



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ:
กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง

Application of Engineering Experimental Design for Quality Improvement:
Case Study of Steel Billets Production Factory

نامผู้วิจัย นายรัชชัย ยงเนตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พิชิต สุขเจริญพงษ์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินัย โพธิ์สุวรรณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ:

กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง

Application of Engineering Experimental Design for Quality Improvement:

Case Study of Steel Billets Production Factory

โดย

นายรัชชัย ขงเนตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

พ.ศ. 2554

รัชชัย ขงเนตร 2554: การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พิชิต สุขเจริญพงษ์, D.Eng. 160 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่ง ในการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต (y_1) และหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็ก พร้อมกับตั้งค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต (y_1 : % Yield Recovery) และการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (y_2 : kWh/kg) โดยใช้ออกแบบการทดลองผสม คือ Extreme Vertices Design ร่วมกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล คือ 2^2 Factorial Design จากนั้นทำการทดลองกับกระบวนการผลิตเหล็กแท่งและเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจำนวน 120 การทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ และพัฒนาแบบจำลองทางสถิติมาใช้ในการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกันทั้ง y_1 และ y_2 (Single Composite Response)

ผลและวิเคราะห์การทดลองทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองสถิติของ y_1 และ y_2 เป็นแบบจำลองควอดราติก (Quadratic Model) สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก $x_1 = 0.5409$, $x_2 = 0.2298$, $x_3 = 0.1373$, $x_4 = 0.0920$ และปัจจัยกระบวนการทั้งสองอยู่ที่ระดับต่ำ คือ $TTT = 60$ นาที และ $TT = 1,600$ องศาเซลเซียส จะได้ $y_1 = 96.4599\%$ และ $y_2 = 0.3023$ kWh/kg แต่จากการทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 34 การทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยของ $y_1 = 89.97\%$ และ $y_2 = 0.5264$ kWh/kg ด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.387% และ 0.05027 kWh/kg ตามลำดับ ผลการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบกับการผลิตที่ไม่มีการกำหนดอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก และไม่มีการตั้งค่าระดับของตัวแปรกระบวนการซึ่งได้ $y_1 = 82.79\%$ และ $y_2 = 0.4698$ kWh/kg ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.979% และ 0.03784 kWh/kg ตามลำดับ สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อย่างไรก็ตามแม้การใช้พลังงานไฟฟ้าจะไม่เป็นไปตามเป้าหมาย แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการผลิตที่ได้ ดังนั้นการกำหนดอัตราส่วนผสมเศษเหล็กและการตั้งค่าปัจจัยกระบวนการดังกล่าว ยังสามารถนำไปใช้ได้

Tawatchai Yongnate 2011: Application of Engineering Experimental Design for Quality Improvement: Case Study of Steel Billets Production Factory. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Pichit Sukchareonpong, D.Eng. 160 pages.

This research aims to study the process of steel billets. The factors that affected efficiency (y_1) and the ratio of raw materials for steel scrap were selected. With a set level of each factor affecting the efficiency (y_1 : % Yield Recovery) and energy consumption per production billet 1 kg. (y_2 : kWh/kg), the experiments were designed using the extreme vertices design with 2^2 factorial design and were then tested by steel billets manufacturing experiments the 120 obtained experimental results were collected and analyzed statistically. The “single composite response or simultaneous multiple response optimizer” models were then used to find the most appropriate response of y_1 and y_2 .

Analyzing experiments to improve model statistics of y_1 and y_2 found that the quadratic model was the ratio of scrap $x_1 = 0.5409$, $x_2 = 0.2298$, $x_3 = 0.1373$, $x_4 = 0.0920$, and the factors process both at low levels $TTT = 60$ minutes and $TT = 1,600$ degrees Celsius is $y_1 = 96.4599\%$ and $y_2 = 0.3023$ kWh/kg but the experiment to confirm the results of 34 trials found that the average of $y_1 = 89.97\%$ and $y_2 = 0.5264$ kWh/kg and standard deviation was 2.387% and 0.05027 kWh/kg, respectively, and statistical hypothesis testing to compare the production with no ratio of steel scrap determination and no set level of process variables which $y_1 = 82.79\%$, and $y_2 = 0.4698$ kWh/kg, standard deviation, 2.979% and 0.03784 kWh/kg, respectively, concluded that efficiency increased, but energy consumption per production steel billets that does not meet the target, statistically significant at the 0.05 level. However, even the use of energy consumption will not be targeted, but do not affect the cost of production compared with production efficiency to be. Therefore, the ratio of steel scrap and process setting factors can still be used.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ. ดร. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ผศ. ดร. วินัย โพธิ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาสาขาวิชารอง และผศ. ดร. ลีลิ อิงศรีสว่าง ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ด้วยความเคารพอย่างสูง ที่ได้กรุณาสละเวลา ทูมเทร่างกาย และแรงใจในการวางแผนและออกแบบ ให้แนวคิดที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนการปรับปรุงวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. ชนะ รัชศิริ ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และรศ. ดร. พงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ด้วยความเคารพอย่างสูง ที่ได้กรุณาสละเวลา ให้แนวคิด และคำแนะนำต่อการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้ทำให้เกิดแนวคิดต่อการทำวิทยานิพนธ์ และความรู้ที่ได้จะก่อให้เกิดการพัฒนาต่อหน้าที่การงาน และประเทศชาติสืบไป

ขอขอบคุณวิศวกร และพนักงานช่างเทคนิค โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า ที่มีใบอนุญาตประกอบโลหกรรม ตาม พ.ร.บ. แร่ พ.ศ. 2510 จากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการตั้งค่าตามแผนการทดลอง การเก็บรวบรวมข้อมูล และความรู้ด้านกระบวนการผลิตเหล็กกล้าและโลหการ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่านของ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านทุนการศึกษา ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำวิทยานิพนธ์ และมีกำลังใจให้กันเสมอมา

ความรู้และประโยชน์ส่วนใดส่วนหนึ่งที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณแม่ อรุณ ชูเนตร บุปผารี ครอบครัวยงเนตร และคุณพ่อจุกเกิด แซ่เฮ้า ผู้ซึ่งล่วงลับไปแล้ว

ธวัชชัย ยงเนตร

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	44
ผล	44
วิจารณ์	81
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก ภาพกลุ่มของเศษเหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง	92
ภาคผนวก ข ภาพการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง	96
ภาคผนวก ค ภาพผลิตภัณฑ์เหล็กกล้า	99
ภาคผนวก ง แผนการทดลอง Extreme Vertices Design	
แผนการทดลอง 2^2 Factorial Design	
แผนการทดลอง Extreme Vertices Design with Two Process Variables	
ใบบันทึกข้อมูลการผลิตและต้นทุนการผลิตของโรงงานผลิตเหล็กแท่ง	101
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติด้วย MiniTab 16	108
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	160

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 Algebraic Signs for Calculating in the 2^2 Design	11
2 การตั้งค่าระดับของปัจจัย	38
3 Extreme Vertices Design, Design Degree: 1 = 10 Design Points	41
4 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_1	46
5 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_2	47
6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_1	49
7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_2	50
8 ค่าสถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนประกอบการพิจารณาพัฒนาแบบจำลองสถิติ	52
9 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_1 สำหรับพัฒนาแบบจำลองจากการทำ Backward Elimination	52
10 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_2 สำหรับพัฒนาแบบจำลองจากการทำ Backward Elimination	54
11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_1 สำหรับพัฒนาแบบจำลองสถิติจากการทำ Backward Elimination	55
12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_2 สำหรับพัฒนาแบบจำลองสถิติจากการทำ Backward Elimination	56
13 ข้อมูลสำหรับการทดสอบสมมุติฐานเพื่อตรวจสอบข้อสรุป	79

ตารางผนวกที่

ง1 แผนการทดลอง Extreme Vertices Design (Design Degree: 1)	102
ง2 แผนการทดลอง 2^2 Factorial Design (Two Process Variables)	102
ง3 แผนการทดลอง Extreme Vertices Design (Design Degree: 1) with Two Process Variables ($z_1 : TTT$ & $z_2 : TT$)	103
ง4 ใบบันทึกข้อมูลการผลิตและต้นทุนการผลิตของโรงงานผลิตเหล็กแท่ง	105

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการผลิต หรือระบบ	7
2 Two difference presentations of 28-point combined design for three mixture components and two process variables	18
3 แผนภูมิกระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steelmaking Process Chart)	26
4 เตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)	27
5 เตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Ladle Furnace: LF)	27
6 การหล่อเหล็กต่อเนื่อง (Continuous Casting)	28
7 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1	45
8 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2	45
9 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างสำหรับ y_1	60
10 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างสำหรับ y_2	60
11 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับค่าที่เหมาะสมสำหรับ y_1	61
12 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับค่าที่เหมาะสมสำหรับ y_2	62
13 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับลำดับของค่าสังเกตสำหรับ y_1	63
14 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับลำดับของค่าสังเกตสำหรับ y_2	63
15 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_1	64
16 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_2	65
17 กราฟผลกระทบร่วมสำหรับ y_2	66
18 Matrix of Mixture Contour Plots for y_1	67
19 Mixture Surface Plots of y_1	67
20 Matrix of Mixture Contour Plots for y_2	68
21 Mixture Surface Plots of y_2	69
22 Cox Response Trace Plot of Fitted y_1	70
23 Cox Response Trace Plot of Fitted y_2	70
24 Simultaneous Multiple Response Optimizer of y_1 and y_2	72
25 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตามปกติ	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
26 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตามปกติ	75
27 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตามปกติ โดยตัด Outlier ออก	76
28 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตามปกติ โดยตัด Outlier ออก	77
29 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer	78
30 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer	78
ภาพผนวกที่	
ก1 เศษเหล็กกลุ่ม 1 ได้แก่ แผ่นสังกะสีปั๊ม Tin Free ลูกอัดบาง ลูกอัดแผ่นสังกะสีปั๊ม Tin Free ลูกอัดเส้นลวด ลูกอัดสายรัด	93
ก2 เศษเหล็กกลุ่ม 2 ส่วนที่ 1 ได้แก่ แผ่นปั๊มบาง แผ่นปั๊มดำ เหล็กตัดไฟ ลูกอัดปั๊มหนา ลูกอัดปั๊มดำ เหล็ก Return	93
ก3 เศษเหล็กกลุ่ม 2 ส่วนที่ 2 ได้แก่ เหล็กตัดขอบจากเหล็กแป้นรีดเย็น เหล็กตะเกียบจาก เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กปั๊ม เหล็กปั๊มดำ	94
ก4 เศษเหล็กกลุ่ม 3 ส่วนที่ 1 ได้แก่ แผ่นสังกะสีปั๊ม Tin Plate ลูกอัดกระป๋อง ลูกอัดแผ่นสังกะสี	94
ก5 เศษเหล็กกลุ่ม 3 ส่วนที่ 2 ได้แก่ ลูกอัดกระป๋อง	95
ก6 เศษเหล็กกลุ่ม 4 ได้แก่ ขี้กลิ้งเหล็กเหนียว เหล็กยิงทราย (Shot Peening) เศษน้ำเหล็ก	95
ข1 การฟ่นออกซิเจนเข้าเตาหลอมไฟฟ้า (EAF)	97
ข2 การเติมเศษเหล็กเข้าเตาหลอมไฟฟ้า (EAF)	97
ข3 การอาร์คต่อในเตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (LF)	98
ข4 การหล่อเหล็กแท่งต่อเนื่อง (CCM)	98
ค1 ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) คือ เหล็กแท่ง (Billets)	100
ค2 ผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นชนิดต่างๆ (Deformed Bars, Round Bars and Wire Rods)	100

การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ:

กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง

Application of Engineering Experimental Design for Quality Improvement:

Case Study of Steel Billets Production Factory

คำนำ

จากอดีตที่ผ่านมาเราได้ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า โดยได้กำหนดไว้อย่างชัดเจนในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 4-7 (พ.ศ. 2520-2539) เนื่องจากเหล็กและผลิตภัณฑ์เหล็กใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ มากมาย อาทิ การก่อสร้างและสถาปัตยกรรม ยานยนต์และชิ้นส่วน ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และท่อเหล็ก เป็นต้น ซึ่งความจำเป็นในการใช้เหล็กดังกล่าว ยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่องยาวนาน ดังนั้น จะเห็นได้จากปริมาณการใช้เหล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง จากกว่า 2 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2528 เป็นมากกว่า 10 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2539 แม้การเกิดภาวะวิกฤตเศรษฐกิจและการเงินในปี พ.ศ. 2540 ก็มิได้ทำให้ความต้องการใช้เหล็กลดลงไปมากแต่ประการใด เมื่อเทียบกับธุรกิจหรืออุตสาหกรรมประเภทอื่น โดยยังคงมีการใช้ที่ประมาณ 10 ล้านตัน และหลังจากที่ได้ผ่านพ้นวิกฤตเศรษฐกิจฯ ไปแล้ว เพียง 2-3 ปี ปริมาณการใช้เหล็กก็เพิ่มขึ้นอย่างมากและต่อเนื่อง จากประมาณ 17 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2542 เป็น 21 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2551 และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยได้คาดการณ์ไว้ว่า ในอนาคตประเทศไทยอาจมีความต้องการใช้เหล็กประมาณ 30 ล้านตันต่อปี ซึ่งเป็นไปตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ ได้แก่ โครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิที่เพิ่งจะดำเนินการแล้วเสร็จ และโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภคต่างๆ เช่น ถนน และสะพาน เป็นต้น โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ บ้าน และที่อยู่อาศัย และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เหล็ก (กรมทรัพยากรธรณี, 2543)

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของไทยยังคงไม่สอดคล้องกับแผนพัฒนาฯ ดังกล่าว เนื่องจากความจำกัดของการพัฒนาอยู่ที่อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง (Intermediate) และขั้นปลาย (Downstream) เท่านั้น ซึ่งเป็นการผลิตเหล็กกล้า (Steelmaking) ยังมีได้ก้าวไปถึงอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น (Upstream) ได้แก่ การถลุงแร่เหล็ก ซึ่งเป็นการผลิตเหล็ก

(Ironmaking) เพื่อให้ได้เหล็กพูน (Sponge Iron) หรือเหล็กดิบ (Pig Iron) ตามแต่สภาพของกรรมวิธีการผลิต กล่าวคือ การถลุงในสภาพของเหลวจะได้เป็นเหล็กดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนออกจากแร่เหล็กพร้อมทั้งเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลว ได้แก่ กรรมวิธีถลุงด้วยเตาพ่นลม (Blast Furnace) และการถลุงด้วยวิธี Direct Smelting เช่น Corex และ HIsmelt ส่วนการถลุงในสภาพของแข็งจะได้เหล็กพูน ซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง และกากแร่ที่ติดปนมาจะไม่สามารถแยกออกได้ ทำให้ต้องใช้พลังงานปริมาณมากในการแปรสภาพให้เป็นเหล็กกล้าในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ กรรมวิธีถลุงด้วยก๊าซถลุงที่ได้จากก๊าซธรรมชาติ (Gas Base) เช่น Midrex, HyL III และ Finmet และการถลุงด้วยก๊าซถลุงที่ได้จากถ่านหิน (Coal Base) เช่น SL/RN, Fastmet, Inmetco DRC และ Iron Dynamic (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545)

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น ใช้แร่เหล็กเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต โดยจะต้องมีเนื้อเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 และมีกำลังการผลิตไม่ควรต่ำกว่า 1 ล้านตันต่อปี จึงจะคุ้มทุนตามหลักวิชาการ ที่สำคัญแร่เหล็กจะมีเสถียรภาพมาก โดยมีสารมลทินที่มีอัตราส่วนค่อนข้างที่จะคงที่ และไม่แปรผันมาก อีกทั้งไม่มีธาตุโลหะอื่นเจือปนอยู่ เนื่องจากเป็นธรรมชาติของการเกิดสายแร่เหล็ก ซึ่งเป็นวัตถุดิบขั้นปฐมภูมิ (Primary Materials) ทำให้ขั้นตอนการถลุงและการทำให้บริสุทธิ์ ควบคุมและปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กกระทำได้ง่ายกว่า ส่งผลให้สามารถผลิตเหล็กกล้าที่มีคุณภาพสูงพิเศษได้ (High Special Steel Grade) ตรงกันข้ามกับอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางที่ใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต เนื่องจากเศษเหล็กเป็นวัตถุดิบที่ผ่านการใช้มาแล้ว แล้วนำกลับเข้ากระบวนการผลิตใหม่ (Recycle) ซึ่งเป็นวัตถุดิบขั้นทุติยภูมิ (Secondary Materials) มีรูปร่าง ขนาด ความหนา และแหล่งที่มาแตกต่างกัน เช่น เศษเหล็กกลิ้ง เศษเหล็กกลุ่มปั๊ม เศษเหล็กทูป เศษเหล็กบาง เศษเหล็กกลม และเศษเหล็กโลหะผสม เป็นต้น ผู้ประกอบการจำเป็นต้องคัดแยกเศษเหล็กและหาอัตราส่วนผสมก่อนบรรจุลงในเตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) แต่ยังไม่มีความเหมาะสมและแน่นอนในการเลือกใช้อัตราส่วนผสมของเศษเหล็กดังกล่าว และที่ผ่านมาวิศวกรโลหการฝ่ายโรงหลอมของโรงงานโดยส่วนใหญ่อาศัยประสบการณ์และความเชี่ยวชาญในสาขาวิชาชีพของตน จึงไม่มีรูปแบบการทำงานที่แน่นอน ขาดความเป็นมาตรฐาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมเศษเหล็ก โดยให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตที่ได้น้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทำให้คุณภาพน้ำเหล็กไม่สม่ำเสมอ มีผลต่อคุณภาพของเหล็กแท่ง (Billets, Blooms & Slabs) ตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตโดยตรง โดยเฉพาะเศษเหล็กโลหะผสมที่มีโครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) เป็นองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณที่มากพอ จะเกิดการแตกหัก (Break Down) ในระหว่างการ

หล่อแบบ (Mold) ก่อนที่จะทำการรีดเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นที่ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น เหล็กเส้นกลม (Round Bars) และเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bars) เป็นต้น แต่ถ้าไม่แตกหักในแบบ ก็จะไม่แตกหักในขั้นตอนการรีด และต้องปรับแต่ง (Set Up) เครื่องรีด (Rolling Mill) บ่อยครั้ง ทำให้ขาดความต่อเนื่องในการผลิต ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น และขาดความสามารถในการแข่งขันกับผลิตภัณฑ์เหล็กนำเข้าจากต่างประเทศได้ อีกทั้งการใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบจะเป็นการเพิ่มมูลค่า (Value Added) และหากไม่มีการผลิตเหล็กกล้าจากเศษเหล็กจะทำให้เศษเหล็กสิ้นประเทศ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้ากลุ่มนี้ ประกอบกับเหตุผลข้างต้น จึงขอเสนอโครงการวิทยานิพนธ์เรื่อง การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง ที่ใช้เตาหลอมไฟฟ้า เพื่อหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็ก (Melting) ทำน้ำเหล็กให้สะอาด (Refining) ปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Alloying) และหล่อต่อเนื่อง (Continuous Casting) จะได้เป็นเหล็กแท่ง (Billets) แล้วจึงนำไปแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นต่อไป โดยทำการหาประสิทธิภาพน้ำเหล็ก (% Yield Recovery) ในขั้นตอนการหลอม ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเหล็กแท่ง ในขั้นตอนการหล่อต่อเนื่อง ด้วยการศึกษาการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) โดยใช้การออกแบบการทดลองผสม (Mixture Design) ร่วมกับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (2^k Factorial Design) เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบเศษเหล็ก พร้อมทั้งการตั้งค่าระดับของแต่ละปัจจัย ที่ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด โดยสูญเสีย (Loss) น้อยที่สุด ร่วมกับการพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม เนื่องจากหากสามารถลดการใช้ไฟฟ้าลดลงได้ จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ก่อนส่งต่อไปยังขั้นตอนการรีดให้เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นก่อสร้าง โดยคาดหวังว่าผลิตภัณฑ์เหล็กแท่งที่ได้จะมีประสิทธิภาพไม่ด้อยไปกว่าผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตมาจากอุตสาหกรรมเหล็กขึ้นต้น และสามารถแข่งขันได้กับผลิตภัณฑ์นำเข้า ซึ่งจะเป็นก้าวแรกของการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กแท่งโดยใช้การออกแบบการทดลองในประเทศไทยให้ก้าวไปสู่ความยั่งยืน และสอดคล้องกับนโยบายของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

อนึ่ง เนื่องจากเศษเหล็กโลหะผสม จะทำให้เกิดการแตกหัก และเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้คุณภาพเศษเหล็กมีความแปรปรวนในองค์ประกอบทางเคมี ส่งผลให้การหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบเศษเหล็กในการศึกษาการออกแบบการทดลองเป็นไปได้ยาก ดังนั้น โครงการวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเศษเหล็กที่ได้จากโครงการศึกษาเพื่อกำหนดลำดับชั้นคุณภาพวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมพื้นฐาน ที่ดำเนินการศึกษาโดย ศูนย์วิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม บางเขน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เสนอต่อกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

ในปี พ.ศ. 2549 ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเศษเหล็กส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน จึงมีความแปรปรวนเฉพาะคุณสมบัติคุณภาพทางด้านกายภาพ และคาดหวังว่า โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าที่ศึกษา จะแบ่งกลุ่มเศษเหล็กโดยใช้โครงการศึกษาเพื่อกำหนดลำดับชั้นคุณภาพวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมพื้นฐานเป็นแนวทาง



วัตถุประสงค์

1. ศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่งที่ใช้เตาอาร์คไฟฟ้า เพื่อเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพน้ำเหล็ก ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการผลิตเหล็กแท่ง (y_1 : % Yield Recovery) ด้วย

2. เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบเศษเหล็ก พร้อมกับการตั้งค่าระดับของแต่ละปัจจัย ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพน้ำเหล็ก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพเหล็กแท่ง และใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (y_2 : kWh/kg) อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (Optimal) ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมลดลง โดยคาดว่าจะสามารถแข่งขันกับผลิตภัณฑ์เหล็กนำเข้าจากต่างประเทศได้

การตรวจเอกสาร

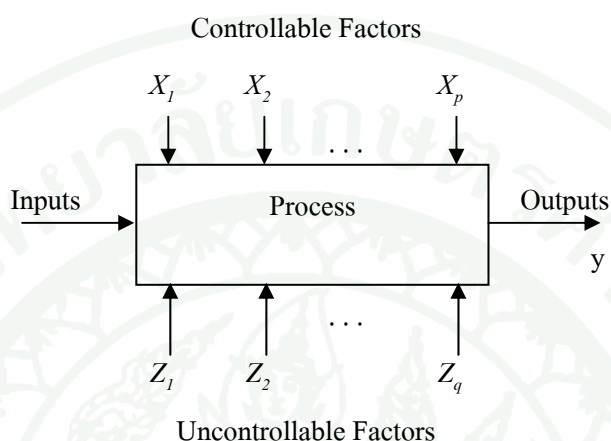
จากการตรวจโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าที่ใช้เตาหลอมไฟฟ้าจำนวน 17 ราย ปัญหาที่พบโดยส่วนใหญ่ ได้แก่ การขาดแคลนวัตถุดิบเศษเหล็ก ราคาสูง และแปรผันมาก การมีเศษเหล็กที่หลากหลายเกรดคุณภาพ เป็นอุปสรรคต่อการหาอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก ในการเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเหล็กแท่งด้วย และการหลอมแต่ละครั้งใช้ต้นทุนที่สูงมาก เกือบเท่ากับราคาจำหน่ายเหล็กแท่งและผลิตภัณฑ์เหล็ก คิดเป็นต้นทุนที่มาจากเศษเหล็กร้อยละ 70 การแก้ปัญหาโดยใช้การออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการในการทำ การทดลองกับกระบวนการหลอมเศษเหล็ก ก่อนปรับปรุงส่วนผสมเคมีขั้นสุดท้าย และหล่อเป็นเหล็กแท่ง พร้อมกับเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงสถิติ นำมาวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็ก พร้อมกับการตั้งค่าระดับของแต่ละปัจจัยให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม นั่นคือจะได้ น้ำเหล็กที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลโดยตรงต่อเหล็กแท่งที่มีประสิทธิภาพตามไปด้วย โดยได้พิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

การออกแบบการทดลอง

Sir Ronald A. Fisher เป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) มาใช้เป็นวิธีการทางสถิติเบื้องต้น เพื่อพัฒนาการออกแบบการทดลองที่สถานีทดลองทางเกษตรกรรม ณ ประเทศอังกฤษ เป็นเวลาหลายปี จนได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยลอนดอน ในปี พ.ศ. 2476 (ค.ศ. 1933) นอกจากนี้ยังมีบุคคลสำคัญที่มีส่วนให้การสนับสนุนสาขาวิชาการออกแบบการทดลอง ได้แก่ F. Yates, R. C. Bose, O. Kempthorne, W. G. Cochran, R. H. Myers, J. H. Hunter, W. G. Hunter และ G. E. P. Box เป็นต้น (ปารเมศ, 2545)

ในยุคแรกของการนำการออกแบบการทดลองไปใช้ประโยชน์ ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์การเกษตรและชีวภาพตามต้นกำเนิดของผู้พัฒนาวิธีการนี้ ต่อมาได้เริ่มนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 สิ้นสุดลง ก็ได้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิต เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก รวมทั้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการผลิตสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ประสบผลสำเร็จอย่างมาก (ปารเมศ, 2545)

การออกแบบการทดลองเป็นการนำปัจจัยการผลิต (Input Variables) เช่น วัตถุดิบ (Materials) เข้าสู่กระบวนการผลิต (Process) หรือระบบ (System) เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปัจจัยการผลิตดังกล่าวไปเป็นผลผลิต หรือผลตอบ (Output Responses) ที่ออกมาจากกระบวนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการผลิต หรือระบบ

ที่มา: ปารเมศ (2545)

ในกระบวนการผลิต ประกอบด้วย พนักงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ โดยเป็นไปตามลำดับขั้นตอนการผลิต เพื่อที่จะเปลี่ยนปัจจัยการผลิตให้เป็นผลผลิต ออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งมี $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factors) เช่น อุณหภูมิ เวลา ความดัน และอัตราป้อน เป็นต้น และ $z_1, z_2, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หรือควบคุมได้ยาก เช่น สภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ผลิตโดยผู้ส่งมอบ โดยที่วัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. หาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (x) ที่มีผลกระทบต่อผลตอบ (y) มากที่สุด
2. หาวิธีการตั้งค่าระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ เฉพาะที่มีผลกระทบต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ผลตอบอยู่ในค่าที่ต้องการ เช่น ค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด รวมทั้งให้ผลตอบมีความแปรปรวนน้อยที่สุด

3. หาวิธีการตั้งค่าระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ที่มีผลกระทบต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (z) มีค่าน้อยที่สุด

การหาผลกระทบของปัจจัยหรือตัวแปรดังกล่าวกับผลตอบของระบบ เรียกราววางแผน และดำเนินการทดลองนี้ว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of Experimentation) ซึ่งมีกลยุทธ์ให้เลือกใช้ได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการปรับปรุง เช่น การทดลองแบบทีละหนึ่งปัจจัย (One-Factor-at-a-Time) แต่จะไม่สามารถหาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ ขณะที่การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistically Designed Experiments) เช่น การทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทีละหลายปัจจัยไปพร้อมๆ กัน และสามารถหาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้อีกด้วย ซึ่งนำมาใช้สร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับหนึ่ง (First-Order Response Surface Model) และแบบจำลองที่มีผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Model) ได้ (ปารเมศ, 2545; Montgomery, 2009)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนา ปรับปรุง และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิต โดยสร้างแบบจำลองและทำการวิเคราะห์ปัญหา เพื่อการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบที่ต้องการ ซึ่งผลตอบที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สามารถควบคุมได้หลายปัจจัย $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้ (Myers *et al.*, 2009)

$$y_i = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon_i$$

โดยที่ ε_i คือความผิดพลาดของผลตอบ y_i ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ค่า ε_i นี้ อาจเรียกว่า ความผันแปรตามธรรมชาติของข้อมูล หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และเป็นอิสระกัน (Independent) โดยมีค่าเฉลี่ย $E(\varepsilon_i) = 0$ และความแปรปรวนคงที่ $\sigma^2(\varepsilon_i) = \sigma^2$ นั่นคือ $\varepsilon_i \sim Nid(0, \sigma^2)$ และจะได้ค่าคาดหวัง $E(y) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ ดังนั้น ฟังก์ชันพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) คือ

$$\begin{aligned} E(y) &= \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) \\ \eta &= f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \end{aligned}$$

เมื่อทำการเข้ารหัสตัวแปรธรรมชาติ $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ เปลี่ยนเป็น $x_1, x_2, \dots, x_k$ ขั้นตอนแรก
ของปัญหาพื้นผิวผลตอบ จะต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่ต้องการ หรือตัวแปรตาม
(Dependent Variable) คู่กับ ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) หรือปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นตัว
แบบหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาก่อน ซึ่งในที่นี้คือแบบจำลองการถดถอย (Regression
Model) โดยใช้ออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k หรืออาจใช้เศษส่วนของการออกแบบเชิง
แฟกทอเรียล 2^{k-p} (Fractional Factorial Design) ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับ
หนึ่ง (First-Order Response Surface Model) ได้ คือ

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_i$$

และเมื่อทำการทดลองเสริมที่จุดศูนย์กลาง (Center-Point: n_c) ประมาณ 3-5 ครั้ง เพื่อใช้
ตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยทำการตรวจสอบผลกระทบร่วมระหว่าง
ปัจจัย และผลแบบส่วนโค้ง (Quadratic) ถ้าเมื่อตรวจสอบแล้วพบว่า แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ
อันดับหนึ่งที่สร้างขึ้นไม่เพียงพอ และมีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะต้องทำการทดลองเสริม
ในแนวแกน (Axial or Star Point) มีจำนวนการทดลองเท่ากับ $2k$ ครั้ง เมื่อรวมแล้วจะมีจำนวนการ
ทดลอง $N = 2^k + n_c + 2k$ เรียกว่า การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central Composite
Design: CCD) ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับสอง (Second-Order Response
Surface Model) ได้ คือ

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i$$

แบบจำลองที่สร้างขึ้น จะนำไปสู่การประมาณค่าพารามิเตอร์ หรือสัมประสิทธิ์การถดถอย
โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method or Ordinary Least Squares: OLS) ซึ่งจะทำให้
ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่มมีค่าน้อยที่สุด และจะได้ตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง
(Unbiased Estimator) เมื่อได้ค่าประมาณของพารามิเตอร์แล้ว ก็สามารถนำมาประมาณค่าผลตอบ
ได้ตามต้องการ

โดยทั่วไปแบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับหนึ่งจะนำไปสู่การทดลองที่มีการปรับปรุงมาก
ที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด ภายใต้สภาวะ

เงื่อนไขการทำงานของระบบที่ดีที่สุดด้วย โดยใช้วิธีการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Path of Steepest Ascent) และเมื่อมาอยู่ใกล้กับอนาเขต หรือบริเวณที่จะได้ค่าที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สูงขึ้น เช่น แบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับสอง จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบได้ (ปารเมศ, 2545; Kutner *et al.*, 2004; Myers *et al.*, 2009)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^k Factorial Design)

การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต จำเป็นต้องศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตนั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป และในแต่ละปัจจัยนั้นจะมีการกำหนดระดับที่แตกต่างกันได้หลายระดับ ขึ้นอยู่กับชนิดของการออกแบบ แล้วจึงทำการทดลองก่อนที่จะสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบในการตั้งค่าหรือหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ได้ค่าผลตอบตามที่ต้องการ เช่น ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด ความสูญเสียในกระบวนการผลิตต่ำสุด หรือทั้งสองอย่างรวมกัน เป็นต้น ดังนั้นการใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในกรณีนี้จะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เนื่องจากสามารถพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากการรวมกันของระดับปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น (ปารเมศ, 2545; Myers *et al.*, 2009)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไป พร้อมๆ กัน แต่ละปัจจัยอาจมีได้หลายระดับ (Level) ที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น และนำระดับของปัจจัยนั้นตั้งแต่ 2 ปัจจัย มาใช้ร่วมกันทำให้เกิดเป็นอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Treatment Combinations or Interactions) เหล่านี้ เช่น การศึกษาอิทธิพลของ 2 ปัจจัย สมมุติให้เป็น A และ B ปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ซึ่งจะมีอิทธิพลร่วมหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B และในการทดลองจำนวนซ้ำ n หน่วย (Number of Replicates) จะประกอบด้วย Treatment รวมปัจจัยทั้งหมด ab Treatment และจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลอง (หน่วยทดลอง) เท่ากับ abn เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (ปารเมศ, 2545; อนันต์ชัย, 2549)

ในกรณีของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มากกว่า 2 ปัจจัย โดยปัจจัย A มี a ระดับ B มี b ระดับ C มี c ระดับ ต่อไปเช่นนี้เรื่อยๆ จะเกิดอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมด คือ AB ,

$AC, BC, ABC, \dots$ และในการทดลองจำนวนซ้ำ n หน่วย จะได้จำนวนข้อมูลทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc\dots n$ (ปารเมศ, 2545)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญและจำเป็นในช่วงเริ่มต้นของการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อกรองปัจจัย (Screening) ให้จำนวนปัจจัยเหลือน้อยลง คือ กรณีที่มี k ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เรียกว่า “การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^k Factorial Design)” และจะแทนระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ของแต่ละปัจจัยด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ เช่น การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเคมีและจำนวนของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ส่งผลต่อผลผลิตในกระบวนการผลิตทางเคมี เป็นการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (2^2 Factorial Design) สมมติให้ A เป็นปัจจัยความเข้มข้นของสารเคมี และมี 2 ระดับ คือ 15% และ 25% นั่นคือ 15% จะเป็นระดับ “ต่ำ” และ 25% เป็นระดับ “สูง” และ B เป็นปัจจัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีระดับเป็นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาใน 1 และ 2 ปอนด์ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน 1 ปอนด์ แทนระดับ “ต่ำ” และ 2 ปอนด์ แทนระดับ “สูง” เป็นต้น ในการออกแบบ 2^k สามารถที่จะประมาณหรือคำนวณค่าเฉลี่ยผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย และผลกระทบร่วมของระดับระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้ โดยอาศัยตารางเครื่องหมายทางพีชคณิตสำหรับการคำนวณผลดังกล่าว ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Algebraic Signs for Calculating Effects in the 2^2 Design

Treatment	Factorial Effect			
Combination	I	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
A	+	+	-	-
B	+	-	+	-
Ab	+	+	+	+

ที่มา: Montgomery (2009)

ตารางที่ 1 แสดงเครื่องหมายทางพีชคณิตของการออกแบบ 2^2 Factorial Design โดยที่ Column I ใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้งหมด ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็น “+” ทั้งหมด นั่นคือ

$$\bar{y} = b_0 = \frac{(1) + a + b + ab}{4n} = \frac{\text{Contrast}}{4n}$$

และสามารถคำนวณผลกระทบเฉลี่ยของปัจจัย A , B และ AB Interactions ได้จาก Column ของปัจจัยนั้นๆ คือ

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{(1) + b}{2n} = \frac{1}{2n} [-(1) + a - b + ab]$$

$$B = \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} = \frac{b + ab}{2n} - \frac{(1) + a}{2n} = \frac{1}{2n} [-(1) - a + b + ab]$$

$$AB = \frac{1}{2n} [(1) - a - b + ab]$$

การคำนวณผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares: SS) ของปัจจัย A , B และ AB Interaction สำหรับการออกแบบ 2^2 Factorial Design คือ

$$SS_A = \frac{1}{(n)2^2} [(Contrast)^2] = \frac{1}{4n} [-(1) + a - b + ab]^2$$

$$SS_B = \frac{1}{(n)2^2} [(Contrast)^2] = \frac{1}{4n} [-(1) - a + b + ab]^2$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{(n)2^2} [(Contrast)^2] = \frac{1}{4n} [(1) - a - b + ab]^2$$

สังเกตว่า เครื่องหมายใน Column AB นั้นได้จากกฎการคูณกันทางพีชคณิตระหว่าง Column A และ B และในแต่ละ Column ยกเว้น Column I จะมีจำนวนเครื่องหมาย “-” และ “+” เท่ากัน โดยมี Treatment Combination เรียงตามลำดับมาตรฐานของ Yates คือ (1), a , b และ ab สำหรับการออกแบบ 2^2 Factorial Design ซึ่งสามารถใช้หลักเกณฑ์นี้ขยายไปสู่การออกแบบ 2^3 , 2^4 , 2^5 , ..., 2^k Factorial Design ได้ โดยมีสูตรทั่วไปที่ใช้คำนวณผลกระทบเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองของปัจจัยทั้งหมดในการออกแบบ 2^k Factorial Design คือ

$$A, B, \dots, K = \frac{2}{(n)2^k} [Contrast_{A, B, \dots, K}]$$

$$SS_{A, B, \dots, K} = \frac{1}{(n)2^k} [(Contrast_{A, B, \dots, K})^2]$$

โดยที่ n คือ จำนวนทำการทดลองซ้ำที่ระดับและปัจจัยเดียวกัน (Number of Replicates) เพื่อใช้ตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และประมาณความผิดพลาดของการทดลอง ซึ่ง $n \geq 2$ ถ้า $n=1$ จะไม่สามารถตรวจสอบผลดังกล่าวได้ เนื่องจากผลรวมกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่มที่ได้จากการทดลองนั้น (Sum Squares Error) มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $SSE = 0$ ด้วยเหตุนี้เองจึงเรียก $n=1$ ว่า “ไม่มีการทำซ้ำ (Unreplicate)” อย่างไรก็ตาม เมื่อปัจจัยมีจำนวนมาก การทดลองเพื่อกรองปัจจัยแบบ 2^k Factorial Design จะทำการทดลองเพียง 1 Replicate ($n=1$) เท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เกิดอันตรกิริยาชั้นสูง (High Order Interaction) จำนวนหนึ่ง ซึ่งโดยปกติจะมีผลน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้ แล้วนำไปรวมเข้าด้วยกันเพื่อใช้ประมาณความผิดพลาดแทน (ปารเมศ, 2545; Montgomery, 2009)

การออกแบบการทดลองผสม (Design of Experiments with Mixture)

การออกแบบการทดลอง RSM ชนิดพิเศษ (Special Type) คือ การออกแบบการทดลองผสม ซึ่งเป็นกรณีที่แตกต่างจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่ระดับของแต่ละปัจจัยจะเป็นอิสระกันจากปัจจัยอื่นๆ ขณะที่การทดลองผสมปัจจัยต่างๆ จะเป็นองค์ประกอบของส่วนผสม ทำให้ระดับของแต่ละปัจจัยเหล่านั้นไม่เป็นอิสระกัน แต่จะเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน เช่น การหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ ที่มี q องค์ประกอบ คือ $x_1, x_2, \dots, x_q$ ดังนั้น

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, q$$

และ

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (\text{เช่น } 100\%)$$

ในการหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบต่อตัวแปรผลตอบ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด สามารถเลือกใช้การออกแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex Design) เช่น การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (Simplex-Lattice Design) หรืออาจจะใช้การออกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ (Simplex-Centroid Design) ก็ได้

การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ คือ $\{q, m\}$ Simplex-Lattice Design สำหรับอัตราส่วนผสม q องค์ประกอบ ที่ต้องการทดลองจริง กำหนดโดยโคออร์ดิเนตดังนี้ องค์ประกอบที่สมมุติขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจะใช้ $m+1$ ค่า จาก 0 ถึง 1 ที่มีระยะห่างเท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$x_i \in \left\{0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, \frac{m-1}{m}, 1\right\} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, q$$

และจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดใน $\{q, m\}$ ของการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ คือ

$$N = \binom{q+m-1}{m} = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!}$$

โดยที่ m คือ องศาการออกแบบ (Design Degree) หรือเป็นสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0-1 (0-100%)

การออกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ ได้รับการเสนอโดย Scheffe ในปี พ.ศ. 2506 (ค.ศ. 1963) ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ $x_1, x_2, \dots, x_q$ จะมี

- q องค์ประกอบ วิธีเรียงสับเปลี่ยน (Permutations) ของ $(1, 0, \dots, 0, 0)$
- q องค์ประกอบ $\binom{q}{2}$ วิธีเรียงสับเปลี่ยนของ $(1/2, 1/2, 0, \dots, 0)$
- q องค์ประกอบ $\binom{q}{3}$ วิธีเรียงสับเปลี่ยนของ $(1/3, 1/3, 1/3, 0, \dots, 0)$
- q องค์ประกอบ $\binom{q}{m}$ วิธีเรียงสับเปลี่ยนของ $(1/m, \dots, 1/m, 0, \dots, 0)$
- เมื่อ $m = q$ จุดศูนย์กลาง (Centroid) จะอยู่ที่ $(1/q, \dots, 1/q)$

และจะมีจำนวนการทดลองของ q องค์ประกอบ คือ

$$N = \sum_{i=1}^q \binom{q}{i} = 2^q - 1$$

เมื่อเปรียบเทียบกับกรอกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ จะพบว่ามีจำนวนการทดลองที่แตกต่างจากการกำหนดองศาการกรอกแบบ ขณะที่การกรอกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ ไม่สามารถกำหนดองศาการกรอกแบบได้ ทำให้จำนวนการทดลองที่เพิ่มขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม q องค์ประกอบเพียงอย่างเดียว เช่น กรณีที่มีอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ 5 ชนิด จะมีจำนวนการทดลองที่แตกต่างกันดังนี้

$$\{q, m\} = \{5, 1\} \text{ Simplex-Lattice Design: } N = \frac{(5+1-1)!}{1!(5-1)!} = 5$$

$$\{q, m\} = \{5, 2\} \text{ Simplex-Lattice Design: } N = \frac{(5+2-1)!}{2!(5-1)!} = 15$$

$$\{q, m\} = \{5, 3\} \text{ Simplex-Lattice Design: } N = \frac{(5+3-1)!}{3!(5-1)!} = 35$$

$$\{q, m\} = \{5, 4\} \text{ Simplex-Lattice Design: } N = \frac{(5+4-1)!}{4!(5-1)!} = 70$$

$$\{q, m\} = \{5, 5\} \text{ Simplex-Lattice Design: } N = \frac{(5+5-1)!}{5!(5-1)!} = 126$$

$$\text{สำหรับ Simplex-Centroid Design: } N = 2^5 - 1 = 31$$

อย่างไรก็ตาม ทั้งการกรอกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ และการกรอกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ ไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองให้กับการกรอกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ได้ จำเป็นต้องใช้การกรอกแบบ Extreme Vertices (Extreme Vertices Design) หรืออาจจะใช้การกรอกแบบการทดลองผสมแบบ D -Optimal เพราะสามารถกำหนดเงื่อนไขอัตราส่วนผสมวัตถุดิบพิเศษหลักในแต่ละกลุ่มให้กับการกรอกแบบได้ ทั้งนี้เนื่องจากเศษหลักกลุ่ม 3 และ 4 มีธาตุเคมีเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ เพราะจะเกิดการแตกหักขณะหล่อแบบหรือรีดดังได้กล่าวไว้แล้ว สำหรับเศษหลักกลุ่ม 1 เป็นเศษหลักที่ผสมกันหลายชนิด ส่วนใหญ่มีความหนาแน่นค่อนข้างดี แต่ก็มี

เคลือบโครเมียมและสังกะสีอยู่บ้าง ทำให้ไม่สามารถใช้ในการทดลองได้ 100% ส่วนเศษเหล็กกลุ่ม 2 เป็นที่ต้องการของผู้ผลิตเหล็กมาก แม้จะราคาสูงเพราะมีความหนาแน่นมาก หลอมแล้วได้ Yield ดี แต่หาได้ยาก มีปริมาณน้อยในตลาด จึงต้องสงวนไว้ใช้หลอมกับเศษเหล็กกลุ่มอื่นด้วย (Montgomery, 2009; Myers *et al.*, 2009)

เนื่องจากการออกแบบการทดลองผสม ขาดความเป็นอิสระของระดับปัจจัย ส่งผลให้มีพารามิเตอร์ (Parameters) จำนวนมากในแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ การแทนค่าอย่างเหมาะสมที่สอดคล้องกับเงื่อนไข $\left(\sum_{i=1}^q x_i = 1\right)$ จะช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ลงได้ เรียกว่า “แบบจำลองของ Scheffe” หรือ “Canonical Form” มีดังต่อไปนี้ (Myers *et al.*, 2009)

1. แบบจำลองอันดับหนึ่ง (The First-Order Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i$$

2. แบบจำลองกำลังสอง (The Quadratic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j$$

3. แบบจำลองกำลังสามเต็มรูป (The Full Cubic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \sum \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j < k} \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

4. แบบจำลองกำลังสามพิเศษ (The Special Cubic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

5. แบบจำลองกำลังสองพิเศษ (The Special Quadratic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^q \sum_{j < k} \nu_{ijk} x_i^2 x_j x_k$$

ตัวแปรกระบวนการที่ประกอบอยู่ในการทดลองผสม (Process Variables in Mixture Experiments)

Myers *et al.* (2009: 621-623) กล่าวว่า ตัวแปรกระบวนการ เป็นปัจจัยหนึ่งในการทดลองที่ไม่ใช่องค์ประกอบของส่วนผสม แต่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของการผสมนั้นด้วย ตัวอย่างเช่น ประสิทธิภาพของสารละลายที่ใช้ในการกัดผิว (Etching Solution) ไม่เพียงแต่จะเป็นฟังก์ชันของกรดสามชนิดที่ผสมกัน แต่ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการกวนด้วย โดยทั่วไป จะมีองค์ประกอบของส่วนผสม q องค์ประกอบ คือ $x_1, x_2, \dots, x_q$ และมีตัวแปรกระบวนการ p ตัว คือ $z_1, z_2, \dots, z_p$ ในกรณีของตัวอย่างการกัดผิว จะมี $q = 3$ องค์ประกอบ และมี $p = 2$ ตัว การรวมเอาตัวแปรกระบวนการเข้าไปในการทดลองผสม สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

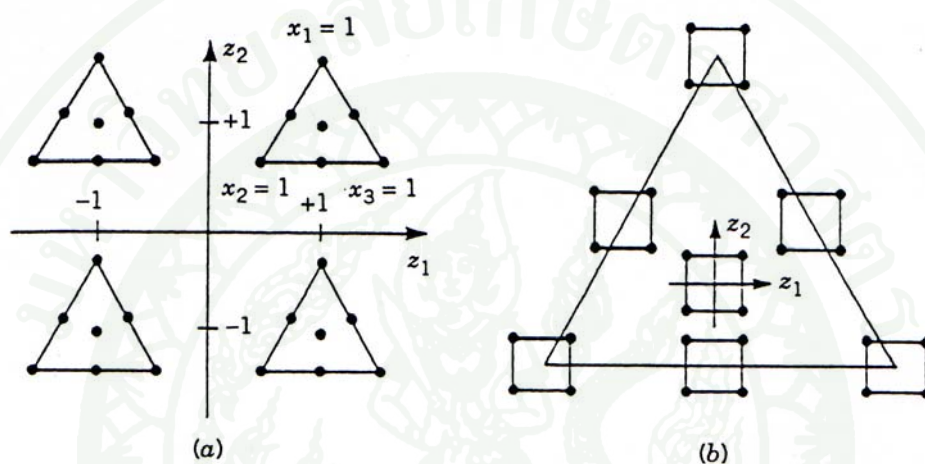
วิธีแรก เป็นการเปลี่ยนรูปแบบของตัวแปรผสมไปเป็นตัวแปรอิสระ $q-1$ ตัว เรียกว่า “Mixture-Related Variables” โดยรวมเป็นปัจจัยทั้งหมด $p+q-1$ ตัว โดยใช้อัตราส่วนขององค์ประกอบที่เปลี่ยนรูปตัวแปรผสมแล้ว เช่น กรณีการกัดผิวดังกล่าว สามารถกำหนดอัตราส่วนได้ดังนี้

$$r_1 = \frac{x_1}{x_3} \quad \text{และ} \quad r_2 = \frac{x_2}{x_3}$$

โดยมีตัวแปรกระบวนการ $z_1 =$ อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการกัดผิว และ $z_2 =$ อัตราการกวน ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางสถิติ คือ

$$\begin{aligned} E(y) = & \beta_0 + \beta_1 r_1 + \beta_2 r_2 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 \\ & + \delta_{11} r_1 z_1 + \delta_{12} r_1 z_2 + \delta_{21} r_2 z_1 + \delta_{22} r_2 z_2 \\ & + \beta_{12} r_1 r_2 + \alpha_{12} z_1 z_2 \end{aligned}$$

วิธีที่สอง เป็นการสร้างแบบจำลองทางสถิติโดยตรงจากองค์ประกอบของส่วนผสม วิธีนี้เป็นการตั้งค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองผสมที่สัมพันธ์กับแต่ละการทดลองของผลกระทบร่วมจากการใช้ตัวแปรกระบวนการในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หรือในทางกลับกัน กล่าวคือเป็นการตั้งค่าการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของตัวแปรกระบวนการที่แต่ละการทดลองของการออกแบบการทดลองผสม ดังภาพที่ 2 (a) และ (b) ตามลำดับ



ภาพที่ 2 Two different presentations of 28-point combined design for three mixture components and two process variables (a) The seven-point simplex-centroid constructed at each of $2^2 = 4$ points of the factorial arrangement. (b) A complete 2^2 constructed at each of the seven points of the simplex-centroid design.

