.79% และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, C.V.) เท่ากับ 4.67

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลแรงดึงที่จุดขาด

Dependent Variable : Tensile				
Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
Model	5	115840.6451	23168.1290	424.23 ^{S1}
Error	26	1419.9111	54.6120	
Corrected Total	31	117260.5562		
R-Square	C.V.	Root MSE		
0.987891	4.6705860	7.3899909		
Parameter	Estimate	T for H0 : Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	456.8504650	38.03	0.0001	12.01248
X1	-5.8297869	-14.42	0.0001	0.40422
X2	-2.0102965	-12.96	0.0001	0.15513
X3	0.0226820	6.95	0.0001	0.00327
X4	0.0021424	1.80	0.0841	0.00119
X5	0.0170912	10.96	0.0001	0.00156

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)

X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)

X3 หมายถึง X1²

X4 หมายถึง X2²

X5 หมายถึง X1*X2

^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

3) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น
(% elongation)

เมื่อนำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่วัดได้ในตารางที่ 4.5 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.15

จากตารางที่ 4.15 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น กับปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$\bar{Y}_3 = 50.2450 + 7.0273X_1 - 2.0052X_2 + 0.0508X_1^2 + 0.0055X_2^2 + 0.0081X_1X_2 \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

เมื่อ

\bar{Y}_3 = ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (เปอร์เซ็นต์)

X_1 = ปริมาณการใช้ DOP (phr.)

X_2 = ปริมาณการใช้ CaCO_3 (phr.)

สมการถดถอยสมการที่ (4.3) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 96.93% และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, C.V.) เท่ากับ 4.97

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

Dependent Variable : Elongation				
Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
Model	5	87710.3547	17542.0709	164.43 ^{S1}
Error	26	2773.7555	106.6829	
Corrected Total	31	90484.1102		
	R-Square	C.V.	Root MSE	
	0.969345	4.9685479	10.328742	
Parameter	Estimate	T for H0 : Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	50.2450099	2.99	0.0060	16.78944
X1	7.0272574	12.44	0.0001	0.56496
X2	-2.0052025	-9.25	0.0001	0.21682
X3	-0.0507703	-11.12	0.0001	0.00456
X4	0.0054671	3.28	0.0030	0.00167
X5	0.0080935	3.71	0.0010	0.00218

- หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)
 X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)
 X3 หมายถึง X1²
 X4 หมายถึง X2²
 X5 หมายถึง X1*X2
^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

4) การวิเคราะห์การถดถอยของค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น
(100% elastic modulus)

เมื่อนำข้อมูลค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นที่วัดได้ในตารางที่ 4.6 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.16

จากตารางที่ 4.16 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณการใช้ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{Y}_4 &= 429.1172 - 8.5370X_1 - 0.5121X_2 + 0.0483X_1^2 \\ &\quad + 0.0072X_1X_2 \dots\dots\dots(4.4) \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{Y}_4 &= \text{ค่าเฉลี่ย 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)} \\ X_1 &= \text{ปริมาณการใช้ DOP (phr.)} \\ X_2 &= \text{ปริมาณการใช้ CaCO}_3 \text{ (phr.)} \end{aligned}$$

สมการถดถอยสมการที่ (4.4) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 98.10% และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, C.V.) เท่ากับ 7.81

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น

Dependent Variable : Modulus				
Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
Model	4	103928.2795	25982.0699	348.91 ^{S1}
Error	27	2010.6147	74.4672	
Corrected Total	31	105938.8942		
	R-Square	C.V.	Root MSE	
	0.981021	7.8071504	8.6294386	
Parameter	Estimate	T for H0 : Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	429.1172007	30.77	0.0001	13.94757
X1	-8.5370406	-18.09	0.0001	0.47201
X2	-0.5121442	-4.39	0.0002	0.11655
X3	0.0482594	12.65	0.0001	0.00381
X5	0.0071615	3.93	0.0005	0.00182

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)
 X2 หมายถึง ปริมาณการใช้ CaCO₃ (phr)
 X3 หมายถึง X1²
 X5 หมายถึง X1*X2
 -^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

5) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็ง (hardness)

เมื่อนำข้อมูลค่าความแข็งที่วัดได้ในตารางที่ 4.7 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลของการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.17 จากตารางที่ 4.17 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$\bar{Y}_5 = 107.0239 - 0.3865X_1 - 0.0014X_1^2 + 0.0013X_1X_2 \dots\dots(4.5)$$

เมื่อ

$$\bar{Y}_5 = \text{ค่าเฉลี่ยความแข็ง (ชอร์ A)}$$

$$X_1 = \text{ปริมาณการใช้ DOP (phr.)}$$

$$X_2 = \text{ปริมาณการใช้ CaCO}_3 \text{ (phr.)}$$

ความแข็งของพีวีซีได้เท่ากับ 99.35% เท่ากับ 1.19

สมการถดถอยสมการที่ (4.5) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของค่าด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 99.35% และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, C.V.)

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความแข็ง

Dependent Variable : Hardness				
Source	DF	Sum of Sq.	Mean Sq.	F Value
Model	3	4107.0322	1369.0107	1423.28 ^{S1}
Error	28	26.9324	0.9619	
Corrected Total	31	4133.9647		
	R-Square	C.V.	Root MSE	
	0.993485	1.1949907	0.98075130	
Parameter	Estimate	T for H0 : Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	107.0239062	74.71	0.0001	1.43244
X1	-0.3865081	-7.33	0.0001	0.05272
X3	-0.0013828	-3.19	0.0035	0.00043
X5	0.0012709	17.59	0.0001	0.00007

หมายเหตุ X1 หมายถึง ปริมาณการใช้ DOP (phr)

X3 หมายถึง X_1^2

X5 หมายถึง $X_1 * X_2$

^{S1} หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9%

4.2.2.3 การวิเคราะห์หาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสม (Optimization)

1) การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อให้ได้พลาสติกพีวีซี ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ (ความถ่วงจำเพาะ) และคุณสมบัติเชิงกล (ได้แก่ ค่าแรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น ความแข็ง) ที่ต้องการ ภายใต้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำที่สุดนั้น ทำได้โดยกำหนดให้สมการต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ ต่อ สารประกอบพีวีซีที่ได้ 1 กิโลกรัม (ซึ่งได้แสดงวิธีการคำนวณต้นทุนดังกล่าวไว้ในส่วนของภาค ผนวก-ข) เป็นสมการเป้าหมาย และกำหนดให้สมการลดถอยของคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ที่ได้จากการวิเคราะห์การลดถอยในหัวข้อ 4.2.2.2 เป็นสมการเงื่อนไขของชุดสมการที่นำมาวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม โดยมีการกำหนดขีดจำกัดบน และ ขีดจำกัดล่าง ของชุดสมการไว้ดังนี้

$$\text{Min } Z = \text{ต้นทุนวัตถุดิบ} / \text{สารประกอบพีวีซี } 1 \text{ กก.}$$

สมการเงื่อนไข:

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	<	1.6
ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Tensile Strength)	>	80
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% Elongation)	>	220
100% โมดูลัสความยืดหยุ่น (100% modulus of elasticity)	>	50
ความแข็ง (Hardness)	<	97

จากรูปแบบของสมการข้างบน สามารถนำมาเขียนแทนด้วยตัวแปรระหว่าง X_1 ซึ่งหมายถึง ปริมาณการใช้ DOP และ X_2 ซึ่งหมายถึง ปริมาณการใช้ แคลเซียมคาร์บอเนต ได้ดังนี้

$$\text{Min } Z = (2620.28 + 26X_1 + 4.8X_2) / (103.3 + X_1 + X_2)$$

สมการเงื่อนไข :

$1.3937 - 0.0022X_1 + 0.0046X_2 - 0.00001X_2^2 - 0.0000089X_1X_2$	<	1.6
$456.8505 - 5.8298X_1 - 2.0103X_2 + 0.0227X_1^2 + 0.0021X_2^2 + 0.0171X_1X_2$	>	80
$50.2450 + 7.0273X_1 - 2.0052X_2 - 0.0508X_1^2 + 0.0055X_2^2 + 0.0081X_1X_2$	>	220
$429.1172 - 8.5370X_1 - 0.5121X_2 + 0.0483X_1^2 + 0.0072X_1X_2$	>	50
$107.0239 - 0.3865X_1 - 0.0014X_1^2 + 0.0013X_1X_2$	<	97

ทั้งนี้ เนื่องจากชุดสมการที่จะนำมาวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมนี้ มีรูปแบบของสมการที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear equation) ดังนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ของชุดสมการที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear programming) ที่ชื่อว่า GINO ช่วยในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.18 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม (optimization)

Solution Status :		Optimal to Tolerrances Dual Conditions :		
		Satisfied		
Objective function Value	19.66			
Variable	Value			
X1	72.07			
X2	70.45			
Constraints :	Objective	Value	Status	
Tensile Strength	>80	110.22	O.K	
% Elongation	>220	221.03	O.K	
Modulus	>50	65.21	O.K	
Hardness	<97	78.50	O.K	
Specific Gravity	<1.6	1.46	O.K	

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม (optimization) สรุปได้ว่าจุดการผสมที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ต้นทุนต่อหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่ำสุด และมีคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลตามต้องการ ของสารผสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต คือจุดที่ปริมาณการใช้ DOP มีค่าเท่ากับ 72.07 phr. และปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าเท่ากับ 70.45 phr. ซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนค่าวัตถุดิบเท่ากับ 19.66 บาท ต่อ กิโลกรัม

2) การเปรียบเทียบผล ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด ค่าที่คำนวณได้จาก
สมการ และ ค่าเป้าหมาย

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์หาจุดการผสมที่เหมาะสม ระหว่าง DOP และ
แคลเซียมคาร์บอเนต นั่นคือ จุดที่มีสัดส่วนการผสม DOP เท่ากับ 72.07 phr. และ แคลเซียม
คาร์บอเนต เท่ากับ 70.45 phr.แล้ว จึงได้ทำการเตรียมชิ้นงานขึ้นด้วยสัดส่วนการผสมดังกล่าว
เพื่อนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านต่างๆ โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยที่ได้มา
วิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.19

และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับขีดจำกัดบน และขีดจำกัดล่าง
ของชุดสมการที่นำมาวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม ซึ่งเป็นค่าเป้าหมาย จะได้ผลดังแสดงในตาราง
ที่ 4.20

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัด และ ค่าที่คำนวณได้จากสมการ

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณได้จาก สมการ	ค่าที่ได้จาก การวัด	% ความแตกต่าง
แรงดึงที่จุดขาด (กก./ตร.ซม.)	110.22	118.91	7.88
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (%)	221.03	228.00	3.15
โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	65.21	70.88	8.69
ความแข็ง (ชอร์ A)	78.50	77.75	0.96
ความถ่วงจำเพาะ	1.46	1.4425	1.20

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงาน กับ ขีดจำกัดบนและล่างของชุดสมการที่นำมาวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม

คุณสมบัติ	ค่าเป้าหมาย	ค่าที่ได้จากการวัด	ยอมรับ/ไม่ยอมรับ
แรงดึงที่จุดขาด (กก./ตร.ซม.)	>80	118.91	ยอมรับ
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (%)	>220	228.00	ยอมรับ
โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	>50	70.88	ยอมรับ
ความแข็ง (ชอร์ A)	<97	77.75	ยอมรับ
ความถ่วงจำเพาะ	<1.6	1.4425	ยอมรับ

4.3 ผลการทดลองสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ ซีรีคลอ

จากผลการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต ในหัวข้อที่ 4.2.2.3 ผลปรากฏว่าปริมาณการใช้ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 72.07 และ 70.45 phr. ตามลำดับ สำหรับการทดลองในตอนี่ 2 นี้ จะเป็นการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของการนำเอา ซีรีคลอ (cereclor) ซึ่งเป็น สารช่วยเสริมสภาพพลาสติก (secondary plasticizer) มาทดแทนปริมาณการใช้ DOP ซึ่งเป็น สารเสริมสภาพพลาสติก (primary plasticizer) และมีราคาแพงกว่า เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต

ดังนั้น ในการทดลองตอนี่ 2 นี้ จึงได้ทำการทดลองโดยการกำหนดให้ปริมาณการใช้ แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าคงที่ เท่ากับ 70.45 phr. แล้วลดปริมาณการใช้ DOP ลงครั้งละ 5 phr. พร้อมกับการเพิ่มปริมาณการใช้ซีรีคลอขึ้นครั้งละ 5 phr. ซึ่งจะได้เป็นแผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 แล้วทำการเตรียมชิ้นงานขึ้นตามสัดส่วนการผสมดังกล่าว

