

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

หลังจากได้กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของขั้นตอนการศึกษาวิจัย ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 จากนั้นได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังกล่าวจนครบทุกกระบวนการ ซึ่งผลการศึกษาระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนและการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยของกระบวนการดังกล่าว โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ผลการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาค่าที่เหมาะสมดังนี้

4.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิโธกราฟี

4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV)

จากการทดลองเพื่อหาค่าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต โดยเริ่มจากการหาความสัมพันธ์จากกระบวนการเดิมของผลิตภัณฑ์ Specialty head แบบ Burnish head ABS ซึ่งเบื้องต้นพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน มีทั้งหมด 5 ปัจจัยหลักได้แก่ 1.พลังงานที่ใช้ในการฉายแสง 2.ความหนาของสารไวแสง 3.ขนาดของแม่แบบ 4.ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากาก 5.เวลาในการล้างสารไวแสง จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต คือ 1.พลังงานที่ใช้ในการฉายแสง 2.ความหนาของสารไวแสง 3.ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากาก และ 4.เวลาในการล้างสารไวแสง จะเห็นจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือปัจจัยทั้งหมดนี้ส่งผลต่อการสร้างลวดลาย และจากรูปที่ 4.1 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

1.การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ จะเห็นว่ากราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติของผลตอบค่ามิติวิกฤต และค่าความหนาของสารไวแสงหลังจากการล้างสารไวแสงออก มีแนวโน้มของข้อมูลที่ได้เป็นแนวตรง ไม่มีแนวโน้มการกระจายตัวหรือการแตกกลุ่มขึ้น ถือว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองเหมาะสม

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยการ ใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูป 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่ามีการกระจายของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยการ ใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองของค่าผลตอบค่าผลตอบค่ามิติวิกฤต และค่าความหนาของสารไวแสงหลังจากการล้างสารไวแสงออก ที่ได้จากการทดลองพบว่า มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลตอบมิติวิกฤต (CD)

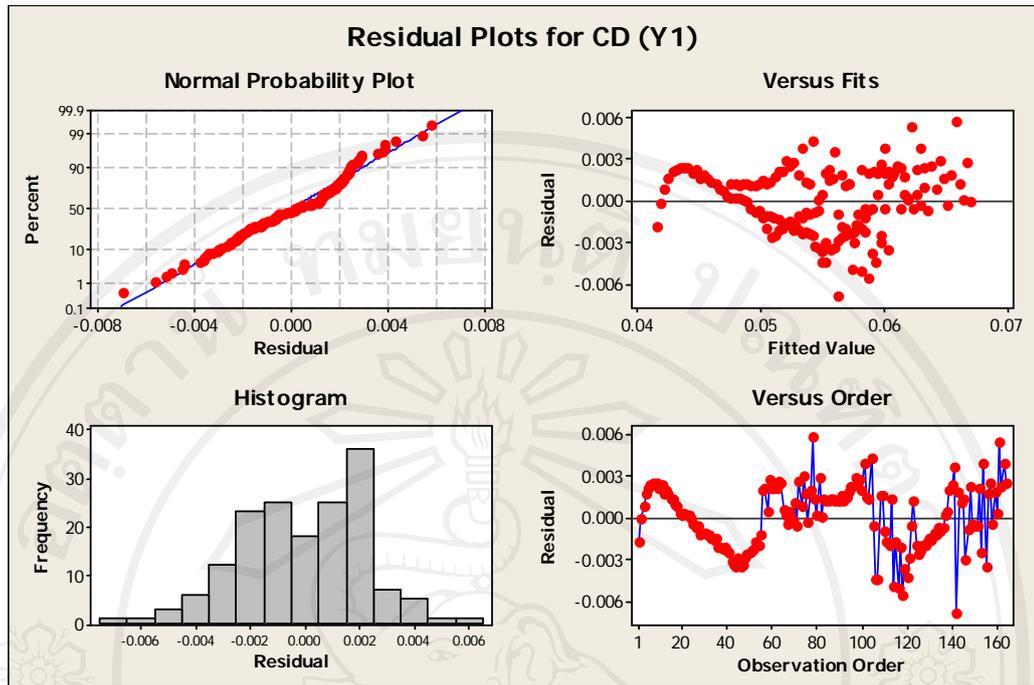
The regression equation is

$$CD (Y_1) = 0.0303 + 0.000190 \text{ Thickness Before} - 0.000193 \text{ Focus} + 0.000114 \text{ Develop (cycle)} + 0.000003 \text{ Energy}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.0302833	0.0009212	32.87	0.000
Thickness Before	0.00018951	0.00001586	11.95	0.000
Focus	-0.00019260	0.00002537	-7.59	0.000
Develop (cycle)	0.00011450	0.00000860	13.31	0.000
Energy	0.00000318	0.00000015	21.00	0.000