ที่มา: Cornell (2002)

สำหรับตัวอย่างการกัณณณณณณณณณ เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^2 ร่วมกับการออกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ (Simplex-Centroid Design) ของ 3 องค์ประกอบ เรียกว่า การออกแบบผสมร่วม (Combined Design) จะมีจำนวนทั้งหมด 28 การทดลอง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองกำลังสองของตัวแปรผสม พร้อมด้วยแบบจำลองที่มีทั้งผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย ในตัวแปรกระบวนการ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
E(y) = & \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_i \sum_{<j}^3 \beta_{ij} x_i x_j \\
& + \sum_{k=1}^2 \left[\sum_{i=1}^3 \alpha_{ik} x_i + \sum_i \sum_{<j}^3 \alpha_{ijk} x_i x_j \right] z_k \\
& + \left[\sum_{i=1}^3 \delta_{i12} x_i + \sum_i \sum_{<j}^3 \delta_{ij12} x_i x_j \right] z_1 z_2
\end{aligned}$$

การออกแบบการทดลองผสมที่ใช้การออกแบบจุดศูนย์กลางผสมเพลิกซ์ หรือการออกแบบโครงตาข่ายผสมเพลิกซ์ จะไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขให้กับการทดลองได้ เนื่องจากวัตถุดิบพิเศษหลักทั้ง 4 กลุ่ม มีข้อจำกัดด้านสัดส่วนการใช้ไม่ควรเกิน 1.0 เพราะบางกลุ่มเป็นอุปสรรคต่อการหลอม ขณะที่อีกกลุ่มจำเป็นต้องสงวนไว้ใช้ จึงต้องใช้ Extreme Vertices Design หรือที่เรียกว่า การออกแบบการทดลองผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design) ซึ่งทำการทดลองบริเวณพื้นที่ที่เล็กกว่าภายในผสมเพลิกซ์ โดยกำหนดเงื่อนไขในรูปแบบของค่าขอบบน (Upper Bound: U) และ/หรือค่าขอบล่าง (Lower Bound: L) ที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสม ดังสมการ

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$$

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq U_i \leq 1 ; i = 1, 2, \dots, q$$

โดยเปลี่ยนเป็นองค์ประกอบของส่วนผสมใหม่ เรียกว่า Pseudocomponents (L -Pseudocomponents และ/หรือ U -Pseudocomponents) และเปลี่ยนกลับไปสู่องค์ประกอบของส่วนผสมเดิม (Original Components) สำหรับตั้งค่าทำการทดลองจริง (Actual Components) จากนั้นทำการตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistent) ของเงื่อนไข (Constraints) ในสมการ หากไม่สอดคล้อง (Inconsistent) จะต้องทำการปรับแต่ง (Adjusting) ให้มีความสอดคล้อง ก่อนทำการตั้งค่าแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถใช้ McLean and Anderson's (1966) Extreme-Vertices Algorithm หรือ Snee and Marquardt's (1974) XVERT Algorithm (Cornell, 2002)

การพัฒนาแบบจำลองการถดถอย

หลังการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง จะสามารถพัฒนาแบบจำลองสถิติเพื่อใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์ และใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่ในบางครั้งอาจพบว่าแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองนั้น มีขนาดใหญ่เกินไปโดยรวมเอาตัวแปรอิสระหรือพจน์ (Term) ที่ไม่มีนัยสำคัญเข้าไปด้วย สมควรที่จะพิจารณาคัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกจากแบบจำลอง และเก็บตัวแปรหรือพจน์ที่มีนัยสำคัญไว้ในแบบจำลอง การเลือกตัวแปรอิสระ และการพัฒนาแบบจำลองการถดถอยที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 4 วิธี ดังนี้ (ประไพศรี และ พงศ์ชนัน, 2551; วิรัช, 2549; สุมิตรา, 2542; Kutner *et al.*, 2004)

1. All Possible Regression เป็นการเลือกแบบจำลองการถดถอยทั้งหมดที่เป็นไปได้ จากการนำตัวแปรอิสระต่างๆ ใส่ไว้ในแบบจำลอง k ตัวแปร โดยเริ่มจากไม่มีตัวแปรอิสระอยู่ในแบบจำลองเลย แล้วเพิ่มตัวแปรอิสระ 1 ตัว ในแต่ละแบบจำลองครบทุกแบบจำลองจะได้จำนวนแบบจำลองเท่ากับ $\binom{k}{1}$ เพิ่มตัวแปรอิสระ 2 ตัว ในแต่ละแบบจำลองครบทุกแบบจำลองจะได้จำนวนแบบจำลองเท่ากับ $\binom{k}{2}$ จนถึงแบบจำลองที่มีตัวแปรอิสระครบทุกตัวจะได้แบบจำลองเท่ากับ $\binom{k}{k} = 1$ เมื่อรวมแล้วจะมีจำนวนแบบจำลองทั้งหมดเท่ากับ 2^k และใช้เกณฑ์ต่างๆ ในการพิจารณาเลือกแบบจำลอง (Criteria for Model Selection) เช่น สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R_{adj}^2) Mallows' C_p (C_p) Akaike's Information Criterion (AIC_p) Schwarz' Bayesian Criterion (SBC_p) และผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดจากการทำนาย (Prediction Error Sum of Square: $PRESS_p$) เป็นต้น โดยเกณฑ์ R^2 และ R_{adj}^2 ยิ่งมีค่าสูงแบบจำลองที่ได้ก็จะมีประสิทธิภาพ จะเลือกเกณฑ์ C_p ที่มีค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับจำนวนพารามิเตอร์ในการพัฒนาแบบจำลอง และเกณฑ์ AIC_p , SBC_p และ $PRESS_p$ ทั้ง 3 ค่านี้ ถ้ามีค่าน้อยจะทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากเกณฑ์เหล่านี้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก จำเป็นต้องตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ประกอบการพิจารณาด้วย เช่น การทดสอบการขาดความเหมาะสมกับข้อมูลของแบบจำลอง (Lack-of-Fit Test) และการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis) หรืออาจต้องพิจารณาเลือกแบบจำลองที่มีตัวแปรอิสระหรือพจน์ที่มีจำนวนน้อยกว่า เนื่องจากความมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านการคำนวณ

2. Forward Selection เริ่มจากแบบจำลองที่ไม่มีตัวแปรอิสระอยู่เลย และพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าไปในแบบจำลองทีละตัว โดยดูค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าสูงสุดจะถูกเลือกเข้ามาในแบบจำลองก่อน และแต่ละครั้งที่เพิ่มตัวแปรอิสระจะทำการทดสอบ Partial F หรือ T-Test ถ้าผลการทดสอบสรุปว่ามีนัยสำคัญจะนำตัวแปรอิสระนั้นใส่ไว้ในแบบจำลอง ซึ่งสามารถดูที่ P -Value แทนได้ โดยที่ $P\text{-Value} < \alpha$ และมีค่าน้อยที่สุดจะถูกเลือกเข้ามาในแบบจำลองก่อน และจะหยุดเมื่อตัวแปรอิสระที่เพิ่มไม่มีนัยสำคัญ

3. Backward Elimination เริ่มจากแบบจำลองเต็มรูป (Full Model) แล้วพิจารณาลดรูป (Reduced Model) โดยคัดเลือกตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญออกทีละตัว ตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญมากที่สุดจะถูกคัดเลือกออกก่อน ด้วยการทดสอบ Partial F หรือ T-Test ซึ่งสามารถดูที่ P -Value แทนได้ $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกคัดออกก่อน จากนั้นทำการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลอง และพิจารณาลดรูปจนกว่าจะไม่สามารถลดรูปได้อีก

4. Stepwise Regression เป็นการผสมผสานระหว่าง Forward Selection และ Backward Elimination โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าไปในแบบจำลอง จะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระเดิมจะสามารถอยู่ในแบบจำลองได้หรือไม่ หรือควรคัดออกไปจากแบบจำลอง

กรรมวิธีการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้า

กว่า 2 ทศวรรษที่ผ่านมา การใช้เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) สำหรับผลิตเหล็กกล้าขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างมากในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในปี 1975 มีการใช้เตาอาร์คไฟฟ้าประมาณ 20% ปี 1996 เพิ่มขึ้นเป็น 39% และในปี 2000 เป็น 50% แนวโน้มการเพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการลงทุนและการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลิตเหล็กกล้าแบบเบ็คส์ที่เริ่มจากการถลุงแร่เหล็กด้วยเตาพ่นลม (Blast Furnace: BF) ต่อด้วยเตาพ่นออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace: BOF) นอกจากนี้ EAF ยังมีความสามารถเหนือกว่า BOF ที่ใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเหล็กกล้า ขณะที่ BOF จะต้องใช้เหล็กดิบหรือน้ำเหล็กดิบเป็นวัตถุดิบหลักแทน เนื่องจากเตาอาร์คไฟฟ้าอาศัยแหล่งพลังงานจากกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก มีช่วงกว้างของการเพิ่มอุณหภูมิในเตาหลอมได้มากกว่า และมีเพียงพอที่จะหลอมละลายเศษเหล็กกล้าให้เป็นน้ำเหล็ก โดยอุณหภูมิหลอมละลาย (Melt Down) เหล็กกล้าบริสุทธิ์ มีคาร์บอน 0.02-0.03% อยู่ที่ประมาณ 1,537°C ส่วน BOF อาศัยแหล่งพลังงาน

จากออกซิเจนในการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งมีเพียงพอในการหลอมละลายเหล็กดิบที่อุณหภูมิประมาณ $1,150^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น ทำให้ EAF ผลิตเหล็กกล้าได้หลายชนิดกว่าการผลิตด้วย BOF สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของ EAF มีให้เลือกใช้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) และไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542; Kopeliovich, 2009)

เตาไฟฟ้า สามารถจัดแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เตาอาร์คไฟฟ้า และเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Arc Induction Furnace) ซึ่งเตาอาร์คไฟฟ้า ยังแบ่งได้อีก 2 ชนิด คือ เตาอาร์คโดยตรง (Direct Arc Furnace) และเตาอาร์คโดยอ้อม (Indirect Arc Furnace) (วีระพันธ์, 2537)

เตาอาร์คโดยตรง การอาร์คจะใช้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านขั้วไฟฟ้าไปยังวัตถุดิบในเตา เหมือนกับการเชื่อมไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า แท่งอิเล็กโทรด (Electrode) มีจำนวน 3 แท่ง ทำด้วยกราไฟต์ไพล์ลงมาจากส่วนบนของเตา เพื่อรับไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10,000 แอมแปร์ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 40 โวลต์ และมี 3 เฟส แท่งอิเล็กโทรดทั้ง 3 แท่ง ต่อกันเป็นวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งอิเล็กโทรดลงสู่เศษเหล็กแล้วไหลต่อไปยังแท่งอิเล็กโทรดที่เหลือจนครบวงจร เตาอาร์คโดยตรงนี้ มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าที่อยู่ในประเทศไทยทั้ง 17 ราย เพียงแต่ว่าขนาดเตาจะแตกต่างกันไป โดยมีขนาดความจุตั้งแต่ 2-3 ตัน ไปจนถึงประมาณ 400 ตัน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในวงการอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าว่า เตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

เตาอาร์คโดยอ้อม ใช้การอาร์คระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ทำให้เกิดการแผ่รังสีได้เป็นความร้อนเพื่อไปหลอมวัตถุดิบที่ต้องการ ซึ่งสามารถหลอมได้ปริมาณน้อย ครั้งละประมาณ 50-100 กิโลกรัม เท่านั้น ไม่เหมาะกับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและใหญ่ ส่วนเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า เป็นเตาขนาดเล็ก ก็ไม่เหมาะกับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและใหญ่ เช่นเดียวกับเตาไฟฟ้าชนิดอาร์คโดยอ้อม

กรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่ง หรือการผลิตเหล็กกล้าที่ใช้เตาหลอมไฟฟ้า (EAF) ซึ่งโดยปกติจะบรรจุเศษเหล็กให้มีปริมาณมากกว่าขนาดของเตาเพียงเล็กน้อย แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อไปหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นน้ำเหล็กในแต่ละครั้งที่อุณหภูมิประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ เมื่อเศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กหมดแล้ว จึงทำน้ำเหล็กให้บริสุทธิ์ (Refining) และปรับปรุงอัตราส่วนผสมธาตุ

ทางเคมี (Alloying) ขึ้นต้น ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที เรียกว่า ระยะเวลาผลิตในแต่ละรอบ (Tap-to-Tap Time: TTT) ก่อนที่จะเทน้ำเหล็กลงในเตาปรุ้งน้ำเหล็ก (Ladle Furnace: LF) ซึ่งมีอุณหภูมิเท (Tapping Temperature: TT) ประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ เพื่อปรับปรุงอัตราส่วนผสมธาตุทางเคมีขั้นสุดท้ายให้เป็นไปตามมาตรฐาน แล้วจึงไปหล่อแท่งด้วยเครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine: CCM) ได้เหล็กแท่งส่งโรงรีดเหล็กเส้นต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ในห้องควบคุม (Control Room) โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการผลิต 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การหลอมเศษเหล็ก (Melting) นำเศษเหล็กชนิดต่างๆ ที่ผ่านการคัดเลือกขนาดและแยกประเภทมาบรรจุในเตาหลอมไฟฟ้า แล้วทำการอาร์คด้วยแท่งกราไฟต์อิเล็กโทรด 3 แท่ง ให้ความร้อนเศษเหล็กจนหลอมละลายหมด จึงบรรจุเศษเหล็กเพิ่มครั้งต่อไปอีก 1-2 ครั้ง จนได้น้ำเหล็กพอดีกับความจุของเตา ใช้เวลาเดิมเศษเหล็กประมาณ 3 นาทีต่อครั้ง ในระหว่างการอาร์คจะมีการใช้หัวเผาเป็น Jet Burner ประกอบด้วยท่อออกซิเจนกับท่อก๊าซธรรมชาติ (Compress Natural Gas: CNG) ร่วมกับการพ่นออกซิเจนเข้าไปในเตาหลอม เพื่อเพิ่มพลังงานความร้อนในการหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็กได้เร็วขึ้น (เนื่องจากประกายอาร์คจากแท่งอิเล็กโทรดทำให้เศษเหล็กบริเวณที่สัมผัสกับปลายอาร์คได้รับความร้อนเพียงจุดเดียว (Cold Spot) จึงต้องใช้ Jet Burner และพ่นออกซิเจนเข้าไปเพื่อทำให้เศษเหล็กบริเวณรอบๆ ข้างเตาหลอมได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงไปพร้อมกัน) เมื่อเศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กแล้ว จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แท่งอิเล็กโทรดแล้วใส่สารสร้างตะกั่ว (Flux) และสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Ferro-Alloy) รวมทั้งการพ่นออกซิเจนเข้าไปในน้ำเหล็ก ซึ่งเป็นการทำน้ำเหล็กบริสุทธิ์ (Refining) จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในเหล็กหลอมเหลว ปฏิกิริยานี้จะช่วยลดสารมลทินต่างๆ เช่น ฟอสฟอรัส ซิลิคอน คาร์บอน ก๊าซไนโตรเจน ไฮโดรเจน โดยรวมตัวเป็นสารประกอบออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าน้ำเหล็ก เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อน จากนั้นจะทำการเติมสารลดออกซิเจน (Deoxidizer) เช่น เฟอร์โรซิลิคอน (Ferro-Si) เฟอร์โรแมงกานีส (Ferro-Mn) เพื่อลดออกซิเจนส่วนเกินในเหล็กหลอมเหลว และเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบธาตุเคมีในน้ำเหล็กขึ้นต้น สารลดออกซิเจนทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ซึ่งจะกำจัดกำมะถันออกจากเนื้อเหล็กที่มีสภาพเป็นเบส (Basic Slag) แล้วใส่หินแดงเข้าไปปรับสภาพความหนืดเพื่อช่วยให้ตะกั่ว (Slag) ไหลตัวดีขึ้น แล้วจึงเทออกทางประตูตะกั่ว (Slag Door) น้ำเหล็กที่ได้จะบริสุทธิ์ แล้วจึงเอียงเตาเทน้ำเหล็กลงถึงรับน้ำเหล็ก (Ladle) ในระหว่างการเทน้ำเหล็กนี้จะมีการโปรยสารสร้างตะกั่ว เพื่อกันไม่ให้ น้ำเหล็กสัมผัสกับออกซิเจน แล้วนำมาวางลงในเตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Ladle Furnace: LF) ที่มี

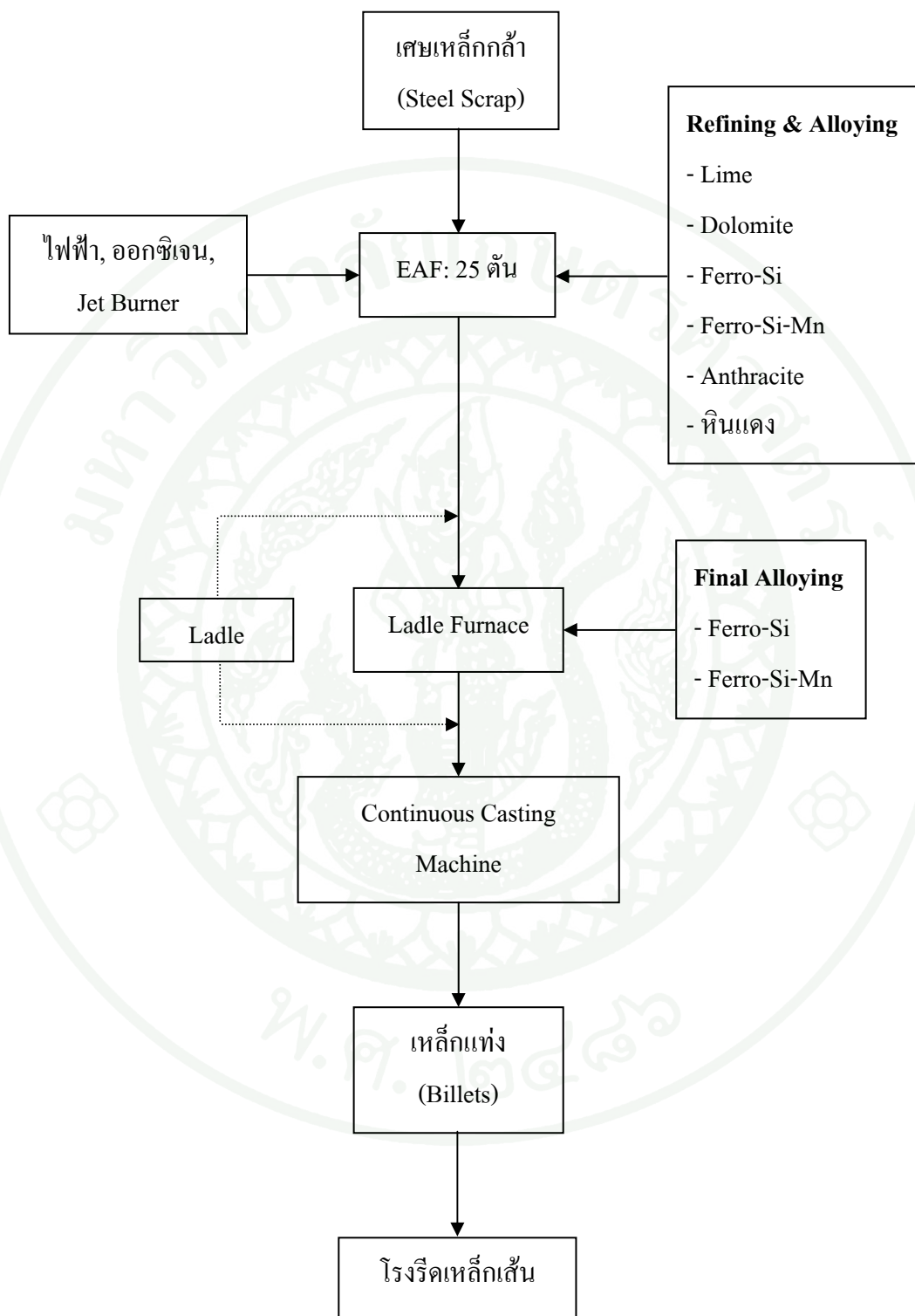
ลักษณะคล้ายฝาครอบถัง (Ladle Lid) โดยมีแท่งกราฟไฟต์อิเล็กโทรด 3 แท่ง ติดตั้งอยู่ทำหน้าที่แทนเตาหลอมไฟฟ้าในขั้นตอนการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมี (ชาญวุฒิ และ สาโรช, 2521)

2. การปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Alloying) ในเตาปรับปรุงน้ำเหล็ก โดยทำการอาร์คต่อเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ประมาณ $1,640^{\circ}\text{C}$ ขณะเดียวกันก็เป็นการอุ่นน้ำเหล็กไปในตัว และพ่นก๊าซอาร์กอนเพื่อกวนน้ำเหล็กให้ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และให้มีการกระจายตัวขององค์ประกอบเคมีในน้ำเหล็กอย่างสม่ำเสมอ แล้วจึงชักตัวอย่างน้ำเหล็กหล่อเป็นแท่งเล็กๆ นำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบธาตุเคมีด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อทราบปริมาณและองค์ประกอบธาตุทางเคมีในน้ำเหล็กแล้ว จึงใส่สารปรุงแต่งน้ำเหล็ก เช่น เฟอร์โรซิลิคอน-แมงกานีส และเฟอร์โรซิลิคอน เพื่อปรับปรุงปริมาณและองค์ประกอบธาตุเคมีให้ได้สัดส่วนผสมตามต้องการและสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) แล้วจึงยกถังรับน้ำเหล็กออกจากเตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กนำไปหล่อเป็นเหล็กแท่งที่เครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine: CCM)

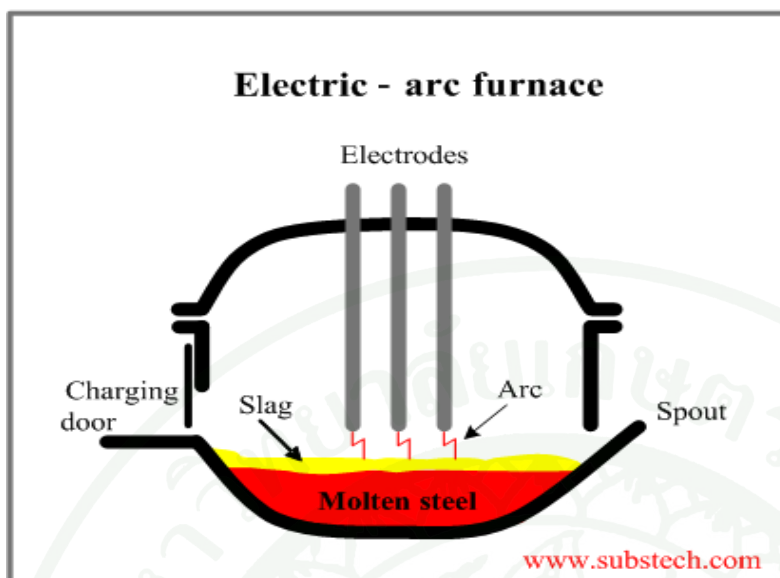
3. การหล่อเหล็กแท่ง (Casting) นำถังรับน้ำเหล็กไปหล่อแท่งด้วยเครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine: CCM) โดยยกถังรับน้ำเหล็กขึ้นวางเหนือเบ้ารับน้ำเหล็ก (Tundish) และเปิดรูระบายน้ำเหล็กที่ก้นถังรับน้ำเหล็กให้ไหลลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อระดับน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กสูงพอประมาณแล้ว จึงเปิดรูใต้เบ้ารับน้ำเหล็กให้น้ำเหล็กไหลลงไปในแบบ (Mold) ซึ่งทำด้วยทองแดงและมีน้ำหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลา น้ำเหล็กเมื่อไหลผ่านแบบ จะเริ่มแข็งตัวโดยเริ่มแข็งตัวที่ผิว และผิวที่เริ่มแข็งตัวนี้จะหุ้มน้ำเหล็กที่ยังหลอมเหลวอยู่ภายใน ขณะที่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านจะมีน้ำฉีดเพื่อให้แข็งตัวเร็วขึ้น และไหลผ่านเครื่องดึง (Withdrawal) และเครื่องตัด (Straight Toner) เพื่อให้เหล็กออกมาเป็นแท่งตรง และผ่านเข้าเครื่องตัดเหล็ก (Mechanical Shear) เพื่อตัดให้ได้ความยาวตามต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เรียกว่า เหล็กแท่ง (Billets) จัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) เหล็กแท่งที่ผลิตได้จะส่งไปยังโรงรีดเหล็กเส้นต่อไป

เหล็กแท่งที่ผลิตได้จะนำไปผ่านกระบวนการรีด (Rolling Process) ให้เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นก่อสร้าง ได้แก่ เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bars) หรือเหล็กเส้นกลม (Round Bars) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) สำหรับการผลิตเหล็กแท่งที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะนำไปใช้

เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย มอก. 24-2548 ชั้นคุณภาพ SD 30 จาก 3 ชั้นคุณภาพ คือ (1) ชั้นคุณภาพ SD 30 (2) ชั้นคุณภาพ SD 40 และ (3) ชั้นคุณภาพ SD 50 ซึ่งจะมีการกำหนดขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ภาคตัด ช่วงระหว่างบั้ง ส่วนสูงของบั้ง ความกว้างของครีบริบหรือช่องว่าง และความยาว) มวลต่อเมตร ส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากเข้และจากผลิตภัณฑ์ และคุณลักษณะที่ต้องการ เช่น เหล็กข้ออ้อยต้องมีผิวเรียบเกลี้ยง ไม่เป็นสนิม ต้องมีบั้งเปรี๊ยะห่างเท่าๆ กันตลอดทั้งเส้น และความต้านทานแรงดึง เป็นต้น โดยเหล็กแท่งที่ผลิตได้ไม่มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมรองรับเหมือนกับเหล็กข้ออ้อย ดังนั้นคุณภาพเหล็กแท่งจึงประเมินได้จากส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์น้ำเหล็กในเตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กก่อนที่จะหล่อออกมาเป็นเหล็กแท่งจะต้องมีธาตุเคมีไม่เกินจากที่ระบุไว้ในชั้นคุณภาพ SD 30 เนื่องจากธาตุเหล่านี้หากมีมากเกินไปที่ระบุไว้จะสร้างปัญหาให้กับกระบวนการถักไป และอาจมีรอยแตกจากการเย็นตัวที่เร็วกว่าปกติได้ และการตรวจสอบคุณภาพเหล็กแท่งจะต้องไม่มีรอยแตก รูปทรงไม่บิดเบี้ยว ไม่มีโพรงอากาศ เป็นแท่งตรง จึงจะสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กข้ออ้อย: ชั้นคุณภาพ SD 30 ได้ (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2547; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2511)

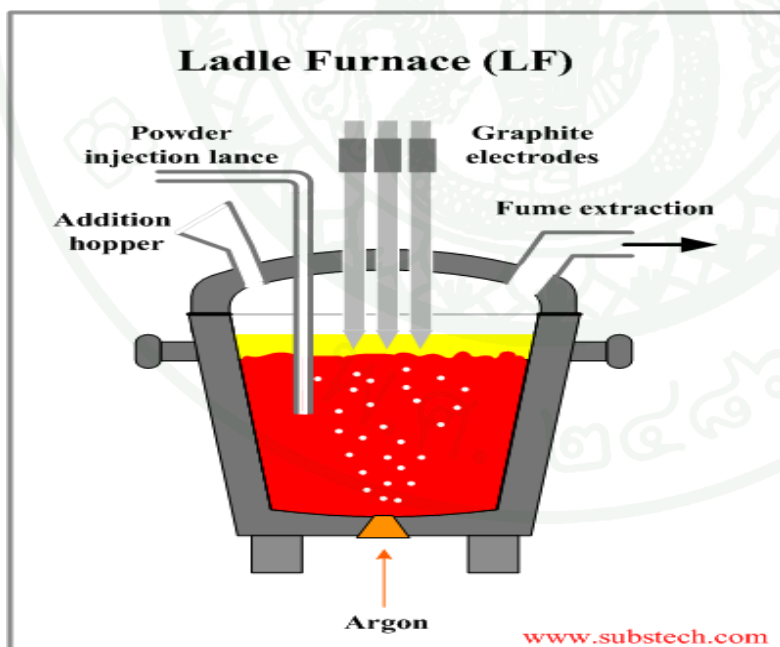


ภาพที่ 3 แผนภูมิกระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steelmaking Process Chart)



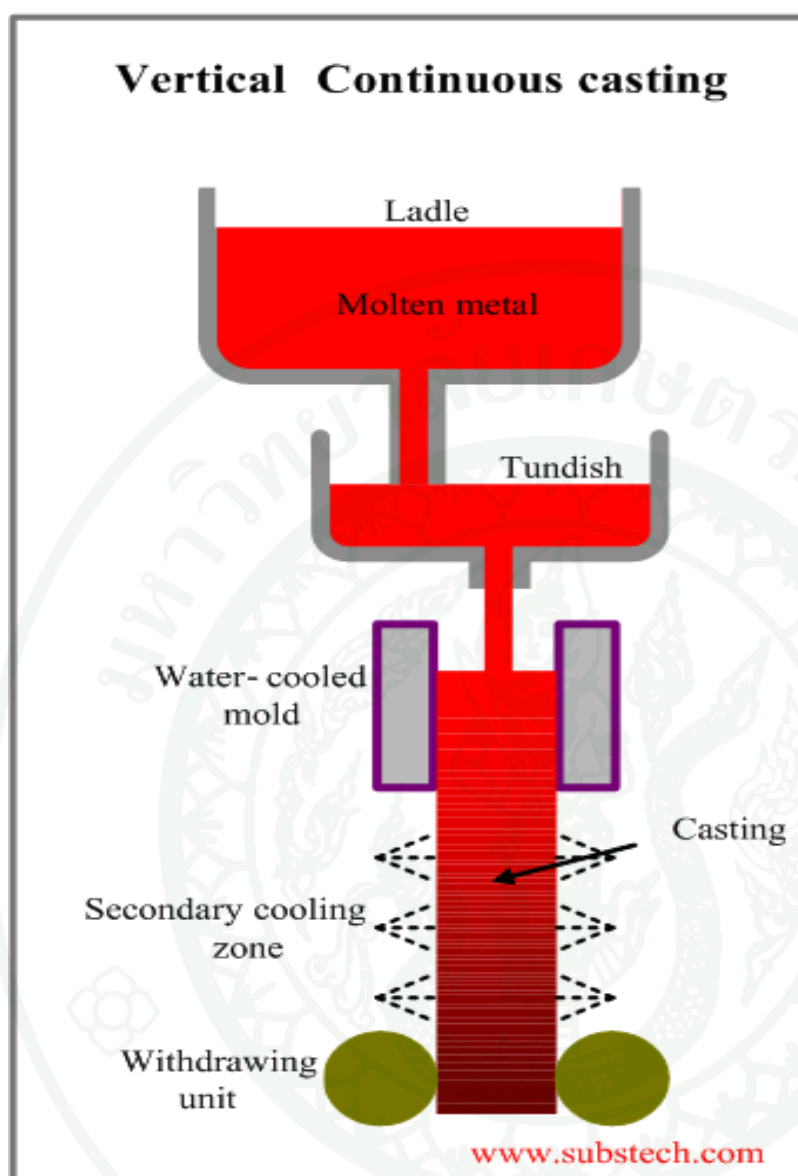
ภาพที่ 4 เตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

ที่มา: Kopelovich (2009)



ภาพที่ 5 เตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Ladle Furnace: LF)

ที่มา: Kopelovich (2009)



ภาพที่ 6 การหล่อเหล็กต่อเนื่อง (Continuous Casting)

ที่มา: Kopelovich (2009)

ในขั้นตอนการหลอมเศษเหล็ก เมื่อเศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กแล้ว โดยปกติจะทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กใน EAF สำหรับโรงงานที่ผลิตเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นเหล็กเกรดคุณภาพพิเศษ แต่ถ้าเป็นโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน จะต้องเป็นเหล็กเกรดคุณภาพพิเศษ เนื่องจากใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยานยนต์ การปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กจึงต้องทำใน LF แยกออกมาจากเตา EAF ต่างหาก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ศึกษากรรมวิธี

การผลิตเหล็กแท่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD 30 ที่มีการใช้ LF ปรับปรุงองค์ประกอบเคมีในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อลดระยะเวลาผลิตในแต่ละรอบลง โดยมีสารสร้างตะกั่วและสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Flux & Ferro-Alloy) และเชื้อเพลิงที่ใช้มีหน้าที่ดังนี้

1. เฟอร์โร-ซิลิคอน (Ferro-Si) เป็นสารที่ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอน และช่วยกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำเหล็ก แล้วแยกตัวออกมาเป็นตะกั่ว (Slag) ลอยขึ้นมาบนผิวน้ำเหล็ก
2. เฟอร์โรซิลิคอน-แมงกานีส (Ferro-Si-Mn) เป็นสารที่ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณแมงกานีส และช่วยลดออกซิเจนออกจากน้ำเหล็ก แล้วแยกตัวออกมาเป็นตะกั่วลอยขึ้นมาบนผิวน้ำเหล็ก
3. ปูนขาว (Lime: CaO) ใช้กำจัดมลทินต่างๆ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) และคาร์บอน (C) โดยดึงฟอสฟอรัสและกำมะถันออกมาในรูปตะกั่ว และดึงคาร์บอนออกมาในรูปก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งจะทำให้น้ำเหล็กเดือด เรียกว่า Carbon Boil โดยจะเป็นผลดี คือ ทำให้น้ำเหล็กเกิดการปั่นป่วน การกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ จะดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดออกซิเจนทำให้เนื้อเหล็กบริสุทธิ์ขึ้นอีกด้วย
4. หินแดง ใช้สำหรับปรับสภาพความหนืดของ Slag ช่วยให้การไหลตัวของ Slag ดีขึ้น
5. แอนทราไซต์ จัดอยู่ในกลุ่มของถ่านหิน ช่วยเพิ่มความร้อน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในน้ำเหล็ก โดยปกติจะใช้แอนทราไซด์ก้อน (Anthracite Nut) ขนาดประมาณ 1 นิ้ว ใส่พร้อมกันกับเศษเหล็ก และใช้แอนทราไซด์เกล็ด (Anthracite Breeze) ขนาดประมาณ 1-5 มิลลิเมตร นิดพ่นร่วมกับออกซิเจนขณะเป็นน้ำเหล็กหลอมเหลวแล้ว
6. Burnt Dolomite ได้จากการเผาแร่โดโลไมต์เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากน้ำเหล็ก สำหรับใช้ในการปรับสภาพความเป็นด่างหรือเบสของ Slag เพื่อลดปัญหาการสึกหรอของผนังเตา
7. ก๊าซธรรมชาติ ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle) ก่อนที่จะทำการหล่อต่อเนื่องได้เป็นเหล็กแท่ง และที่เตาอบ (Pre-Heating Furnace: RHF) เพื่ออบเหล็กแท่งก่อนนำไปรีดเป็นเหล็กเส้น

8. การใช้หัวเผา Jet Burner ซึ่งมีท่อออกซิเจนกับท่อก๊าซธรรมชาติ ใช้พ่นเข้าไปในเตาหลอม เพื่อให้หลอมเศษเหล็กได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และช่วยให้ความร้อนในบริเวณที่ความร้อนเข้าไปไม่ถึง (Cold Spot) ทำให้เศษเหล็กได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงกัน

9. ออกซิเจน (O_2) ใช้พ่นเข้าไปในเตาหลอม เพื่อให้หลอมเศษเหล็กได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เกิดภายในเตาหลอมให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

10. พลังงานไฟฟ้า ใช้ในการหลอมวัตถุดิบต่างๆ ที่อยู่ภายในเตาหลอมไฟฟ้า และใช้ในการป้อนเตาเหล็กในเตาป้อนน้ำเหล็ก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชยันต์ (2548) ศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกในการผลิตผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคาร พบว่าปัญหาสำคัญที่ควรได้รับการแก้ไข คือ การฉีดไม่เต็มชิ้นงานของชิ้นส่วนดังกล่าว แล้วนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุหรือปัจจัยที่ทำให้ชิ้นส่วนเกิดการฉีดไม่เต็มชิ้นงานด้วยแผนผังก้างปลา (Fish-Bone Diagram) ซึ่งพบว่ามี 11 ปัจจัย คือ (1) ความดันในการฉีดพลาสติก (2) ความดันด้านการถอยหลังของสกรู (3) ความเร็วในการฉีดพลาสติก (4) ความเร็วของสกรู (5) ความเร็วในการหลอมพลาสติก (6) ระยะเวลาในการฉีดพลาสติก (7) ระยะเพื่อ (8) อุณหภูมิของหัวฉีด (9) อุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนหน้า (10) อุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนกลาง และ (11) อุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนหลัง จากนั้นใช้แผนการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อกรองปัจจัยที่เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นส่วนที่เกิดจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งพบว่าเหลือ 5 ปัจจัย คือ (1) ความดันในการฉีดพลาสติก (2) ความเร็วในการฉีดพลาสติก (3) ความเร็วของสกรู (4) ความเร็วในการหลอมพลาสติก และ (5) อุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนกลาง และนำปัจจัยที่ได้มาทำการทดลองต่อเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อชิ้นส่วนที่เกิดจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงานให้มีค่าน้อยที่สุด ด้วยแผนการทดลองส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) พร้อมทั้งวิเคราะห์แบบบัญญัติ (Canonical Analysis) พบว่า มีรูปแบบเป็นจุดอานม้า (Saddle Point) และได้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 5 คือ (1) ความดันในการฉีดพลาสติกอยู่ที่ระดับ 42.50 kg/cm^2 (2) ความเร็วในการฉีดพลาสติกที่ระดับ 47.00 mm/s (3) ความเร็วของสกรูที่ระดับ 91.50 mm/s (4) ความเร็วในการหลอมพลาสติกที่ระดับ 7.67 mm/s และ (5) อุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนกลางที่ระดับ

225.00°C ทำให้ได้สัดส่วนของเสียที่เกิดจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงานเท่ากับ 1.94 หรือ 0.22% ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.10

อรรวรรณ (2549) ศึกษากระบวนการผลิตทินเนอร์ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ประกอบอยู่ในสีพ่นรถยนต์ สำหรับใช้ผสมกับสีพ่นรถยนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ระยะเวลาในการทำละลายสีและการแห้งตัวของสีเร็วที่สุด และต้นทุนต่ำสุด โดยยังคงความมีคุณภาพที่ลูกค้าพึงพอใจ จากการศึกษากระบวนการผลิตทินเนอร์ พบว่า ต้องใช้สารเคมีมาผสมกัน 7 ชนิด ได้แก่ Toluene, Methyl Ethyl Ketone, Ethyl Acetone, Acetone, Isobutyl Alcohol, Isopropyl Acetone และ Methanol สารเคมีบางชนิดมีข้อจำกัดและเงื่อนไขการใช้แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงใช้การออกแบบการทดลองผสมแบบ *D-Optimal* และกำหนดให้ Toluene เป็นตัวแปรขาด เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลเชิงสถิติจนสามารถพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของผลตอบ 3 ตัว คือ ระยะเวลาในการทำละลายสี ระยะเวลาในการแห้งตัวของสี และต้นทุน ได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) แบบจำลองกำลังสอง (Quadratic Model) และแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) ตามลำดับ แล้วใช้วิธีการหาผลตอบหลายตัวพร้อมกัน (Simultaneous Multiple Responses) กับแบบจำลองการถดถอยทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า การใช้สัดส่วน Toluene 60.0%, Methyl Ethyl Ketone 27.40%, Acetone 2.60%, Isopropanol Alcohol 2.75%, และ Methanol 7.25% จะได้ทินเนอร์สำหรับใช้ผสมกับสีพ่นรถยนต์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้กับวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ระยะเวลาในการทำละลายสีเฉลี่ย 9.30 นาที ระยะเวลาในการแห้งตัวของสีเฉลี่ย 8.91 นาที และต้นทุนเฉลี่ย 43.27 บาทต่อกิโลกรัม

นิภาส (2553) ศึกษากระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ถุงยางอนามัยด้วยเครื่อง Disc Pack เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Force) ของการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ พบว่ามี 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วสายพาน อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป อุณหภูมิในการขึ้นรูป และอุณหภูมิในการปิดผนึก จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือระดับปัจจัยทั้ง 4 ที่เหมาะสมที่ทำให้ความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ถุงยางอนามัยที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ไม่ฉีกขาดหรือเสียหาย พบว่า ความเร็วสายพาน และอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปอยู่ที่ระดับต่ำ คือ 44 ขึ้นก่อนาที และ 150°C ตามลำดับ อุณหภูมิในการขึ้นรูป และอุณหภูมิในการปิดผนึกอยู่ที่ระดับสูง คือ 170°C และ 140°C ตามลำดับ ที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น และทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Run) จากการตั้งค่าตามระดับปัจจัยทั้ง 4 ที่ได้ พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 17.84 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.28 นิวตัน และ $C_{pk} = 1.99$ ซึ่งสูงกว่าการผลิตปกติของโรงงาน หรือ ก่อนการปรับปรุงที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 12.51 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.19 นิวตัน และ $C_{pk} = 0.62$

อนันต์ และคณะ (ม.ป.ป.) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จาก ปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ นิกเกิลอะลูมินา และนิกเกิลแมกนีเซียม ปฏิกิริยาดังกล่าวนอกจากจะได้แก๊สไฮโดรเจนแล้ว ยังประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งผู้วิจัยสนใจแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ เนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเซลล์เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ โดยปัจจัยที่สนใจศึกษาและทำการทดลองภายใต้สภาวะที่ 2 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิ (300-500°C) อัตราส่วนโมลของน้ำต่อเอทานอล (3:1-6:1) และเวลาสัมผัส (0.5-1.0 mg.) ของตัวเร่งปฏิกิริยา (นาที่/มิลลิลิตร) ของสารตั้งต้น จึงใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 เก็บรวบรวมข้อมูลค่าผลตอบของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ในหน่วยแก๊สที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ และสรุปได้ว่า ภาวะที่อุณหภูมิและเวลาสัมผัสอยู่ที่ระดับสูง อัตราส่วนโมลของน้ำต่อเอทานอลอยู่ที่ระดับต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิลอะลูมินา และภาวะที่อุณหภูมิและอัตราส่วน โมลของน้ำต่อเอทานอลอยู่ที่ระดับสูง เวลาสัมผัสอยู่ที่ระดับต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิลแมกนีเซียม จะทำให้ได้ผลผลิตเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง โดยเป็นไฮโดรเจนมากกว่า 85% และคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 1% ซึ่งไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกและทดแทนแหล่งพลังงานอื่นในเครื่องยนต์ได้

Menezes *et al.* (2008: 3027-3039) พัฒนาสูตรที่ได้จากกากของเสียในกระบวนการผลิตดินขาว (Kaolin Processing) และหินแกรนิต (Granite Sawing Wastes) ร่วมกับดินแดง (Commercial Red Clay) สำหรับใช้ผลิตกระเบื้องเซรามิกส์ด้วยวิธี Wet Process และเผาอบที่อุณหภูมิ 1,000°C 1,100°C และ 1,150°C และทำการทดสอบคุณสมบัติ 3 ด้าน คือ การดูดซับน้ำ (Water Absorption) การหดตัวเมื่อถูกเผา (Linear Firing Shrinkage) และมอดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) โดยใช้การออกแบบการทดลองผสมกับส่วนผสม 3 ชนิดดังกล่าว คือ {3,2} Centroid Simplex-Lattice Design, Augmented with Interior Points ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง (Replicates) รวมเป็น $10 \times 4 = 40$ การทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ และพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของแต่ละผลตอบ 3 ค่า ที่แต่ละอุณหภูมิเผาอบ 3 ค่า รวม 9 สมการ พร้อมทั้งวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่า การใช้กากของเสีย (Granite & Kaolin Wastes)

ประมาณ 62% ขึ้นไป สามารถนำไปผลิตกระเบื้องเซรามิกส์ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้พล็อตกราฟ Response Trace Plot เพื่อวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) อีกด้วย

Yahiaoui (2010) ศึกษากระบวนการแยกทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยผลตอบที่ต้องการ คือ ให้มีเศษทองแดงที่อยู่ในทองแดงไอออน (Residual Concentrations of Cu^{2+}) น้อยที่สุด (y) ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการให้ผลผลิตทองแดงที่ได้มีมวลเพิ่มขึ้น และพบว่ามี 5 ปัจจัย ที่มีผลโดยตรง คือ ความเข้มข้นของทองแดงไอออนเริ่มต้น (Initial Concentration of Copper Ions: Cu^{2+} : x_1) อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (x_2) และอัตราการไหลในปฏิกิริยาเคมีของทองแดง (x_3) โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งใช้เป็นการทดลองเบื้องต้น และให้ปัจจัยที่เหลืออีก 2 ปัจจัยเป็นค่าคงที่ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายเคมี คือ pH 3 และเวลาในการทดลอง 180 นาที ซึ่งได้จากการศึกษาทฤษฎีจนศาสตร์แล้วว่าเป็นค่าที่เหมาะสม จากนั้นทำการทดลองจริงกับกระบวนการให้เป็นไปตามแผนการทดลอง 2^3 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติจนสามารถพัฒนาแบบจำลองอันดับ 1 ได้ดังสมการ

$$\hat{y} = 3.8813 + 2.4566x_1 + 0.1895x_2 - 0.4226x_3 \\ + 0.6965x_1x_3 + 0.4375x_2x_3 - 0.4269x_1x_2x_3$$

และผู้วิจัยสรุปจากสมการได้ว่าปัจจัย x_1 , x_2 , x_3 , x_1x_3 , x_2x_3 และ $x_1x_2x_3$ มีอิทธิพลต่อ y อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย คือ x_1x_2 ที่ไม่ได้อยู่ในสมการ ไม่มีนัยสำคัญต่อ y

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

1. เตาหลอมไฟฟ้า หรือเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)
2. เครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine: CCM)
3. เครื่องคอมพิวเตอร์
4. เครื่องพิมพ์
5. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ MiniTab 16 (Free trial 30 days)

วิธีการ

1. ทำความเข้าใจกับปัญหา (Recognition of and Statement of the Problem)

เมื่อมีปัญหามาเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์เพื่อหาปัญหาที่มีความสำคัญมากที่สุด หรือเป็นปัญหาที่นำมาซึ่งขาดความสามารถในการแข่งขัน ให้ได้รับการแก้ไขก่อน แล้วปัญหาเล็กๆ จะได้รับการคลี่คลายไปโดยอัตโนมัติ การที่จะเลือกว่าปัญหาใดเป็นปัญหาสำคัญที่ควรได้รับการแก้ไขก่อน ควรนำหลักการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) พัฒนาโดย อัลเฟรโด พาราโต พ.ศ. 2391-2466 แล้ววิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause-and-Effect Diagram) พัฒนาโดย คาโอริ อิชิกาวา ในปี พ.ศ. 2496 ดังนั้น การจะเข้าใจปัญหาได้อย่างถ่องแท้จึงควรศึกษาระบบหรือกระบวนการอย่างละเอียด สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาระบบวิธีการผลิตเหล็กแท่งที่ใช้เตาหลอมไฟฟ้า (EAF) และขอคำปรึกษาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากวิศวกรโลหการฝ่ายโรงหลอมของโรงงานผลิตเหล็กแท่ง เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลองที่จะทำการแก้ไขปัญหานั้น (สุภชัย, 2551)

2. เลือกตัวแปรผลตอบ (Selection of the Response Variable)

จากการศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่ง และจากประสบการณ์ในการตรวจโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าจำนวน 17 ราย ร่วมกับการระดมสมอง (Brain Storming) ของวิศวกรและช่างเทคนิคในโรงงานผลิตเหล็กแท่ง พบว่า วัตถุดิบหลักได้แก่เศษเหล็กกล้าที่มีหลายเกรดคุณภาพ ทั้งส่วนผสมทางเคมีหรือเรียกว่าความสะอาด และลักษณะทางกายภาพ ซึ่งมีความแปรปรวนไปมาก ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต (y_1 : %Yield Recovery) และได้พิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (y_2 : kWh/kg) ซึ่งเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตโดยตรง กล่าวคือ เศษเหล็กที่มีความสะอาดและลักษณะทางกายภาพมีความหนาแน่นมากจะมีราคาแพง ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตสูง ในทางตรงกันข้าม เศษเหล็กที่มีส่วนผสมธาตุเคมีที่สูงและมีความหนาแน่นน้อยจะมีราคาที่ต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ โดยส่วนผสมทางเคมีจะสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพและผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และลักษณะทางกายภาพสัมพันธ์กับผลผลิตที่ได้ เนื่องจากเศษเหล็กที่ไม่สะอาดทำให้ต้องใส่สารสร้างตะกรันและสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กมากไปตามสัดส่วนเพื่อลดมลทินในน้ำเหล็กและปรับปรุงองค์ประกอบเคมีให้เป็นไปตามมาตรฐาน ก่อนส่งต่อไปยังกระบวนการรีดเป็นเหล็กเส้นก่อสร้าง มิฉะนั้นจะเกิดการแตกระหว่างการหล่อแบบ ดังนั้นผลตอบที่ต้องการมี 2 ตัว คือ ประสิทธิภาพการผลิต (y_1) ให้มีค่าสูงสุด และการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (y_2) ให้มีค่าต่ำสุด เป็นไปตามสมการ

$$y_1 = \frac{Billets(kg)}{Scrap(kg) + Flux(kg) + FerroAlloy(kg)} \times 100\%$$

$$y_2 = \frac{Energy(kWh)}{Billets(kg)}$$

โดยที่ *Billets* คือ เหล็กแท่ง เป็นผลผลิตที่ได้ (Output)

Scrap คือ เศษเหล็กมี 4 กลุ่ม เป็นวัตถุดิบหลัก (Input)

Flux และ *Ferro Alloy* คือ สารสร้างตะกรัน และสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กตามลำดับ เป็นวัตถุดิบรอง (Input)

Energy คือ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

3. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors, Levels and Range)

ความรู้ ประสบการณ์ และการระดมสมองที่ได้จากการศึกษากระบวนการผลิตเหล็กแท่งที่ใช้เตาหลอมไฟฟ้า รวมทั้งทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถพิจารณาเลือกปัจจัยที่มีผลต่อ y_1 และ y_2 ได้ดังนี้

1. วัตถุดิบหลัก ได้แก่ เศษเหล็ก ซึ่งทางโรงงานผลิตเหล็กแท่งที่เข้าไปศึกษาทำวิจัยนี้ ได้จัดแบ่งกลุ่มเศษเหล็กเป็น 4 กลุ่ม (ภาพผนวกที่ ก1 ถึง ก6) ราคาขึ้นอยู่กับคุณภาพเศษเหล็กในแต่ละกลุ่ม มีขนาด ความหนา และรูปร่างแตกต่างกัน เป็นลักษณะทางกายภาพของเศษเหล็กที่มีผลโดยตรงต่อผลผลิต ส่วนองค์ประกอบเคมีของเศษเหล็กจะมีผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำเหล็กและผลผลิตที่ได้ ดังนั้นการหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็กจึงเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ก่อนที่จะใส่ลงไปในเตาหลอมไฟฟ้า

2. วัตถุดิบรอง ได้แก่ สารสร้างตะกรัน และสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก ปริมาณการใส่สารสร้างตะกรัน และสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กหลังจากที่เศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กแล้ว ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารมลทินที่อยู่ในน้ำเหล็ก โดยพิจารณาได้จากหน้าจอบคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในห้องควบคุม ซึ่งเป็นเทคนิคและความชำนาญเฉพาะตัวของวิศวกรฝ่ายโรงหลอม ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

3. การใช้ Jet Burner และการฟั่นออกซิเจน เพื่อช่วยหลอมละลายให้เศษเหล็กเป็นน้ำเหล็กได้เร็วขึ้น และเมื่อเศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กแล้ว จะมีการฟั่นออกซิเจนเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในการกำจัดมลทินต่างๆ ออกจากน้ำเหล็ก ปริมาณการใช้และความเร็วในการฟั่นเป็นเทคนิคและความชำนาญเฉพาะตัวของพนักงานควบคุมเตาหลอม ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

4. พนักงาน จากการศึกษา พบว่า พนักงานควบคุมเตาหลอมไฟฟ้าจะเป็นวิศวกรโลหการที่มีความรู้ ประสบการณ์ และความชำนาญ ประกอบกับการใช้คอมพิวเตอร์ที่อยู่ในห้องควบคุมเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงในการปฏิบัติงานเป็นหลัก เช่น การใส่สารสร้างตะกรัน และสารปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก ซึ่งปริมาณการใช้จะเป็นไปตามสัดส่วนน้ำเหล็กที่ได้ในแต่ละรอบของการหลอม ปริมาณการใช้ Jet Burner และออกซิเจน และความเร็วในการฟั่น ก็เช่นเดียวกัน เป็นประสบการณ์

เฉพาะตัวของช่างเทคนิคที่ไม่สามารถควบคุมเพื่อทำการทดลองได้ แต่พนักงานสามารถควบคุมค่าเหล่านี้ได้ดังเหตุผลข้างต้น

5. วิธีการปฏิบัติงาน ได้แก่ การใส่เศษเหล็กเข้าไปในเตาหลอมไฟฟ้า แล้วกดแท่งกราไฟต์ อิเล็กโทรดทำการอาร์คกับเศษเหล็กจนหลอมละลายเป็นน้ำเหล็ก จึงเปิดฝาเตาเพื่อใส่เศษเหล็กเพิ่มอีก 1-2 ครั้ง จนได้น้ำเหล็กเต็มเตา การเปิดฝาดังนี้จะทำให้สูญเสียพลังงานความร้อน จึงควรรีบปิดฝาเตา จากการศึกษาพบว่าใช้เวลาเปิด-ปิดฝาเตาเพียง 3 นาทีต่อครั้ง หากสามารถควบคุมให้ต่ำกว่านี้ รวมทั้งลดจำนวนครั้งในการเปิด-ปิดฝาเตาได้จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อน และทำให้ Tap-to-Tap Time ลดลงด้วย การเปิด-ปิดฝาดังนี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะทางกายภาพของเศษเหล็ก หากเศษเหล็กมีขนาดใหญ่จะทำให้เศษเหล็กล้นเตา เวลาในการเปิด-ปิดฝาเตาจึงอาจต้องเลื่อนออกไป ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องควบคุมการผสมเศษเหล็กทางลักษณะทางกายภาพควบคู่ไปกับการเปิด-ปิดฝาเตาหลอม และเศษเหล็กแต่ละชั้นที่ทับถมกันมีความหนาแน่นดี ไม่โปร่ง จะช่วยให้การหลอมเศษเหล็กเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังนี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ซึ่งยังคงทำให้ช่างเทคนิคควบคุมจำนวนครั้งและเวลาการเปิด-ปิดฝาเตาไว้ได้ แต่ปัจจัยนี้ไม่สามารถควบคุมเพื่อทำการทดลองได้

6. เครื่องจักร ได้แก่ เตาหลอมไฟฟ้า (EAF) ถังรับน้ำเหล็ก (Ladle) เตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (LF) และเครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง (CCM)

6.1 เตาหลอมไฟฟ้า ใช้ระยะเวลาผลิตในแต่ละรอบ (Tap-to-Tap Time) ประมาณ 60 นาที โดยเริ่มจากหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็ก ทำน้ำเหล็กให้บริสุทธิ์ และปรับส่วนผสมเคมีขึ้นต้น และในการหลอมเศษเหล็กต้องคำนึงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของเศษเหล็กที่ใช้ด้วย โดยเหล็กกล้าบริสุทธิ์ที่มีคาร์บอน 0.02-0.03% อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ $1,537^{\circ}\text{C}$ และหากมีคาร์บอนประมาณ 4.3% อุณหภูมิหลอมเหลวลดลงเหลือประมาณ $1,130^{\circ}\text{C}$ (วาระพันธ์, 2537) จากการศึกษาพบว่า การหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็กจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเศษเหล็ก หากเศษเหล็กมีความหนาแน่นและขนาดใหญ่จะทำให้เวลานานขึ้น แต่การผลิตปกติของโรงงานใช้เวลาประมาณ 60 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ (รวมจำนวนครั้งและเวลาเปิด-ปิดฝาเตาหลอม) หากเร่งให้หลอมเร็วขึ้นกว่านี้ อาจส่งผลเสียต่อหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) และสามารถทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ได้แต่ไม่ควรเกิน 70 นาที เพราะจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า การทิ้งไว้นี้อาจช่วย

