

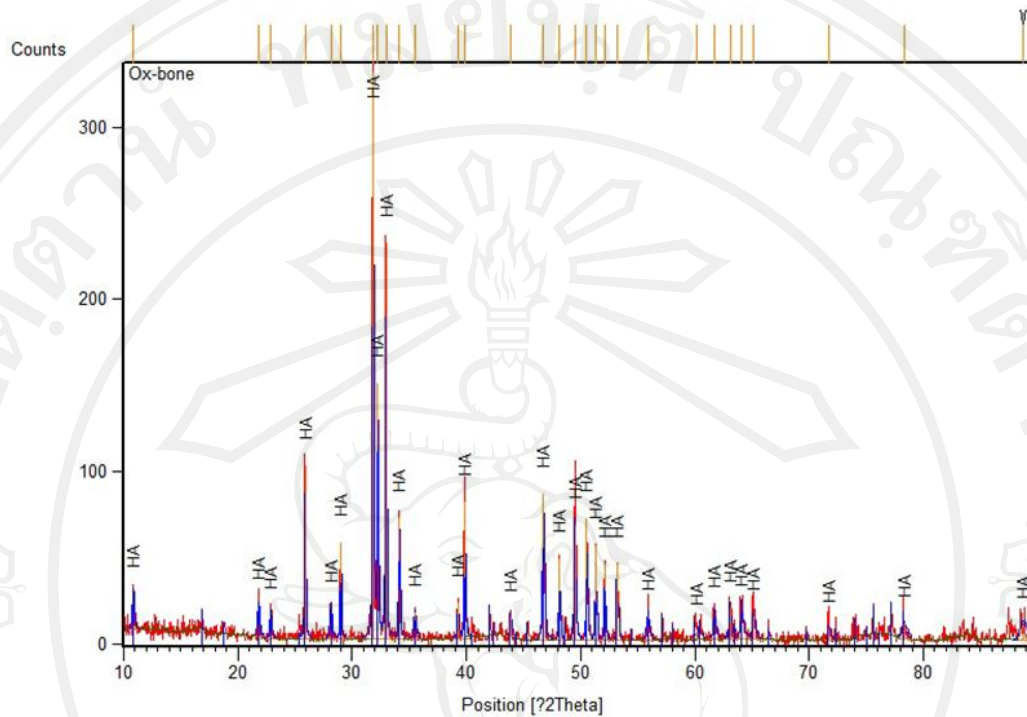
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาวิจัย

เมื่อดำเนินการวิจัยตามบทที่ 3 เพื่อหาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการเทหล่อขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส-พอลิเมทิลเมทาไครเลตโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบการทดลอง ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคืออัตราส่วนผสมระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส-พอลิเมทิลเมทาไครเลต ระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปชิ้นงาน (Polymerization) โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการเทหล่อไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลคือค่าการกดอัด ค่าการดึง และ ค่าความพรุนของชิ้นงาน ในบทนี้แสดงผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง และรูปแบบสมการพีชคณิตที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล

#### 4.1 ผลการทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

ผงกระดูกวัวที่สังเคราะห์ได้นำมาวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกระดูกวัวที่สังเคราะห์ได้มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูลหมายเลข 9-432 (JCPDS-IDCC, 2000) สามารถยืนยันได้ว่ากระดูกวัวที่สังเคราะห์ได้เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

#### 4.2 ผลการทดลองจากการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

เนื่องจกงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทำงานเพือหาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการเทหล่อ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่หนึ่งหาส่วนผสมของกระดูกเทียมที่เหมาะสม และขั้นตอนที่สอง หาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียม จากส่วนผสมที่หาได้จากขั้นตอนที่หนึ่ง ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุน โดยในขั้นตอนแรกใช้เทคนิคการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกระดูกเทียม เมื่อได้ส่วนผสมที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุนแล้ว ในขั้นตอนที่สองใช้เทคนิคแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ในการหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาสำหรับการขึ้นรูปกระดูกเทียม ซึ่งการกำหนดระดับของปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ทั้งนี้ผู้วิจัยขอเน่าตารางดังกล่าวมาอ้างอิงอีกครั้งเพือให้เป็นที่เข้าใจ โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัย และสัญลักษณ์สำหรับการทดลอง

ปัจจัย (หน่วย)	ระดับขอบเขตของปัจจัย		สัญลักษณ์
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
1. อัตราส่วนผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว (%w/w)	10	55	(HA)
2. อัตราส่วนผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (%w/w)	40	80	(CMC)
3. อัตราส่วนผสมพอลิเมทิลเมทาไครเลต (%w/w)	5	10	(PMMA)
4. อุณหภูมิในการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส)	70	100	(Temp)
5. ระยะเวลาในการขึ้นรูป (นาที)	20	45	(Time)

#### 4.2.1 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกระดูกเทียม ด้วยเทคนิคการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)

เมื่อได้ดำเนินการขึ้นรูปและทดสอบชิ้นงานตามการทดลองจากบทที่ 3 ในอัตราส่วนของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพอลิเมทิลเมทาไครเลตที่แตกต่างกัน โดยผลตอบของการทดลองคือ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงกด และค่าความพรุนของชิ้นงาน ตารางที่ 4.2 แสดงผลที่ได้จากการทดลอง ในการวัดค่าแรงดึงและแรงกดอัดโดยใช้เครื่อง Universal Tester สำหรับการหาค่าความพรุนโดยใช้เครื่อง Mettler Toledo Density Kit สำหรับข้อมูลดิบก่อนการนำมาคำนวณหาค่าการดึง ค่าการกดอัด และค่าความพรุน แสดงผลตามตาราง ข1 ข2 และ ข3 ตามลำดับในภาคผนวก ข

ตาราง 4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

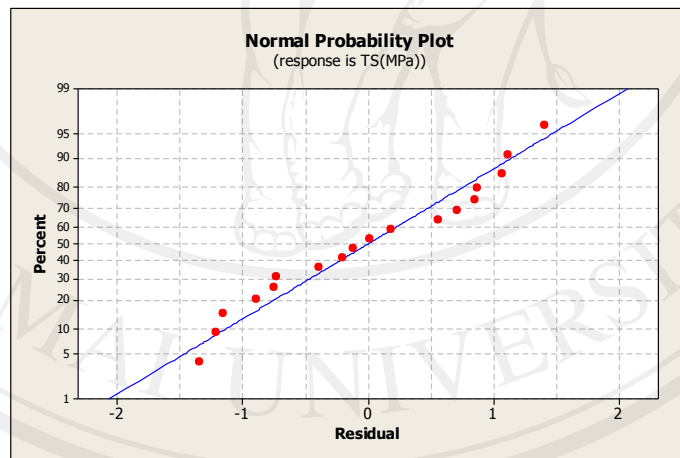
ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย			ผลตอบ		
	ไฮดรอกซีอะ พาไทต์ (%W/W)	พอลิเมทิลเม ทาโครเลต (%W/W)	คาร์บอกซี เมทิล เซลลูโลส (%W/W)	ค่าการดึง (MPa)	ค่าการกดอัด (MPa)	ความพรุน ปรากฏ (%)
1	32.50	60.00	7.50	17.41	56.06	6.0356
2	15.00	80.00	5.00	22.24	72.69	3.3019
3	21.25	70.00	8.75	17.84	55.43	6.6855
4	23.75	70.00	6.25	20.66	56.85	4.1052
5	55.00	40.00	5.00	11.85	71.14	5.5444
6	50.00	40.00	10.00	9.66	43.30	13.7366
7	23.75	70.00	6.25	20.11	55.38	5.5184
8	41.25	50.00	8.75	13.85	45.99	11.4811
9	15.00	80.00	5.00	21.32	72.97	3.3079
10	32.50	60.00	7.50	16.55	55.19	5.4019
11	41.25	50.00	8.75	12.80	44.49	10.5156
12	10.00	80.00	10.00	22.59	42.45	3.1407
13	50.00	40.00	10.00	8.20	41.23	13.7347
14	10.00	80.00	10.00	19.97	45.50	2.7703
15	43.75	50.00	6.25	12.46	60.86	6.0326
16	55.00	40.00	5.00	10.40	70.08	5.4812
17	43.75	50.00	6.25	12.91	62.50	5.8540
18	21.25	70.00	8.75	18.88	56.90	6.6538

วิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมของกระดูกเทียม โดยนำผลตอบที่ได้  
จากการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16

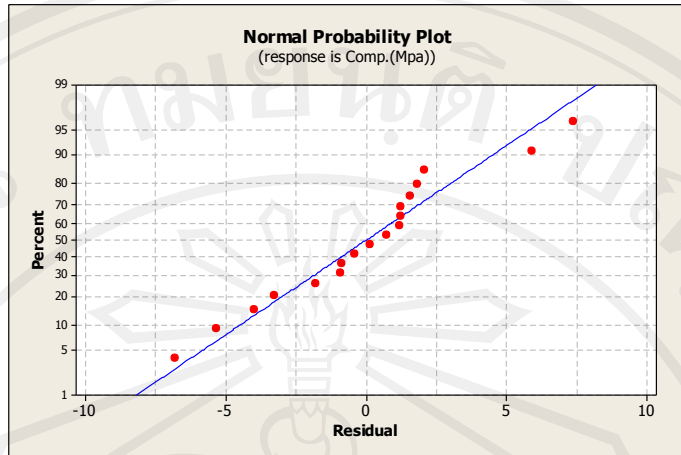
#### 4.2.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผล หลังจากนั้นทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) โดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

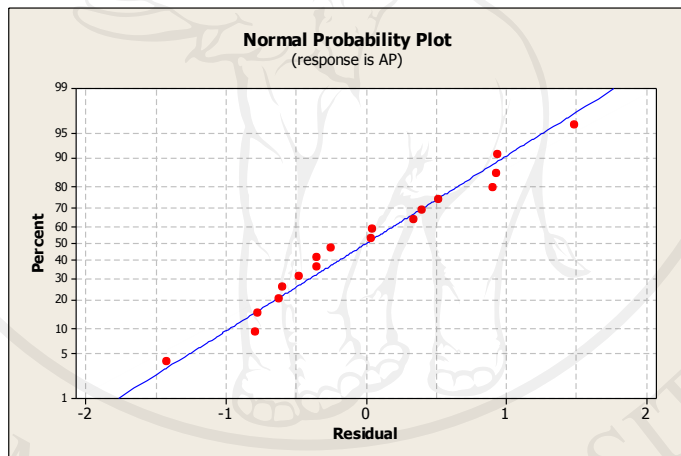
1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ โดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of the Residuals) จากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน การกดอัดของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงานตามลำดับ พบว่าผลที่ได้จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของทั้งสามผลตอบมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใดๆ ออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน สรุปได้ว่าการกระจายส่วนตกค้างของข้อมูลมีแนวโน้มของการกระจายตัวเป็นแบบปกติ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน

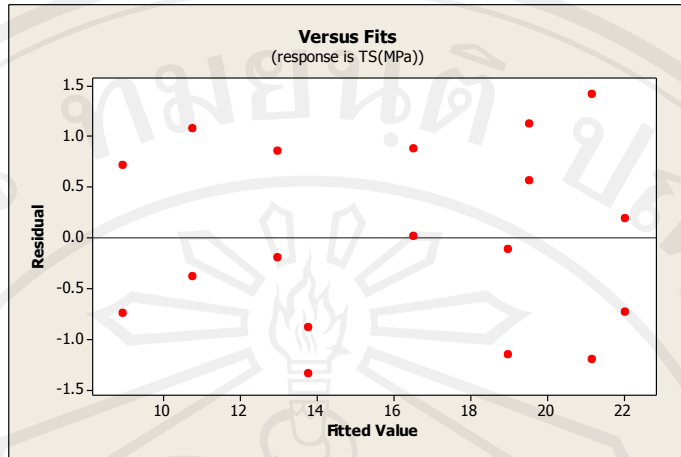


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน

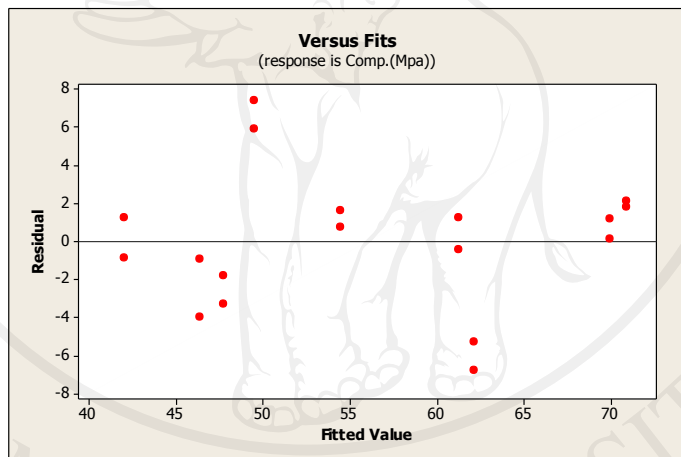


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

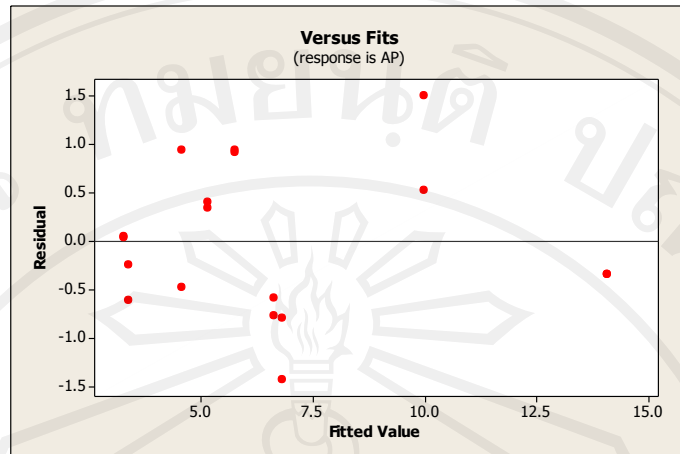
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึง การกดอัด และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ตามลำดับพบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองค่าความแข็งแรงต่อการดึง กดอัด และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ไม่เปลี่ยนแปลงตามลำดับของปัจจัย หรือขึ้นอยู่กับค่าพยากรณ์ของผลตอบ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน

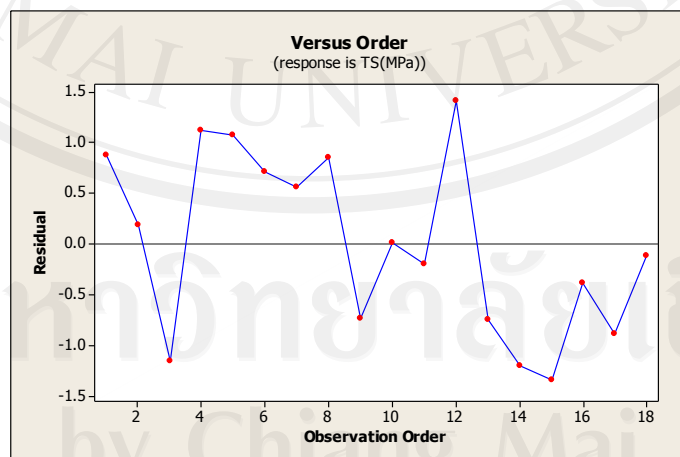


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน



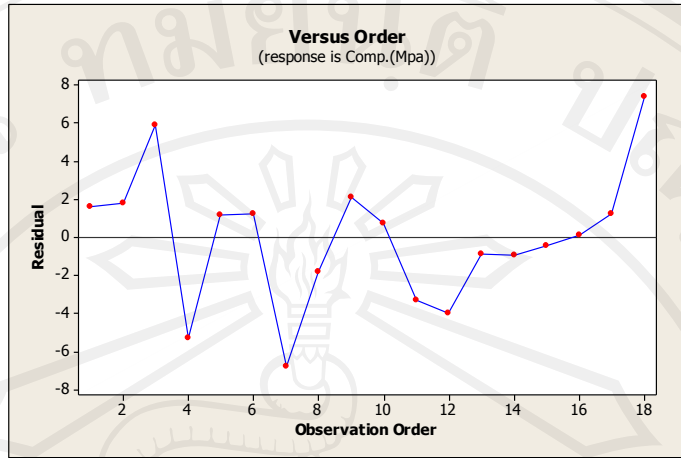
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

3. การตรวจสอบส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอิสระ (Independence Assumption) โดยดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ด้วยแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) จากรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน การกดอัดของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ตามลำดับ จากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residual Versus the Observation Order of the Data) พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีแนวโน้มใดๆ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ไม่ขึ้นกับลำดับการทดลอง

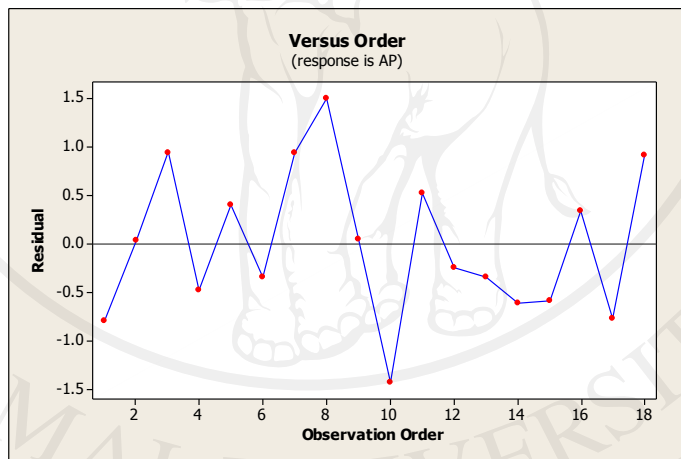


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน





รูปที่ 4.9 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

จากการทดสอบทั้ง 3 ข้อสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนคงที่ และมีการกระจายตัวอิสระ

#### 4.2.1.2 การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่ามีความเหมาะสมแล้ว ทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่า  $R^2$  (R-Square) ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายว่า

สมการถดถอยที่ใช้ประมาณค่ามีความสามารถในการอธิบายความผันผวน (Variation) ของตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด หรือตัวแปรอิสระในแบบจำลอง สามารถอธิบายตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด ค่า  $R^2$  มีค่าตั้งแต่ 0 - 1 หรือ 0 - 100% หากค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการที่ได้มีประสิทธิภาพสูง ถ้าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า มีประสิทธิภาพต่ำ ในการศึกษาความสัมพันธ์ต้องการให้ค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี

ซึ่งจากตารางการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบของค่าการดึง การกดอัด และเปอร์เซ็นต์ความพูนปรากฏของชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ค่า R-Square ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 96.34 89.31 และ 95.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และแบบจำลองมีความเหมาะสมสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลตอบได้ต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการดึงของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
HA	-4.01	6.055	*	*
PMMA	25.91	2.974	*	*
CMC	-1.23	25.760	*	*
HA*PMMA	20.90	15.060	1.39	0.189
HA*CMC	-69.40	72.298	-0.96	0.355
R-Sq = 96.34%		R-Sq (adj) = 95.21%		

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
HA	123.0	24.01	*	*
PMMA	103.0	11.79	*	*
CMC	-416.8	102.13	*	*
HA*PMMA	-69.7	59.71	-1.17	0.264
HA*CMC	-100.4	286.62	-0.35	0.732
R-Sq = 89.31%		R-Sq (adj) = 86.02%		

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของ  
ชั้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
HA	-13.59	5.195	*	*
PMMA	4.17	2.551	*	*
CMC	-31.47	22.101	*	*
HA*PMMA	2.05	12.921	0.16	0.876
HA*CMC	438.96	62.029	7.08	0.000
R-Sq = 95.11%		R-Sq (adj) = 93.61%		

#### 4.2.1.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance)

วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยการพิจารณาจากค่าพี (P-Value) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือค่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ถ้าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือยอมรับ  $H_0$  กล่าวคือ ผลกระทบดังกล่าวมีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าหากปัจจัยไม่มีนัยสำคัญต่อผลตอบมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือยอมรับ  $H_1$  กล่าวคือ ผลกระทบดังกล่าวไม่มีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) มีค่าเป็น \* เนื่องจากมีการกำหนดขอบเขตของระดับของปัจจัย และอัตราส่วนผสม เมื่อลดอัตราส่วนของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งอัตราส่วนที่เหลือทั้งสองจะต้องเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากเพิ่มอัตราส่วนของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งอัตราส่วนที่เหลือทั้งสองจะต้องลดลง ทำให้ไม่สามารถประมาณค่า P-Value ได้ แต่ทั้งปัจจัยของ HA PMMA และ CMC มีผลต่อค่าการดึงของชั้นงาน ส่วนผลกระทบของอันตรกิริยา (Interaction Term) ไม่มีผลกระทบต่อค่าการดึงของชั้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.6) พบว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เนื่องจาก P-Value ของเทอม Linear มีค่าเท่ากับ 0.001 ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Linear Model