เมื่อได้เตรียมชิ้นงานขึ้นตามสัดส่วนการผสมดังกล่าวแล้ว นำชิ้นงานที่เตรียมได้ ไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และ เชงกลซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การทนต่อความร้อน ค่าแรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

4.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และ เชิงกล

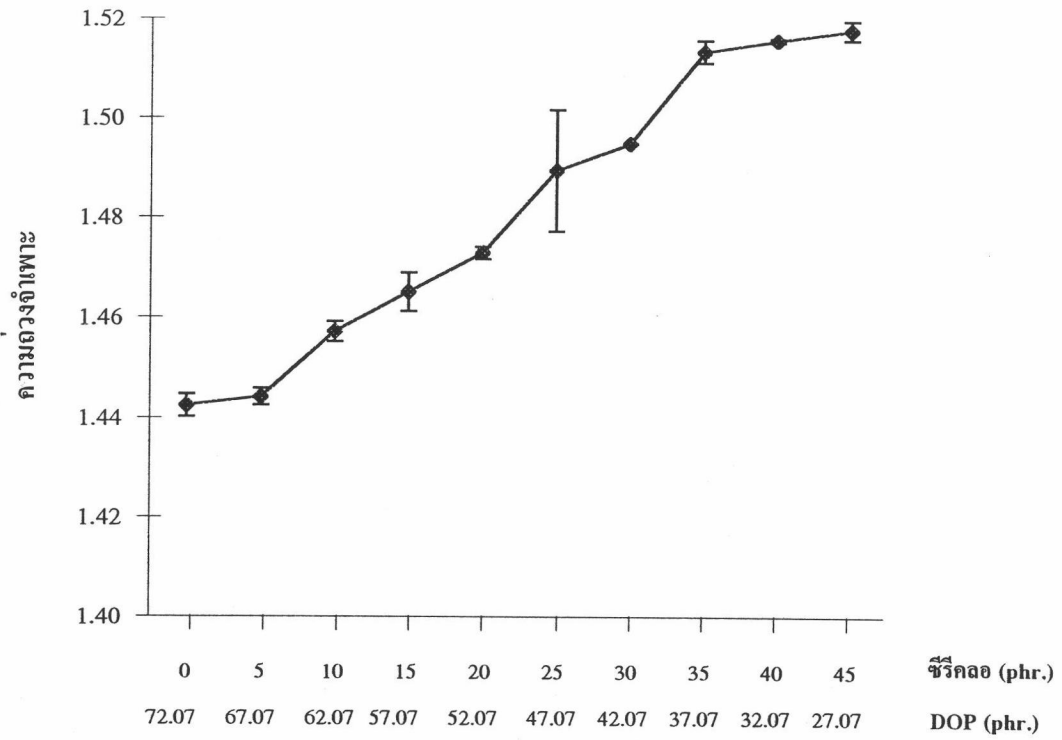
4.3.1.1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานจำนวน 40 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และ ปริมาณของซีรีคลอ อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.21 และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคลอ กับ ค่าความถ่วงจำเพาะ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.17

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซีรีคลอมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำซีรีคลอมาใช้เพื่อทดแทนปริมาณการใช้ DOP ในสัดส่วนที่เท่าๆกัน จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.21 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลล

DOP (phr.)	ซีรีคอลล (phr.)	ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	1.4408	1.4441	1.4424 ± 0.0023
67.07	5	1.4430	1.4454	1.4442 ± 0.0017
62.07	10	1.4608	1.4636	1.4622 ± 0.0020
57.07	15	1.4677	1.4624	1.4650 ± 0.0038
52.07	20	1.4720	1.4736	1.4728 ± 0.0012
47.07	25	1.4807	1.4980	1.4893 ± 0.0122
42.07	30	1.4947	1.4948	1.4948 ± 0.0001
37.07	35	1.5149	1.5118	1.5134 ± 0.0022
32.07	40	1.5154	1.5159	1.5157 ± 0.0004
27.07	45	1.5190	1.5163	1.5177 ± 0.0019



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงจำเพาะ กับ ปริมาณการใช้ซีรีคตล และ DOP

4.3.1.2) การทนความร้อน (Heat Stability)

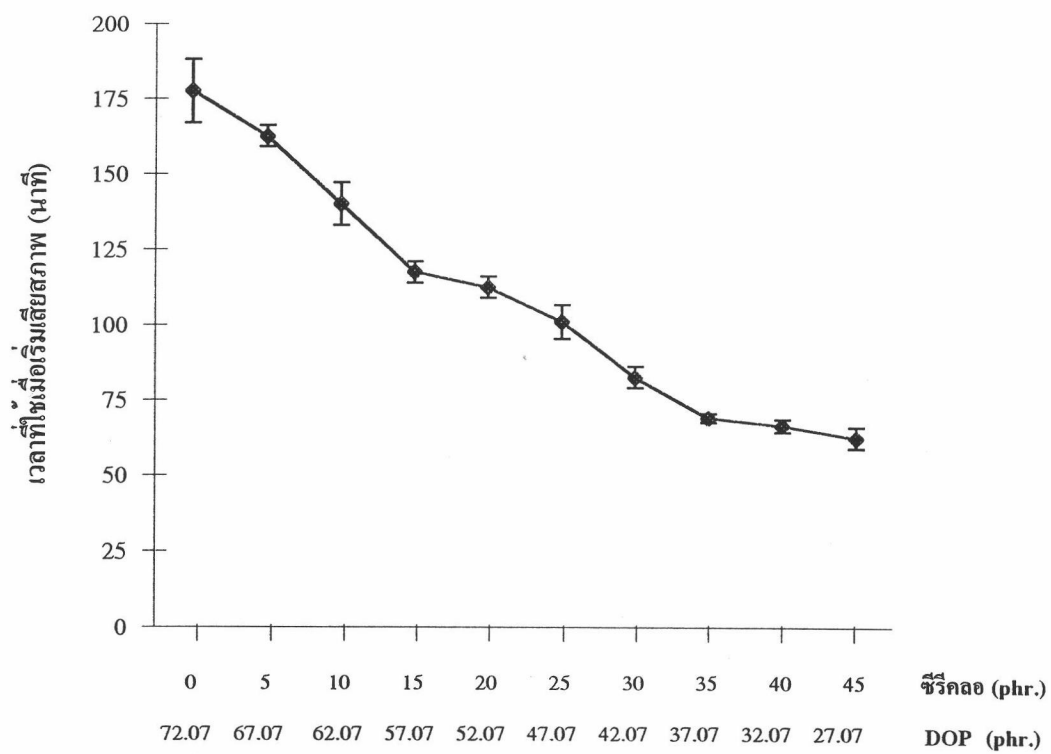
จากการทดสอบหาค่าความทนความร้อน โดยใช้ผงของส่วนผสมจำนวน 20 ส่วนผสม ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และปริมาณของซีรีคลอ อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.22 ซึ่งแสดงค่าความทนความร้อน ในรูปของเวลาที่ใช้ในการทำให้ส่วนผสมของพีวีซีเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อตั้งอุณหภูมิสำหรับการทดสอบไว้ที่ 180 องศาเซลเซียส และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคลอ กับ ค่าเวลา จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.18

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าความทนความร้อนของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อปริมาณของซีรีคลอมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำซีรีคลอมาใช้เพื่อทดแทนปริมาณการใช้ DOP ในสัดส่วนที่เท่าๆกัน จะส่งผลให้ค่าการทนต่อความร้อนของพลาสติกพีวีซีมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่ลดลงอย่างรวดเร็วนั่นเอง

ตารางที่ 4.22 ผลของค่าการทนความร้อน ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลล

หน่วย : นาที่

DOP (phr.)	ซีรีคอลล (phr.)	ค่าการทนความร้อนเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	185	170	177.5 ± 10.61
67.07	5	160	165	162.5 ± 3.54
62.07	10	145	135	140.0 ± 7.07
57.07	15	115	120	117.5 ± 3.54
52.07	20	110	115	112.5 ± 3.54
47.07	25	97	105	101.0 ± 5.66
42.07	30	80	85	82.5 ± 3.54
37.07	35	68	70	69.0 ± 1.41
32.07	40	68	65	66.5 ± 2.12
27.07	45	65	60	62.5 ± 3.54



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนความร้อน กับ ปริมาณการใช้ซีรียคอลลอ และ DOP

4.3.1.3) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Tensile Strength)

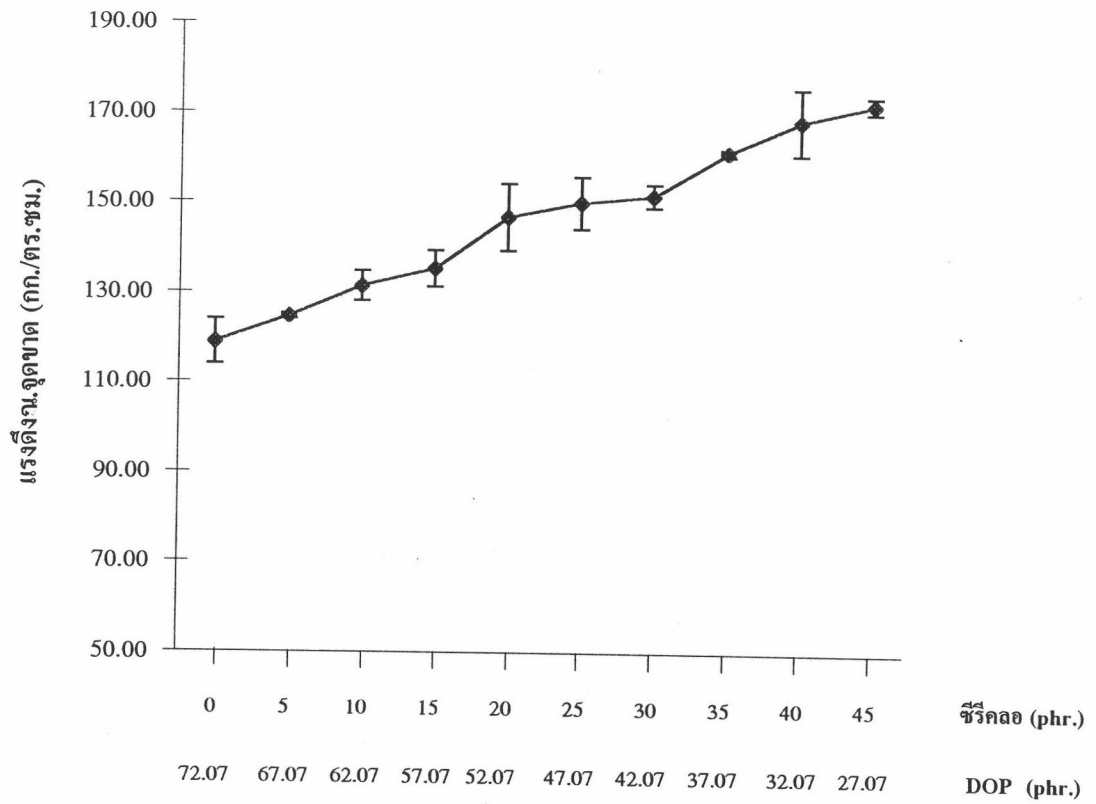
จากการทดสอบหาค่าแรงดึงที่จุดขาดของชิ้นงานจำนวน 100ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และ ปริมาณของซีรีคอลลอย อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.23 และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคอลลอย กับ ค่าแรงดึงที่จุดขาด จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.19

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าคุณค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซีรีคอลลอยมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำซีรีคอลลอยมาใช้เพื่อเป็นการทดแทนปริมาณการใช้ DOP ในสัดส่วนที่เท่าๆกัน จะส่งผลให้ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.23 ผลของค่าแรงดึงที่จุดขาด ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลลอ

หน่วย : กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

DOP (phr.)	ซีรีคอลลอ (phr.)	ค่าแรงดึงที่จุดขาดเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	115.37	122.45	118.91 ± 5.01
67.07	5	125.11	124.20	124.65 ± 0.64
62.07	10	129.06	133.76	131.41 ± 3.32
57.07	15	132.45	138.11	135.28 ± 4.01
52.07	20	141.41	152.01	146.71 ± 7.50
47.07	25	154.07	145.86	149.97 ± 5.81
42.07	30	149.81	153.44	151.63 ± 2.57
37.07	35	161.82	160.76	161.29 ± 0.75
32.07	40	173.50	163.09	168.30 ± 7.36
27.07	45	170.91	173.47	172.19 ± 1.81