ทำให้ความร้อนและส่วนผสมเคมีกระจายตัวในน้ำเหล็กอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ลดระยะเวลาผลิตในขั้นตอนถัดไป ดังนั้น Tap-to-Tap Time จึงเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และควรตั้งค่าระดับอยู่ระหว่าง 60-70 นาที หลังการปรับส่วนผสมขึ้นต้นแล้ว สำหรับปัจจัยด้านอุณหภูมิเทก็เช่นเดียวกัน เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และตั้งค่าระดับได้ระหว่าง 1,600-1,630°C เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่า 1,600°C อาจทำให้น้ำเหล็กไหลตัวได้ไม่ดี อันเป็นเหตุให้ y_1 ลดลง และถ้าอุณหภูมิเกินกว่า 1,630°C จะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ทำให้ y_2 เพิ่มขึ้น ดังนั้น การศึกษาการทดลองของอุณหภูมิระหว่าง 1,600-1,630°C จึงเป็นการศึกษาการไหลตัวที่ดีของน้ำเหล็ก และเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาครั้งแรกในการค้นหาสภาพการผลิตตามปกติของกระบวนการจึงใช้ 2 ระดับก่อน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การตั้งค่าระดับของปัจจัย

Factors	Factors Levels	
	Low (-1)	High (+1)
Tap-to-Tap Time: $TTT = z_1$ (minutes)	60	70
Tapping Temperature: $TT = z_2$ (°C)	1,600	1,630

6.2 ถังรับน้ำเหล็ก เป็นเพียงอุปกรณ์เสริมช่วยการผลิต สำหรับรับ-ส่งถ่าน้ำเหล็กระหว่าง EAF กับ LF และ LF กับ CCM

6.3 เตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก จะมีแท่งกราฟไฟต์อิเล็กโทรด 3 แท่ง เช่นเดียวกับ EAF ใช้เพื่อปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีขั้นสุดท้าย โดย LF จะรับน้ำเหล็กมาจาก Ladle ที่ได้จาก EAF ซึ่งมีความสะอาดและส่วนผสมทางเคมีพร้อมแล้ว การปรับแต่งนี้จึงกระทำเพียงเล็กน้อย และอาศัยก๊าซเฉื่อย คือ อาร์กอน ฉีดพ่นเข้าที่ก้น LF เพื่อให้ส่วนผสมทางเคมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำเหล็ก และเป็นการรักษาอุณหภูมิให้มีความสม่ำเสมอและให้ได้ตามที่กำหนด คือ 1,640°C แล้วจึงเทน้ำเหล็กลง Ladle ก่อนไปหล่อเป็นเหล็กแท่ง การควบคุมเวลาและอุณหภูมิที่ LF นี้ สามารถทำได้ เช่นเดียวกับ EAF แต่จากประสบการณ์ของวิศวกรควบคุมเตาที่ได้กำหนดอุณหภูมิของ LF อยู่ที่ 1,640°C เพื่อให้อุณหภูมิลดลงไม่เกินจาก 1,600°C อันจะเป็นเหตุให้น้ำเหล็กหนืด สาเหตุจากการเผื่อนี้ เนื่องจากไม่สามารถหล่อเป็นเหล็กแท่งที่ CCM ได้โดยตรง จะต้องเทน้ำเหล็กลงสู่ Ladle ก่อน และต่อเนื่องไปยัง Tundish และ Mold ตามลำดับ

6.4 เครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง น้ำเหล็กจาก Ladle จะไหลลงสู่ Tundish เมื่อระดับน้ำเหล็กที่อยู่ใน Tundish ได้ระดับพอประมาณแล้ว จึงเลื่อนเปิดรูที่กั้น Tundish ให้ไหลลงสู่ Mold ต่อไป ซึ่งจะมีน้ำหล่อเย็นที่ Mold ตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อนจาก Mold และทำให้น้ำเหล็กเริ่มแข็งตัวที่ผิวก่อน เมื่อหลุดจาก Mold แล้ว จะมีการพ่นน้ำระบายความร้อนจนเหล็กแข็งตัวหมดได้เป็นเหล็กแท่ง ขั้นตอนจากน้ำเหล็กที่มืองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐานแล้ว นำมาหล่อที่ CCM จากการศึกษพบว่า มีการสูญเสีย น้ำเหล็กจากขั้นตอนนี้เพียง 1-2% เท่านั้น ไม่มีการตัดหัวท้ายของเหล็กแท่ง

สรุปได้ว่า มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อ y_1 และ y_2 โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ เพื่อทำการทดลองมี 3 ปัจจัย คือ เศษเหล็ก อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก และ Tap-to-Tap Time โดยที่อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก และ Tap-to-Tap Time เป็นปัจจัยกระบวนการ (Process Variables) สามารถตั้งค่าได้จาก EAF โดยตรง ส่วนเศษเหล็กนั้นเป็นวัตถุดิบที่ป้อนลงสู่ EAF ต้องใช้การออกแบบการทดลองผสม เพื่อตั้งค่าอัตราส่วนผสมเศษเหล็กในการทดลอง อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ อาศัยประสบการณ์ และความชำนาญของวิศวกรโลหการฝ่ายควบคุมโรงหลอม พร้อมทั้งใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการผลิตให้มีความเที่ยงตรง เพื่อให้ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ มีผลต่อ y_1 และ y_2 น้อยที่สุด

4. เลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อ y_1 และ y_2 โดยการหาอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสร้าง Extreme Vertices Design เลือก Design Degree: 1 และกำหนดเงื่อนไขการทดลองให้กับการออกแบบด้วย และปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ 2 ปัจจัย ใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล และนำการออกแบบทั้ง 2 ส่วนมารวมกัน เพื่อทำการทดลองในชุดเดียวกัน เรียกว่า Extreme Vertices Design with Two Process Variables

การกำหนดเงื่อนไขการทดลองให้กับการออกแบบ Extreme Vertices Design สำหรับบริหารจัดการอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็ก 4 กลุ่ม โดยการพิจารณาของวิศวกรควบคุมเตาหลอม และช่างเทคนิคที่มีประสบการณ์ สามารถสรุปเหตุผลที่ใช้ในการพิจารณา ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. เศษเหล็กกลุ่ม 1 (x_1) แม้ว่าจะมีค่อนข้างมากในตลาดภายในประเทศ และมีความหนาแน่น (Density) ค่อนข้างดี เมื่อหลอมจะได้ % Yield Recovery ดี ตามสภาพความหนาแน่นของเศษเหล็ก แต่เศษเหล็กกลุ่มนี้มีการเคลือบโครเมียมอยู่บ้าง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการหลอม จึงไม่สามารถใช้ในปริมาณมาก หรือ 100% ได้ จึงกำหนดสัดส่วนการใช้อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.85 หากมีปริมาณเศษเหล็กกลุ่มนี้มากกว่า 0.85 จะต้องใส่สารสร้างตะกั่วในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อกำจัดมลทินของโครเมียม จนทำให้ต้นทุนการผลิตสูงเกินไป และหากใช้น้อยกว่า 0.4 จะต้องเพิ่มเศษเหล็กกลุ่ม 2 มากขึ้น จนทำให้ต้นทุนสูงขึ้น และอาจขาดแคลนในการผลิตครั้งต่อไป

2. เศษเหล็กกลุ่ม 2 (x_2) มีความหนาของแผ่นเหล็กมาก จึงมีความหนาแน่นมากด้วย หลอมแล้วได้ % Yield Recovery ดีมาก โรงงานผลิตเหล็กแท่งด้วยเตาหลอมไฟฟ้ามีความต้องการเศษเหล็กกลุ่มนี้มากที่สุด จึงเกิดการขาดแคลน และส่งผลให้มีราคาแพงสุด จึงจำเป็นต้องสงวนไว้ใช้ในการผลิตครั้งต่อไป โดยกำหนดสัดส่วนการใช้ไม่เกิน 0.35

3. เศษเหล็กกลุ่ม 3 (x_3) และกลุ่ม 4 (x_4) เป็นเศษเหล็กบาง ความหนาแน่นจึงต่ำ มักมีสนิมอยู่บ้าง เศษเหล็กกลุ่มนี้มีมากในตลาด และราคาค่อนข้างถูก แต่ใช้ในปริมาณมากไม่ได้ เนื่องจากหลอมแล้วได้ % Yield Recovery ต่ำ ไม่คุ้มกับต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังมีธาตุโลหะอื่นเจือปนอยู่ เช่น ดีบุก (Sn) โครเมียม (Cr) สังกะสี (Zn) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการหลอม อาจทำให้เกิดการแตกหักขณะหล่อแบบด้วย CCM หากใช้ในปริมาณมากเกินไปกว่าค่าที่กำหนด ค่าที่กำหนดให้นี้มาจากประสบการณ์ของวิศวกรฝ่ายโรงหลอมของโรงงาน โดยกำหนดสัดส่วนการใช้ไม่เกิน 0.25

จากเหตุผลดังกล่าวสามารถกำหนดเงื่อนไขอัตราส่วนผสมเศษเหล็กได้ดังนี้

$$0.4 \leq x_1 \leq 0.85$$

$$0.0 \leq x_2 \leq 0.35$$

$$0.0 \leq x_3 \leq 0.25$$

$$0.0 \leq x_4 \leq 0.25$$

จากการกำหนดเงื่อนไขอัตราส่วนผสมเศษเหล็กดังกล่าว และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสร้าง Extreme Vertices Design เลือก Design Degree: 1 จะได้ 10 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Extreme Vertices Design, Design Degree: 1= 10 Design Points

Run	Scrap Mix of Proportions			
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0.4	0.35	0	0.25
2	0.4	0.35	0.25	0
3	0.85	0	0	0.15
4	0.75	0	0	0.25
5	0.4	0.1	0.25	0.25
6	0.5	0	0.25	0.25
7	0.85	0	0.15	0
8	0.75	0	0.25	0
9	0.85	0.15	0	0
10	0.65	0.35	0	0

กำหนด Extreme Vertices Design จำนวน 10 การทดลอง ที่แต่ละระดับของ 2^2 Factorial Design หรือในทางกลับกัน จะได้ 40 การทดลอง และทำซ้ำอีก 3 การทดลอง (Replicates) รวมเป็น 120 การทดลอง

5. ทำการทดลอง (Performing the Experiment)

ตั้งค่าตามที่ได้วางแผนการทดลองไว้ในข้อ 4 เพื่อทำการทดลองจริงกับกรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่งที่ใช้เตาอาร์คไฟฟ้า และเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 120 การทดลอง

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis of the Data)

นำข้อมูลที่รวบรวมได้ในข้อ 5 มาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ดังนี้

1. ตรวจสอบความถูกต้องตามข้อสมมุติก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยตัวแปรสุ่ม y_1 และ y_2 ต้องมีการแจกแจงปกติ เป็นอิสระ และความแปรปรวนคงที่ หากไม่เป็นไปตามข้อสมมุติ จำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Data Transformation) เพื่อให้ตัวแปรสุ่มดังกล่าวเป็นไปตามข้อสมมุติ และจึงใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนกับข้อมูลที่แปลงแล้ว แต่เมื่อจะสร้างแบบจำลองทางสถิติต้องแปลงกลับไปยังข้อมูลเดิม (อนันต์ชัย, 2549)

2. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Estimated Regression Coefficients) และการทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว (Test of Significant on Individual Regression Coefficients)

3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

4. พัฒนาแบบจำลองการถดถอย (Regression Model) หรือแบบจำลองพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Model)

5. การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ในการพยากรณ์หรือประมาณค่าผลตอบ และใช้ในการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimizer) เช่น การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Analysis of Residuals) และการทดสอบการขาดความเหมาะสมของแบบจำลอง (Lack-of-Fit Test) เป็นต้น

6. วิเคราะห์กราฟชนิดต่างๆ จากแบบจำลองที่พัฒนาได้ ได้แก่ กราฟผลกระทบหลัก (Main Effects Plot) กราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) กราฟเส้นโครงร่าง (Contour Plot) กราฟพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface) และกราฟของ Cox Response Trace Plot เป็นต้น เพื่อการประมาณค่าผลตอบ y_1 และ y_2 และทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบทั้ง 2 ตัว พร้อมกัน (Simultaneous Multiple Response Optimizer or Single Composite Response) เพื่อการตั้งค่าอัตราส่วนผสมหลัก พร้อมกับตั้งค่าระดับของ TTT และ IT ให้ได้ค่า y_1 มากที่สุด (Maximize) และ y_2 น้อยที่สุด (Minimize)

7. สรุปและขอเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations)

สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น รวมทั้งทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Run) และตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่ได้



ผลและวิจารณ์

ผล

ข้อมูลที่รวบรวมได้จาก Extreme Vertices Design with two Process Variables จำนวน 120 ข้อมูล นำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลการทดลอง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

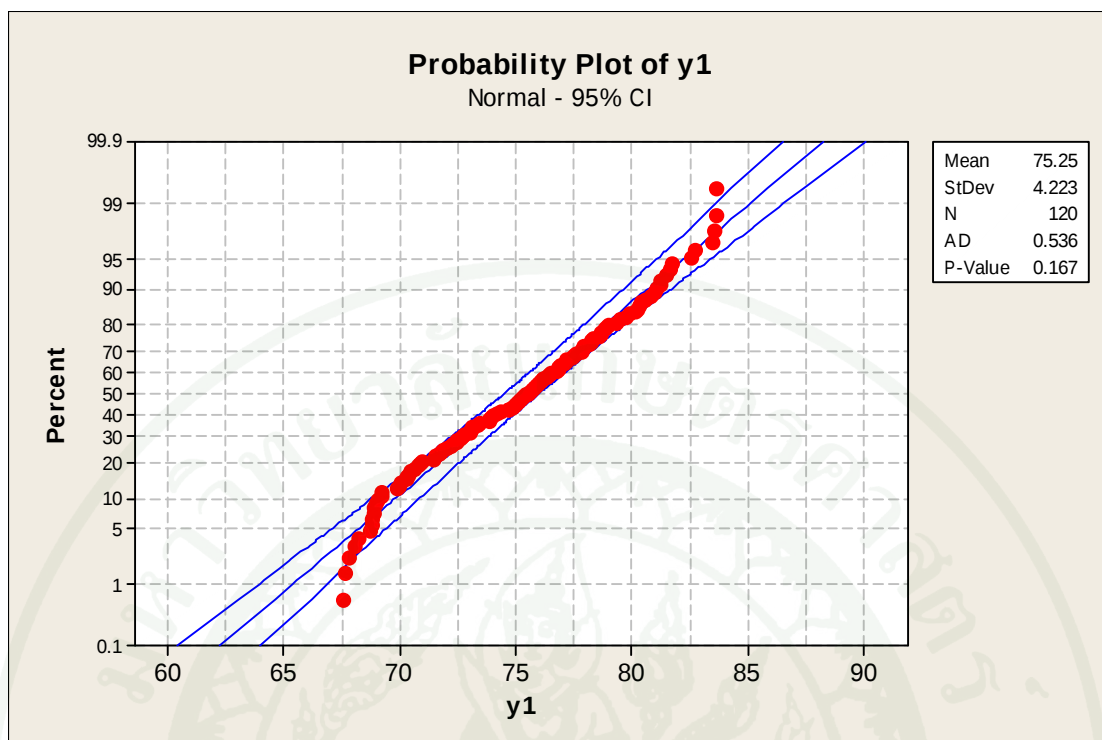
1. ตรวจสอบความสอดคล้องของตัวแปรผลตอบตามข้อสมมุติก่อนใช้ ANOVA ได้แก่ y_1 และ y_2 ได้ผลดังนี้

ข้อมูล y_1 และ y_2 มีการแจกแจงปกติหรือไม่ โดยการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของประสิทธิภาพการผลิต (Normal Probability Plot of y_1) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (Normal Probability Plot of y_2) และใช้การทดสอบ Anderson-Darling (AD) สมมุติฐานของการทดสอบ คือ

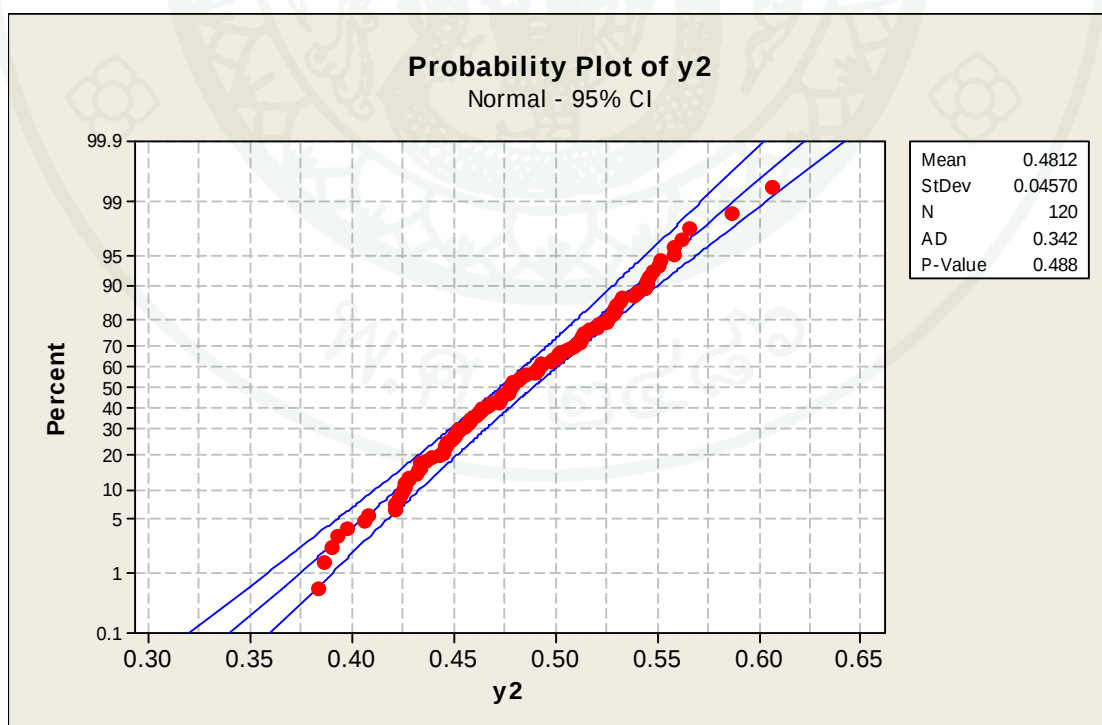
H_0 : ข้อมูลตัวอย่างมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ

H_1 : ข้อมูลตัวอย่างไม่ได้มาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติจะกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 เนื่องจากข้อมูล y_1 และ y_2 มี $P - Value = 0.167 > \alpha = 0.05$ และ $P - Value = 0.488 > \alpha = 0.05$ ตามลำดับ จึงยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) และสรุปว่าข้อมูลตัวอย่างมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในภาพที่ 7 และภาพที่ 8 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1



ภาพที่ 8 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2

2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย และทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัวของ y_1 และ y_2 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_1

Term	Standard Error of		T-Test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
x_1	70.8	0.7957	88.98	0.000*
x_2	26.5	7.4249	3.57	0.000*
x_3	-55.0	13.9937	-3.93	0.000*
x_4	-135.8	13.9937	9.70	0.000*
$x_1 * x_2$	116.3	13.7497	8.46	0.000*
$x_1 * x_3$	197.5	21.6619	9.12	0.000*
$x_1 * x_4$	275.5	21.6619	12.72	0.000*
$x_2 * x_3$	226.9	25.5821	8.87	0.000*
$x_2 * x_4$	295.8	25.5821	11.56	0.000*
$x_3 * x_4$	357.3	29.3203	12.19	0.000*
$x_1 * z_1$	1.9	0.7957	2.33	0.022*
$x_2 * z_1$	-2.1	7.4249	-0.28	0.777
$x_3 * z_1$	37.6	13.9937	2.69	0.009*
$x_4 * z_1$	-10.2	13.9937	-0.73	0.467
$x_1 * x_2 * z_1$	-5.7	13.7497	-0.42	0.677
$x_1 * x_3 * z_1$	-60.1	21.6619	-2.77	0.007*
$x_1 * x_4 * z_1$	-1.5	21.6619	-0.07	0.944
$x_2 * x_3 * z_1$	-45.1	25.5821	-1.76	0.082
$x_2 * x_4 * z_1$	39.0	25.5821	1.53	0.131
$x_3 * x_4 * z_1$	-14.5	29.3203	-0.49	0.623
$x_1 * z_2$	2.1	0.7957	2.59	0.011*
$x_2 * z_2$	8.7	7.4249	1.17	0.247
$x_3 * z_2$	52.5	13.9937	3.75	0.000*
$x_4 * z_2$	26.1	13.9937	1.87	0.066
$x_1 * x_2 * z_2$	-22.3	13.7497	-1.62	0.109
$x_1 * x_3 * z_2$	-81.1	21.6619	-3.74	0.000*

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_1 * x_4 * z_2$	-46.4	21.6619	-2.14	0.035*
$x_2 * x_3 * z_2$	-78.8	25.5821	-3.08	0.003*
$x_2 * x_4 * z_2$	-28.2	25.5821	-1.10	0.273
$x_3 * x_4 * z_2$	-90.0	29.3203	-3.07	0.003*
$x_1 * z_1 * z_2$	-8.5	0.7957	-10.71	0.000*
$x_2 * z_1 * z_2$	-57.3	7.4249	-7.72	0.000*
$x_3 * z_1 * z_2$	-141.6	13.9937	-10.12	0.000*
$x_4 * z_1 * z_2$	-152.0	13.9937	-10.86	0.000*
$x_1 * x_2 * z_1 * z_2$	113.9	13.7497	8.29	0.000*
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	224.2	21.6619	10.35	0.000*
$x_1 * x_4 * z_1 * z_2$	234.9	21.6619	10.84	0.000*
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	242.2	25.5821	9.47	0.000*
$x_2 * x_4 * z_1 * z_2$	247.9	25.5821	9.69	0.000*
$x_3 * x_4 * z_1 * z_2$	328.5	29.3203	11.20	0.000*

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 5 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ระดับของ y_2

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
x_1	0.410	0.09864	4.16	0.000*
x_2	-0.457	0.92044	-0.50	0.621
x_3	-0.376	1.73475	-0.22	0.796
x_4	-0.229	1.73475	-0.13	0.912
$x_1 * x_2$	1.491	1.70449	0.87	0.384
$x_1 * x_3$	1.485	2.68534	0.55	0.582
$x_1 * x_4$	1.332	2.68534	0.50	0.621
$x_2 * x_3$	1.947	3.17130	0.62	0.535

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_2 * x_4$	2.423	3.17130	0.76	0.447
$x_3 * x_4$	1.395	3.63472	0.38	0.702
$x_1 * z_1$	0.054	0.09864	0.55	0.587
$x_2 * z_1$	0.429	0.92044	0.47	0.642
$x_3 * z_1$	1.161	1.73475	0.67	0.505
$x_4 * z_1$	-1.681	1.73475	-0.97	0.335
$x_1 * x_2 * z_1$	-0.787	1.70449	-0.46	0.646
$x_1 * x_3 * z_1$	-1.690	2.68534	-0.63	0.531
$x_1 * x_4 * z_1$	1.892	2.68534	0.70	0.483
$x_2 * x_3 * z_1$	-2.099	3.17130	-0.66	0.510
$x_2 * x_4 * z_1$	1.920	3.17130	0.61	0.547
$x_3 * x_4 * z_1$	1.274	3.63472	0.35	0.727
$x_1 * z_2$	0.132	0.09864	1.33	0.186
$x_2 * z_2$	1.428	0.92044	1.55	0.125
$x_3 * z_2$	2.100	1.73475	1.21	0.230
$x_4 * z_2$	2.072	1.73475	1.19	0.236
$x_1 * x_2 * z_2$	-2.495	1.70449	-1.46	0.147
$x_1 * x_3 * z_2$	-3.207	2.68534	-1.19	0.236
$x_1 * x_4 * z_2$	-3.352	2.68534	-1.25	0.216
$x_2 * x_3 * z_2$	-4.274	3.17130	-1.35	0.182
$x_2 * x_4 * z_2$	-4.342	3.17130	-1.37	0.175
$x_3 * x_4 * z_2$	-4.400	3.63472	-1.21	0.230
$x_1 * z_1 * z_2$	0.237	0.09864	2.40	0.019*
$x_2 * z_1 * z_2$	1.683	0.92044	1.83	0.071
$x_3 * z_1 * z_2$	3.608	1.73475	2.08	0.041*
$x_4 * z_1 * z_2$	3.417	1.73475	1.97	0.052
$x_1 * x_2 * z_1 * z_2$	-3.284	1.70449	-1.93	0.058
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	-5.724	2.68534	-2.13	0.036*
$x_1 * x_4 * z_1 * z_2$	-5.420	2.68534	-2.02	0.047*
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	-6.470	3.17130	-2.04	0.045*

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_2 * x_4 * z_1 * z_2$	-6.007	3.17130	-1.89	0.062
$x_3 * x_4 * z_1 * z_2$	-7.401	3.63472	-2.04	0.045*

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 4 และตารางที่ 5 เป็นการทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัวของ y_1 และ y_2 ตามลำดับ ด้วย T-Test ซึ่งสามารถพิจารณาที่ *P-Value* แทนได้ โดยที่ *P-Value* < 0.05 สรุปว่ามีผลต่อตัวแปรผลตอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จึงควรใส่ไว้ในแบบจำลอง และตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก ตามหลักการพัฒนาแบบจำลองการถดถอย ซึ่งนิยมเลือกใช้อยู่ 4 วิธี คือ (1) All Possible Regression (2) Forward Selection (3) Backward Elimination และ (4) Stepwise Regression สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธี Backward Elimination และพิจารณาตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table) ประกอบด้วย

3. วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของ y_1 และ y_2 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_1

Source of Variation	Sequential			Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
	Degree of Freedom	Sum of Squares	Adjust Sum of Squares			
Regression	39	2115.90	2115.9047	54.2540	675.96	0.000*
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	167.92	0.000*
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	58.60	0.000*
Component* z_1						
Linear	4	35.06	17.1475	4.2869	53.41	0.000*

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Sequential						
Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Adjust Sum of Squares	Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
Quadratic Component* z_2	6	37.79	37.7904	6.2984	78.47	0.000*
Linear	4	39.11	4.6628	1.1657	14.52	0.000*
Quadratic Component* z_1 * z_2	6	11.49	11.4926	1.9154	23.86	0.000*
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	65.52	0.000*
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	34.92	0.000*
Residual Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_2

Sequential						
Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Adjust Sum of Squares	Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
Regression Component Only	39	0.149819	0.149819	0.003842	3.11	0.000*
Linear	3	0.041588	0.003751	0.001250	1.01	0.391
Quadratic	6	0.014086	0.014086	0.002348	1.90	0.090
Component* z_1						
Linear	4	0.006833	0.022715	0.005679	4.60	0.002*
Quadratic	6	0.019604	0.019604	0.003267	2.65	0.021*
Component* z_2						
Linear	4	0.028758	0.003735	0.000934	0.76	0.556
Quadratic	6	0.004459	0.004459	0.000743	0.60	0.728

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Sequential						
Source of	Degree of	Sum of	Adjust Sum	Adjust Mean		
Variation	Freedom	Squares	of Squares	Squares	F ₀	P-Value
Component*z ₁ *z ₂						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.04	0.022*
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.12	0.036*
Residual Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

แหล่งความแปรปรวน (Source of Variation) ดังแสดงในตารางที่ 6 สรุปได้ว่าทุกแบบจำลองมีอิทธิพลต่อ y_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากทุกแบบจำลองมี $P\text{-Value} < 0.05$ กรณีนี้แบบจำลองที่มีอันดับสูงกว่าหรือมีความซับซ้อนมากกว่าจะเป็นแบบจำลองที่ใช้ทำนายหรือพยากรณ์ได้ดีกว่า เป็นไปตามหลักสถิติ นั่นคือ แบบจำลองกำลังสองหรือแบบจำลองส่วนโค้ง (Quadratic Model) ในส่วนของอัตราส่วนผสมหลักที่มีตัวแปรกระบวนการ 2 ตัวรวมอยู่ด้วย (Component* z_1 * z_2) และเมื่อพิจารณาาร่วมกันกับตารางที่ 4 ทำให้ต้องตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกทีละตัวคือวิธี Backward Elimination สำหรับตารางที่ 7 พิจารณาร่วมกันกับตารางที่ 5 ได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปค่าสถิติต่างๆ ประกอบการพิจารณาพัฒนาแบบจำลองสถิติได้ดังแสดงในตารางที่ 8 และการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวของแบบจำลองที่พัฒนาได้จากการทำ Backward Elimination เป็นไปตามตารางที่ 9 และตารางที่ 10 และพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 11 และตารางที่ 12 ของ y_1 และ y_2 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ค่าสถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนประกอบการพิจารณาพัฒนาแบบจำลองสถิติ

Model	S	PRESS	R^2	R^2_{pred}	R^2_{adj}	Lack-of-Fit	Residuals
							Analysis
For y_1 (%Yield Recovery)							
Full							
Quadratic	0.283306	14.4473	99.70	99.32	99.55	na.	Adequate
Reduced							
(Backward Elimination)							
Quadratic	0.280326	13.2490	99.69	99.38	99.56	เหมาะสม	Adequate
(cut out 4 terms)							
For y_2 (kWh/kg)							
Full							
Quadratic	0.0351203	0.222019	60.29	10.65	40.93	na.	Inadequate
Reduced							
(Backward Elimination)							
Quadratic	0.0344220	0.181920	54.70	26.79	43.26	เหมาะสม	Adequate
(cut out 15 terms)							

หมายเหตุ na. = not available (ไม่สามารถแสดงผลได้)

ตารางที่ 9 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_1 สำหรับพัฒนาแบบจำลองจากการทำ Backward Elimination

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
x_1	70.8	0.7873	89.93	0.000*
x_2	26.5	7.3468	3.61	0.000*
x_3	-55.0	13.8466	3.97	0.000*
x_4	-135.8	13.8466	9.81	0.000*
$x_1 * x_2$	116.3	13.6051	8.55	0.000*
$x_1 * x_3$	197.5	21.4341	9.21	0.000*
$x_1 * x_4$	275.5	21.4341	12.85	0.000*

ตารางที่ 9 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_2 * x_3$	226.9	25.3130	8.96	0.000*
$x_2 * x_4$	295.8	25.3130	11.69	0.000*
$x_3 * x_4$	357.3	29.0119	12.32	0.000*
$x_1 * z_1$	2.0	0.1396	14.15	0.000*
$x_3 * z_1$	39.4	5.4927	7.18	0.000*
$x_4 * z_1$	-11.9	0.5720	-20.75	0.000*
$x_1 * x_2 * z_1$	-9.3	0.6007	-15.42	0.000*
$x_1 * x_3 * z_1$	-63.1	7.3924	-8.53	0.000*
$x_2 * x_3 * z_1$	-50.2	7.3224	-6.85	0.000*
$x_2 * x_4 * z_1$	38.7	2.0119	19.26	0.000*
$x_3 * x_4 * z_1$	-12.9	7.2137	-1.80	0.076
$x_1 * z_2$	1.2	0.1602	7.25	0.000*
$x_3 * z_2$	37.8	5.6754	6.65	0.000*
$x_4 * z_2$	11.5	1.1043	10.41	0.000*
$x_1 * x_2 * z_2$	-6.3	0.6757	-9.31	0.000*
$x_1 * x_3 * z_2$	-57.7	7.7141	-7.48	0.000*
$x_1 * x_4 * z_2$	-23.2	2.1196	-10.96	0.000*
$x_2 * x_3 * z_2$	-50.4	7.4657	-6.76	0.000*
$x_3 * x_4 * z_2$	-59.3	8.0773	-7.35	0.000*
$x_1 * z_1 * z_2$	-8.5	0.7873	-10.83	0.000*
$x_2 * z_1 * z_2$	-57.3	7.3468	-7.80	0.000*
$x_3 * z_1 * z_2$	-141.6	13.8466	-10.23	0.000*
$x_4 * z_1 * z_2$	-152.0	13.8466	-10.98	0.000*
$x_1 * x_2 * z_1 * z_2$	113.9	13.6051	8.37	0.000*
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	224.2	21.4341	10.46	0.000*
$x_1 * x_4 * z_1 * z_2$	234.9	21.4341	10.96	0.000*
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	242.2	25.3130	9.57	0.000*

ตารางที่ 9 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_2 * x_4 * z_1 * z_2$	247.9	25.3130	9.97	0.000*
$x_3 * x_4 * z_1 * z_2$	328.5	29.0119	11.32	0.000*

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 10 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอย และการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ละตัวของ y_2
สำหรับพัฒนาแบบจำลองที่ได้จากการทำ Backward Elimination

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
x_1	0.485	0.00740	65.54	0.000*
x_2	0.365	0.02370	15.40	0.000*
x_3	0.492	0.02443	20.14	0.000*
x_4	0.528	0.03195	16.53	0.000*
$x_2 * x_4$	0.559	0.17984	3.11	0.002*
$x_1 * z_1$	0.105	0.02649	3.97	0.000*
$x_2 * z_1$	0.772	0.22252	3.47	0.001*
$x_3 * z_1$	1.232	0.34255	3.60	0.001*
$x_4 * z_1$	-0.416	0.10700	-3.89	0.000*
$x_1 * x_2 * z_1$	-1.483	0.42388	-3.50	0.001*
$x_1 * x_3 * z_1$	-2.034	0.56734	-3.58	0.001*
$x_2 * x_3 * z_1$	-2.408	0.66417	-3.63	0.000*
$x_2 * z_2$	0.041	0.01686	2.43	0.017*
$x_3 * z_2$	0.066	0.02130	3.12	0.002*
$x_1 * x_4 * z_2$	-0.078	0.03651	-2.13	0.035*
$x_1 * z_1 * z_2$	0.237	0.09668	2.45	0.016*
$x_2 * z_1 * z_2$	1.683	0.90214	1.87	0.065
$x_3 * z_1 * z_2$	3.608	1.70025	2.12	0.036*

ตารางที่ 10 (ต่อ)

Term	Standard Error of		T-test	P-Value
	Coefficient	Coefficient		
$x_4 * z_1 * z_2$	3.417	1.70025	2.01	0.047*
$x_1 * x_2 * z_1 * z_2$	-3.284	1.67060	-1.97	0.052
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	-5.724	2.63195	-2.17	0.032*
$x_1 * x_4 * z_1 * z_2$	-5.420	2.63195	-2.06	0.042*
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	-6.470	3.10825	-2.08	0.040*
$x_2 * x_4 * z_1 * z_2$	-6.007	3.10825	-1.93	0.056
$x_3 * x_4 * z_1 * z_2$	-7.401	3.56245	-2.08	0.040*

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_1 สำหรับพัฒนาแบบจำลองจากการทำ
Backward Elimination

Source of Variation	Degree of Freedom	Sequential			F_0	P-Value
		Sum of Squares	Adjust Sum of Squares	Adjust Mean Squares		
Regression	35	2115.72	2115.7248	60.4493	769.24	0.000*
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	171.51	0.000*
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	59.85	0.000*
Component* z_1						
Linear	3	33.05	39.5210	13.1737	167.64	0.000*
Quadratic	5	39.74	39.7384	7.9477	101.14	0.000*
Component* z_2						
Linear	3	38.51	9.3370	3.1123	39.61	0.000*
Quadratic	5	11.99	11.9851	2.3970	30.50	0.000*
Component* $z_1 * z_2$						
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	66.92	0.000*
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	35.67	0.000*

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Source of Variation	Degree of Freedom	Sequential		Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
		Sum of Squares	Adjust Sum of Squares			
Residual Error	84	6.60	6.6010	0.0786		
Lack-of-Fit	4	0.18	0.1800	0.0450	0.56	0.962
Pure Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ y_2 สำหรับพัฒนาแบบจำลองจากการทำ Backward Elimination

Source of Variation	Degree of Freedom	Sequential		Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
		Sum of Squares	Adjust Sum of Squares			
Regression	24	0.135930	0.135930	0.005664	4.78	0.000*
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.043942	0.014647	12.36	0.000*
Quadratic	1	0.011437	0.011437	0.011437	9.65	0.000*
Component* z_1						
Linear	4	0.006833	0.019980	0.004995	4.22	0.003*
Quadratic	3	0.015854	0.015854	0.005285	4.46	0.006*
Component* z_2						
Linear	2	0.020335	0.025529	0.012765	10.77	0.000*
Quadratic	1	0.005393	0.005393	0.005393	4.55	0.035*
Component* z_1 * z_2						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.16	0.017*
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.16	0.033*

ตารางที่ 12 (ต่อ)

Source of Variation	Degree of Freedom	Sequential		Adjust Mean Squares	F_0	P-Value
		Sum of Squares	Adjust Sum of Squares			
Residual Error	95	0.112563	0.112563	0.001185		
Lack-of-Fit	15	0.013888	0.013888	0.000926	0.75	0.726
Pure Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				

หมายเหตุ *Significant at P-Value < 0.05

ค่าผิดพลาดมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of Estimate: S) และผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดจากการทำนาย (Prediction Error Sum of Squares: PRESS) ทั้ง 2 ค่านี้ยังมีค่าน้อยมากเท่าใด แบบจำลองที่ได้จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเท่านั้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ใช้ในการทำนาย (R^2_{pred}) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R^2_{adj}) ยังมีค่าเพิ่มขึ้นมากเท่าใด จะทำให้แบบจำลองที่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสถิติ อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ได้แก่ การทดสอบการขาดความเหมาะสมกับข้อมูลของแบบจำลอง การถดถอย (Lack-of-Fit Test) และการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis) จากการพิจารณาค่าสถิติในตารางที่ 8 พบว่า ค่าสถิติต่างๆ คือ S, PRESS, R^2 , R^2_{pred} , และ R^2_{adj} มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้น จึงต้องพิจารณาเกณฑ์ Lack-of-Fit และ Residuals Analysis ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองสำหรับ y_1 และ y_2 คือ Reduced Model ที่ตัดออก 4 พจน์ และ 15 พจน์ ตามลำดับ ซึ่งยังคงเป็น Quadratic Model หรือ แบบจำลองพื้นผิวผลตอบอันดับ 2 (Second-Order Response Surface Model) ดังนี้

ประสิทธิภาพการผลิต (y_1 : %Yield Recovery)

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 = & 70.8x_1 + 26.5x_2 - 55.0x_3 - 135.8x_4 \\ & + 116.3x_1x_2 + 197.5x_1x_3 + 275.5x_1x_4 \\ & + 226.9x_2x_3 + 295.8x_2x_4 + 357.3x_3x_4 \\ & + 2.0x_1z_1 + 39.4x_3z_1 - 11.9x_4z_1 \\ & - 9.3x_1x_2z_1 - 63.1x_1x_3z_1 \\ & - 50.2x_2x_3z_1 + 38.7x_2x_4z_1 - 12.9x_3x_4z_1 \\ & + 1.2x_1z_2 + 37.8x_3z_2 + 11.5x_4z_2 \\ & - 6.3x_1x_2z_2 - 57.7x_1x_3z_2 - 23.2x_1x_4z_2 \\ & - 50.4x_2x_3z_2 - 59.3x_3x_4z_2 \\ & - 8.5x_1z_1z_2 - 57.3x_2z_1z_2 - 141.6x_3z_1z_2 - 152.0x_4z_1z_2 \\ & + 113.9x_1x_2z_1z_2 + 224.2x_1x_3z_1z_2 + 234.9x_1x_4z_1z_2 \\ & + 242.2x_2x_3z_1z_2 + 247.9x_2x_4z_1z_2 + 328.5x_3x_4z_1z_2\end{aligned}$$

การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตหลักแห้ง 1 กิโลกรัม (y_2 : kWh/kg)

$$\begin{aligned}\hat{y}_2 = & 0.485x_1 + 0.365x_2 + 0.492x_3 + 0.528x_4 - 0.559x_2x_4 \\ & + 0.105x_1z_1 + 0.772x_2z_1 + 1.232x_3z_1 - 0.416x_4z_1 \\ & - 1.483x_1x_2z_1 - 2.034x_1x_3z_1 - 2.408x_2x_3z_1 \\ & + 0.041x_2z_2 + 0.066x_3z_2 - 0.078x_1x_4z_2 \\ & + 0.237x_1z_1z_2 + 1.683x_2z_1z_2 + 3.608x_3z_1z_2 + 3.417x_4z_1z_2 \\ & - 3.284x_1x_2z_1z_2 - 5.724x_1x_3z_1z_2 - 5.420x_1x_4z_1z_2 \\ & - 6.470x_2x_3z_1z_2 - 6.007x_2x_4z_1z_2 - 7.401x_3x_4z_1z_2\end{aligned}$$

4. ตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

4.1 การทดสอบการขาดความเหมาะสม (Lack-of-Fit Test)

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

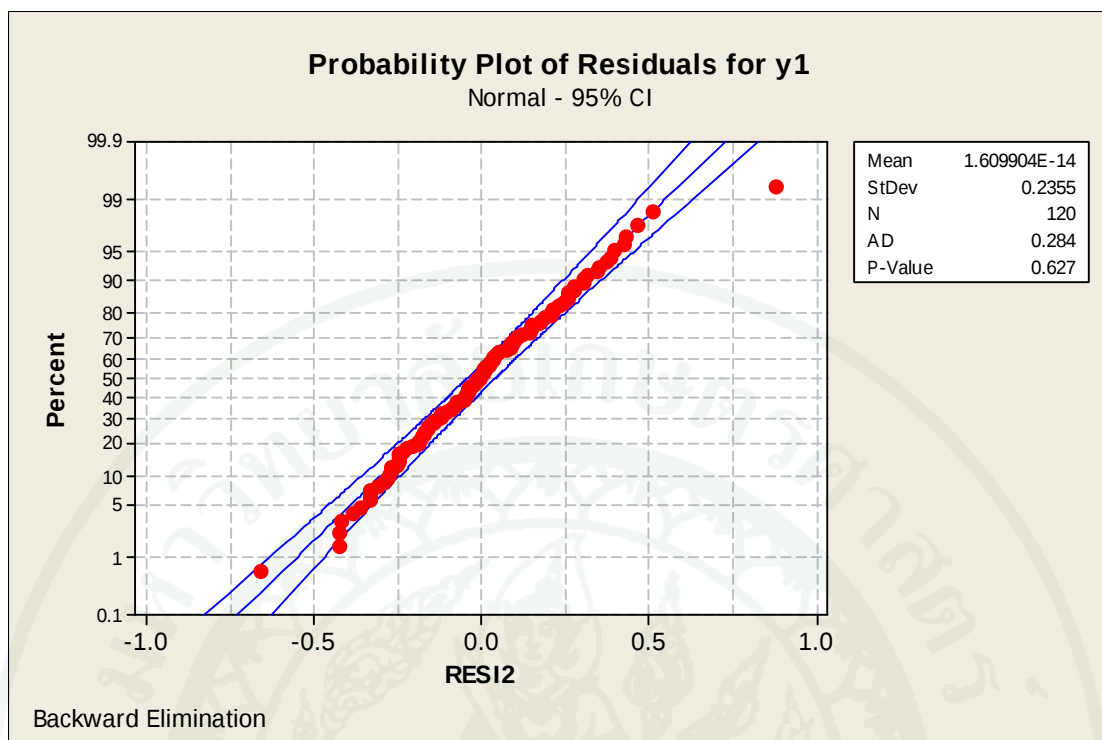
จากตารางที่ 11 และตารางที่ 12 ในส่วนการทดสอบ Lack-of-Fit ของ y_1 และ y_2 ตามลำดับ เนื่องจาก $P-Value = 0.692 > \alpha = 0.05$ และ $P-Value = 0.726 > \alpha = 0.05$ จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) สรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอย หรือแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ อันดับ 2 ที่พัฒนาได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลทั้ง y_1 และ y_2 ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.2 ส่วนตกค้าง (Residuals) ของ y_1 และ y_2 มีการแจกแจงปกติหรือไม่ โดยการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of Residuals) และใช้การทดสอบ Anderson-Darling (AD) สมมติฐานของการทดสอบ คือ

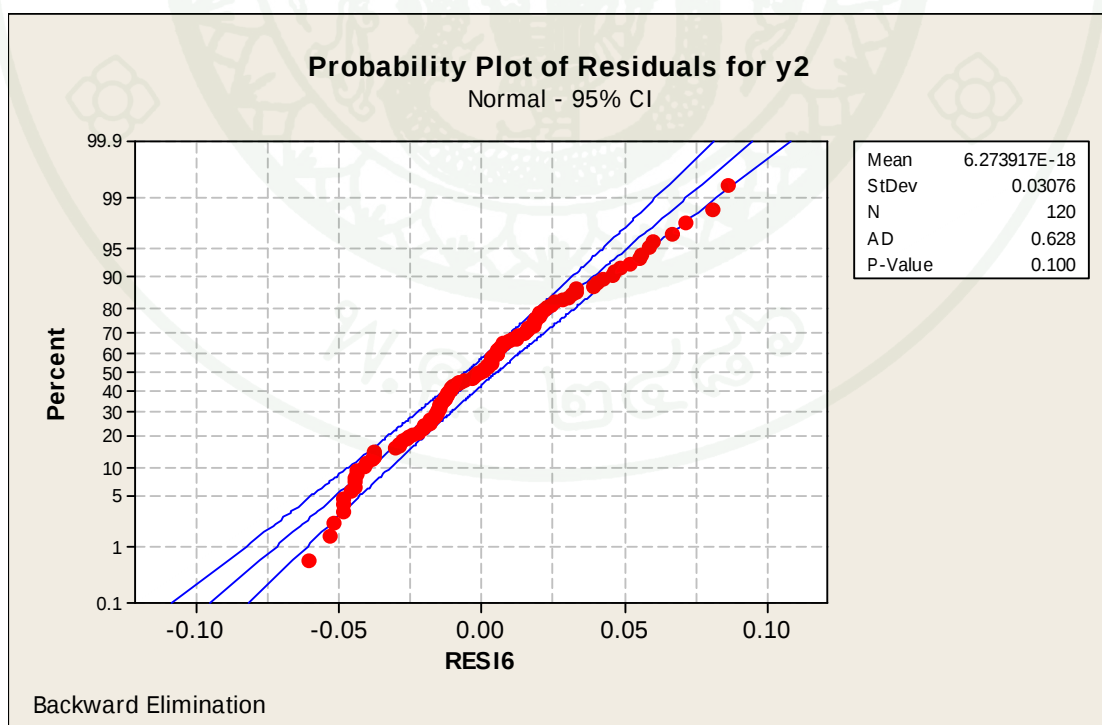
H_0 : ส่วนตกค้าง (Residuals: ε_i) มีการแจกแจงปกติ

H_1 : ส่วนตกค้าง (Residuals: ε_i) ไม่มีการแจกแจงปกติ

เนื่องจาก $P-Value$ ทั้ง y_1 และ y_2 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ นั่นคือ $P-Value = 0.627 > \alpha = 0.05$ และ $P-Value = 0.100 > \alpha = 0.05$ ตามลำดับ จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 ตามลำดับ

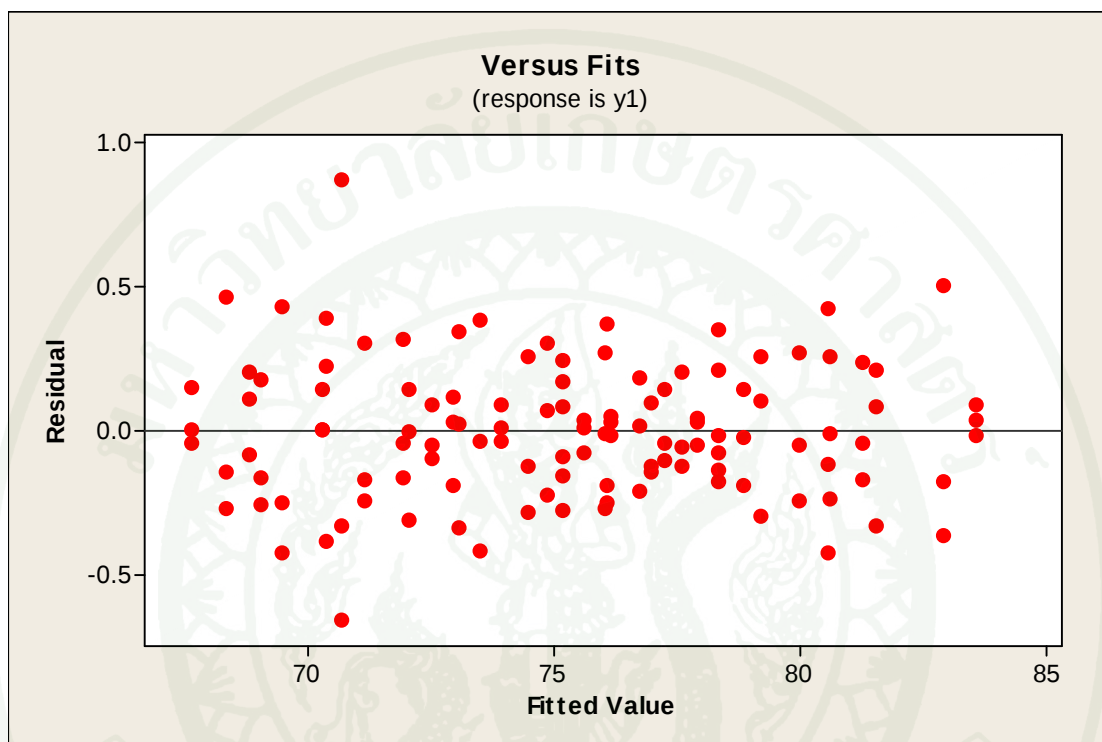


ภาพที่ 9 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างสำหรับ y_1

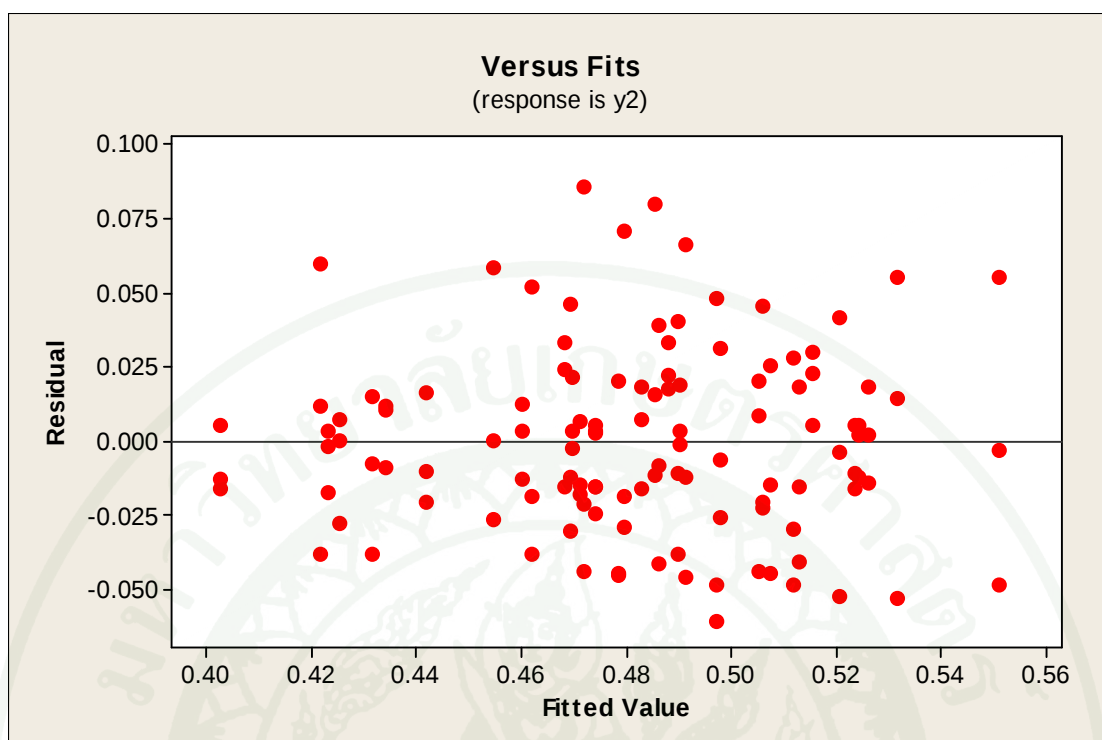


ภาพที่ 10 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างสำหรับ y_2

4.3 ส่วนตกค้าง (Residuals) ของ y_1 และ y_2 มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่หรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับค่าที่เหมาะสม (Residuals Versus the Fitted Values) ดังแสดงในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 ตามลำดับ



