

เมื่อ

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

โดยที่  $Y$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $n \times 1$  ของค่าสังเกต ของตัวแปรตาม  $Y$

$X$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $n \times (p + 1)$  ของค่าสังเกตของตัวแปรอิสระ  $x_1, \dots, x_p$

$\beta$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $(p + 1) \times 1$  ของพารามิเตอร์  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$

$\varepsilon$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $n \times 1$  ของความคลาดเคลื่อน

$p$  เป็นจำนวนตัวแปรอิสระ และ  $n$  เป็นขนาดตัวอย่าง

การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเป็นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย  $\beta_j$  ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังสมการ

$$b = (X'X)^{-1}X'Y$$

ได้ค่าประมาณ  $b_j$  ซึ่งมีค่าความแปรปรวนต่ำที่สุด รูปแบบที่ได้เป็นดังนี้

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_{1i} + \dots + b_kX_{ki}$$

เมื่อ  $\hat{Y}_i$  เป็นค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของ  $Y_i$

$X_{ij}$  เป็นค่าสังเกตที่  $i$  ของตัวแปรอิสระที่  $j$

$b_j$  เป็นค่าประมาณของ  $\beta_j$

$i = 1, 2, \dots, n$

$j = 0, 1, 2, \dots, k$

### 6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

เมื่อมีตัวแปรอิสระหลายตัวในการวิเคราะห์การถดถอย สามารถทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ของการถดถอยพหุคูณ หรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและเซตของตัวแปรอิสระ โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \text{มีอย่างน้อยหนึ่ง } \beta_j \neq 0 \text{ โดยที่ } j = 1, 2, \dots, k$$

สถิติสำหรับทดสอบคือ

$$F = \text{MSR}/\text{MSE}$$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $F > F_{\alpha, k, n-k-1}$

ถ้ายอมรับ  $H_0$  หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม แต่ถ้าปฏิเสธ  $H_0$  หมายความว่ามีความสัมพันธ์อย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้ มีประโยชน์ต่อการพยากรณ์หรืออธิบายตัวแปรตาม

การทดสอบ F หรือ (F-test) จำเป็นต้องสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โคนคำนวณค่าผลบวกกำลังสองทั้งหมดของ Y (SST) ผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (SSR) และ ผลบวกกำลังสองเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน (SSE) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{SST} = \sum Y^2 - (\sum Y)^2/n \text{ หรือ } Y'Y - (\sum Y)^2/n$$

$$\text{SSR} = b'X'Y - (\sum Y)^2/n$$

$$SSE = Y'Y - b'X'Y$$

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SST มีค่าเท่ากับ  $n-1$  เพราะว่าสูญเสียความเป็นอิสระไป 1 เนื่องจาก  $\sum(Y_i - \bar{Y}) = 0$  เมื่อนำ df หาร SST จะได้กำลังสองเฉลี่ยทั้งหมด (Total Mean Square) เขียนแทนด้วย MST

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SSR มีค่าเท่ากับ  $k$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย เมื่อนำ  $k$  หาร SSR จะได้กำลังสองเฉลี่ยเนื่องจากสมการถดถอย (Mean Square Due to Regression) เขียนแทนด้วย MSR

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SSE มีค่าเท่ากับ  $n - k - 1$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด เมื่อนำ  $n - k - 1$  หาร SSE จะได้ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error) เขียนแทนด้วย MSE

นำค่าสถิติทั้งหมดที่คำนวณได้ใส่ไว้ในตาราง เรียกว่าตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance หรือ ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตาราง ANOVA สำหรับการถดถอยพหุคูณ

| แหล่งของความแปรผัน | ผลบวกกำลังสอง | องศาแห่งความเป็นอิสระ | กำลังสองเฉลี่ย      | F             |
|--------------------|---------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| การถดถอย           | SSR           | $k$                   | $MSR = SSR/k$       | $F = MSR/MSE$ |
| ความคลาดเคลื่อน    | SSE           | $n - k - 1$           | $MSE = SSE/(n-k-1)$ |               |
| รวม                | SST           | $n - 1$               |                     |               |

## 6.2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถดถอย

การทดสอบสัมประสิทธิ์  $\beta_j$  ของตัวแปรอิสระ  $X_j$  เป็นทดสอบที่จะช่วยตรวจสอบคุณค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่อยู่ในสมการถดถอย โดยการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ  $X_j$  มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ ที่เหลือมีค่าคงที่ หรือเป็นการยืนยันว่าการเพิ่มตัวแปรอิสระ  $X_j$  จะช่วยเพิ่มอำนาจให้กับสมการถดถอยหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

สถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$t = b_j / S_{b_j} = b_j / \sqrt{\text{MSE} \times C_{jj}}$$

เมื่อ  $C_{jj}$  คือสมาชิกที่  $j$  บนเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์  $(X'X)^{-1}$  โดยที่ การแจกแจง  $t$  มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ  $n - k - 1$

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & \dots & C_{0k} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1k} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ C_{k0} & C_{k1} & C_{k2} & \dots & C_{kk} \end{bmatrix}$$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $|t| > t_{\alpha/2, n-k-1}$  ถ้าปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่า  $X_j$  มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือการเปลี่ยนแปลงของ  $X_j$  มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม สมควรที่จะบรรจุ  $X_j$  ไว้ในสมการถดถอย

### 6.5 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

โดยปกติแล้วค่าที่ได้จากการสังเกตกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย จะไม่เท่ากัน แต่ก็ควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ถ้าหากค่าที่ได้จากการสังเกตเท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอยทั้งหมดแล้ว สมการถดถอยจะใช้พยากรณ์ค่าสังเกตได้เกือบ 100% นั่นคือค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ย่อมมีค่ามากกว่าค่าความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ และสัดส่วนค่าความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้กับความแปรปรวนทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ 1 ด้วยเหตุนี้จึงมีการวัดค่าอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนที่อธิบายได้กับความแปรปรวนทั้งหมด และเรียกอัตราส่วนนี้ว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเขียนแทนด้วย  $R^2$  คำนวณได้จาก

$$R^2 = SSR/SST$$

ค่า  $R^2$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า  $R^2$  ที่เท่ากับ 0 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง นั่นคือสมการถดถอยที่ประมาณได้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในทางกลับกัน ถ้าค่า  $R^2$  มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากตามไปด้วย กรณีที่จำนวนข้อมูลในตัวอย่างมีน้อย การพิจารณาค่า  $R^2$  อาจคลาดเคลื่อน เพราะค่า  $R^2$  มีค่าสูงเกินความเป็นจริง เพื่อขจัดปัญหานี้จึงมีการปรับค่า  $R^2$  เรียกว่า  $R^2$  ที่ปรับแล้ว (Adjusted  $R^2$ ) มีสูตรว่า

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \{SSE/(n-2)\}/\{SST/(n-1)\}$$

ความแตกต่างระหว่าง  $R^2$  และ Adjusted  $R^2$  คือ การหาร SST ด้วย  $n-1$  และ SSE ด้วย  $n-2$  เท่ากับเป็นการปรับ SST และ SSE ด้วยองศาแห่งความเป็นอิสระ เมื่อ  $n$  มีค่ามาก ค่า  $R^2$  ทั้งสองค่าจะใกล้เคียงกัน

## 6.6 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสม

Lawson and Erjavec (2001) กล่าวว่าแบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสมมีข้อแตกต่างไปจากแบบจำลองการถดถอยแบบทั่วไปอยู่บ้างเนื่องจากเป็นที่เข้าใจแล้วว่า ส่วนประกอบทุกอย่างเมื่อรวมกันแล้วมีสัดส่วนเท่ากับ 1 สมมติว่ามีส่วนประกอบอยู่ 3 อย่างที่จะนำมาผสมกัน ถ้ากำหนดให้  $X_1$  แทนสัดส่วนของส่วนประกอบที่  $i$  แล้ว จะได้ว่า  $X_1 + X_2 + X_3 = 1$  เมื่อทราบสัดส่วนของ  $X_1$  และ  $X_2$  ย่อมจะทราบสัดส่วนของ  $X_3$  ได้ทันทีจาก  $1 - X_1 - X_2$  ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าแท้จริงแล้วตัวแปรตอบสนองเป็นฟังก์ชันของ  $X_1$  และ  $X_2$  เท่านั้น สำหรับ  $X_3$  ที่ตัดออกไป ถูกเรียกว่าเป็นตัวแปรขาด (Slack Variable) จะถูกละเอาไว้ ไม่นำไปสู่การคำนวณสมการถดถอย ในทางปฏิบัติแล้วจะกำหนดให้ตัวแปรใดเป็นตัวแปรขาดก็ได้ การกำหนดให้มีตัวแปรขาดเท่ากับช่วยตัดปัญหาของการมีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งหลายที่อยู่ในรูปแบบการถดถอย ซึ่งเป็นข้อห้ามที่สำคัญของการวิเคราะห์การถดถอย ดังนั้นสมการถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสมจึงแตกต่างจากสมการถดถอยแบบทั่วไปคือ ตัวแปรอิสระในสมการจะขาดหายไปตัวหนึ่งดังเช่นสมการที่ปรากฏในตอนท้ายของหัวข้อที่ 5

สำหรับการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสม มีวิธีการเช่นเดียวกันกับการถดถอยแบบทั่วไปแต่มีข้อแตกต่างคือ สัมประสิทธิ์การถดถอยเฉพาะส่วนที่เป็นเชิงเส้นตรงนั้น ถ้ามีบางตัวที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบก็ไม่สามารถตัดออกจากสมการได้ Lawson and Erjavec (2001) กล่าวว่าเนื่องจากการดำเนินการคำนวณการจริง ส่วนผสมที่ไม่มีอิทธิพลนั้นอาจยังคงเป็นส่วนประกอบหนึ่งในส่วนผสมนั้นอยู่ไม่ได้หมายความว่า จะไม่ถูกใช้ เพียงแต่สามารถใช้ในปริมาณเท่าใดก็ได้ ที่เหลือจากการหักส่วนผสมอื่น ๆ ออกแล้ว

## 6.7 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย

เมื่อได้สมการถดถอยแล้วยังไม่สามารถมั่นใจได้ว่าสมการถดถอยนั้นมีรูปแบบเหมาะสมกับข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย ซึ่งนอกเหนือไปจากการตรวจสอบสมมติฐาน  $\epsilon_i \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ซึ่งตรวจสอบด้วยส่วนตกค้าง (Residual) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.1 แล้ว ยังมีการทดสอบความเหมาะสมของตัวแบบในวิธีอื่น ๆ อีก ดังนี้

### 6.7.1 การตรวจสอบข้อมูลผิดปกติ

ข้อมูลผิดปกติ (outlier) คือค่าสังเกตที่มีค่าน้อยหรือมากผิดปกติจากค่าสังเกตอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน สาเหตุของการเกิดข้อมูลผิดปกติบางครั้งอาจเกิดจากความผิดพลาดที่เป็นเหตุการณ์ที่อธิบายได้ เช่น วัดผิด หรือลรห้สผิด ควรตัดข้อมูลผิดปกติทิ้งเสีย เพราะเส้นถดถอยจะถูกดึงเข้าหาข้อมูลผิดปกติเพื่อทำให้ค่า SSE มีค่าน้อยที่สุด

การตรวจสอบข้อมูลที่มีความผิดปกติทำได้ด้วยการสังเกตแผนภาพการกระจาย หรือพล็อตส่วนตกค้างคู่กับ  $\hat{Y}$  จะช่วยให้เห็นข้อมูลผิดปกติซึ่งเป็นจุดที่อยู่ห่างจากการกระจายของส่วนตกค้างที่เหลือหรือใช้ค่า Studentized Residuals ในการระบุข้อมูลผิดปกติโดยการลบสังเกตด้วยค่าที่ประมาณจากสมการถดถอยแล้วหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนั้นค่า Studentized Residuals คำนวณได้จาก

$$r_i = e_i / (S\sqrt{1 - h_i})$$

เมื่อ  $e_i$  คือค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสังเกตที่ต่างไปจากค่าที่ประมาณได้จาก

สมการถดถอย  $h_i = (1/n) + \{(X_i - \bar{X})^2 / \sum (X_i - \bar{X})^2\}$  และ  $S = \sqrt{\text{MSE}}$  เรียกว่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า โดยค่าสังเกตที่มี Studentized residual มากกว่า 3 ถือว่าเป็นข้อมูลผิดปกติ

### 6.7.2 การตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล

ในการวิเคราะห์การถดถอย บางครั้งเกิดกรณีที่ค่าสังเกตหนึ่งหรือสองค่ามอิทธิพลต่อการประมาณสมการถดถอย ค่าสังเกตที่มีอิทธิพลของตัวอย่างอาจประเมินได้ด้วยค่าสถิติมาตรฐาน เรียกว่าค่า DFFITS (difference in the fitted value) คำนวณจากสูตร

$$\text{DFFITS} = \{\hat{Y}_i - \hat{Y}_{(-i)}\} / \{s_{(-i)} \sqrt{h_i}\}$$

$\hat{Y}_{(-i)}$  หมายถึงค่าประมาณ  $Y$  ที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่  $i$

$s_{(-i)}$  คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่  $i$

ถ้าค่าสัมบูรณ์ของ DFFITS ใหญ่กว่าได้ว่าค่าสังเกตที่  $i$  ของข้อมูลมีอิทธิพลต่อการประมาณสมการถดถอย วิรัชช (2545) กล่าวว่าเมื่อนักสถิติบางท่านแนะนำว่าค่าสังเกตที่มีค่าสัมบูรณ์ของ DFFITS มากกว่า  $2/\sqrt{p/n}$  เมื่อ  $p$  คือจำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอย จะถูกพิจารณาได้ว่าเป็นค่าสังเกตที่มีอิทธิพล และในบางครั้งค่าสังเกตที่มีอิทธิพลก็อาจเป็นค่าที่วัดมาอย่างถูกต้องแล้ว แต่ไม่สามารถอธิบายได้จึงไม่ควรตัดทิ้งทันที อาจเสนอผลการวิเคราะห์ทั้งสองแบบคือแบบหนึ่งมีค่าสังเกตนั้นอยู่และอีกแบบคือตัดค่าสังเกตนั้นออกแล้ว ถ้าสมการถดถอยไม่แตกต่างกันนักไม่จำเป็นต้องตัดทิ้งก็ได้ แต่ถ้าสมการถดถอยแตกต่างกันมากแล้วควรเลี่ยงไปใช้การแปลงข้อมูลเพื่อให้ได้การถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่แปลงแล้วแทน

### 6.7.3 การทดสอบ Lack of Fit

การทดสอบ Lack of Fit เป็นการทดสอบทางสถิติอย่างหนึ่ง เพื่อทดสอบว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีข้อกำหนดว่าจะต้องมีค่าสังเกตซ้ำอย่างน้อยที่ระดับหนึ่งของ  $X$  โดยการทดสอบจะแบ่งผลบวกกำลังสองของ residual ออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$SSE = SSPE + SSLF$$

เมื่อ SSPE คือผลบวกกำลังสองเนื่องมาจาก pure error อันเป็นความคลาดเคลื่อนจริงที่เกิดจากการทดลอง และ SSLF คือผลบวกกำลังสองเนื่องมาจาก lack of fit ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสร้างสมการถดถอยที่มีรูปแบบที่ไม่เหมาะสม โดยตั้งสมมติฐานว่า

$H_0$ : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$ : รูปแบบการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

สถิติสำหรับการทดสอบ

$$F_0 = \{SSLF/(m-2)\} / \{SSPE/(n-m)\} = MSLF/MSPE$$

ถ้า  $F_0 > F_{\alpha, n-m-k-1, m}$  จะปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นไม่เหมาะสมกับข้อมูล แต่ถ้า  $F_0$  ไม่มากกว่า  $F_{\alpha, m-2, n-m}$  แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA สำหรับการทดสอบ lack of fit ของฟังก์ชันถดถอยเชิงเส้น

| แหล่งของความแปรผัน | ผลบวกกำลังสอง | องศาแห่งความเป็นอิสระ | กำลังสองเฉลี่ย | F             |
|--------------------|---------------|-----------------------|----------------|---------------|
| การถดถอย           | SSR           | k                     | MSR            |               |
| ความคลาดเคลื่อน    | SSE           | n - k - 1             | MSE            |               |
| Lack of fit        | SSLF          | n - k - 1 - m         | MSLF           | F = MSLF/MSPE |
| Pure Error         | SSPE          | m                     | MSPE           |               |
| รวม                | SST           | n - 1                 |                |               |

## 7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

Muhannad Jumaa และคณะ (1997) ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมไปใช้พัฒนากรดไขมันเพื่อผสมกับยาในการผลิตยาชั้นอุตสาหกรรม โดยกรดไขมันจะช่วยทำให้ยาไม่ตกตะกอน

เมื่อรับประทานเข้าไป กรดไขมันนี้มีส่วนผสม 3 ชนิดคือน้ำมันคาสเตอร์ (Castor oil) กรดโอเลอิก และไตรกลีเซอไรด์ นอกจากนี้ยังได้ทดลองใช้กรดโอเลอิก โอลีเอสเทอร์ และโอเลอิกอัลทอสอลแทนกรดโอเลอิกด้วย โดยเกณฑ์การตัดสินคุณภาพของกรดไขมันนี้วัดที่ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ยาสามารถแตกตัวได้ ได้ข้อสรุปว่ากรดไขมันที่ช่วยให้ยาไม่ตกตะกอนและแตกตัวได้ดีคือกรดไขมันที่ได้จากการผสมกรดโอเลอิกและไตรกลีเซอไรด์ในสัดส่วนประมาณ 33% ต่อ 67% โดยปริมาตร

Dasa and Zheng (1999) ได้นำเอาทฤษฎีพื้นผิวผลตอบ ไปใช้เพื่อหาความน่าเชื่อถือของวัสดุโลหะชนิดแผ่น โดยขั้นแรกใช้ผลตอบแบบ First Order Effects ในการหาตำแหน่งชิ้นงานที่จะรับแรงได้น้อยที่สุดก่อน เมื่อเข้าใจตำแหน่งที่ต้องการจะหาให้พบแล้ว จากนั้นจึงนำ Second Order Effects ทดสอบหาแรงที่น้อยที่สุดซึ่งชิ้นงานสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก

สุรพล (2542) ใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมตึบ-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อัตโนมัติ และพบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเชื่อมคือ อุณหภูมิในช่วงของการอบความร้อน 105 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ 0.817 และความเร็วของสายพาน 108 เซนติเมตรต่อนาที จะสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องบนชิ้นงานจาก 20 จุดต่อแผ่น เหลือเพียง 3 จุดต่อแผ่น