S = 0.00229780 R-Sq = 87.6% R-Sq (adj) = 87.3%

โดยที่ Y_1 คือ ผลตอบของมิติวิกฤต



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงส่วนตกค้างของผลการทดลองค่า CD

ตาราง 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลตอบความหนาของสารไวแสงหลังจากการล้างสารไวแสงออก

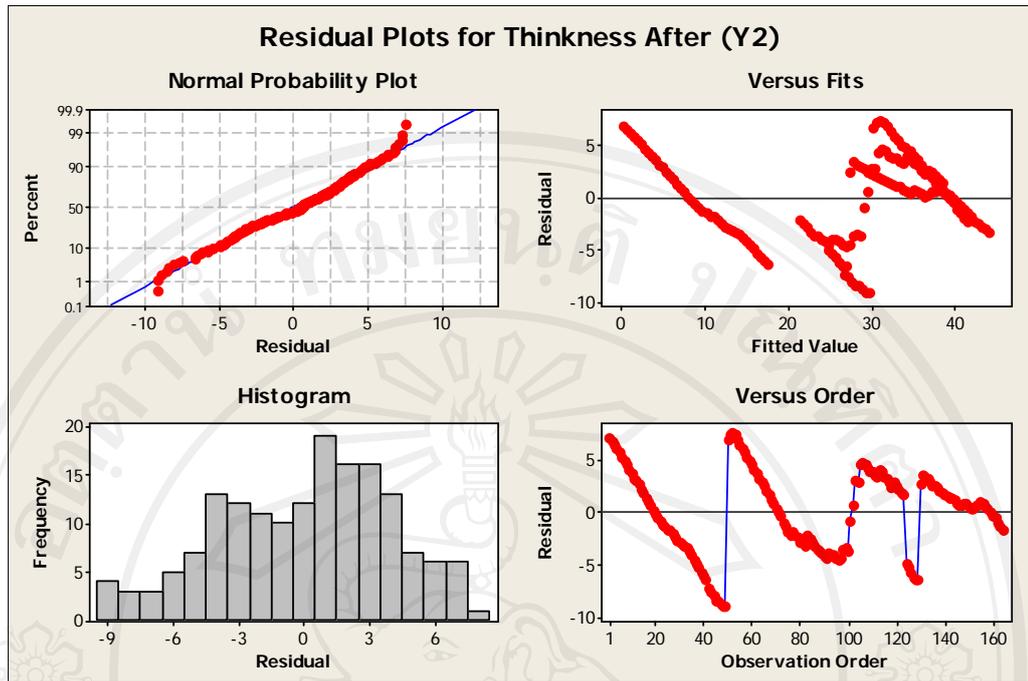
The regression equation is

$$\text{Thinkness After } (Y_2) = -12.5 + 0.662 \text{ Thinkness Before} - 0.0995 \text{ Focus} + 0.0918 \text{ Deverlop(cycle)} + 0.00431 \text{ Energy}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-12.464	1.603	-7.77	0.000
Thinkness Before	0.66215	0.02760	23.99	0.000
Focus	-0.09954	0.04416	-2.25	0.026
Deverlop (cycle)	0.09180	0.01497	6.13	0.000
Energy	0.0043118	0.0002639	16.34	0.000

S = 3.99896 R-Sq = 90.0% R-Sq (adj) = 89.7%

โดยที่ Y_2 คือ ผลตอบของค่าความหนาของสารไวแสงหลังจากการล้างสารไวแสงออก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงส่วนตกค้างของผลการทดลองค่าความหนาหลังจากการล้างสารไวแสง

จากผลการทดลองเบื้องต้น จะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต มีอยู่ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ 1.พลังงานที่ใช้ในการฉายแสง 2.ความหนาของสารไวแสง 3.ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากาก และ 4.เวลาในการล้างสารไวแสง ซึ่งสังเกตเห็นจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้ผลการทดลองนี้สามารถเชื่อถือได้ที่ระดับนัยสำคัญ 95% และจากกราฟแสดงส่วนตกค้างของผลตอบทั้งสอง จะเห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้อง