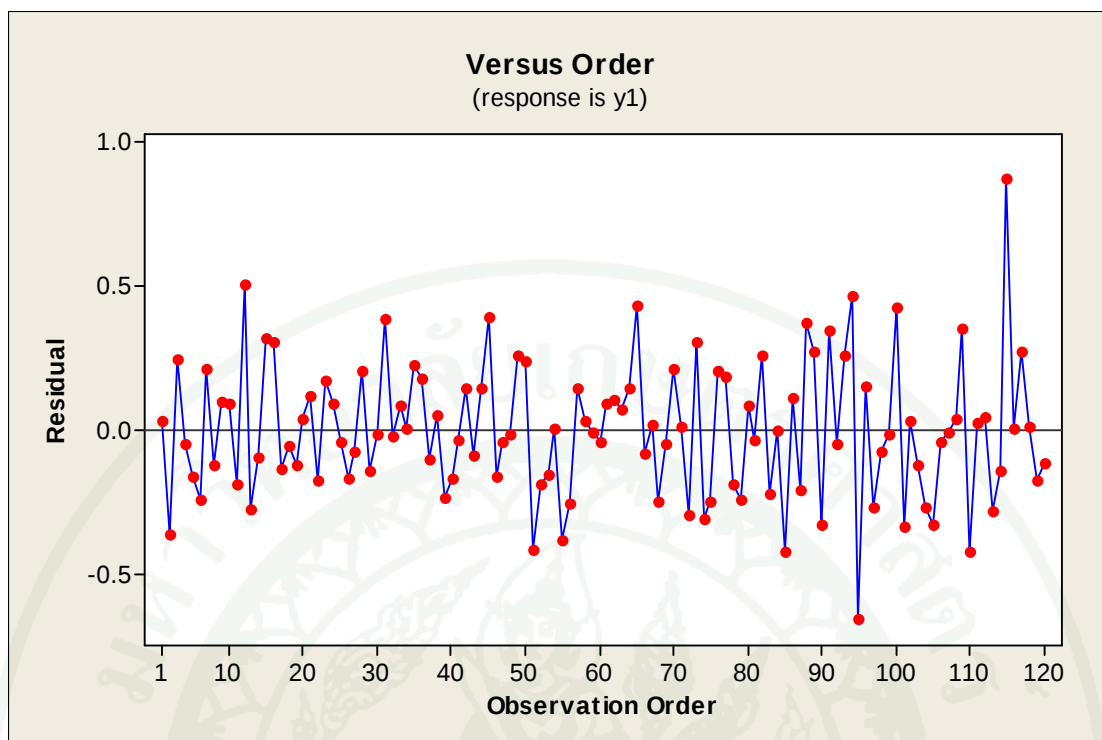
ภาพที่ 11 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับค่าที่เหมาะสมสำหรับ y_1



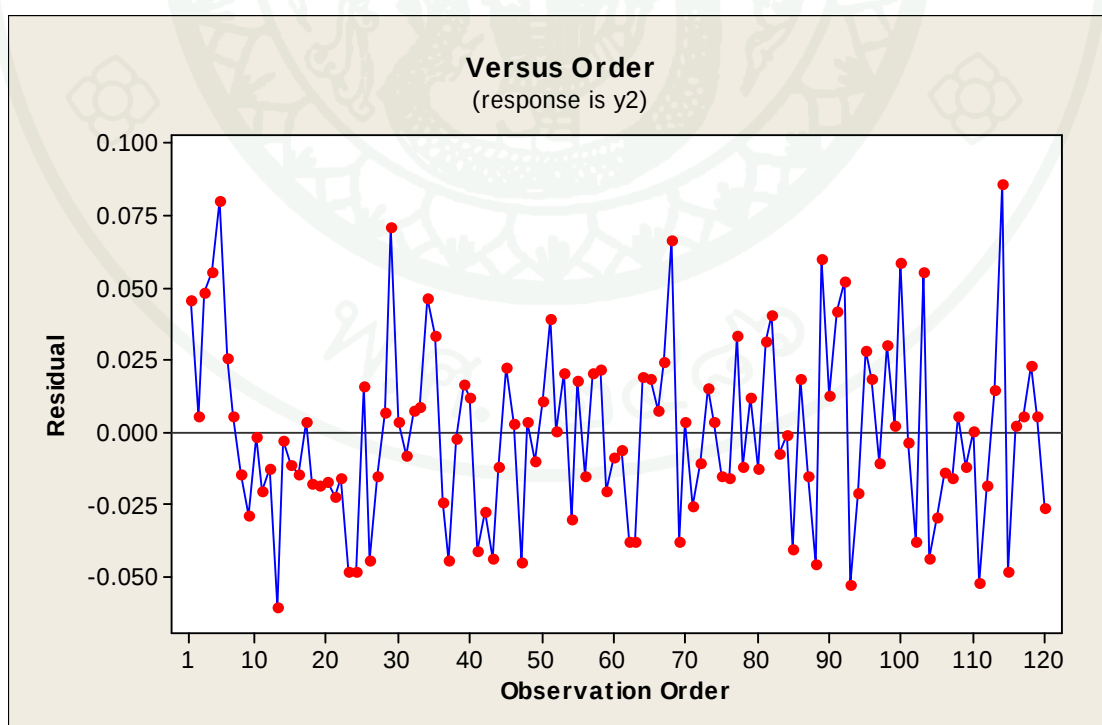
ภาพที่ 12 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับค่าที่เหมาะสมสำหรับ y_2

จากภาพที่ 11 และภาพที่ 12 พบว่าจุดที่พล็อตมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยล้อมรอบๆ เส้นกลาง หรือแกนอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่ นั่นคือ $E(\varepsilon) = 0$ และ $\sigma^2(\varepsilon) = \sigma^2$

4.4 ส่วนตกค้าง (Residuals) ของ y_1 และ y_2 มีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับลำดับของค่าสังเกต (Residuals Versus the Order of the Data) ดังแสดงในภาพที่ 13 และภาพที่ 14 ตามลำดับ



ภาพที่ 13 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับลำดับของค่าสังเกตสำหรับ y_1

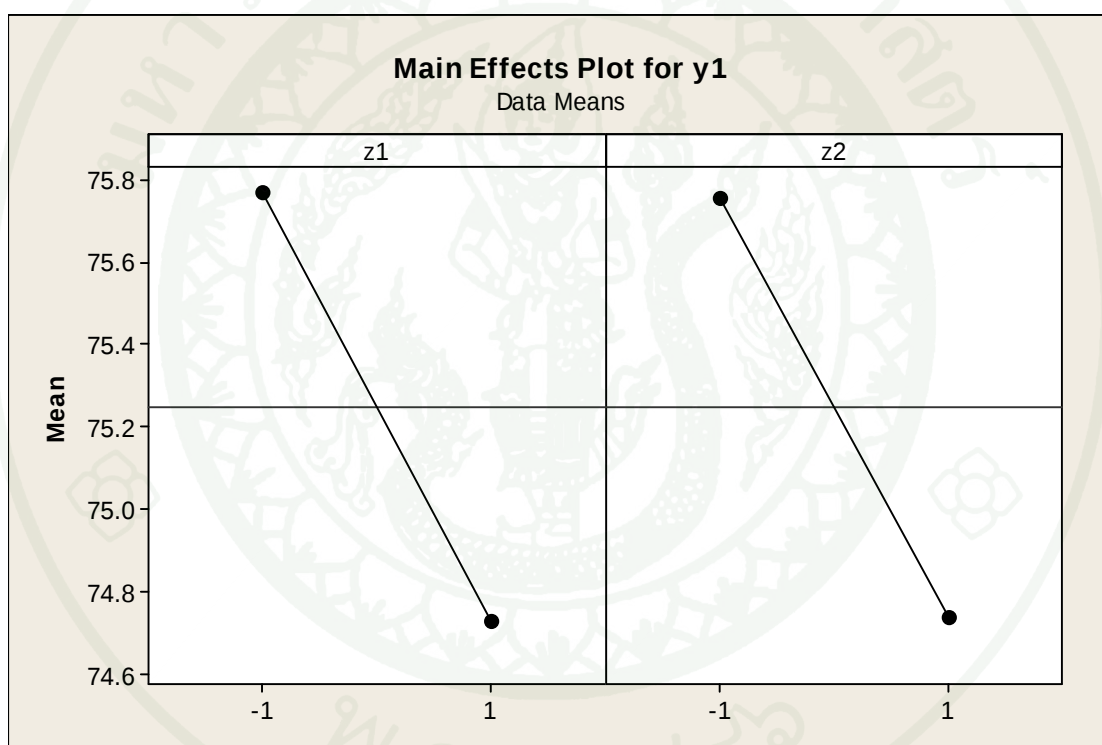


ภาพที่ 14 กราฟการพล็อตส่วนตกค้างคู่กับลำดับของค่าสังเกตสำหรับ y_2

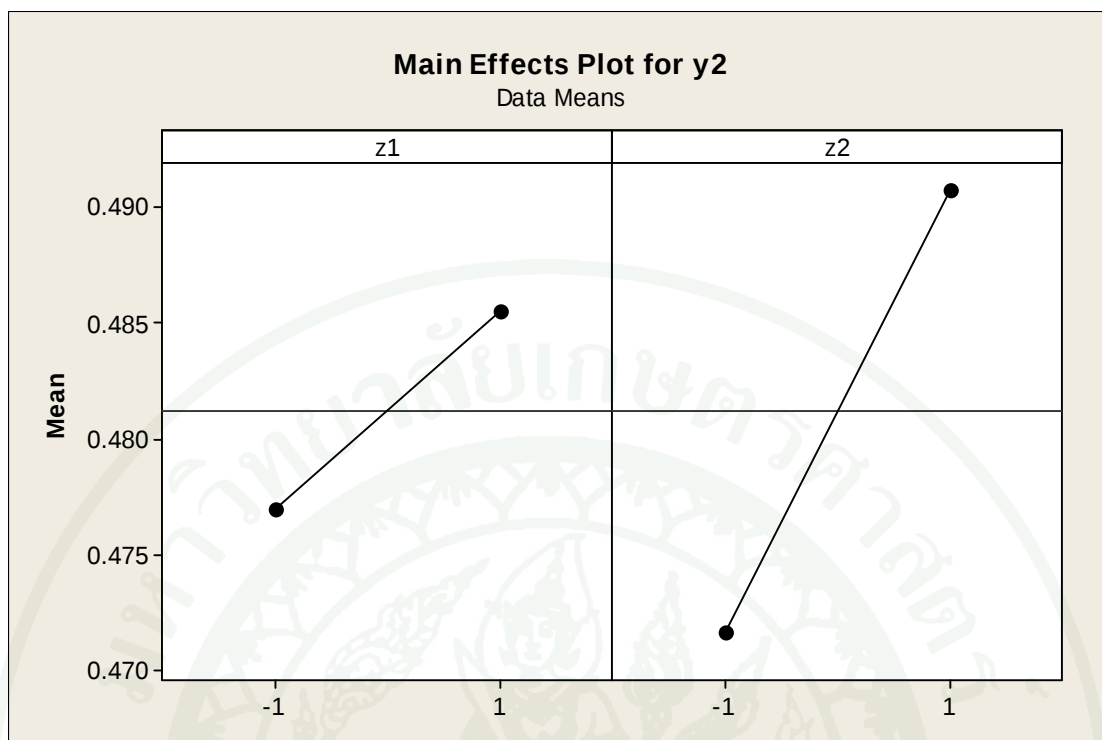
จากภาพที่ 13 และภาพที่ 14 พบว่าจุดที่พล็อตมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยสุ่มรอบๆ เส้นกลาง หรือแกนอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และไม่มีแนวโน้ม (Trend) หรือเป็นวัฏจักร (Cyclic) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน และไม่ขึ้นกับลำดับของค่าสังเกต

5. วิเคราะห์กราฟชนิดต่างๆ จากแบบจำลองที่พัฒนาได้ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 กราฟผลกระทบหลัก (Main Effects Plot) สำหรับตัวแปรกระบวนการของ y_1 และ y_2 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 15 และภาพที่ 16 ตามลำดับ

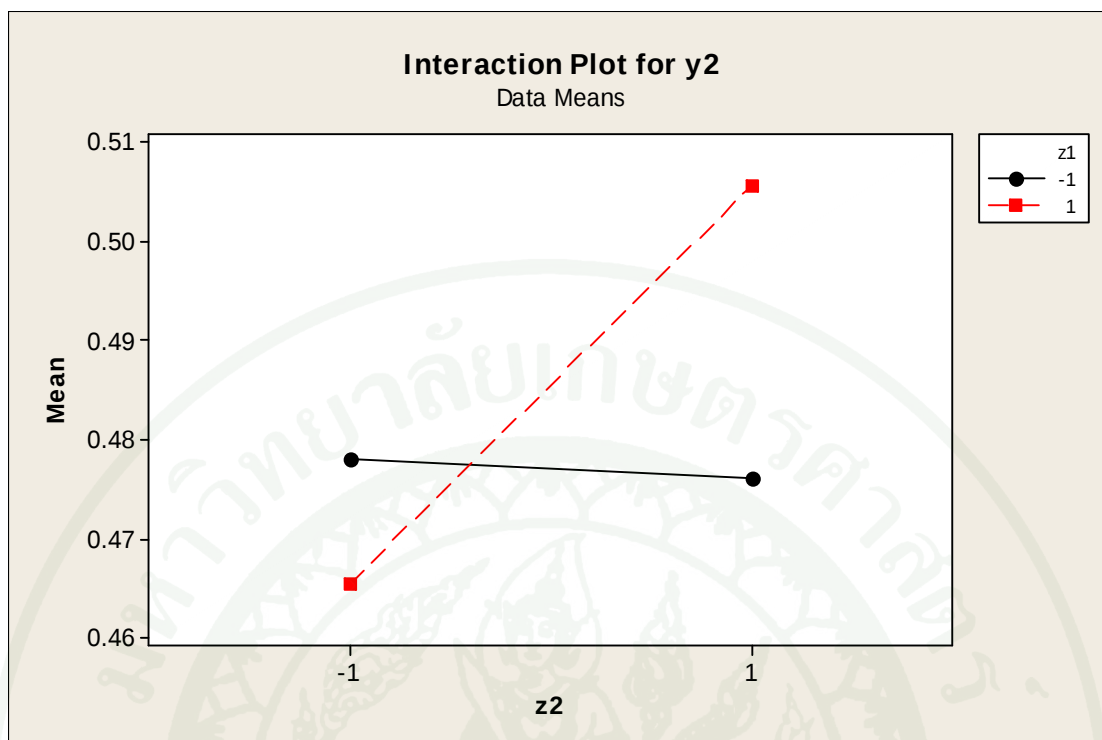


ภาพที่ 15 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_1



ภาพที่ 16 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_2

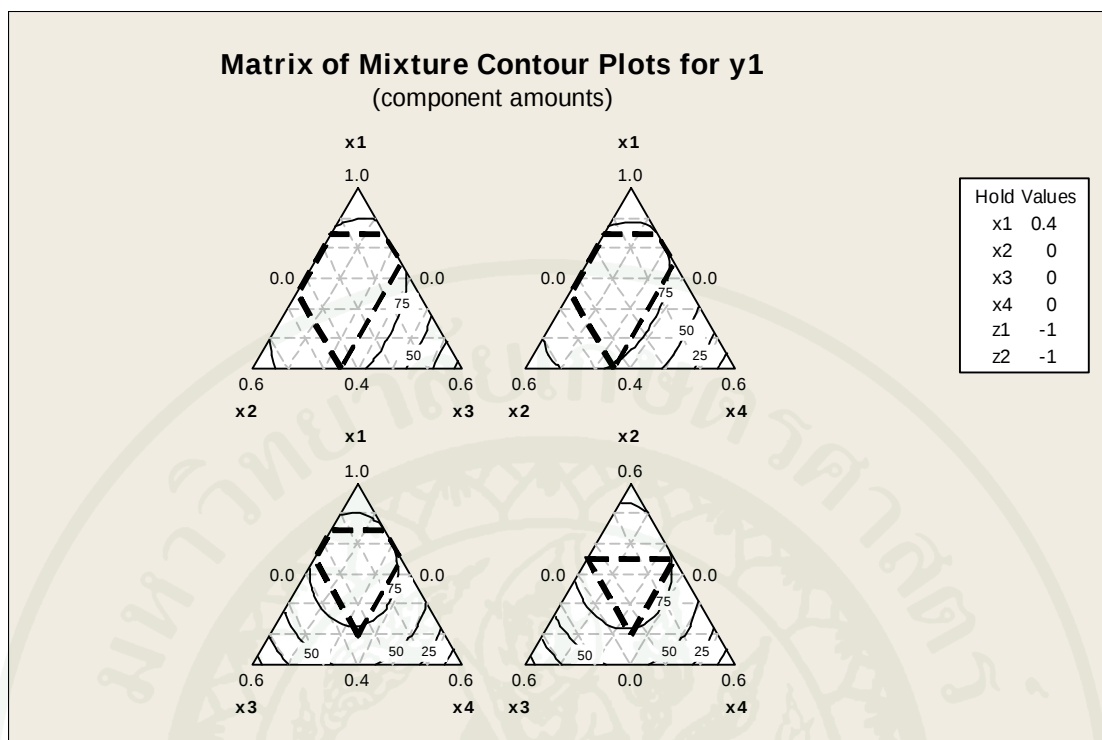
จากภาพที่ 15 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_1 และภาพที่ 16 กราฟผลกระทบหลักสำหรับ y_2 จะสังเกตได้ว่า ถ้าดำเนินกระบวนการผลิต โดยตั้งค่าปัจจัยกระบวนการ $TTT (z_1)$ และ $TT (z_2)$ อยู่ที่ระดับต่ำ คือ 60 นาที และ $1,600^\circ\text{C}$ ตามลำดับ จะได้ y_1 สูงขึ้น แสดงถึงการเพิ่มผลิตภาพ (Productivity) และ y_2 ลดลง แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม ที่ลดลง ตามลำดับ และเนื่องจากกราฟในภาพที่ 15 มีปัจจัยกระบวนการทั้งสองขนานกัน จึงไม่มีอิทธิพลร่วม หรือผลกระทบร่วม ส่วนกราฟในภาพที่ 16 ไม่ขนานกัน จึงมีอิทธิพลร่วมดังภาพที่ 17



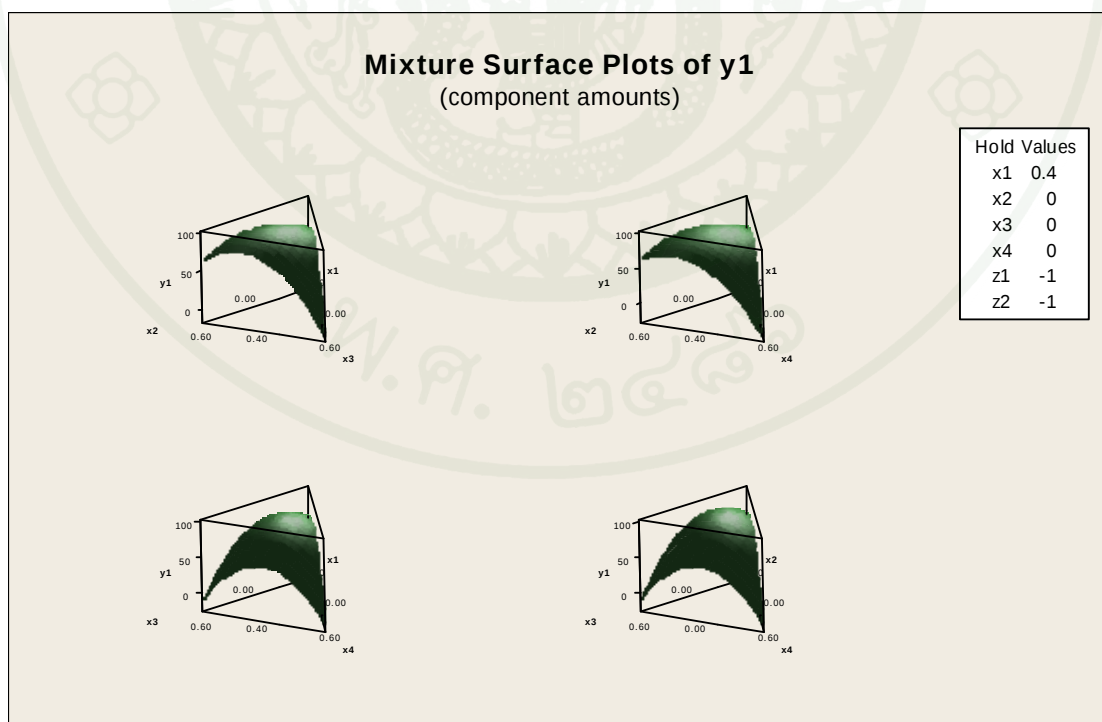
ภาพที่ 17 กราฟผลกระทบร่วมสำหรับ y_2

จากภาพที่ 17 อิทธิพลร่วมของ z_1, z_2 (z_1, z_2 Interaction) พบว่า อุณหภูมิเหน้าเหล็ก ($TT: z_2$) มีผลน้อยมากเมื่อเวลาที่ใช้ผลิตในแต่ละรอบ ($TTT: z_1$) อยู่ที่ระดับต่ำ (-1) และจะมีผลมากเมื่อ TTT อยู่ที่ระดับสูง (1) เมื่อต้องการให้การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง (y_2) ลดลง ควรดำเนินการกระบวนการผลิตให้ z_2 อยู่ที่ระดับต่ำ และ z_1 อยู่ที่ระดับสูง จะได้ $y_2 = 0.465$ kWh/kg หาก z_1 และ z_2 อยู่ที่ระดับต่ำ จะได้ $y_2 = 0.477$ kWh/kg เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ประเด็นนี้ยังคงต้องวิเคราะห์ต่อไป เนื่องจาก y_2 ที่ได้ทั้ง 2 ค่า ไม่แตกต่างกันมาก และหากตั้งค่าให้ z_2 อยู่ที่ระดับต่ำ และ z_1 อยู่ที่ระดับสูง เพื่อให้ y_2 ลดลงมากที่สุด จะส่งผลให้ y_1 ลดลง ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

5.2 กราฟส่วนผสมเส้นโครงร่าง (Mixture Contour Plot) และกราฟส่วนผสมพื้นผิวผลตอบ (Mixture Surface Plot) ของ y_1 และ y_2 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 18-19 และภาพที่ 20-21 ตามลำดับ

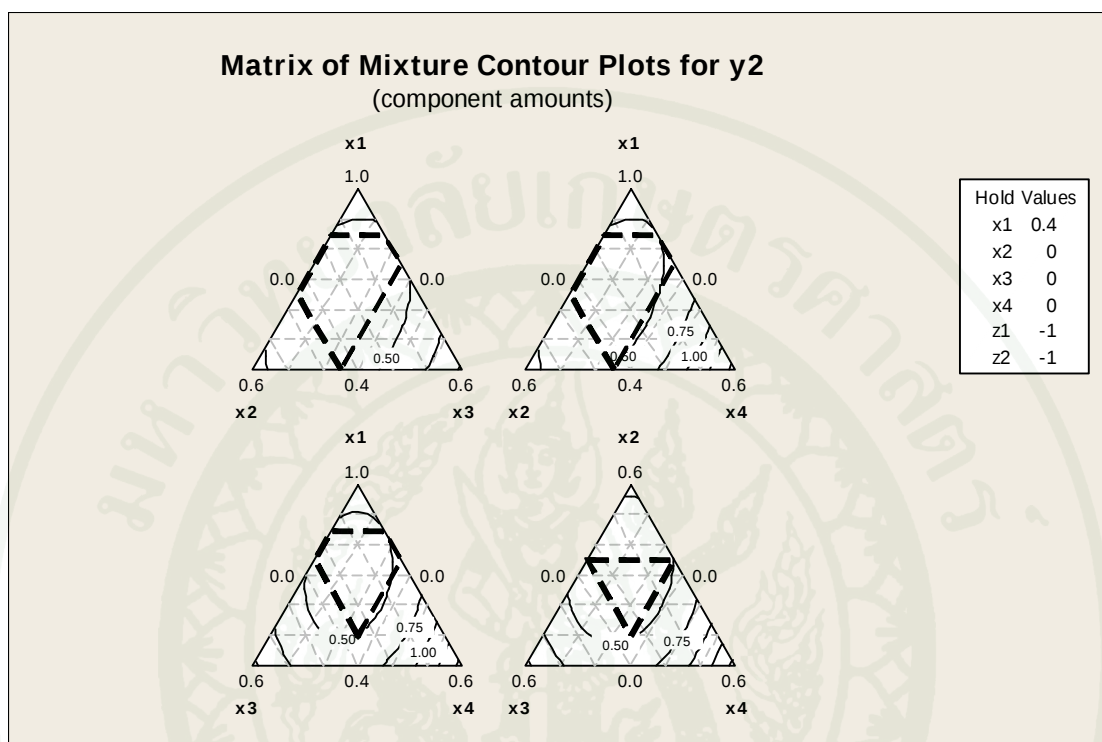


ภาพที่ 18 Matrix of Mixture Contour Plots for y_1

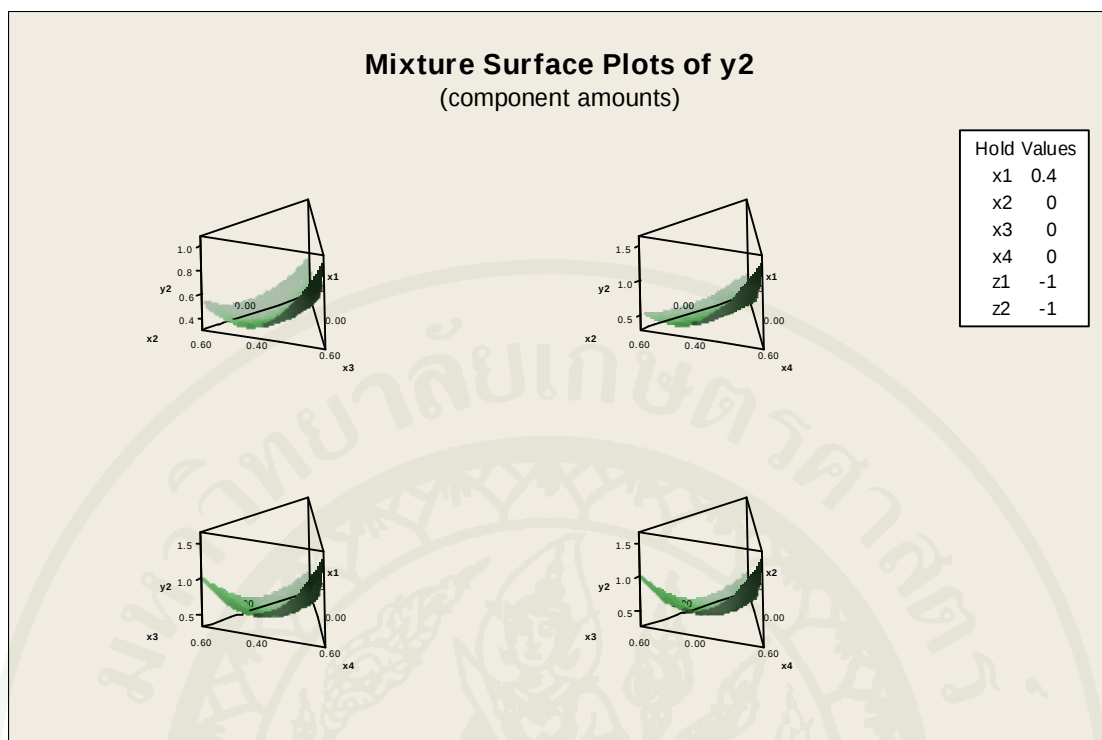


ภาพที่ 19 Mixture Surface Plots of y_1

ภาพที่ 18-19 เป็นการตั้งค่าปัจจัยกระบวนการทั้งสองอยู่ที่ระดับต่ำ และอัตราส่วนเศษเหลืออยู่ที่ค่าขอบล่าง (Lower Bound) สำหรับใช้ประมาณค่าผลตอบที่ดีที่สุด $y_1 \approx 90\%$



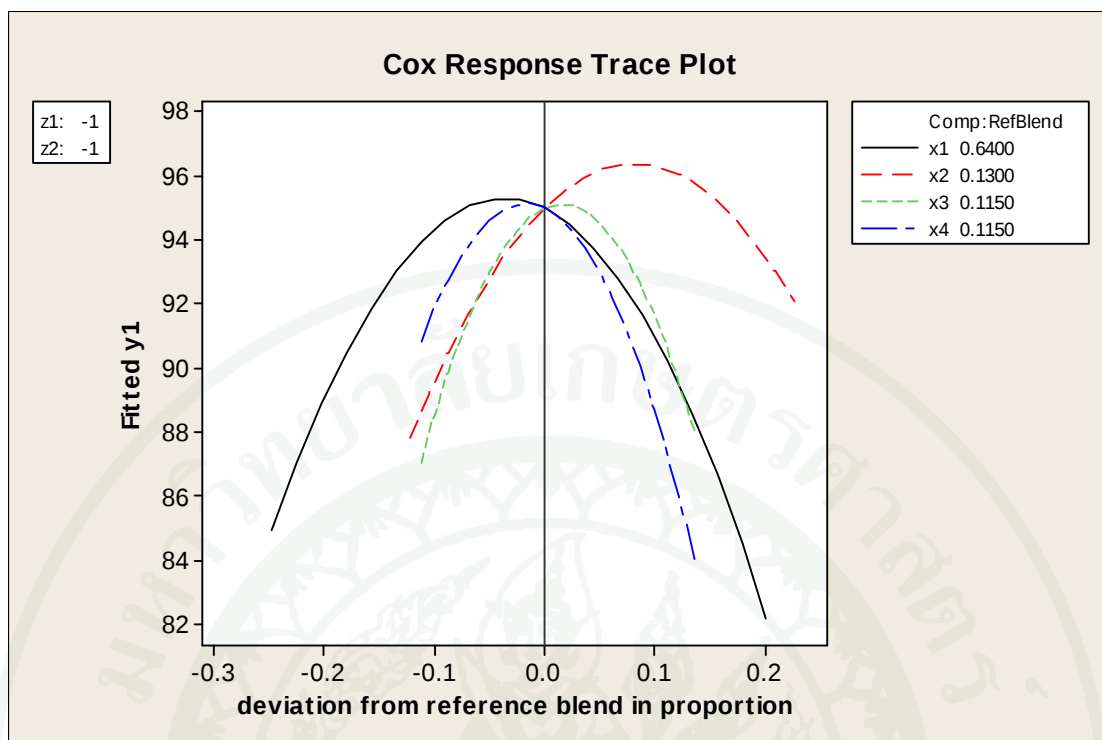
ภาพที่ 20 Matrix of Mixture Contour Plots for y_2



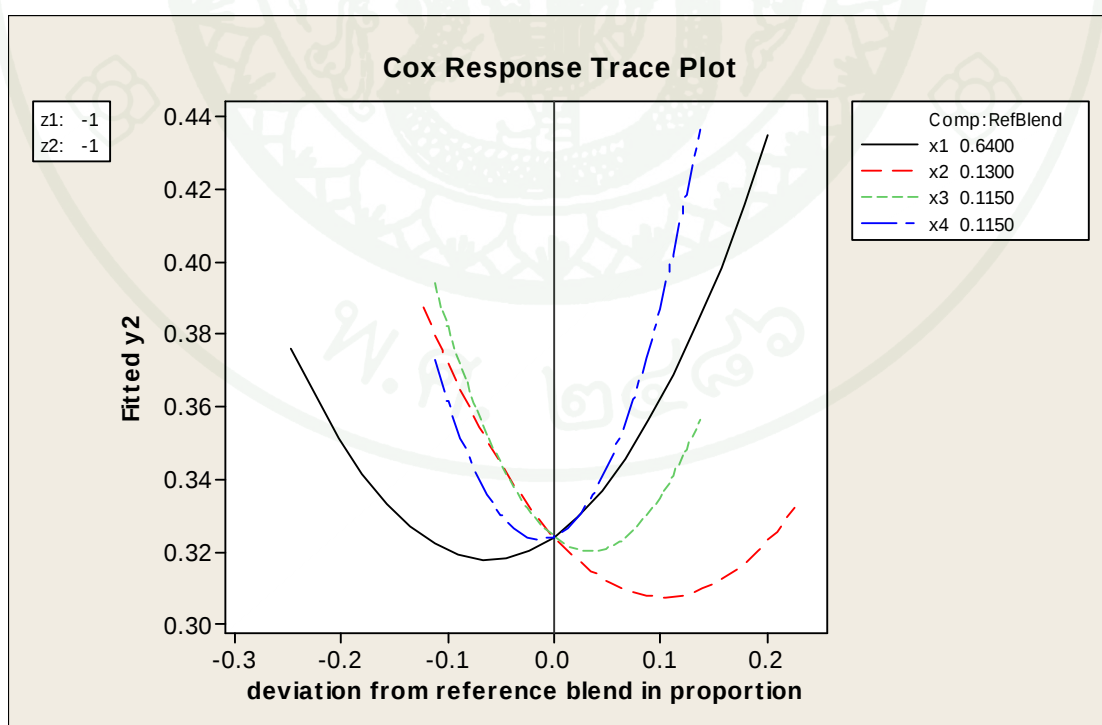
ภาพที่ 21 Mixture Surface Plots of y_2

ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 20-21 เป็นการตั้งค่าปัจจัยกระบวนการทั้งสองอยู่ที่ระดับต่ำ และอัตราส่วนเศษเหลืออยู่ที่ค่าขอบล่าง (Lower Bound) สำหรับใช้ประมาณค่าผลตอบแทนที่ดีที่สุด $y_2 \approx 0.40$ kWh/kg

5.3 Cox Response Trace Plot ของ y_1 และ y_2 ดังแสดงในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 ตามลำดับ



ภาพที่ 22 Cox Response Trace Plot of y_1



ภาพที่ 23 Cox Response Trace Plot of y_2

จากภาพที่ 22-23 ใช้ในการประมาณค่าผลตอบของ y_1 และ y_2 ตามลำดับ และวิเคราะห์ความไวของอัตราการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบพิเศษเหล็กในแต่ละกลุ่ม โดยตั้งค่าปัจจัยกระบวนการทั้งสองอยู่ที่ระดับต่ำ ($z_1, z_2 = -1$) ซึ่งส่วนผสมอ้างอิงอยู่ที่ $r_1: r_2: r_3: r_4 = 0.6400: 0.1300: 0.1150: 0.1150$ จะได้ $y_1 \approx 95.0\%$ และ $y_2 \approx 0.325$ kWh/kg พิจารณาเศษเหล็กกลุ่ม 1 ในภาพที่ 22 เมื่อเคลื่อนออกจากส่วนผสมอ้างอิงไปตามแกนอนด้านขวามือ ซึ่งเป็นการเพิ่มสัดส่วนผสมให้กับเศษเหล็กกลุ่ม 1 สมมติให้เป็น $\Delta_1 = 0.1$ ดังนั้น

$$x_1 = r_1 + \Delta_1 = 0.64 + 0.1 = 0.74$$

และจะได้สัดส่วนผสมเศษเหล็กกลุ่ม 2 กลุ่ม 3 และกลุ่ม 4 ใหม่ ดังสมการ

$$x_j = r_j - \frac{\Delta_i r_j}{(1 - r_i)}, \quad j \neq i$$

โดยที่

$$r_1 + r_2 + \dots + r_q = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$$

r = ส่วนผสมอ้างอิง (Reference Mixture)

Δ = อัตราการเปลี่ยนแปลง (Incremental Change)

$$x_2 = r_2 - \frac{\Delta_1 r_2}{(1 - r_1)} = 0.13 - \frac{0.1 \times 0.13}{(1 - 0.64)} = 0.094$$

$$x_3 = r_3 - \frac{\Delta_1 r_3}{(1 - r_1)} = 0.115 - \frac{0.1 \times 0.115}{(1 - 0.64)} = 0.083$$

$$x_4 = r_4 - \frac{\Delta_1 r_4}{(1 - r_1)} = 0.25 - \frac{0.1 \times 0.25}{(1 - 0.64)} = 0.083$$

ซึ่งจะได้ $y_1 \approx 91\%$ และถาลดสัดส่วน x_1 ลง เป็น $\Delta_1 = -0.1$ ดังนั้น

$$x_1 = r_1 - \Delta_1 = 0.64 - 0.1 = 0.54$$

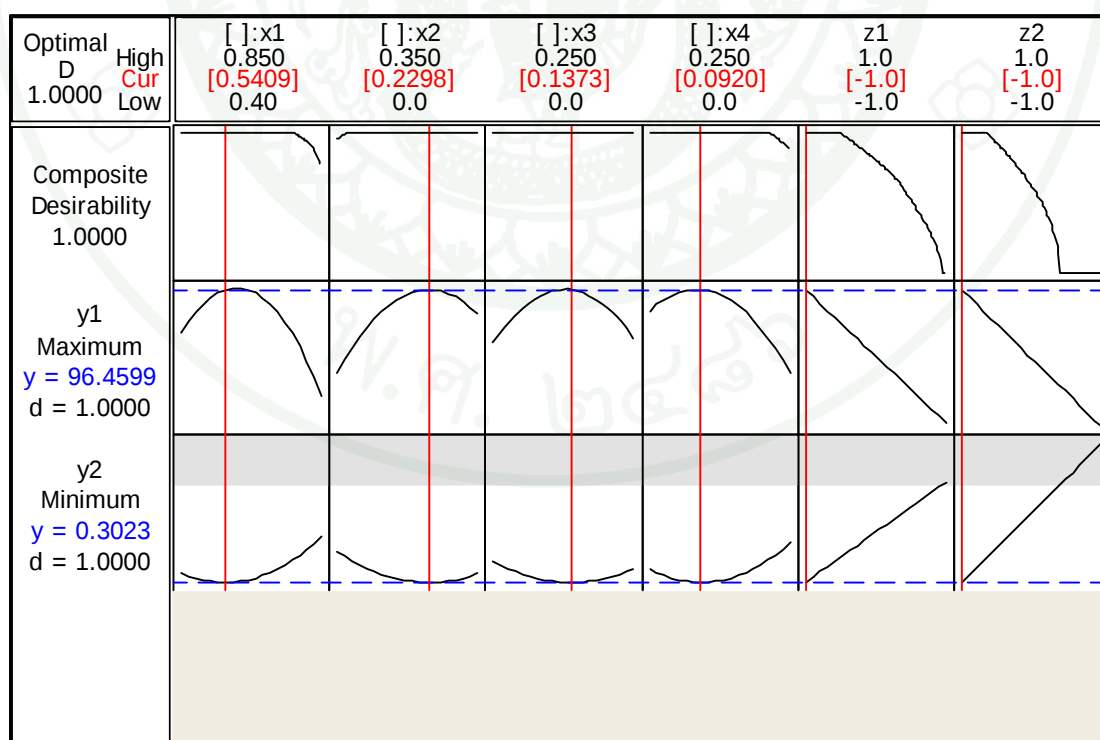
$$x_2 = r_2 - \frac{\Delta_1 r_2}{(1-r_1)} = 0.13 - \frac{(-0.1) \times 0.13}{(1-0.64)} = 0.166$$

$$x_3 = r_3 - \frac{\Delta_1 r_3}{(1-r_1)} = 0.115 - \frac{(-0.1) \times 0.115}{(1-0.64)} = 0.147$$

$$x_4 = r_4 - \frac{\Delta_1 r_4}{(1-r_1)} = 0.115 - \frac{(-0.1) \times 0.115}{(1-0.64)} = 0.147$$

จะได้ $y_1 \approx 94.4\%$ และสามารถพิจารณาเศษเหลือกลุ่ม 2 กลุ่ม 3 และกลุ่ม 4 ได้ในทำนองเดียวกัน หากต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตที่ได้ (ภาพที่ 22-23) ควรเพิ่มสัดส่วน x_2 อีกไม่เกิน 0.1 จะได้ $y_1 \approx 96.3\%$ และ $y_2 \approx 0.307$ kWh/kg ถ้าเพิ่มมากกว่า 0.1 จะทำให้ y_1 ลดลง และ y_2 เพิ่มขึ้น (Cornell, 2002)

5.4 การหาค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุดของ y_1 และ y_2 พร้อมกัน (Simultaneous Multiple Response Optimizer or Single Composite Response) ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 Simultaneous Multiple Response Optimizer of y_1 and y_2

ภาพที่ 24 เป็นการหาค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุดของ y_1 และ y_2 พร้อมกัน โดยการตั้งค่าอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก $x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 0.5409 : 0.2298 : 0.1373 : 0.0920$ และตัวแปรกระบวนการ z_1 และ z_2 อยู่ที่ระดับต่ำ (-1) จะได้ค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุดคือ $y_1 = 96.4599\%$ และ $y_2 = 0.3023 \text{ kWh/kg}$

6. ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยการตั้งค่าอัตราส่วนผสมเศษเหล็กที่ได้จากการทำ Simultaneous Multiple Response Optimizer คือ $x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 0.5409 : 0.2298 : 0.1373 : 0.0920$ และปัจจัยกระบวนการทั้งสองอยู่ที่ระดับต่ำ นั่นคือ $z_1 = 60$ นาที และ $z_2 = 1,600^\circ\text{C}$ จำนวน 34 การทดลอง จำนวนได้ค่าเฉลี่ย $y_1 = 89.97\%$ และ $y_2 = 0.5364 \text{ kWh/kg}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.387% และ 0.05 kWh/kg ตามลำดับ

7. ตรวจสอบข้อสรุปที่ได้จากการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ y_1 และ y_2 ตามลำดับ ระหว่างการผลิตตามปกติกับการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer (การทดลองเพื่อยืนยันผล)

ก่อนทำการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ ควรตรวจสอบข้อสมมุติเบื้องต้นก่อนว่าข้อมูลที่ได้จากการผลิตตามปกติ และข้อมูลจากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer มีการแจกแจงปกติหรือไม่ หากมีการแจกแจงปกติจะช่วยเพิ่มอำนาจของการทดสอบ ทำให้มีความน่าเชื่อถือ โดยมีสมมุติฐานของการทดสอบ คือ

H_0 : ข้อมูลตัวอย่างมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ

H_1 : ข้อมูลตัวอย่างไม่ได้มาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ

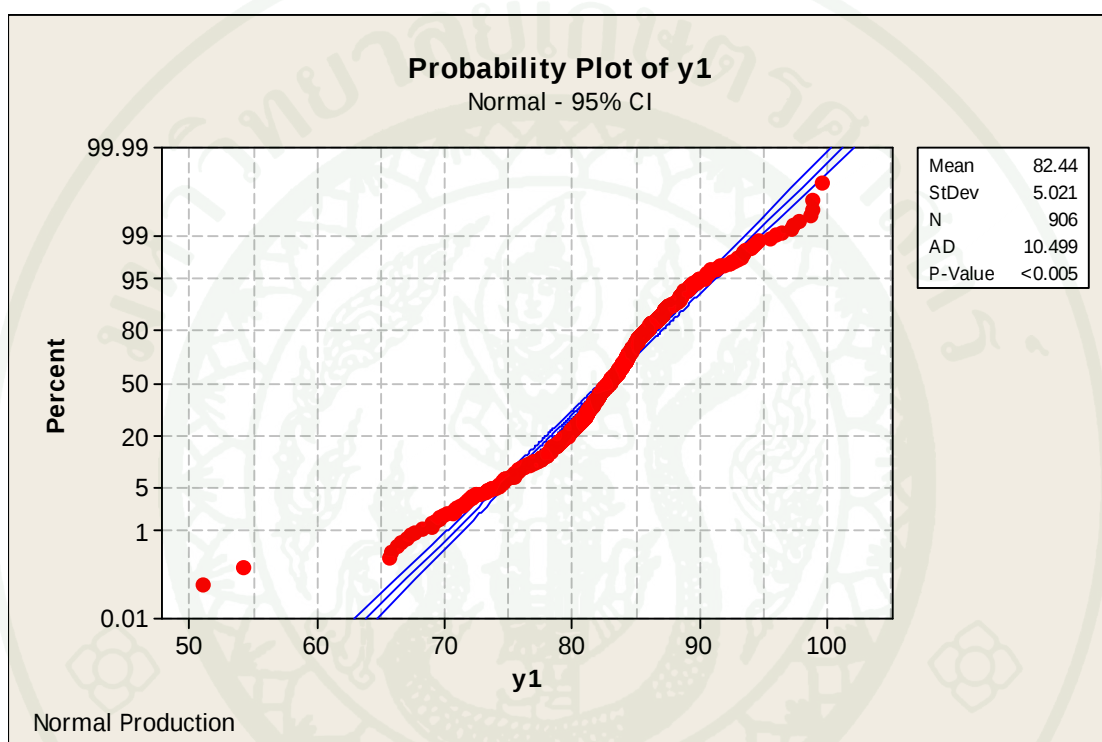
เนื่องจากข้อมูล y_1 และ y_2 ของการผลิตตามปกติ มี $P\text{-Value}$ น้อยกว่าระดับความมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.01$) แต่การผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer มี $P\text{-Value}$ มากกว่าระดับความมีนัยสำคัญ สรุปได้ดังนี้

การผลิตตามปกติที่ไม่มีการกำหนดอัตราส่วนผสมเศษเหล็ก และไม่มีการตั้งค่าระดับของปัจจัยกระบวนการที่เก็บรวบรวมได้จำนวน 906 ข้อมูล จำนวนได้ค่าเฉลี่ย $y_1 = 82.44\%$ และ $y_2 = 0.4764 \text{ kWh/kg}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.021% และ 0.06441 kWh/kg ตามลำดับ

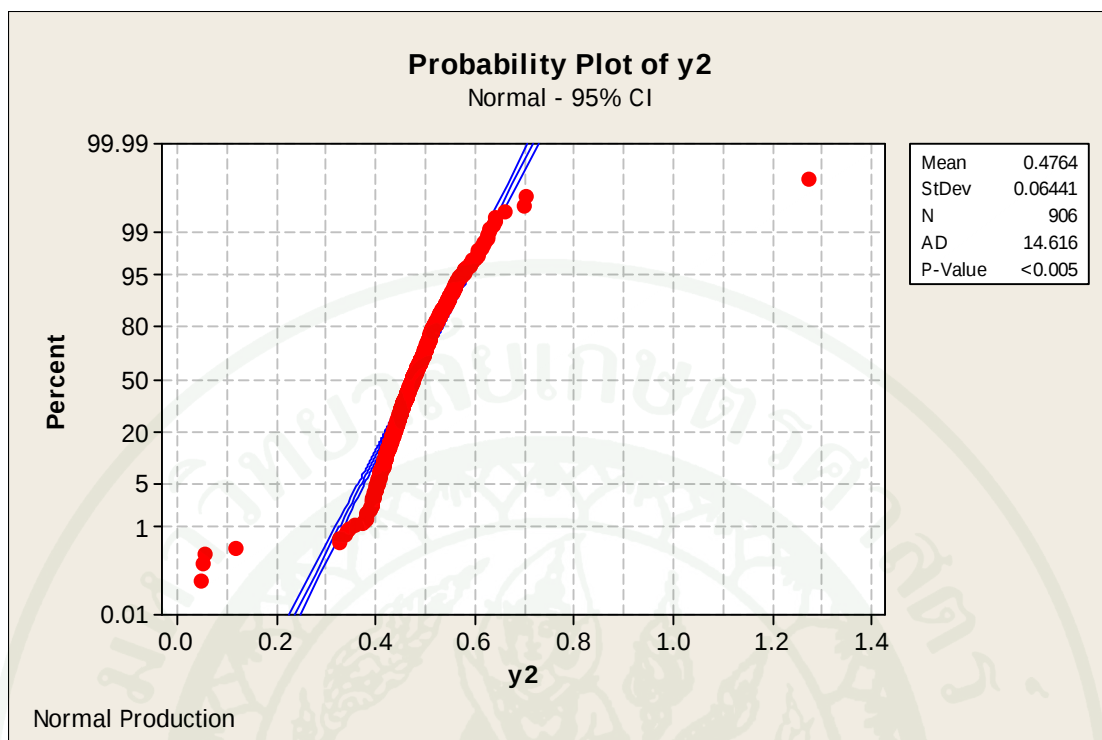
สำหรับ y_1 : $P\text{-Value} < 0.005 < \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 25

สำหรับ y_2 : $P\text{-Value} < 0.005 < \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 26

จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปว่าข้อมูลตัวอย่างไม่ได้มาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ดังแสดงในภาพที่ 25-26



ภาพที่ 25 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตามปกติ



ภาพที่ 26 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตามปกติ

เมื่อข้อมูลดังกล่าวไม่มีการแจกแจงปกติจำเป็นต้องทำการตรวจสอบเพื่อปรับปรุงให้ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ หรืออาจทำการแปลงข้อมูลให้เป็นไปตามทฤษฎีสถิติ อย่างไรก็ตาม ได้ตรวจสอบแล้วพบว่าข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Outlier) จึงสืบหาสาเหตุโดยปริกษาวิศวกรของโรงงานและทราบว่าข้อมูลที่มีค่าผิดปกติเกิดจากสาเหตุ 4 ข้อหลัก ดังนี้

(1) การพ่นออกซิเจนเข้าไปใน EAF เพื่อลดหรือกำจัดปริมาณคาร์บอนส่วนเกินมากเกินไป ทำให้มีความดันอากาศภายใน EAF ค่อนข้างสูงเกินไป ส่งผลให้ y_1 ต่ำกว่าปกติ และต้นทุนสูงกว่าปกติ เนื่องจากสิ้นเปลืองออกซิเจนที่พ่น

(2) ในบางครั้งอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ จากการหล่อเหล็กแท่งที่ไม่สอดคล้องกับเวลาในการหล่อเหล็กแท่งแต่ละครั้ง โดยน้ำเหล็กที่อยู่ในถัง Ladle จำเป็นต้องปล่อยทิ้งไว้ (Waiting Time) นานเกินไป ทำให้อุณหภูมิลดลง ส่งผลให้น้ำเหล็กหนืดไหลตัวได้ไม่ดีเป็นผลให้ y_1 ลดลง แม้ว่าที่ถัง Ladle จะมีก๊าซธรรมชาติช่วยในการอุ่นเพื่อไม่ให้อุณหภูมิลดลงมากเกินไปแล้วก็ตาม จึงเป็นผลให้ต้นทุนสูงเกินปกติด้วย

(3) ทรายซึ่งอ่อนไม่ได้มาตรฐานขณะชั่งน้ำหนักเศษเหล็ก ทำให้ได้น้ำหนักหรือปริมาตรเศษเหล็กน้อยกว่าปกติ เมื่อเทียบกับผลผลิตเหล็กแท่งที่ได้ ส่งผลให้การบันทึกข้อมูล y_1 สูงกว่าปกติ

(4) ขณะหล่อเหล็กแท่ง มีบางครั้งที่น้ำเหล็กไหลทะลักกรางเท ทำให้ y_1 ลดลง เนื่องจากความไม่แข็งแรงของปูนขาวที่บรอบขอบรูปเทที่กั้นถึง Ladle

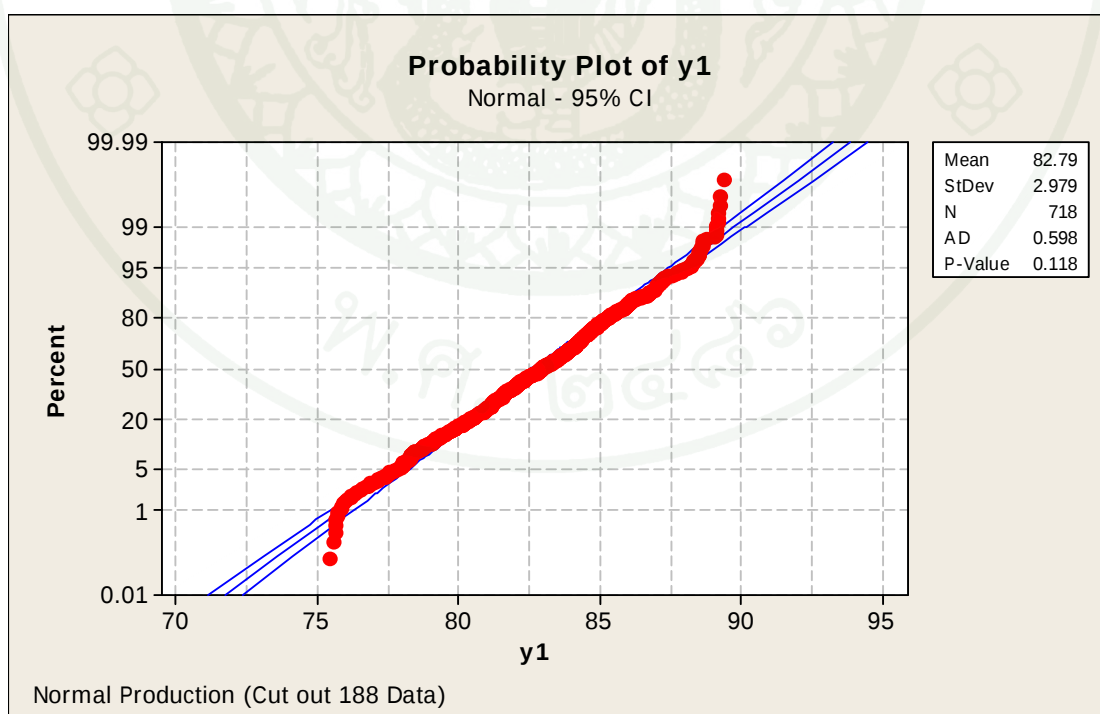
ดังนั้นจึงได้พิจารณาตัดข้อมูลผิดปกติออกจำนวน 188 ข้อมูล เหลือ 718 ข้อมูล แล้วทำการวิเคราะห์ผลข้อมูลใหม่ สรุปได้ดังนี้