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่จุดขาด กับ ปริมาณการใช้ชื้อรีคลอ และ DOP

4.3.1.4) เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% Elongation)

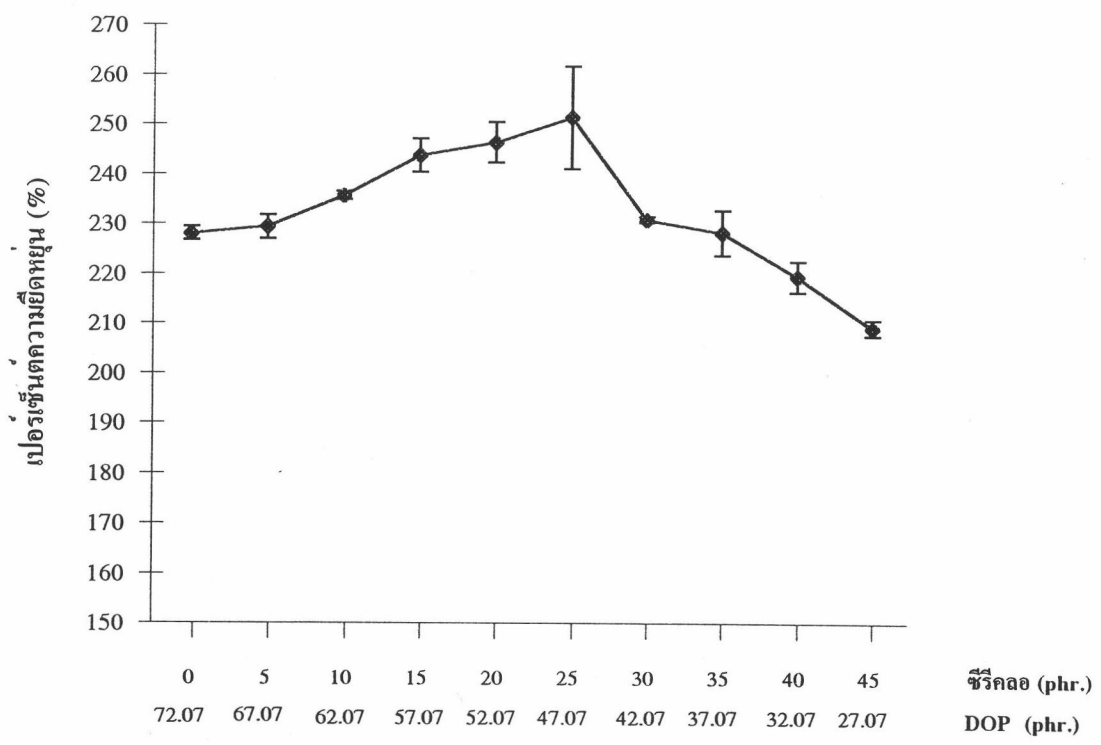
จากการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ของชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และ ปริมาณของซีรีคอลลอ อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.24 และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคอลลอ กับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณของซีรีคอลลอมีค่ามากขึ้นอยู่ระหว่าง 0-25 phr. ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลงจาก 72.07 เป็น 47.07 และพบว่า เมื่อปริมาณการใช้ซีรีคอลลอมีค่ามากกว่า 25 phr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลง เป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำใช้ซีรีคอลลอมาแทน DOP ในสัดส่วนที่เท่ากัน จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้น แล้วจึงลดลงในที่สุด

ตารางที่ 4.24 ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคตอ

หน่วย : เปอร์เซนต์

DOP (phr.)	ซีรีคตอ (phr.)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	227.00	229.00	228.00 ± 1.41
67.07	5	227.60	231.00	229.30 ± 2.40
62.07	10	235.00	236.20	235.60 ± 0.85
57.07	15	246.00	241.25	243.63 ± 3.36
52.07	20	249.20	243.40	246.30 ± 4.10
47.07	25	258.60	244.00	251.30 ± 10.32
42.07	30	230.40	231.20	230.80 ± 0.57
37.07	35	231.40	225.00	228.20 ± 4.53
32.07	40	221.60	217.25	219.43 ± 3.08
27.07	45	210.25	208.00	209.13 ± 1.59



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น กับ ปริมาณการใช้ซีรีคตอ และ DOP

4.3.1.5) 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น (100% Elastic Modulus)

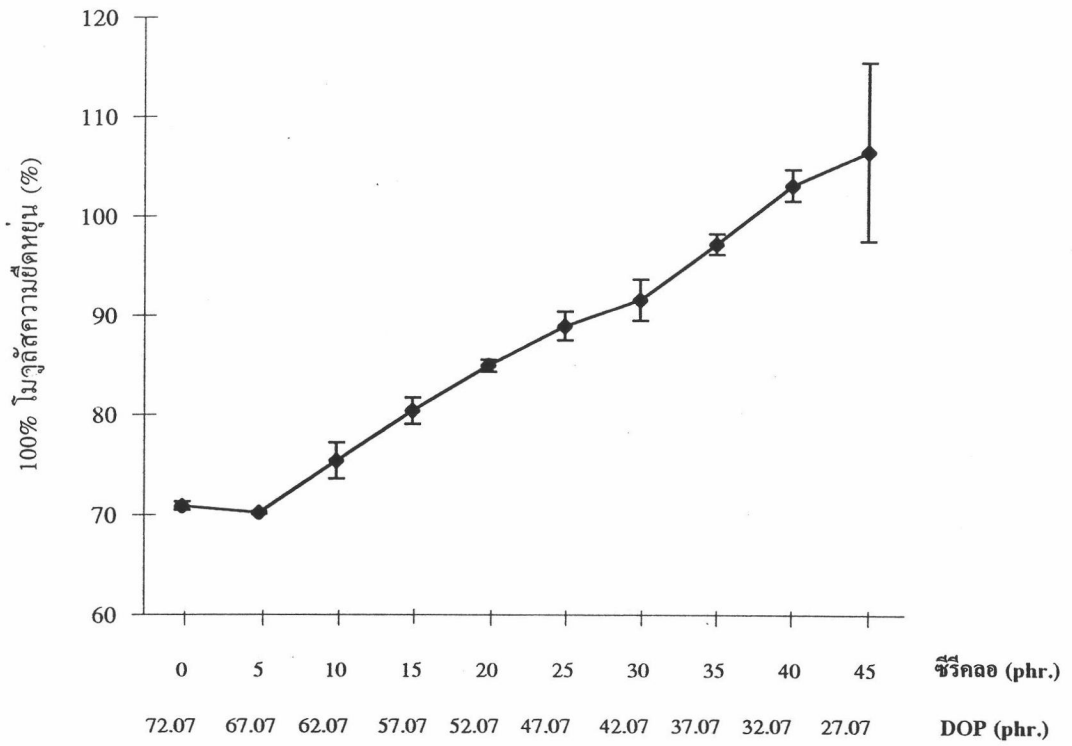
จากการทดสอบหาค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น ของชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และปริมาณของซีรีคอลลอย อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.25 และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคอลลอย กับค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.21

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นว่าค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณของซีรีคอลลอยมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำซีรีคอลลอยมาใช้เพื่อทดแทนปริมาณการใช้ DOP ในสัดส่วนที่เท่าๆกัน จะส่งผลให้ค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซีมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.25 ผลของค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ ซีรีคอลลอ

หน่วย : กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

DOP (phr.)	ซีรีคอลลอ (phr.)	ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	71.16	70.59	70.88 ± 0.40
67.07	5	70.13	70.31	70.22 ± 0.13
62.07	10	76.63	74.06	75.35 ± 1.81
57.07	15	81.33	79.45	80.39 ± 1.33
52.07	20	84.46	85.36	84.91 ± 0.63
47.07	25	89.92	87.85	88.89 ± 1.46
42.07	30	90.09	93.04	91.56 ± 2.08
37.07	35	96.46	97.93	97.20 ± 1.04
32.07	40	104.21	102.00	103.10 ± 1.56
27.07	45	112.85	100.13	106.46 ± 8.99



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณการใช้ชิริคอส และ DOP

4.3.1.6) ความแข็ง (Hardness)

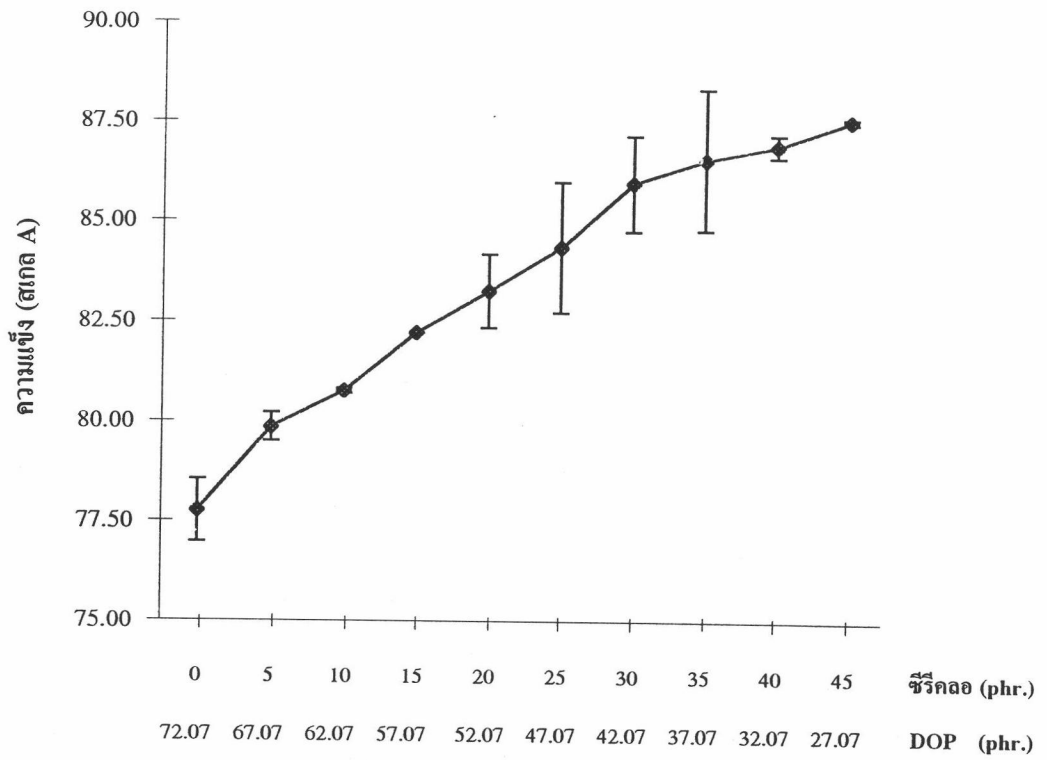
จากการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานจำนวน 20 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจาก ปริมาณของ DOP อยู่ระหว่าง 72.07-27.07 phr. และ ปริมาณของซีรีคอลลอ อยู่ระหว่าง 0-45 phr. โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.26 และเมื่อนำผลที่ได้ไปแสดงใน รูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ซีรีคอลลอ กับ ค่าความแข็ง จะได้กราฟดังแสดงใน รูปที่ 4.22

จากตาราง และกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของพลาสติกมี แนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซีรีคอลลอมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ DOP มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการนำซีรีคอลลอมาใช้เพื่อทดแทนปริมาณการใช้ DOP ในสัดส่วน ที่เท่าๆกัน จะส่งผลให้ค่าความแข็งของพลาสติกพีวีซีมีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.26 ผลของค่าความแข็ง ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ ซีรีคอลล

หน่วย : ชอร์ A

DOP (phr.)	ซีรีคอลล (phr.)	ค่าความแข็งเฉลี่ยของการทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
72.07	0	77.2	78.3	77.75 ± 0.78
67.07	5	80.1	79.6	79.85 ± 0.35
62.07	10	80.8	80.7	80.75 ± 0.07
57.07	15	82.2	82.2	82.20 ± 0.00
52.07	20	82.6	83.9	83.25 ± 0.92
47.07	25	83.2	85.5	84.35 ± 1.63
42.07	30	85.1	86.8	85.95 ± 1.20
37.07	35	85.3	87.8	86.55 ± 1.77
32.07	40	86.7	87.1	86.9 ± 0.28
27.07	45	87.5	87.6	87.55 ± 0.07



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง กับ ปริมาณการใช้ชิโรส และ DOP