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 พบว่าผลกระทบของปัจจัย Main Effects มีค่าเป็น \* ด้วยเหตุผลเช่นเดียวดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปัจจัยของ HA PMMA และ CMC มีผลต่อค่าการกดอัดของชั้นงาน ส่วนผลกระทบของอันตรกิริยา (Interaction Term) ไม่มีผลกระทบต่อค่าการกด

อัตราของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.7) พบว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เนื่องจาก P-Value ของเทอม Linear มีค่าเท่ากับ 0.000 ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Linear Model

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 พบว่าผลกระทบของปัจจัย Main Effects มีค่าเป็น \* ด้วยเหตุผลเช่นเดียวครั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปัจจัยของ HA PMMA และ CMC มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ส่วนผลกระทบของอันตรกิริยา (Interaction Term) คือ HA\*CMC เปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงานเช่นกัน เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.8) พบว่า P-Value ของเทอม Interaction มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Quadratic Model

ตาราง 4.6 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการดึงของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	4	351.976	351.9759	87.9940	85.44	0.000
Linear	2	349.627	28.9545	14.4773	14.06	0.001
Quadratic	2	2.349	2.3492	1.1746	1.14	0.350
HA*PMMA	1	1.400	1.9827	1.9827	1.93	0.189
HA*CMC	1	0.949	0.9489	0.9489	0.92	0.355
Residual Error	13	13.388	13.3880	1.0298		
Lack-of-Fit	4	5.693	5.6932	1.4233	1.67	0.241
Pure Error	9	7.695	7.6948	0.8550		
Total	17	365.394				

ตาราง 4.7 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกอดอัดของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	4	1758.10	1758.096	439.524	27.16	0.000
Linear	2	1728.05	580.175	290.088	17.92	0.000
Quadratic	2	30.05	30.049	15.025	0.93	0.420
HA*PMMA	1	28.06	22.036	22.036	1.36	0.264
HA*CMC	1	1.99	1.985	1.985	0.12	0.732
Residual Error	13	210.41	210.414	16.186		
Lack-of-Fit	4	198.04	198.036	49.509	36.00	0.000
Pure Error	9	12.38	12.378	1.375		
Total	17	1968.51				

ตาราง 4.8 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	4	191.875	191.8745	47.9686	63.28	0.000
Linear	2	150.171	8.9966	4.4983	5.93	0.015
Quadratic	2	41.704	41.7038	20.8519	27.51	0.0002
HA*PMMA	1	3.739	0.0191	0.0191	0.03	0.876
HA*CMC	1	37.964	37.9644	37.9644	50.08	0.000
Residual Error	13	9.855	9.8548	0.7581		
Lack-of-Fit	4	8.102	8.1023	2.0256	10.40	0.002
Pure Error	9	1.753	1.7525	0.1947		
Total	17	201.729				

#### 4.2.1.4 การสร้างสมการทำนาย

เนื่องจากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ผู้วิจัยต้องการให้วัสดุทดแทนกระดูกมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จึงพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติเชิงกลในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการขึ้นรูป โดยไม่พิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีผลต่อผลตอบ มาทำการเขียนสมการสำหรับทำนายค่าผลตอบ โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากโปรแกรมเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส (Coded Units) ได้สมการทำนายดังนี้

สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Tensile Strength} = -4.01\text{HA} + 25.91\text{PMMA} - 1.23\text{CMC} \quad (4.1)$$

สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.2

$$\text{Tensile Strength} = -4.00440\text{HA} + 25.9070\text{PMMA} - 1.22782\text{CMC} \quad (4.2)$$

สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.3

$$\text{Compressive Strength} = 123.0\text{HA} + 103.0\text{PMMA} - 416.8\text{CMC} \quad (4.3)$$

สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.4

$$\text{Compressive Strength} = 123.038\text{HA} + 102.963\text{PMMA} - 416.821 \text{ CMC} \quad (4.4)$$

สมการทำนายของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน (Appearance Porosity) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.5

$$\text{Appearance Porosity} = -13.59 \text{ HA} + 4.17 \text{ PMMA} - 31.47 \text{ CMC} + 438.96 \text{ HA} * \text{CMC} \quad (4.5)$$

สมการทำนายของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน (Appearance Porosity) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.6

$$\text{Appearance Porosity} = -13.5942 \text{ HA} + 4.17383 \text{ PMMA} - 31.4657 \text{ CMC} + 438.964 \text{ HA} * \text{CMC} \quad (4.6)$$

#### 4.2.1.5 การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ

เมื่อได้สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) และค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) นำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในโปรแกรม Minitab 16 ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลองที่ศึกษานี้ โดยการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 - 1.0 ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด และในขณะเดียวกันผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะได้ค่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อผลตอบ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าที่สูงที่สุด (Maximum) เนื่องจากต้องการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย เพื่อให้ได้การดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงานสูงที่สุด โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน

<b>Response Optimization</b>						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
TS(MPa)	Maximum	8.20	22.59	22.59	1	1
Comp.(Mpa)	Maximum	41.23	72.97	72.97	1	1
<b>Global Solution</b>						
Components						
HA = 0.15						
PMMA = 0.8						
CMC = 0.05						
<b>Predicted Responses</b>						
Tensile Strength (MPa) = 22.0497 , Desirability = 0.96245						
Compressive Strength (Mpa) = 70.8723 , Desirability = 0.93391						
Composite Desirability = 0.94808						

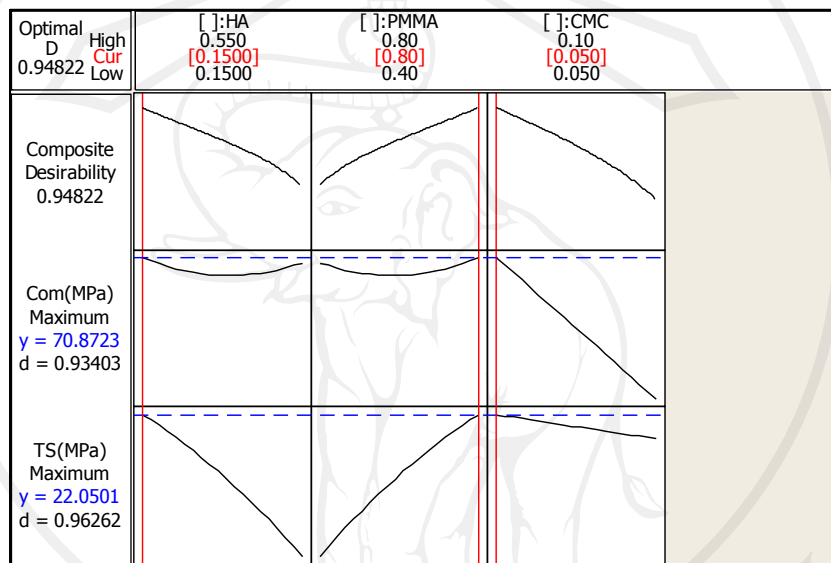
จากตารางที่ 4.9 ผู้วิจัยได้กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบที่ค่าระดับต่ำกว่า (Lower) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 8.200 และ 41.23 MPa ตามลำดับ เนื่องจากเป็นค่าผลตอบต่ำที่สุดที่ได้จากการทดลอง และค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 22.59 และ 72.97 MPa ตามลำดับ โดยค่าระดับสูง (Upper) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 22.59 และ 72.97 MPa ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งผู้วิจัยไม่นำผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏมาคิดรวมเนื่องจากต้องการให้กระดูกเทียมมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และเนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ซึ่งจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์และคาร์บอนซีเมนต์ซิลิเกต ทำให้ค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาไครเลต ทำให้ค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยอัตราส่วนผสมระหว่างไฮดรอก



ซีอะพาไทต์ พอลิเมทิลเมทาไครเลต คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานคือ 0.15 0.8 และ 0.05 ตามลำดับ

โดยมีค่าทำนายของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Predicted Responses) คือ Tensile Strength มีค่าเท่ากับ 22.0497 MPa และ Compressive Strength มีค่าเท่ากับ 70.8723 MPa ที่ค่าความพึงพอใจเท่ากับ (Desirability) 0.96245 และ 0.93391 ตามลำดับ ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.94808 แสดงตามรูป 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

ในขั้นตอนแรกเมื่อได้อัตราส่วนผสมของกระดูกเทียม ที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุน คือไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว 15% คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส 5% และพอลิเมทิลเมทาไครเลต 80% ที่หาได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ในขั้นตอนต่อไปเป็นการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียม จากส่วนผสมที่ได้ในขั้นตอนนี้

#### 4.2.2 ผลการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียมด้วยเทคนิคการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

ในขั้นตอนนี้ดำเนินการขึ้นรูปและทดสอบชิ้นงานเช่นเดียวกับขั้นตอนแรก โดยนำส่วนผสมที่ดีที่สุดจากขั้นตอนแรกมาทำการทดลองต่อ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป โดยผลตอบของการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนแรก คือ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงกด และค่าความพรุนของชิ้นงาน ดังตารางที่ 4.10 แสดงผลที่ได้จากการทดลอง และสำหรับข้อมูลดิบก่อนการนำมาคำนวณหาค่าการดึง ค่าการกดอัด และค่าความพรุนแสดงผลตามตาราง ค1 ค2 และ ค3 ตามลำดับ แสดงในภาคผนวก ค