การผลิตตามปกติ โดยตัด Outlier ออก 188 ข้อมูล

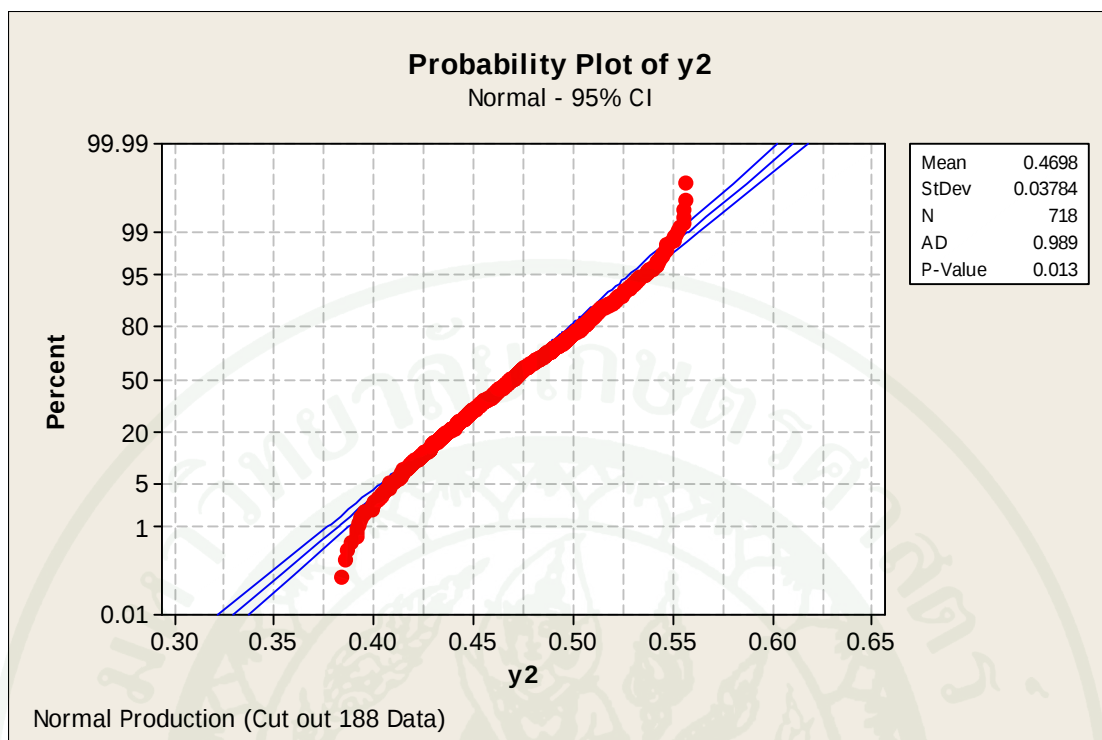
สำหรับ y_1 : $P\text{-Value} = 0.118 > \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 27

สำหรับ y_2 : $P\text{-Value} = 0.013 > \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 28

จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปว่าข้อมูลตัวอย่างมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ดังแสดงในภาพที่ 27-28



ภาพที่ 27 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตามปกติ โดยตัด Outlier ออก



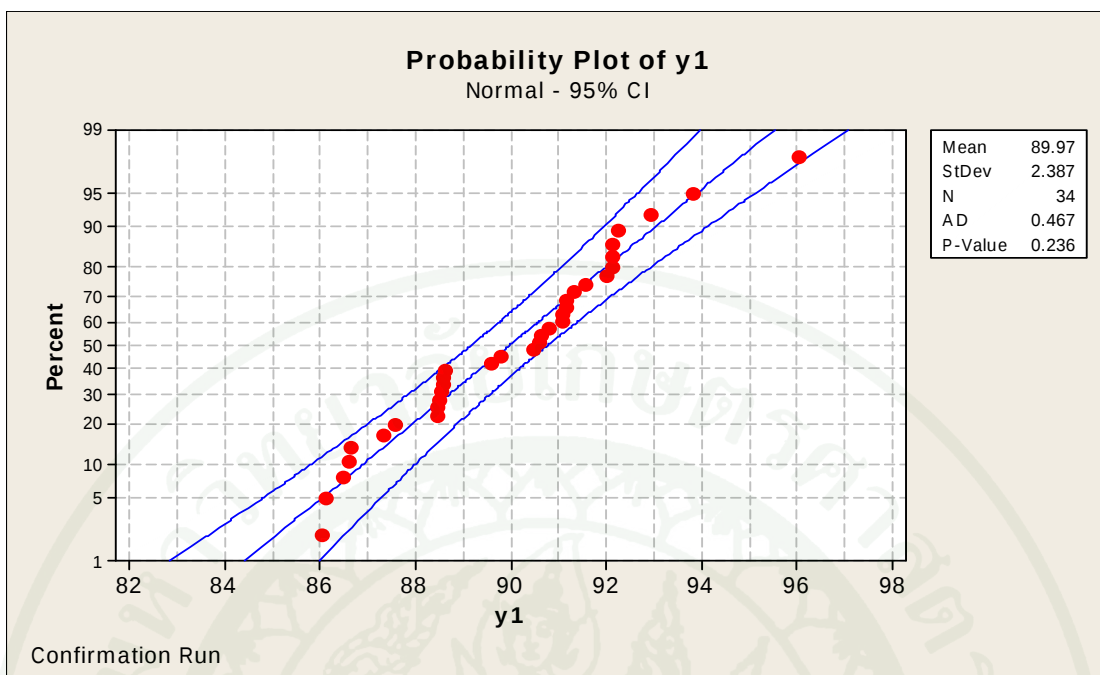
ภาพที่ 28 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตามปกติ โดยตัด Outlier ออก

การผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer

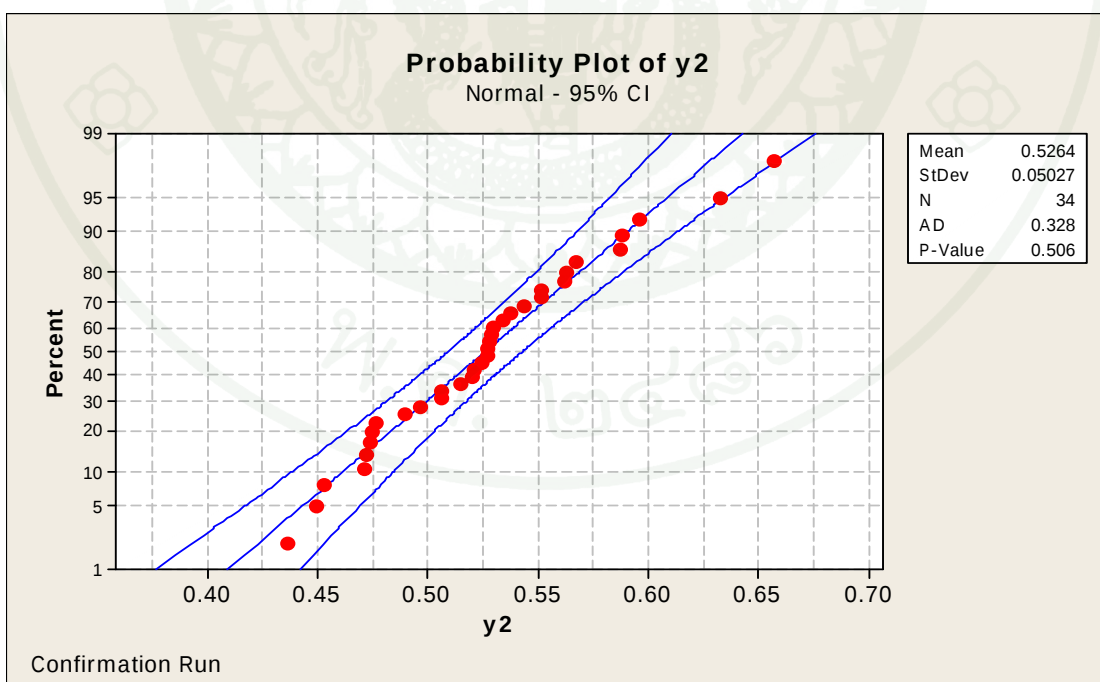
สำหรับ y_1 : $P - Value = 0.514 > \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 29

สำหรับ y_2 : $P - Value = 0.452 > \alpha = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 30

จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปว่าข้อมูลตัวอย่างมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ดังแสดงในภาพที่ 29-30



ภาพที่ 29 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_1 จากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer



ภาพที่ 30 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ y_2 จากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer

ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจึงต้องใช้ข้อมูลที่ได้มาจากการประชากรที่มีการแจกแจงปกติ สามารถสรุปข้อมูลที่วิเคราะห์เพื่อทดสอบสมมติฐานได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ข้อมูลสำหรับการทดสอบสมมติฐานเพื่อตรวจสอบข้อสรุป

	การผลิตตามปกติ	การผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer
ค่าเฉลี่ย y_1 ($\bar{X}_{y_1}$)	82.79	89.97
ความแปรปรวนของ y_1 ($S_{y_1}^2$)	2.979 ²	2.387 ²
ค่าเฉลี่ย y_2 ($\bar{X}_{y_2}$)	0.4698	0.5264
ความแปรปรวนของ y_2 ($S_{y_2}^2$)	0.03784 ²	0.05027 ²
จำนวนข้อมูล (n)	718	34

7.1 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร สำหรับ y_1 (โดยกำหนดระดับความมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$)

เนื่องจากขนาดตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม คือ $n_1 = 718$ และ $n_2 = 34$ เป็นข้อมูลที่มาจากการแจกแจงปกติ โดยที่ $n_1 \geq 30$ และ $n_2 \geq 30$ และไม่ทราบค่าความแปรปรวนของทั้งสองประชากร การทดสอบสมมติฐานในกรณีนี้จึงต้องใช้ Approximate Z-Test (บุญเรียง, 2545)

กำหนดให้ $\mu_{y_1(1)}$ เป็นค่าเฉลี่ยประชากร y_1 ของการผลิตตามปกติ

$\mu_{y_1(2)}$ เป็นค่าเฉลี่ยประชากร y_1 ของการผลิตตาม Simultaneous
Multiple Response Optimizer

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

$$H_0 : \mu_{y_1(1)} = \mu_{y_1(2)}$$

$$H_1 : \mu_{y_1(1)} < \mu_{y_1(2)}$$

ค่าสถิติทดสอบ คือ

$$Z_{cal} = \frac{(\bar{X}_{y_1(1)} - \bar{X}_{y_1(2)}) - (\mu_{y_1(1)} - \mu_{y_1(2)})}{\sqrt{\frac{S_{y_1(1)}^2}{n_1} + \frac{S_{y_1(2)}^2}{n_2}}}$$

$$Z_{cal} = \frac{(82.79 - 89.97) - (0)}{\sqrt{\frac{2.979^2}{718} + \frac{2.387^2}{34}}} = -16.93$$

เนื่องจาก $Z_{cal} = -16.93 < Z_{\alpha} = Z_{0.05} = -1.645$ ตกอยู่ในบริเวณวิกฤต จึงปฏิเสธ H_0 สรุปว่าค่าเฉลี่ย y_1 ของการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer สูงกว่าการผลิตตามปกติ นั่นคือประสิทธิภาพการผลิตที่ได้จากแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

7.2 การทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร สำหรับ y_2 (โดยกำหนดระดับความมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$)

กำหนดให้ $\mu_{y_2(1)}$ เป็นค่าเฉลี่ย y_2 ของการผลิตตามปกติ

$\mu_{y_2(2)}$ เป็นค่าเฉลี่ย y_2 ของการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer

สมมุติฐานของการทดสอบ คือ

$$H_0 : \mu_{y_2(1)} = \mu_{y_2(2)}$$

$$H_1 : \mu_{y_2(1)} > \mu_{y_2(2)}$$

ค่าสถิติของการทดสอบ คือ

$$Z_{cal} = \frac{(\bar{X}_{y_2(1)} - \bar{X}_{y_2(2)}) - (\mu_{y_2(1)} - \mu_{y_2(2)})}{\sqrt{\frac{S_{y_2(1)}^2}{n_1} + \frac{S_{y_2(2)}^2}{n_2}}}$$

$$Z_{cal} = \frac{(0.4698 - 0.5264) - (0)}{\sqrt{\frac{0.03784^2}{718} + \frac{0.05027^2}{34}}} = -6.48$$

เนื่องจาก $Z_{cal} = -6.48 < Z_{\alpha} = Z_{0.05} = 1.645$ ตกอยู่ในบริเวณยอมรับ H_0 สรุปว่าค่าเฉลี่ย y_2 ของการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer ไม่น้อยกว่าการผลิตตามปกติ นั่นคือการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตที่ได้ 1 กิโลกรัม จากแบบจำลองไม่ลดลงหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

วิจารณ์

1. การที่ข้อมูล y_1 และ y_2 มีการแจกแจงปกติ แสดงถึงกระบวนการผลิตหลักแท่งที่มีเสถียรภาพ และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้จากการทำการทดลองกับกระบวนการผลิตนั้นส่งผลต่อ y_1 และ y_2 เพียงเล็กน้อย รวมทั้งปัจจัยที่ใช้ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญของวิศวกรโลหการฝ่ายโรงหลอมมีผลให้กระบวนการผลิตเพิ่มความมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติจะช่วยเพิ่มอำนาจของการทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย T-Test และการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย F-Test ทำให้ผลสรุปที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

2. ผลที่ได้จากการทดลองคือแบบจำลองทางสถิติของผลตอบ y_1 และ y_2 ซึ่งเป็น Quadratic Model และทำการหาอนุพันธ์บางส่วนของแบบจำลองทั้งสองเป็นไปตามสมการ (Myers *et al.*, 2009)

หาอนุพันธ์บางส่วนของ y_1 และ y_2 เทียบกับอัตราส่วนผสมเหล็ก

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial y_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial y_1}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial y_1}{\partial x_4} = 0$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial y_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial y_2}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial y_2}{\partial x_4} = 0$$

หาอนุพันธ์บางส่วนของ y_1 และ y_2 เทียบกับตัวแปรกระบวนการ

$$\frac{\partial y_1}{\partial z_1} = 0, \frac{\partial y_1}{\partial z_2} = 0$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial z_1} = 0, \frac{\partial y_2}{\partial z_2} = 0$$

จากนั้นแก้สมการ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบทั้ง 2 ตัว พร้อมกัน (Simultaneous Multiple Response Optimizer or Single Composite Response) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 24 นั่นคือ $x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 0.5409 : 0.2298 : 0.1373 : 0.0920$ และ $z_1 = -1, z_2 = -1$ แทนค่าลงในแบบจำลองจะได้ $y_1 = 96.4599\%$ และ $y_2 = 0.3023 \text{ kWh/kg}$

จากการทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 34 การทดลอง ได้ค่าเฉลี่ยของ $y_1 = 89.97\%$ และ $y_2 = 0.5264 \text{ kWh/kg}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 2.387% และ 0.05027 kWh/kg ตามลำดับ โดยผลของ y_1 และ y_2 ไม่เป็นไปตามเป้าหมาย โดย y_1 มีค่าเฉลี่ยลดลง และ y_2 มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลของ y_1 ที่ได้จากการทำการทดลองเพื่อยืนยันผลสูงกว่าการผลิตตามปกติที่โรงงานดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งไม่มีการกำหนดอัตราส่วนผสมหลักและตัวแปรกระบวนการ ทำให้สามารถยอมรับได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาได้นี้มีประสิทธิภาพ ซึ่งยืนยันได้ด้วยการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย y_1 และ y_2 ระหว่างการผลิตตามปกติกับการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer ที่ผ่านมา การที่ y_2 มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการผลิตที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กอาศัยพลังงานอื่นในรูปของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จากการพ่นออกซิเจนเข้าไปในเตาหลอมและจากธาตุผสมในเศษเหล็ก ซึ่งอาจน้อยหรือมากไปบ้างปรับเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ ถ้าพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีน้อย ทำให้ต้องใช้พลังงานฟามากขึ้น และจะใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง เมื่อพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีมาก

3. แบบจำลองสถิติที่พัฒนาได้จะนำไปสู่ภาคปฏิบัติในโรงงานผลิตเหล็กแท่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต สอดคล้องกับนโยบายของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ในการสนับสนุน ส่งเสริม และพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า แต่มีอุปสรรคที่สำคัญคือ อุปสงค์เศษเหล็กมากกว่าอุปทานเศษเหล็ก โดยเฉพาะเศษเหล็กเกรดคุณภาพ จึงเป็นข้อจำกัดของการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กกล้ากลุ่มนี้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่ง อาศัยประสบการณ์ และการระดมสมองจากวิศวกรและช่างเทคนิคของโรงงานผลิตเหล็กแท่งที่เข้าไปศึกษาทำวิจัย เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factors) และส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต (y_1 : %Yield Recovery) และการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตเหล็กแท่ง 1 กิโลกรัม (y_2 : kWh/kg) มาทำการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง โดยสามารถเลือกได้ 3 ปัจจัย คือ วัตถุดิบหลักเศษเหล็ก ระยะเวลาในการหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็กในแต่ละรอบ (Tap-to-Tap Time: TTT) และอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (Tapping Temperature: TT) ซึ่งวัตถุดิบเศษเหล็กนั้นมีหลายเกรดคุณภาพ ราคา และเงื่อนไขการใช้แตกต่างกัน จำเป็นต้องหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็ก โดยใช้การออกแบบการทดลองผสมที่สามารถกำหนดเงื่อนไขให้กับการออกแบบได้ คือ Extreme Vertices Design ส่วนปัจจัยที่เหลือ คือ TTT และ TT เป็นตัวแปรกระบวนการ (Process Variables) ที่สามารถตั้งค่าได้ที่เตาอาร์คไฟฟ้าโดยตรง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 แล้วนำการออกแบบการทดลองทั้งสองส่วนมารวมกันเป็น Extreme Vertices Design with Two Process Variables ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสร้างการออกแบบการทดลองนี้ได้ ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ จนสามารถพัฒนาแบบจำลองการถดถอยได้เป็น Quadratic Model ดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 = & 70.8x_1 + 26.5x_2 - 55.0x_3 - 135.8x_4 \\ & + 116.3x_1x_2 + 197.5x_1x_3 + 275.5x_1x_4 \\ & + 226.9x_2x_3 + 295.8x_2x_4 + 357.3x_3x_4 \\ & + 2.0x_1z_1 + 39.4x_3z_1 - 11.9x_4z_1 \\ & - 9.3x_1x_2z_1 - 63.1x_1x_3z_1 \\ & - 50.2x_2x_3z_1 + 38.7x_2x_4z_1 - 12.9x_3x_4z_1 \\ & + 1.2x_1z_2 + 37.8x_3z_2 + 11.5x_4z_2 \\ & - 6.3x_1x_2z_2 - 57.7x_1x_3z_2 - 23.2x_1x_4z_2 \\ & - 50.4x_2x_3z_2 - 59.3x_3x_4z_2 \\ & - 8.5x_1z_1z_2 - 57.3x_2z_1z_2 - 141.6x_3z_1z_2 - 152.0x_4z_1z_2 \\ & + 113.9x_1x_2z_1z_2 + 224.2x_1x_3z_1z_2 + 234.9x_1x_4z_1z_2 \\ & + 242.2x_2x_3z_1z_2 + 247.9x_2x_4z_1z_2 + 328.5x_3x_4z_1z_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{y}_2 = & 0.485x_1 + 0.365x_2 + 0.492x_3 + 0.528x_4 - 0.559x_2x_4 \\
& + 0.105x_1z_1 + 0.772x_2z_1 + 1.232x_3z_1 - 0.416x_4z_1 \\
& - 1.483x_1x_2z_1 - 2.034x_1x_3z_1 - 2.408x_2x_3z_1 \\
& + 0.041x_2z_2 + 0.066x_3z_2 - 0.078x_1x_4z_2 \\
& + 0.237x_1z_1z_2 + 1.683x_2z_1z_2 + 3.608x_3z_1z_2 + 3.417x_4z_1z_2 \\
& - 3.284x_1x_2z_1z_2 - 5.724x_1x_3z_1z_2 - 5.420x_1x_4z_1z_2 \\
& - 6.470x_2x_3z_1z_2 - 6.007x_2x_4z_1z_2 - 7.401x_3x_4z_1z_2
\end{aligned}$$

จากแบบจำลองที่พัฒนาได้นำมาใช้ในการหาค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุดของ y_1 และ y_2 พร้อมกัน (Simultaneous Multiple Response Optimizer or Single Composite Response) โดยสามารถกำหนดอัตราส่วนผสมวัตถุดิบพิเศษหลัก x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 0.5409: 0.2298: 0.1373: 0.0920 และตั้งค่าระดับของปัจจัยกระบวนการคือ $TTT = 60$ นาที และ $TT = 1,600^\circ\text{C}$ จะได้ประสิทธิภาพการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตหลักแท่งที่ได้ 1 กิโลกรัม ที่เหมาะสม คือ $y_1 = 96.4599\%$ และ $y_2 = 0.3023 \text{ kWh/kg}$ (302.3 kWh/Ton) แต่การทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 34 การทดลอง ได้ค่าเฉลี่ยของ $y_1 = 89.97\%$ และ $y_2 = 0.5264 \text{ kWh/kg}$ (526.4 kWh/Ton) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.387% และ 0.05027 kWh/kg ตามลำดับ ประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เป็นไปตามเป้าหมาย เมื่อเปรียบเทียบโดยการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติกับการผลิตตามปกติที่ไม่มีการกำหนดอัตราส่วนผสมพิเศษหลักและไม่มีการตั้งค่าระดับของตัวแปรกระบวนการ ซึ่งได้ค่าเฉลี่ย $y_1 = 82.79\%$ และ $y_2 = 0.4698 \text{ kWh/kg}$ (469.8 kWh/Ton) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.979% และ 0.03784 kWh/kg ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่ง y_2 ที่ได้จากการผลิตตาม Simultaneous Multiple Response Optimizer จะไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการผลิต y_1 ที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กอาศัยพลังงานอื่นในรูปของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จากการฟั่นออกซิเจนเข้าไปในเตาหลอมและจากธาตุผสมในเศษเหล็ก ซึ่งอาจน้อยหรือมากไปบ้างปรับเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ ถ้าพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีน้อย ทำให้ต้องใช้พลังงานฟ้ามมากขึ้น และจะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง เมื่อพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีมาก

อย่างไรก็ตาม หากมีการใช้เศษเหล็กเป็นไปตามคู่มือการกำหนดลำดับชั้นคุณภาพเศษเหล็กของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม รวมทั้งแบ่งกลุ่มเศษเหล็กให้มีหลายเกรดคุณภาพเพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้การออกแบบการทดลองมาพัฒนาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ แต่เนื่องจากอุปสงค์เศษเหล็กมีมากกว่าอุปทาน จึงเป็นข้อจำกัดของการ

พัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กกล้ากลุ่มนี้ กรณีนี้การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) จาก Cox Response Trace Plot อาจเป็นแนวทางที่ช่วยแก้ไขสถานการณ์เช่นนี้ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงควรพิจารณาวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องอื่นเพิ่มเติม เช่น เหล็กดิบ (Pig Iron) และเหล็กพูน (Sponge Iron)

ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลองสถิติที่พัฒนาได้จากงานวิจัยนี้ เหมาะกับโรงงานผลิตเหล็กแท่งที่เข้าไปศึกษาทำวิจัยเท่านั้น ซึ่งได้แบ่งกลุ่มเศษเหล็กเป็น 4 กลุ่ม แต่เนื่องจากในแต่ละโรงงานของประเทศไทยจำนวน 17 ราย มีการแบ่งกลุ่มเศษเหล็กที่แตกต่างกันไป โดยโรงงานที่มีขนาดเล็กกว่ามักมีข้อจำกัดด้านการเงิน ทำให้ได้รับเศษเหล็กที่มีความหนาแน่นต่ำและไม่สามารถจัดแบ่งกลุ่มเศษเหล็กได้ ขณะที่โรงงานขนาดใหญ่จะมีกำลังซื้อมากกว่าทำให้เศษเหล็กที่ได้มีคุณภาพดีกว่าและสามารถจัดแบ่งกลุ่มเศษเหล็กได้หลากหลายกว่า และยังต้องใช้แนวปฏิบัติของวิศวกรฝ่ายโรงหลอมที่มีประสบการณ์และความชำนาญจะช่วยลดความแปรปรวนและผลกระทบอื่นๆ (Uncontrollable Factors) ที่มีต่อ y_1 ลงได้

2. การทำการทดลองเพื่อยืนยันผลนั้นควรทำให้มีจำนวนมากพอเพื่อที่จะเปรียบเทียบกับการผลิตตามปกติของโรงงานได้ นั่นคือต้องมีจำนวนการทดลองที่เทียบเท่ากัน จึงจะสามารถสรุปผลได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ แต่เนื่องจากปริมาณเศษเหล็กขาดแคลน ราคาสูง และผันผวนมาก โดยเฉพาะเศษเหล็กเกรดคุณภาพ (เศษเหล็กกลุ่ม 2) จึงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กกล้ากลุ่มนี้ ทำให้ไม่สามารถตั้งค่าทำการทดลองเพื่อยืนยันผลให้มีจำนวนมากพอได้กับระยะเวลาในการทำวิจัย ดังนั้นในอนาคตจึงต้องพิจารณานำเข้า (Import) เหล็กดิบ และ/หรือเหล็กพูน มาทำการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองร่วมกันกับเศษเหล็ก และพัฒนาแบบจำลองสถิติใหม่ โดยเหล็กดิบและเหล็กพูนนั้น ราคาจะสูงกว่าเศษเหล็ก มีเนื้อเหล็กหนาแน่นและมีความเสถียรมากกว่า มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง แต่จะสร้างปัญหาในการกำจัดคาร์บอนส่วนเกินในภายหลัง

3. ในการทำวิจัยครั้งต่อไปอาจแบ่งกลุ่มเศษเหล็กให้ละเอียดเพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มาพัฒนาแบบจำลองสถิติที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยความละเอียดจะช่วยลดความแปรปรวนของเศษเหล็กภายในแต่ละกลุ่มเดียวกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากเศษ

เหล็กมาจากผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าหลากหลายชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแร่เหล็ก

4. การออกแบบการทดลองในแนวทางนี้อาจเป็นจุดเริ่มต้นให้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมอื่นนอกเหนือจากอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าที่พิจารณาหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่จะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ ร่วมกับปัจจัยหรือตัวแปรกระบวนการที่ตั้งค่าได้จากเครื่องจักรโดยตรง เช่น อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก ที่ศึกษาคุณสมบัติวัตถุดิบของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม 3 ชนิด คือ แป้งข้าว แกลบข้าว และพอลิเอทิลีน ร่วมกับปัจจัยกระบวนการต่างๆ เช่น อัตราป้อน อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น ซึ่งตั้งค่าได้จากเครื่องฉีดพลาสติกโดยตรง โดยที่การหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบใช้การออกแบบการทดลองผสม เช่น การออกแบบจุดศูนย์กลางซิมเพล็กซ์ (Simplex-Centroid Design) การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (Simplex-Lattice Design) และการออกแบบการทดลองผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design or Extreme Vertices Design) ส่วนตัวแปรกระบวนการนั้นใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เช่น 2^k หรือ 3^k Factorial Design และการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นต้น แล้วนำการออกแบบทั้ง 2 ส่วนนี้มารวมกันเป็น Process Variables in Mixture Experiments หรือสลับกันเป็น Mixture Experiments in Process Variables ก็ได้ ดังทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ “การออกแบบการทดลอง” ทั้งนี้การจะเลือกใช้การออกแบบใดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และอุตสาหกรรมกระบวนการที่มีความแตกต่างกันไป ซึ่งจำเป็นที่ผู้วิจัยจะต้องศึกษากระบวนการผลิตอย่างละเอียดรอบครอบ เพื่อให้มีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ โดยอาจนำหลักการแผนผังก้างปลาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อที่จะคัดเลือกปัจจัยได้อย่างสมเหตุสมผลก่อนที่จะเริ่มทำการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการกำหนดลำดับ
ชั้นคุณภาพเศษเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. 2543. แผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็ก, น. 18-66.
ใน การประชุมวิชาการ กทช. ประจำปี 2543 เนื่องในวาระครบรอบ 108 ปี (9 รอบ) แห่ง
การสถาปนากรมทรัพยากรธรณี ครั้งที่ 1: ด้านอุตสาหกรรมโลหการ. หอสมุดการพิมพ์,
กรุงเทพฯ.

ชยันต์ เลาสุทแสน. 2548. การออกแบบแผนการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการฉีด
พลาสติก: กรณีศึกษาโรงงานฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสาโรช จิตติเกียรติพงศ์. 2521. วัสดุในงานวิศวกรรม. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น
จำกัด, กรุงเทพฯ.

นิภาส ถิ่นะธรรม. 2553. การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์
โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญเรียง ขจรศิลป์. 2545. สถิติวิจัย I. พิมพ์ครั้งที่ 8. หจก. พี.เอ็น. การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง
(Design and Analysis of Experiments). พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด,
กรุงเทพฯ.

ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

- วิรัช พานิชวงค์. 2549. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis). พิมพ์ครั้งที่ 4. ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- วีระพันธ์ สิทธิพงศ์. 2537. โลหะวิทยากายภาพสำหรับวิศวกร ภาค 1. โรงพิมพ์นิยมวิทยา, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์วิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม บางเขน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549. โครงการศึกษาเพื่อกำหนดลำดับชั้นคุณภาพวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมพื้นฐาน.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542. โครงการศึกษาการจัดการวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเหล็ก.
- ศุภชัย นาทะพันธ์. 2551. การควบคุมคุณภาพ (Quality Control). บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545. โครงการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเหล็กขั้นต้นในประเทศไทย ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2.
- สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. 2547. โครงการพัฒนาสินค้าที่เพิ่มมูลค่าในเชิงพาณิชย์ของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าตามพิกัดศุลกากร 7213 และ 7214 (โครงการต่อเนื่องปีที่ 2).
- สุมิตรา เรืองพิระกุล. 2542. หลักสถิติเพื่อการพยากรณ์ (Statistical Forecasting Methods). พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2511. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย. มอก. 24-2548.

อนันต์ เศรษฐพุทธิ, นพิตา หิญาธีระนันท์ และธราพงษ์ วิทิตสานต์. ม.ป.ป. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ของปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล, ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (ภาควิชาเคมีเทคนิค) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. แหล่งที่มา: <http://www.intania.com/scripts/journalmem.asp>, 3 พฤษภาคม 2554.

อนันต์ชัย เชื้ออนธรรม. 2549. **วิธีการทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรรณพ พรณบัวหลวง. 2549. **การออกแบบการทดลองแบบผสมเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเชลดูโลส**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Cornell, John A. 2002. **Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data**. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc. New York.

Yahiaoui, I. and Aissani-Benissad, F. 2010. **Experimental design for copper cementation process in fixed bed reactor using two-level factorial design**. Arabian Journal of Chemistry, King Saud University. Available Source: www.sciencedirect.com/, April 30, 2011.

Kopeliovich, Dmitri. 2009. **Electric Arc Furnace**. Substech. Available Source: <http://www.substech.com/>, December 29, 2010.

Kutner, Michael H., Nachtsheim, Christopher J. and Neter, John. 2004. **Applied Linear Regression Models**. 4th ed. McGraw-Hill/Irwin, Inc. New York.

Montgomery, D.C. 2009. **Design and Analysis of Experiments**. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M. 2009. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc. New York.

Menezes, R.R., Malzac Neto, H.G., Santana, L.N.L., Lira, H.L., Ferreira H.S. and Neves G.A. 2008. **Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments**. Journal of the European Ceramic Society 28, Available Source: www.sciencedirect.com/, April 30, 2011.





ภาคผนวก ก

ภาพกลุ่มของเศษเหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง



ภาพผนวกที่ ก1 เศษเหล็กกลุ่ม 1 ได้แก่ แผ่นสังกะสีปี้ม Tin Free ลูกอัดบาง ลูกอัดแผ่นสังกะสีปี้ม
Tin Free ลูกอัดเส้นลวด ลูกอัดสายรัด



ภาพผนวกที่ ก2 เศษเหล็กกลุ่ม 2 ส่วนที่ 1 ได้แก่ แผ่นปี้มบาง แผ่นปี้มดำ เหล็กตัดไฟ ลูกอัดปี้มหนา
ลูกอัดปี้มดำ เหล็ก Return



ภาพผนวกที่ ก3 เศษเหล็กกลุ่ม 2 ส่วนที่ 2 ได้แก่ เหล็กตัดขอบจากเหล็กแผ่นรีดเย็น เหล็กตะเกียบจากเหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กป้อน เหล็กป้อนดำ



ภาพผนวกที่ ก4 เศษเหล็กกลุ่ม 3 ส่วนที่ 1 ได้แก่ แผ่นสังกะสีป้อน Tin Plate ลูกอัดกระป๋อง ลูกอัดแผ่นสังกะสี



ภาพผนวกที่ ก5 เศษเหล็กกลุ่ม 3 ส่วนที่ 2 ได้แก่ ลูกอัดกระป๋อง (โดยปกติจะมีดินบุกและ โครเมียมเคลือบอยู่บ้าง)



ภาพผนวกที่ ก6 เศษเหล็กกลุ่ม 4 ได้แก่ จั๊กลิงเหล็กเหนียว จี้เลื่อยเหล็กเหนียว เหล็กยิงทราย (Shot Peening) เศษน้ำเหล็ก





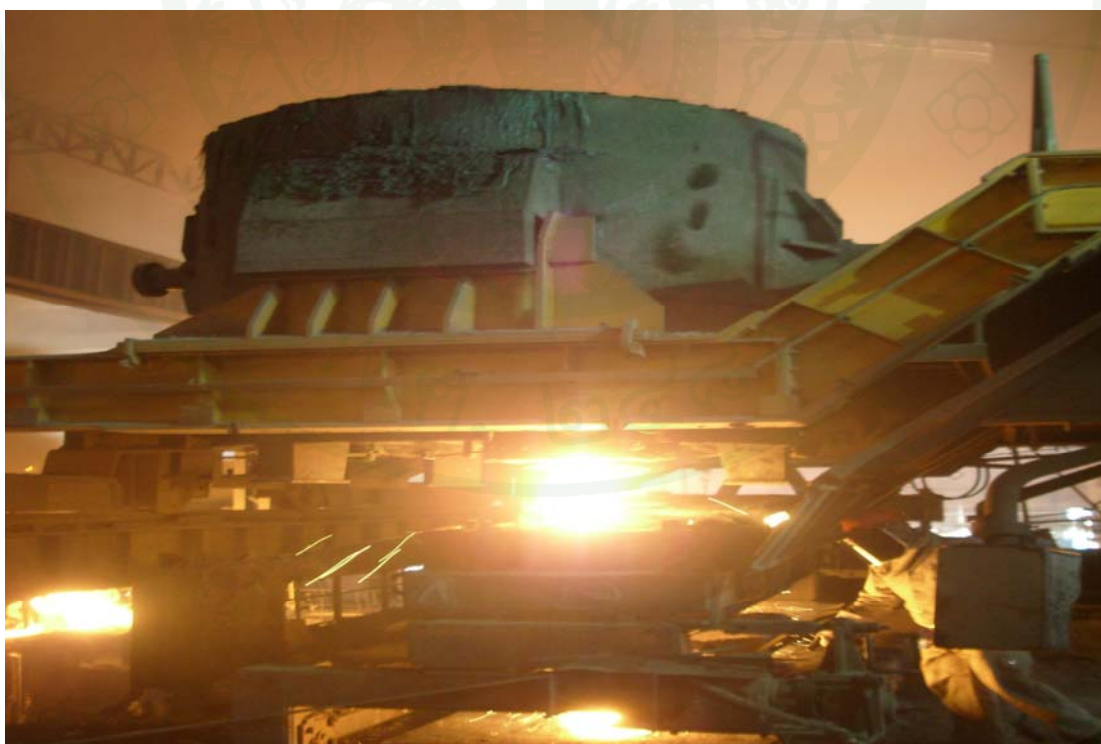
ภาพผนวกที่ ข1 การฟั่นออกซิเจนเข้าเตาหลอมไฟฟ้า (EAF)



ภาพผนวกที่ ข2 การเติมเศษเหล็กเข้าเตาหลอมไฟฟ้า (EAF)



ภาพผนวกที่ ข3 การอาร์คต่อในเตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (LF)



ภาพผนวกที่ ข4 การหล่อเหล็กแท่งต่อเนื่อง (CCM)





ภาพผนวกที่ ค1 ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) คือ เหล็กแท่ง (Billets)



ภาพผนวกที่ ค2 ผลิตภัณฑ์เหล็กเส้นชนิดต่างๆ (Deformed Bars, Round Bars and Wire Rods)

ภาคผนวก ง

แผนการทดลอง Extreme Vertices Design

แผนการทดลอง 2^2 Factorial Design

แผนการทดลอง Extreme Vertices Design with Two Process Variables

ใบบันทึกข้อมูลการผลิตและต้นทุนการผลิตของโรงงานผลิตเหล็กแท่ง

ตารางผนวกที่ ง1 แผนการทดลอง Extreme Vertices Design (Design Degree: 1)

Run	Scrap Mix of Proportions			
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0.4	0.35	0	0.25
2	0.4	0.35	0.25	0
3	0.85	0	0	0.15
4	0.75	0	0	0.25
5	0.4	0.1	0.25	0.25
6	0.5	0	0.25	0.25
7	0.85	0	0.15	0
8	0.75	0	0.25	0
9	0.85	0.15	0	0
10	0.65	0.35	0	0
Min.	0.40	0	0	0
Max.	0.85	0.35	0.25	0.25

ตารางผนวกที่ ง2 แผนการทดลอง 2^2 Factorial Design (Two Process Variables)

Treatment	Factorial Effect				Factors	Factor Levels	
Combination	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>		Low (-1)	High (+1)
(1)	+	-	-	+	A: Tap-to-Tap Time (Minutes)	60	70
<i>a</i>	+	+	-	-	B: Tapping Temperature (°C)	1,600	1,630
<i>b</i>	+	-	+	-			
<i>ab</i>	+	+	+	+			

ตารางผนวกที่ ๓3 แผนการทดลอง Extreme Vertices Design (Design Degree: 1) with Two Process
Variables (z_1 : TTT & z_2 : TT)

Run	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2
1	0.4	0.35	0	0.25	-1	-1
2	0.4	0.35	0.25	0	-1	-1
3	0.85	0	0	0.15	-1	-1
4	0.75	0	0	0.25	-1	-1
5	0.4	0.1	0.25	0.25	-1	-1
6	0.5	0	0.25	0.25	-1	-1
7	0.85	0	0.15	0	-1	-1
8	0.75	0	0.25	0	-1	-1
9	0.85	0.15	0	0	-1	-1
10	0.65	0.35	0	0	-1	-1
11	0.4	0.35	0	0.25	1	-1
12	0.4	0.35	0.25	0	1	-1
13	0.85	0	0	0.15	1	-1
14	0.75	0	0	0.25	1	-1
15	0.4	0.1	0.25	0.25	1	-1
16	0.5	0	0.25	0.25	1	-1
17	0.85	0	0.15	0	1	-1
18	0.75	0	0.25	0	1	-1
19	0.85	0.15	0	0	1	-1
20	0.65	0.35	0	0	1	-1
21	0.4	0.35	0	0.25	-1	1
22	0.4	0.35	0.25	0	-1	1
23	0.85	0	0	0.15	-1	1
24	0.75	0	0	0.25	-1	1
25	0.4	0.1	0.25	0.25	-1	1
26	0.5	0	0.25	0.25	-1	1
27	0.85	0	0.15	0	-1	1
28	0.75	0	0.25	0	-1	1
29	0.85	0.15	0	0	-1	1
30	0.65	0.35	0	0	-1	1

ตารางผนวกที่ 33 (ต่อ)

Run	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2
31	0.4	0.35	0	0.25	1	1
32	0.4	0.35	0.25	0	1	1
33	0.85	0	0	0.15	1	1
34	0.75	0	0	0.25	1	1
35	0.4	0.1	0.25	0.25	1	1
36	0.5	0	0.25	0.25	1	1
37	0.85	0	0.15	0	1	1
38	0.75	0	0.25	0	1	1
39	0.85	0.15	0	0	1	1
40	0.65	0.35	0	0	1	1

ตารางผนวกที่ ๔4 ใบบันทึกข้อมูลการผลิตและต้นทุนการผลิตของโรงงานผลิตเหล็กแท่ง

ข้อมูลการผลิตเหล็กกล้า (เหล็กแท่ง)							
Run	ปริมาณการใช้เศษเหล็กกล้า (SS: kg.)					การใช้	
	กลุ่ม1	กลุ่ม2	กลุ่ม3	กลุ่ม4	รวม	Flux (kg.)	Alloy (kg.)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
.							
.							
.							
n							

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

Run	ข้อมูลการผลิตเหล็กกล้า (เหล็กแท่ง)					
	O_2 (Nm ³)	CNG (kg.)	$TTT(z_1)$ (นาที)	$TT(z_2)$ (°C)	Billets (kg.)	y_1 (%)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
.						
.						
.						
n						

ตารางผนวกที่ ง4 (ต่อ)

ต้นทุนการผลิต (Cost)							
	SS	Flux	Alloy	O ₂ +CNG	Energy Charge		รวม
Run	(Bahts)	(Bahts)	(Bahts)	(Bahts)	(kWh.)	(Bahts)	y ₂
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
.							
.							
.							
n							

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติด้วย MiniTab 16
(COMPONENT WITH TWO PROCESS VARIABLES)

รายละเอียด Extreme Vertices Design

The Linear Model for y_1

The Quadratic Model for y_1

The Special Cubic Model for y_1

Backward Elimination จาก Quadratic Model for y_1

วิเคราะห์ผลต่อจาก Backward Elimination for y_1

The Linear Model for y_2

The Quadratic Model for y_2

The Special Cubic Model for y_2

Backward Elimination จาก Quadratic Model for y_2

วิเคราะห์ผลต่อจาก Backward Elimination for y_2

Simultaneous Multiple Response Optimizer for y_1 and y_2 (Single Composite Response)

รายละเอียด Extreme Vertices Design

Extreme Vertices Design

Components: 4 Design points: 120
 Process variables: 2 Design degree: 1

Mixture total: 1.00000

Number of Boundaries for Each Dimension

Point Type	1	2	3	0
Dimension	0	1	2	3
Number	10	16	8	1

Number of Design Points for Each Type

Point Type	1	2	3	4	0	-1
Distinct	40	0	0	0	0	0
Replicates	3	0	0	0	0	0
Total number	120	0	0	0	0	0

Bounds of Mixture Components

Comp	Amount		Proportion		Pseudocomponent	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
A	0.40000	0.85000	0.40000	0.85000	0.00000	0.75000
B	0.00000	0.35000	0.00000	0.35000	0.00000	0.58333
C	0.00000	0.25000	0.00000	0.25000	0.00000	0.41667
D	0.00000	0.25000	0.00000	0.25000	0.00000	0.41667

The Linear Model for y_1

Regression for Mixtures: y_1 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_1 (component proportions)

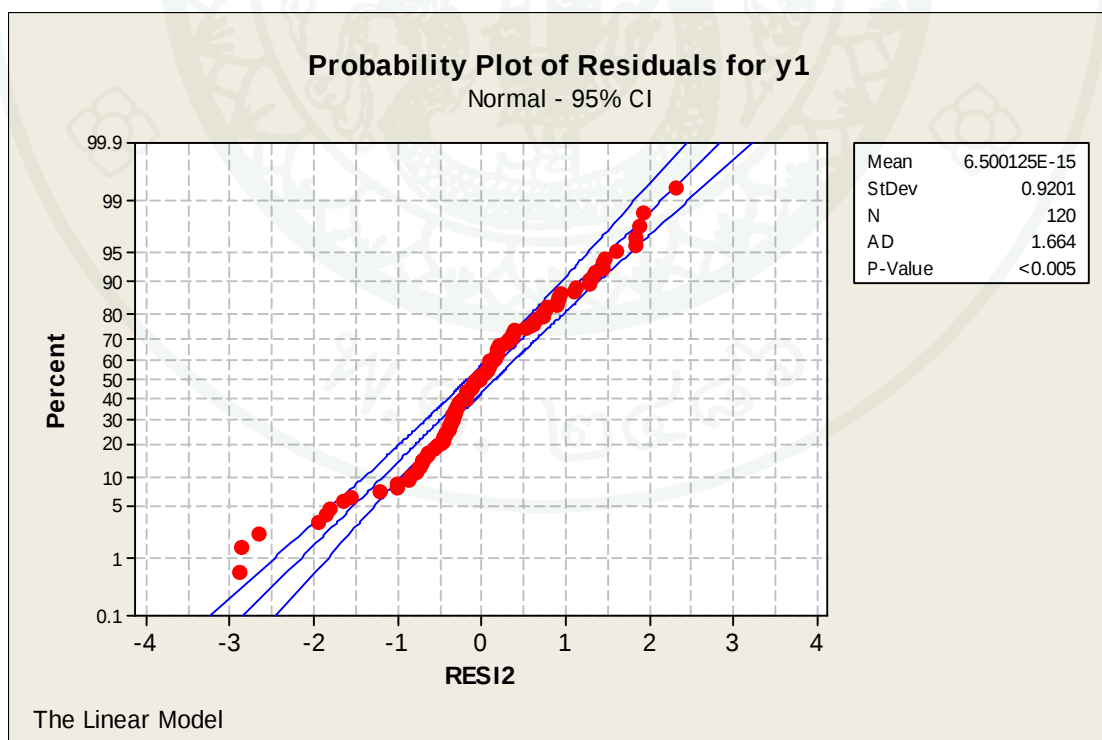
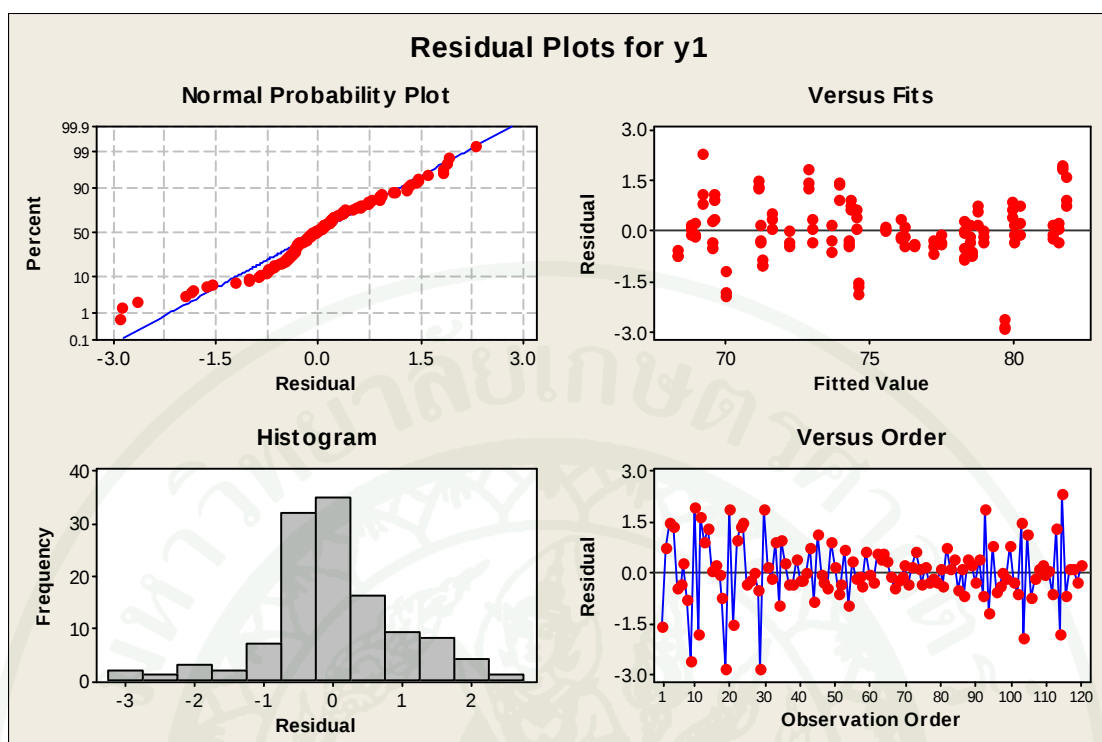
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	78.298	0.1964	*	*	2.123
x_2	86.576	0.5228	*	*	1.355
x_3	71.599	0.6814	*	*	1.568
x_4	49.141	0.6814	*	*	1.568
x_1*z_1	-0.254	0.1964	-1.29	0.199	2.123
x_2*z_1	-0.755	0.5228	-1.44	0.152	1.355
x_3*z_1	-1.514	0.6814	-2.22	0.028	1.568
x_4*z_1	-0.725	0.6814	-1.06	0.290	1.568
x_1*z_2	-0.261	0.1964	-1.33	0.186	2.123
x_2*z_2	-0.412	0.5228	-0.79	0.432	1.355
x_3*z_2	-2.486	0.6814	-3.65	0.000	1.568
x_4*z_2	0.005	0.6814	0.01	0.994	1.568
$x_1*z_1*z_2$	-0.608	0.1964	-3.10	0.003	2.123
$x_2*z_1*z_2$	0.449	0.5228	0.86	0.393	1.355
$x_3*z_1*z_2$	3.024	0.6814	4.44	0.000	1.568
$x_4*z_1*z_2$	0.010	0.6814	0.01	0.988	1.568

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.984206 PRESS = 133.022
 R-Sq = 95.25% R-Sq(pred) = 93.73% R-Sq(adj) = 94.57%

Analysis of Variance for y_1 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	15	2021.58	2021.58	134.772	139.13	0.000
Component Only						
Linear	3	1925.81	1925.81	641.936	662.70	0.000
Component* z_1						
Linear	4	35.06	35.06	8.766	9.05	0.000
x_1*z_1	1	25.44	1.62	1.616	1.67	0.199
x_2*z_1	1	2.70	2.02	2.019	2.08	0.152
x_3*z_1	1	5.82	4.78	4.784	4.94	0.028
x_4*z_1	1	1.10	1.10	1.096	1.13	0.290
Component* z_2						
Linear	4	39.11	39.11	9.778	10.09	0.000
x_1*z_2	1	24.76	1.72	1.717	1.77	0.186
x_2*z_2	1	1.04	0.60	0.602	0.62	0.432
x_3*z_2	1	13.31	12.90	12.897	13.31	0.000
x_4*z_2	1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.994
Component* $z_1 * z_2$						
Linear	4	21.60	21.60	5.400	5.58	0.000
$x_1*z_1*z_2$	1	0.57	9.29	9.286	9.59	0.003
$x_2*z_1*z_2$	1	1.31	0.71	0.713	0.74	0.393
$x_3*z_1*z_2$	1	19.73	19.08	19.078	19.69	0.000
$x_4*z_1*z_2$	1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.988
Residual Error	104	100.74	100.74	0.969		
Lack-of-Fit	24	94.32	94.32	3.930	48.96	0.000
Pure Error	80	6.42	6.42	0.080		
Total	119	2122.33				



The Quadratic Model for y_1

Regression for Mixtures: y_1 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_1 (component proportions)