ฤทัยภักดิ์ (2545) ได้นำเอาการวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์วุ้นเส้นสำเร็จรูปที่ผลิตจากแป้งที่ได้จากต้นพุทธรักษากินได้ เพื่อเป็นการค้นหาทางเลือกใหม่ให้กับผู้บริโภค พบว่าส่วนผสมของวุ้นเส้นจากต้นพุทธรักษากินได้ที่ให้รสชาติและคุณสมบัติเทียบเท่ากับวุ้นเส้นที่มาจากแป้งถั่วเขียวทั่วไปนั้นประกอบด้วย แป้งขาว 10% แป้งชนิดผง 90% ความชื้นของแป้งที่นวดผสม 61.7% และอุณหภูมิในการกินตัว 4 องศาเซลเซียส

เหรียญ (2545) ได้นำการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาใช้ทดลองเปรียบเทียบส่วนผสมของสารแพคคาร์บรูไรซิ่ง ที่ใช้ในการชุบเพื่ออบเพิ่มคุณสมบัติเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากสารแพคคาร์บรูไรซิ่งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องนำเข้า จึงทำการทดลองผสมเองโดยทดลองผสมขึ้น 6 สูตรแล้วนำไปใช้ชุบเหล็กในสภาวะที่ใช้งานจริง พบว่าส่วนผสมที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดและมีคุณภาพใกล้เคียงกับสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะประกอบไปด้วย ถ่านไม้ 70% ถ่านโค้ก 18% แบเรียมคาร์บอเนต 5% โซเดียมคาร์บอเนต 3% แคลเซียมคาร์บอเนต 2% และน้ำเหลืองน้ำตาล 2%

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. Toluene
2. Methyl Ethyl Ketone
3. Ethyl Acetate
4. Acetone
5. Isobutyl Alcohol
6. Isopropanol
7. Methanol
8. กระบอกฉีดยาขนาด 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
9. ปีกเกอร์ขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
10. ขวดรูปกรวยขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
11. ปีเปตขนาด 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
12. ปีเปตขนาด 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
13. กระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42
14. กระจกนาฬิกา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
15. สีฟนรยนต์แห้งเร็วไนโตรเซลลูโลสชั้นคุณภาพทางการค้า
16. คอมพิวเตอร์ PC
17. เครื่องพิมพ์
18. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางสถิติ Design Expert 7.0 Trial Version
19. เครื่องวัดความชื้น
20. เทอร์โมมิเตอร์
21. แผ่นเหล็กละมุนขนาด 70×150×1 มิลลิเมตร
22. กาฟนสี
23. ถังลม
24. คัตเตอร์ปลายแหลม
25. กระดาษกาวเซลโลเฟนขนาดหน้ากว้าง 24 มิลลิเมตร
26. นาฬิกาจับเวลา

## วิธีการ

### 1. การวางแผนการทดลอง

#### 1.1 ทำความเข้าใจปัญหา

จากการศึกษาและทำความเข้าใจในปัญหาของโรงงานผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห่งเร็วในโตรเซลลูโลสพบว่า โรงงานผลิตตัวทำละลายอย่างอื่นอีกหลากหลายชนิดที่ใช้สารเคมีในกลุ่มเดียวกันเป็นการผลิตตามสั่ง และมีการปรับเปลี่ยนสูตรใหม่ ๆ ที่ละเล็กละน้อยทุกครั้งที่มีการผลิต ตัวทำละลายบางชนิดมีชื่อทางการค้าต่างกันแต่ใช้ส่วนผสมอย่างเดียวกัน จึงมีหลายครั้งที่มีการร้องเรียนของลูกค้าในเรื่องคุณภาพไม่คงที่ แต่ส่วนมากเป็นลูกค้าประจำที่ต่อรองได้ ผู้ผลิตจึงไม่ได้สังเกตเห็นความสำคัญต่อความผิดพลาดเหล่านี้

#### 1.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง

สำหรับกรณีของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห่งเร็วในโตรเซลลูโลสมีส่วนผสมซึ่งล้วนแต่เป็นสารเคมีทั้งหมด 7 อย่างที่ผู้ผลิตเลือกนำมาใช้ ได้แก่ โทลูอิน (Toluene) เมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone) เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate) อะซิโตน (Acetone) ไอโซบิวทิลแอลกอฮอล์ (Isobutyl Alcohol) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Acetone) และเมทานอล (Methanol) ซึ่งต่อไปนี้จะใช้อักษรย่อว่า TOL , MEK , EA , ACT , IBA , IPA และ MET ตามลำดับ

#### 1.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)

ตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการทดลองจะเป็นตัววัดคุณภาพของทินเนอร์ด้วย มี 3 ตัวแปร คือ อัตราการทำละลายสีวัดหน่วยเป็นนาที่ อัตราการแห้งตัววัดหน่วยเป็นนาที่ ราคาหน่วยเป็นบาทต่อกิโลกรัม

#### 1.4 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง

เลือกการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป็นของผสมและมีของแข็งทั้งบนและล่าง โดยมีการกำหนดขอบเขตของแต่ละปัจจัยหรือส่วนประกอบในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรดังนี้

$$0 \leq \text{TOL} \leq 60$$

$$0 \leq \text{MEK} \leq 100$$

$$0 \leq \text{EA} \leq 100$$

$$0 \leq \text{ACT} \leq 100$$

$$0 \leq \text{IBA} \leq 10$$

$$0 \leq \text{IPA} \leq 10$$

$$0 \leq \text{MET} \leq 10$$

$$30 \leq \text{MEK} + \text{EA} + \text{ACT} \leq 100$$

$$0 \leq \text{IBA} + \text{IPA} + \text{MET} \leq 10$$

#### 1.5 ทำการทดลองผสมสูตรต่างๆที่กำหนดขึ้นเพื่อเก็บข้อมูล

ทำการทดลองเพื่อติดตามคุณภาพการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้ จะทำให้ผลการทดลองนี้ใช้ไม่ได้

#### 1.6 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ

นำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ โดยเครื่องมือที่ใช้คือการวิเคราะห์การถดถอย และหาค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

### 1.7 ติดตามผลและสรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปปฏิบัติ และเก็บข้อมูลเพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของพารามิเตอร์ เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองสามารถเชื่อถือได้ โดยใช้การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) จากนั้นจึงสรุปผลการทดลองและทำข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ตั้งค่าพารามิเตอร์ในการผลิตคราวต่อไป

### 2. สถานที่ทำการทดลอง

โรงงานผลิตหินเนอร์ เลขที่ 20/2 ซอยจัดสรร 1 ถนนเพชรเกษม 81 แขวงอ้อมน้อย เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯและบริษัทสีไทยจำกัด 12/1-5 ถนนปทุมสายใน อ.เมือง จ.ปทุมธานี

### 3. ระยะเวลาในการทดลอง

การทดลองครั้งนี้เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2549

## ผลและวิจารณ์

จากการเก็บข้อมูลที่ได้จากการผสมทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลล์ูโลส โดยใช้ส่วนผสมที่แตกต่างกันด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบ D-optimal โดยมีผลตอบทั้งหมดสามผลตอบได้แก่ ระยะเวลาในการทำละลายสีได้หมด หน่วยเป็นนาที ระยะเวลาในการแห้งแข็งหน่วยเป็นนาทีและราคาต้นทุนหน่วยเป็นบาทต่อกิโลกรัม ได้ผลดังตารางภาคผนวก ข.

### 1. ระยะเวลาในการทำละลายสี

#### 1.1 สมการถดถอยเพื่อทำนายระยะเวลาในการทำละลายสี

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยกำหนดให้โทลูอินเป็นตัวแปรขาด พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อระยะเวลาในการทำละลายสีได้ดีที่สุดคือรูปแบบเชิงเส้นตรง กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 5 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อระยะเวลาในการทำละลายสี

| Source of Variation | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F     | P        |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------|-------|----------|
| Model               | 138.93         | 6                 | 23.15       | 32.22 | < 0.0001 |
| MEK                 | 7.98           | 1                 | 7.98        | 11.10 | 0.0022   |
| EA                  | 4.50           | 1                 | 4.50        | 6.26  | 0.0178   |
| ACT                 | 21.87          | 1                 | 21.87       | 30.43 | < 0.0001 |
| IBA                 | 29.67          | 1                 | 29.67       | 41.29 | < 0.0001 |
| IPA                 | 26.47          | 1                 | 26.47       | 36.84 | < 0.0001 |
| MET                 | 0.74           | 1                 | 0.74        | 1.03  | 0.3173   |
| Residual            | 22.28          | 31                | 0.72        |       |          |
| Lack of Fit         | 20.05          | 26                | 0.77        | 1.73  | 0.2835   |
| Pure Error          | 2.23           | 5                 | 0.45        |       |          |
| Total               | 161.20         | 37                |             |       |          |

ด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่า p-value ของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความไม่สมรูปมีค่าเท่ากับ 0.2835 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ของการทดสอบความไม่สมรูปเนื่องจากความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลของข้อมูลได้ และพบว่าส่วนผสมทุกอย่างยกเว้นเมทานอล มีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการทำละลายของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วใน โตรเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำส่วนผสมทุกอย่างไปคำนวณสมการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เฉพาะส่วนที่เป็นเชิงเส้นตรงนั้นไม่สามารถตัดส่วนผสมที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบออกจากสมการได้ เนื่องจากแม้ว่าเมทานอลจะไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำละลาย แต่ไม่ได้หมายความว่าจะไม่ใส่เมทานอลลงในส่วนผสม หากแต่ว่าสามารถใส่ในปริมาณเท่าใดก็ได้ ที่เหลือจากการหักส่วนผสมอื่น ๆ ออกแล้ว

ต่อไปจึงสร้างสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ สำหรับกรณีของการออกแบบการทดลองแบบผสม ไม่ว่าส่วนผสมใดจะมีอิทธิพลต่อผลตอบหรือไม่ก็ตามในทอมที่เป็นรูปแบบเชิงเส้นตรงแล้วยังต้องใส่พจน์ของส่วนผสมนั้นไว้ในสมการ

**ตารางที่ 6** แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนผสมต่าง ๆ ในสมการถดถอยเพื่อทำนายระยะเวลาในการทำละลายสี

| Component | Coefficient | DF | Standard Error | 95% CI |        |
|-----------|-------------|----|----------------|--------|--------|
|           | Estimate    |    |                | Low    | High   |
| Intercept | 10.80       | 1  | 0.57           | 9.64   | 11.95  |
| MEK       | -2.06       | 1  | 0.62           | -3.33  | -0.80  |
| EA        | -1.60       | 1  | 0.64           | -2.90  | -0.30  |
| ACT       | -3.57       | 1  | 0.65           | -4.90  | -2.25  |
| IBA       | 27.95       | 1  | 4.35           | 19.08  | 36.82  |
| IPA       | -26.35      | 1  | 4.34           | -35.21 | -17.50 |
| MET       | 4.32        | 1  | 4.25           | -4.35  | 12.98  |

จะเห็นว่ามีส่วนผสมครบหมดทุกอย่างยกเว้น โทลูอินที่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรขาด และจะไม่นำมาร่วมสร้างสมการถดถอยตั้งแต่แรก ดังนั้นสมการที่ใช้ทำนายระยะเวลาในการทำละลายสีเมื่อ B, C, D, E, F และ G หมายถึง MEK, EA, ACT, IBA, IPA และ MET ตามลำดับคือ

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาในการทำละลาย} &= 10.7966 - 0.0206 B - 0.016 C - 0.0357 D \\ &+ 0.2795 E - 0.2636 F + 0.0432 G \end{aligned}$$

สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 83.51% และสามารถนำไปใช้ทำนายระยะเวลาในการทำละลายได้ด้วยความแม่นยำ 79.40 %

## 1.2 ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

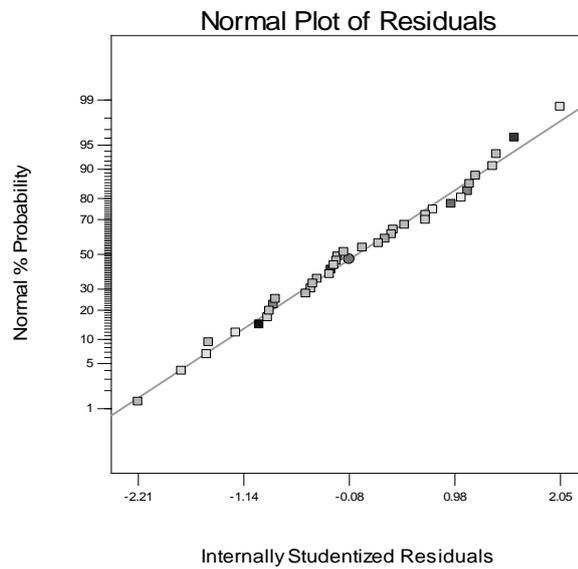
ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริงต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองเสียก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าสมการถดถอยที่สร้างได้นี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ความคลาดเคลื่อนนี้หมายถึงความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงที่เก็บมาได้ด้วยค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย ซึ่งถ้าสมการถดถอยที่สร้างได้นี้ถูกต้องแล้วความคลาดเคลื่อนต้องไม่มีรูปแบบใดๆ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งออกไปตามสมมติฐานต่างๆดังนี้

### 1.2.1 สมมติฐานของข้อมูลมีแจกแจงแบบปกติ

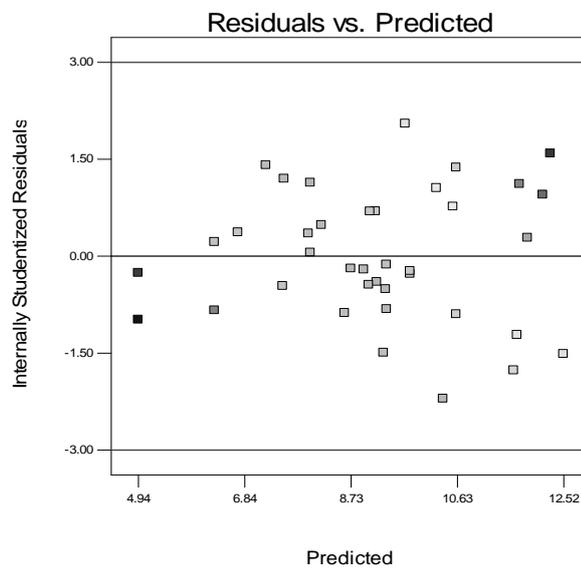
สมมูลกับ ความคลาดเคลื่อน (error term,  $\epsilon_i$ ) ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 6 จุดที่เขียนบนกระดาษกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวบนแนวเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

### 1.2.2 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวน เท่ากับค่าคงที่  $[V(\epsilon_i) = \sigma^2]$  ถ้าหากแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นก็ไม่ควรจะมีรูปแบบใดๆทั้งสิ้น ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอยดังภาพที่ 7 เมื่อค่า Internally Studentized Residual ในที่นี้หมายถึงค่า Studentized Residual



ภาพที่ 6 Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาการทำละลาย

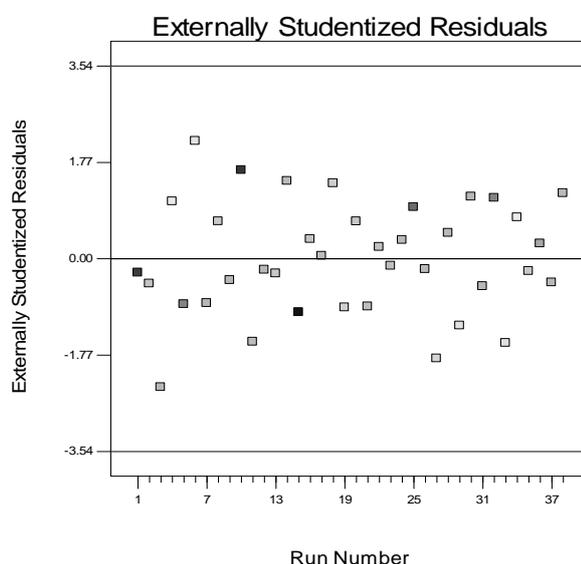


ภาพที่ 7 กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้

จากภาพที่ 7 ลักษณะของจุดมีการกระจายที่ไม่มีรูปแบบ(pattern) กล่าวคือ ไม่มีลักษณะของการเกิดแนวโน้มหรือเป็นเส้นโค้งแต่อย่างใด ระยะห่างของจุดจากเส้นแกนกลางทั้งด้านบนและล่างโดยเฉลี่ยแล้วพอกัน แม้ว่าจะดูไม่ค่อยสม่ำเสมอนัก เป็นเพราะว่าข้อมูลมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่

### 1.2.3 สมมติฐานของความเป็นอิสระ

ภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนในที่นี้จะใช้ Externally Studentized Residual ซึ่งหมายถึงค่า Studentized Residual ที่ใช้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่  $i$  กับลำดับของการเก็บข้อมูล ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 8 เมื่อค่าสรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับและเวลาที่เก็บข้อมูล



ภาพที่ 8 กราฟของความผิดพลาดกับลำดับของการเก็บข้อมูล

จากการทดสอบสมมติฐานทั้งสามนี้ สามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้นี้พอเพียงแล้วที่จะนำไปใช้ทำนายระยะเวลาในการทำละลาย ซึ่งมิมีประโยชน์ในกรณีนี้อาจมีการ

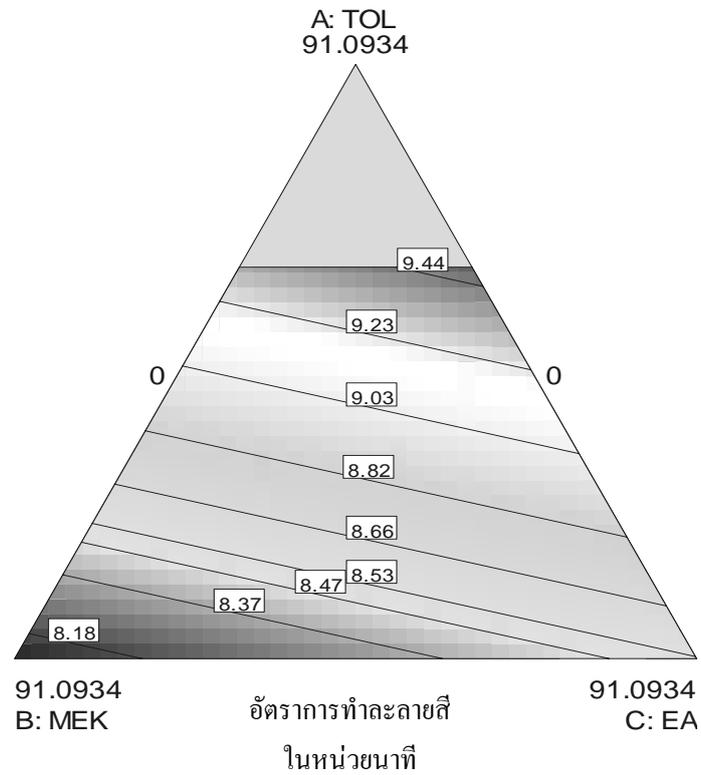
ปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงราคาต้นทุนหรือเปลี่ยนแปลงแหล่งที่ซื้อวัตถุดิบ