ตาราง 4.10 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		ผลตอบ		
	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการดึง (MPa)	ค่าการกดอัด (MPa)	ความพรุนปรากฏ (%)
1	41	74	22.65	57.60	4.6322
2	41	96	30.49	65.95	5.2231
3	33	85	27.21	65.65	4.8915
4	24	96	30.50	74.02	5.2242
5	20	85	29.80	58.07	4.8915
6	33	85	29.59	63.12	4.9394
7	33	85	28.13	65.30	4.8653
8	33	85	30.96	62.38	4.9491
9	45	85	29.16	66.11	4.8437
10	24	74	21.99	32.43	4.5172
11	33	100	32.97	71.80	5.3708
12	33	85	29.06	61.52	4.8899
13	33	70	20.21	40.64	4.4662
14	41	74	22.03	56.54	4.6113
15	41	96	30.90	64.83	5.1077
16	33	85	28.70	64.80	4.8511

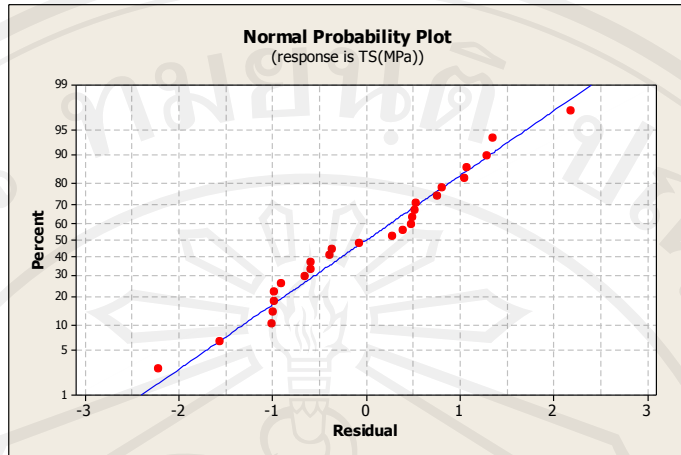
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		ผลตอบ		
	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการดึง (MPa)	ค่าการกดอัด (MPa)	ความพรุนปรากฏ (%)
17	24	96	33.22	75.39	5.1864
18	20	85	30.33	56.07	4.8812
19	33	85	27.77	64.10	4.8965
20	33	85	27.79	65.80	4.8852
21	33	85	30.13	63.51	4.9739
22	45	85	29.45	66.68	4.8815
23	24	74	21.68	32.05	4.5127
24	33	100	33.73	72.39	5.3589
25	33	85	28.38	61.40	4.8926
26	33	70	20.89	40.15	4.4153

วิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เช่นเดียวกันกับขั้นตอนแรก (4.2.1) โดยนำผลตอบที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16

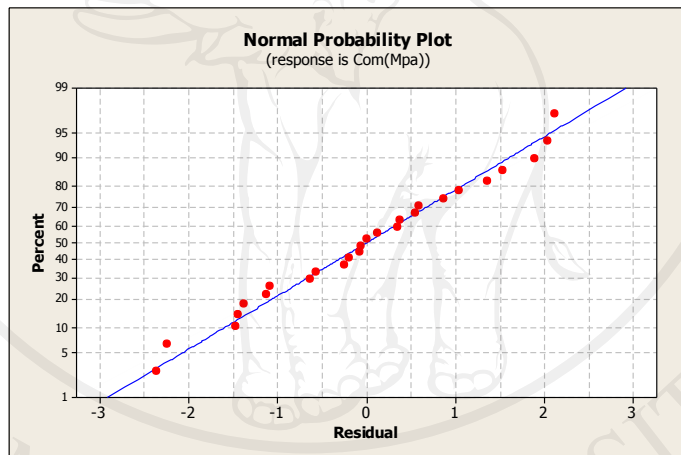
#### 4.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

โดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

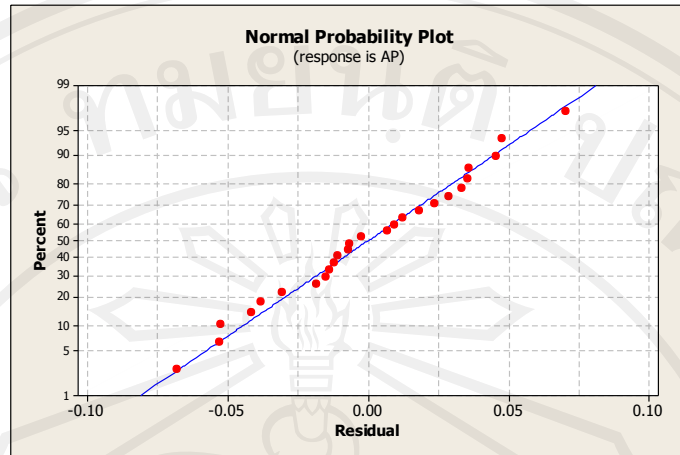
1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองว่ามีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ จากรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ตามลำดับ พบว่าผลที่ได้จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใดๆ ออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน สรุปได้ว่าการกระจายส่วนตกค้างของข้อมูลมีแนวโน้มของการกระจายตัวเป็นแบบปกติ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน

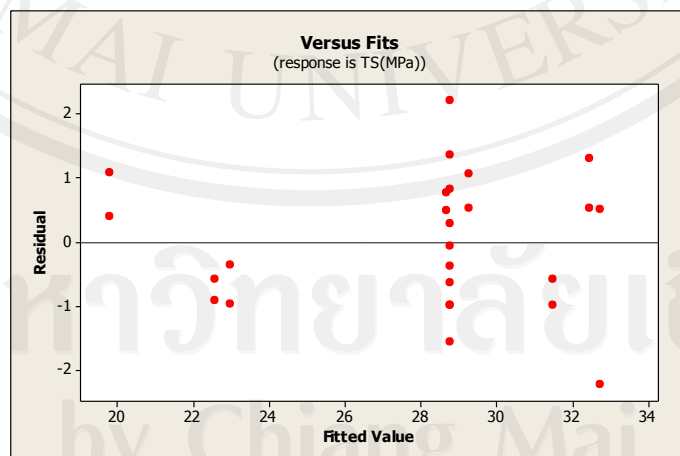


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน

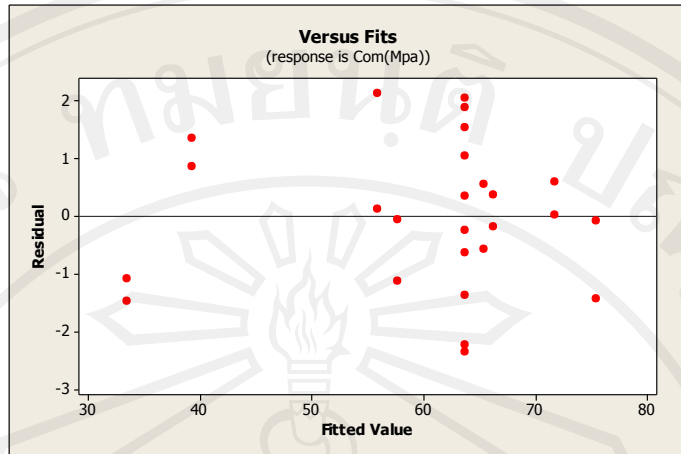


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบของเปอร์เซ็นต์ความ  
พรุนปรากฏของชิ้นงาน

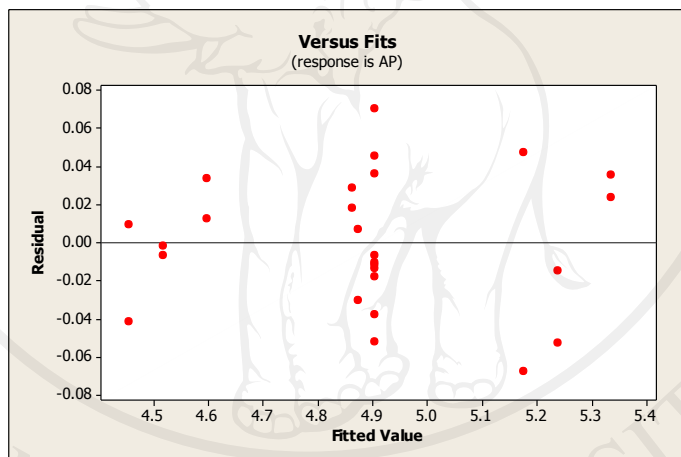
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) ของข้อมูล จากรูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึง ค่าการกดอัด และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ตามลำดับ พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองค่าความแข็งแรงต่อการดึงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ไม่เปลี่ยนแปลงตามลำดับของปัจจัย หรือขึ้นอยู่กับค่าพยากรณ์ของผลตอบ