4.3.2 การวิเคราะห์หาจุดการทดแทนที่เหมาะสมของซีรีคโล

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของชิ้นงาน ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง DOP ที่มีการแปรค่าอยู่ระหว่าง 72.07 - 27.07 phr. และ ซีรีคโล ที่มีการแปรค่าอยู่ระหว่าง 0 - 45 phr. พบว่า เมื่อมีการนำซีรีคโลมาใช้ทดแทน DOP ด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน คือ 5 phr. จะส่งผลให้ค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ซึ่งได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าแรงดึงที่จุดขาด โมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งของพลาสติก มีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าความสามารถในการทนต่อความร้อนของพลาสติก ที่มีแนวโน้มลดลง และสำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกนั้น พบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ปริมาณการใช้ซีรีคโลมีค่าเท่ากับ 25 phr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกจึงมีแนวโน้มที่จะลดลง

และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณสมบัติที่ได้ เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายของงานวิจัย จะพบว่า

- 1) ค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมายไว้ ให้มีค่าน้อยกว่า 1.6 และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.4424 - 1.5177 ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในบริเวณที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย
- 2) ค่าแรงดึงที่จุดขาด ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมายไว้ ให้มีค่ามากกว่า 80 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าแรงดึงที่จุดขาดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 118.91 - 172.19 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในบริเวณที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย
- 3) ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมายไว้ ให้มีค่ามากกว่า 220 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงในที่สุด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 228.00 - 209.13 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.20 ทำให้ทราบว่า จุดที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นเริ่มที่จะมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมาย คือ จุดที่ปริมาณการใช้ซีรีคโลมีค่าเท่ากับ 40 phr. ดังนั้นช่วงที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นยังคงอยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย คือ ช่วงที่ปริมาณการใช้ซีรีคโลมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 35 phr. นั่นเอง

4) ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมายไว้ ให้มีค่ามากกว่า 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 70.88 - 106.49 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในบริเวณที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย

5) ค่าความแข็ง ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมายไว้ ให้มีค่าต่ำกว่า 97 ชอร์ A และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าความแข็งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 77.75 - 87.55 ชอร์ A ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในบริเวณที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าเป้าหมาย และค่าที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติ สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณของซีรีคโลที่นำมาใช้ทดแทน DOP เพื่อให้ได้พลาสติกพีวีซีที่คุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ คือ จุดที่ปริมาณการใช้ซีรีคโลมีค่าเท่ากับ 35 phr. ซึ่งต้องใช้ DOP เท่ากับ 37.07 phr. กล่าวคือ สามารถใช้ซีรีคโลแทน DOP ได้ในสัดส่วนเท่ากับ 51.44 % ของปริมาณ DOP ที่ต้องใช้ (72.07 phr.)

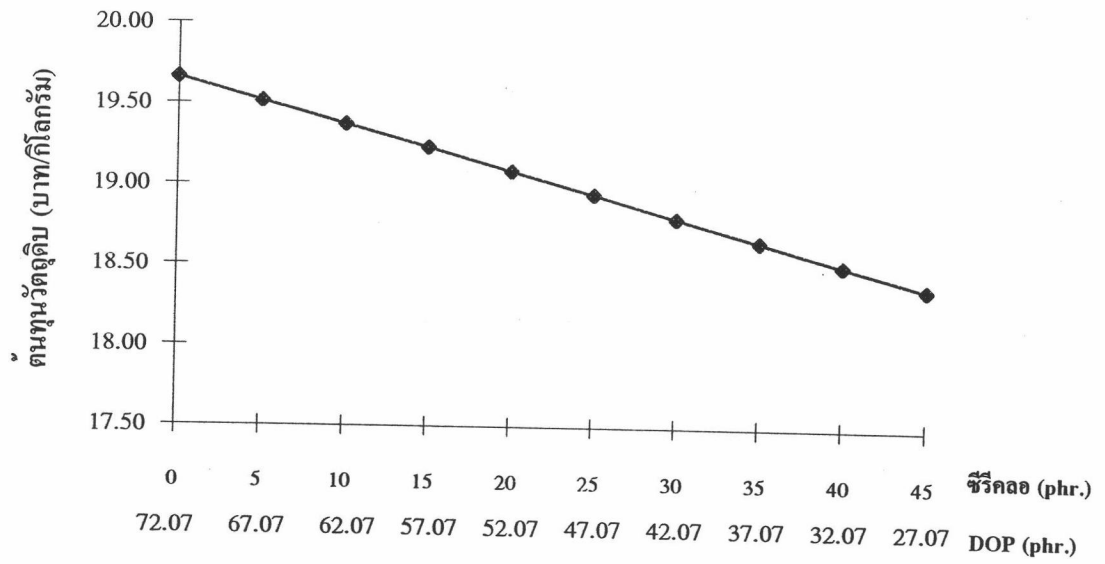
ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การนำซีรีคโลมาใช้แทน DOP นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ดังนั้น เมื่อพิจารณาต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ซึ่งลดลงเนื่องจากการนำซีรีคโลมาใช้แทน DOP แล้ว จะได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.27 และกราฟรูปที่ 4.23

จากตารางที่ 4.27 และ รูปที่ 4.23 พบว่า ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ซึ่งลดลงเนื่องจากการนำซีรีคโลมาใช้แทน DOP นี้ จะมีค่าลดลงจากเดิม 19.66 บาท/กิโลกรัม เป็น 18.66 บาท/กิโลกรัม หรือลดลงเท่ากับ 1.00 บาท/กิโลกรัม

ตารางที่ 4.27 ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น

หน่วย : บาท/กิโลกรัม

DOP (phr.)	ซีรีคล (phr.)	ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต
72.07	0	19.66
67.07	5	19.52
62.07	10	19.37
57.07	15	19.23
52.07	20	19.09
47.07	25	18.95
42.07	30	18.80
37.07	35	18.66
32.07	40	18.52
27.07	45	18.38



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนวัตถุดิบ กับ ปริมาณการใช้ซีรีคตอ และ DOP

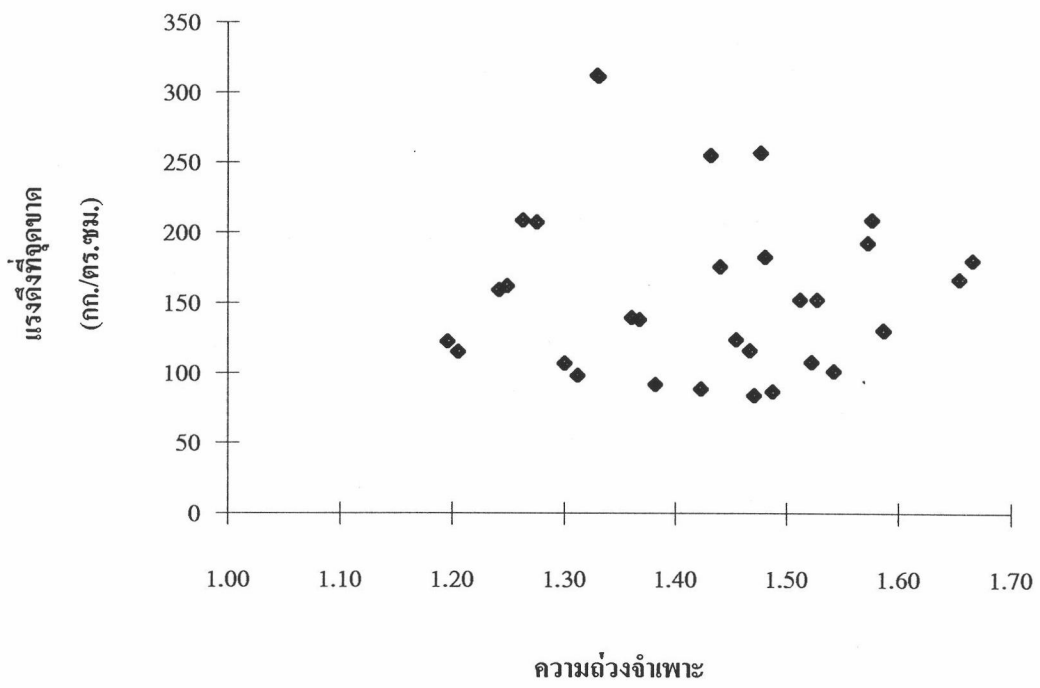
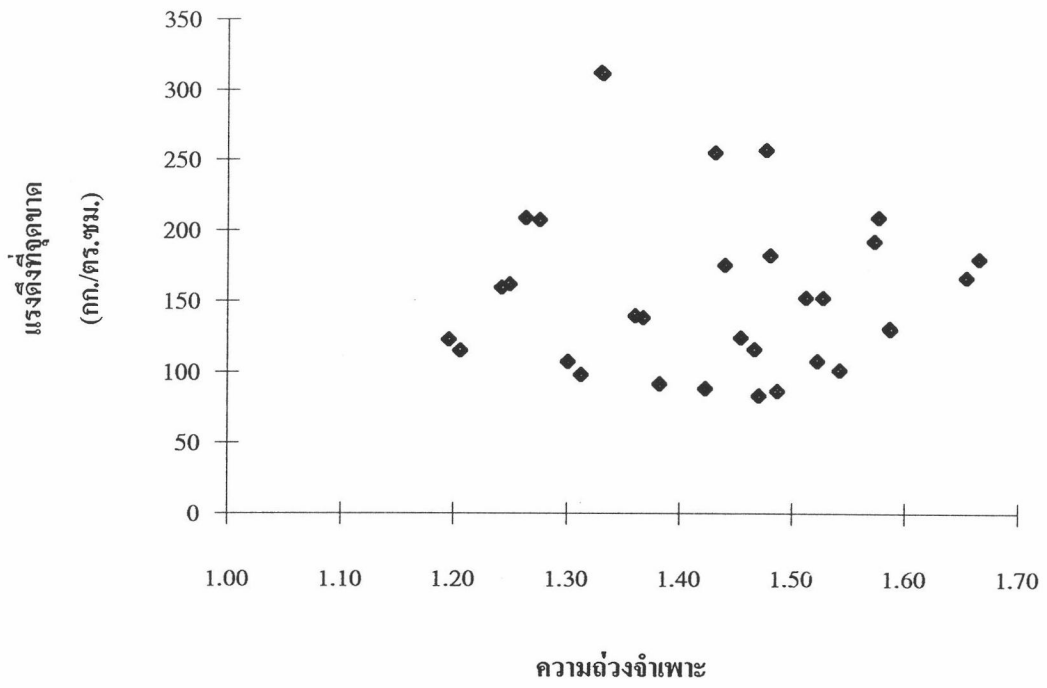
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพลาสติกพีวีซี

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ กับ คุณสมบัติเชิงกล

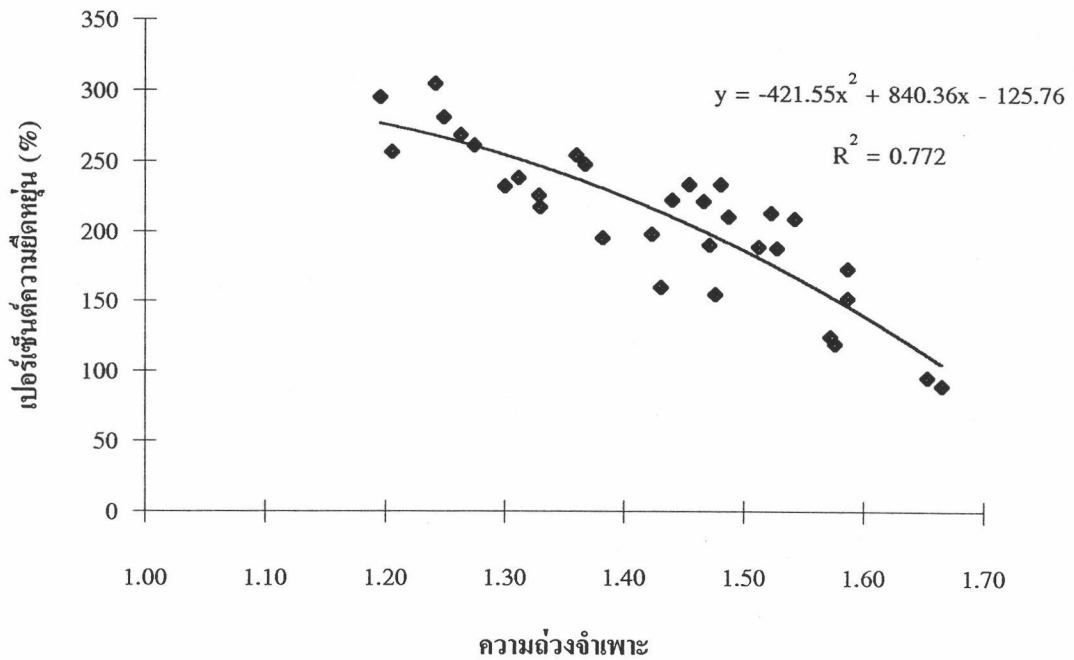
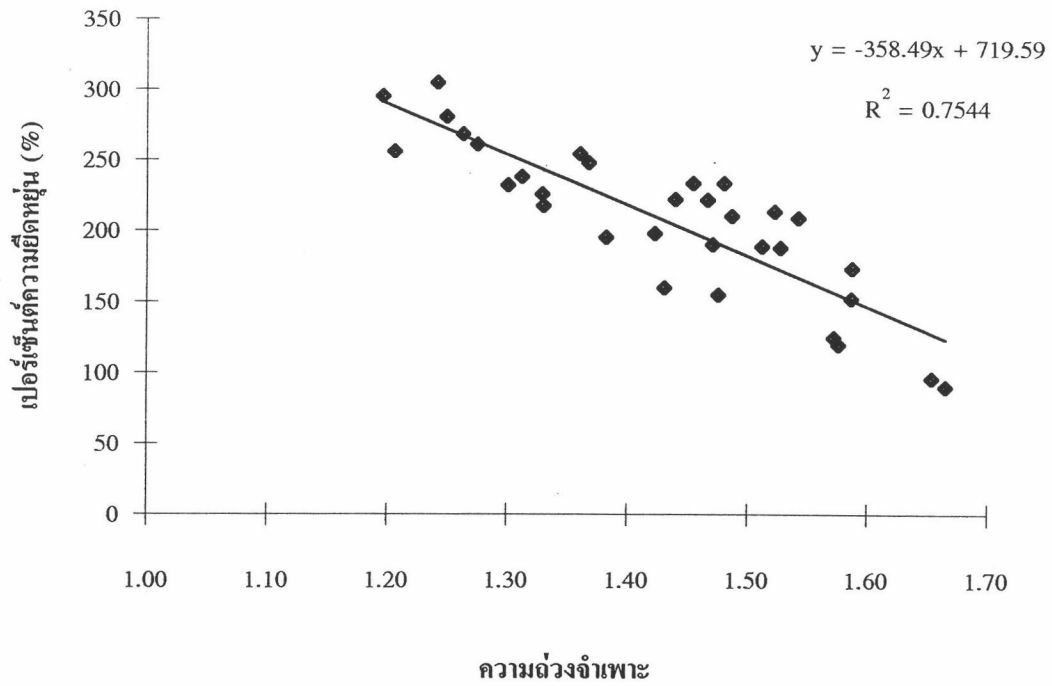
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ คือ แรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 - 4.27 ตามลำดับ เป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2

กราฟรูปที่ 4.26 และ 4.27 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกพีวีซีมีค่ามากขึ้น ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งของพลาสติก ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย แต่สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ในรูปที่ 4.25 นั้น แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบต่อกัน กล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลง เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น

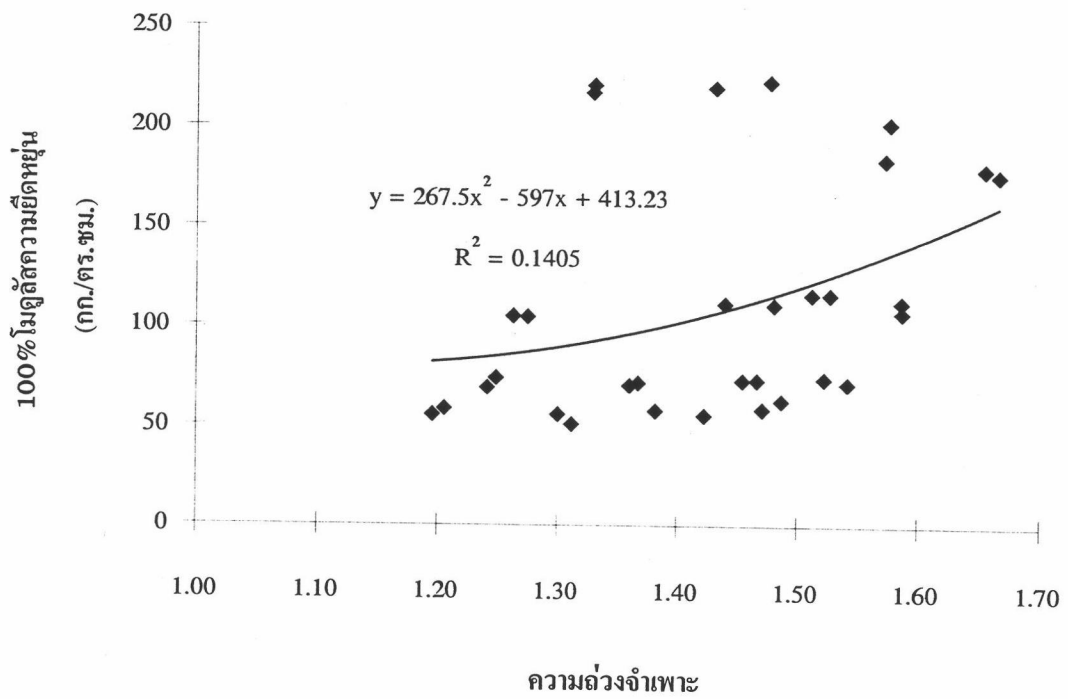
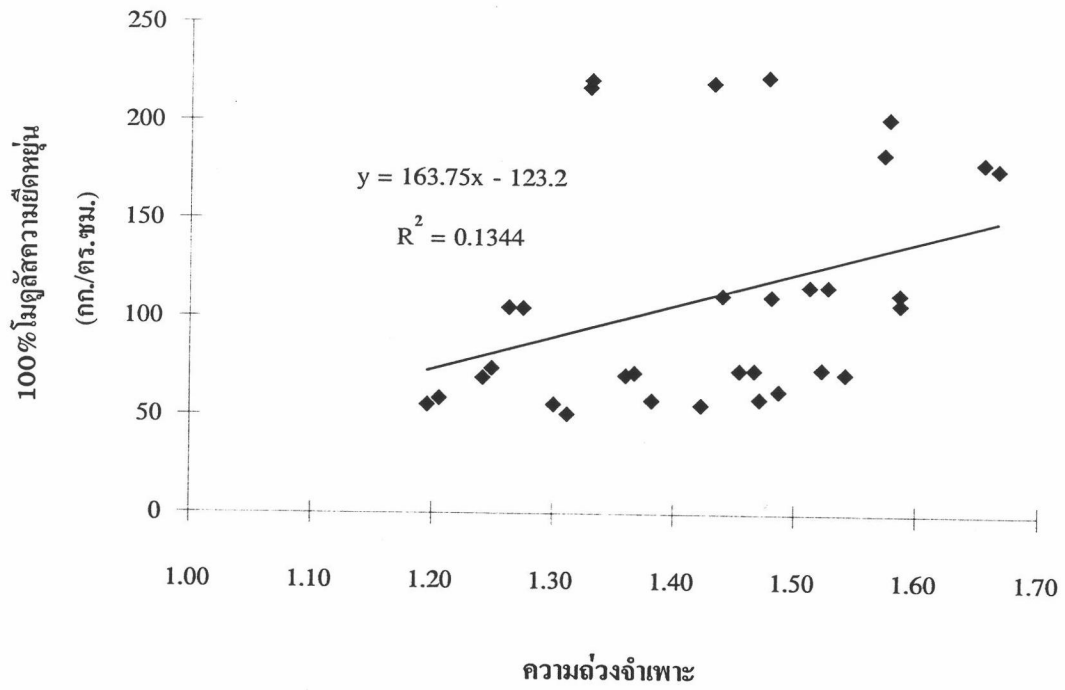
สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซี ในรูปที่ 4.24 นั้น พบว่า คุณสมบัติทั้งสองไม่น่าที่จะมีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความถ่วงจำเพาะ แทบจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ต่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีเลยนั่นเอง



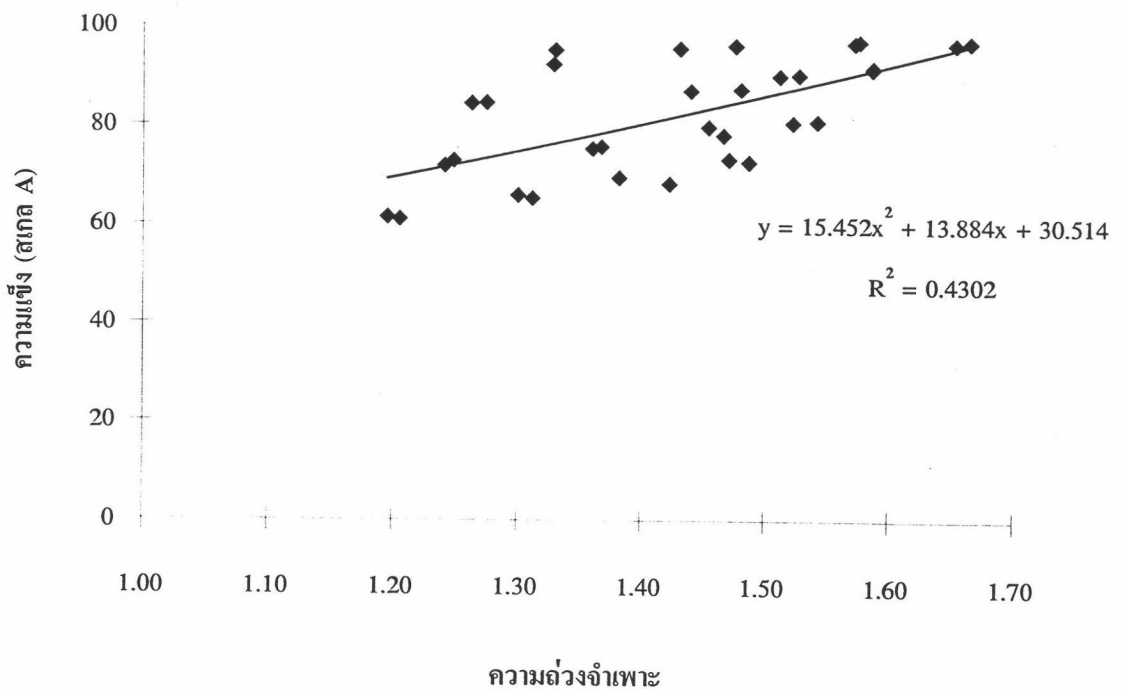
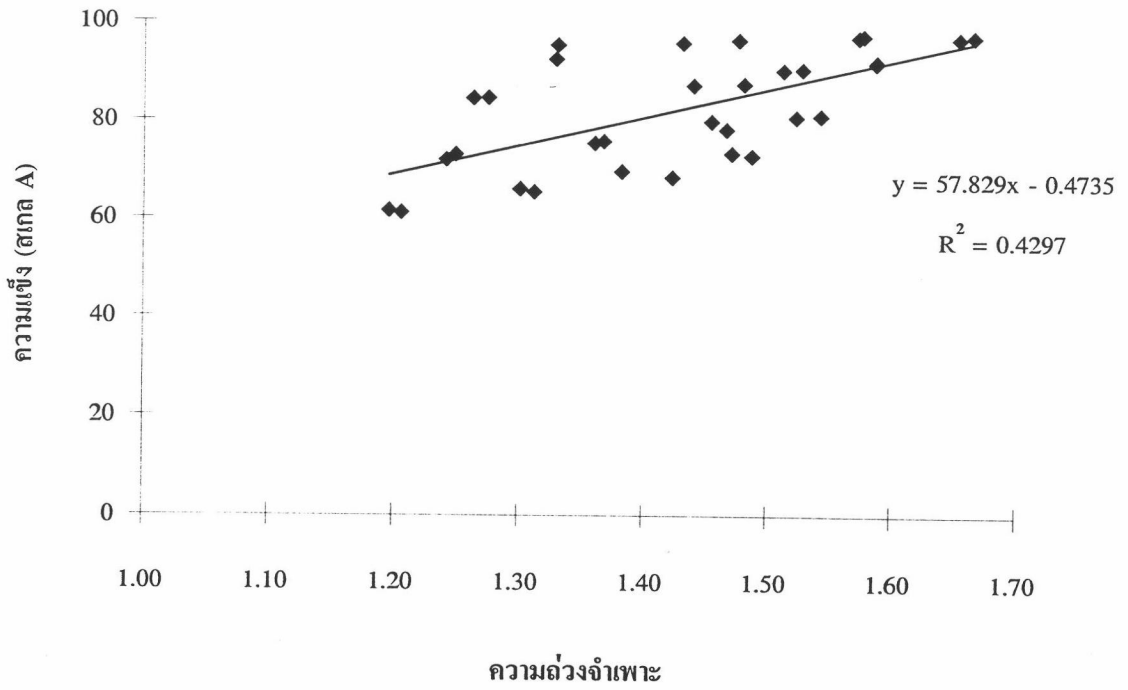
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับ แรงดึงที่จุดขาด