4.1.2 ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

เมื่อเราทำการทดลองโดยใช้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนและจากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญทางด้านลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า จากปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตจะเหลือเพียง 2 ปัจจัย เนื่องจากปัจจัยระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากากเรากำหนดให้มีค่าคงที่และจากค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการฉายแสงเป็นพลังงานที่สูง มีมุมการเบี่ยงเบนที่ต่ำ ซึ่งมีมุมอยู่ที่ 0.3 rad ส่งผลน้อยมากหรือแทบจะไม่ส่งผลเลยสำหรับปัจจัยระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากาก และเวลาในการล้างสารไวแสง ซึ่งในการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออกสำหรับการใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งเมื่อถูกฉายแสงด้วยรังสีเอกซ์แล้ว ส่วนที่ถูกฉายจะกลายเป็นเพอริเมอร์ถาวรเมื่อนำไปล้างแล้วจะไม่

ส่งผลต่อโครงสร้างที่อาบรังสี นั่นคือถึงจะแช่ชิ้นงานในน้ำยาล้างสารไวแสงไว้นานเพียงใดก็ไม่ส่งผลต่อโครงสร้าง เราจะดูเพียงว่าชิ้นงานถูกล้างออกหมดแล้วโดยการส่องดูจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ดังรูปที่ 3.30 เราจึงเหลือปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน 2 ปัจจัย คือ 1.พลังงานในการอาบรังสีเอกซ์ และ 2.ค่าความหนาของสารไวแสง SU-8 และจากการนำชิ้นงานทำการกัดที่เครื่องกัด RIE ซึ่งได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้าง Burnish head ABS คือ ระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน ทำให้เราได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ 1.พลังงานในการอาบรังสีเอกซ์ 2.ค่าความหนาของสารไวแสง SU-8 และ 3. ระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน

4.1.3 ผลการทดลองการหาค่า Selectivity

การหาค่า Selectivity เป็นการหาค่าอัตราส่วนระหว่างความสามารถของการกัดสารไวแสงและการกัดชิ้นงาน (AITiC) เพื่อให้ได้ค่าความหนาที่สามารถทนต่อการกัดโดยเครื่อง RIE ซึ่งจะได้ AITiC ที่มีความลึกเท่ากับ 30 μm ตามมาตรฐานของ Burnishing head เนื่องจาก หากเราใช้ความหนาของหน้ากากที่ไม่เหมาะสมกับการกัดจะทำให้เวลาทำการกัดหน้ากากที่ป้องกันชิ้นงานทะลุชิ้นงานเกิดความเสียหาย ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นก่อนเราจะหาค่าความหนาที่เหมาะสม เราต้องทำการหาค่า Selectivity ซึ่งงานวิจัยนี้เราจะหาค่า Selectivity ของหน้ากากที่ใช้ในการผลิตจริงจากบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย จำกัด) โดยจะมีหน้ากากแข็งอยู่ 2 ชนิดที่ใช้คือ สารไวแสง AZ P4620 และโครเมียม (Cr) เนื่องจากการวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำรังสีเอกซ์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งสารไวแสงที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับรังสีเอกซ์ คือ สารไวแสงชนิดลบ คือ SU-8 โดยการทดลองนี้ระบุการใช้สารไวแสง SU-8 เบอร์ 3050 เนื่องจากเราไม่ได้ต้องการสร้างความหนาที่มากเกินไปกว่า 500 μm สารไวแสง SU-8 ที่ใช้จึงมีความเหมาะสม นั่นคือ เราจะทำการหาค่า Selectivity ทั้งหมด 3 ชนิด คือ 1.สารไวแสง AZ P4620 2.โครเมียม (Cr) 3. สารไวแสง SU-8 3050 โดยผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.3 จากการใช้สมการการหาดังสมการที่ 3.1 และนำไปวัดความลึกด้วยเครื่อง Veeco ซึ่งแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการหาค่า Selectivity ของการกัดโดยเครื่องกัด RIE