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน

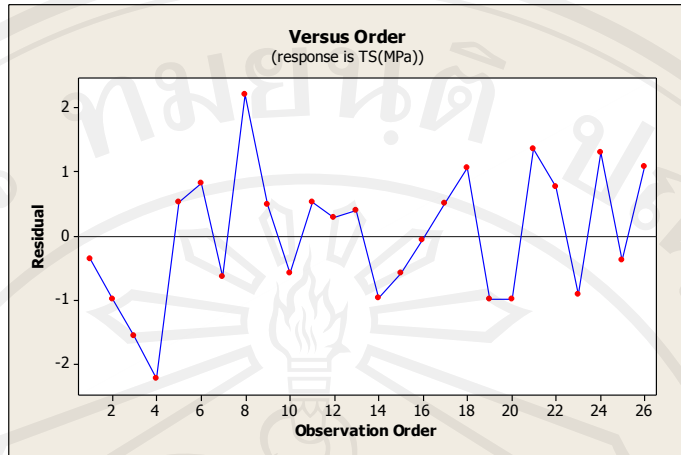


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน

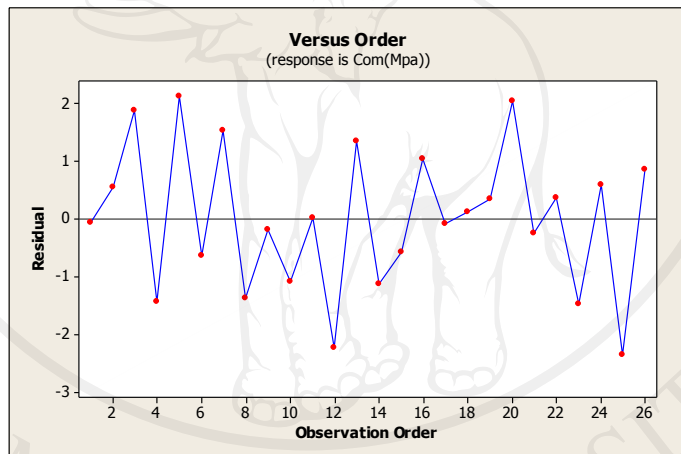


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

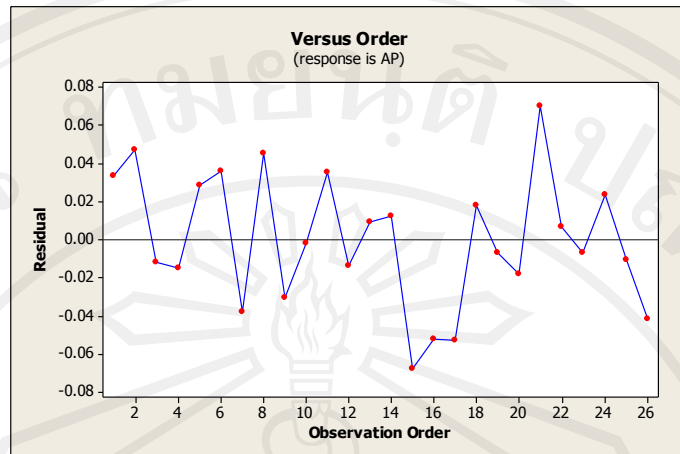
3. การตรวจสอบส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอิสระ (Independence Assumption) โดยคุณลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน ตามลำดับ จากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residual Versus the Observation Order of the Data) พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีแนวโน้มใดๆ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันไม่ขึ้นกับลำดับการทดลอง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน

จากการทดสอบทั้ง 3 ข้อสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนคงที่ และมีการกระจายตัวอิสระ

#### 4.2.2.2 การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่ามีความเหมาะสมแล้ว ทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่า  $R^2$  (R-Square)

ซึ่งจากตารางการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบของค่าการดึง การกดอัด และ เปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ ค่า R-Square ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 93.14 98.73 และ 98.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และแบบจำลองมีความเหมาะสมสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลตอบได้ต่อไป



ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการดึงของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	28.7820	0.3658	78.690	0.000
Time	-0.2991	0.4157	-0.719	0.480
Temp	6.3480	0.4007	15.843	0.000
Time*Time	0.1942	0.6300	0.308	0.761
Temp*Temp	-2.6449	0.6082	-4.349	0.000
Time*Temp	-0.8271	0.8172	-1.012	0.324
R-Sq = 93.14%		R-Sq (adj) = 91.42%		

ตาราง 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	63.554	0.4437	143.226	0.000
Time	5.178	0.5043	10.268	0.000
Temp	16.938	0.4861	34.845	0.000
Time*Time	-2.430	0.7642	-3.180	0.005
Temp*Temp	-8.221	0.7378	-11.142	0.000
Time*Temp	-17.153	0.9914	-17.301	0.000
R-Sq = 98.84%		R-Sq (adj) = 98.55%		

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของ  
ชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	4.90328	0.01236	396.866	0.000
Time	0.00578	0.01404	0.411	0.685
Temp	0.44199	0.01353	32.657	0.000
Time*Time	-0.03471	0.02128	-1.631	0.119
Temp*Temp	-0.00748	0.02054	-0.364	0.720
Time*Temp	-0.07168	0.02760	-2.597	0.017
R-Sq = 98.17%		R-Sq (adj) = 97.71%		

#### 4.2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance)

จากข้อมูลในตารางที่ 4.11 พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) ของอุณหภูมิ และผลกระทบของเทอมกำลังสอง (Square Term) คือ Temp\*Temp มีผลต่อค่าการดึงของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนปัจจัยอื่นไม่มีผลกระทบต่อค่าการดึงของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.14) พบว่า P-Value ของเทอม Square มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Quadratic Model

จากข้อมูลในตารางที่ 4.12 พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) คือเวลา และอุณหภูมิ ผลกระทบของเทอมกำลังสอง (Square Term) คือ Time\*Time และ Temp\*Temp และผลกระทบของอันตรกิริยา (Interaction Term) คือ Time\*Temp มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.15) พบว่า P-Value ของเทอม Square และ Interaction มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Quadratic Model

จากข้อมูลในตารางที่ 4.13 พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) ของอุณหภูมิ และผลกระทบของอันตรกิริยา (Interaction Term) คือ Time\*Temp มีผลต่อของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนปัจจัยอื่นไม่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (จากตารางที่ 4.16) พบว่า P-Value ของเทอม Interaction มีค่าน้อยกว่า

0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ ดังนั้นจึงมีรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยเป็นแบบ Quadratic Model

ตาราง 4.14 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการดึงของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	5	361.148	361.148	72.230	54.28	0.000
Linear	2	333.552	334.723	167.361	125.76	0.000
Time	1	0.679	0.689	0.689	0.52	0.480
Temp	1	332.873	334.034	334.034	251.01	0.000
Square	2	26.233	26.233	13.117	9.86	0.001
Time*Time	1	1.065	0.126	0.126	0.09	0.761
Temp*Temp	1	25.168	25.168	25.168	18.91	0.000
Interaction	1	1.363	1.363	1.363	1.02	0.324
Time*Temp	1	1.363	1.363	1.363	1.02	0.324
Residual Error	20	26.616	26.616	1.331		
Lack-of-Fit	3	9.530	9.530	3.177	3.16	0.052
Pure Error	17	17.085	17.085	1.005		
Total	25	387.764				

ตาราง 4.15 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	5	3337.44	3337.44	667.49	340.80	0.000
Linear	2	2502.28	2584.63	1292.32	659.81	0.000
Time	1	212.52	206.49	206.49	105.43	0.000
Temp	1	2289.76	2378.14	2378.14	1214.20	0.000
Square	2	248.89	248.89	124.44	63.54	0.000
Time*Time	1	5.75	19.80	19.80	10.11	0.005
Temp*Temp	1	243.14	243.14	243.14	124.14	0.000
Interaction	1	586.26	586.26	586.26	299.33	0.000
Time*Temp	1	586.26	586.26	586.26	299.33	0.000
Residual Error	20	39.17	39.17	1.96		
Lack-of-Fit	3	10.31	10.31	3.44	2.02	0.149
Pure Error	17	28.87	28.87	1.70		
Total	25	3376.61				

ตาราง 4.16 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของเปอร์เซ็นต์ความพรุน  
ปรากฏของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	5	1.62643	1.62643	0.32529	214.23	0.000
Linear	2	1.61211	1.61966	0.80983	533.34	0.000
Time	1	0.00033	0.00026	0.00026	0.17	0.685
Temp	1	1.61178	1.61940	1.61940	1066.51	0.000
Square	2	0.00407	0.00407	0.00204	1.34	0.284
Time*Time	1	0.00387	0.00404	0.00404	2.66	0.119
Temp*Temp	1	0.00020	0.00020	0.00020	0.13	0.720
Interaction	1	0.01024	0.01024	0.01024	6.74	0.017
Time*Temp	1	0.01024	0.01024	0.01024	6.74	0.017
Residual Error	20	0.03037	0.03037	0.00152		
Lack-of-Fit	3	0.00727	0.00727	0.00242	1.78	0.188
Pure Error	17	0.02310	0.02310	0.00136		
Total	25	1.65679				

#### 4.2.2.4 การสร้างสมการทำนาย

โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีผลต่อผลตอบ มาทำการเขียนสมการสำหรับทำนายค่าผลตอบ โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากโปรแกรมเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส (Coded Units) และตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ได้สมการทำนายดังนี้

สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.7

$$\text{Tensile Strength} = 28.7820 + 6.3480\text{Temp} - 2.6449 \text{Temp}*\text{Temp} \quad (4.7)$$

สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.8

$$\text{Tensile Strength} = -103.288 + 2.54422\text{Temp} - 0.0117236\text{Temp}*\text{Temp} \quad (4.8)$$

สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.9

$$\begin{aligned} \text{Compressive Strength} = & 63.554 + 5.178\text{Time} + 16.938\text{Temp} - 2.430\text{Time*Time} \\ & - 8.221\text{Temp*Temp} - 17.153\text{Time*Temp} \end{aligned} \quad (4.9)$$

สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.10

$$\begin{aligned} \text{Compressive Strength} = & -583.527 + 9.32940\text{Time} + 10.3811\text{Temp} - 0.0182042\text{Time*Time} \\ & - 0.0370288\text{Temp*Temp} - 0.0910609\text{Time*Temp} \end{aligned} \quad (4.10)$$

สมการทำนายของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน (Appearance Porosity) เมื่อใช้ตัวแปรถูกเข้ารหัส ดังสมการที่ 4.11

$$\text{Appearance Porosity} = 4.90328 + 0.44199\text{Temp} - 0.07168\text{Temp*Temp} \quad (4.11)$$

สมการทำนายของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน (Appearance Porosity) เมื่อใช้ตัวแปรธรรมชาติ (Uncoded Units) ดังสมการที่ 4.12

$$\text{Appearance Porosity} = 0.852626 + 0.0475445\text{Temp} - 0.000382316\text{Time*Temp} \quad (4.12)$$

#### 4.2.2.5 การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ

เมื่อได้สมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน (Tensile Strength) และค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compressive Strength) ผู้วิจัยไม่นำสมการทำนายของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงานมาพิจารณา เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนซีเมนต์เซลลูโลสที่เติมลงไปชิ้นงาน ซึ่งได้อัตราส่วนของคาร์บอนซีเมนต์เซลลูโลสที่เหมาะสมสำหรับเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏจากการทดลองแบบส่วนผสมในขั้นตอนแรก และเนื่องจากผลการทดลองดังตารางที่ 4.10 จากการทดลองแบบส่วนประสมกลางในขั้นตอนที่สอง ผลของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 4 – 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่

ในช่วงคุณสมบัติความพรุนของกระดูกชนิดเนื้อแน่น (5 – 10 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นจึงนำสมการทำนายค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงานที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยด้วยโปรแกรม Minitab 16 โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer สำหรับหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลองที่ศึกษานี้ ด้วยวิธีเช่นเดียวกับ 4.2.1.5 โดยการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ดังนี้ น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด และในขณะเดียวกันผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะได้ค่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อผลตอบ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าที่สูงที่สุด (Maximum) เนื่องจากต้องการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย เพื่อให้ได้การดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงานสูงที่สุด โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน

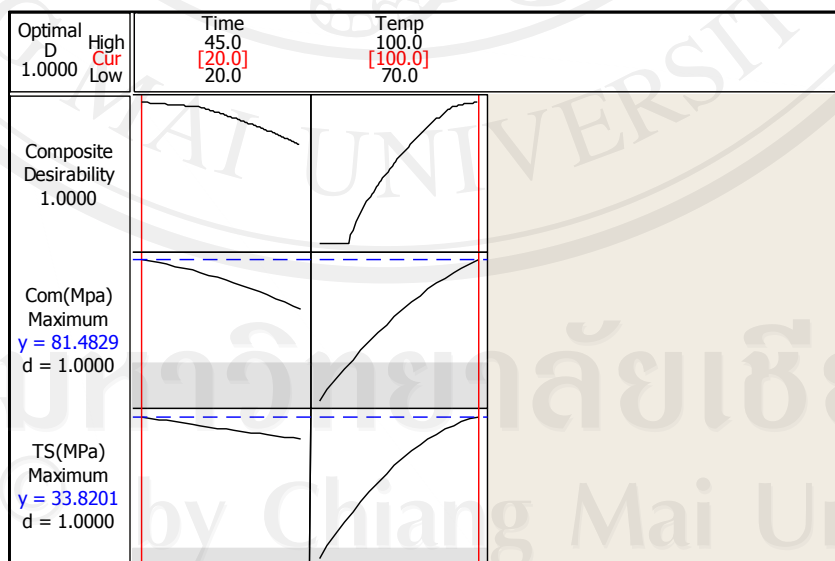
<b>Response Optimization</b>						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
TS(MPa)	Maximum	20.21	33.73	33.73	1	1
Comp.(Mpa)	Maximum	32.05	75.39	75.39	1	1
<b>Global Solution</b>						
Components						
Time = 20						
Temp = 100						
<b>Predicted Responses</b>						
Tensile Strength (MPa) = 33.8201, Desirability = 1.000000						
Compressive Strength (Mpa) = 81.4829, Desirability = 1.000000						
Composite Desirability = 1.000000						

จากตารางที่ 4.17 ผู้วิจัยได้กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบที่ค่าระดับต่ำกว่า (Lower) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 20.21 และ 32.05 MPa

ตามลำดับ เนื่องจากเป็นค่าผลตอบต่ำที่สุดที่ได้จากการทดลอง และค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 33.73 และ 75.39 MPa ตามลำดับ โดยค่าระดับสูง (Upper) ของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ 33.73 และ 75.39 MPa ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งผู้วิจัยไม่นำผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏมาคิดรวมเนื่องจากต้องการให้กระดูกเทียมมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และเนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏที่ได้อยู่ในช่วง 4 – 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงคุณสมบัติความพรุนของกระดูกชนิดเนื้อแน่น

ซึ่งจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการขึ้นรูป ทำให้ค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป ทำให้ค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานคือ 20 นาที และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

โดยมีค่าทำนายของค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Predicted Responses) คือ Tensile Strength มีค่าเท่ากับ 33.8201 MPa และ Compressive Strength มีค่าเท่ากับ 81.4829 MPa ที่ค่าความพึงพอใจเท่ากับ (Desirability) 1.000000 และ 1.000000 ตามลำดับ ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 1.000000 แสดงตามรูป 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย



#### 4.2.2.6 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองยืนยันผล เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยฟังก์ชันการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด หลังจากได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการทำนายด้วยโปรแกรม Minitab 16 ขั้นตอนนี้คือทำการทดลองยืนยันผลจำนวน 10 การทดลอง โดยระดับของปัจจัยที่ได้จากสมการทำนาย คือ

เวลาในการขึ้นรูป = 20 นาที

อุณหภูมิในการขึ้นรูป = 100 องศาเซลเซียส

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานในสถานะดังกล่าว และนำไปวัดค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน แสดงดังตาราง 4.18 และสำหรับข้อมูลดิบก่อนการนำมาคำนวณหาค่าการดึง และค่าการกดอัด แสดงผลตามตาราง ค4 แสดงในภาคผนวก ก

ตาราง 4.18 แสดงผลการทดสอบยืนยันผลในการขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าสถานะที่เหมาะสม

ลำดับการทดลอง	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดสอบ	
			ค่าการดึง (MPa)	ค่าการกดอัด (MPa)
1	20	100	34.07	80.69
2	20	100	33.06	79.99
3	20	100	33.06	81.76
4	20	100	32.22	80.69
5	20	100	33.79	82.60
6	20	100	32.33	80.11
7	20	100	33.29	80.87
8	20	100	34.49	81.14
9	20	100	33.37	80.04
10	20	100	33.62	82.28

เมื่อทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง นำผลที่ได้จากการทดลองกับค่าเป้าหมายที่ได้จากสมการทำนายมาทดสอบและประมาณค่าผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร ด้วยฟังก์ชัน 1 Sample Test โดยพิจารณาจาก P-Value จากตารางที่ 4.19 P-Value ของผลตอบทั้งค่าการดึง และค่าการกดอัด มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าผลตอบของค่าการดึง และค่าการกดอัด ที่ได้จากการทดลอง

ยืนยันผลกับค่าเป้าหมายที่ได้จากสมการทำนาย ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.19 การทดสอบระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าการดึง และค่าการกดอัด จากการทดลองยืนยันผลกับค่าเป้าหมายที่ได้จากสมการทำนาย

ผลตอบ	ค่าเป้าหมาย	ทดลองยืนยันผล	N	StDev	SE Mean	T	P
ค่าการดึง	33.82	33.33	10	0.713	0.225	-2.18	0.057
ค่าการกดอัด	81.48	81.02	10	0.928	0.294	-1.58	0.148

จากตารางที่ 4.19 สามารถสรุปได้ว่าการทดลองในครั้งนี้ได้ผลตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ในกรอบการออกแบบการทดลอง

#### 4.3 การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ

##### 4.3.1 การหาความพึงพอใจโดยรวมด้วยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ

เมื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลอง ดังสมการที่ 4.13 – 4.17 นำสมการดังกล่าวไปคำนวณหาค่าสมการเป้าหมายในโปรแกรม Matlab7 จะได้ผลการรันโปรแกรมในการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน แสดงผลตามตาราง ๑ ในภาคผนวก ข

$$\text{Objective Function} \quad \text{Maximize} = \sqrt{p_1 * p_2} \quad (4.13)$$

$$\text{s.t.} \quad y_1 = -103.288 + (2.54422x_2) - (0.0117236x_2^2) \quad (4.14)$$

$$y_2 = -583.527 + (9.32940x_1) + (10.3811x_2) - (0.0182042x_1^2) - (0.0370288x_2^2) - (0.0910609x_1x_2) \quad (4.15)$$

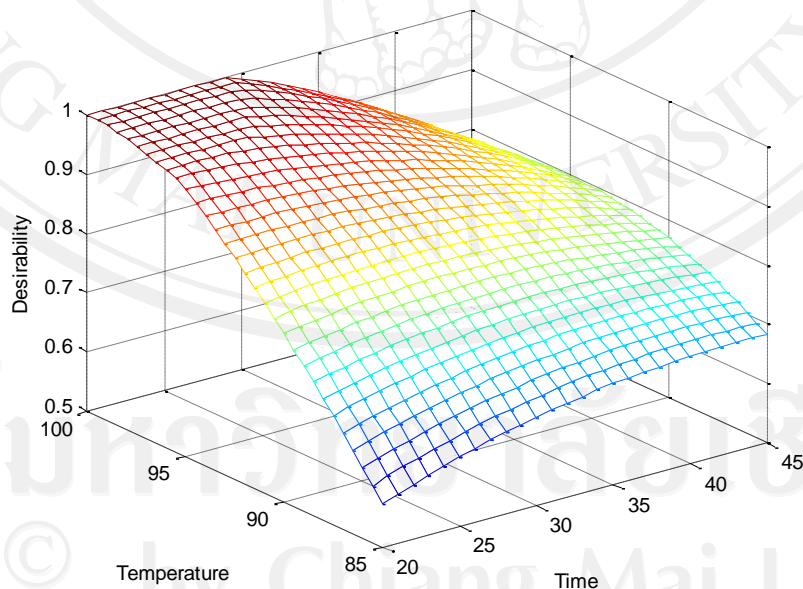
$$a_1 = 20.208, b_1 = 33.730$$

$$a_2 = 32.045, b_2 = 75.386$$

$$p_1(y_1 : a_1, b_1) = \begin{cases} 0 & y_1 < a_1 \\ (y_1 - a_1)/(b_1 - a_1) & a_1 \leq y_1 < b_1 \\ 1 & y_1 \geq b_1 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$p_2(y_2 : a_2, b_2) = \begin{cases} 0 & y_2 < a_2 \\ (y_2 - a_2)/(b_2 - a_2) & a_2 \leq y_2 < b_2 \\ 1 & y_2 \geq b_2 \end{cases} \quad (4.17)$$

จากตาราง ง1 ในภาคผนวก ข พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป โดยการเพิ่มเวลาในการขึ้นรูปครั้งละ 1 นาที โดยเริ่มตั้งแต่ที่ระยะเวลา 20 นาทีขึ้นไป และลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปครั้งละ 0.5 องศาเซลเซียส โดยเริ่มตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสลงมา พบว่าที่ระยะเวลา 20 นาทีและที่อุณหภูมิ 99.5 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานเท่ากับ 1.0000 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ พื้นผิวผลตอบระหว่างระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป กับค่าความพึงพอใจ โดยรวมของผลตอบ แสดงดังรูป 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป

จากรูปสามารถสรุปได้ว่าทั้งเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเพิ่มระยะเวลาและลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปขึ้นงานพร้อมๆกันทำให้ค่าผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