### 1.3 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของระยะเวลาในการทำละลายสี

สมการถดถอยมีประโยชน์เพื่อใช้ในการทำนายผลตอบ แต่การจะได้ระดับผลตอบที่ดีที่สุดนั้นในกรณีของระยะเวลาในการทำละลายสีควรจะเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ถ้าสมการถดถอยไม่มีเทอมของอันตรกิริยา(interaction) การหาระดับของแต่ละส่วนผสมที่จะให้ค่าผลตอบต่ำที่สุดนั้นสามารถทำได้ด้วยการนำสมการถดถอยไปหาอนุพันธ์ แต่ถ้ามีเทอมอันตรกิริยาแล้ว การหาอนุพันธ์ไม่สามารถตอบได้ว่าเทอมที่มีอันตรกิริยานั้นมีปริมาณส่วนผสมแต่ละตัวอยู่อย่างละเท่าไรแน่ การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ดี สะดวกรวดเร็ว

ในกรณีของระยะเวลาในการทำละลายสี โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ประมวลผลพื้นผิวผลตอบบริเวณที่มีค่าระยะเวลาในการทำละลายสีต่ำกว่าขอบเขตที่ลูกค้ายอมรับได้(10 นาที)และมีราคาต้นทุนค่อนข้างต่ำแสดงดังภาพที่ 9 เมื่ออ่านกราฟพื้นผิวผลตอบแล้วบริเวณที่มีระดับของ TOL และ EA อย่างละประมาณ 2% มี MEK ประมาณ 87% และมีระดับของ ACT 1.35% , IBA 0.25% , IPA 3.65% และ MET 3.75% ให้ค่าระยะเวลาในการทำละลาย 8.18 นาที

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าส่วนผสมตามหมายเลข 1 ถึง 3 เป็นส่วนผสมที่สามารถทำละลายสีได้ดีมากแต่มีราคาต้นทุนสูงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนในการผลิตปัจจุบัน (41 บาทต่อกิโลกรัม) ส่วนผสมหมายเลข 4 ถึง 6 เป็นส่วนผสมที่ละลายสีได้เร็วกว่าขอบเขตที่ลูกค้ายอมรับได้ (10 นาที) แต่ก็ยังมีต้นทุนแพงอยู่ ดังนั้นการค้นหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดนอกจากพิจารณาที่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีมากกว่าหนึ่งอย่างแล้ว ยังต้องพิจารณาต้นทุนที่ผู้ประกอบการยอมรับได้ซึ่งส่วนมากจะหมายถึงต้นทุนต่ำสุดอีกด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงการพิจารณาคุณสมบัติของการแห้งตัวและราคาต้นทุนในส่วนต่อไป



ภาพที่ 9 แสดงพื้นผิวผลตอบแทนแบบสองมิติของความสามารถในการทำละลายในหน่วยนาที่

ตารางที่ 7 ระดับของส่วนผสมที่ให้ค่าระยะเวลาในการทำละลายต่ำที่ราคาต้นทุนต่างๆ

| ลำดับ | TOL    | MEK    | EA     | ACT    | IBA   | IPA    | MET   | Sol.rate<br>(min) | COST/k<br>g |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------------------|-------------|
| 1     | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 90.000 | 0.000 | 10.000 | 0.000 | 4.94              | 56.05       |
| 2     | 0.000  | 8.497  | 0.000  | 81.503 | 0.000 | 10.000 | 0.000 | 5.07              | 55.75       |
| 3     | 19.378 | 0.000  | 0.000  | 70.643 | 0.000 | 9.979  | 0.000 | 5.64              | 53.38       |
| 4     | 0.000  | 90.909 | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 9.091  | 0.000 | 6.52              | 52.41       |
| 5     | 12.448 | 0.000  | 33.177 | 51.109 | 0.000 | 3.266  | 0.000 | 7.58              | 59.99       |
| 6     | 1.977  | 4.720  | 6.204  | 78.584 | 3.395 | 0.374  | 4.746 | 8.85              | 54.92       |

## 2 ระยะเวลาในการแห้งตัวของสี

### 2.1 สมการถดถอยเพื่อทำนายระยะเวลาในการแห้งตัว

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยกำหนดให้ TOL เป็นตัวแปรขาด พบว่ารูปแบบที่อธิบายผลการทดลอง เพื่อศึกษาระยะเวลาในการแห้งตัวได้ดีที่สุดคือแบบ Quadratic กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 8 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ เมื่อ B, C, D, E, F และ G หมายถึง MEK, EA, ACT, IBA, IPA และ MET ตามลำดับ

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อระยะเวลาในการแห้งตัว

| Source of Variation | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F      | P        |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------|--------|----------|
| Model               | 691.88         | 27                | 25.63       | 21.99  | < 0.0001 |
| B                   | 0.083          | 1                 | 0.083       | 0.071  | 0.7954   |
| C                   | 0.14           | 1                 | 0.14        | 0.12   | 0.7398   |
| D                   | 0.055          | 1                 | 0.055       | 0.047  | 0.8330   |
| E                   | 0.0001         | 1                 | 0.0001      | 0.0001 | 0.9921   |
| F                   | 1.09           | 1                 | 1.09        | 0.93   | 0.3569   |
| G                   | 0.27           | 1                 | 0.27        | 0.23   | 0.6406   |
| BC                  | 0.080          | 1                 | 0.080       | 0.068  | 0.7990   |
| BD                  | 0.071          | 1                 | 0.071       | 0.061  | 0.8094   |
| BE                  | 1.31           | 1                 | 1.31        | 1.12   | 0.3141   |
| BF                  | 1.97           | 1                 | 1.97        | 1.69   | 0.2223   |
| BG                  | 0.23           | 1                 | 0.23        | 0.20   | 0.6679   |
| CD                  | 0.012          | 1                 | 0.012       | 0.011  | 0.9196   |
| CE                  | 3.93           | 1                 | 3.93        | 3.37   | 0.0962   |
| CF                  | 1.56           | 1                 | 1.56        | 1.34   | 0.2735   |
| CG                  | 0.030          | 1                 | 0.030       | 0.026  | 0.8758   |
| DE                  | 3.88           | 1                 | 3.88        | 3.33   | 0.0978   |
| DF                  | 0.95           | 1                 | 0.95        | 0.81   | 0.3886   |
| DG                  | 0.011          | 1                 | 0.011       | 0.009  | 0.9244   |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| Source of Variation | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F     | P      |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------|-------|--------|
| EF                  | 15.12          | 1                 | 15.12       | 12.98 | 0.0048 |
| EG                  | 18.30          | 1                 | 18.30       | 15.71 | 0.0027 |
| FG                  | 0.37           | 1                 | 0.37        | 0.31  | 0.5872 |
| B <sup>2</sup>      | 2.60           | 1                 | 2.60        | 2.23  | 0.1664 |
| C <sup>2</sup>      | 0.19           | 1                 | 0.19        | 0.16  | 0.6946 |
| D <sup>2</sup>      | 0.020          | 1                 | 0.020       | 0.018 | 0.8971 |
| E <sup>2</sup>      | 0.016          | 1                 | 0.016       | 0.014 | 0.9095 |
| F <sup>2</sup>      | 2.47           | 1                 | 2.47        | 2.12  | 0.1761 |
| F <sup>2</sup>      | 0.042          | 1                 | 0.042       | 0.036 | 0.8536 |
| G <sup>2</sup>      | 11.65          | 10                | 1.17        |       |        |
| Residual            | 1.31           | 5                 | 0.26        |       |        |
| Lack of Fit         | 10.34          | 5                 | 2.07        |       | 0.9796 |
| Pure Error          | 703.53         | 37                |             |       |        |
| Cor Total           |                |                   |             |       |        |

ในทำนองเดียวกันกับการละลาย ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตามไม่สามารถตัดส่วนผสมใดๆที่อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นตรงออกจากสมการได้ มีผลที่เกิดร่วมกันของ EF (IBAและIPA) และ EG (IPAและMET) เท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการแห้งตัวของสีอย่างมีนัยสำคัญ ค่า p-value ของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความไม่สมรูปมีค่าเท่ากับ 0.9796 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบความไม่สมรูปเนื่องจากความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลของข้อมูลได้ ต่อไปจึงสร้างสมการถดถอยด้วยได้ผลดังตารางที่ 9 เมื่อ B, C, D, E, F และ G หมายถึง MEK, EA, ACT, IBA, IPA และ MET ตามลำดับและพิจารณาสมการถดถอยในทำนองเดียวกันกับระยะเวลาในการทำละลายสี

ตารางที่ 9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนผสมต่างๆในสมการถดถอยเพื่อทำนายระยะเวลาในการแห้งตัวของสี

| Component      | Coefficient | DF | Standard Error | 95% CI  |         |
|----------------|-------------|----|----------------|---------|---------|
|                | Estimate    |    |                | Low     | High    |
| Intercept      | 5.74        | 1  | 0.83           | 4.05    | 7.44    |
| B              | 2.57        | 1  | 2.42           | -2.39   | 7.52    |
| C              | 3.51        | 1  | 0.86           | 1.75    | 5.28    |
| D              | -1.23       | 1  | 0.91           | -3.10   | 0.63    |
| E              | 48.78       | 1  | 6.73           | 34.98   | 62.58   |
| F              | 47.10       | 1  | 5.54           | 35.73   | 58.47   |
| G              | 12.30       | 1  | 5.40           | 1.23    | 23.37   |
| BE             | -25.94      | 1  | 13.80          | -54.25  | 2.37    |
| EF             | 1553.92     | 1  | 355.31         | 824.89  | 2282.95 |
| EG             | 3230.27     | 1  | 455.92         | 2294.80 | 4165.75 |
| B <sup>2</sup> | 7.30        | 1  | 2.20           | 2.78    | 11.81   |

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาในการแห้งตัวของสี} = & 5.7437 + 0.0257 \text{ MEK} + 0.0351 \text{ EA} - 0.0123 \text{ ACT} \\ & + 0.4878 \text{ IBA} + 0.4710 \text{ IPA} + 0.1230 \text{ MET} \\ & - 0.0025 \text{ MEK IBA} + 0.1554 \text{ IBA IPA} \\ & + 0.3230 \text{ IBA MET} + 0.0007 \text{ MEK}^2 \end{aligned}$$

สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 94.21% และสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการทำละลายสีได้ด้วยความแม่นยำ 88.89 %

## 2.2 ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

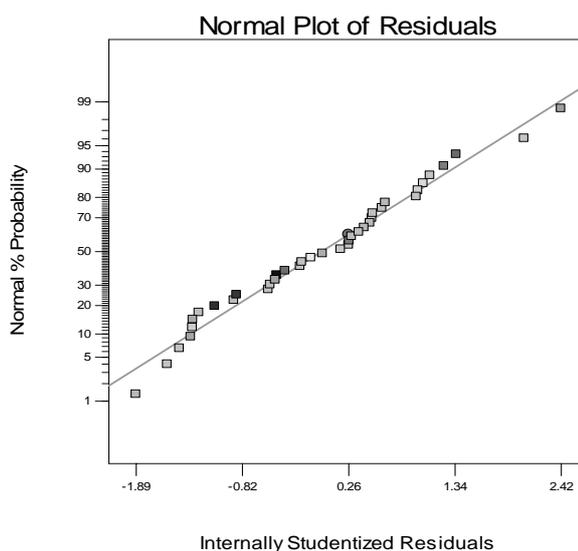
ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริงต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองเสียก่อน เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบสมการถดถอยของระยะเวลาในการทำละลายสีในหัวข้อที่แล้ว

### 2.1.1 สมมติฐานของข้อมูลมีแจกแจงแบบปกติ

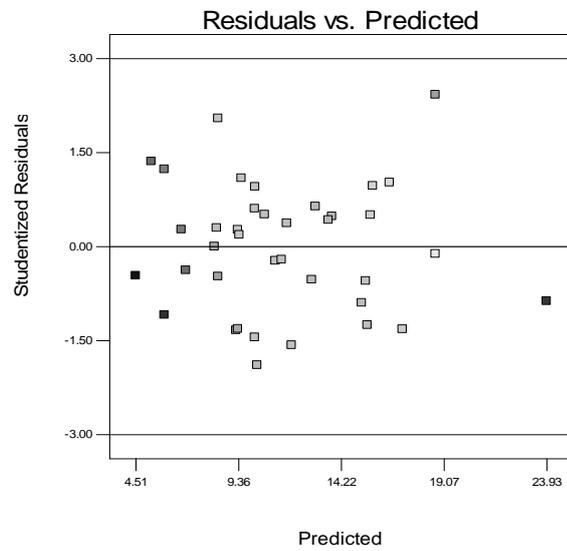
สมมุติว่า ความคลาดเคลื่อน (error term,  $\epsilon_i$ ) ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังภาพที่ 10 เมื่อพิจารณาจากภาพแล้วจุดที่เขียนบนกระดาษกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวเกือบจะเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

### 2.1.2 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

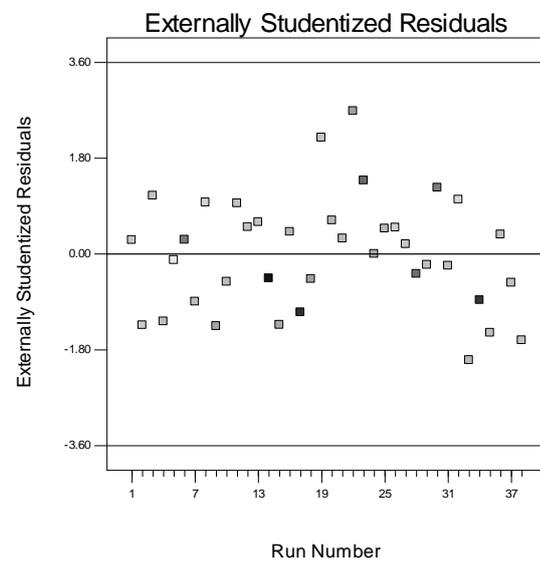
ในการทำงานเดียวกันกับสมการถดถอยที่ใช้ทำนายระยะเวลาในการทำละลาย จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอยการถดถอยที่สร้างขึ้น สำหรับระยะเวลาในการแห้งตัวดังภาพที่ 11 พบว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เนื่องจาก ลักษณะของจุดไม่มีการเกิดแนวโน้มหรือเป็นเส้นโค้ง ระยะห่างของจุดจากเส้นแกนกลาง ทั้งด้านบนและล่างโดยเฉลี่ยแล้วพอกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 10 Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาการทำละลาย



ภาพที่ 11 กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้

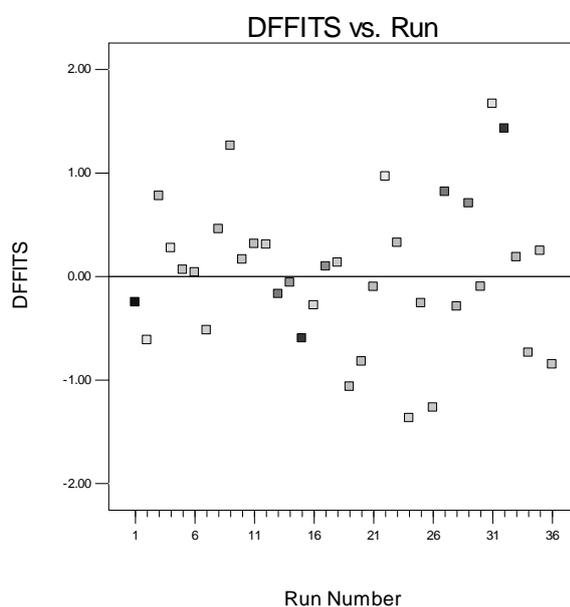


ภาพที่ 12 กราฟของความผิดพลาดกับลำดับของการเก็บข้อมูล

### 2.2.3 สมมติฐานของความเป็นอิสระ

ภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูลดังภาพที่ 12 ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ดูคล้ายเส้นโค้ง หากนำสมการถดถอยที่ได้ไปใช้ก็อาจเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากขัดแย้งกับสมมติฐานว่าความคลาดเคลื่อนแต่ละค่าต้องมีความเป็นอิสระจากกัน

ทางแก้ไขคือต้องหาให้พบว่าข้อมูลตัวใดเป็นค่าที่มีอิทธิพล โดยการพล็อตค่า DFFIT กับลำดับของการทดลอง นักสถิติบางท่านแนะนำว่าค่าสังเกตที่มีค่าสัมบูรณ์ของ DFFITS มากกว่า  $2/\sqrt{p/n}$  เมื่อ  $p$  คือจำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอยในที่นี้มีค่าเท่ากับ 7 และ  $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดในที่นี้มีค่าเท่ากับ 38 จะถูกพิจารณาได้ว่าเป็นค่าสังเกตที่มีอิทธิพล ดังนั้นค่า DFFIT จึงต้องไม่เกิน 4.66 ดังภาพที่ 13 พบว่าไม่มีการทดลองใดเป็นค่าที่มีอิทธิพล

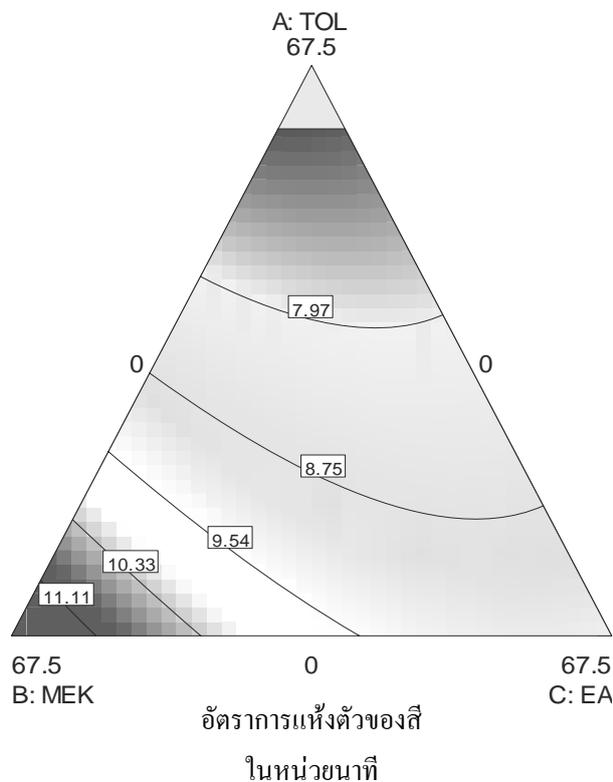


ภาพที่ 13 กราฟของค่า DFFIT กับลำดับของการเก็บข้อมูลที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีค่าที่มีอิทธิพล

### 2.3 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของระยะเวลาในการแห้งตัวของสี

ในกรณีของระยะเวลาในการแห้งตัวของสีควรจะเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงเมื่อนำทินเนอร์ไปใช้งานแล้วต้องทำให้สีแห้งเร็วด้วย เนื่องจากพนักงานพ่นจะต้องพ่นซ้ำเป็นจำนวนสามครั้ง และการพ่นซ้ำโดยที่สีครั้งก่อนยังไม่แห้งตัวดี มักจะทำให้เกิดรอยคลื่นไม่เรียบ