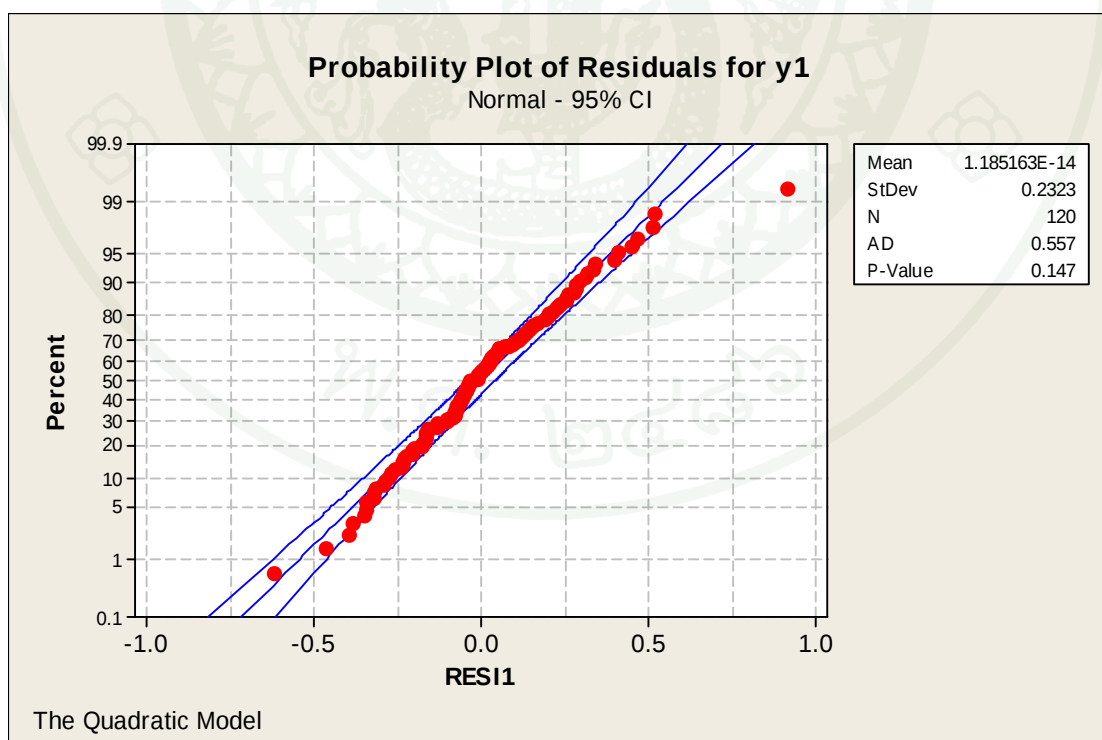
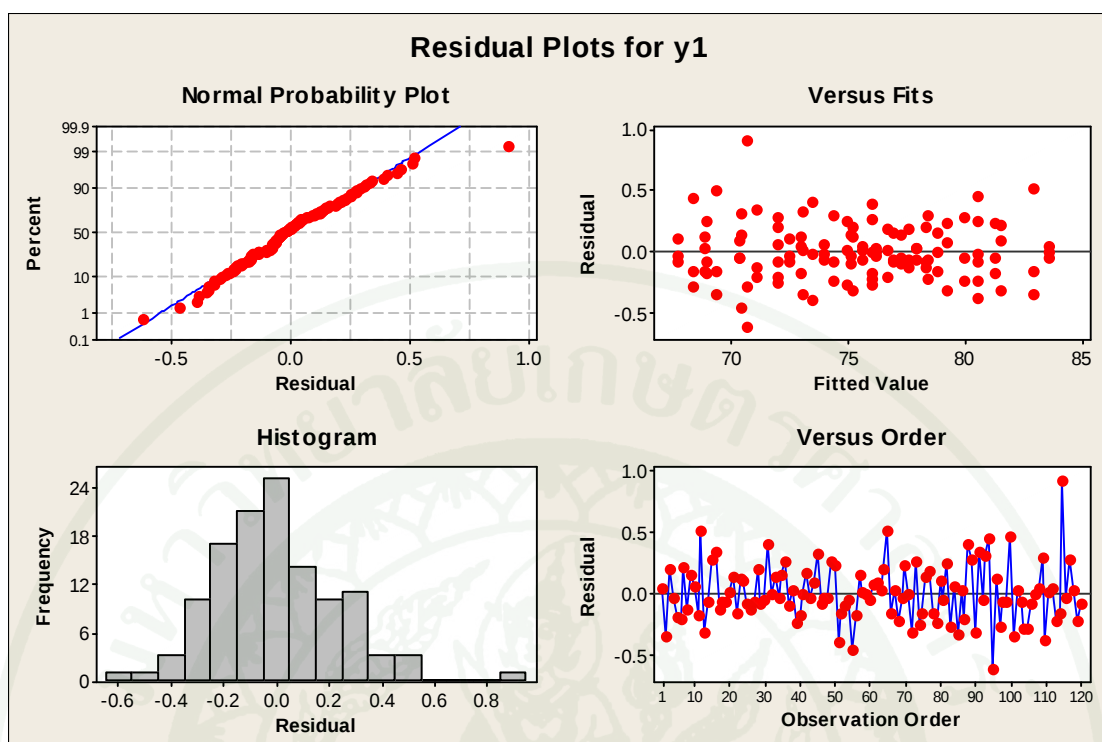
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	70.8	0.7957	*	*	420.7
x_2	26.5	7.4249	*	*	3297.0
x_3	-55.0	13.9937	*	*	7978.2
x_4	-135.8	13.9937	*	*	7978.2
$x_1 \times x_2$	116.3	13.7497	8.46	0.000	3075.6
$x_1 \times x_3$	197.5	21.6619	9.12	0.000	6106.2
$x_1 \times x_4$	275.5	21.6619	12.72	0.000	6106.2
$x_2 \times x_3$	226.9	25.5821	8.87	0.000	810.3
$x_2 \times x_4$	295.8	25.5821	11.56	0.000	810.3
$x_3 \times x_4$	357.3	29.3203	12.19	0.000	1004.1
$x_1 \times z_1$	1.9	0.7957	2.33	0.022	420.7
$x_2 \times z_1$	-2.1	7.4249	-0.28	0.777	3297.0
$x_3 \times z_1$	37.6	13.9937	2.69	0.009	7978.2
$x_4 \times z_1$	-10.2	13.9937	-0.73	0.467	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-5.7	13.7497	-0.42	0.677	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-60.1	21.6619	-2.77	0.007	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1$	-1.5	21.6619	-0.07	0.944	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-45.1	25.5821	-1.76	0.082	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1$	39.0	25.5821	1.53	0.131	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1$	-14.5	29.3203	-0.49	0.623	1004.1
$x_1 \times z_2$	2.1	0.7957	2.59	0.011	420.7
$x_2 \times z_2$	8.7	7.4249	1.17	0.247	3297.0
$x_3 \times z_2$	52.5	13.9937	3.75	0.000	7978.2
$x_4 \times z_2$	26.1	13.9937	1.87	0.066	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_2$	-22.3	13.7497	-1.62	0.109	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_2$	-81.1	21.6619	-3.74	0.000	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-46.4	21.6619	-2.14	0.035	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_2$	-78.8	25.5821	-3.08	0.003	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_2$	-28.2	25.5821	-1.10	0.273	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_2$	-90.0	29.3203	-3.07	0.003	1004.1
$x_1 \times z_1 \times z_2$	-8.5	0.7957	-10.71	0.000	420.7
$x_2 \times z_1 \times z_2$	-57.3	7.4249	-7.72	0.000	3297.0
$x_3 \times z_1 \times z_2$	-141.6	13.9937	-10.12	0.000	7978.2
$x_4 \times z_1 \times z_2$	-152.0	13.9937	-10.86	0.000	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	113.9	13.7497	8.29	0.000	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	224.2	21.6619	10.35	0.000	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	234.9	21.6619	10.84	0.000	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	242.2	25.5821	9.47	0.000	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	247.9	25.5821	9.69	0.000	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	328.5	29.3203	11.20	0.000	1004.1

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.283306 PRESS = 14.4473
 R-Sq = 99.70% R-Sq(pred) = 99.32% R-Sq(adj) = 99.55%

Analysis of Variance for y1 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	39	2115.90	2115.9047	54.2540	675.96	0.000
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	167.92	0.000
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	58.60	0.000
x1*x2	1	0.08	5.7437	5.7437	71.56	0.000
x1*x3	1	6.60	6.6723	6.6723	83.13	0.000
x1*x4	1	1.47	12.9823	12.9823	161.75	0.000
x2*x3	1	8.14	6.3143	6.3143	78.67	0.000
x2*x4	1	0.02	10.7303	10.7303	133.69	0.000
x3*x4	1	11.92	11.9196	11.9196	148.51	0.000
Component* z1						
Linear	4	35.06	17.1475	4.2869	53.41	0.000
x1*z1	1	25.44	0.4366	0.4366	5.44	0.022
x2*z1	1	2.70	0.0065	0.0065	0.08	0.777
x3*z1	1	5.82	0.5796	0.5796	7.22	0.009
x4*z1	1	1.10	0.0428	0.0428	0.53	0.467
Quadratic	6	37.79	37.7904	6.2984	78.47	0.000
x1*x2*z1	1	1.32	0.0140	0.0140	0.17	0.677
x1*x3*z1	1	0.37	0.6180	0.6180	7.70	0.007
x1*x4*z1	1	29.96	0.0004	0.0004	0.01	0.944
x2*x3*z1	1	2.04	0.2490	0.2490	3.10	0.082
x2*x4*z1	1	4.08	0.1870	0.1870	2.33	0.131
x3*x4*z1	1	0.02	0.0195	0.0195	0.24	0.623
Component* z2						
Linear	4	39.11	4.6628	1.1657	14.52	0.000
x1*z2	1	24.76	0.5390	0.5390	6.72	0.011
x2*z2	1	1.04	0.1091	0.1091	1.36	0.247
x3*z2	1	13.31	1.1306	1.1306	14.09	0.000
x4*z2	1	0.00	0.2796	0.2796	3.48	0.066
Quadratic	6	11.49	11.4926	1.9154	23.86	0.000
x1*x2*z2	1	0.00	0.2109	0.2109	2.63	0.109
x1*x3*z2	1	0.77	1.1247	1.1247	14.01	0.000
x1*x4*z2	1	6.44	0.3687	0.3687	4.59	0.035
x2*x3*z2	1	0.06	0.7625	0.7625	9.50	0.003
x2*x4*z2	1	3.46	0.0977	0.0977	1.22	0.273
x3*x4*z2	1	0.76	0.7561	0.7561	9.42	0.003
Component* z1 * z2						
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	65.52	0.000
x1*z1*z2	1	0.57	9.2136	9.2136	114.79	0.000
x2*z1*z2	1	1.31	4.7803	4.7803	59.56	0.000
x3*z1*z2	1	19.73	8.2210	8.2210	102.43	0.000
x4*z1*z2	1	0.00	9.4731	9.4731	118.03	0.000
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	34.92	0.000
x1*x2*z1*z2	1	0.24	5.5108	5.5108	68.66	0.000
x1*x3*z1*z2	1	0.01	8.6017	8.6017	107.17	0.000
x1*x4*z1*z2	1	3.84	9.4347	9.4347	117.55	0.000
x2*x3*z1*z2	1	1.52	7.1966	7.1966	89.66	0.000
x2*x4*z1*z2	1	1.15	7.5389	7.5389	93.93	0.000
x3*x4*z1*z2	1	10.07	10.0726	10.0726	125.50	0.000
Residual Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				



The Special Cubic Model for y_1

Regression for Mixtures: y_1 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

The following terms cannot be estimated and were removed:

$x_1 \times x_2 \times x_3$
 $x_1 \times x_2 \times x_4$
 $x_1 \times x_3 \times x_4$
 $x_2 \times x_3 \times x_4$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_1$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_1$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_1$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_1$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_2$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_2$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$

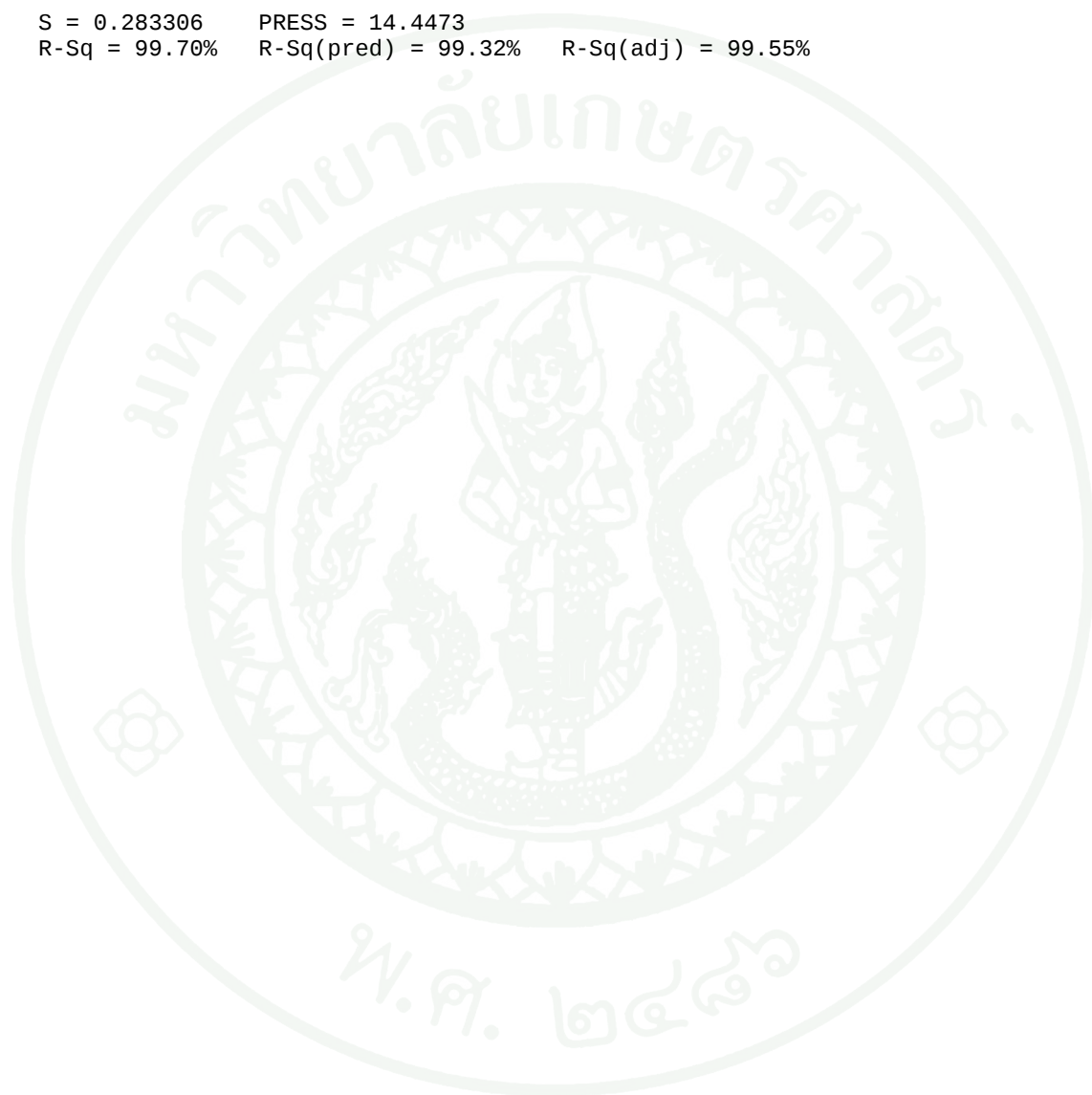
Estimated Regression Coefficients for y_1 (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	70.8	0.7957	*	*	420.7
x_2	26.5	7.4249	*	*	3297.0
x_3	-55.0	13.9937	*	*	7978.2
x_4	-135.8	13.9937	*	*	7978.2
$x_1 \times x_2$	116.3	13.7497	8.46	0.000	3075.6
$x_1 \times x_3$	197.5	21.6619	9.12	0.000	6106.2
$x_1 \times x_4$	275.5	21.6619	12.72	0.000	6106.2
$x_2 \times x_3$	226.9	25.5821	8.87	0.000	810.3
$x_2 \times x_4$	295.8	25.5821	11.56	0.000	810.3
$x_3 \times x_4$	357.3	29.3203	12.19	0.000	1004.1
$x_1 \times z_1$	1.9	0.7957	2.33	0.022	420.7
$x_2 \times z_1$	-2.1	7.4249	-0.28	0.777	3297.0
$x_3 \times z_1$	37.6	13.9937	2.69	0.009	7978.2
$x_4 \times z_1$	-10.2	13.9937	-0.73	0.467	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-5.7	13.7497	-0.42	0.677	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-60.1	21.6619	-2.77	0.007	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1$	-1.5	21.6619	-0.07	0.944	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-45.1	25.5821	-1.76	0.082	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1$	39.0	25.5821	1.53	0.131	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1$	-14.5	29.3203	-0.49	0.623	1004.1
$x_1 \times z_2$	2.1	0.7957	2.59	0.011	420.7
$x_2 \times z_2$	8.7	7.4249	1.17	0.247	3297.0
$x_3 \times z_2$	52.5	13.9937	3.75	0.000	7978.2
$x_4 \times z_2$	26.1	13.9937	1.87	0.066	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_2$	-22.3	13.7497	-1.62	0.109	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_2$	-81.1	21.6619	-3.74	0.000	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-46.4	21.6619	-2.14	0.035	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_2$	-78.8	25.5821	-3.08	0.003	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_2$	-28.2	25.5821	-1.10	0.273	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_2$	-90.0	29.3203	-3.07	0.003	1004.1
$x_1 \times z_1 \times z_2$	-8.5	0.7957	-10.71	0.000	420.7
$x_2 \times z_1 \times z_2$	-57.3	7.4249	-7.72	0.000	3297.0
$x_3 \times z_1 \times z_2$	-141.6	13.9937	-10.12	0.000	7978.2
$x_4 \times z_1 \times z_2$	-152.0	13.9937	-10.86	0.000	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	113.9	13.7497	8.29	0.000	3075.6

$x1 \times x3 \times z1 \times z2$	224.2	21.6619	10.35	0.000	6106.2
$x1 \times x4 \times z1 \times z2$	234.9	21.6619	10.84	0.000	6106.2
$x2 \times x3 \times z1 \times z2$	242.2	25.5821	9.47	0.000	810.3
$x2 \times x4 \times z1 \times z2$	247.9	25.5821	9.69	0.000	810.3
$x3 \times x4 \times z1 \times z2$	328.5	29.3203	11.20	0.000	1004.1

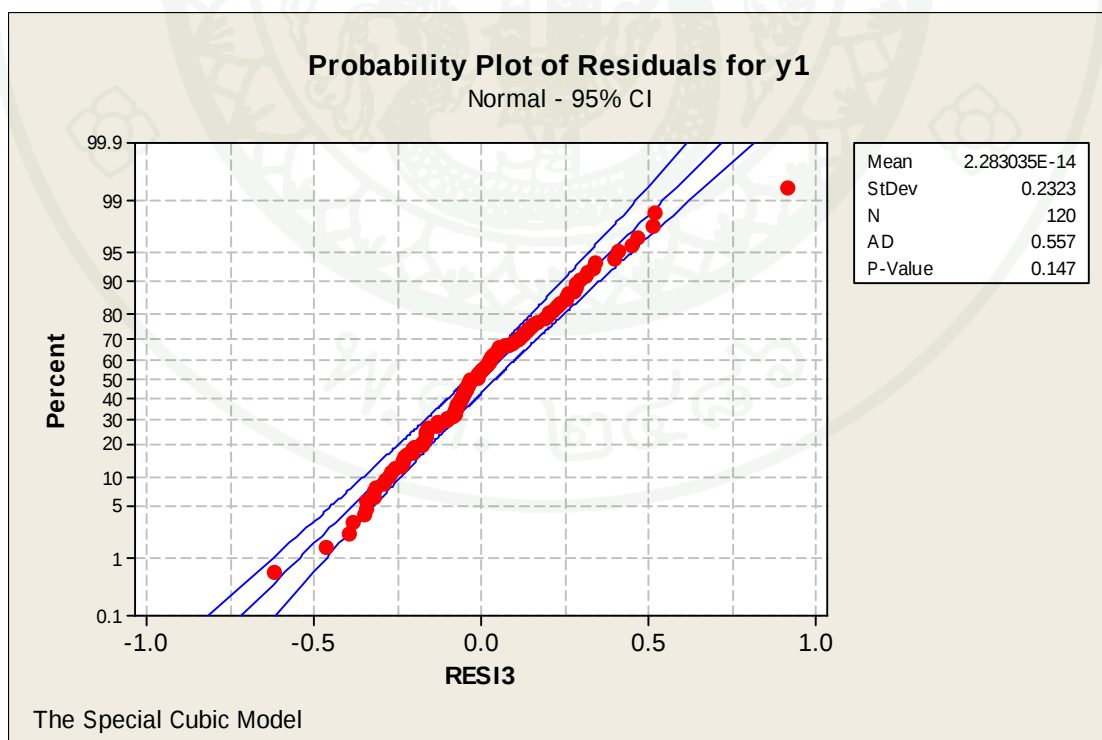
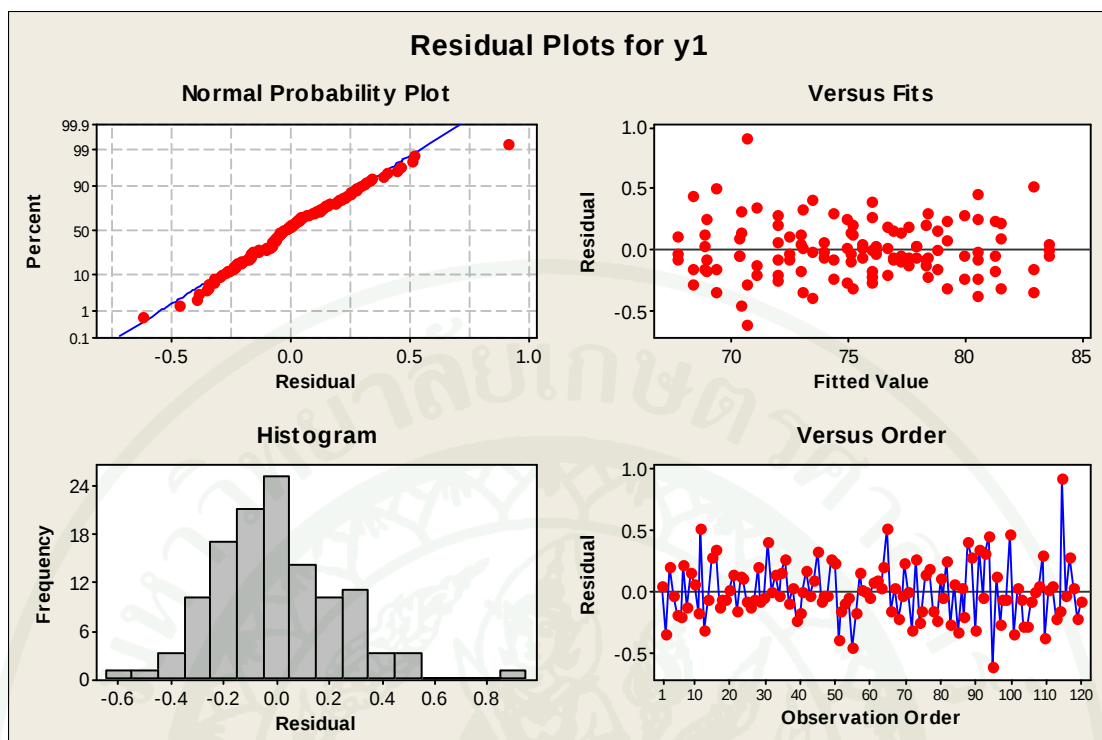
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.283306 PRESS = 14.4473
R-Sq = 99.70% R-Sq(pred) = 99.32% R-Sq(adj) = 99.55%



Analysis of Variance for y1 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	39	2115.90	2115.9047	54.2540	675.96	0.000
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	167.92	0.000
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	58.60	0.000
x1*x2	1	0.08	5.7437	5.7437	71.56	0.000
x1*x3	1	6.60	6.6723	6.6723	83.13	0.000
x1*x4	1	1.47	12.9823	12.9823	161.75	0.000
x2*x3	1	8.14	6.3143	6.3143	78.67	0.000
x2*x4	1	0.02	10.7303	10.7303	133.69	0.000
x3*x4	1	11.92	11.9196	11.9196	148.51	0.000
Component* z1						
Linear	4	35.06	17.1475	4.2869	53.41	0.000
x1*z1	1	25.44	0.4366	0.4366	5.44	0.022
x2*z1	1	2.70	0.0065	0.0065	0.08	0.777
x3*z1	1	5.82	0.5796	0.5796	7.22	0.009
x4*z1	1	1.10	0.0428	0.0428	0.53	0.467
Quadratic	6	37.79	37.7904	6.2984	78.47	0.000
x1*x2*z1	1	1.32	0.0140	0.0140	0.17	0.677
x1*x3*z1	1	0.37	0.6180	0.6180	7.70	0.007
x1*x4*z1	1	29.96	0.0004	0.0004	0.01	0.944
x2*x3*z1	1	2.04	0.2490	0.2490	3.10	0.082
x2*x4*z1	1	4.08	0.1870	0.1870	2.33	0.131
x3*x4*z1	1	0.02	0.0195	0.0195	0.24	0.623
Component* z2						
Linear	4	39.11	4.6628	1.1657	14.52	0.000
x1*z2	1	24.76	0.5390	0.5390	6.72	0.011
x2*z2	1	1.04	0.1091	0.1091	1.36	0.247
x3*z2	1	13.31	1.1306	1.1306	14.09	0.000
x4*z2	1	0.00	0.2796	0.2796	3.48	0.066
Quadratic	6	11.49	11.4926	1.9154	23.86	0.000
x1*x2*z2	1	0.00	0.2109	0.2109	2.63	0.109
x1*x3*z2	1	0.77	1.1247	1.1247	14.01	0.000
x1*x4*z2	1	6.44	0.3687	0.3687	4.59	0.035
x2*x3*z2	1	0.06	0.7625	0.7625	9.50	0.003
x2*x4*z2	1	3.46	0.0977	0.0977	1.22	0.273
x3*x4*z2	1	0.76	0.7561	0.7561	9.42	0.003
Component* z1 * z2						
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	65.52	0.000
x1*z1*z2	1	0.57	9.2136	9.2136	114.79	0.000
x2*z1*z2	1	1.31	4.7803	4.7803	59.56	0.000
x3*z1*z2	1	19.73	8.2210	8.2210	102.43	0.000
x4*z1*z2	1	0.00	9.4731	9.4731	118.03	0.000
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	34.92	0.000
x1*x2*z1*z2	1	0.24	5.5108	5.5108	68.66	0.000
x1*x3*z1*z2	1	0.01	8.6017	8.6017	107.17	0.000
x1*x4*z1*z2	1	3.84	9.4347	9.4347	117.55	0.000
x2*x3*z1*z2	1	1.52	7.1966	7.1966	89.66	0.000
x2*x4*z1*z2	1	1.15	7.5389	7.5389	93.93	0.000
x3*x4*z1*z2	1	10.07	10.0726	10.0726	125.50	0.000
Residual Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				



Backward Elimination ๑๑๑ Quadratic Model for y_1

Stepwise for Mixtures: y_1 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Backward model selection

Response: y_1

Number of terms considered = 40 Number of cases used = 120

Alpha-to-Remove 0.1000

Forced terms: $x_1 x_2 x_3 x_4$

Step	1	2	3	4	5
x_1	70.7557	70.7557	70.7557	70.7557	70.7557
T-Value	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*
x_2	26.473	26.473	26.473	26.473	26.473
T-Value	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*
x_3	-55.02	-55.02	-55.02	-55.02	-55.02
T-Value	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*
x_4	-135.81	-135.81	-135.81	-135.81	-135.81
T-Value	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*
x_1*x_2	116.31	116.31	116.31	116.31	116.31
T-Value	8.46	8.51	8.52	8.51	8.55
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_1*x_3	197.51	197.51	197.51	197.51	197.51
T-Value	9.12	9.17	9.18	9.17	9.21
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_1*x_4	275.50	275.50	275.50	275.50	275.50
T-Value	12.72	12.80	12.81	12.79	12.85
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_2*x_3	226.90	226.90	226.90	226.90	226.90
T-Value	8.87	8.92	8.93	8.92	8.96
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_2*x_4	295.79	295.79	295.79	295.79	295.79
T-Value	11.56	11.63	11.64	11.63	11.69
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_3*x_4	357.31	357.31	357.31	357.31	357.31
T-Value	12.19	12.26	12.27	12.25	12.32
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x_1*z_1	1.8558	1.8020	1.9754	1.9754	1.9754
T-Value	2.33	7.79	14.10	14.08	14.15
P-Value	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000
x_2*z_1	-2.106	-2.593			
T-Value	-0.28	-0.94			
P-Value	0.777	0.349			

x3*z1	37.603	36.717	39.430	39.430	39.430
T-Value	2.69	5.90	7.15	7.14	7.18
P-Value	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
x4*z1	-10.2192	-11.2075	-11.8707	-11.8707	-11.8707
T-Value	-0.73	-12.34	-20.68	-20.65	-20.75
P-Value	0.467	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x2*z1	-5.7424	-4.8298	-9.2628	-9.2628	-9.2628
T-Value	-0.42	-1.02	-15.36	-15.34	-15.42
P-Value	0.677	0.312	0.000	0.000	0.000
x1*x3*z1	-60.110	-58.709	-63.057	-63.057	-63.057
T-Value	-2.77	-6.72	-8.50	-8.49	-8.53
P-Value	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x4*z1	-1.53				
T-Value	-0.07				
P-Value	0.944				
x2*x3*z1	-45.056	-43.400	-50.176	-50.176	-50.176
T-Value	-1.76	-4.22	-6.83	-6.82	-6.85
P-Value	0.082	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*x4*z1	39.047	40.845	38.746	38.746	38.746
T-Value	1.53	13.58	19.19	19.16	19.26
P-Value	0.131	0.000	0.000	0.000	0.000
x3*x4*z1	-14.457	-12.447	-12.949	-12.949	-12.949
T-Value	-0.49	-1.71	-1.79	-1.79	-1.80
P-Value	0.623	0.090	0.077	0.078	0.076
x1*z2	2.0620	2.0620	2.0620	1.2202	1.1608
T-Value	2.59	2.61	2.61	5.44	7.25
P-Value	0.011	0.011	0.011	0.000	0.000
x2*z2	8.657	8.657	8.657	0.843	
T-Value	1.17	1.17	1.17	0.38	
P-Value	0.247	0.244	0.244	0.704	
x3*z2	52.520	52.520	52.520	38.715	37.764
T-Value	3.75	3.78	3.78	6.22	6.65
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x4*z2	26.119	26.119	26.119	10.849	11.498
T-Value	1.87	1.88	1.88	5.33	10.41
P-Value	0.066	0.064	0.064	0.000	0.000
x1*x2*z2	-22.2898	-22.2898	-22.2898	-7.7492	-6.2906
T-Value	-1.62	-1.63	-1.63	-1.99	-9.31
P-Value	0.109	0.107	0.106	0.050	0.000
x1*x3*z2	-81.087	-81.087	-81.087	-59.234	-57.719
T-Value	-3.74	-3.77	-3.77	-6.80	-7.48
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x4*z2	-46.426	-46.426	-46.426	-22.698	-23.231
T-Value	-2.14	-2.16	-2.16	-8.91	-10.96
P-Value	0.035	0.034	0.034	0.000	0.000
x2*x3*z2	-78.850	-78.850	-78.850	-52.712	-50.437
T-Value	-3.08	-3.10	-3.10	-5.50	-6.76
P-Value	0.003	0.003	0.003	0.000	0.000

x2*x4*z2	-28.22	-28.22	-28.22		
T-Value	-1.10	-1.11	-1.11		
P-Value	0.273	0.270	0.270		
x3*x4*z2	-89.992	-89.992	-89.992	-58.947	-59.329
T-Value	-3.07	-3.09	-3.09	-7.21	-7.35
P-Value	0.003	0.003	0.003	0.000	0.000
x1*z1*z2	-8.5251	-8.5251	-8.5251	-8.5251	-8.5251
T-Value	-10.71	-10.78	-10.79	-10.77	-10.83
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*z1*z2	-57.301	-57.301	-57.301	-57.301	-57.301
T-Value	-7.72	-7.77	-7.77	-7.76	-7.80
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x3*z1*z2	-141.62	-141.62	-141.62	-141.62	-141.62
T-Value	-10.12	-10.18	-10.19	-10.18	-10.23
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x4*z1*z2	-152.03	-152.03	-152.03	-152.03	-152.03
T-Value	-10.86	-10.93	-10.94	-10.92	-10.98
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x2*z1*z2	113.93	113.93	113.93	113.93	113.93
T-Value	8.29	8.34	8.34	8.33	8.37
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x3*z1*z2	224.25	224.25	224.25	224.25	224.25
T-Value	10.35	10.42	10.42	10.41	10.46
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x4*z1*z2	234.86	234.86	234.86	234.86	234.86
T-Value	10.84	10.91	10.92	10.90	10.96
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*x3*z1*z2	242.24	242.24	242.24	242.24	242.24
T-Value	9.47	9.53	9.53	9.52	9.57
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*x4*z1*z2	247.93	247.93	247.93	247.93	247.93
T-Value	9.69	9.75	9.76	9.74	9.79
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x3*x4*z1*z2	328.46	328.46	328.46	328.46	328.46
T-Value	11.20	11.27	11.28	11.26	11.32
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.283	0.282	0.281	0.282	0.280
R-sq	99.70	99.70	99.69	99.69	99.69
R-sq(adj)	99.55	99.56	99.56	99.55	99.56
Mallows Cp	40.0	38.0	36.9	36.1	34.2
PRESS	14.4473	13.9472	13.7684	13.4826	13.2490
R-Sq(pred)	99.32	99.34	99.35	99.36	99.38

Regression for Mixtures: y1 versus x1, x2, x3, x4, z1, z2

Estimated Regression Coefficients for y1 (component proportions)

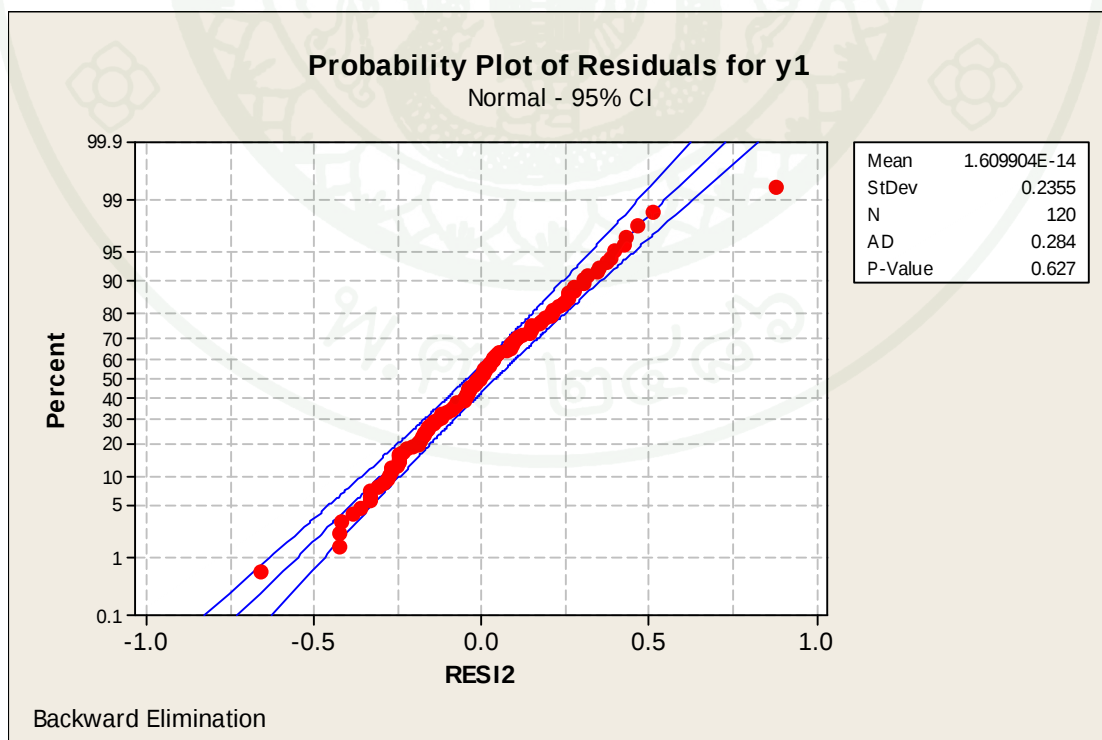
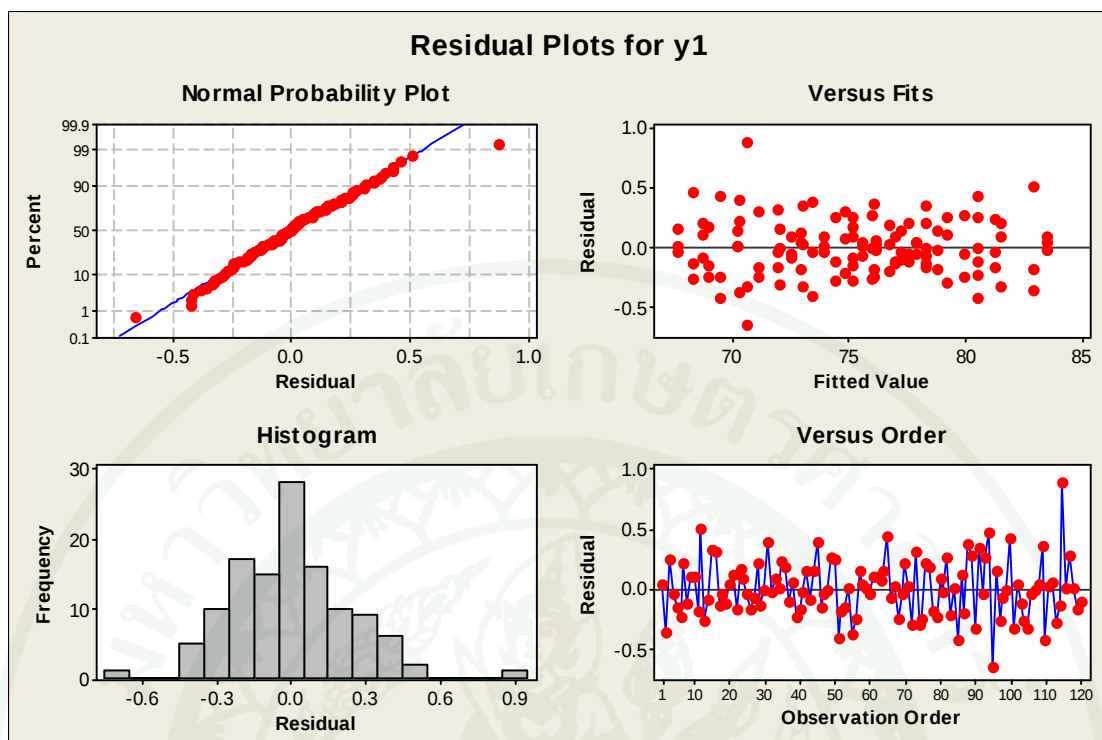
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x1	70.8	0.7873	*	*	420.75
x2	26.5	7.3468	*	*	3296.96
x3	-55.0	13.8466	*	*	7978.16
x4	-135.8	13.8466	*	*	7978.16
x1*x2	116.3	13.6051	8.55	0.000	3075.62
x1*x3	197.5	21.4341	9.21	0.000	6106.16
x1*x4	275.5	21.4341	12.85	0.000	6106.16
x2*x3	226.9	25.3130	8.96	0.000	810.28
x2*x4	295.8	25.3130	11.69	0.000	810.28
x3*x4	357.3	29.0119	12.32	0.000	1004.15
x1*z1	2.0	0.1396	14.15	0.000	13.22
x3*z1	39.4	5.4927	7.18	0.000	1255.42
x4*z1	-11.9	0.5720	-20.75	0.000	13.61
x1*x2*z1	-9.3	0.6007	-15.42	0.000	6.00
x1*x3*z1	-63.1	7.3924	-8.53	0.000	726.33
x2*x3*z1	-50.2	7.3224	-6.85	0.000	67.80
x2*x4*z1	38.7	2.0119	19.26	0.000	5.12
x3*x4*z1	-12.9	7.2137	-1.80	0.076	62.08
x1*z2	1.2	0.1602	7.25	0.000	17.41
x3*z2	37.8	5.6754	6.65	0.000	1340.32
x4*z2	11.5	1.1043	10.41	0.000	50.75
x1*x2*z2	-6.3	0.6757	-9.31	0.000	7.59
x1*x3*z2	-57.7	7.7141	-7.48	0.000	790.92
x1*x4*z2	-23.2	2.1196	-10.96	0.000	59.71
x2*x3*z2	-50.4	7.4657	-6.76	0.000	70.48
x3*x4*z2	-59.3	8.0773	-7.35	0.000	77.84
x1*z1*z2	-8.5	0.7873	-10.83	0.000	420.75
x2*z1*z2	-57.3	7.3468	-7.80	0.000	3296.96
x3*z1*z2	-141.6	13.8466	-10.23	0.000	7978.16
x4*z1*z2	-152.0	13.8466	-10.98	0.000	7978.16
x1*x2*z1*z2	113.9	13.6051	8.37	0.000	3075.62
x1*x3*z1*z2	224.2	21.4341	10.46	0.000	6106.16
x1*x4*z1*z2	234.9	21.4341	10.96	0.000	6106.16
x2*x3*z1*z2	242.2	25.3130	9.57	0.000	810.28
x2*x4*z1*z2	247.9	25.3130	9.79	0.000	810.28
x3*x4*z1*z2	328.5	29.0119	11.32	0.000	1004.15

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.280326 PRESS = 13.2490
R-Sq = 99.69% R-Sq(pred) = 99.38% R-Sq(adj) = 99.56%

Analysis of Variance for y1 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	35	2115.72	2115.7248	60.4493	769.24	0.000
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	171.51	0.000
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	59.85	0.000
x1*x2	1	0.08	5.7437	5.7437	73.09	0.000
x1*x3	1	6.60	6.6723	6.6723	84.91	0.000
x1*x4	1	1.47	12.9823	12.9823	165.21	0.000
x2*x3	1	8.14	6.3143	6.3143	80.35	0.000
x2*x4	1	0.02	10.7303	10.7303	136.55	0.000
x3*x4	1	11.92	11.9196	11.9196	151.68	0.000
Component* z1						
Linear	3	33.05	39.5210	13.1737	167.64	0.000
x1*z1	1	25.44	15.7394	15.7394	200.29	0.000
x3*z1	1	6.33	4.0497	4.0497	51.53	0.000
x4*z1	1	1.27	33.8467	33.8467	430.71	0.000
Quadratic	5	39.74	39.7384	7.9477	101.14	0.000
x1*x2*z1	1	1.20	18.6857	18.6857	237.78	0.000
x1*x3*z1	1	0.15	5.7177	5.7177	72.76	0.000
x2*x3*z1	1	9.06	3.6900	3.6900	46.96	0.000
x2*x4*z1	1	29.07	29.1451	29.1451	370.88	0.000
x3*x4*z1	1	0.25	0.2532	0.2532	3.22	0.076
Component* z2						
Linear	3	38.51	9.3370	3.1123	39.61	0.000
x1*z2	1	24.76	4.1270	4.1270	52.52	0.000
x3*z2	1	13.75	3.4793	3.4793	44.28	0.000
x4*z2	1	0.00	8.5194	8.5194	108.41	0.000
Quadratic	5	11.99	11.9851	2.3970	30.50	0.000
x1*x2*z2	1	0.58	6.8105	6.8105	86.67	0.000
x1*x3*z2	1	0.71	4.3993	4.3993	55.98	0.000
x1*x4*z2	1	6.36	9.4399	9.4399	120.13	0.000
x2*x3*z2	1	0.09	3.5866	3.5866	45.64	0.000
x3*x4*z2	1	4.24	4.2396	4.2396	53.95	0.000
Component* z1 * z2						
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	66.92	0.000
x1*z1*z2	1	0.57	9.2136	9.2136	117.25	0.000
x2*z1*z2	1	1.31	4.7803	4.7803	60.83	0.000
x3*z1*z2	1	19.73	8.2210	8.2210	104.62	0.000
x4*z1*z2	1	0.00	9.4731	9.4731	120.55	0.000
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	35.67	0.000
x1*x2*z1*z2	1	0.24	5.5108	5.5108	70.13	0.000
x1*x3*z1*z2	1	0.01	8.6017	8.6017	109.46	0.000
x1*x4*z1*z2	1	3.84	9.4347	9.4347	120.06	0.000
x2*x3*z1*z2	1	1.52	7.1966	7.1966	91.58	0.000
x2*x4*z1*z2	1	1.15	7.5389	7.5389	95.94	0.000
x3*x4*z1*z2	1	10.07	10.0726	10.0726	128.18	0.000
Residual Error	84	6.60	6.6010	0.0786		
Lack-of-Fit	4	0.18	0.1800	0.0450	0.56	0.692
Pure Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				



วิเคราะห์ผลต่อจาก Backward Elimination for y_1

Regression for Mixtures: y_1 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_1 (component proportions)

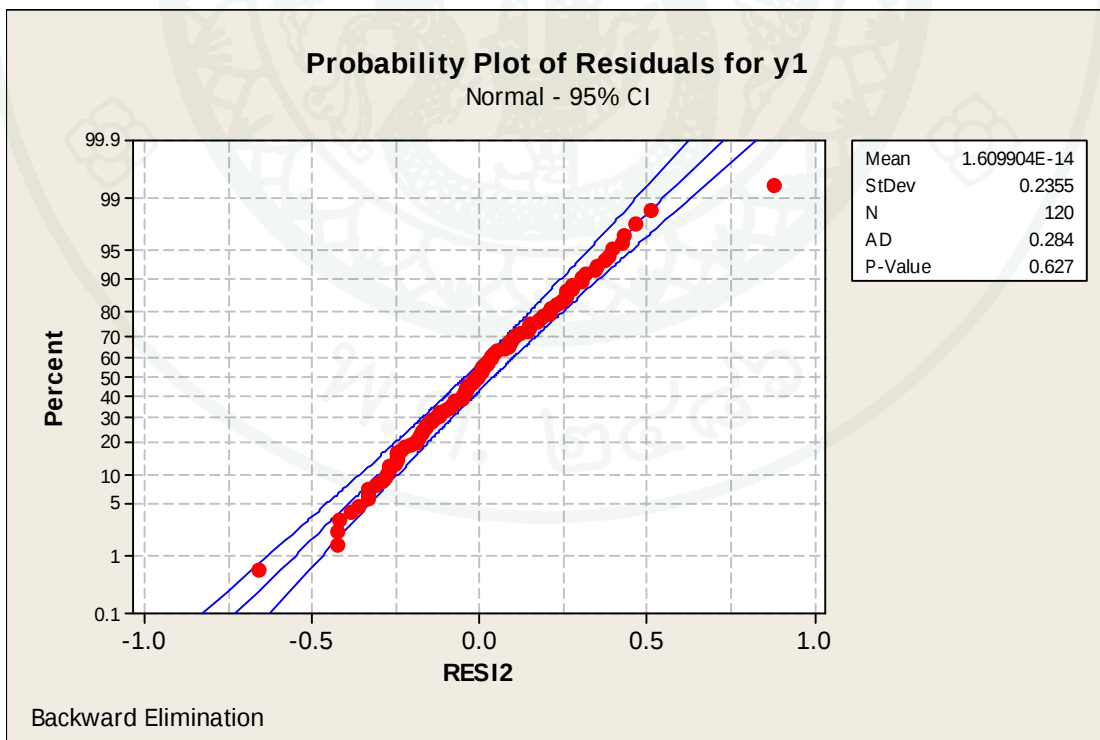
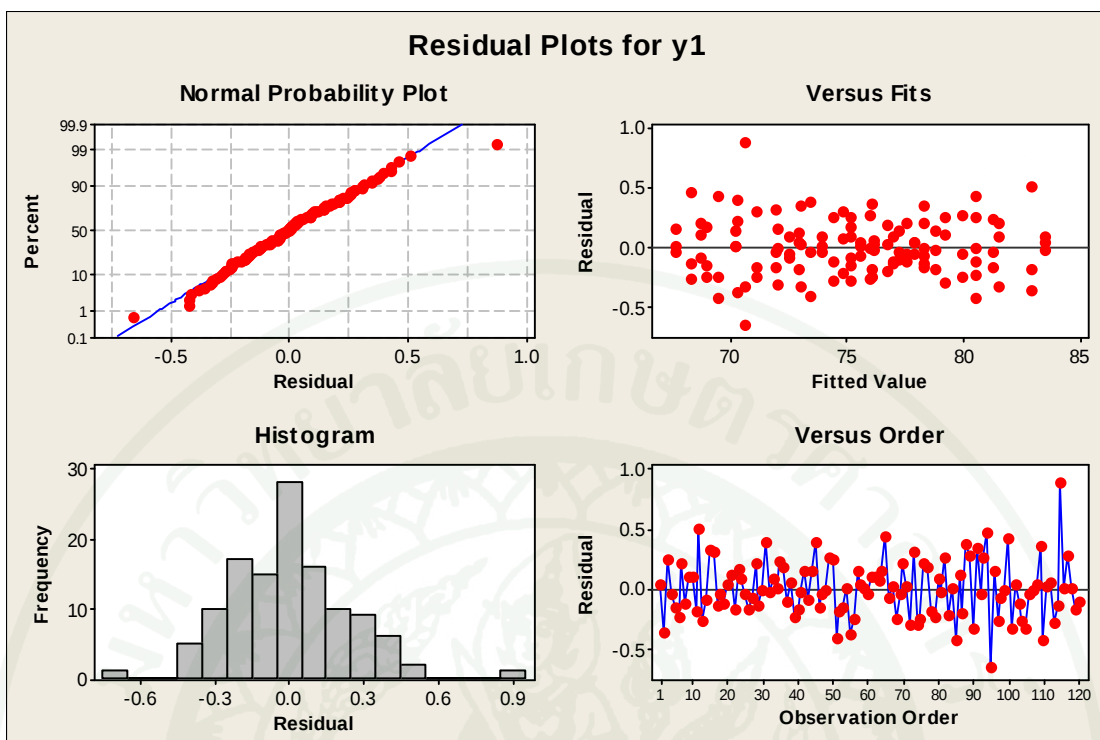
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	70.8	0.7873	*	*	420.75
x_2	26.5	7.3468	*	*	3296.96
x_3	-55.0	13.8466	*	*	7978.16
x_4	-135.8	13.8466	*	*	7978.16
$x_1 \times x_2$	116.3	13.6051	8.55	0.000	3075.62
$x_1 \times x_3$	197.5	21.4341	9.21	0.000	6106.16
$x_1 \times x_4$	275.5	21.4341	12.85	0.000	6106.16
$x_2 \times x_3$	226.9	25.3130	8.96	0.000	810.28
$x_2 \times x_4$	295.8	25.3130	11.69	0.000	810.28
$x_3 \times x_4$	357.3	29.0119	12.32	0.000	1004.15
$x_1 \times z_1$	2.0	0.1396	14.15	0.000	13.22
$x_3 \times z_1$	39.4	5.4927	7.18	0.000	1255.42
$x_4 \times z_1$	-11.9	0.5720	-20.75	0.000	13.61
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-9.3	0.6007	-15.42	0.000	6.00
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-63.1	7.3924	-8.53	0.000	726.33
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-50.2	7.3224	-6.85	0.000	67.80
$x_2 \times x_4 \times z_1$	38.7	2.0119	19.26	0.000	5.12
$x_3 \times x_4 \times z_1$	-12.9	7.2137	-1.80	0.076	62.08
$x_1 \times z_2$	1.2	0.1602	7.25	0.000	17.41
$x_3 \times z_2$	37.8	5.6754	6.65	0.000	1340.32
$x_4 \times z_2$	11.5	1.1043	10.41	0.000	50.75
$x_1 \times x_2 \times z_2$	-6.3	0.6757	-9.31	0.000	7.59
$x_1 \times x_3 \times z_2$	-57.7	7.7141	-7.48	0.000	790.92
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-23.2	2.1196	-10.96	0.000	59.71
$x_2 \times x_3 \times z_2$	-50.4	7.4657	-6.76	0.000	70.48
$x_3 \times x_4 \times z_2$	-59.3	8.0773	-7.35	0.000	77.84
$x_1 \times z_1 \times z_2$	-8.5	0.7873	-10.83	0.000	420.75
$x_2 \times z_1 \times z_2$	-57.3	7.3468	-7.80	0.000	3296.96
$x_3 \times z_1 \times z_2$	-141.6	13.8466	-10.23	0.000	7978.16
$x_4 \times z_1 \times z_2$	-152.0	13.8466	-10.98	0.000	7978.16
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	113.9	13.6051	8.37	0.000	3075.62
$x_1 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	224.2	21.4341	10.46	0.000	6106.16
$x_1 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	234.9	21.4341	10.96	0.000	6106.16
$x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	242.2	25.3130	9.57	0.000	810.28
$x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	247.9	25.3130	9.79	0.000	810.28
$x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	328.5	29.0119	11.32	0.000	1004.15

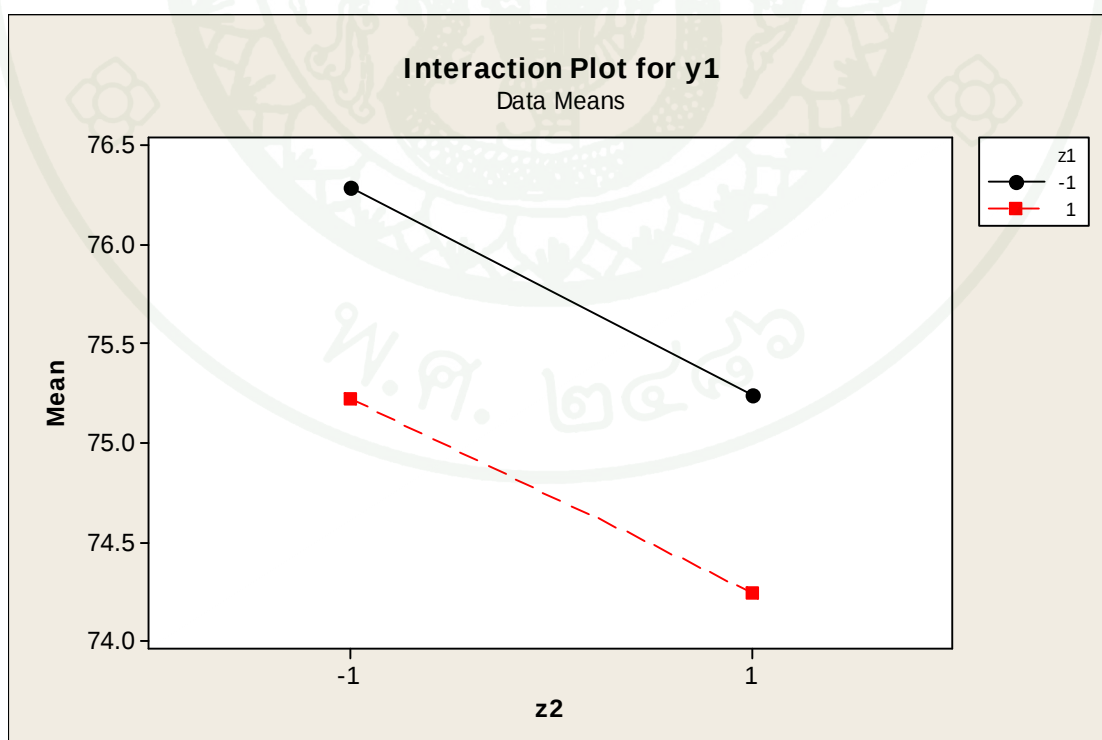
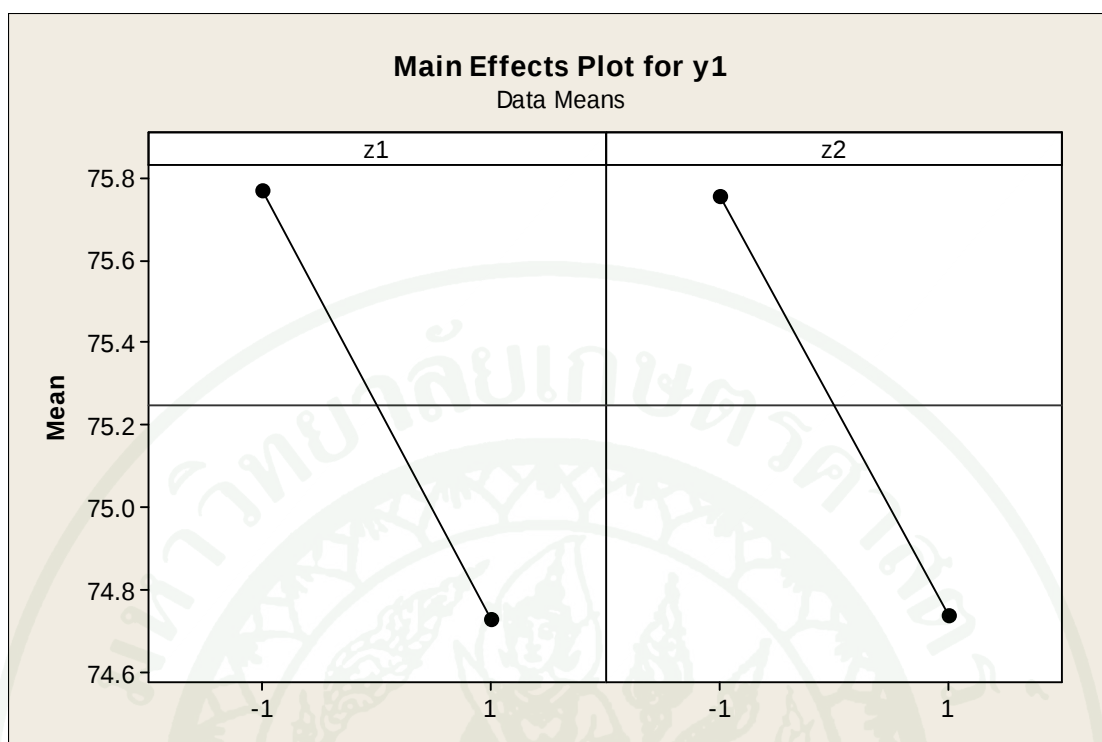
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.280326 PRESS = 13.2490
 R-Sq = 99.69% R-Sq(pred) = 99.38% R-Sq(adj) = 99.56%