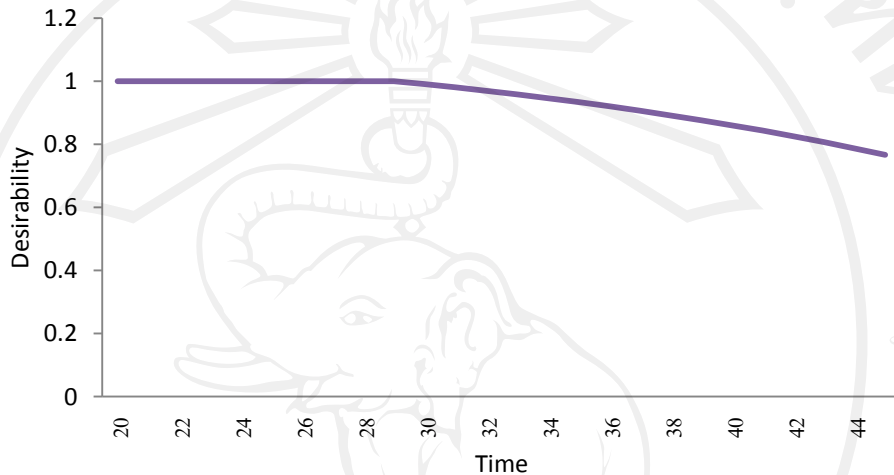
ตารางที่ 4.20 ผลการรันโปรแกรมหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปคงที่ 100 องศาเซลเซียส

Time (mins)	Temp ( $^{\circ}$ C)	Desirability	Time (mins)	Temp ( $^{\circ}$ C)	Desirability
20	100	1.0000	36	100	0.9202
21	100	1.0000	37	100	0.9062
22	100	1.0000	38	100	0.8915
23	100	1.0000	39	100	0.8762
24	100	1.0000	40	100	0.8600
25	100	1.0000	41	100	0.8431
26	100	1.0000	42	100	0.8252
27	100	1.0000	43	100	0.8065
28	100	1.0000	44	100	0.7868
29	100	1.0000	45	100	0.7661
30	100	0.9910	35	100	0.9335
31	100	0.9806	36	100	0.9202
32	100	0.9697	37	100	0.9062
33	100	0.9582	38	100	0.8915
34	100	0.9461	39	100	0.8762
35	100	0.9335			

เมื่อหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 4.13 – 4.17 ผลการรันโปรแกรมจากสมการที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.20 ซึ่งเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปคงที่ 100 องศาเซลเซียส และเพิ่มเวลาในการขึ้นรูปครั้งละ 1 นาที โดยเริ่มตั้งแต่ที่ระยะเวลา 20 นาทีขึ้นไป พบว่าระยะเวลาตั้งแต่ 20 ถึง 29 นาที ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานเท่ากับ

1.0000 แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการขึ้นรูปตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลง

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.20 มาพล็อตกราฟระหว่างระยะเวลาในการขึ้นรูป กับค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ แสดงดังรูป 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปคงที่ 100 องศาเซลเซียส

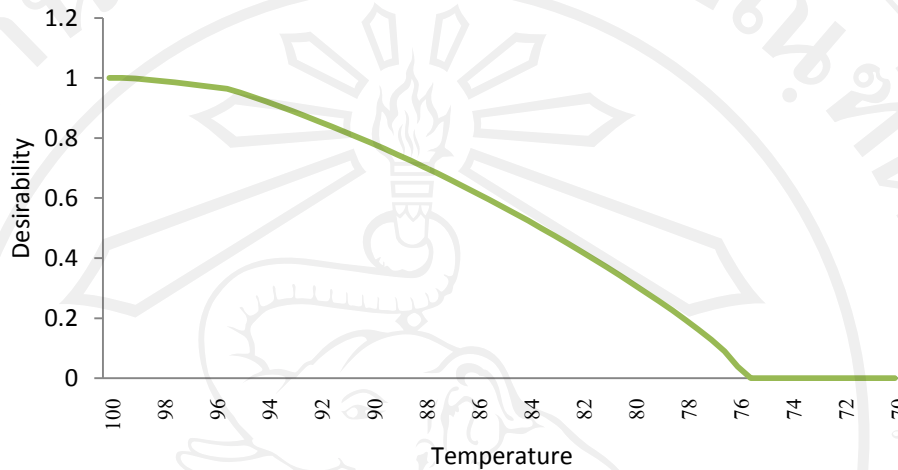
จากรูปสามารถสรุปได้ว่าเวลาในการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการขึ้นรูปขึ้นงานทำให้ค่าผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

เมื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 4.13 – 4.17 ผลการรัน โปรแกรมจากสมการที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.21 ซึ่งเมื่อกำหนดให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที และลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปครั้งละ 0.5 องศาเซลเซียส โดยเริ่มตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสลงมา พบว่าตั้งแต่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 99.5 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานเท่ากับ 1.0000 แต่เมื่อลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่อุณหภูมิตั้งแต่ 99 องศาเซลเซียสลงมา ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.21 ผลการรันโปรแกรมหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการตั้ง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้เวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที

Time (min)	Temp (°C)	Desirability	Time (min)	Temp (°C)	Desirability	Time (min)	Temp (°C)	Desirability	Time (min)	Temp (°C)	Desirability
20	100	1.0000	20	92	0.8557	20	84	0.5243	20	76	0.0386
20	99.5	1.0000	20	91.5	0.8383	20	83.5	0.4997	20	75.5	0.0000
20	99	0.9984	20	91	0.8205	20	83	0.4747	20	75	0.0000
20	98.5	0.9942	20	90.5	0.8022	20	82.5	0.4492	20	74.5	0.0000
20	98	0.9897	20	90	0.7835	20	82	0.4232	20	74	0.0000
20	97.5	0.9849	20	89.5	0.7644	20	81.5	0.3968	20	73.5	0.0000
20	97	0.9800	20	89	0.7448	20	81	0.3698	20	73	0.0000
20	96.5	0.9748	20	88.5	0.7247	20	80.5	0.3422	20	72.5	0.0000
20	96	0.9693	20	88	0.7042	20	80	0.3141	20	72	0.0000
20	95.5	0.9636	20	87.5	0.6833	20	79.5	0.2854	20	71.5	0.0000
20	95	0.9509	20	87	0.6620	20	79	0.2560	20	71	0.0000
20	94.5	0.9361	20	86.5	0.6401	20	78.5	0.2258	20	70.5	0.0000
20	94	0.9209	20	86	0.6179	20	78	0.1946	20	70	0.0000
20	93.5	0.9053	20	85.5	0.5952	20	77.5	0.1622			
20	93	0.8892	20	85	0.5720	20	77	0.1278			
20	92.5	0.8727	20	84.5	0.5484	20	76.5	0.0896			

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.21 มาพล็อตกราฟระหว่างระยะเวลาในการขึ้นรูป กับค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ แสดงดังรูป 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที

จากรูปสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปขึ้นงานทำให้ค่าผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของขึ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

#### 4.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ

เนื่องจากการหาค่าอุณหภูมิที่ดีที่สุด ในขั้นตอนการออกแบบการทดลองมีข้อจำกัดในการกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางเทคนิค จึงได้ค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสูงที่สุดที่ผู้วิจัยสามารถทำการทดลองได้ และจากการทำนายหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดด้วยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียสเช่นกัน ดังนั้นจึงใช้เทคนิคพีชชีแบบหลายพื้นผิวผลตอบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย เมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปมีค่ามากกว่า 100 องศาเซลเซียส และกำหนดให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปที่ 20 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด เพราะหากระยะเวลาที่น้อยกว่า 20 นาที ทำให้ชิ้นงานเซตตัวไม่ดีพอและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานไม่ได้ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 4.13 – 4.17 เช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 4.3.1 และนำสมการดังกล่าวไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปกระดูกเทียม

โดยที่ระยะเวลาที่น้อยกว่า 20 นาที ด้วยโปรแกรม Matlab7 จะได้ผลการรันโปรแกรมในการหาผลตอบค่าการดึง ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ แสดงผลตามตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ผลการรันโปรแกรมหาค่าการดึง ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวม เมื่อกำหนดให้เวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที

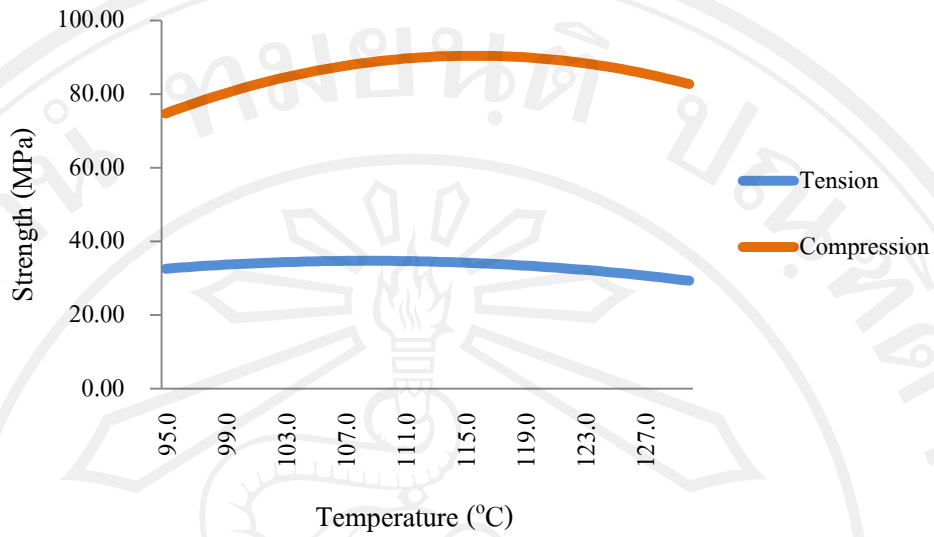
Time(mins)	Temp (°C)	Compression (MPa)	Tension (MPa)	Desirability
20	95.0	74.78	32.61	0.9509
20	95.5	75.54	32.76	0.9636
20	96.0	76.27	32.91	0.9693
20	96.5	76.99	33.06	0.9748
20	97.0	77.68	33.19	0.9800
20	97.5	78.36	33.33	0.9849
20	98.0	79.02	33.45	0.9897
20	98.5	79.67	33.57	0.9942
20	99.0	80.29	33.69	0.9984
20	99.5	80.89	33.80	1.0000
20	100.0	81.48	33.90	1.0000
20	100.5	82.05	33.99	1.0000
20	101.0	82.60	34.09	1.0000
20	101.5	83.13	34.17	1.0000
20	102.0	83.64	34.25	1.0000
20	102.5	84.13	34.32	1.0000
20	103.0	84.61	34.39	1.0000
20	103.5	85.07	34.45	1.0000
20	104.0	85.50	34.51	1.0000
20	105.0	86.32	34.60	1.0000