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ประมวลผลพื้นผิวผลตอบบริเวณที่มีค่าระยะเวลาในการแห้งตัวของสีต่ำกว่าขอบเขตที่ลูกค้ายอมรับได้(10 นาที) แสดงดังภาพที่ 18 เมื่ออ่านกราฟพื้นผิวผลตอบแล้วบริเวณที่มีระดับของ TOL ประมาณ 60% MEK และ EA อย่างละประมาณ 5.0% และมีระดับของ ACT 25.0%, IBA 0.00%, IPA และ MET อย่างละ 2.5% ให้ค่าระยะเวลาในการทำละลาย 8 นาที



ภาพที่ 14 แสดงพื้นผิวผลตอบแบบสองมิติของความสามารถในการทำละลายในหน่วยนาที

จากตารางที่ 11 จะเห็นว่าทุกส่วนผสมที่โปรแกรมคำนวณให้ สามารถทำละลายได้ดี แต่มีราคาต้นทุนสูงเมื่อเทียบกับต้นทุนในการผลิตปัจจุบัน (41 บาทต่อกิโลกรัม) ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์นอกจากต้องละลายได้ดี แห้งเร็วแล้วควรมีต้นทุนต่ำๆ ด้วย ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ต้นทุนในส่วนต่อไป

ตารางที่ 10 ระดับของส่วนผสมที่ให้ค่าระยะเวลาในการแห้งตัวต่ำที่ราคาต้นทุนต่าง ๆ

| No. | TOL    | MEK   | EA     | ACT    | IBA   | IPA   | MET   | Sol.rate<br>(min) | COST<br>/kg |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------------------|-------------|
| 1   | 0.000  | 0.000 | 0.000  | 100.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.51              | 55.00       |
| 2   | 4.978  | 0.000 | 0.000  | 95.022 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.57              | 54.33       |
| 3   | 37.500 | 0.000 | 0.000  | 62.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 5.00              | 49.87       |
| 4   | 32.693 | 0.000 | 0.000  | 67.097 | 0.039 | 0.171 | 0.000 | 5.04              | 50.56       |
| 5   | 0.031  | 9.301 | 17.708 | 65.460 | 2.000 | 3.412 | 2.088 | 9.66              | 58.11       |

### 3. ราคาต้นทุน

#### 3.1 สมการถดถอยเพื่อทำนายราคาต้นทุน

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยกำหนดให้โทลูอินเป็นตัวแปรขาด พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อราคาต้นทุนที่สุดคือรูปแบบเชิงเส้นตรง กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 12 และสรุปผลการทดลองได้ว่าส่วนผสมทุกอย่าง มีอิทธิพลต่อราคาต้นทุนในการผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วใน โตรเซลลูโลส ค่า p-value ของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากราคาต้นทุนคำนวณมาจากราคาของแต่ละส่วนผสมที่มีค่าคงที่ ดังนั้นการทดลองที่มีส่วนผสมเดียวกัน จึงมีราคาต้นทุนที่เท่ากันเสมอจึงไม่ต้องทดสอบความไม่สมบูรณ์เนื่องจากความผิดพลาดในการเก็บข้อมูล สำหรับสมการที่ใช้ทำนายราคาต้นทุนของทินเนอร์เมื่อวิเคราะห์จากตารางที่ 13 มีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ราคาต้นทุน (บาทต่อกิโลกรัม)} = & 40.6165 + 0.1035 \text{ MEK} + 0.3508 \text{ EA} + 0.1440 \text{ ACT} \\ & + 0.3318 \text{ IBA} + 0.2581 \text{ IPA} - 0.1710 \text{ MET} \end{aligned}$$

สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 99.93% และสามารถนำไปใช้ทำนายราคา  
ต้นทุน ได้ด้วยความแม่นยำ 99.92%

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อราคาค้นทุน

| Source of Variation | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F        | P        |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------|----------|----------|
| Model               | 3031.50        | 6                 | 505.25      | 9194.97  | < 0.0001 |
| MEK                 | 200.65         | 1                 | 200.65      | 3651.59  | < 0.0001 |
| EA                  | 2161.72        | 1                 | 2161.72     | 39340.77 | < 0.0001 |
| ACT                 | 354.23         | 1                 | 354.23      | 6446.63  | < 0.0001 |
| IBA                 | 41.80          | 1                 | 41.80       | 760.69   | < 0.0001 |
| IPA                 | 25.39          | 1                 | 25.39       | 461.98   | < 0.0001 |
| MET                 | 11.64          | 1                 | 11.64       | 211.88   | < 0.0001 |
| Residual            | 1.70           | 31                | 0.055       |          |          |
| Lack of Fit         | 1.70           | 26                | 0.066       |          |          |
| Pure Error          | 0.000          | 5                 | 0.000       |          |          |
| Total               | 3033.21        | 37                |             |          |          |

ตารางที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนผสมต่างๆในสมการถดถอยเพื่อทำนายราคาค้นทุน  
(บาท/kg.)

| Component | Coefficient | DF | Standard Error | 95% CI |        |
|-----------|-------------|----|----------------|--------|--------|
|           | Estimate    |    |                | Low    | High   |
| Intercept | 40.62       | 1  | 0.16           | 40.30  | 40.94  |
| MEK       | 10.35       | 1  | 0.17           | 10.00  | 10.70  |
| EA        | 35.07       | 1  | 0.18           | 34.71  | 35.44  |
| ACT       | 14.39       | 1  | 0.18           | 14.02  | 14.75  |
| IBA       | 33.18       | 1  | 1.20           | 30.72  | 35.63  |
| IPA       | 25.81       | 1  | 1.20           | 23.36  | 28.26  |
| MET       | -17.10      | 1  | 1.17           | -19.50 | -14.70 |

### 3.2 ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

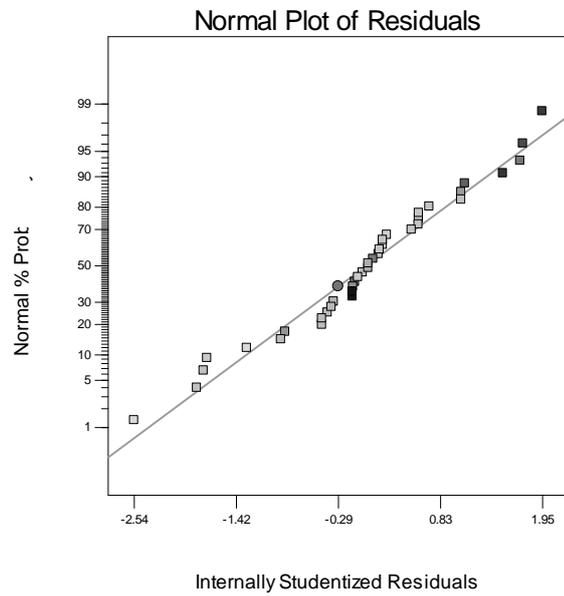
เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบสมการถดถอยของระยะเวลาในการทำละลายและการแห้งตัวในหัวข้อที่แล้ว ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริงต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองเสียก่อน

#### 3.2.1 สมมติฐานของข้อมูลมีแจกแจงแบบปกติ

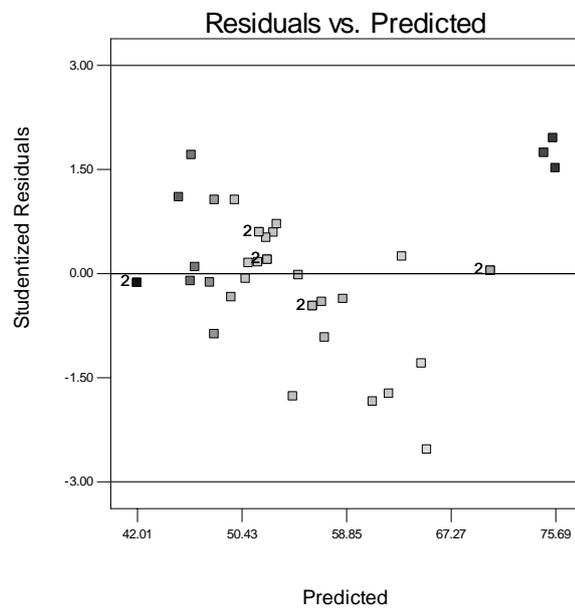
สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาจากภาพแล้วจุดที่เขียนบนกระดาษกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

#### 3.2.2 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย การถดถอยที่สร้างขึ้นสำหรับทำนายราคาต้นทุน พบว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เนื่องจาก ลักษณะของจุดไม่มีการเกิดแนวโน้มหรือเป็นเส้นโค้งแต่อย่างใด ระยะห่างของจุดจากเส้นแกนกลางทั้งด้านบนและล่าง โดยเฉลี่ยแล้วพอกๆกัน ดังภาพที่ 20 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 15 Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนของราคาต้นทุน

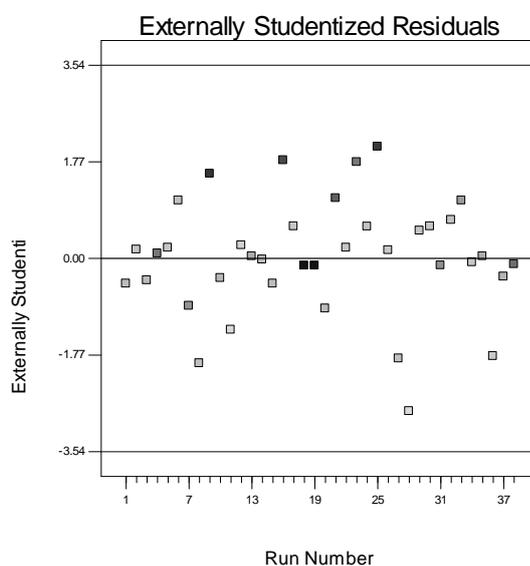


ภาพที่ 16 กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้

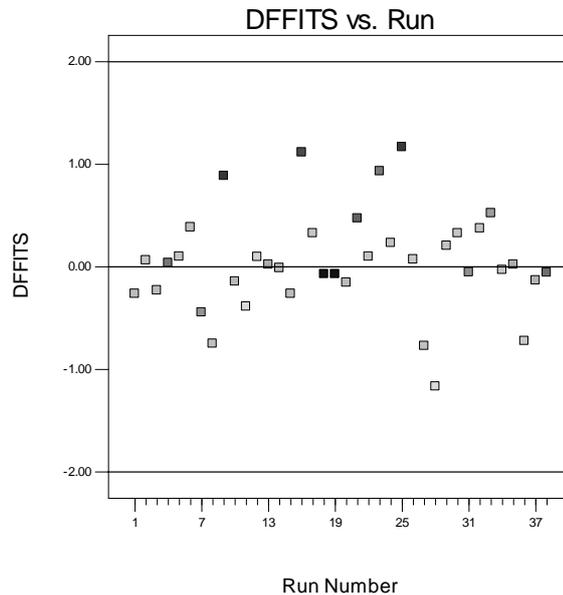
### 3.2.3 สมมติฐานของความเป็นอิสระ

จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (pattern) เท่ากับเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 21 สรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ได้ขึ้นอยู่กับลำดับและเวลาที่เก็บข้อมูลแม้ว่าจุดพล็อตจะขาดความสม่ำเสมอไปบ้าง แต่เพื่อความแน่ใจ ควรจะตรวจสอบด้วยการพล็อตค่า DFFIT กับลำดับของการทดลองเพื่อตรวจหาค่าที่มีอิทธิพล ดังภาพที่ 22 ไม่พบค่าที่มีอิทธิพล

จากการทดสอบสมมติฐานทั้งสามนี้ สามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้นี้พอเพียงแล้วที่จะนำไปใช้ทำนายราคาต้นทุน ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่อาจมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต



ภาพที่ 17 กราฟของความผิดพลาดกับลำดับของการเก็บข้อมูล

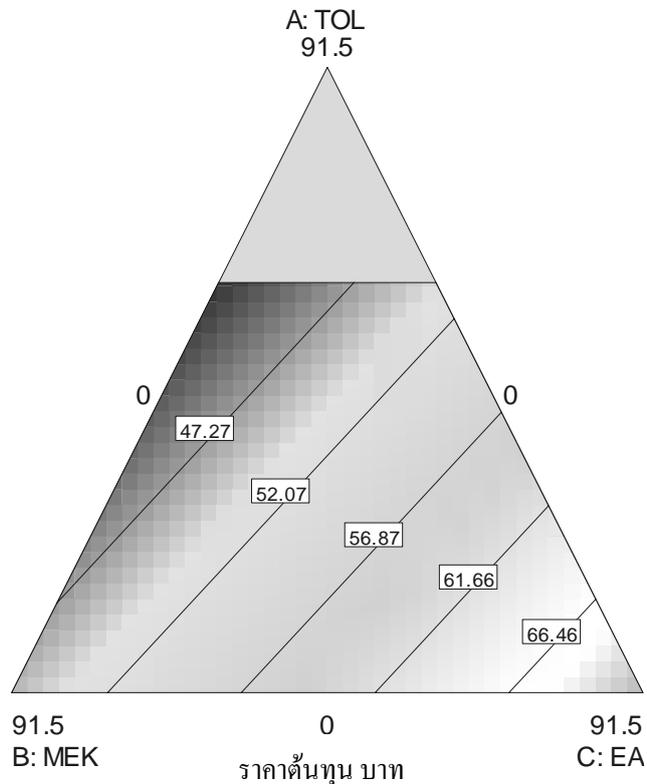


ภาพที่ 18 กราฟของค่า DFFIT กับลำดับของการเก็บข้อมูลที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีค่าที่มีอิทธิพล

### 3.3 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของราคาต้นทุน

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ประมวลผลพื้นผิวผลตอบบริเวณที่มีค่าราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 23 เมื่ออ่านกราฟพื้นผิวผลตอบแล้วได้บริเวณที่มีระดับของ TOL ประมาณ 60% MEK ประมาณ 25% EA ประมาณ 6.5% และมีระดับของ ACT , IBA และ IPA อย่างละ 0.000% และ MET 8.500% ให้ราคาต้นทุนประมาณ 45 บาทต่อกิโลกรัม

จากตารางที่ 14 จะเห็นว่าส่วนผสมที่โปรแกรมประมวลให้ มีราคาต้นทุนต่ำสุด เท่าๆกับต้นทุนในการผลิตปัจจุบัน (41 บาทต่อกิโลกรัม) และยังให้ระยะเวลาในการแห้งตัวที่น่าพอใจ แต่ความสามารถในการทำละลายสีช้าเกินกว่าที่ลูกค้าจะยอมรับได้ ระดับที่ให้ราคาต้นทุนต่ำเหล่านี้จึงยังไม่ใช้ระดับของส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปผลิต



ภาพที่ 19 แสดงพื้นผิวผลตอบแทนแบบสองมิติของราคาต้นทุนในหน่วยบาทต่อกิโลกรัม

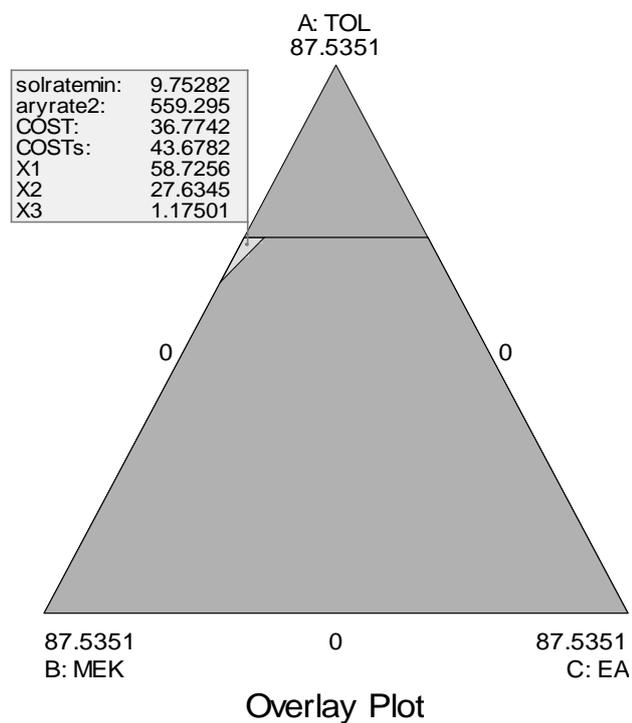
ตารางที่ 13 ระดับของส่วนผสมที่ให้ราคาต้นทุนต่ำที่สุดใน 6 อันดับแรก

| No. | TOL    | MEK    | EA    | ACT    | IBA   | IPA   | MET    | Sol.rate<br>(min) | Dryrate<br>(min) | COST/kg |
|-----|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------------------|------------------|---------|
| 1   | 60.000 | 30.000 | 0.000 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 10.000 | 10.61             | 9.11             | 42.01   |
| 2   | 59.982 | 18.802 | 0.000 | 11.217 | 0.000 | 0.000 | 10.000 | 10.44             | 8.76             | 42.47   |
| 3   | 60.000 | 27.581 | 2.428 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 9.991  | 10.62             | 9.17             | 42.61   |
| 4   | 60.000 | 26.236 | 0.000 | 4.446  | 0.000 | 1.231 | 8.087  | 10.12             | 8.98             | 42.91   |
| 5   | 60.000 | 33.831 | 0.000 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 6.169  | 10.36             | 8.92             | 43.06   |
| 6   | 60.000 | 0.000  | 0.000 | 30.000 | 0.000 | 0.000 | 10.000 | 10.16             | 8.50             | 43.22   |

#### 4. การหาระดับที่ดีที่สุดของระยะเวลาในการทำละลายและแห้งตัวของสีและราคาต้นทุน

การที่พื้นผิวผลตอบแทนมีผลตอบแทนหลายตัว วิธีที่ง่ายที่สุดในการหาระดับที่เหมาะสมคือการนำกราฟของทุกผลตอบแทนมาวางซ้อนกันเพื่อหาบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทุกผลตอบแทน

ภาพที่ 24 บริเวณที่เป็นสีขาวคือบริเวณที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ต่ำและคุณภาพของทินเนอร์อยู่ในขอบเขตที่ลูกค้าพึงพอใจ คือระยะเวลาในการทำละลายสีประมาณ 9.75 นาที ระยะเวลาในการแห้งตัวประมาณ 9.32 นาที และราคาต้นทุนประมาณ 43.68 บาทต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามการพิจารณารกราฟด้วยตาอาจอ่านค่าผิดพลาดได้ โปรแกรมสำเร็จรูปจึงประมวลตัวเลขที่ชัดเจนของส่วนผสมที่เหมาะสมให้มีด้วยกันถึง 4 แบบดังตารางที่ 15