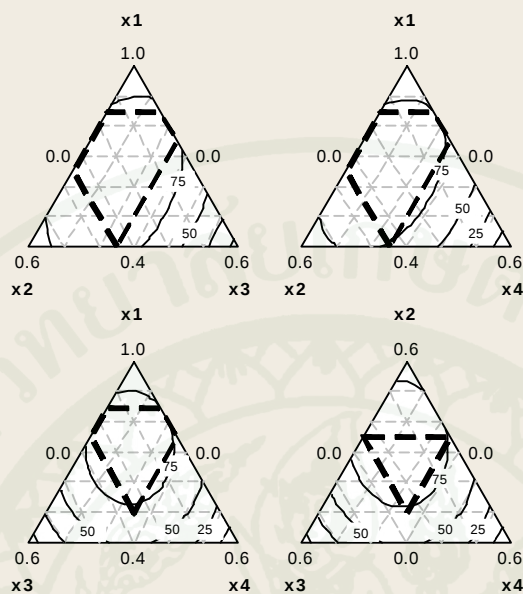
Analysis of Variance for y1 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	35	2115.72	2115.7248	60.4493	769.24	0.000
Component Only						
Linear	3	1925.81	40.4329	13.4776	171.51	0.000
Quadratic	6	28.22	28.2207	4.7034	59.85	0.000
x1*x2	1	0.08	5.7437	5.7437	73.09	0.000
x1*x3	1	6.60	6.6723	6.6723	84.91	0.000
x1*x4	1	1.47	12.9823	12.9823	165.21	0.000
x2*x3	1	8.14	6.3143	6.3143	80.35	0.000
x2*x4	1	0.02	10.7303	10.7303	136.55	0.000
x3*x4	1	11.92	11.9196	11.9196	151.68	0.000
Component* z1						
Linear	3	33.05	39.5210	13.1737	167.64	0.000
x1*z1	1	25.44	15.7394	15.7394	200.29	0.000
x3*z1	1	6.33	4.0497	4.0497	51.53	0.000
x4*z1	1	1.27	33.8467	33.8467	430.71	0.000
Quadratic	5	39.74	39.7384	7.9477	101.14	0.000
x1*x2*z1	1	1.20	18.6857	18.6857	237.78	0.000
x1*x3*z1	1	0.15	5.7177	5.7177	72.76	0.000
x2*x3*z1	1	9.06	3.6900	3.6900	46.96	0.000
x2*x4*z1	1	29.07	29.1451	29.1451	370.88	0.000
x3*x4*z1	1	0.25	0.2532	0.2532	3.22	0.076
Component* z2						
Linear	3	38.51	9.3370	3.1123	39.61	0.000
x1*z2	1	24.76	4.1270	4.1270	52.52	0.000
x3*z2	1	13.75	3.4793	3.4793	44.28	0.000
x4*z2	1	0.00	8.5194	8.5194	108.41	0.000
Quadratic	5	11.99	11.9851	2.3970	30.50	0.000
x1*x2*z2	1	0.58	6.8105	6.8105	86.67	0.000
x1*x3*z2	1	0.71	4.3993	4.3993	55.98	0.000
x1*x4*z2	1	6.36	9.4399	9.4399	120.13	0.000
x2*x3*z2	1	0.09	3.5866	3.5866	45.64	0.000
x3*x4*z2	1	4.24	4.2396	4.2396	53.95	0.000
Component* z1 * z2						
Linear	4	21.60	21.0354	5.2589	66.92	0.000
x1*z1*z2	1	0.57	9.2136	9.2136	117.25	0.000
x2*z1*z2	1	1.31	4.7803	4.7803	60.83	0.000
x3*z1*z2	1	19.73	8.2210	8.2210	104.62	0.000
x4*z1*z2	1	0.00	9.4731	9.4731	120.55	0.000
Quadratic	6	16.82	16.8160	2.8027	35.67	0.000
x1*x2*z1*z2	1	0.24	5.5108	5.5108	70.13	0.000
x1*x3*z1*z2	1	0.01	8.6017	8.6017	109.46	0.000
x1*x4*z1*z2	1	3.84	9.4347	9.4347	120.06	0.000
x2*x3*z1*z2	1	1.52	7.1966	7.1966	91.58	0.000
x2*x4*z1*z2	1	1.15	7.5389	7.5389	95.94	0.000
x3*x4*z1*z2	1	10.07	10.0726	10.0726	128.18	0.000
Residual Error	84	6.60	6.6010	0.0786		
Lack-of-Fit	4	0.18	0.1800	0.0450	0.56	0.692
Pure Error	80	6.42	6.4210	0.0803		
Total	119	2122.33				





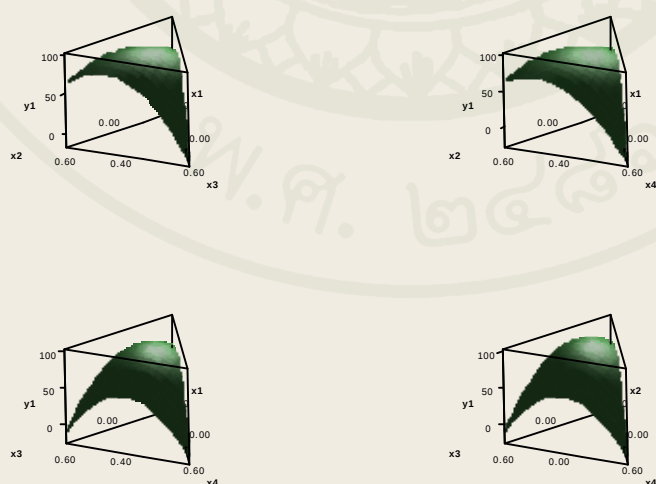
Matrix of Mixture Contour Plots for y1 (component amounts)



Hold Values

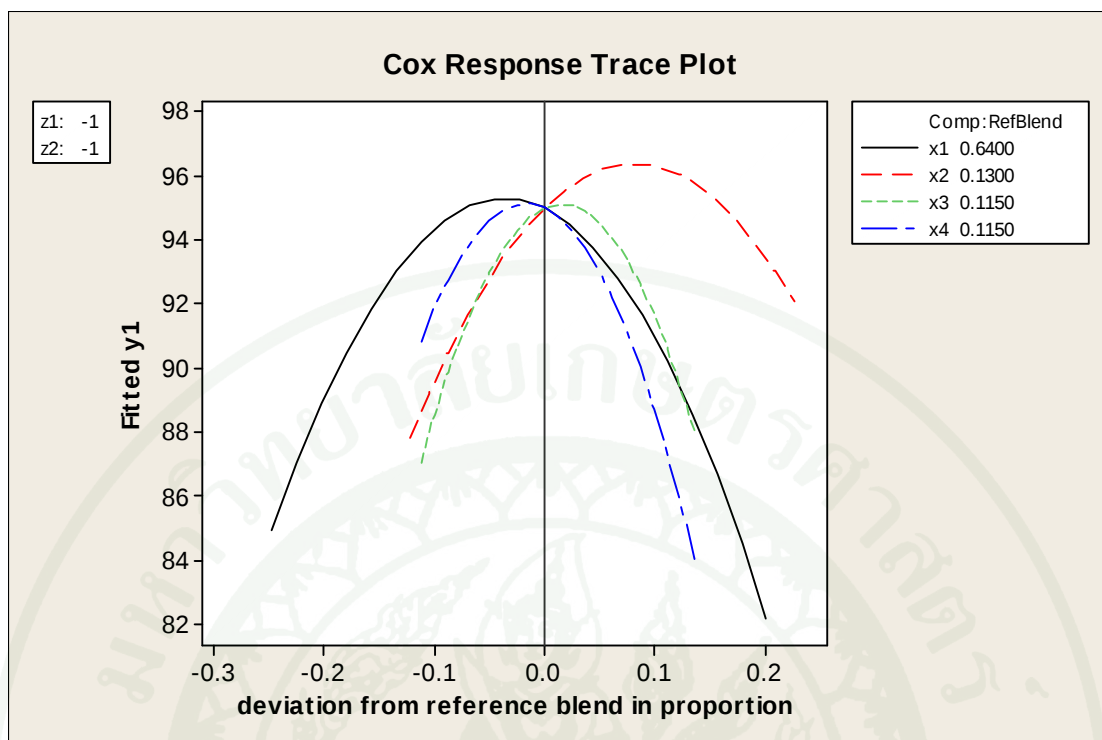
x1	0.4
x2	0
x3	0
x4	0
z1	-1
z2	-1

Mixture Surface Plots of y1 (component amounts)



Hold Values

x1	0.4
x2	0
x3	0
x4	0
z1	-1
z2	-1



Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
y1	Maximum	70	95	95	1	1

Global Solution

Components

x1 = 0.576657
 x2 = 0.215657
 x3 = 0.125315
 x4 = 0.0823724

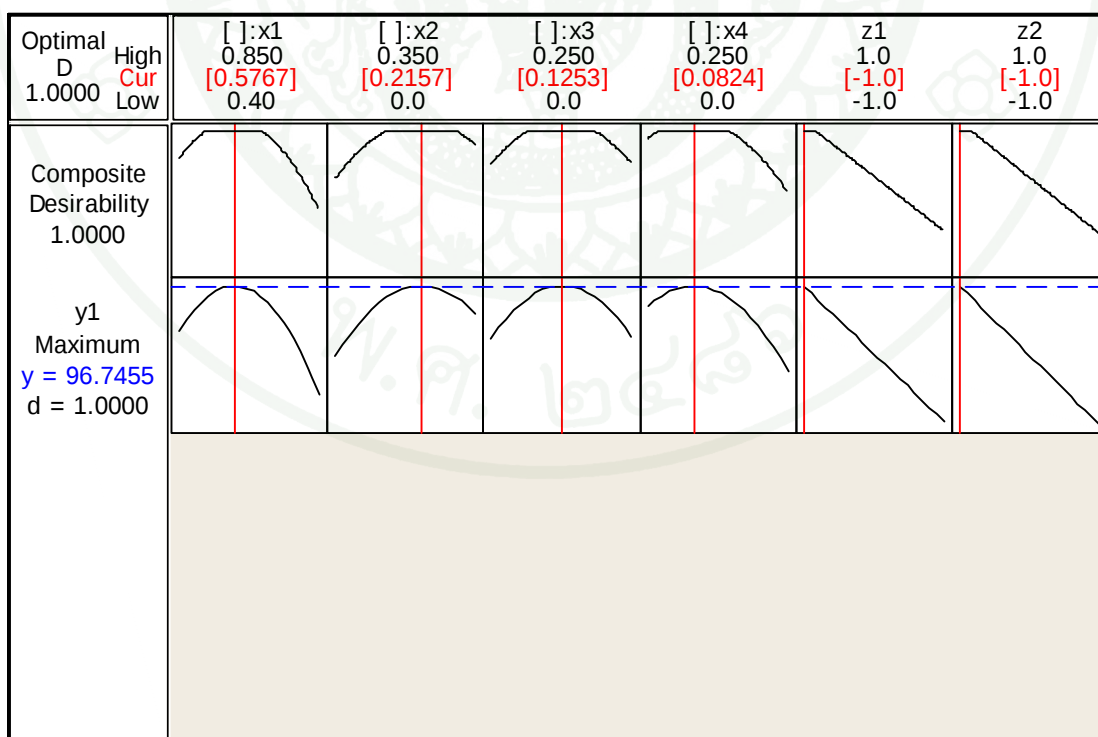
Process Variables

z1 = -1
 z2 = -1

Predicted Responses

y1 = 96.7455 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000



The Linear Model for y_2

Regression for Mixtures: y_2 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_2 (component proportions)

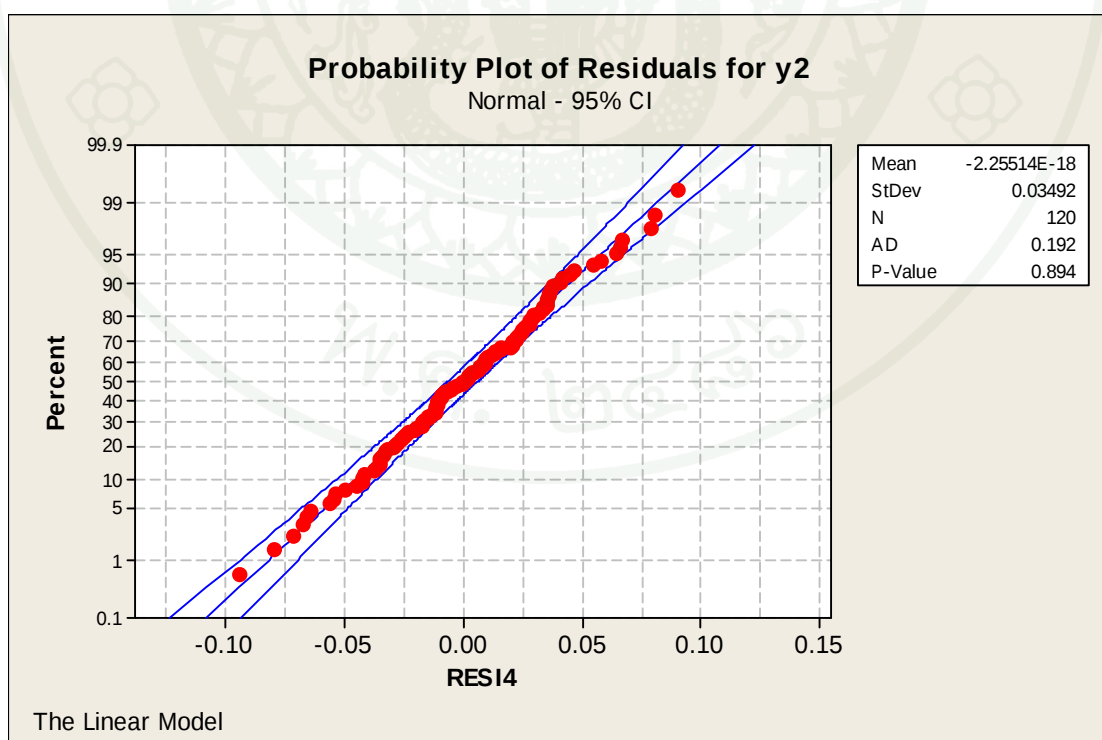
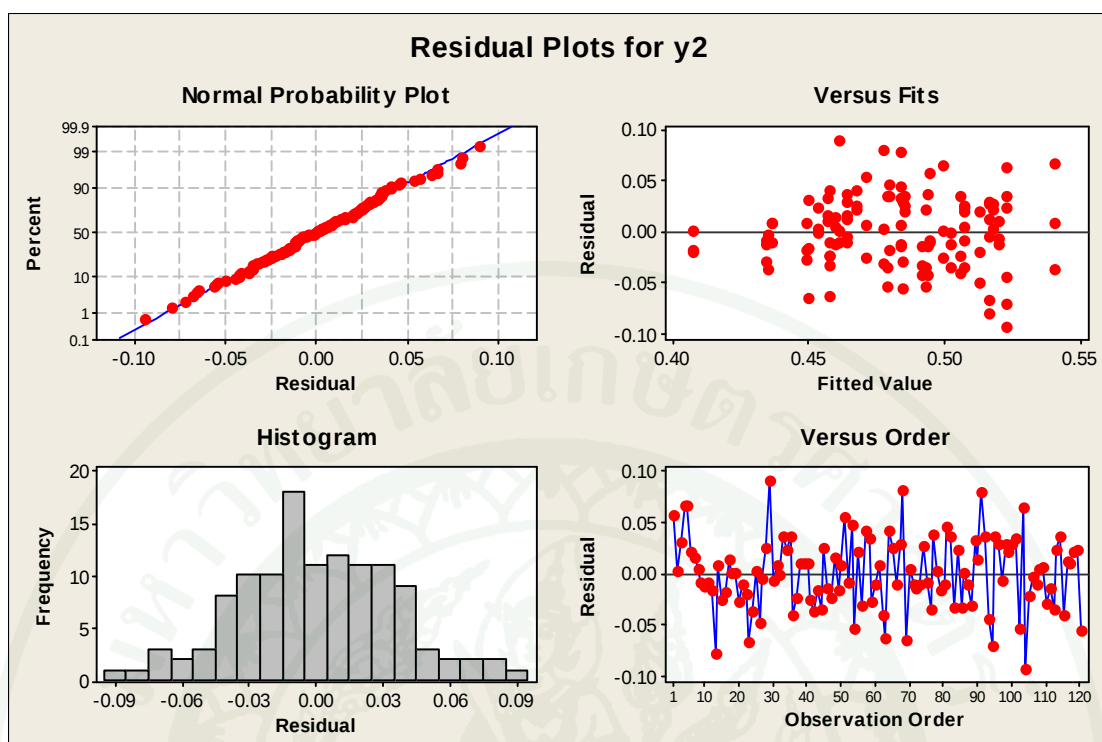
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	0.47614	0.007452	*	*	2.123
x_2	0.41166	0.019842	*	*	1.355
x_3	0.47566	0.025861	*	*	1.568
x_4	0.59389	0.025861	*	*	1.568
x_1*z_1	0.01468	0.007452	1.97	0.052	2.123
x_2*z_1	-0.00775	0.019842	-0.39	0.697	1.355
x_3*z_1	0.00016	0.025861	0.01	0.995	1.568
x_4*z_1	-0.03613	0.025861	-1.40	0.165	1.568
x_1*z_2	0.00682	0.007452	0.92	0.362	2.123
x_2*z_2	0.03920	0.019842	1.98	0.051	1.355
x_3*z_2	0.06416	0.025861	2.48	0.015	1.568
x_4*z_2	-0.06354	0.025861	-2.46	0.016	1.568
$x_1*z_1*z_2$	0.02555	0.007452	3.43	0.001	2.123
$x_2*z_1*z_2$	-0.03110	0.019842	-1.57	0.120	1.355
$x_3*z_1*z_2$	-0.04084	0.025861	-1.58	0.117	1.568
$x_4*z_1*z_2$	0.02521	0.025861	0.97	0.332	1.568

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.0373516 PRESS = 0.192970
 R-Sq = 41.61% R-Sq(pred) = 22.34% R-Sq(adj) = 33.19%

Analysis of Variance for y_2 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	15	0.103399	0.103399	0.006893	4.94	0.000
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.041588	0.013863	9.94	0.000
Component* z_1						
Linear	4	0.006833	0.006833	0.001708	1.22	0.305
x_1*z_1	1	0.003696	0.005414	0.005414	3.88	0.052
x_2*z_1	1	0.000329	0.000213	0.000213	0.15	0.697
x_3*z_1	1	0.000085	0.000000	0.000000	0.00	0.995
x_4*z_1	1	0.002723	0.002723	0.002723	1.95	0.165
Component* z_2						
Linear	4	0.028758	0.028758	0.007189	5.15	0.001
x_1*z_2	1	0.008831	0.001170	0.001170	0.84	0.362
x_2*z_2	1	0.005495	0.005445	0.005445	3.90	0.051
x_3*z_2	1	0.006011	0.008588	0.008588	6.16	0.015
x_4*z_2	1	0.008421	0.008421	0.008421	6.04	0.016
Component* $z_1 * z_2$						
Linear	4	0.026220	0.026220	0.006555	4.70	0.002
$x_1*z_1*z_2$	1	0.018414	0.016404	0.016404	11.76	0.001
$x_2*z_1*z_2$	1	0.003634	0.003428	0.003428	2.46	0.120
$x_3*z_1*z_2$	1	0.002846	0.003480	0.003480	2.49	0.117
$x_4*z_1*z_2$	1	0.001326	0.001326	0.001326	0.95	0.332
Residual Error	104	0.145095	0.145095	0.001395		
Lack-of-Fit	24	0.046420	0.046420	0.001934	1.57	0.071
Pure Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				



The Quadratic Model for y_2

Regression for Mixtures: y_2 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_2 (component proportions)

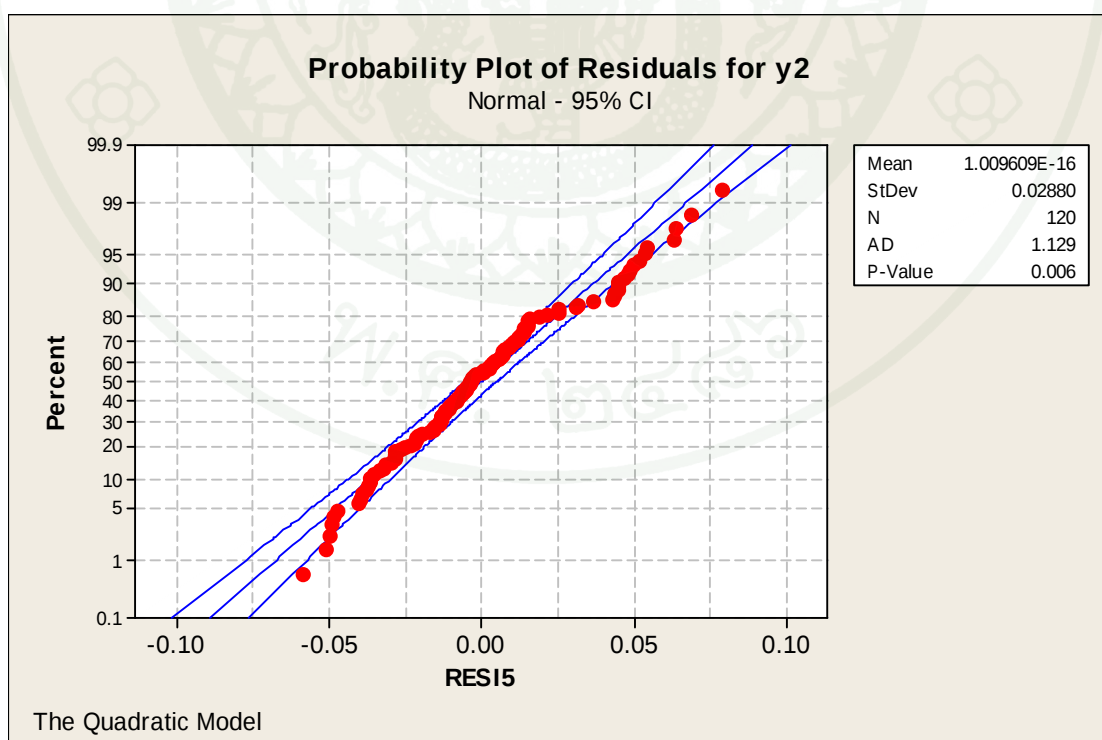
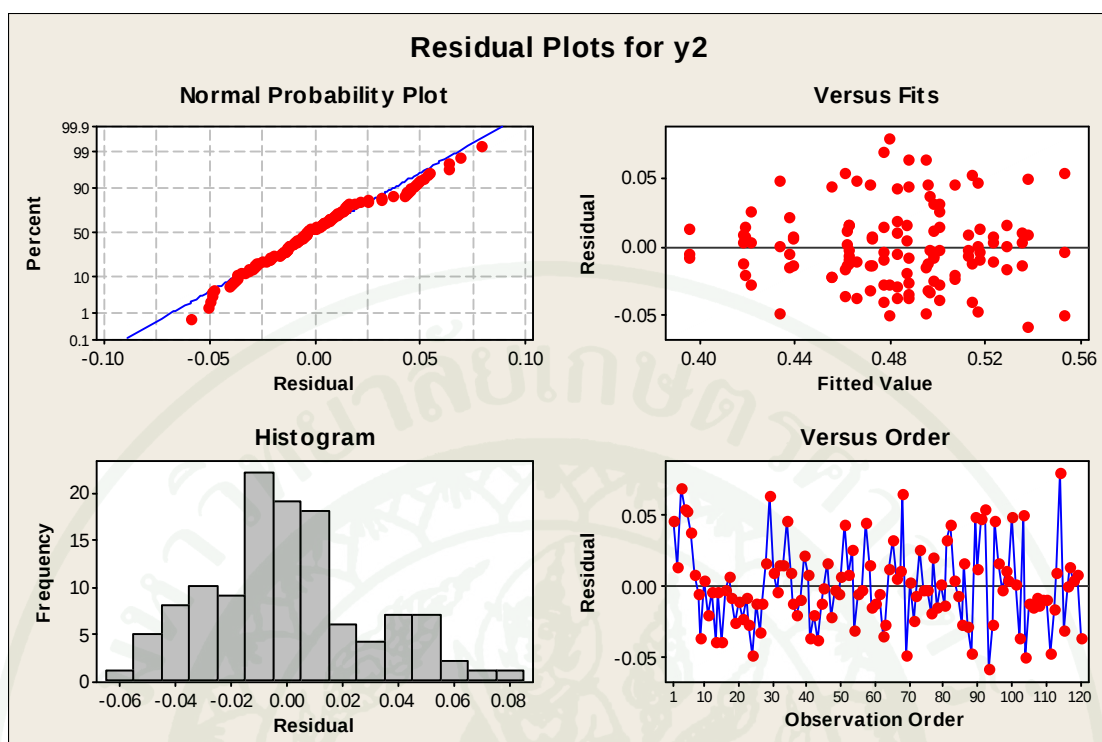
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	0.410	0.09864	*	*	420.7
x_2	-0.457	0.92044	*	*	3297.0
x_3	-0.376	1.73475	*	*	7978.2
x_4	-0.229	1.73475	*	*	7978.2
$x_1 \times x_2$	1.491	1.70449	0.87	0.384	3075.6
$x_1 \times x_3$	1.485	2.68534	0.55	0.582	6106.2
$x_1 \times x_4$	1.332	2.68534	0.50	0.621	6106.2
$x_2 \times x_3$	1.974	3.17130	0.62	0.535	810.3
$x_2 \times x_4$	2.423	3.17130	0.76	0.447	810.3
$x_3 \times x_4$	1.395	3.63472	0.38	0.702	1004.1
$x_1 \times z_1$	0.054	0.09864	0.55	0.587	420.7
$x_2 \times z_1$	0.429	0.92044	0.47	0.642	3297.0
$x_3 \times z_1$	1.161	1.73475	0.67	0.505	7978.2
$x_4 \times z_1$	-1.681	1.73475	-0.97	0.335	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-0.787	1.70449	-0.46	0.646	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-1.690	2.68534	-0.63	0.531	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1$	1.892	2.68534	0.70	0.483	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-2.099	3.17130	-0.66	0.510	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1$	1.920	3.17130	0.61	0.547	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1$	1.274	3.63472	0.35	0.727	1004.1
$x_1 \times z_2$	0.132	0.09864	1.33	0.186	420.7
$x_2 \times z_2$	1.428	0.92044	1.55	0.125	3297.0
$x_3 \times z_2$	2.100	1.73475	1.21	0.230	7978.2
$x_4 \times z_2$	2.072	1.73475	1.19	0.236	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_2$	-2.495	1.70449	-1.46	0.147	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_2$	-3.207	2.68534	-1.19	0.236	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-3.352	2.68534	-1.25	0.216	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_2$	-4.274	3.17130	-1.35	0.182	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_2$	-4.342	3.17130	-1.37	0.175	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_2$	-4.400	3.63472	-1.21	0.230	1004.1
$x_1 \times z_1 \times z_2$	0.237	0.09864	2.40	0.019	420.7
$x_2 \times z_1 \times z_2$	1.683	0.92044	1.83	0.071	3297.0
$x_3 \times z_1 \times z_2$	3.608	1.73475	2.08	0.041	7978.2
$x_4 \times z_1 \times z_2$	3.417	1.73475	1.97	0.052	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	-3.284	1.70449	-1.93	0.058	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	-5.724	2.68534	-2.13	0.036	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-5.420	2.68534	-2.02	0.047	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	-6.470	3.17130	-2.04	0.045	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-6.007	3.17130	-1.89	0.062	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-7.401	3.63472	-2.04	0.045	1004.1

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.0351203 PRESS = 0.222019
R-Sq = 60.29% R-Sq(pred) = 10.65% R-Sq(adj) = 40.93%

Analysis of Variance for y2 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	39	0.149819	0.149819	0.003842	3.11	0.000
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.003751	0.001250	1.01	0.391
Quadratic	6	0.014086	0.014086	0.002348	1.90	0.090
x1*x2	1	0.000509	0.000944	0.000944	0.77	0.384
x1*x3	1	0.006404	0.000377	0.000377	0.31	0.582
x1*x4	1	0.003711	0.000303	0.000303	0.25	0.621
x2*x3	1	0.000829	0.000478	0.000478	0.39	0.535
x2*x4	1	0.002452	0.000720	0.000720	0.58	0.447
x3*x4	1	0.000182	0.000182	0.000182	0.15	0.702
Component* z1						
Linear	4	0.006833	0.022715	0.005679	4.60	0.002
x1*z1	1	0.003696	0.000368	0.000368	0.30	0.587
x2*z1	1	0.000329	0.000268	0.000268	0.22	0.642
x3*z1	1	0.000085	0.000553	0.000553	0.45	0.505
x4*z1	1	0.002723	0.001158	0.001158	0.94	0.335
Quadratic	6	0.019604	0.019604	0.003267	2.65	0.021
x1*x2*z1	1	0.000058	0.000263	0.000263	0.21	0.646
x1*x3*z1	1	0.000216	0.000489	0.000489	0.40	0.531
x1*x4*z1	1	0.001829	0.000612	0.000612	0.50	0.483
x2*x3*z1	1	0.016217	0.000540	0.000540	0.44	0.510
x2*x4*z1	1	0.001133	0.000452	0.000452	0.37	0.547
x3*x4*z1	1	0.000152	0.000152	0.000152	0.12	0.727
Component* z2						
Linear	4	0.028758	0.003735	0.000934	0.76	0.556
x1*z2	1	0.008831	0.002194	0.002194	1.78	0.186
x2*z2	1	0.005495	0.002968	0.002968	2.41	0.125
x3*z2	1	0.006011	0.001808	0.001808	1.47	0.230
x4*z2	1	0.008421	0.001760	0.001760	1.43	0.236
Quadratic	6	0.004459	0.004459	0.000743	0.60	0.728
x1*x2*z2	1	0.000263	0.002644	0.002644	2.14	0.147
x1*x3*z2	1	0.000781	0.001759	0.001759	1.43	0.236
x1*x4*z2	1	0.000466	0.001922	0.001922	1.56	0.216
x2*x3*z2	1	0.000469	0.002240	0.002240	1.82	0.182
x2*x4*z2	1	0.000672	0.002312	0.002312	1.87	0.175
x3*x4*z2	1	0.001808	0.001808	0.001808	1.47	0.230
Component* z1 * z2						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.04	0.022
x1*z1*z2	1	0.018414	0.007119	0.007119	5.77	0.019
x2*z1*z2	1	0.003634	0.004122	0.004122	3.34	0.071
x3*z1*z2	1	0.002846	0.005335	0.005335	4.32	0.041
x4*z1*z2	1	0.001326	0.004786	0.004786	3.88	0.052
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.12	0.036
x1*x2*z1*z2	1	0.000344	0.004578	0.004578	3.71	0.058
x1*x3*z1*z2	1	0.000016	0.005605	0.005605	4.54	0.036
x1*x4*z1*z2	1	0.002614	0.005024	0.005024	4.07	0.047
x2*x3*z1*z2	1	0.000126	0.005134	0.005134	4.16	0.045
x2*x4*z1*z2	1	0.000057	0.004425	0.004425	3.59	0.062
x3*x4*z1*z2	1	0.005114	0.005114	0.005114	4.15	0.045
Residual Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				



The Special Cubic Model for y_2

Regression for Mixtures: y_2 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

The following terms cannot be estimated and were removed:

$x_1 \times x_2 \times x_3$
 $x_1 \times x_2 \times x_4$
 $x_1 \times x_3 \times x_4$
 $x_2 \times x_3 \times x_4$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_1$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_1$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_1$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_1$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_2$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_2$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$
 $x_1 \times x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$
 $x_1 \times x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$
 $x_2 \times x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$

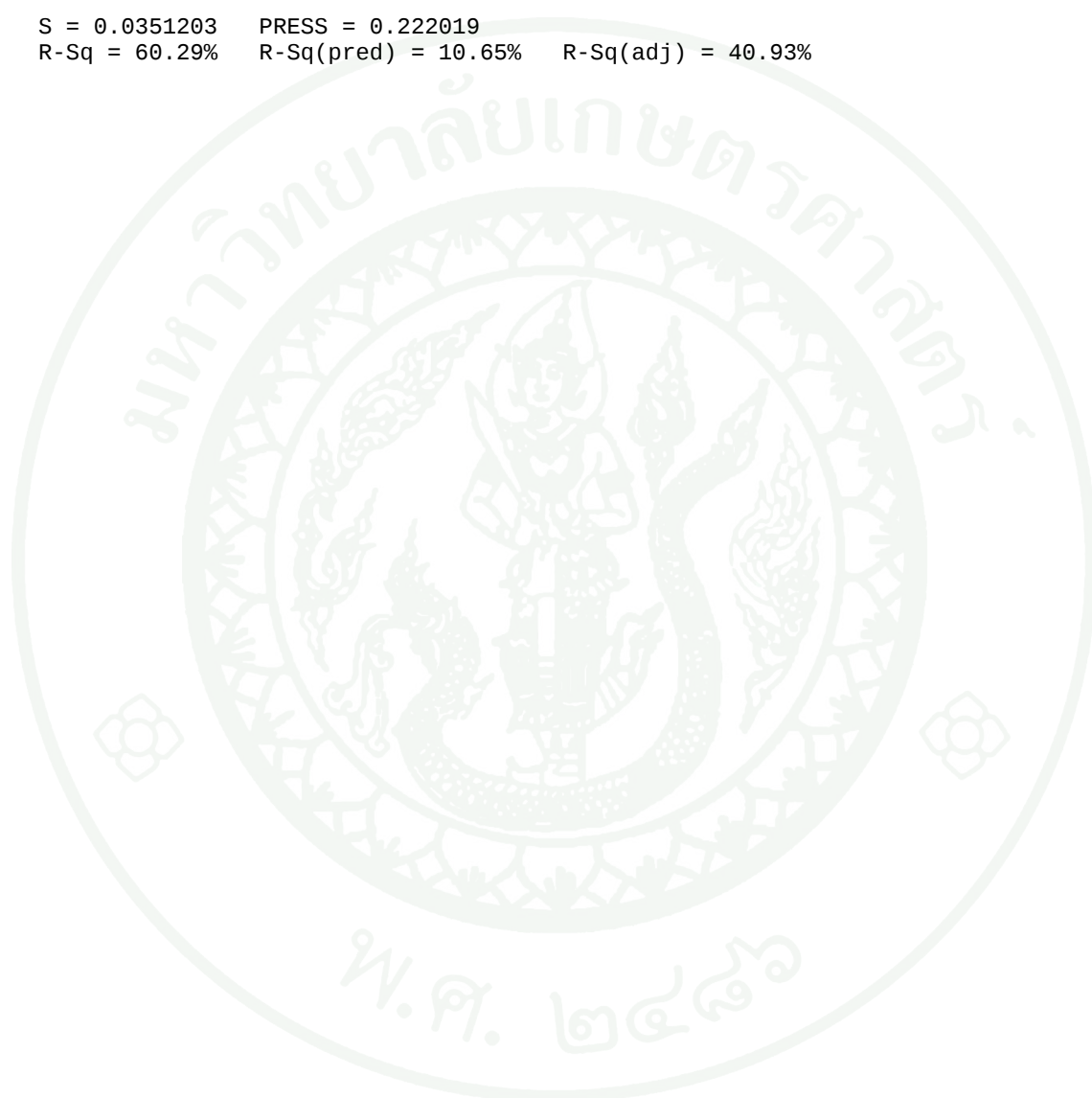
Estimated Regression Coefficients for y_2 (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	0.410	0.09864	*	*	420.7
x_2	-0.457	0.92044	*	*	3297.0
x_3	-0.376	1.73475	*	*	7978.2
x_4	-0.229	1.73475	*	*	7978.2
$x_1 \times x_2$	1.491	1.70449	0.87	0.384	3075.6
$x_1 \times x_3$	1.485	2.68534	0.55	0.582	6106.2
$x_1 \times x_4$	1.332	2.68534	0.50	0.621	6106.2
$x_2 \times x_3$	1.974	3.17130	0.62	0.535	810.3
$x_2 \times x_4$	2.423	3.17130	0.76	0.447	810.3
$x_3 \times x_4$	1.395	3.63472	0.38	0.702	1004.1
$x_1 \times z_1$	0.054	0.09864	0.55	0.587	420.7
$x_2 \times z_1$	0.429	0.92044	0.47	0.642	3297.0
$x_3 \times z_1$	1.161	1.73475	0.67	0.505	7978.2
$x_4 \times z_1$	-1.681	1.73475	-0.97	0.335	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-0.787	1.70449	-0.46	0.646	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-1.690	2.68534	-0.63	0.531	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_1$	1.892	2.68534	0.70	0.483	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-2.099	3.17130	-0.66	0.510	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_1$	1.920	3.17130	0.61	0.547	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_1$	1.274	3.63472	0.35	0.727	1004.1
$x_1 \times z_2$	0.132	0.09864	1.33	0.186	420.7
$x_2 \times z_2$	1.428	0.92044	1.55	0.125	3297.0
$x_3 \times z_2$	2.100	1.73475	1.21	0.230	7978.2
$x_4 \times z_2$	2.072	1.73475	1.19	0.236	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_2$	-2.495	1.70449	-1.46	0.147	3075.6
$x_1 \times x_3 \times z_2$	-3.207	2.68534	-1.19	0.236	6106.2
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-3.352	2.68534	-1.25	0.216	6106.2
$x_2 \times x_3 \times z_2$	-4.274	3.17130	-1.35	0.182	810.3
$x_2 \times x_4 \times z_2$	-4.342	3.17130	-1.37	0.175	810.3
$x_3 \times x_4 \times z_2$	-4.400	3.63472	-1.21	0.230	1004.1
$x_1 \times z_1 \times z_2$	0.237	0.09864	2.40	0.019	420.7
$x_2 \times z_1 \times z_2$	1.683	0.92044	1.83	0.071	3297.0
$x_3 \times z_1 \times z_2$	3.608	1.73475	2.08	0.041	7978.2
$x_4 \times z_1 \times z_2$	3.417	1.73475	1.97	0.052	7978.2
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	-3.284	1.70449	-1.93	0.058	3075.6

$x1 \times x3 \times z1 \times z2$	-5.724	2.68534	-2.13	0.036	6106.2
$x1 \times x4 \times z1 \times z2$	-5.420	2.68534	-2.02	0.047	6106.2
$x2 \times x3 \times z1 \times z2$	-6.470	3.17130	-2.04	0.045	810.3
$x2 \times x4 \times z1 \times z2$	-6.007	3.17130	-1.89	0.062	810.3
$x3 \times x4 \times z1 \times z2$	-7.401	3.63472	-2.04	0.045	1004.1

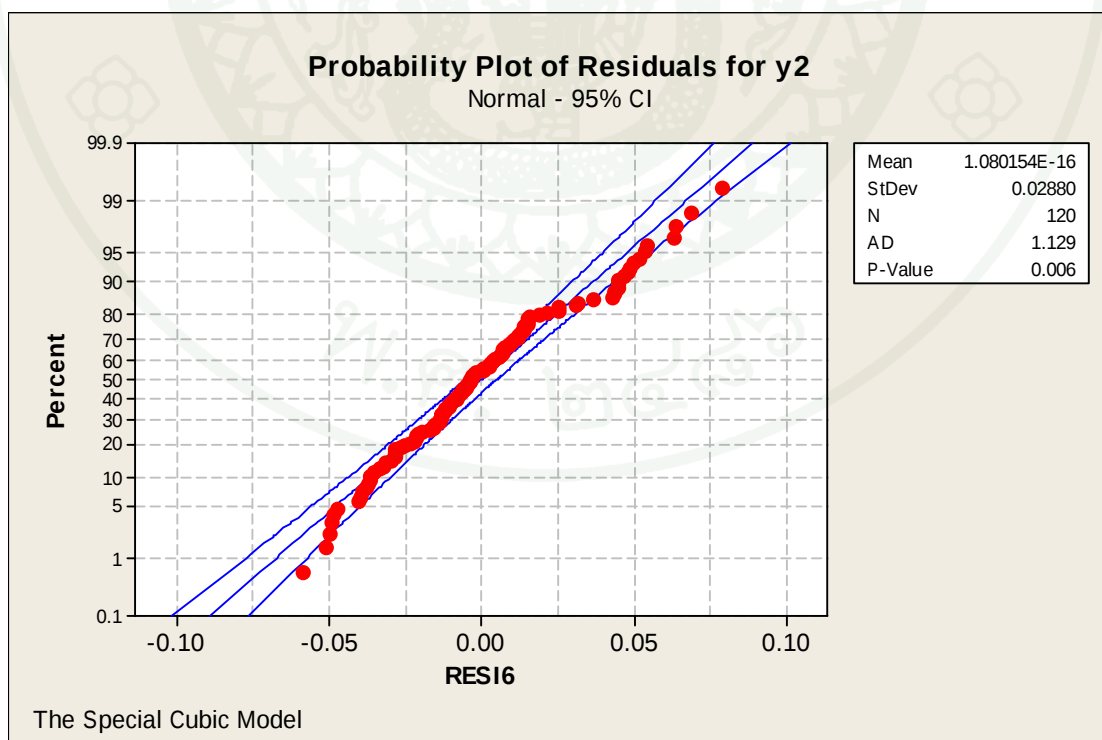
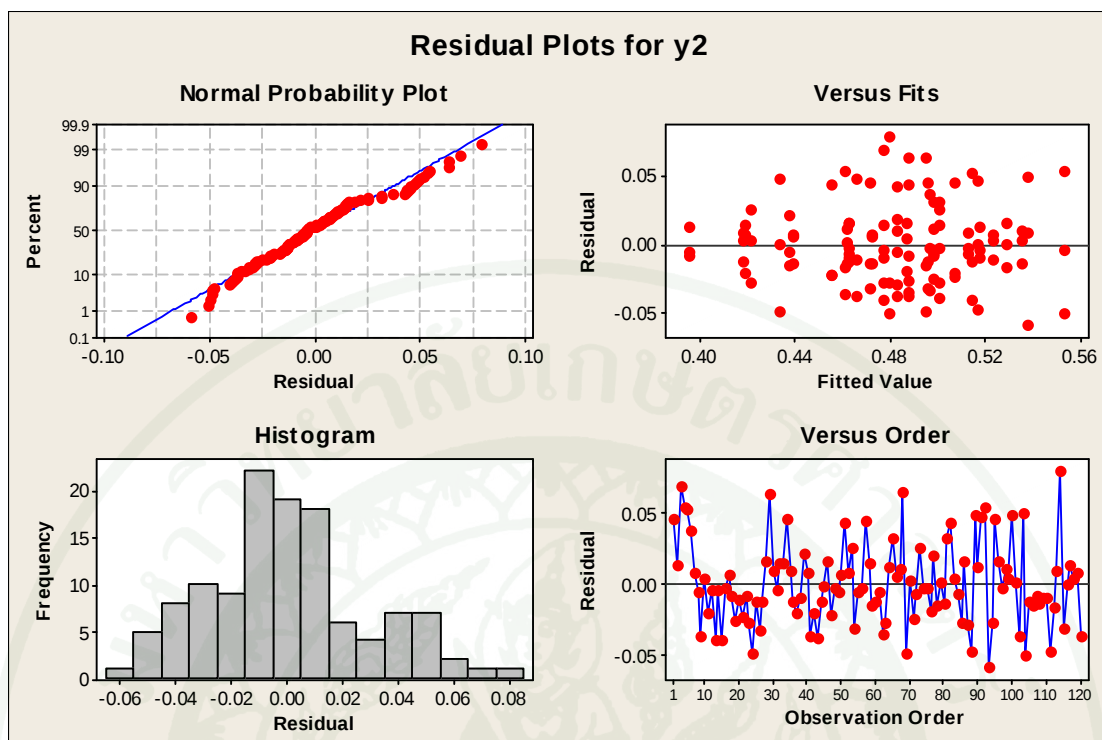
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.0351203 PRESS = 0.222019
R-Sq = 60.29% R-Sq(pred) = 10.65% R-Sq(adj) = 40.93%



Analysis of Variance for y2 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	39	0.149819	0.149819	0.003842	3.11	0.000
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.003751	0.001250	1.01	0.391
Quadratic	6	0.014086	0.014086	0.002348	1.90	0.090
x1*x2	1	0.000509	0.000944	0.000944	0.77	0.384
x1*x3	1	0.006404	0.000377	0.000377	0.31	0.582
x1*x4	1	0.003711	0.000303	0.000303	0.25	0.621
x2*x3	1	0.000829	0.000478	0.000478	0.39	0.535
x2*x4	1	0.002452	0.000720	0.000720	0.58	0.447
x3*x4	1	0.000182	0.000182	0.000182	0.15	0.702
Component* z1						
Linear	4	0.006833	0.022715	0.005679	4.60	0.002
x1*z1	1	0.003696	0.000368	0.000368	0.30	0.587
x2*z1	1	0.000329	0.000268	0.000268	0.22	0.642
x3*z1	1	0.000085	0.000553	0.000553	0.45	0.505
x4*z1	1	0.002723	0.001158	0.001158	0.94	0.335
Quadratic	6	0.019604	0.019604	0.003267	2.65	0.021
x1*x2*z1	1	0.000058	0.000263	0.000263	0.21	0.646
x1*x3*z1	1	0.000216	0.000489	0.000489	0.40	0.531
x1*x4*z1	1	0.001829	0.000612	0.000612	0.50	0.483
x2*x3*z1	1	0.016217	0.000540	0.000540	0.44	0.510
x2*x4*z1	1	0.001133	0.000452	0.000452	0.37	0.547
x3*x4*z1	1	0.000152	0.000152	0.000152	0.12	0.727
Component* z2						
Linear	4	0.028758	0.003735	0.000934	0.76	0.556
x1*z2	1	0.008831	0.002194	0.002194	1.78	0.186
x2*z2	1	0.005495	0.002968	0.002968	2.41	0.125
x3*z2	1	0.006011	0.001808	0.001808	1.47	0.230
x4*z2	1	0.008421	0.001760	0.001760	1.43	0.236
Quadratic	6	0.004459	0.004459	0.000743	0.60	0.728
x1*x2*z2	1	0.000263	0.002644	0.002644	2.14	0.147
x1*x3*z2	1	0.000781	0.001759	0.001759	1.43	0.236
x1*x4*z2	1	0.000466	0.001922	0.001922	1.56	0.216
x2*x3*z2	1	0.000469	0.002240	0.002240	1.82	0.182
x2*x4*z2	1	0.000672	0.002312	0.002312	1.87	0.175
x3*x4*z2	1	0.001808	0.001808	0.001808	1.47	0.230
Component* z1 * z2						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.04	0.022
x1*z1*z2	1	0.018414	0.007119	0.007119	5.77	0.019
x2*z1*z2	1	0.003634	0.004122	0.004122	3.34	0.071
x3*z1*z2	1	0.002846	0.005335	0.005335	4.32	0.041
x4*z1*z2	1	0.001326	0.004786	0.004786	3.88	0.052
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.12	0.036
x1*x2*z1*z2	1	0.000344	0.004578	0.004578	3.71	0.058
x1*x3*z1*z2	1	0.000016	0.005605	0.005605	4.54	0.036
x1*x4*z1*z2	1	0.002614	0.005024	0.005024	4.07	0.047
x2*x3*z1*z2	1	0.000126	0.005134	0.005134	4.16	0.045
x2*x4*z1*z2	1	0.000057	0.004425	0.004425	3.59	0.062
x3*x4*z1*z2	1	0.005114	0.005114	0.005114	4.15	0.045
Residual Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				



Backward Elimination of Quadratic Model for y_2

Stepwise for Mixtures: y_2 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Backward model selection