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ 100% ไม้ดูสต์ความชื้น



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับ ความถี่

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และ โพลีโนเมียลดีกรี 2 มีดังต่อไปนี้

4.4.2.1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ ไม่น่าที่จะมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบใดเลย เนื่องจาก ค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกพีวีซีแทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเลย เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มขึ้น

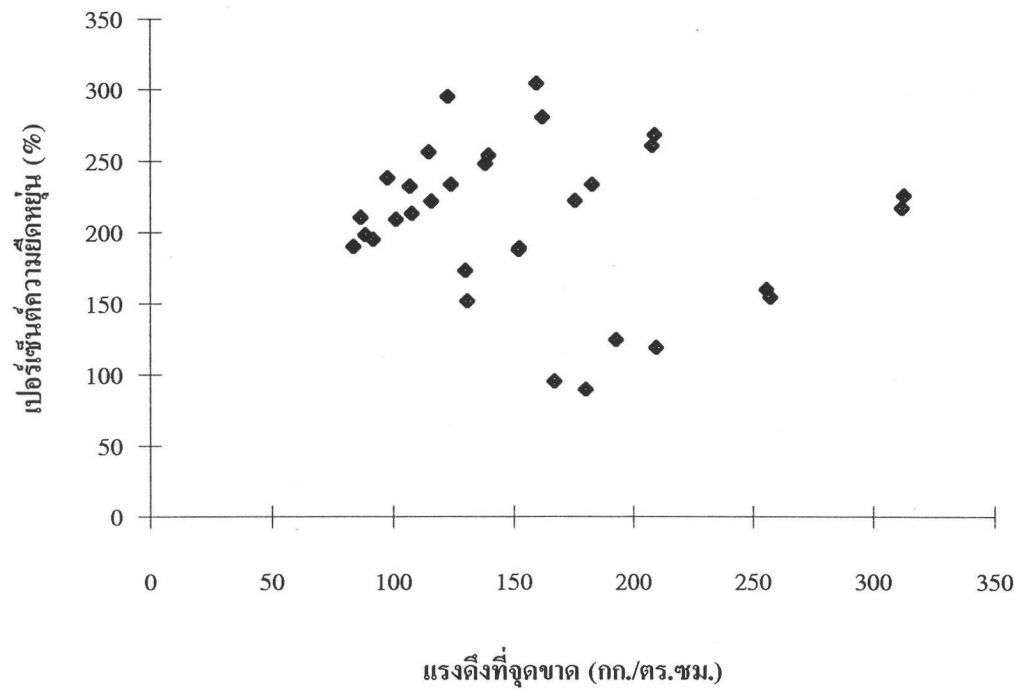
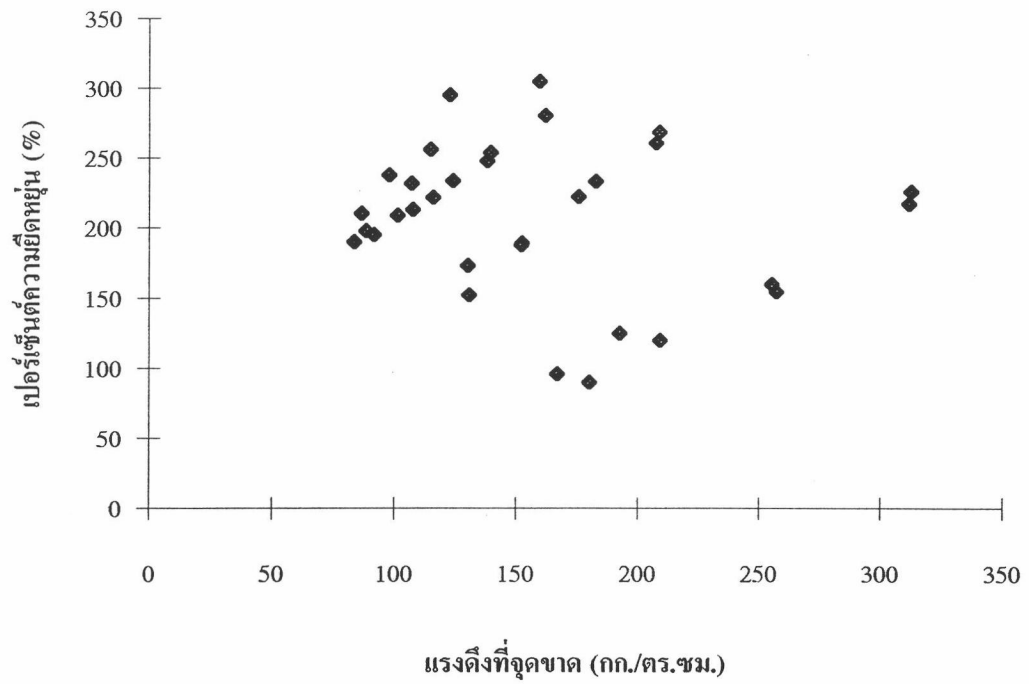
4.4.2.2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสอง มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้น เมื่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกมีค่ามากขึ้น

4.4.2.3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับ ค่าความแข็ง ของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ ค่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย เมื่อค่าแรงดึงที่จุดขาดของพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น

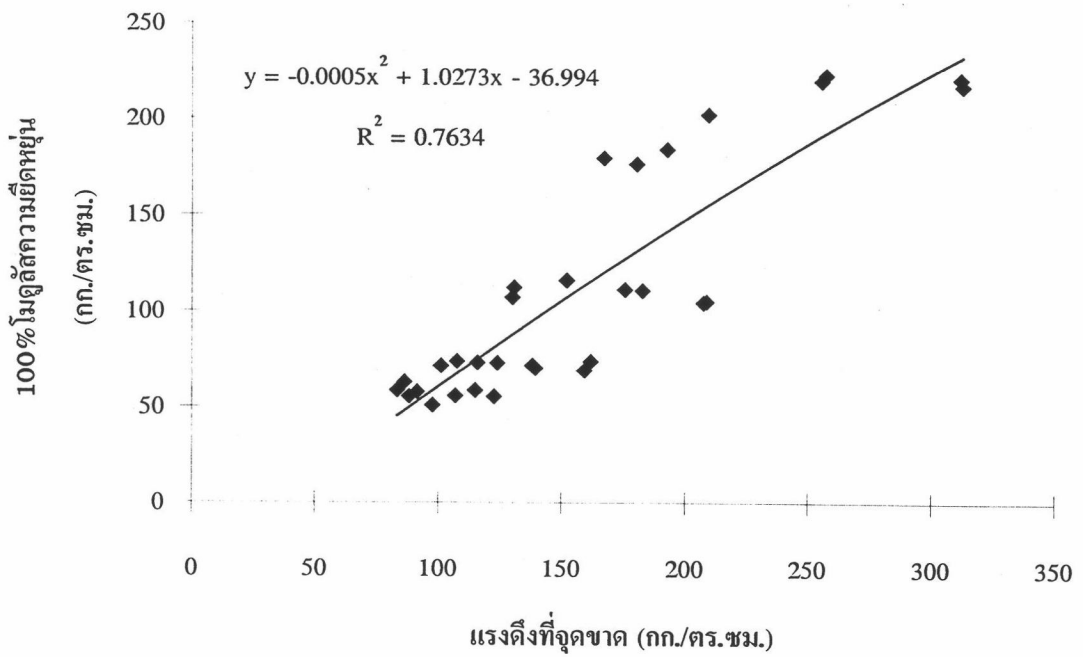
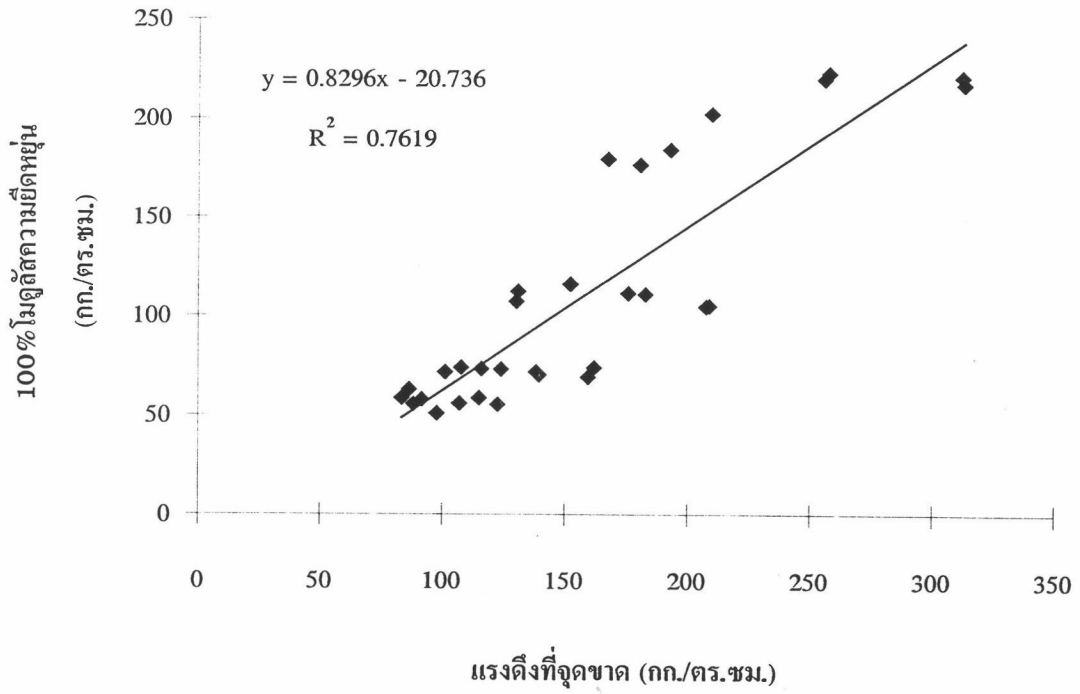
4.4.2.4) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสอง มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบต่อกัน กล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นกลับมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อค่าความแข็งของพลาสติกมีค่ามากขึ้นนั่นเอง

4.4.2.5) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสอง มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ ค่า 100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย เมื่อค่าความแข็งของพลาสติกมีค่ามากขึ้น