ภาพที่ 20 พื้นผิวผลตอบแสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสาม

ตารางที่ 14 ระดับของส่วนผสมที่ให้ผลตอบทั้งสามต่ำที่สุด

| No. | TOL    | MEK    | EA    | ACT    | IBA   | IPA   | MET   | Sol<br>(min) | Dry<br>(min) | COST<br>/kg |
|-----|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------------|
| 1   | 60.000 | 27.395 | 0.000 | 2.605  | 0.000 | 2.748 | 7.252 | 9.73         | 9.30         | 43.30       |
| 2   | 60.000 | 3.809  | 0.000 | 26.208 | 0.000 | 1.288 | 8.695 | 9.82         | 8.56         | 43.63       |
| 3   | 60.000 | 0.474  | 0.000 | 29.526 | 0.000 | 1.044 | 8.956 | 9.84         | 8.53         | 43.65       |
| 4   | 60.000 | 0.000  | 0.000 | 32.161 | 0.000 | 0.000 | 7.839 | 9.99         | 8.20         | 43.90       |

ในทัศนะของผู้ผลิตแล้วแน่นอนว่าผู้ผลิตทุกรายจะต้องให้ความสำคัญของราคาต้นทุนมาเป็นอันดับแรก ดังนั้นส่วนผสมที่ดีที่สุดในการผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสคือ TOL: MEK: EA: ACT: IBA: IPA: MET = 60.000: 27.395: 0.000: 2.605: 0.000: 2.748: 7.752 เป็นสัดส่วนโดยปริมาตร

##### **5. นาระดับที่ดีที่สุดของปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์**

เมื่อได้ข้อสรุปเบื้องต้นแล้วว่าส่วนผสมของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสที่ดีที่สุดคือส่วนผสมที่ได้จากการใช้ โทลูอิน(Toluene), เมทิลเอธิลคีโตน(Methyl Ethyl Ketone), อะซิโตน (Actone), ไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์, (Isopropanol Alcohol) และเมทานอล (Methanol) คิดเป็นปริมาตร 60.000 %, 27.395 %, 2.605 %, 2.748 %, 7.252 % ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่กำหนดสัดส่วนไว้โดยปริมาตร

แต่เมื่อกำหนดถึงการผลิตจริง โรงงานจะผลิตทินเนอร์โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนัก และเนื่องจากมีข้อจำกัดในความละเอียดของเครื่องมือวัดและความเที่ยงตรงของตัวพนักงานที่มีแปรปรวนอยู่ตามธรรมชาติ จึงได้ปรับตัวเลข เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ใช้งานง่ายขึ้นคือ โทลูอิน, เมทิลเอธิลคีโตน, อะซิโตน, ไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์, และเมทานอล คิดเป็นน้ำหนัก 62.08 %, 25.75 %, 2.79 %, 2.56 %, 6.82 % ตามลำดับ (การคำนวณสัดส่วนโดยปริมาตรให้อยู่ในรูปสัดส่วนโดยน้ำหนักแสดงดังตารางภาคผนวก ง.) ซึ่งมีราคาต้นทุนกิโลกรัมละ 43.27 บาท นำส่วนผสมนี้ไปทดลองให้พนักงานในอุโมงค์รถยนต์ทดลองใช้อีกครั้งได้ผลดังตารางที่ 16 พบว่าระยะเวลาในการทำละลายและระยะเวลาในการแห้งโดยเฉลี่ยให้ผลเป็นที่น่าพอใจคือไม่เกิน 10 นาที และเมื่อรอจนแห้งแล้วสีไม่มีคราบและไม่หลุดลอก

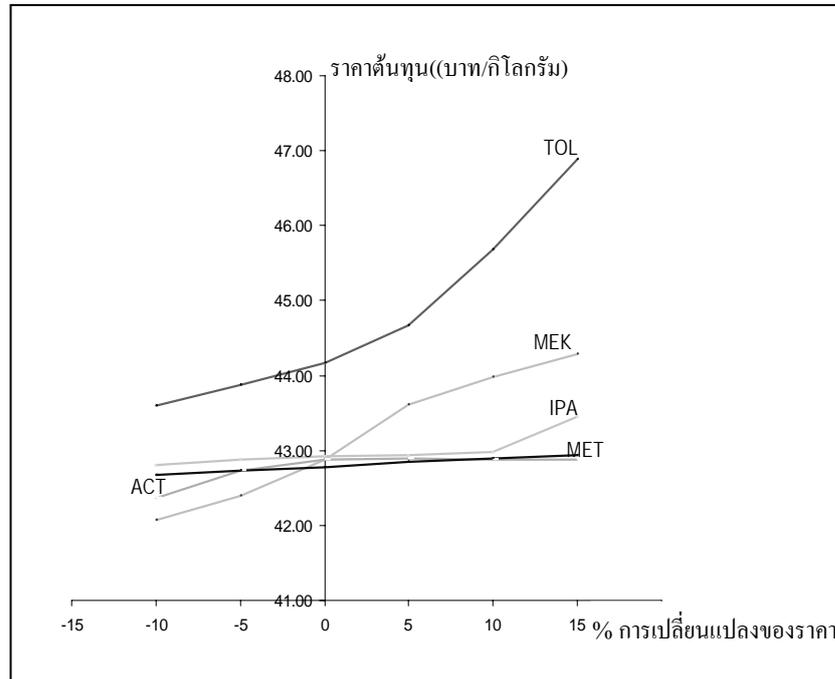
**ตารางที่ 15** แสดงการนำค่าที่เหมาะสมที่สุดไปทดสอบ

| การทดสอบ<br>ที่      | ระยะเวลาการทำ<br>ละลายสี(นาทีก) | ระยะเวลาการ<br>แห้งตัว(นาทีก) | ทดสอบ<br>คราบ | ทดสอบการ<br>หลุดลอก |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------|
| 1                    | 9.85                            | 8.85                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| 2                    | 9.74                            | 8.43                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| 3                    | 9.40                            | 8.80                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| 4                    | 9.23                            | 9.37                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| 5                    | 8.42                            | 8.78                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| 6                    | 9.18                            | 9.20                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| เฉลี่ย               | 9.30                            | 8.91                          | ไม่มีคราบ     | ไม่หลุดลอก          |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.51                            | 0.33                          | -             | -                   |

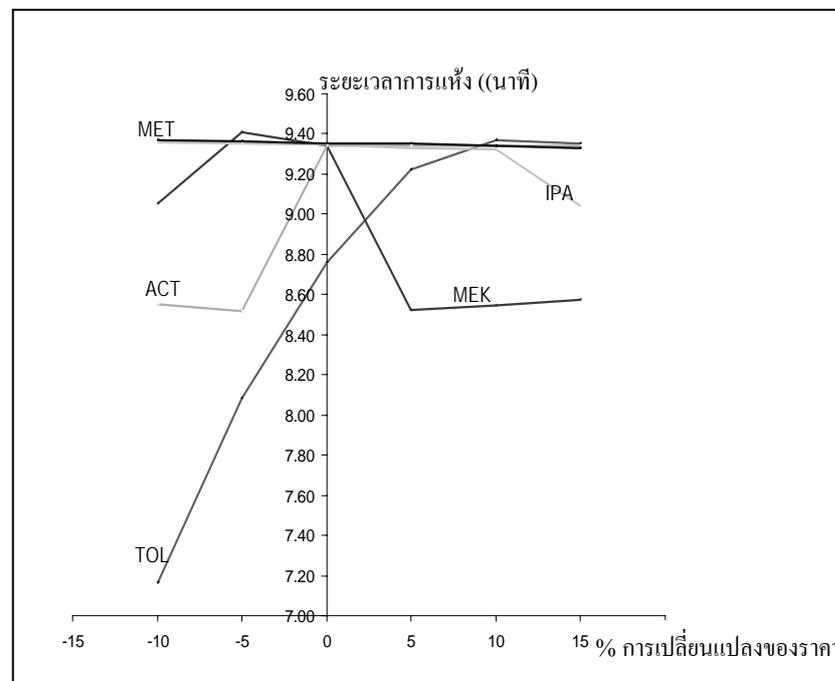
## 6. การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

ระดับของส่วนผสมของทินเนอร์ที่เหมาะสมที่เลือกไว้อาจไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสมตลอดไปก็ได้ หากมีการเปลี่ยนแปลงราคาสินค้าที่เป็นวัตถุดิบของส่วนผสมจึงต้องมีการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญๆที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วศึกษาความไวของการเปลี่ยนแปลงระดับของส่วนผสมของทินเนอร์ที่เหมาะสมเมื่อมีราคาของส่วนผสมใดส่วนผสมหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปในช่วงราคาที่เพิ่มขึ้นอีก 15% และลดลง 10% ดังนี้

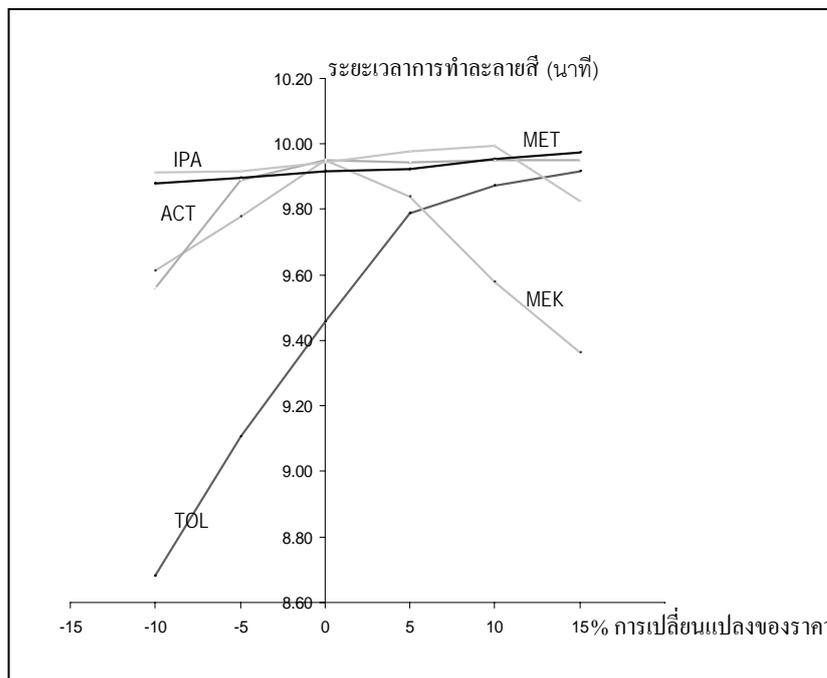
จากกราฟในภาพที่ 25 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงราคาของโพลูอิน เมทิลเอทิลดีโตนตลอดในช่วงราคาที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นจาก -10% ถึง 15% สารเคมีทั้งสองมีผลอย่างยิ่งต่อราคาผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตจึงควรกำหนดให้มีการปรับราคาสินค้าได้โดยมีเหตุผลว่าต้นทุนของผลิตภัณฑ์มีราคาที่สูงขึ้น สำหรับการปรับราคาของสารเคมีที่เหลือได้แก่ อะซิโตน ไอโซโพรพิลอัลกอฮอล์ และเมทานอลนั้นมีผลน้อยมากกับราคาค่าต้นทุนของผลิตภัณฑ์ ผู้ผลิตอาจยังคงตรึงราคาขายไว้ที่ราคาเดิมก่อนก็ได้เพื่อเป็นการรักษายอดขาย



ภาพที่ 21 ความไวของราคาต้นทุนของทินเนอร์เมื่อราคาต้นทุนของแต่ละสารเคมีเปลี่ยนแปลง

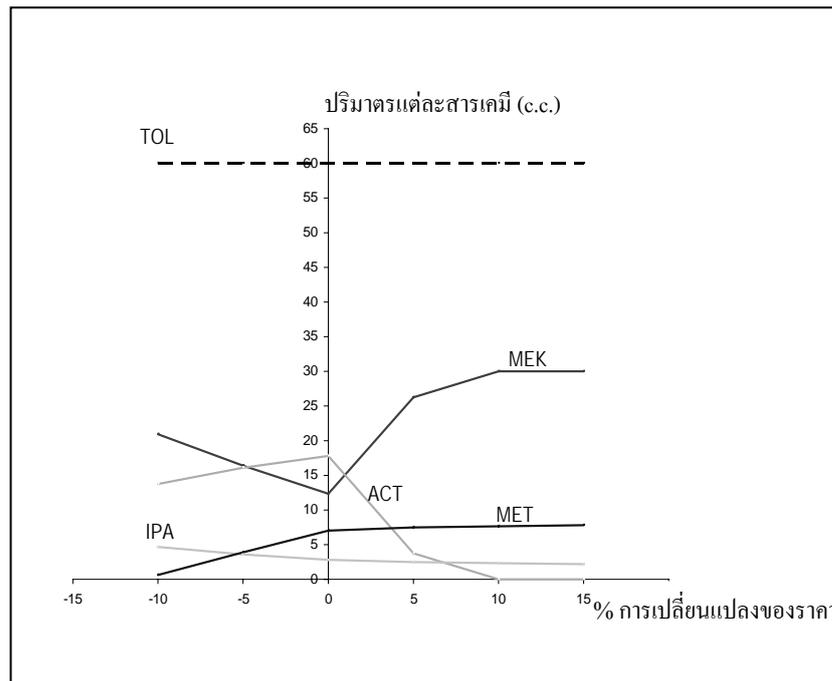


ภาพที่ 22 ความไวของระยะเวลาในการแห้งของสีเมื่อราคาต้นทุนของแต่ละสารเคมีเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 23 ความไวของระยะเวลาในการทำละลายเมื่อราคาต้นทุนของแต่ละสารเคมีเปลี่ยนแปลง

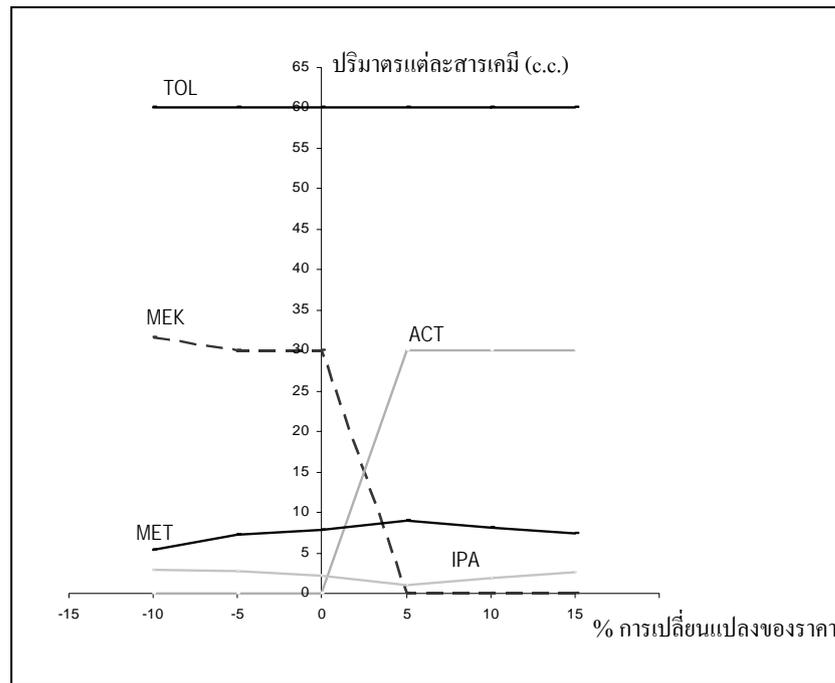
จากการวิเคราะห์ความไวของราคาต้นทุนแต่ละสารเคมีที่มีผลต่อความผันแปรของระยะเวลาในการแห้งตัวและระยะเวลาในการทำละลาย พบว่าผลการวิเคราะห์มีความคล้ายกัน คือ การเปลี่ยนแปลงราคาของโทลูอินที่สูงขึ้น มีผลทำให้ระยะเวลาในการแห้งและระยะเวลาในการทำละลายมีค่าสูงขึ้นตามไป ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเป็นการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสามผลตอบที่เน้นในเรื่องของราคาต้นทุนที่ต่ำสุด ดังนั้นเมื่อราคาของโทลูอินสูงขึ้น ถ้าผู้ผลิตต้องการตรึงราคาต้นทุนเดิมหรือใกล้เคียงเอาไว้ ก็จะต้องเลือกส่วนผสมที่ให้ระยะเวลาในการแห้งและระยะเวลาในการทำละลายมีค่าต่ำกว่าเดิม ในขณะที่เมทิลเอทิลคีโตนให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือเมื่อราคาของมันสูงขึ้น ระยะเวลาในการแห้งและระยะเวลาในการทำละลายกลับให้ค่าที่เร็วขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงราคาของเมทิลเอทิลคีโตนที่มีผลต่อส่วนผสมของสารเคมีอื่นๆ พบว่า เมื่อเมทิลเอทิลคีโตนมีราคาสูงขึ้นก็มีแนวโน้มว่าจะถูกใช้ในปริมาณที่น้อยลงแต่ใช้อะซิโตนทดแทน เพื่อเป็นการคงราคาต้นทุนไว้ให้ต่ำที่สุด สำหรับการเปลี่ยนแปลงราคาของสารเคมีอื่นๆ ส่งผลน้อยมากต่อระยะเวลาในการแห้งและระยะเวลาในการทำละลาย



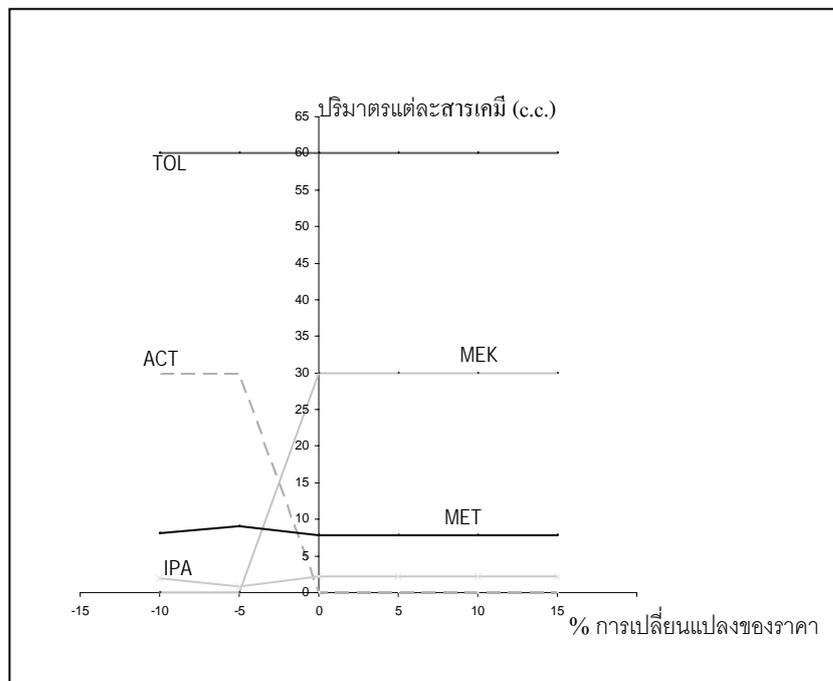
ภาพที่ 24 ความไวของปริมาณส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อราคาต้นทุนของโทลูอินเปลี่ยนแปลง