Response: y_2

Number of terms considered = 40 Number of cases used = 120

Alpha-to-Remove 0.1000

Forced terms: x_1, x_2, x_3, x_4

Step	1	2	3	4	5	6
x_1	0.4100	0.4100	0.4456	0.4545	0.4545	0.4812
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x_2	-0.4569	-0.4569	-0.1371	-0.0431	-0.0431	0.2396
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x_3	-0.3758	-0.3758	0.2659	0.1303	0.1303	0.5020
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x_4	-0.2294	-0.2294	0.4122	0.6360	0.6360	0.5293
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
$x_1 \times x_2$	1.4912	1.4912	0.8914	0.7214	0.7214	0.2104
T-Value	0.87	0.88	1.32	1.24	1.24	0.74
P-Value	0.384	0.382	0.189	0.217	0.217	0.464
$x_1 \times x_3$	1.4853	1.4853	0.4873	0.6162	0.6162	
T-Value	0.55	0.56	0.74	1.01	1.01	
P-Value	0.582	0.580	0.464	0.314	0.314	
$x_1 \times x_4$	1.3320	1.3320	0.3340			
T-Value	0.50	0.50	0.50			
P-Value	0.621	0.619	0.616			
$x_2 \times x_3$	1.9742	1.9742	0.8061	0.9014	0.9014	0.1083
T-Value	0.62	0.63	0.92	1.05	1.05	0.31
P-Value	0.535	0.533	0.362	0.295	0.295	0.755
$x_2 \times x_4$	2.4226	2.4226	1.2544	0.8519	0.8519	0.7216
T-Value	0.76	0.77	1.43	2.31	2.31	2.09
P-Value	0.447	0.445	0.158	0.023	0.023	0.040
$x_3 \times x_4$	1.395	1.395				
T-Value	0.38	0.39				
P-Value	0.702	0.701				
$x_1 \times z_1$	0.0539	0.0864	0.0864	0.0864	0.1052	0.1052
T-Value	0.55	2.60	2.61	2.63	3.95	3.95
P-Value	0.587	0.011	0.011	0.010	0.000	0.000
$x_2 \times z_1$	0.4291	0.7213	0.7213	0.7213	0.9886	0.9886
T-Value	0.47	1.86	1.87	1.87	3.67	3.67
P-Value	0.642	0.067	0.066	0.065	0.000	0.000

x3*z1	1.1614	1.7475	1.7475	1.7475	1.5649	1.5649
T-Value	0.67	3.80	3.82	3.84	3.77	3.77
P-Value	0.505	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x4*z1	-1.6811	-1.0949	-1.0949	-1.0949	-0.7148	-0.7148
T-Value	-0.97	-2.38	-2.39	-2.40	-3.05	-3.05
P-Value	0.335	0.020	0.019	0.018	0.003	0.003
x1*x2*z1	-0.7865	-1.3344	-1.3344	-1.3344	-1.7919	-1.7919
T-Value	-0.46	-1.97	-1.98	-1.99	-3.76	-3.75
P-Value	0.646	0.052	0.051	0.050	0.000	0.000
x1*x3*z1	-1.6900	-2.6017	-2.6017	-2.6017	-2.4639	-2.4639
T-Value	-0.63	-3.91	-3.93	-3.95	-3.83	-3.83
P-Value	0.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x4*z1	1.8922	0.9805	0.9805	0.9805	0.3984	0.3984
T-Value	0.70	1.47	1.48	1.49	1.44	1.44
P-Value	0.483	0.145	0.143	0.141	0.155	0.155
x2*x3*z1	-2.0992	-3.1664	-3.1664	-3.1664	-3.2196	-3.2196
T-Value	-0.66	-3.58	-3.60	-3.61	-3.68	-3.68
P-Value	0.510	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
x2*x4*z1	1.9199	0.8528	0.8528	0.8528		
T-Value	0.61	0.96	0.97	0.97		
P-Value	0.547	0.338	0.335	0.333		
x3*x4*z1	1.274					
T-Value	0.35					
P-Value	0.727					
x1*z2	0.1316	0.1316	0.1316	0.1316	0.1316	0.1316
T-Value	1.33	1.34	1.35	1.35	1.35	1.35
P-Value	0.186	0.184	0.181	0.179	0.179	0.179
x2*z2	1.4278	1.4278	1.4278	1.4278	1.4278	1.4278
T-Value	1.55	1.56	1.57	1.57	1.58	1.58
P-Value	0.125	0.123	0.121	0.119	0.119	0.119
x3*z2	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100
T-Value	1.21	1.22	1.22	1.23	1.23	1.23
P-Value	0.230	0.227	0.225	0.222	0.222	0.222
x4*z2	2.072	2.072	2.072	2.072	2.072	2.072
T-Value	1.19	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21
P-Value	0.236	0.233	0.231	0.229	0.228	0.228
x1*x2*z2	-2.495	-2.495	-2.495	-2.495	-2.495	-2.495
T-Value	-1.46	-1.47	-1.48	-1.49	-1.49	-1.49
P-Value	0.147	0.145	0.143	0.141	0.141	0.141
x1*x3*z2	-3.207	-3.207	-3.207	-3.207	-3.207	-3.207
T-Value	-1.19	-1.20	-1.21	-1.21	-1.21	-1.21
P-Value	0.236	0.233	0.231	0.229	0.229	0.229
x1*x4*z2	-3.352	-3.352	-3.352	-3.352	-3.352	-3.352
T-Value	-1.25	-1.26	-1.26	-1.27	-1.27	-1.27
P-Value	0.216	0.213	0.211	0.209	0.208	0.208
x2*x3*z2	-4.274	-4.274	-4.274	-4.274	-4.274	-4.274
T-Value	-1.35	-1.35	-1.36	-1.37	-1.37	-1.37
P-Value	0.182	0.179	0.177	0.175	0.175	0.175

x2*x4*z2	-4.342	-4.342	-4.342	-4.342	-4.342	-4.342
T-Value	-1.37	-1.38	-1.38	-1.39	-1.39	-1.39
P-Value	0.175	0.172	0.170	0.168	0.168	0.168
x3*x4*z2	-4.400	-4.400	-4.400	-4.400	-4.400	-4.400
T-Value	-1.21	-1.22	-1.22	-1.23	-1.23	-1.23
P-Value	0.230	0.227	0.225	0.222	0.222	0.222
x1*z1*z2	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370
T-Value	2.40	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44
P-Value	0.019	0.018	0.017	0.017	0.017	0.017
x2*z1*z2	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827
T-Value	1.83	1.84	1.85	1.86	1.86	1.86
P-Value	0.071	0.070	0.068	0.067	0.067	0.067
x3*z1*z2	3.608	3.608	3.608	3.608	3.608	3.608
T-Value	2.08	2.09	2.10	2.11	2.11	2.11
P-Value	0.041	0.040	0.039	0.038	0.038	0.038
x4*z1*z2	3.417	3.417	3.417	3.417	3.417	3.417
T-Value	1.97	1.98	1.99	2.00	2.00	2.00
P-Value	0.052	0.051	0.050	0.049	0.049	0.049
x1*x2*z1*z2	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284
T-Value	-1.93	-1.94	-1.95	-1.96	-1.96	-1.96
P-Value	0.058	0.056	0.055	0.054	0.054	0.054
x1*x3*z1*z2	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724
T-Value	-2.13	-2.14	-2.15	-2.16	-2.16	-2.16
P-Value	0.036	0.035	0.034	0.033	0.033	0.033
x1*x4*z1*z2	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420
T-Value	-2.02	-2.03	-2.04	-2.05	-2.05	-2.05
P-Value	0.047	0.046	0.045	0.044	0.044	0.044
x2*x3*z1*z2	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470
T-Value	-2.04	-2.05	-2.06	-2.07	-2.07	-2.07
P-Value	0.045	0.043	0.042	0.041	0.041	0.041
x2*x4*z1*z2	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007
T-Value	-1.89	-1.90	-1.91	-1.92	-1.92	-1.92
P-Value	0.062	0.060	0.059	0.058	0.058	0.058
x3*x4*z1*z2	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401
T-Value	-2.04	-2.05	-2.06	-2.07	-2.07	-2.07
P-Value	0.045	0.044	0.043	0.042	0.042	0.042
S	0.0351	0.0349	0.0347	0.0346	0.0346	0.0346
R-sq	60.29	60.23	60.16	60.03	59.58	59.08
R-sq(adj)	40.93	41.57	42.18	42.70	42.73	42.72
Mallows Cp	40.0	38.1	36.3	34.5	33.4	32.4
PRESS	0.222019	0.217945	0.214221	0.211334	0.210488	0.204736
R-Sq(pred)	10.65	12.29	13.79	14.95	15.29	17.61

Forced terms: x1 x2 x3 x4

Step	7	8	9	10	11	12
x1	0.4808	0.4847	0.4847	0.4847	0.4847	0.4847
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*

x2	0.2914	0.3648	0.3648	0.3648	0.3648	0.3648
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x3	0.5061	0.4924	0.4924	0.4924	0.4924	0.4924
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x4	0.5304	0.5278	0.5278	0.5278	0.5278	0.5278
T-Value	*	*	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*	*	*
x1*x2	0.1377					
T-Value	0.83					
P-Value	0.409					
x1*x3						
T-Value						
P-Value						
x1*x4						
T-Value						
P-Value						
x2*x3						
T-Value						
P-Value						
x2*x4	0.6338	0.5587	0.5587	0.5587	0.5587	0.5587
T-Value	3.15	3.11	3.11	3.12	3.14	3.13
P-Value	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002
x3*x4						
T-Value						
P-Value						
x1*z1	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052
T-Value	3.97	3.98	3.97	3.99	4.01	4.00
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*z1	0.9886	0.9886	0.9886	0.9886	0.9886	0.9886
T-Value	3.69	3.69	3.68	3.70	3.72	3.71
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x3*z1	1.5649	1.5649	1.5649	1.5649	1.5649	1.5649
T-Value	3.79	3.80	3.79	3.81	3.83	3.82
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x4*z1	-0.7148	-0.7148	-0.7148	-0.7148	-0.7148	-0.7148
T-Value	-3.07	-3.07	-3.06	-3.08	-3.10	-3.09
P-Value	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
x1*x2*z1	-1.7919	-1.7919	-1.7919	-1.7919	-1.7919	-1.7919
T-Value	-3.77	-3.78	-3.77	-3.79	-3.81	-3.80
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x3*z1	-2.4639	-2.4639	-2.4639	-2.4639	-2.4639	-2.4639
T-Value	-3.85	-3.85	-3.84	-3.86	-3.88	-3.87
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x1*x4*z1	0.3984	0.3984	0.3984	0.3984	0.3984	0.3984
T-Value	1.44	1.45	1.44	1.45	1.46	1.45
P-Value	0.153	0.152	0.153	0.151	0.148	0.150

x2*x3*z1	-3.2196	-3.2196	-3.2196	-3.2196	-3.2196	-3.2196
T-Value	-3.70	-3.71	-3.70	-3.72	-3.74	-3.73
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x2*x4*z1						
T-Value						
P-Value						
x3*x4*z1						
T-Value						
P-Value						
x1*z2	0.1316	0.1316	0.0189	0.0176	0.0126	
T-Value	1.36	1.36	0.67	0.64	1.25	
P-Value	0.177	0.176	0.505	0.524	0.214	
x2*z2	1.4278	1.4278	0.4079	0.4024	0.3478	0.3157
T-Value	1.58	1.59	1.21	1.21	1.87	1.71
P-Value	0.117	0.116	0.229	0.231	0.064	0.091
x3*z2	2.1003	2.1003	0.0331	0.0370	0.0576	0.0812
T-Value	1.24	1.24	0.30	0.34	1.79	3.10
P-Value	0.220	0.219	0.766	0.736	0.078	0.003
x4*z2	2.0725	2.0725	0.2198	0.0720		
T-Value	1.22	1.22	0.29	0.20		
P-Value	0.226	0.225	0.773	0.844		
x1*x2*z2	-2.4953	-2.4953	-0.5864	-0.5735	-0.4751	-0.3789
T-Value	-1.49	-1.50	-1.01	-1.00	-1.68	-1.38
P-Value	0.139	0.138	0.315	0.321	0.097	0.170
x1*x3*z2	-3.207	-3.207				
T-Value	-1.22	-1.22				
P-Value	0.226	0.225				
x1*x4*z2	-3.3522	-3.3522	-0.4217	-0.2265	-0.1080	-0.0647
T-Value	-1.27	-1.28	-0.39	-0.38	-2.05	-1.62
P-Value	0.206	0.205	0.694	0.708	0.044	0.109
x2*x3*z2	-4.2736	-4.2736	-0.5131	-0.5180	-0.4923	-0.5409
T-Value	-1.38	-1.38	-1.39	-1.42	-1.45	-1.60
P-Value	0.173	0.172	0.167	0.160	0.150	0.113
x2*x4*z2	-4.3419	-4.3419	-0.8786	-0.6735	-0.5186	-0.5490
T-Value	-1.40	-1.40	-0.70	-0.79	-1.63	-1.72
P-Value	0.166	0.165	0.487	0.429	0.107	0.089
x3*x4*z2	-4.4003	-4.4003	-0.1969			
T-Value	-1.24	-1.24	-0.22			
P-Value	0.220	0.219	0.825			
x1*z1*z2	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370
T-Value	2.45	2.46	2.45	2.46	2.48	2.47
P-Value	0.016	0.016	0.016	0.016	0.015	0.015
x2*z1*z2	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827
T-Value	1.87	1.87	1.86	1.87	1.88	1.88
P-Value	0.065	0.065	0.066	0.064	0.063	0.064
x3*z1*z2	3.608	3.608	3.608	3.608	3.608	3.608
T-Value	2.12	2.13	2.12	2.13	2.14	2.14
P-Value	0.037	0.036	0.037	0.036	0.035	0.035

x4*z1*z2	3.417	3.417	3.417	3.417	3.417	3.417
T-Value	2.01	2.01	2.01	2.02	2.03	2.02
P-Value	0.047	0.047	0.048	0.046	0.045	0.046
x1*x2*z1*z2	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284
T-Value	-1.97	-1.97	-1.96	-1.98	-1.99	-1.98
P-Value	0.052	0.052	0.053	0.051	0.050	0.051
x1*x3*z1*z2	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724
T-Value	-2.18	-2.18	-2.17	-2.19	-2.20	-2.19
P-Value	0.032	0.032	0.032	0.031	0.031	0.031
x1*x4*z1*z2	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420
T-Value	-2.06	-2.06	-2.06	-2.07	-2.08	-2.07
P-Value	0.042	0.042	0.043	0.041	0.040	0.041
x2*x3*z1*z2	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470
T-Value	-2.08	-2.09	-2.08	-2.09	-2.10	-2.10
P-Value	0.040	0.040	0.040	0.039	0.038	0.039
x2*x4*z1*z2	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007
T-Value	-1.93	-1.94	-1.93	-1.94	-1.95	-1.95
P-Value	0.056	0.056	0.057	0.055	0.054	0.055
x3*x4*z1*z2	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401
T-Value	-2.08	-2.08	-2.08	-2.09	-2.10	-2.09
P-Value	0.041	0.040	0.041	0.040	0.039	0.039
S	0.0344	0.0343	0.0344	0.0343	0.0341	0.0342
R-sq	59.04	58.71	58.00	57.98	57.96	57.23
R-sq(adj)	43.32	43.52	43.20	43.81	44.41	44.06
Mallows Cp	30.5	29.2	28.6	26.7	24.7	24.2
PRESS	0.201039	0.197902	0.197686	0.190813	0.188107	0.188054
R-Sq(pred)	19.10	20.36	20.45	23.21	24.30	24.32

Forced terms: x1 x2 x3 x4

Step	13	14	15	16
x1	0.4847	0.4847	0.4847	0.4847
T-Value	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*
x2	0.3648	0.3648	0.3648	0.3648
T-Value	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*
x3	0.4924	0.4924	0.4924	0.4924
T-Value	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*
x4	0.5278	0.5278	0.5278	0.5278
T-Value	*	*	*	*
P-Value	*	*	*	*
x1*x2				
T-Value				
P-Value				
x1*x3				
T-Value				
P-Value				

x1*x4
T-Value
P-Value

x2*x3
T-Value
P-Value

x2*x4	0.5587	0.5587	0.5587	0.5587
T-Value	3.11	3.12	3.12	3.11
P-Value	0.002	0.002	0.002	0.002

x3*x4
T-Value
P-Value

x1*z1	0.1052	0.1052	0.1052	0.1052
T-Value	3.98	3.99	4.00	3.97
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000

x2*z1	0.9886	0.9886	0.9886	0.7721
T-Value	3.69	3.70	3.70	3.47
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.001

x3*z1	1.5649	1.5649	1.5649	1.2322
T-Value	3.80	3.81	3.81	3.60
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.001

x4*z1	-0.7148	-0.7148	-0.7148	-0.4160
T-Value	-3.07	-3.08	-3.08	-3.89
P-Value	0.003	0.003	0.003	0.000

x1*x2*z1	-1.7919	-1.7919	-1.7919	-1.4826
T-Value	-3.78	-3.79	-3.79	-3.50
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.001

x1*x3*z1	-2.4639	-2.4639	-2.4639	-2.0339
T-Value	-3.85	-3.86	-3.87	-3.58
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.001

x1*x4*z1	0.3984	0.3984	0.3984	
T-Value	1.45	1.45	1.45	
P-Value	0.152	0.151	0.150	

x2*x3*z1	-3.2196	-3.2196	-3.2196	-2.4084
T-Value	-3.71	-3.71	-3.72	-3.63
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000

x2*x4*z1
T-Value
P-Value

x3*x4*z1
T-Value
P-Value

x1*z2
T-Value
P-Value

x2*z2	0.0627	0.0507	0.0410	0.0410
T-Value	2.47	2.48	2.44	2.43
P-Value	0.015	0.015	0.016	0.017

x3*z2	0.0733	0.0624	0.0664	0.0664
T-Value	2.85	2.87	3.14	3.12
P-Value	0.005	0.005	0.002	0.002

x4*z2
T-Value
P-Value

x1*x2*z2
T-Value
P-Value

x1*x3*z2
T-Value
P-Value

x1*x4*z2	-0.0687	-0.0646	-0.0779	-0.0779
T-Value	-1.71	-1.63	-2.15	-2.13
P-Value	0.090	0.107	0.034	0.035

x2*x3*z2	-0.1360
T-Value	-0.80
P-Value	0.428

x2*x4*z2	-0.1622	-0.1217
T-Value	-1.05	-0.84
P-Value	0.296	0.405

x3*x4*z2
T-Value
P-Value

x1*z1*z2	0.2370	0.2370	0.2370	0.2370
T-Value	2.46	2.46	2.47	2.45
P-Value	0.016	0.016	0.015	0.016

x2*z1*z2	1.6827	1.6827	1.6827	1.6827
T-Value	1.87	1.87	1.88	1.87
P-Value	0.065	0.064	0.064	0.065

x3*z1*z2	3.608	3.608	3.608	3.608
T-Value	2.13	2.13	2.13	2.12
P-Value	0.036	0.036	0.035	0.036

x4*z1*z2	3.417	3.417	3.417	3.417
T-Value	2.01	2.02	2.02	2.01
P-Value	0.047	0.046	0.046	0.047

x1*x2*z1*z2	-3.284	-3.284	-3.284	-3.284
T-Value	-1.97	-1.97	-1.98	-1.97
P-Value	0.052	0.051	0.051	0.052

x1*x3*z1*z2	-5.724	-5.724	-5.724	-5.724
T-Value	-2.18	-2.18	-2.19	-2.17
P-Value	0.032	0.031	0.031	0.032

x1*x4*z1*z2	-5.420	-5.420	-5.420	-5.420
T-Value	-2.06	-2.07	-2.07	-2.06
P-Value	0.042	0.041	0.041	0.042

x2*x3*z1*z2	-6.470	-6.470	-6.470	-6.470
T-Value	-2.09	-2.09	-2.09	-2.08
P-Value	0.040	0.039	0.039	0.040

x2*x4*z1*z2	-6.007	-6.007	-6.007	-6.007
T-Value	-1.94	-1.94	-1.94	-1.93
P-Value	0.056	0.055	0.055	0.056
x3*x4*z1*z2	-7.401	-7.401	-7.401	-7.401
T-Value	-2.08	-2.09	-2.09	-2.08
P-Value	0.040	0.040	0.039	0.040
S	0.0343	0.0343	0.0342	0.0344
R-sq	56.33	56.02	55.69	54.70
R-sq(adj)	43.51	43.73	43.91	43.26
Mallows Cp	24.0	22.6	21.3	21.3
PRESS	0.187671	0.185615	0.181712	0.181920
R-Sq(pred)	24.48	25.30	26.87	26.79

Regression for Mixtures: y2 versus x1, x2, x3, x4, z1, z2

Estimated Regression Coefficients for y2 (component proportions)

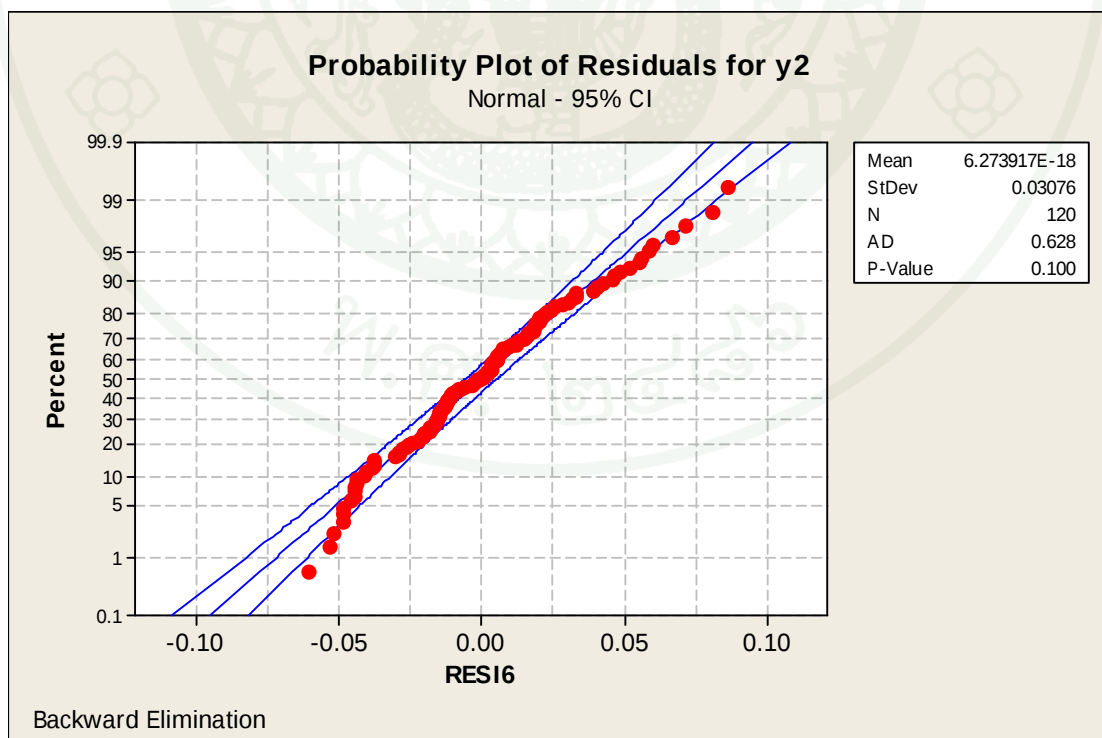
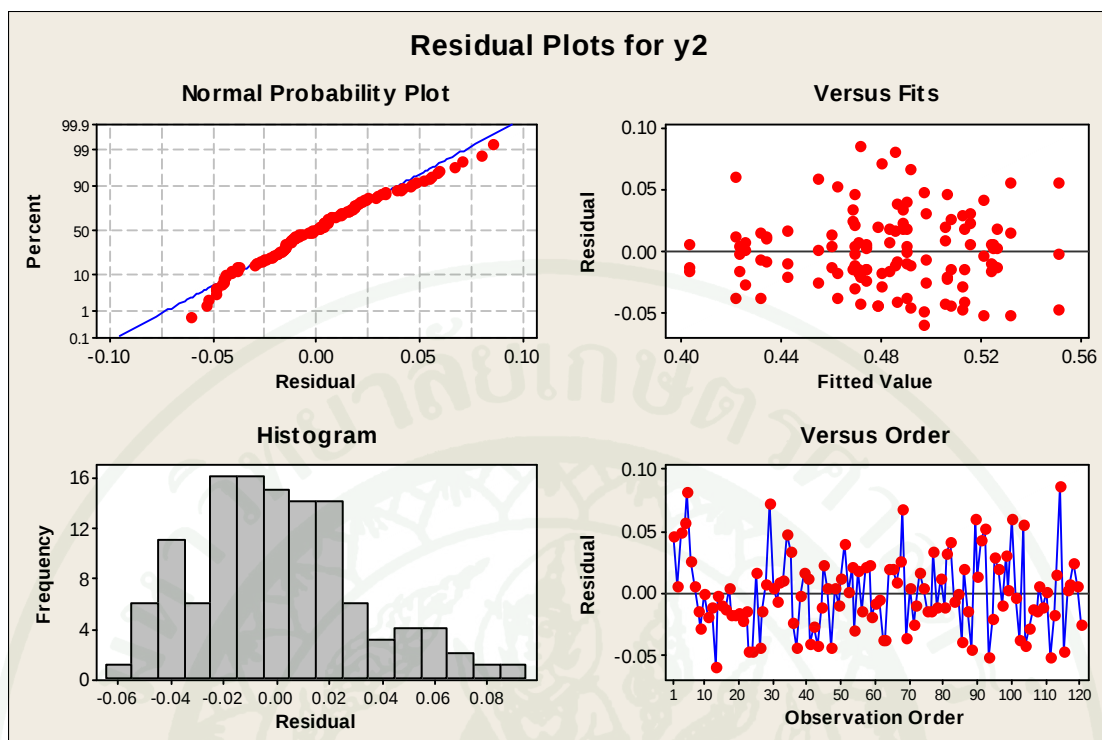
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x1	0.485	0.00740	*	*	2.47
x2	0.365	0.02370	*	*	2.28
x3	0.492	0.02443	*	*	1.65
x4	0.528	0.03195	*	*	2.82
x2*x4	0.559	0.17984	3.11	0.002	2.71
x1*z1	0.105	0.02649	3.97	0.000	31.58
x2*z1	0.772	0.22252	3.47	0.001	200.60
x3*z1	1.232	0.34255	3.60	0.001	323.83
x4*z1	-0.416	0.10700	-3.89	0.000	31.60
x1*x2*z1	-1.483	0.42388	-3.50	0.001	198.00
x1*x3*z1	-2.034	0.56734	-3.58	0.001	283.73
x2*x3*z1	-2.408	0.66417	-3.63	0.000	37.00
x2*z2	0.041	0.01686	2.43	0.017	1.15
x3*z2	0.066	0.02130	3.12	0.002	1.25
x1*x4*z2	-0.078	0.03651	-2.13	0.035	1.17
x1*z1*z2	0.237	0.09668	2.45	0.016	420.75
x2*z1*z2	1.683	0.90214	1.87	0.065	3296.96
x3*z1*z2	3.608	1.70025	2.12	0.036	7978.16
x4*z1*z2	3.417	1.70025	2.01	0.047	7978.16
x1*x2*z1*z2	-3.284	1.67060	-1.97	0.052	3075.62
x1*x3*z1*z2	-5.724	2.63195	-2.17	0.032	6106.16
x1*x4*z1*z2	-5.420	2.63195	-2.06	0.042	6106.16
x2*x3*z1*z2	-6.470	3.10825	-2.08	0.040	810.28
x2*x4*z1*z2	-6.007	3.10825	-1.93	0.056	810.28
x3*x4*z1*z2	-7.401	3.56245	-2.08	0.040	1004.15

* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.0344220 PRESS = 0.181920
R-Sq = 54.70% R-Sq(pred) = 26.79% R-Sq(adj) = 43.26%

Analysis of Variance for y2 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	24	0.135930	0.135930	0.005664	4.78	0.000
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.043942	0.014647	12.36	0.000
Quadratic	1	0.011437	0.011437	0.011437	9.65	0.002
x2*x4	1	0.011437	0.011437	0.011437	9.65	0.002
Component* z1						
Linear	4	0.006833	0.019980	0.004995	4.22	0.003
x1*z1	1	0.003696	0.018708	0.018708	15.79	0.000
x2*z1	1	0.000329	0.014265	0.014265	12.04	0.001
x3*z1	1	0.000085	0.015333	0.015333	12.94	0.001
x4*z1	1	0.002723	0.017915	0.017915	15.12	0.000
Quadratic	3	0.015854	0.015854	0.005285	4.46	0.006
x1*x2*z1	1	0.000058	0.014496	0.014496	12.23	0.001
x1*x3*z1	1	0.000216	0.015228	0.015228	12.85	0.001
x2*x3*z1	1	0.015580	0.015580	0.015580	13.15	0.000
Component* z2						
Linear	2	0.020335	0.025529	0.012765	10.77	0.000
x2*z2	1	0.012432	0.007000	0.007000	5.91	0.017
x3*z2	1	0.007903	0.011512	0.011512	9.72	0.002
Quadratic	1	0.005393	0.005393	0.005393	4.55	0.035
x1*x4*z2	1	0.005393	0.005393	0.005393	4.55	0.035
Component* z1 * z2						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.16	0.017
x1*z1*z2	1	0.018414	0.007119	0.007119	6.01	0.016
x2*z1*z2	1	0.003634	0.004122	0.004122	3.48	0.065
x3*z1*z2	1	0.002846	0.005335	0.005335	4.50	0.036
x4*z1*z2	1	0.001326	0.004786	0.004786	4.04	0.047
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.16	0.033
x1*x2*z1*z2	1	0.000344	0.004578	0.004578	3.86	0.052
x1*x3*z1*z2	1	0.000016	0.005605	0.005605	4.73	0.032
x1*x4*z1*z2	1	0.002614	0.005024	0.005024	4.24	0.042
x2*x3*z1*z2	1	0.000126	0.005134	0.005134	4.33	0.040
x2*x4*z1*z2	1	0.000057	0.004425	0.004425	3.73	0.056
x3*x4*z1*z2	1	0.005114	0.005114	0.005114	4.32	0.040
Residual Error	95	0.112563	0.112563	0.001185		
Lack-of-Fit	15	0.013888	0.013888	0.000926	0.75	0.726
Pure Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				



วิเคราะห์ผลต่อจาก Backward Elimination for y_2

Regression for Mixtures: y_2 versus $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2$

Estimated Regression Coefficients for y_2 (component proportions)

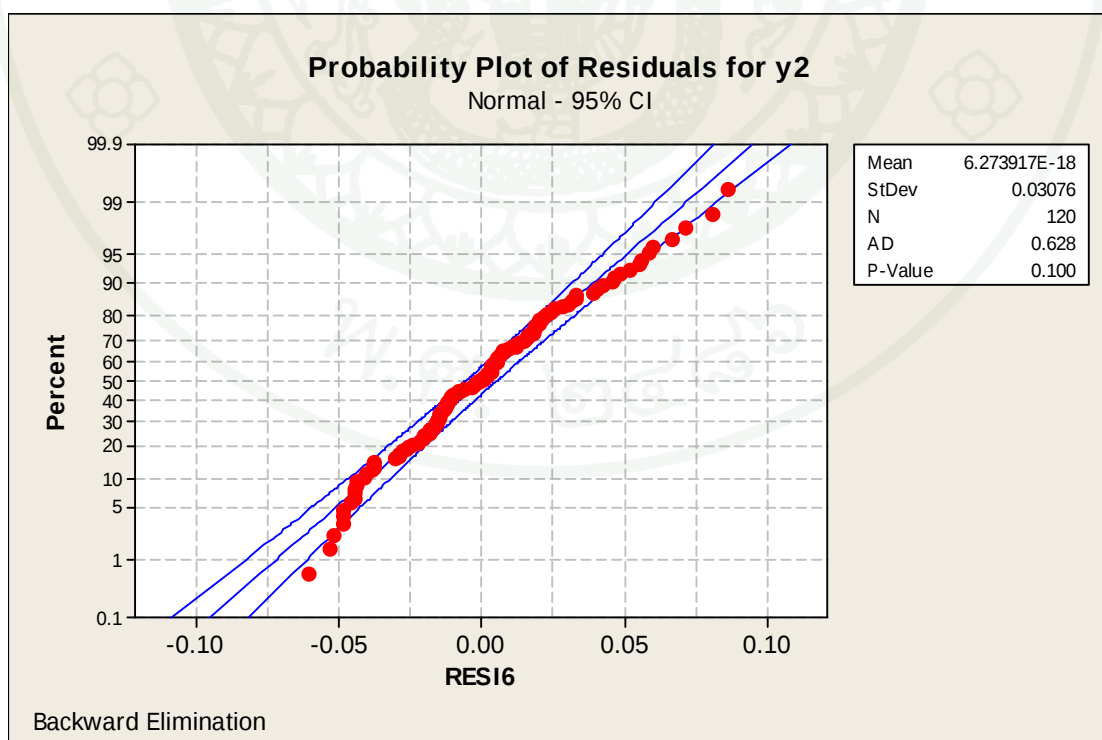
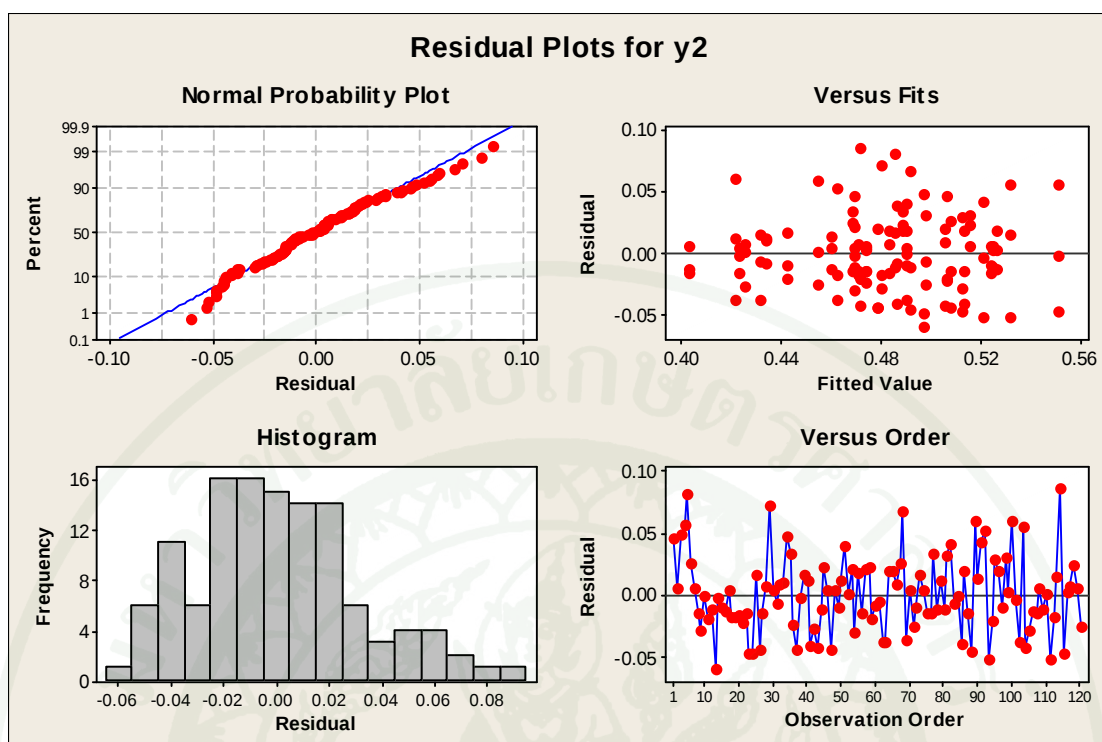
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
x_1	0.485	0.00740	*	*	2.47
x_2	0.365	0.02370	*	*	2.28
x_3	0.492	0.02443	*	*	1.65
x_4	0.528	0.03195	*	*	2.82
$x_2 \times x_4$	0.559	0.17984	3.11	0.002	2.71
$x_1 \times z_1$	0.105	0.02649	3.97	0.000	31.58
$x_2 \times z_1$	0.772	0.22252	3.47	0.001	200.60
$x_3 \times z_1$	1.232	0.34255	3.60	0.001	323.83
$x_4 \times z_1$	-0.416	0.10700	-3.89	0.000	31.60
$x_1 \times x_2 \times z_1$	-1.483	0.42388	-3.50	0.001	198.00
$x_1 \times x_3 \times z_1$	-2.034	0.56734	-3.58	0.001	283.73
$x_2 \times x_3 \times z_1$	-2.408	0.66417	-3.63	0.000	37.00
$x_2 \times z_2$	0.041	0.01686	2.43	0.017	1.15
$x_3 \times z_2$	0.066	0.02130	3.12	0.002	1.25
$x_1 \times x_4 \times z_2$	-0.078	0.03651	-2.13	0.035	1.17
$x_1 \times z_1 \times z_2$	0.237	0.09668	2.45	0.016	420.75
$x_2 \times z_1 \times z_2$	1.683	0.90214	1.87	0.065	3296.96
$x_3 \times z_1 \times z_2$	3.608	1.70025	2.12	0.036	7978.16
$x_4 \times z_1 \times z_2$	3.417	1.70025	2.01	0.047	7978.16
$x_1 \times x_2 \times z_1 \times z_2$	-3.284	1.67060	-1.97	0.052	3075.62
$x_1 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	-5.724	2.63195	-2.17	0.032	6106.16
$x_1 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-5.420	2.63195	-2.06	0.042	6106.16
$x_2 \times x_3 \times z_1 \times z_2$	-6.470	3.10825	-2.08	0.040	810.28
$x_2 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-6.007	3.10825	-1.93	0.056	810.28
$x_3 \times x_4 \times z_1 \times z_2$	-7.401	3.56245	-2.08	0.040	1004.15

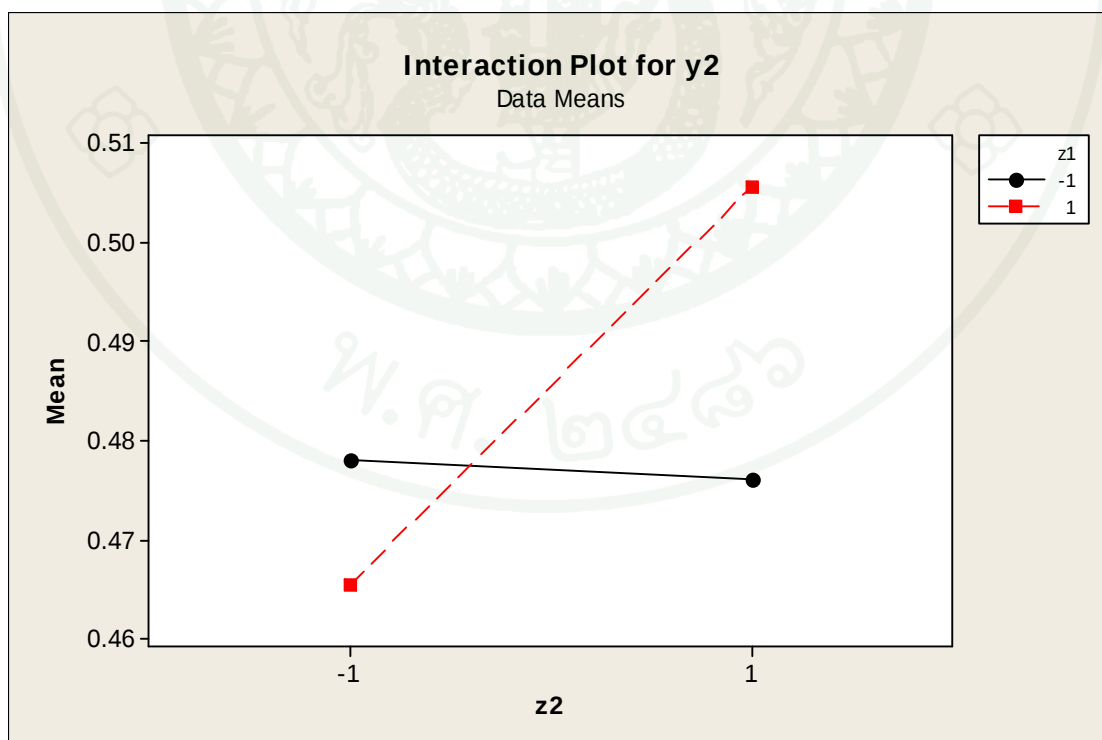
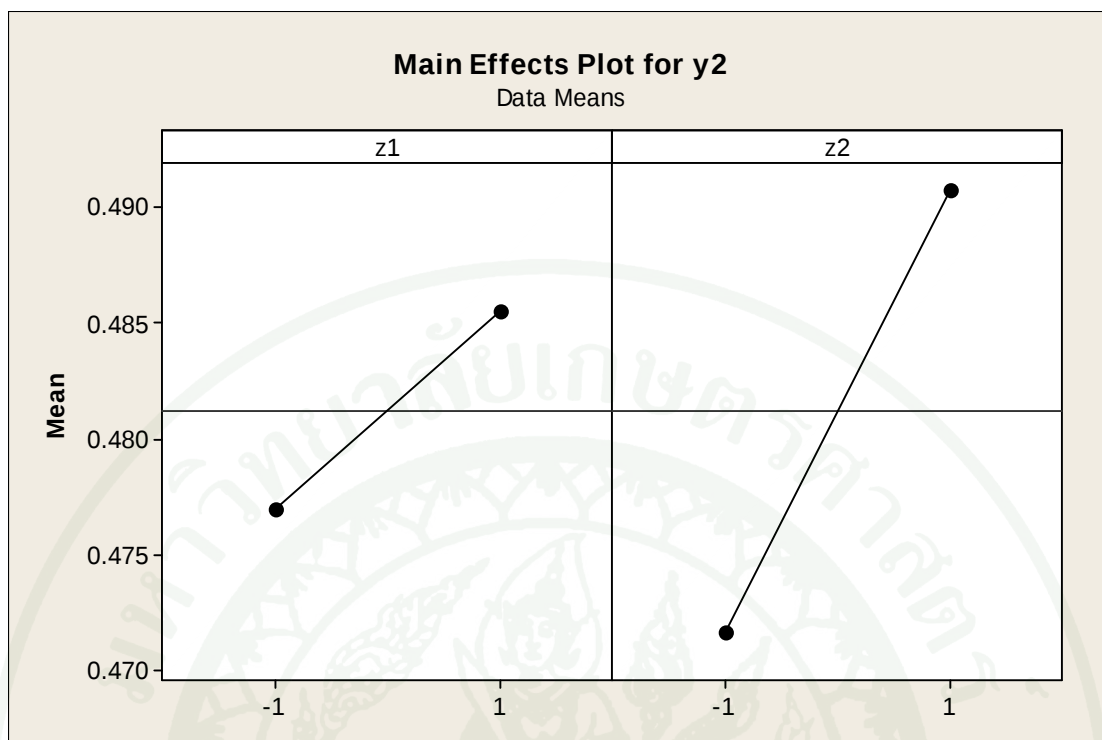
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.0344220 PRESS = 0.181920
R-Sq = 54.70% R-Sq(pred) = 26.79% R-Sq(adj) = 43.26%

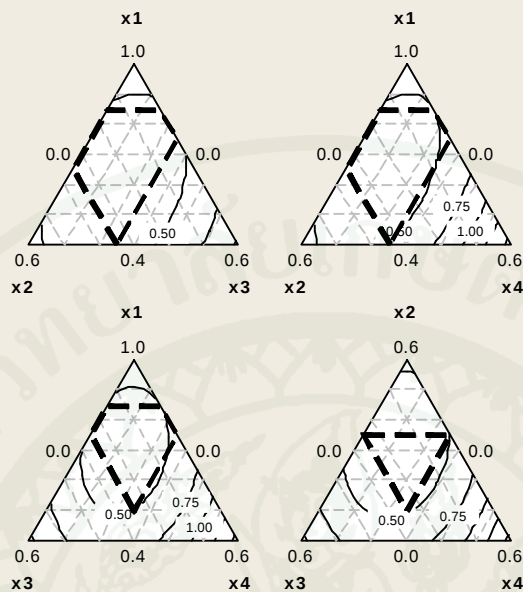
Analysis of Variance for y2 (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	24	0.135930	0.135930	0.005664	4.78	0.000
Component Only						
Linear	3	0.041588	0.043942	0.014647	12.36	0.000
Quadratic	1	0.011437	0.011437	0.011437	9.65	0.002
x2*x4	1	0.011437	0.011437	0.011437	9.65	0.002
Component* z1						
Linear	4	0.006833	0.019980	0.004995	4.22	0.003
x1*z1	1	0.003696	0.018708	0.018708	15.79	0.000
x2*z1	1	0.000329	0.014265	0.014265	12.04	0.001
x3*z1	1	0.000085	0.015333	0.015333	12.94	0.001
x4*z1	1	0.002723	0.017915	0.017915	15.12	0.000
Quadratic	3	0.015854	0.015854	0.005285	4.46	0.006
x1*x2*z1	1	0.000058	0.014496	0.014496	12.23	0.001
x1*x3*z1	1	0.000216	0.015228	0.015228	12.85	0.001
x2*x3*z1	1	0.015580	0.015580	0.015580	13.15	0.000
Component* z2						
Linear	2	0.020335	0.025529	0.012765	10.77	0.000
x2*z2	1	0.012432	0.007000	0.007000	5.91	0.017
x3*z2	1	0.007903	0.011512	0.011512	9.72	0.002
Quadratic	1	0.005393	0.005393	0.005393	4.55	0.035
x1*x4*z2	1	0.005393	0.005393	0.005393	4.55	0.035
Component* z1 * z2						
Linear	4	0.026220	0.014976	0.003744	3.16	0.017
x1*z1*z2	1	0.018414	0.007119	0.007119	6.01	0.016
x2*z1*z2	1	0.003634	0.004122	0.004122	3.48	0.065
x3*z1*z2	1	0.002846	0.005335	0.005335	4.50	0.036
x4*z1*z2	1	0.001326	0.004786	0.004786	4.04	0.047
Quadratic	6	0.008271	0.008271	0.001378	1.16	0.033
x1*x2*z1*z2	1	0.000344	0.004578	0.004578	3.86	0.052
x1*x3*z1*z2	1	0.000016	0.005605	0.005605	4.73	0.032
x1*x4*z1*z2	1	0.002614	0.005024	0.005024	4.24	0.042
x2*x3*z1*z2	1	0.000126	0.005134	0.005134	4.33	0.040
x2*x4*z1*z2	1	0.000057	0.004425	0.004425	3.73	0.056
x3*x4*z1*z2	1	0.005114	0.005114	0.005114	4.32	0.040
Residual Error	95	0.112563	0.112563	0.001185		
Lack-of-Fit	15	0.013888	0.013888	0.000926	0.75	0.726
Pure Error	80	0.098675	0.098675	0.001233		
Total	119	0.248494				





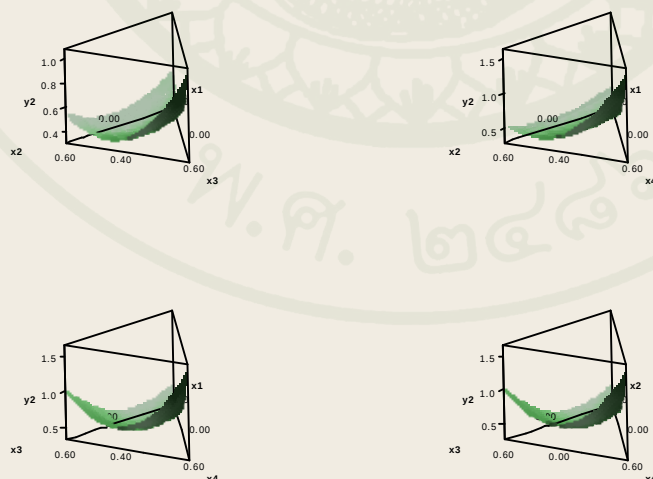
Matrix of Mixture Contour Plots for y_2 (component amounts)



Hold Values

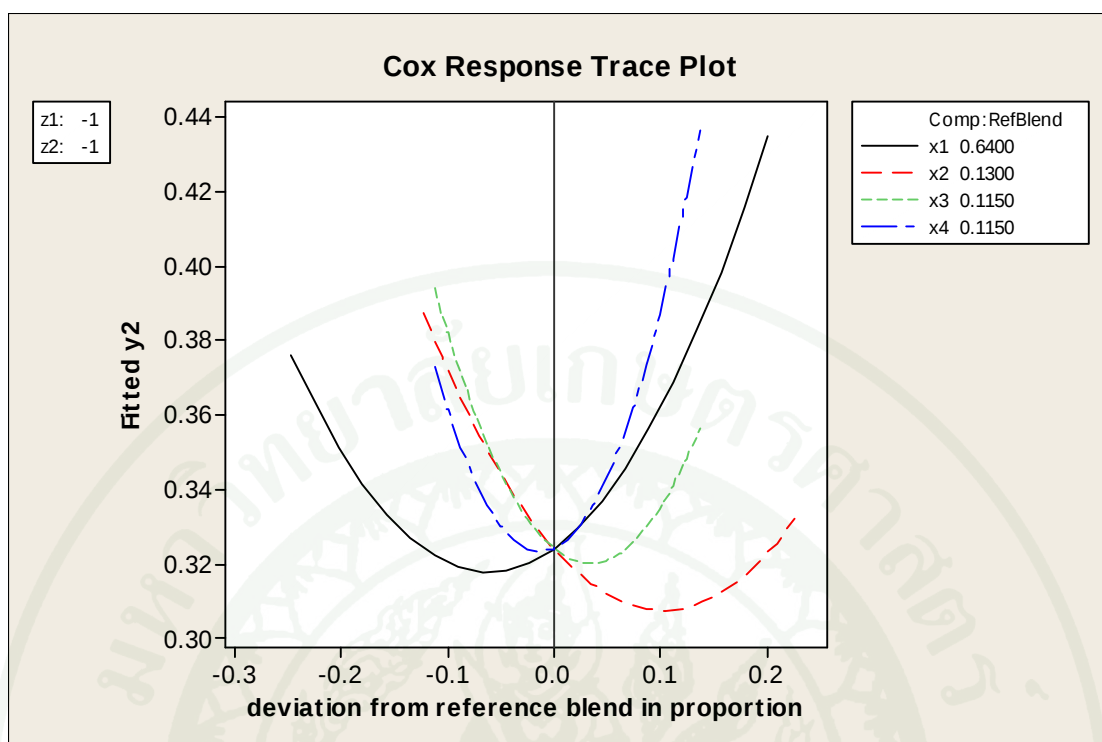
x1	0.4
x2	0
x3	0
x4	0
z1	-1
z2	-1

Mixture Surface Plots of y_2 (component amounts)



Hold Values

x1	0.4
x2	0
x3	0
x4	0
z1	-1
z2	-1



Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
y2	Minimum	0.38	0.38	0.61	1	1

Global Solution

Components

x1 = 0.585958
 x2 = 0.184325
 x3 = 0.121131
 x4 = 0.108586

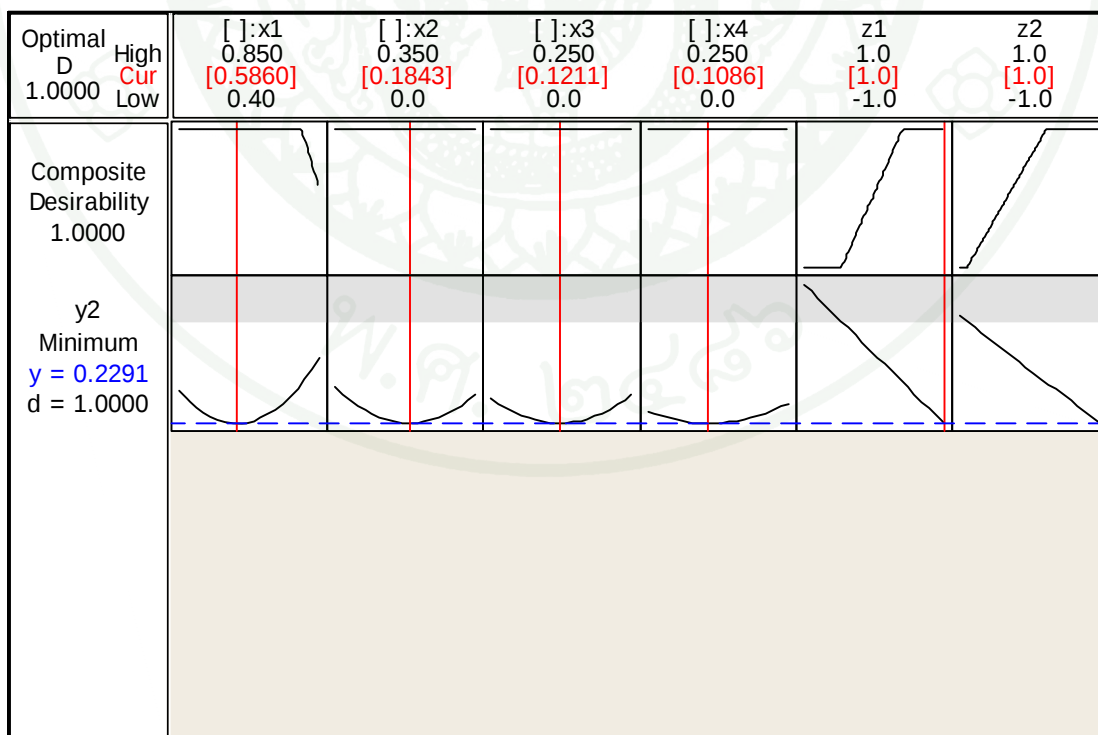
Process Variables

z1 = 1
 z2 = 1

Predicted Responses

y2 = 0.229067 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000



Simultaneous Multiple Response Optimizer for y_1 and y_2

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
y1	Maximum	67.58	83.63	83.63	1	1
y2	Minimum	0.38	0.38	0.61	1	1

Global Solution

Components

x1	=	0.540882
x2	=	0.229798
x3	=	0.137334
x4	=	0.0919858

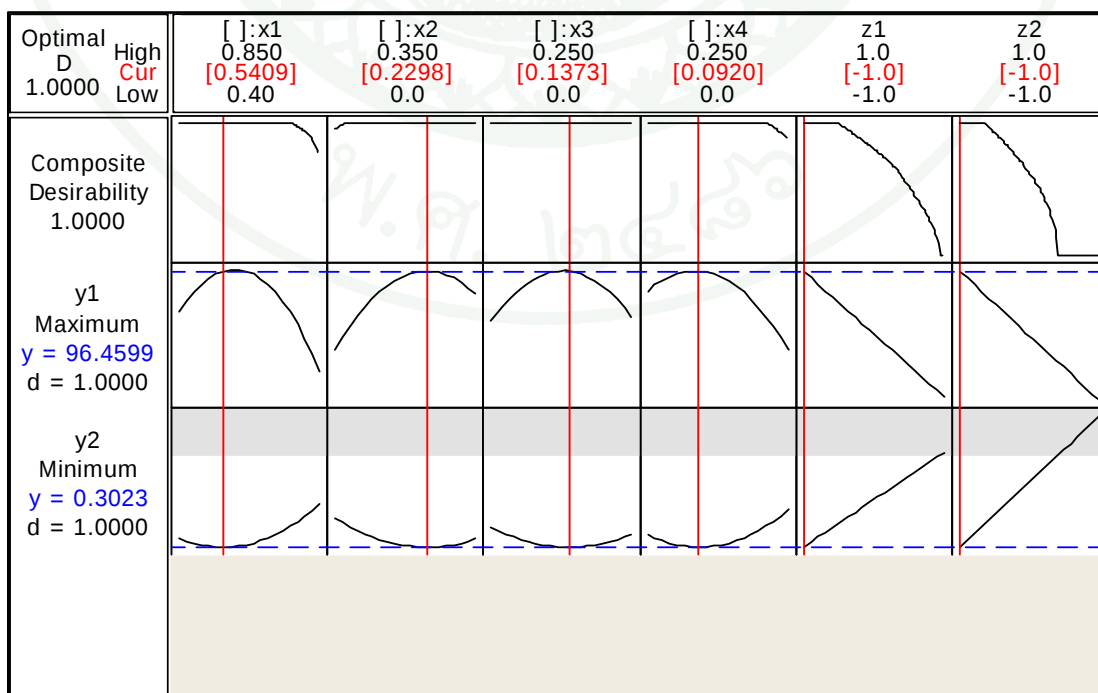
Process Variables

z1	=	-1
z2	=	-1

Predicted Responses

y1	=	96.4599	,	desirability	=	1.000000
y2	=	0.3023	,	desirability	=	1.000000

Composite Desirability = 1.000000



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายรัชชัย ขงเนตร

เกิดวันที่ 5 มิถุนายน 2511

สถานที่เกิด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

ตำแหน่งปัจจุบัน วิศวกรโลหการชำนาญการ (วิศวกรโลหการ 7วช.)

สถานที่ทำงานปัจจุบัน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนอุดหนุนจากสัญญาเกี่ยวกับอุตสาหกรรมแร่ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (พ.ศ. 2549-2551)