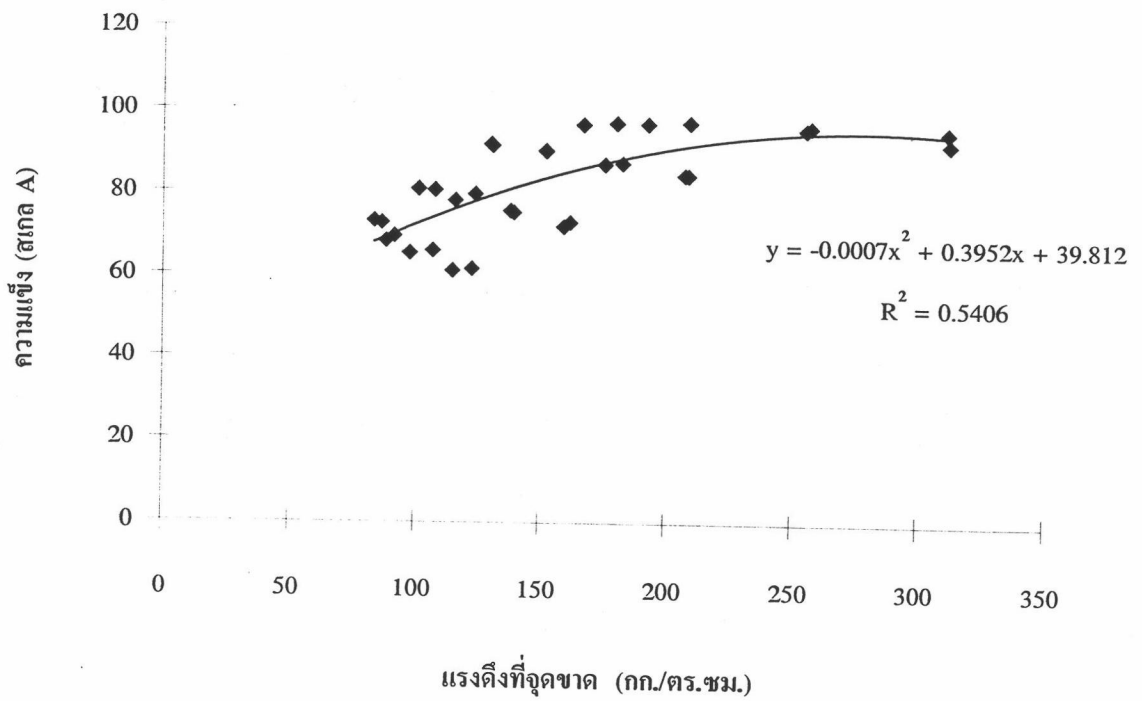
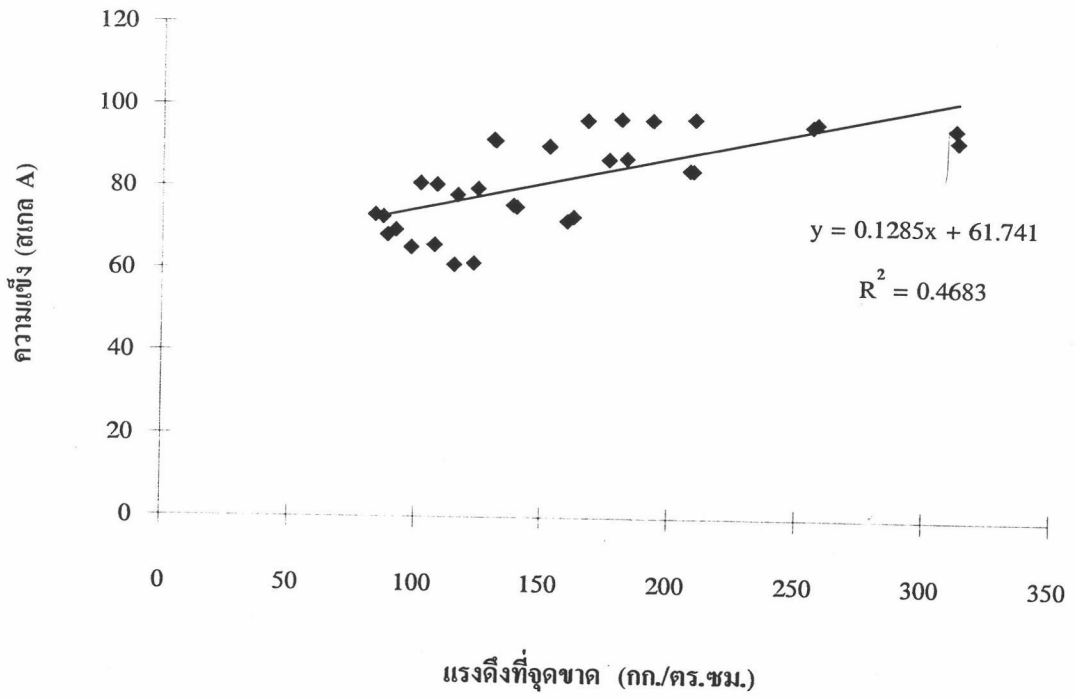
4.4.2.6) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น กับ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่นของพลาสติกพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสอง มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบต่อกัน กล่าวคือ ค่า 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น กลับมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลง เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพลาสติกมีค่ามากขึ้นนั่นเอง



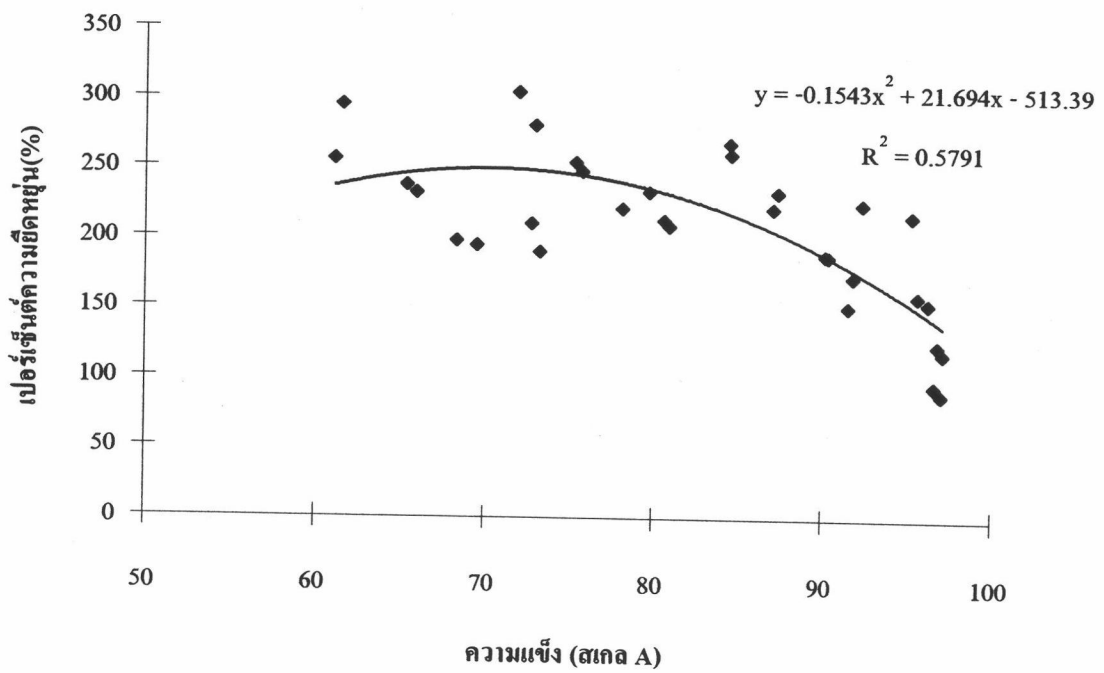
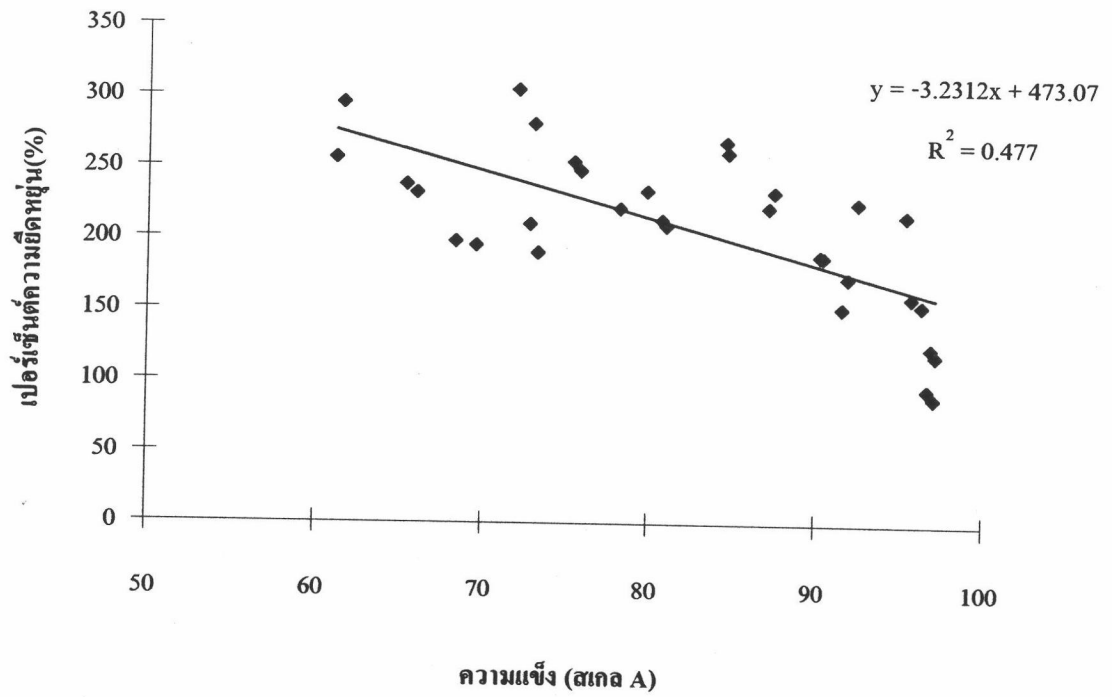
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่จุดขาด กับ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น



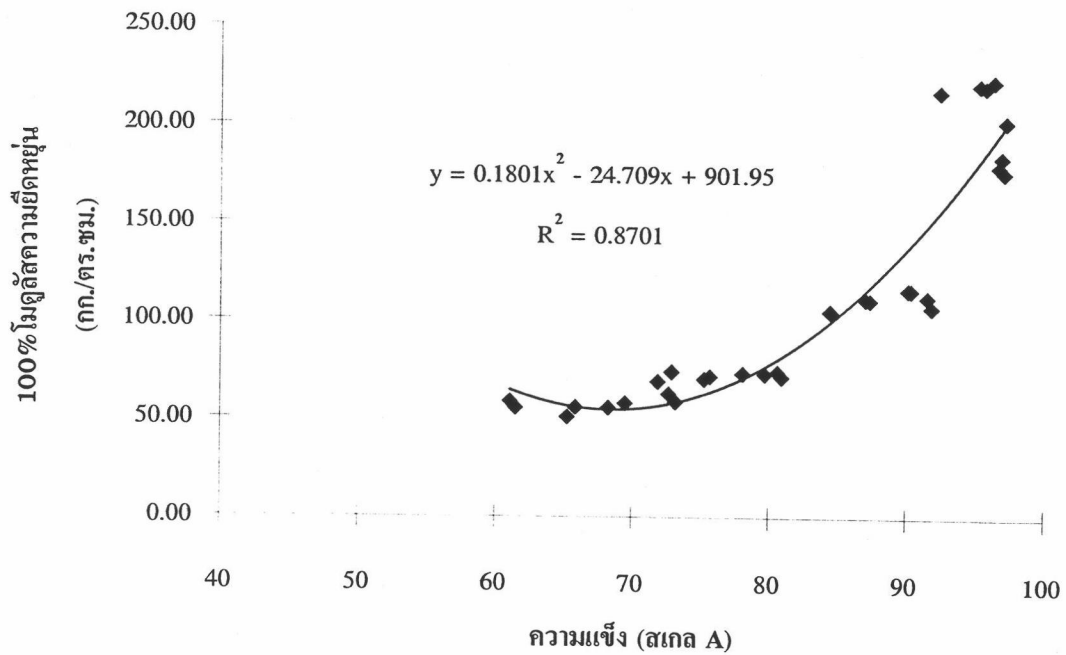
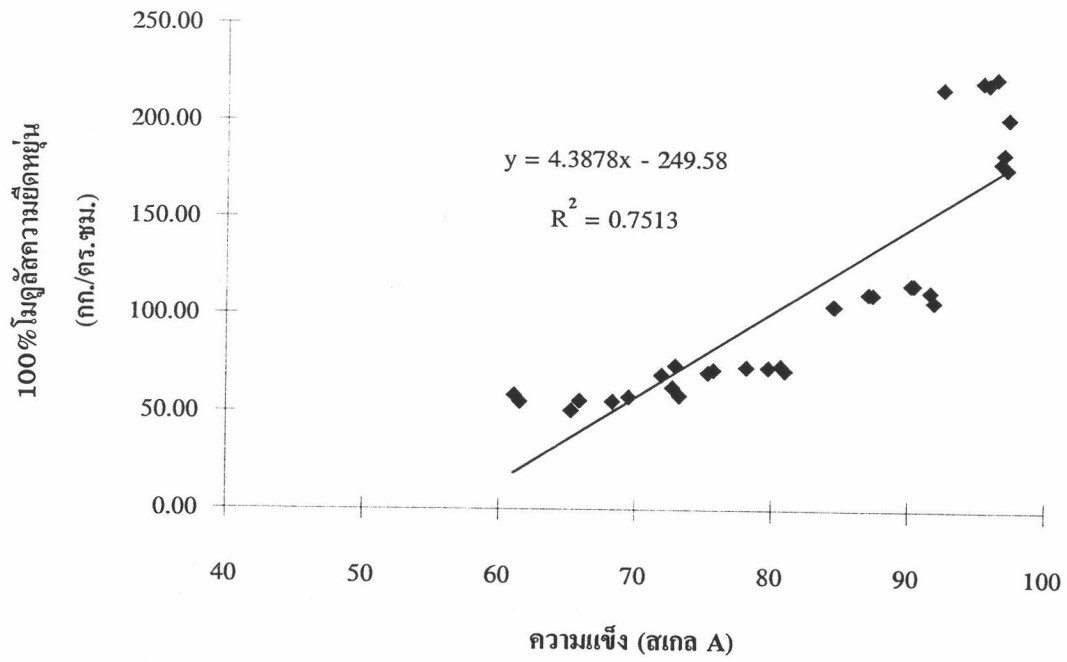
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดิ่งที่จุดขาด กับ 100% ไม้ดูลีตความยี้ดหญุ่น