จากการวิเคราะห์ความไวของราคาต้นทุนของโทลูอินจากกราฟในภาพที่ 28 ที่มีผลต่อความผันแปรของปริมาณส่วนผสมอื่นๆ เมื่อยังคงระดับของผลตอบทั้งสามที่ดีที่สุดพบว่า เมื่อราคาโทลูอินสูงขึ้นอย่างไรก็ตามยังคงใช้โทลูอินในปริมาณเดิมคือร้อยละ 60 แต่จะมีการปรับปริมาณการใช้อะซิโตนให้น้อยลงแล้วเพิ่มเมทิลเอทิลคีโตนแทน ส่วนไอโซโพรพิลอัลกอฮอล์และเมททานอลนั้นจะใช้ในปริมาณใกล้เคียงกับส่วนผสมเดิม

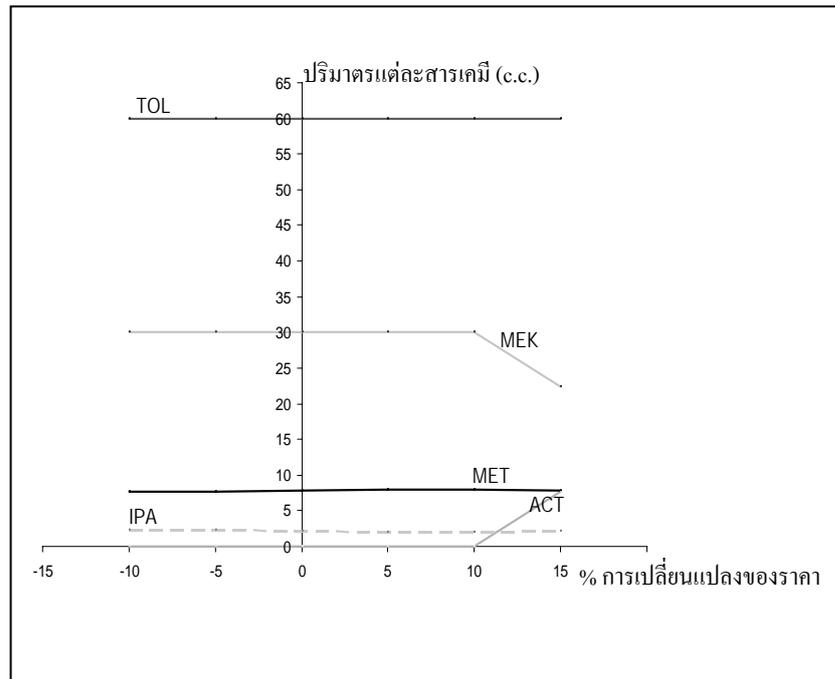
ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ความไวของราคาต้นทุนของเมทิลเอทิลคีโตน จากกราฟในภาพที่ 29 ที่มีผลต่อความผันแปรของปริมาณส่วนผสมอื่นๆ เมื่อยังคงระดับของผลตอบทั้งสามที่ดีที่สุดพบว่า เมื่อราคาของเมทิลเอทิลคีโตนสูงขึ้นไม่เกิน 5% ปริมาณการใช้จะลดลงและใช้อะซิโตนทดแทน ถ้าราคาสูงขึ้นเกินกว่านี้จะงดใช้เมทิลเอทิลคีโตนแต่จะหันมาใช้อะซิโตนแทนทั้งหมด และจากกราฟในภาพที่ 30 ถ้าราคาของอะซิโตนเพิ่มขึ้นสารเคมีที่ทดแทนอะซิโตนได้ ก็คือเมทิลเอทิลคีโตนนั่นเองในขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ ยังคงใช้ในปริมาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก



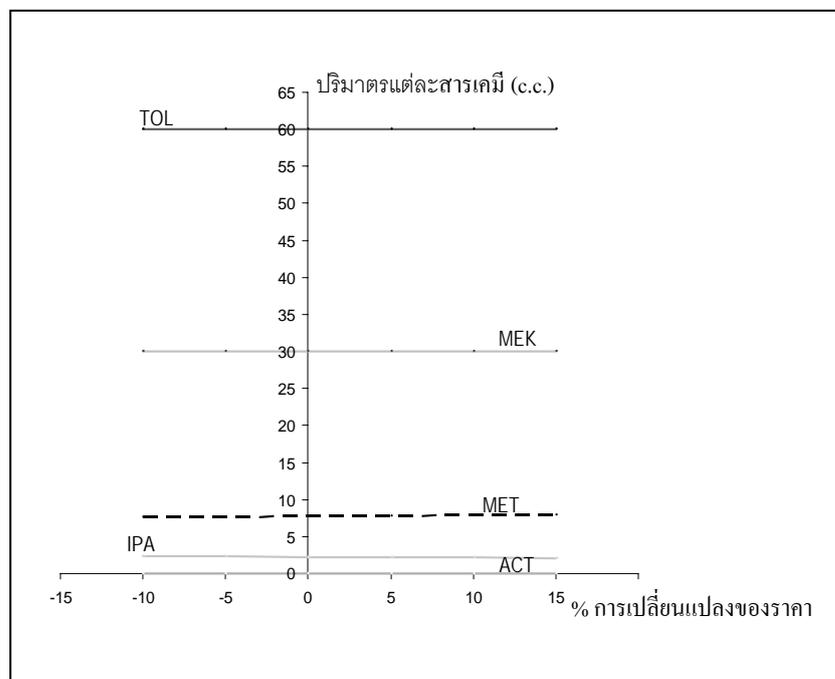
ภาพที่ 25 ความไวของปริมาณส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อราคาต้นทุนของเมทิลเมทิลลิกิโตนเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 26 ความไวของปริมาณส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อราคาต้นทุนของอะซิโตน เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 27 ความไวของปริมาณส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อราคาต้นทุนของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 28 ความไวของปริมาณส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อราคาต้นทุนของเมทานอลเปลี่ยนแปลง

จากกราฟความไวของปริมาณส่วนผสมอื่นใน 100 c.c. ตามภาพที่ 31 และ 32 เมื่อราคาต้นทุนของ IPA เปลี่ยนแปลงไปส่วนผสมอื่นๆ ยังคงถูกใช้ในปริมาณที่คงเดิม แต่เพื่อเป็นการคงไว้ซึ่งค่าผลตอบแทนที่ต่ำสุดทั้งสาม เมื่อ IPA มีราคาสูงขึ้นมากๆ ก็มีแนวโน้มว่าจะต้องใช้ อะซิโตนทดแทนเมทิลเอทิลคีโตนบางส่วน สำหรับการเปลี่ยนแปลงของราคาเมทธานอลนั้น ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมอื่นๆแต่อย่างใด คือยังคงใช้ในปริมาณเดิม

## สรุป

จากการออกแบบการทดลองแบบผสมครั้งนี้ได้ทดลองผสมทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสจำนวน 38 สูตรและใช้สูตรที่เคยมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของลูกค้าเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการทำละลายสี ระยะเวลาในการแห้งเมื่อพ่น ราคาต้นทุน และได้ทดสอบการเกิดคราบและการหลุดล่อนหลังจากปล่อยให้แห้งด้วย

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองคือต้องการค้นหาสูตรในการผสมทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลส ที่มีระยะเวลาในการทำละลายสี ระยะเวลาในการแห้งเมื่อพ่นที่รวดเร็ว ในราคาต้นทุนที่ต่ำที่สุด และไม่เกิดการเกิดคราบและไม่หลุดล่อนหลังจากที่สีแห้ง และที่สำคัญส่วนผสมจะต้องไม่ผิดไปจากข้อกำหนดของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงจะถือว่าเป็นส่วนผสมที่ดีที่สุดที่จะนำไปผลิตเพื่อจำหน่ายในคราวต่อไป

จากการศึกษาทดลองปรากฏว่าภายใต้เงื่อนไขของการผสมที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดนั้น ไม่มีส่วนผสมใดที่ให้ระยะเวลาในการทำละลายสีหรือระยะเวลาในการแห้งได้อย่างน่าพอใจโดยมีต้นทุนต่ำกว่าต้นทุนปัจจุบัน (41 บาทต่อกิโลกรัม) ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในทุกด้านแล้ว ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลส ควรใช้ส่วนผสมที่ประกอบไปด้วย โทลูอิน (Toluene), เมทิลเอธิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone), อะซิโตน (Acetone), ไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์, (Isopropanol Alcohol) และเมทานอล (Methanol) คิดเป็นน้ำหนัก 62.08%, 25.75%, 2.79%, 2.56%, 6.82% ตามลำดับ จะได้ทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสที่มีราคาต้นทุนต่ำสุด และมีคุณภาพดีกว่าสูตรที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือทำละลายสีได้ภายใน 9.30 นาที และแห้งภายใน 8.91 นาที พ่นแล้วสีติดแน่นไม่หลุดลอก และไม่มียอคราบ มีราคาต้นทุนกิโลกรัมละ 43.27 บาท การที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตอย่างถูกต้องตามมาตรฐานและมีคุณภาพดีอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้ผู้ผลิตพ้นจากความเสียหายจากร้องเรียนของลูกค้า ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตจะสูงกว่าเดิมเล็กน้อย แต่ก็เป็นเรื่องที่สมเหตุสมผล ผู้ผลิตจึงยอมรับราคาต้นทุนนี้ได้

ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดนี้มีความเสถียรมากในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงราคาต้นทุนของ TOL, IPA และ MET การเปลี่ยนแปลงในช่วงราคาที่ลดลง 10% ถึงเพิ่มขึ้น 15% จะไม่ทำให้สูตรที่เหมาะสมนี้เปลี่ยนแปลงไป แต่ราคาต้นทุนจะสูงขึ้นเมื่อราคาของ TOL ขยับตัวสูงขึ้น

เนื่องมาจากเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในปริมาณมาก แต่ถ้ำราคาของ MEK หรือ ACT เปลี่ยนแปลงไป ผู้ผลิตจะต้องหาสูตรของทินเนอร์ที่เหมาะสมใหม่เพื่อคงไว้ซึ่งคุณภาพที่ดีและราคาต้นทุนที่ต่ำ

ในกรณีที่ผู้ผลิตต้องการจะปรับเปลี่ยนสูตรผสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของราคาในอนาคต สามารถใช้สมการถดถอยต่อไปนี้เพื่อใช้ทำนายคุณภาพและราคาต้นทุน ได้แก่ ระยะเวลาในการทำละลายสี (นาทิจ) =  $10.7699 - 0.0206 \text{ MEK} - 0.0160 \text{ EA} - 0.0357 \text{ ACT} + 0.0295 \text{ IBA} - 0.2636 \text{ IPA} + 0.0432 \text{ MET}$  เมื่อตัวแปรต้นคือเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของส่วนผสมนั้นๆ สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 83.51% และสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการทำละลายสีได้ด้วยความแม่นยำ 79.40%

สมการถดถอยเพื่อใช้ทำนาย ระยะเวลาในการแห้งของสีเมื่อพ่นคือ ระยะเวลาในการแห้งของสีเมื่อพ่น(นาทิจ) =  $5.7437 + 0.0257 \text{ MEK} + 0.0351 \text{ EA} - 0.0123 \text{ ACT} + 0.4878 \text{ IBA} + 0.4710 \text{ IPA} + 0.1230 \text{ MET} - 0.0025 \text{ MEK IBA} + 0.1554 * \text{IBA IPA} + 0.3230 \text{ IBA MET} + 0.0007 \text{ MEK}^2$  เมื่อตัวแปรต้นคือเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของส่วนผสมนั้นๆ สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 94.21% และสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการทำละลายสีได้ด้วยความแม่นยำ 88.89%

สำหรับสมการถดถอยที่สามารถนำไปใช้เพื่อทำนายต้นทุนในการผลิตคือ ราคาต้นทุน (บาทต่อกิโลกรัม) =  $40.6165 + 0.1035 \text{ MEK} + 0.3508 \text{ EA} + 0.1440 \text{ ACT} + 0.3318 \text{ IBA} + 0.2581 \text{ IPA} - 0.1710 \text{ MET}$  เมื่อตัวแปรต้นคือเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของส่วนผสมนั้นๆ สมการที่ได้นี้สามารถอธิบายข้อมูลได้ 99.93% และสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการทำละลายสีได้ด้วยความแม่นยำ 99.92%

## ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการสั่งซื้อสารเคมี จึงทำให้ไม่ได้ทดลองใช้สารเคมีอื่นๆที่สามารถนำมาใช้ผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสตามที่ได้อ้างอิงไว้ในส่วนการตรวจเอกสาร ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไป อาจเลือกสารเคมีเหล่านั้นมาใช้ทดแทนสารเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. การวิจัยครั้งนี้ทดสอบมาตรฐานคุณภาพของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสโดยการปล่อยให้สีแตกตัวในทินเนอร์เอง แต่ในการใช้งานจริง พนักงานจะใช้อุปกรณ์ช่วยกวนให้สีละลาย และบางโรงงานมีห้องพ่นสีที่ปรับอุณหภูมิให้สีแห้งเร็วได้ ทำให้ผู้ผลิตสามารถกำหนดสูตรที่มีราคาต้นทุนต่ำกว่าจุดที่เหมาะสมนี้โดยยอมให้ระยะเวลาในการทำละลายและแห้งตัวช้าลงได้อีกดังนั้นจึงควรแบ่งทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสออกเป็นสามสูตรย่อยๆ เพื่อให้ลูกค้าเลือกได้ตามสภาวะการใช้งาน ได้แก่ สูตรที่ทำละลายสีได้เร็ว สูตรที่แห้งเร็ว และสูตรที่ราคาต้นทุนต่ำเป็นพิเศษ

3. ข้อเสนอแนะสำหรับโรงงานกรณีศึกษาที่สามารถนำผลการทดลองทั้งสามไปใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อช่วยตัดสินใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลส ในกรณีที่จะมีการปรับปรุงสูตรคราวต่อไป

4. ควรนำการออกแบบการทดลองแบบผสมไปใช้ปรับปรุงหรือพัฒนาสูตรของตัวทำละลาย (solvent) ประเภทอื่น ๆ ทุกประเภทที่โรงงานกรณีศึกษาได้ผลิตและจัดทำเป็นคู่มือสูตรผสมสารละลายเพื่อให้พนักงานนำไปใช้ผสมสารละลายที่มีคุณภาพดีและมีมาตรฐานต่อไป

## เอกสารและอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/index.asp>, 27 กันยายน 2548.

บริษัทคอฟโก้เคมีคัลจำกัด. 2548. รายการสินค้า. กรุงเทพฯ

ปารเมศ ชุตินา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เรวดี เกริกไกรกิจพร. 2540. การศึกษาโครงสร้างการผลิตและการตลาดของอุตสาหกรรมสีในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิรัชช พานิชวงส์. 2545. การวิเคราะห์การถดถอย. ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2527. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมทินเนอร์สำหรับสีพื้นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลส. มอก. 520-2527.

สุรพล สุรบรเจิดพร. 2542. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมตึบูกตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เหรียญ พลต่าง. 2547. การทดลองเปรียบเทียบส่วนผสมของสารเพ็คคาร์บูไรซิ่งในกระบวนการชุบผิวแข็งโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฤทัยภักดิ์ ชาญศรี. 2545. การผลิตวุ้นเส้นจากแป้งพุทธรักษากินได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Dasa, P.K. and Y. Zheng. 1999. Cumulative formation of response surface and its use in reliability analysis. **Probabilistic Engineering Mechanics**. 15: 309-315.

Lawson, J. and J. Erjavec. 2001. **Modern Statistics for Engineering and Quality Improvement**. Duxbury, Australia

Montgomery, D.C. 1991. **Design and Analysis of Experiment**. John Wiley and Son, Inc., New York.

Muhannad, J., P. Kleinebudde and B.W. Muller. 1997. Mixture experiments with the oil phase of parenteral emulsions. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**. 46: 161-167.

Myers, R.H. and D.C. Montgomery. 2002. **Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 2nd ed. John Wiley and Son, Inc., New York.

Scheff, H. 1973. **The Analysis of Varaince**. 2nd ed. John Wiley and Son, Inc., New York.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
แสดงราคาสารเคมีในหน่วยบาทต่อกิโลกรัมและบาทต่อลิตร

ตารางผนวกที่ ก1 ราคาสารเคมีในหน่วยบาทต่อกิโลกรัมและบาทต่อลิตร

| ลำดับที่ | ชื่อสารเคมี<br>ที่ใช้ผลิตทินเนอร์ | อักษรย่อที่<br>ใช้ในงานวิจัย | ราคา<br>(บาท/ก.ก.) | ความถ่วง<br>จำเพาะ | ราคา<br>(บาท/ลิตร) |
|----------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1        | Toluene                           | TOL                          | 41.00              | 0.873              | 35.79              |
| 2        | Methyl Ethyl Ketone               | MEK                          | 51.00              | 0.793              | 40.44              |
| 3        | Ethyl Acetate                     | EA                           | 76.00              | 0.807              | 61.33              |
| 4        | Actone                            | ACT                          | 55.00              | 0.903              | 49.67              |
| 5        | Isobutyl Alcohol                  | IBA                          | 75.00              | 0.804              | 60.30              |
| 6        | Isopropanol Alcohol               | IPA                          | 67.00              | 0.787              | 52.73              |
| 7        | Mehtanol                          | MET                          | 21.00              | 0.793              | 16.65              |
| 8        | Normal Butyl Acetate              | -                            | 72.00              | 0.833              | 59.98              |
| 9        | Ethylglycol Acetate               | -                            | 68.00              | 0.975              | 66.30              |
| 10       | Isopropyl Acetone                 | -                            | 71.00              | 0.803              | 56.99              |
| 11       | Xylene                            | -                            | 41.00              | 0.875              | 35.88              |

ที่มา: บริษัทคอฟโก้เคมีคัลจำกัด (2548)

ภาคผนวก ข  
แสดงสูตรผสมทินเนอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน

ตารางผนวกที่ ข1 สูตรผสมทินเนอร์ที่ใช้ในปัจจุบันสูตรที่1

| ประเภทสารเคมี | ชื่อสารเคมี | น้ำหนักที่ผสมในการผลิต(kg.) | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก | ปริมาตรที่ผสมในการผลิต(cc.) | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
|---------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| ไฮโดรคาร์บอน  | TOL         | 100                         | 62.50                 | 114.55                      | 60.50                 |
| คีโตน         | MEK         | 5                           | 3.13                  | 6.31                        | 3.33                  |
| คีโตน         | EA          | 5                           | 3.13                  | 6.20                        | 3.27                  |
| คีโตน         | ACT         | 5                           | 3.13                  | 5.54                        | 2.92                  |
| อัลกอฮอล์     | IBA         | 5                           | 3.13                  | 6.22                        | 3.28                  |
| อัลกอฮอล์     | IPA         | 10                          | 6.25                  | 12.71                       | 6.71                  |
| อัลกอฮอล์     | MET         | 30                          | 18.75                 | 37.83                       | 19.98                 |
|               | รวม         | 160                         | 100                   | 189.34                      | 100                   |

|                       |   |      |
|-----------------------|---|------|
| ระยะเวลาในการทำละลาย  | 10.27   | นาที |
| ระยะเวลาในการแห้งตัว  | 9.18  | นาที |
| การเกิดคราบ           | ไม่มีคราบ   |      |
| การหลุดล่อน           | ไม่หลุดล่อน   |      |
| ราคาคันทุน            | 41  | บาท  |
| การร้องเรียนของลูกค้า | ไม่มีการร้องเรียน   |      |
| ข้อสังเกต             | มีอัลกอฮอล์โดยรวม ปริมาตรมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด (10%) และมีคีโตนน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนด (30%) |      |