Time(mins)	Temp (°C)	Compression (MPa)	Tension (MPa)	Desirability
20	105.5	86.71	34.64	1.0000
20	106.0	87.07	34.67	1.0000
20	106.5	87.42	34.70	1.0000
20	107.0	87.74	34.72	1.0000
20	107.5	88.05	34.73	1.0000
20	108.0	88.34	34.74	1.0000
20	108.5	88.61	34.75	1.0000
20	109.0	88.87	34.74	1.0000
20	109.5	89.10	34.74	1.0000
20	110.0	89.32	34.72	1.0000
20	110.5	89.52	34.70	1.0000
20	111.0	89.69	34.67	1.0000
20	111.5	89.85	34.64	1.0000
20	112.0	90.00	34.60	1.0000
20	112.5	90.12	34.56	1.0000
20	113.0	90.23	34.51	1.0000
20	113.5	90.31	34.45	1.0000
20	114.0	90.38	34.39	1.0000
20	114.5	90.43	34.33	1.0000
20	115.0	90.46	34.25	1.0000
20	115.5	90.47	34.17	1.0000
20	116.0	90.47	34.09	1.0000
20	116.5	90.44	34.00	1.0000
20	117.0	90.40	33.90	1.0000
20	118.0	90.26	33.69	0.9985
20	118.5	90.16	33.58	0.9943

Time(mins)	Temp (°C)	Tension (MPa)	Compression (MPa)	Desirability
20	119.0	33.46	90.04	0.9898
20	119.5	33.33	89.9	0.9851
20	120.0	33.20	89.75	0.9802
20	120.5	33.06	89.58	0.9749
20	121.0	32.92	89.39	0.9695
20	121.5	32.77	89.18	0.9638
20	122.0	32.61	88.95	0.9578
20	122.5	32.45	88.7	0.9516
20	123.0	32.28	88.44	0.9450
20	123.5	32.11	88.15	0.9383
20	124.0	31.93	87.85	0.9312
20	124.5	31.75	87.53	0.9238
20	125.0	31.56	87.19	0.9162
20	125.5	31.36	86.83	0.9082
20	126.0	31.16	86.46	0.9000
20	126.5	30.95	86.06	0.8914
20	127.0	30.74	85.65	0.8825
20	127.5	30.52	85.21	0.8732
20	128.0	30.29	84.76	0.8636
20	128.5	30.06	84.3	0.8536
20	129.0	29.82	83.81	0.8433
20	129.5	29.58	83.3	0.8326
20	130.0	29.33	82.78	0.8214

เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 4.22 มาพล็อตกราฟผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความ  
แข็งแรงต่อแรงดึง และแรงอัด แสดงดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าการดึง และค่าการกดอัดคดอัด  
เมื่อเวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที

จากรูปสามารถสรุปได้ว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป 115.5 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 20 นาที ซึ่งทำให้ค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าที่สูงที่สุด คือ 90.47 และ 34.17 MPa ตามลำดับ และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานเท่ากับ 1.0000

#### 4.3.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบกับค่าผลตอบ และค่าความพึงพอใจโดยรวมด้วยเทคนิคฟัซซี่หลายพื้นผิวผลตอบ

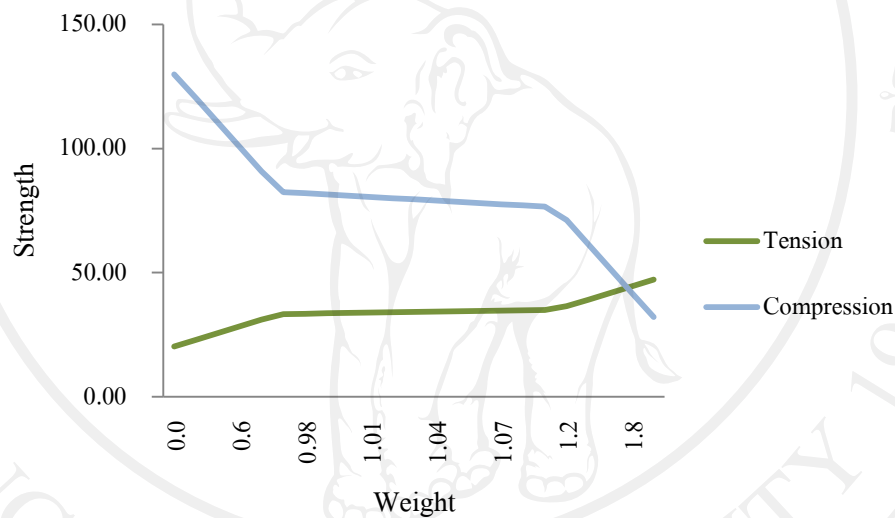
ในขั้นตอนนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน หรือค่าน้ำหนักของผลตอบ กับค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคฟัซซี่แบบหลายพื้นผิวผลตอบ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 4.13 – 4.17 เช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 4.3.1 และนำสมการดังกล่าวไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบกับค่าผลตอบการดึง การกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ ด้วยโปรแกรม Matlab7 จะได้ผลการรันแสดงผลดังตาราง 4.23 โดยกำหนดค่าความสำคัญของผลตอบค่าการดึงมีค่าเท่ากับ 1 และค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 1 ฉะนั้นค่าความสำคัญรวมของผลตอบมีค่าเท่ากับ 2

ตารางที่ 4.23 ผลการรันโปรแกรมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบกับค่าผลตอบ การตั้ง การกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ

w1	w2	Tension (Mpa)	Compression (Mpa)	Time	Temp	Desirability
0.0	2.0	20.21	129.99	*	73.3	0.0000
0.2	1.8	22.91	120.19	*	76.7	0.6000
0.4	1.6	25.62	110.40	*	80.6	0.8000
0.6	1.4	28.32	100.60	*	85.1	0.9165
0.8	1.2	31.02	90.81	*	90.7	0.9798
0.97	1.03	33.32	82.48	*	97.5	0.9995
0.98	1.02	33.46	81.99	*	98.0	0.9998
0.99	1.01	33.59	81.50	16.0	98.6	0.9999
1.0	1.0	33.73	81.02	20.0	99.2	1.0000
1.01	0.99	33.86	80.53	21.4	99.8	0.9999
1.02	0.98	34.00	80.04	23.3	100.5	0.9998
1.03	0.97	34.13	79.55	24.8	101.3	0.9995
1.04	0.96	34.27	79.06	25.8	102.1	0.9991
1.05	0.95	34.40	78.57	26.7	103.1	0.9987
1.06	0.94	34.54	78.08	27.4	104.3	0.9982
1.07	0.93	34.67	77.59	28.0	106.0	0.9975
1.08	0.92	34.81	77.10	*	*	0.9968
1.09	0.91	34.94	76.61	*	*	0.9919
1.2	0.8	36.43	71.22	*	*	0.9798
1.4	0.6	39.14	61.43	*	*	0.9165
1.6	0.4	41.84	51.63	*	*	0.8000
1.8	0.2	44.54	41.84	*	*	0.6000
2.0	0.0	47.25	32.05	*	*	0.0000

หมายเหตุ \*ไม่สามารถหาค่าระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปได้ เมื่อให้ค่าความสำคัญของค่าการดึงมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความสำคัญของผลตอบค่าการกดอัดลดลง จะทำให้ผลตอบค่าการดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง เนื่องจากผลตอบค่าการดึง และ/หรือผลตอบค่าการกดอัด ที่ได้จากการทำนายมีค่าที่สูงกว่าค่าขอบเขตบนที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในทางคณิตศาสตร์นั้นสามารถหาได้เพียงบางค่าเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงนั้นในทางปฏิบัติอาจจะทำการขึ้นรูปในสภาวะดังกล่าวไม่ได้เนื่องจากเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปชนิดนั้นๆ

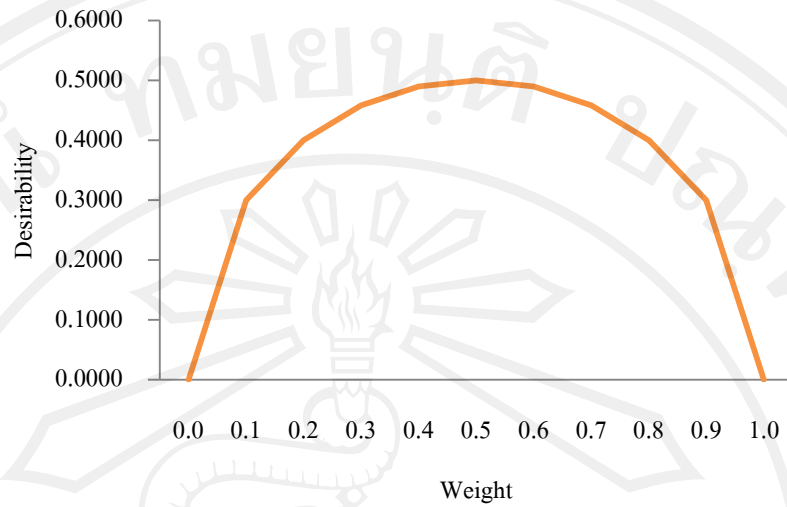
เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 4.23 มาพล็อตกราฟระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงานแสดงดังรูป 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน

จากรูปสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าความสำคัญของผลตอบค่าการดึง ( $W_1$ ) และลดค่าความสำคัญของผลตอบค่าการกดอัด ( $W_2$ ) จะทำให้ผลตอบค่าการดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง

เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 4.23 มาพล็อตกราฟระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ แสดงดังรูป 4.27



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ

จากรูปสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าความสำคัญของผลตอบค่าการดึง จะทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อให้ค่าความสำคัญของผลตอบค่าการดึงมากกว่า 1.0 จะทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบมีค่าลดลง ซึ่งที่ค่าความสำคัญของค่าผลตอบค่าการดึงเท่ากับ 1.0 และค่าความสำคัญของค่าผลตอบค่าการกดเท่ากับ 1.0 จะทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดของชิ้นงานเท่ากับ 1.0