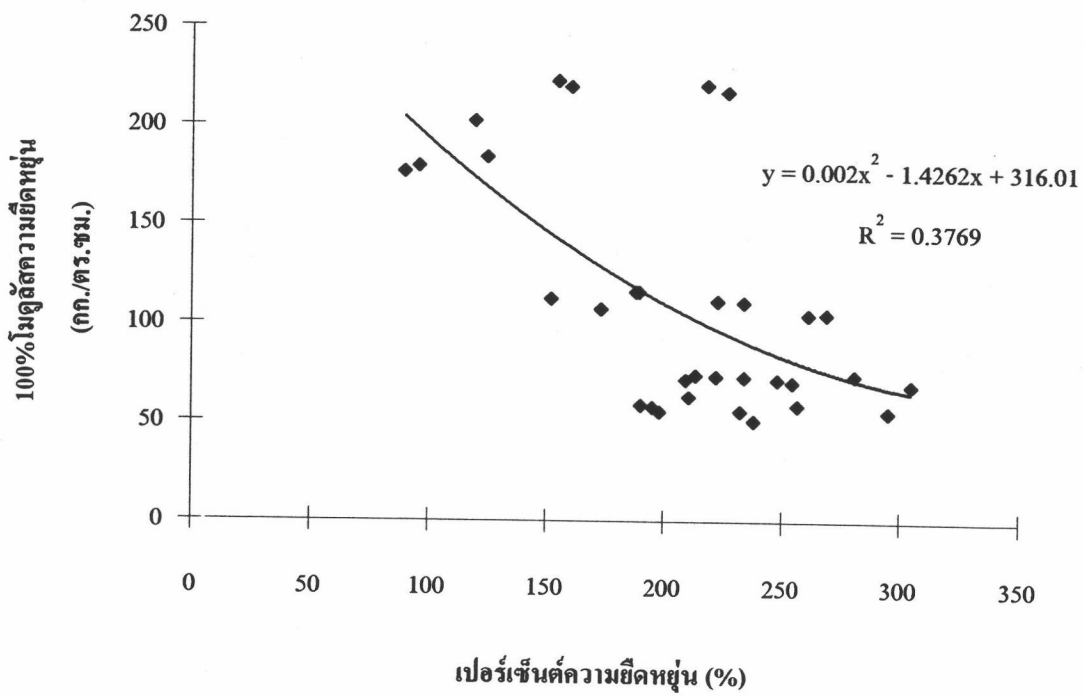
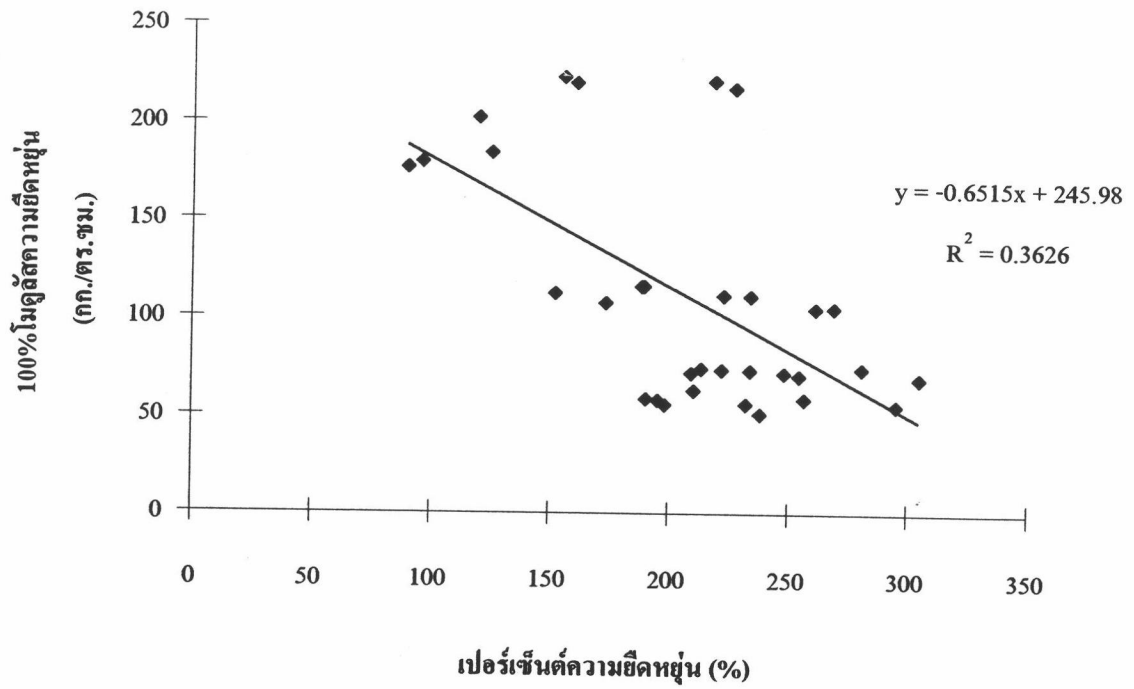
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดิ่งที่จุดขาด กับ ความแข็งแรง



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์ความยี้ดหญุ่น กับ 100% ไม้ดู๊สความยี้ดหญุ่น

4.5 สรุปผลตารางการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมดที่ได้กระทำมาในงานวิจัยนี้ สามารถนำมาสรุปเป็นตารางผลการทดลอง ได้ดังนี้

4.5.1 ผลสรุปการทดลองสัดส่วนผสม ระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

หลังจากที่ได้ดำเนินการทดลอง ผ่านขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงาน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ แรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งของชิ้นงาน รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลทางสถิติแล้ว สามารถนำผลทั้งหมดที่ได้จากการดำเนินการวิจัย มาสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.28 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

ตารางที่ 4.29 สรุปสมการความสัมพันธ์ ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล กับ สัดส่วนของ DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต

4.5.2 ผลสรุปการทดลองสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลลอ

สำหรับการทดลองในส่วนของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลลอ ซึ่งได้ดำเนินการทดลองผ่านขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงาน และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การทนต่อความร้อน แรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งของชิ้นงานแล้ว ผลที่ได้ทั้งหมด สามารถนำมาสรุปเป็นตารางสรุปผลค่าเฉลี่ย ของคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล สำหรับส่วนผสมระหว่าง DOP และซีรีคอลลอ ดังแสดงในตารางที่ 4.30

4.5.3 ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพลาสติกพีวีซี

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของพลาสติกที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2 จะได้ผลสรุปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.28 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ของสัปดาห์ผสมระหว่าง DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

คุณสมบัติ	แคลเซียมคาร์บอเนต (phr.)															
	0				35				70				100			
	DOP (phr.)				DOP (phr.)				DOP (phr.)				DOP (phr.)			
	30	50	70	90	30	50	70	90	30	50	70	90	30	50	70	90
ความถ่วงจำเพาะ	1.33	1.27	1.25	1.20	1.45	1.46	1.36	1.31	1.57	1.52	1.46	1.40	1.66	1.59	1.53	1.48
แรงดึงที่จุดขาด (กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร)	312	208	161	119	256	179	139	102	201	152	120	90	174	130	104	85
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (เปอร์เซ็นต์)	222	265	293	276	157	228	251	235	122	188	228	197	93	163	211	200
โมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร)	219	105	72	57	221	111	71	53	193	116	73	57	178	110	73	61
ความแข็ง (ชอร์ A)	93.8	84.5	72.4	61.3	95.9	87.2	75.5	65.6	97.0	90.2	78.9	68.9	96.8	91.7	80.8	73.0

ตารางที่ 4.29 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล กับ สัดส่วนของ DOP และ แคลเซียมคาร์บอเนต

y	หน่วย	สมการความสัมพันธ์	R ²
1. ความถ่วงจำเพาะ	-	$y = 1.3937 - 0.0022x_1 + 0.0046x_2 - 0.00001x_2^2 - 0.0000089x_1x_2$	0.9831
2. แรงดึงที่จุดขาด	กก./ตร.ซม.	$y = 456.8505 - 5.8298x_1 - 2.0103x_2 + 0.0227x_1^2 + 0.0021x_2^2 + 0.0171x_1x_2$	0.9879
3. เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์	$y = 50.2450 + 7.0273x_1 - 2.0052x_2 + 0.0508x_1^2 + 0.0055x_2^2 + 0.0081x_1x_2$	0.9693
4. 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$y = 429.1172 - 8.5370x_1 - 0.5121x_2 + 0.0483x_1^2 + 0.0072x_1x_2$	0.9810
5. ความแข็ง	ชอร์ A	$y = 107.0239 - 0.3865x_1 - 0.0014x_1^2 - 0.0013x_1x_2$	0.9935

หมายเหตุ x_1 = ปริมาณของ DOP

x_2 = ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.30 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ของสัดส่วนผสมระหว่าง DOP และ ซีรีคลด

DOP (phr.)	ซีรีคลด (phr.)	ความถ่วงจำเพาะ	การทนความร้อน (นาทื)	แรงดึงที่จุดขาด (กก./ตร.ซม.)	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (เปอร์เซ็นต์)	100 % โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	ความแข็ง (ชอร์ A)
72.07	0	1.4424	177.50	118.91	228.00	70.88	77.75
67.07	5	1.4442	162.50	124.65	229.30	70.22	79.85
62.07	10	1.4622	140.00	131.41	235.60	75.35	80.75
57.07	15	1.4650	117.50	135.28	243.63	80.39	82.20
52.07	20	1.4728	112.50	146.71	246.30	84.91	83.25
47.07	25	1.4893	101.00	149.97	251.30	88.89	84.35
42.07	30	1.4948	82.50	151.63	230.80	91.56	85.95
37.07	35	1.5134	69.00	161.29	228.20	97.20	86.55
32.07	40	1.5157	66.50	168.30	219.43	103.10	86.90
27.07	45	1.5177	62.50	172.19	209.13	106.49	87.55

ตารางที่ 4.31 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพลาสติกพีวีซี

ลำดับที่	x		y		ประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบ เส้นตรง		ประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบ พหุนามเมื่อยกกำลัง 2	
	คุณสมบัติ	หน่วย	คุณสมบัติ	หน่วย	สมการ	R ²	สมการ	R ²
1	ความถ่วงจำเพาะ	-	แรงดึงที่จุดขาด	กก./ตร.ซม.	-	-	-	-
2	ความถ่วงจำเพาะ	-	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์	$y = -358.49x + 719.59$	0.7544	$y = -421.55x^2 + 840.36x - 125.76$	0.7720
3	ความถ่วงจำเพาะ	-	100% โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$y = 163.75x - 123.2$	0.1344	$y = 267.5x^2 - 597x - 413.23$	0.1405
4	ความถ่วงจำเพาะ	-	ความแข็ง	ชอร์ A	$y = 57.829x - 0.4735$	0.4297	$y = 15.452x^2 + 13.884x + 30.514$	0.4302
5	แรงดึงที่จุดขาด	กก./ตร.ซม.	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์	-	-	-	-
6	แรงดึงที่จุดขาด	กก./ตร.ซม.	100% โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$y = 0.8296x - 20.736$	0.7619	$y = -0.0005x^2 + 1.0273x - 36.994$	0.7634
7	แรงดึงที่จุดขาด	กก./ตร.ซม.	ความแข็ง	ชอร์ A	$y = 0.1285x + 61.741$	0.4683	$y = -0.0007x^2 + 0.3952x + 39.812$	0.5406
8	ความแข็ง	ชอร์ A	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์	$y = -3.2312x + 473.07$	0.4770	$y = -0.1543x^2 + 21.694x - 513.39$	0.5791
9	ความแข็ง	ชอร์ A	100% โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$y = 4.3878x - 249.58$	0.7513	$y = 0.1801x^2 - 24.709x + 901.95$	0.8701
10	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์	100% โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$y = -0.6515x + 245.98$	0.3626	$y = 0.002x^2 - 1.4262x + 316.01$	0.3769