ตารางผนวกที่ ข2 สูตรผสมทินเนอร์ที่ใช้ในปัจจุบันสูตรที่2

| ประเภทสารเคมี         | ชื่อสารเคมี | น้ำหนักที่ผสมในการผลิต(kg.)   | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก | ปริมาตรที่ผสมในการผลิต(cc.) | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
|-----------------------|-------------|---|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| ไฮโดรคาร์บอน          | TOL         | 100   | 62.5                  | 114.55                      | 60.79                 |
| คีโตน                 | MEK         | 5   | 3.125                 | 6.31                        | 3.35                  |
| คีโตน                 | EA          | 5   | 3.125                 | 6.20                        | 3.29                  |
| คีโตน                 | ACT         | 10  | 6.25                  | 11.07                       | 5.88                  |
| อัลกอฮอล์             | IBA         | 10  | 6.25                  | 12.44                       | 6.60                  |
| อัลกอฮอล์             | IPA         | 5   | 3.125                 | 6.35                        | 3.37                  |
| อัลกอฮอล์             | MET         | 25  | 15.625                | 31.53                       | 16.73                 |
|                       | รวม         | 160   | 100                   | 188.44                      | 100.00                |
| ระยะเวลาใน            |             |   |                       |                             |                       |
| การทำละลาย            |             | 12.5  | นาที                  |                             |                       |
| ระยะเวลาในการแห้งตัว  |             | 10.6  | นาที                  |                             |                       |
| การเกิดคราบ           |             | ไม่มีคราบ   |                       |                             |                       |
| การหลุดล่อน           |             | ไม่หลุดล่อน   |                       |                             |                       |
| ราคาต้นทุน            |             | 41  | บาท                   |                             |                       |
| การร้องเรียนของลูกค้า |             | มีการร้องเรียนเรื่องการทำละลายสีได้ช้า สีจับตัวกันเป็นก้อน                                    |                       |                             |                       |
| ข้อสังเกต             |             | มีอัลกอฮอล์โดยรวม ปริมาตรมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด (10%) และมีคีโตนน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนด (30%) |                       |                             |                       |

ภาคผนวก ค

แสดงข้อมูลจากการออกแบบทดลองแบบผสมแบบ D-Optimal

ตารางผนวกที่ ค1 แสดงข้อมูลจากการออกแบบทดลองแบบผสมแบบ D-Optimal

| ลำดับ<br>ที่<br>ทดลอง | TOL<br>% by<br>vol. | MEK<br>% by<br>vol. | EA<br>% by<br>vol. | ACT<br>% by<br>vol. | IBA<br>% by<br>vol. | IPA<br>% by<br>vol. | MET<br>% by<br>vol. | อัตราการใช้<br>ทำละลาย<br>(min) | อัตราการใช้<br>แห้งตัว<br>(min) | ราคา<br>(บาท/<br>ก.ก.) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1                     | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 90.000              | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 4.75                            | 9.58                            | 56.05                  |
| 2                     | 0.000               | 95.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 5.000               | 0.000               | 7.15                            | 15.87                           | 51.78                  |
| 3                     | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 90.000              | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 8.75                            | 10.45                           | 56.80                  |
| 4                     | 60.000              | 30.000              | 0.000              | 0.000               | 5.0000              | 5.000               | 0.000               | 11.08                           | 14.60                           | 46.69                  |
| 5                     | 0.000               | 90.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 5.67                            | 18.57                           | 52.56                  |
| 6                     | 40.000              | 0.000               | 0.000              | 56.666              | 3.3333              | 0.000               | 0.000               | 11.33                           | 6.93                            | 50.11                  |
| 7                     | 0.000               | 90.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 8.75                            | 14.38                           | 48.04                  |
| 8                     | 40.000              | 0.000               | 50.000             | 0.000               | 3.3333              | 6.667               | 0.000               | 9.72                            | 16.45                           | 60.58                  |
| 9                     | 0.000               | 0.000               | 100.00             | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.90                            | 8.05                            | 76.00                  |
| 10                    | 20.000              | 40.000              | 30.000             | 0.000               | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 13.53                           | 12.35                           | 58.52                  |
| 11                    | 15.000              | 10.416              | 60.416             | 10.416              | 1.2500              | 1.250               | 1.250               | 8.10                            | 11.10                           | 64.62                  |
| 12                    | 0.000               | 50.000              | 50.000             | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.80                            | 11.07                           | 63.38                  |
| 13                    | 0.000               | 0.000               | 90.000             | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 9.58                            | 10.68                           | 70.48                  |
| 14                    | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 100.00              | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.27                            | 4.08                            | 55.00                  |
| 15                    | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 90.000              | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 4.22                            | 8.15                            | 56.05                  |
| 16                    | 0.000               | 0.000               | 90.000             | 0.000               | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 6.98                            | 13.98                           | 75.11                  |
| 17                    | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 90.000              | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 8.05                            | 4.87                            | 51.98                  |
| 18                    | 60.000              | 30.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 11.63                           | 7.97                            | 41.98                  |
| 19                    | 60.000              | 30.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 9.93                            | 10.25                           | 41.98                  |
| 20                    | 15.000              | 25.833              | 25.833             | 25.833              | 2.5000              | 2.500               | 2.500               | 9.65                            | 13.62                           | 56.90                  |
| 21                    | 60.000              | 0.000               | 0.000              | 30.000              | 0.0000              | 5.000               | 5.000               | 7.93                            | 8.62                            | 45.61                  |
| 22                    | 0.000               | 90.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 6.47                            | 20.90                           | 52.56                  |
| 23                    | 60.000              | 0.000               | 0.000              | 40.000              | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 9.27                            | 6.45                            | 46.73                  |
| 24                    | 0.000               | 50.000              | 0.000              | 50.000              | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.25                            | 8.23                            | 53.11                  |
| 25                    | 0.000               | 0.000               | 90.000             | 0.000               | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 12.85                           | 14.20                           | 75.90                  |
| 26                    | 0.000               | 100.00              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.58                            | 16.05                           | 51.00                  |
| 27                    | 60.000              | 0.000               | 35.000             | 0.000               | 5.0000              | 0.000               | 0.000               | 10.25                           | 9.58                            | 54.17                  |
| 28                    | 0.000               | 0.000               | 50.000             | 50.000              | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.58                            | 6.52                            | 64.80                  |
| 29                    | 20.000              | 40.000              | 0.000              | 30.000              | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 10.73                           | 11.22                           | 52.50                  |
| 30                    | 0.0000              | 0.000               | 0.000              | 90.000              | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 8.85                            | 6.98                            | 51.98                  |
| 31                    | 30.000              | 70.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 0.000               | 8.95                            | 10.90                           | 47.83                  |
| 32                    | 0.0000              | 90.000              | 0.000              | 0.000               | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 12.57                           | 17.00                           | 53.40                  |
| 33                    | 60.000              | 0.000               | 0.000              | 30.000              | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 11.37                           | 8.58                            | 48.47                  |
| 34                    | 0.000               | 90.000              | 0.000              | 0.000               | 5.0000              | 0.000               | 5.000               | 11.15                           | 23.72                           | 50.72                  |
| 35                    | 0.000               | 0.000               | 90.000             | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 10.000              | 9.62                            | 8.82                            | 70.48                  |
| 36                    | 20.000              | 0.000               | 40.000             | 30.000              | 10.000              | 0.000               | 0.000               | 12.10                           | 12.00                           | 61.90                  |
| 37                    | 0.000               | 95.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 0.000               | 5.000               | 8.70                            | 14.87                           | 49.52                  |
| 38                    | 60.000              | 30.000              | 0.000              | 0.000               | 0.0000              | 10.000              | 0.000               | 8.43                            | 10.52                           | 46.28                  |

ภาคผนวก ง

แสดงการคำนวณสัดส่วนที่ดีที่สุดโดยปริมาตรให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ๑1 การคำนวณสัดส่วนที่ดีที่สุดโดยปริมาตรให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

| ประเภทสารเคมี | ชื่อสารเคมี | ปริมาตร (cc.) | ความถ่วงจำเพาะ | น้ำหนัก (กรัม) | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |
|---------------|-------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------|
| ไฮโดรคาร์บอน  | TOL         | 60            | 0.873          | 52.38          | 62.08                 |
| คีโตน         | MEK         | 27.40         | 0.793          | 21.72          | 25.75                 |
| คีโตน         | ACT         | 2.61          | 0.903          | 2.35           | 2.79                  |
| อัลกอฮอล์     | IPA         | 2.75          | 0.787          | 2.16           | 2.56                  |
| อัลกอฮอล์     | MET         | 7.25          | 0.793          | 5.75           | 6.82                  |
|               | รวม         | 100.00        | -              | 84.37          | 100.00                |

**ภาคผนวก จ**

**แสดง การประมวลผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert 7.0 Trial Version**

**Sequential Model Sum of Squares** (Component Toluene is the Slack Variable)

| Source                | Sum of Squares | df       | Mean Square  | F Value      | p-value Prob > F   |                  |
|-----------------------|----------------|----------|--------------|--------------|--------------------|------------------|
| Mean vs Total         | 3001.21        | 1        | 3001.21      |              |                    |                  |
| <u>Linear vs Mean</u> | <u>135.53</u>  | <u>6</u> | <u>22.59</u> | <u>30.47</u> | <u>&lt; 0.0001</u> | <u>Suggested</u> |
| 2FI vs Linear         | 14.20          | 15       | 0.95         | 1.82         | 0.1356             |                  |
| Quadratic vs 2FI      | 3.60           | 6        | 0.60         | 1.30         | 0.3556             |                  |
| Cubic vs Quadratic    | 1.46           | 3        | 0.49         | 1.10         | 0.4321             | Aliased          |
| Residual              | 2.23           | 5        | 0.45         |              |                    |                  |
| Total                 | 3158.24        | 36       | 87.73        |              |                    |                  |

*"Sequential Model Sum of Squares [Type I]":* Select the highest order polynomial

**Lack of Fit Tests**

| Source        | Sum of Squares | df        | Mean Square | F Value     | p-value Prob > F |                  |
|---------------|----------------|-----------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| <u>Linear</u> | <u>19.27</u>   | <u>24</u> | <u>0.80</u> | <u>1.80</u> | <u>0.2669</u>    | <u>Suggested</u> |
| 2FI           | 5.06           | 9         | 0.56        | 1.26        | 0.4187           |                  |
| Quadratic     | 1.46           | 3         | 0.49        | 1.10        | 0.4321           |                  |
| Cubic         | 0.00           | 0         |             |             |                  | Aliased          |
| Pure Error    | 2.23           | 5         | 0.45        |             |                  |                  |

*"Lack of Fit Tests":* Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

**Model Summary Statistics**

| Source        | Std. Dev.   | R-Squared     | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS        |                  |
|---------------|-------------|---------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------|
| <u>Linear</u> | <u>0.86</u> | <u>0.8631</u> | <u>0.8348</u>      | <u>0.7924</u>       | <u>32.60</u> | <u>Suggested</u> |
| 2FI           | 0.72        | 0.8536        | 0.8339             |                     |              |                  |
| Quadratic     | 0.68        | 0.8765        | 0.7971             |                     |              |                  |
| Cubic         | 0.67        | 0.8858        | 0.8007             |                     |              | Aliased          |

*"Model Summary Statistics":* Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

ภาพผนวกที่ ๑1 การประมวลผลตอบระยะเวลาการทำละลาย (นาที)

**Analysis of variance table [Partial sum of squares]** (Component Toluene is the Slack Variable)

*Stepwise Regression with Alpha to Enter = 0.100, Alpha to Exit = 0.100*

| Source      | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F |                 |
|-------------|----------------|----|-------------|---------|------------------|-----------------|
| Model       | 135.53         | 6  | 22.59       | 30.47   | < 0.0001         | significant     |
| B-MEK       | 8.45           | 1  | 8.45        | 11.39   | 0.0021           |                 |
| C-EA        | 4.72           | 1  | 4.72        | 6.37    | 0.0173           |                 |
| D-ACT       | 22.31          | 1  | 22.31       | 30.10   | < 0.0001         |                 |
| E-IBA       | 27.24          | 1  | 27.24       | 36.75   | < 0.0001         |                 |
| F-IPA       | 26.69          | 1  | 26.69       | 36.01   | < 0.0001         |                 |
| G-MET       | 0.52           | 1  | 0.52        | 0.70    | 0.4096           |                 |
| Residual    | 21.50          | 29 | 0.74        |         |                  |                 |
| Lack of Fit | 19.27          | 24 | 0.80        | 1.80    | 0.2669           | not significant |
| Pure Error  | 2.23           | 5  | 0.45        |         |                  |                 |
| Cor Total   | 157.02         | 35 |             |         |                  |                 |

*The Model F-value of 30.47 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise. Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case B, C, D, E, F are significant model terms.*

*The "Lack of Fit F-value" of 1.80 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 26.69% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.*

|               |        |                |        |       |       |
|---------------|--------|----------------|--------|-------|-------|
| Std. Dev.     | 0.86   | R-Squared      | 0.863  | Mean  | 9.13  |
| Adj R-Squared | 0.8351 | Pred R-Squared | 0.7940 | PRESS | 32.60 |

*The "Pred R-Squared" of 0.7940 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.83  
This model can be used to navigate the design space.*

| Coefficient |          |    | Standard | 95% CI | 95% CI |
|-------------|----------|----|----------|--------|--------|
| Component   | Estimate | df | Error    | Low    | High   |
| Intercept   | 10.79    | 1  | 0.57     | 9.64   | 11.95  |
| MEK         | -2.06    | 1  | 0.62     | -3.33  | -0.80  |
| EA          | -1.60    | 1  | 0.64     | -2.90  | -0.30  |
| ACT         | -3.57    | 1  | 0.65     | -4.90  | -2.25  |
| IBA         | 27.95    | 1  | 4.35     | 19.08  | 36.82  |
| IPA         | -26.36   | 1  | 4.34     | -35.21 | -17.50 |
| MET         | 4.32     | 1  | 4.25     | -4.35  | 12.98  |

**Final Equation in Terms of Actual Components:**

Solution time (min.) =

+10.7938

-0.0206            MEK

-0.0160            EA

-0.0357            ACT

+0.2795            IBA

-0.2636            IPA

+0.0432            MET

*Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:*

- 1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.*
- 2) Studentized residuals versus predicted values to check for constant error.*
- 3) Externally Studentized Residuals to look for outliers, i.e., influential values.*

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

**Sequential Model Sum of Squares** (Component Toluene is the Slack Variable)

| Source                     | Sum of Squares | df        | Mean Square | F Value     | p-value Prob > F |                  |
|----------------------------|----------------|-----------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| Mean vs Total              | 5051.98        | 1         | 5051.98     |             |                  |                  |
| Linear vs Mean             | 580.46         | 6         | 96.74       | 24.37       | < 0.0001         |                  |
| <u>Quadratic vs Linear</u> | <u>111.43</u>  | <u>21</u> | <u>5.31</u> | <u>4.55</u> | <u>0.0087</u>    | <u>Suggested</u> |
| Sp Cubic vs Quadratic      | 1.31           | 5         | 0.26        | 0.13        | 0.9796           | Aliased          |
| Cubic vs Sp Cubic          | 0.00           | 0         |             |             |                  | Aliased          |
| Residual                   | 10.34          | 5         | 2.07        |             |                  |                  |
| Total                      | 5755.52        | 38        | 151.46      |             |                  |                  |

*"Sequential Model Sum of Squares [Type I]":* Select the highest order polynomial

**Lack of Fit Tests**

| Source           | Sum of Squares | df       | Mean Square | F Value     | p-value Prob > F |                  |
|------------------|----------------|----------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| Linear           | 112.74         | 26       | 4.34        | 2.10        | 0.2099           |                  |
| <u>Quadratic</u> | <u>1.31</u>    | <u>5</u> | <u>0.26</u> | <u>0.13</u> | <u>0.9796</u>    | <u>Suggested</u> |
| Special Cubic    | 0.00           | 0        |             |             |                  | Aliased          |
| Cubic            | 0.00           | 0        |             |             |                  | Aliased          |
| Pure Error       | 10.34          | 5        | 2.07        |             |                  |                  |

*"Lack of Fit Tests":* Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

**Model Summary Statistics**

| Source           | Std. Dev.   | R-Squared     | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS         |                  |
|------------------|-------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|------------------|
| Linear           | 1.99        | 0.8251        | 0.7912             | 0.7492              | 176.48        |                  |
| <u>Quadratic</u> | <u>1.08</u> | <u>0.9834</u> | <u>0.9387</u>      | <u>0.7662</u>       | <u>164.48</u> | <u>Suggested</u> |
| Special Cubic    | 1.44        | 0.9853        | 0.8913             |                     |               | Aliased          |
| Cubic            |             |               |                    |                     |               | Aliased          |

*"Model Summary Statistics":* Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

ภาพผนวกที่ ๖2 การประมวลผลต่อระยะเวลาการแห้งของสี (นาที่)

**Analysis of variance table [Partial sum of squares ]** *Stepwise Regression with Alpha to Enter = 0.100,*

*Alpha to Exit = 0.100. Forced Terms are Intercept, B-MEK, C-EA, D-ACT, E-IBA, F-IPA, G-MET*

| Added                    | Coefficient | t for H <sub>0</sub> |           | R-Squared | MSE  |
|--------------------------|-------------|----------------------|-----------|-----------|------|
|                          | Estimate    | Coeff=0              | Prob >  t |           |      |
| E <sup>2</sup>           | -1551.38    | -5.07                | <0.0001   | 0.9058    | 2.21 |
| EG                       | 1975.86     | 2.85                 | 0.0080    | 0.9264    | 1.79 |
| B <sup>2</sup>           | 6.59        | 2.63                 | 0.0136    | 0.9410    | 1.48 |
| EF                       | 1314.93     | 2.63                 | 0.0140    | 0.9530    | 1.22 |
| BE                       | -25.94      | -1.88                | 0.0710    | 0.9577    | 1.10 |
| E <sup>2</sup> (removed) | -260.70     | -0.69                | 0.4948    | 0.9522    | 1.20 |

**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

| Source         | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F |             |
|----------------|----------------|----|-------------|---------|------------------|-------------|
| Model          | 673.80         | 10 | 67.38       | 61.19   | < 0.0001         | sig.        |
| B-MEK          | 1.24           | 1  | 1.24        | 1.13    | 0.2973           |             |
| C-EA           | 18.33          | 1  | 18.33       | 16.64   | 0.0004           |             |
| D-ACT          | 2.03           | 1  | 2.03        | 1.85    | 0.1853           |             |
| E-IBA          | 57.93          | 1  | 57.93       | 52.61   | < 0.0001         |             |
| F-IPA          | 79.57          | 1  | 79.57       | 72.25   | < 0.0001         |             |
| G-MET          | 5.72           | 1  | 5.72        | 5.19    | 0.0308           |             |
| BE             | 3.89           | 1  | 3.89        | 3.53    | 0.0710           |             |
| EF             | 21.06          | 1  | 21.06       | 19.13   | 0.0002           |             |
| EG             | 55.28          | 1  | 55.28       | 50.20   | < 0.0001         |             |
| B <sup>2</sup> | 12.10          | 1  | 12.10       | 10.99   | 0.0026           |             |
| Residual       | 29.73          | 27 | 1.10        |         |                  |             |
| Lack of Fit    | 19.39          | 22 | 0.88        | 0.43    | 0.9248           | not         |
| Pure Error     | 10.34          | 5  | 2.07        |         |                  | significant |
| Cor Total      | 703.53         | 37 |             |         |                  |             |

ภาพผนวกที่ ๖2 (ต่อ)

The Model F-value of 61.19 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise. Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case C, E, F, G, EF, EG, B<sup>2</sup> are significant model terms.

The "Lack of Fit F-value" of 0.43 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 92.48% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.

|               |        |                |        |       |       |
|---------------|--------|----------------|--------|-------|-------|
| Std. Dev.     | 1.05   | R-Squared      | 0.9577 | Mean  | 11.53 |
| Adj R-Squared | 0.9421 | Pred R-Squared | 0.8889 | PRESS | 78.17 |

The "Pred R-Squared" of 0.8889 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9421. This model can be used to navigate the design space.

| Component      | Coefficient |       | Standard Error | 95% CI  |         |
|----------------|-------------|-------|----------------|---------|---------|
|                | Estimate    | df    |                | Low     | High    |
| Intercept      | 5.74        | 1     | 0.83           | 4.05    | 7.44    |
| B-MEK          | 2.57        | 1     | 2.42           | -2.39   | 7.52    |
| C-EA           | 3.51        | 1     | 0.86           | 1.75    | 5.28    |
| D-ACT          | -1.23       | 1     | 0.91           | -3.10   | 0.63    |
| E-IBA          | 48.78       | 1     | 6.73           | 34.98   | 62.58   |
| F-IPA          | 47.10       | 1     | 5.54           | 35.73   | 58.47   |
| G-MET          | 12.30       | 1     | 5.40           | 1.23    | 23.37   |
| BE             | -25.94      | 1     | 13.80          | -54.25  | 2.37    |
| EF             | 1553.92     | 1     | 355.31         | 824.89  | 2282.95 |
| EG             | 3230.27     | 1     | 455.92         | 2294.80 | 4165.75 |
| B <sup>2</sup> | 7.30        | 12.20 | 2.78           | 11.81   |         |

ภาพผนวกที่ ๖2 (ต่อ)

**Final Equation in Terms of Actual Components:**

$$\begin{aligned}
 \text{dryratemin} &= \\
 &+5.74366 \\
 &+0.025677 \text{ MEK} \\
 &+0.035131 \text{ EA} \\
 &-0.012339 \text{ ACT} \\
 &+0.48778 \text{ IBA} \\
 &+0.47103 \text{ IPA} \\
 &+0.12298 \text{ MET} \\
 &-2.59400\text{E-}003 \text{ MEK IBA} \\
 &+0.15539 \text{ IBA IPA} \\
 &+0.32303 \text{ IBA MET} \\
 &+7.29751\text{E-}004 \text{ MEK}^2
 \end{aligned}$$

*Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:*

- 1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.*
- 2) Studentized residuals versus predicted values to check for constant error.*
- 3) Externally Studentized Residuals to look for outliers, i.e., influential values.*

ภาพผนวกที่ ๖2 (ต่อ)

**Sequential Model Sum of Squares [Type I]**

| Source                     | Sum of Squares | df       | Mean Square   | F Value         | p-value Prob > F   |                  |
|----------------------------|----------------|----------|---------------|-----------------|--------------------|------------------|
| Mean vs Total              | 1.115E+005     | 1        | 1.115E+005    |                 |                    |                  |
| <u>Linear vs Mean</u>      | <u>3005.93</u> | <u>6</u> | <u>500.99</u> | <u>8773.74</u>  | <u>&lt; 0.0001</u> | <u>Suggested</u> |
| <u>Quadratic vs Linear</u> | <u>1.66</u>    | <u>2</u> | <u>10.079</u> | <u>32583.00</u> | <u>&lt; 0.0001</u> | <u>Suggested</u> |
| Sp Cubic vs Quadratic      | 1.936E-005     | 3        | 6.453E-006    | 6.366E+007      | < 0.0001           | Aliased          |
| Cubic vs Sp Cubic          | 0.00           | 0        |               |                 |                    | Aliased          |
| Residual                   | 0.00           | 5        | 0.000         |                 |                    |                  |
| Total                      | 1.146E+005     | 36       | 3182.14       |                 |                    |                  |

*"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial*

**Lack of Fit Tests**

| Source        | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F     |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|----------------------|
| Linear        | 1.66           | 24 | 0.069       |         | "Lack of Fit Tests": |
| Quadratic     | 1.936E-005     | 3  | 6.453E-006  |         | can not be detected. |
| Special Cubic | 0.00           | 0  |             |         |                      |
| Cubic         | 0.00           | 0  |             |         |                      |
| Pure Error    | 0.00           | 5  | 0.000       |         |                      |

**Model Summary Statistics**

| Source           | Std. Dev.         | R-Squared     | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS       |                  |
|------------------|-------------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------|------------------|
| <u>Linear</u>    | <u>0.24</u>       | <u>0.9994</u> | <u>0.9993</u>      | <u>0.9992</u>       | <u>2.50</u> | <u>Suggested</u> |
| <u>Quadratic</u> | <u>1.556E-003</u> | <u>1.0000</u> | <u>1.0000</u>      |                     |             | <u>Suggested</u> |
| Special Cubic    | 0.00              | 1.0000        | 1.0000             |                     |             | Aliased          |
| Cubic            |                   |               |                    |                     |             | Aliased          |

*"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".*

ภาพผนวกที่ ๖3 การประมวลผลตอบราคาต้นทุน (บาทต่อกิโลกรัม)

**Analysis of variance table [Partial sum of square]**

*Stepwise Regression with Alpha to Enter = 0.100, Alpha to Exit = 0.100*

| Source      | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value  | p-value Prob > F |
|-------------|----------------|----|-------------|----------|------------------|
| Model       | 3031.50        | 6  | 505.25      | 9194.97  | < 0.0001 sig.    |
| B-MEK       | 200.65         | 1  | 200.65      | 3651.59  | < 0.0001         |
| C-EA        | 2161.72        | 1  | 2161.72     | 39340.77 | < 0.0001         |
| D-ACT       | 354.23         | 1  | 354.23      | 6446.63  | < 0.0001         |
| E-IBA       | 41.80          | 1  | 41.80       | 760.69   | < 0.0001         |
| F-IPA       | 25.39          | 1  | 25.39       | 461.98   | < 0.0001         |
| G-MET       | 11.64          | 1  | 11.64       | 211.88   | < 0.0001         |
| Residual    | 1.70           | 31 | 0.055       |          |                  |
| Lack of Fit | 1.70           | 26 | 0.066       |          |                  |
| Pure Error  | 0.000          | 5  | 0.000       |          |                  |
| Cor Total   | 3033.21        | 37 |             |          |                  |

*The Model F-value of 9194.97 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise. Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case B, C, D, E, F, G are significant model terms.*

|               |        |                |        |       |       |
|---------------|--------|----------------|--------|-------|-------|
| Std. Dev.     | 0.23   | R-Squared      | 0.9994 | Mean  | 55.57 |
| Adj R-Squared | 0.9993 | Pred R-Squared | 0.9992 | PRESS | 2.53  |

*The "Pred R-Squared" of 0.9992 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9993. This model can be used to navigate the design space.*

ภาพผนวกที่ ๓ (ต่อ)

| Component | Coefficient |    | Standard Error | 95% CI |        |
|-----------|-------------|----|----------------|--------|--------|
|           | Estimate    | df |                | Low    | High   |
| Intercept | 40.62       | 1  | 0.16           | 40.30  | 40.94  |
| B-MEK     | 10.35       | 1  | 0.17           | 10.00  | 10.70  |
| C-EA      | 35.07       | 1  | 0.18           | 34.71  | 35.44  |
| D-ACT     | 14.39       | 1  | 0.18           | 14.02  | 14.75  |
| E-IBA     | 33.18       | 1  | 1.20           | 30.72  | 35.63  |
| F-IPA     | 25.81       | 1  | 1.20           | 23.36  | 28.26  |
| G-MET     | -17.10      | 1  | 1.17           | -19.50 | -14.70 |

**Final Equation in Terms of Actual Components:**

$$\begin{aligned} \text{COSTs} &= \\ &+40.61650 \\ &+0.10352 \text{ MEK} \\ &+0.35075 \text{ EA} \\ &+0.14389 \text{ ACT} \\ &+0.33176 \text{ IBA} \\ &+0.25807 \text{ IPA} \\ &-0.17100 \text{ MET} \end{aligned}$$

Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:

- 1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.
- 2) Studentized residuals versus predicted values to check for constant error.
- 3) Externally Studentized Residuals to look for outliers, i.e., influential values.

If all the model statistics and diagnostic plots are OK, finish up with the Model Graphs icon.

ภาพผนวกที่ ๓ (ต่อ)

ภาคผนวก ฉ  
แสดง การคำนวณจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม

ตารางผนวกที่ ๑1 แสดงการนำค่าที่เหมาะสมที่สุดไปทดสอบ

| การทดสอบ<br>ที่      | ระยะเวลาการทำ<br>ละลายสี(นาที) | ระยะเวลาการ<br>แห้งตัว(นาที) | ทดสอบคราบ | ทดสอบการ<br>หลุดลอก |
|----------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------|---------------------|
| 1                    | 9.85                           | 8.85                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| 2                    | 9.74                           | 8.43                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| 3                    | 9.40                           | 8.80                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| 4                    | 9.23                           | 9.37                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| 5                    | 8.42                           | 8.78                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| 6                    | 9.18                           | 9.20                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| เฉลี่ย               | 9.30                           | 8.91                         | ไม่มีคราบ | ไม่หลุดลอก          |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.51                           | 0.33                         | -         | -                   |

การคำนวณความพอเพียงของจำนวนตัวอย่างสามารถคำนวณได้จาก

$$n = (Z_{\alpha/2} \sigma / \epsilon)^2$$

- เมื่อ
- n คือจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม
  - $\sigma$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.51 และ 0.33
  - $\epsilon$  คือค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยฉบับนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5

ดังนั้นจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบคุณภาพของทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์  
แห่งเร็วไนโตรเซลลูโลส สูตรที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ตัวอย่างเป็นอย่างน้อย ในที่นี้ใช้ทั้งหมด 6 ตัวอย่างก็  
ถือว่าพอเพียง

ภาคผนวก ช  
ตารางการวิเคราะห์ความไว

ตารางผนวกที่ ๑๑ แสดงการคำนวณไวของผลตอบแทนที่ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงราคาของ  
แต่ละสารเคมีในช่วงราคาที่ลดลง 10% ถึงราคาที่เพิ่มขึ้น 15%

| ร้อยละของ<br>การเปลี่ยนแปลง<br>ราคาวัตถุดิบ | ระยะเวลาการทำละลาย (นาทีก)              |       |       |       |       |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
|   | เมื่อวัตถุดิบนั้นๆเปลี่ยนแปลงราคาต้นทุน |       |       |       |       |
|   | TOL                                     | MEK   | ACT   | IPA   | MET   |
| -10   | 8.68                                    | 9.61  | 9.56  | 9.91  | 9.88  |
| -5  | 9.10                                    | 9.78  | 9.89  | 9.92  | 9.90  |
| 0   | 9.46                                    | 9.95  | 9.95  | 9.94  | 9.91  |
| 5   | 9.79                                    | 9.84  | 9.94  | 9.98  | 9.92  |
| 10  | 9.87                                    | 9.58  | 9.95  | 9.99  | 9.95  |
| 15  | 9.92                                    | 9.36  | 9.95  | 9.82  | 9.98  |
|   | ระยะเวลาการแห้งตัว (นาทีก)              |       |       |       |       |
|   | เมื่อวัตถุดิบนั้นๆเปลี่ยนแปลงราคาต้นทุน |       |       |       |       |
| -10   | 7.16                                    | 9.05  | 8.55  | 9.36  | 9.37  |
| -5  | 8.08                                    | 9.41  | 8.52  | 9.35  | 9.36  |
| 0   | 8.76                                    | 9.34  | 9.34  | 9.34  | 9.35  |
| 5   | 9.22                                    | 8.52  | 9.34  | 9.33  | 9.35  |
| 10  | 9.37                                    | 8.55  | 9.34  | 9.32  | 9.34  |
| 15  | 9.35                                    | 8.57  | 9.34  | 9.04  | 9.33  |
|   | ราคาต้นทุน (บาทต่อกิโลกรัม)             |       |       |       |       |
|   | เมื่อวัตถุดิบนั้นๆเปลี่ยนแปลงราคาต้นทุน |       |       |       |       |
| -10   | 43.60                                   | 42.08 | 42.36 | 42.81 | 42.67 |
| -5  | 43.88                                   | 42.39 | 42.74 | 42.88 | 42.73 |
| 0   | 44.17                                   | 42.88 | 42.88 | 42.92 | 42.78 |
| 5   | 44.67                                   | 43.62 | 42.89 | 42.94 | 42.85 |
| 10  | 45.68                                   | 43.98 | 42.88 | 42.98 | 42.89 |
| 15  | 46.88                                   | 44.28 | 42.88 | 43.45 | 42.94 |

ตารางผนวกที่ ๒ แสดงการคำนวณไวของส่วนผสมอื่น ๆ ที่ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงราคาของ  
แต่ละสารเคมีในช่วงราคาที่ลดลง 10% ถึงราคาที่เพิ่มขึ้น 15%

| ร้อยละของการ<br>เปลี่ยนแปลง<br>ราคาวัตถุดิบ | วัตถุดิบที่มีราคาเปลี่ยนแปลงไป |              |              |             |             | ระยะเวลา<br>ทำละลายสี<br>(นาที) | ระยะเวลา<br>แห้งตัว<br>(นาที) | ราคา<br>(บาทต่อก.ก.) |
|---|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|
|   | TOL                            | MEK          | ACT          | IPA         | MET         |                                 |                               |                      |
| -10   | <u>60.00</u>                   | 20.93        | 13.81        | 4.63        | 0.64        | 8.68                            | 7.16                          | 43.60                |
| -5  | <u>60.00</u>                   | 16.36        | 16.13        | 3.59        | 3.92        | 9.10                            | 8.08                          | 43.88                |
| 0   | <u>60.00</u>                   | 12.38        | 17.76        | 2.85        | 7.02        | 9.46                            | 8.76                          | 44.17                |
| 5   | <u>60.00</u>                   | 26.20        | 3.80         | 2.49        | 7.51        | 9.79                            | 9.22                          | 44.67                |
| 10  | <u>60.00</u>                   | 30.00        | 0.00         | 2.40        | 7.60        | 9.87                            | 9.37                          | 45.68                |
| 15  | <u>60.00</u>                   | 30.00        | 0.00         | 2.25        | 7.75        | 9.92                            | 9.35                          | 46.88                |
| -10   | 60.00                          | <u>31.69</u> | 0.00         | 2.90        | 5.41        | 9.61                            | 9.05                          | 42.08                |
| -5  | 60.00                          | <u>30.00</u> | 0.00         | 2.71        | 7.29        | 9.78                            | 9.41                          | 42.39                |
| 0   | 60.00                          | <u>30.00</u> | 0.00         | 2.14        | 7.86        | 9.95                            | 9.34                          | 42.88                |
| 5   | 60.00                          | <u>0.00</u>  | 30.00        | 1.04        | 8.96        | 9.84                            | 8.52                          | 43.62                |
| 10  | 60.00                          | <u>0.00</u>  | 30.00        | 1.89        | 8.11        | 9.58                            | 8.55                          | 43.98                |
| 15  | 60.00                          | <u>0.00</u>  | 30.00        | 2.58        | 7.42        | 9.36                            | 8.57                          | 44.28                |
| -10   | 60.00                          | 0.00         | <u>30.00</u> | 1.95        | 8.05        | 9.56                            | 8.55                          | 42.36                |
| -5  | 60.00                          | 0.00         | <u>30.00</u> | 0.87        | 9.13        | 9.89                            | 8.52                          | 42.74                |
| 0   | 60.00                          | 30.00        | <u>0.00</u>  | 2.14        | 7.86        | 9.95                            | 9.34                          | 42.88                |
| 5   | 60.00                          | 30.00        | <u>0.00</u>  | 2.17        | 7.83        | 9.94                            | 9.34                          | 42.89                |
| 10  | 60.00                          | 30.00        | <u>0.00</u>  | 2.14        | 7.86        | 9.95                            | 9.34                          | 42.88                |
| 15  | 60.00                          | 30.00        | <u>0.00</u>  | 2.14        | 7.86        | 9.95                            | 9.34                          | 42.88                |
| -10   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | <u>2.27</u> | 7.73        | 9.91                            | 9.36                          | 42.81                |
| -5  | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | <u>2.26</u> | 7.74        | 9.92                            | 9.35                          | 42.88                |
| 0   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | <u>2.17</u> | 7.83        | 9.94                            | 9.34                          | 42.92                |
| 5   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | <u>2.06</u> | 7.94        | 9.98                            | 9.33                          | 42.94                |
| 10  | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | <u>2.01</u> | 7.99        | 9.99                            | 9.32                          | 42.98                |
| 15  | 60.00                          | 22.37        | 7.63         | <u>2.18</u> | 7.82        | 9.82                            | 9.04                          | 43.45                |
| -10   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.38        | <u>7.63</u> | 9.88                            | 9.37                          | 42.67                |
| -5  | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.32        | <u>7.68</u> | 9.90                            | 9.36                          | 42.73                |
| 0   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.26        | <u>7.74</u> | 9.91                            | 9.35                          | 42.78                |
| 5   | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.23        | <u>7.77</u> | 9.92                            | 9.35                          | 42.85                |
| 10  | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.14        | <u>7.86</u> | 9.95                            | 9.34                          | 42.89                |
| 15  | 60.00                          | 30.00        | 0.00         | 2.07        | <u>7.93</u> | 9.98                            | 9.33                          | 42.94                |

หมายเหตุ หลักที่มีตัวเลขที่ขีดเส้นใต้หมายถึงส่วนผสมในหลักนั้นมีการเปลี่ยนแปลงราคา