Mask materials	Z_1	Z_2	Z_3	SR	T_s	Etched time (min)
Chromium	7.32	27.99	24.33	1 : 0.15	4.5	1140
SU-8 photoresist	223.4	118.6	30.25	1 : 4.46	133.8	1200
AZP4620 photoresist	25.36	21.09	0.62	1 : 7.88	236.4	35

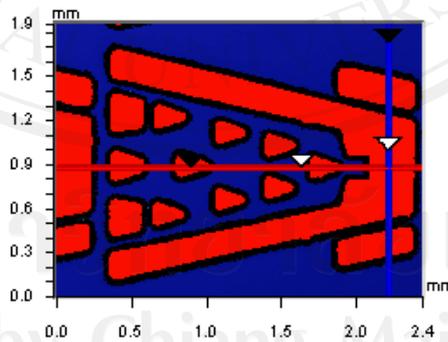
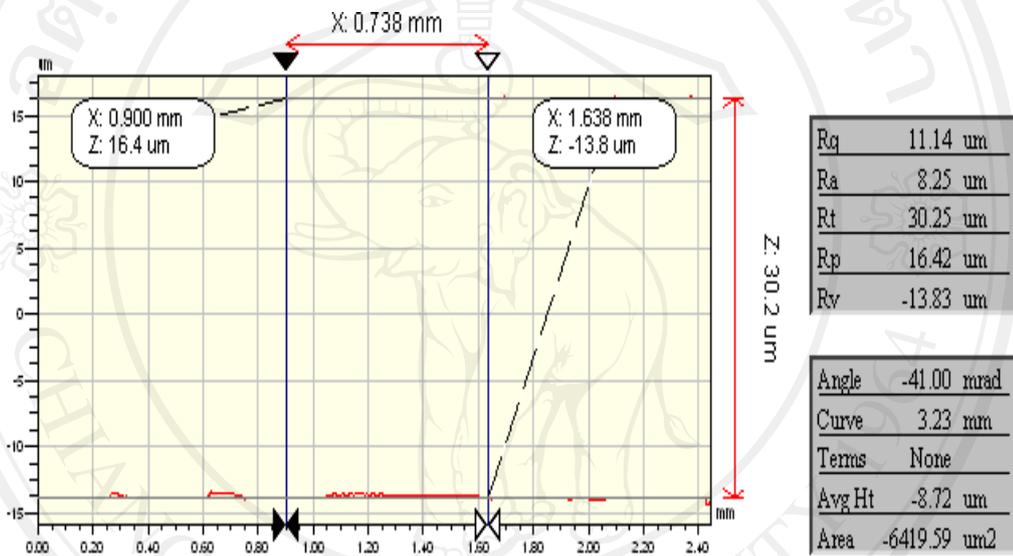
โดยที่ Z_1 คือ ความหนาของหน้ากาก (μm)

Z_2 คือ ความหนาของหน้ากากที่คงเหลือกับความลึกของชั้นงานที่ด้วยการกัดโดยเครื่อง RIE (μm)

Z_3 คือ ความลึกของชั้นงานหลังจากผ่านการกัด (μm)

SR คือ ค่า Selectivity

T_s คือ ค่าความหนาของหน้ากากที่เหมาะสมสำหรับความต้องการความลึกของชั้นงาน (AITiC) ที่ $30 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.3 ความหนาของหน้ากากแข็งที่วัดค่าจากเครื่อง Veeco

จากการทดลองจะเห็นว่า หากเราต้องการชั้นงานที่มีความลึก $30 \mu\text{m}$ เราต้องทำการเคลือบอย่างน้อยสารไวแสง AZ P4620 เท่ากับ $236.4 \mu\text{m}$ สารไวแสง SU-8 เท่ากับ $133.8 \mu\text{m}$ และโลหะโครเมียม เท่ากับ $4.5 \mu\text{m}$ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4 และได้ค่า R^2 ของทั้งสามสมการเท่ากับ 0.999 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลของตัวแปรทั้งสามมีความสัมพันธ์กันมาก ซึ่ง

ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของหน้ากอกแข็งแต่ละชนิดกับความลึกของAITiC หลังจากผ่านการกัดด้วยเครื่อง RIE ดังนี้สมการ 4.1 4.2 และ 4.3

$$y_1 = 38.74x - 35.36 \quad (4.1)$$

$$y_2 = 21.92x - 20.07 \quad (4.2)$$

$$y_3 = 0.737x - 0.675 \quad (4.3)$$

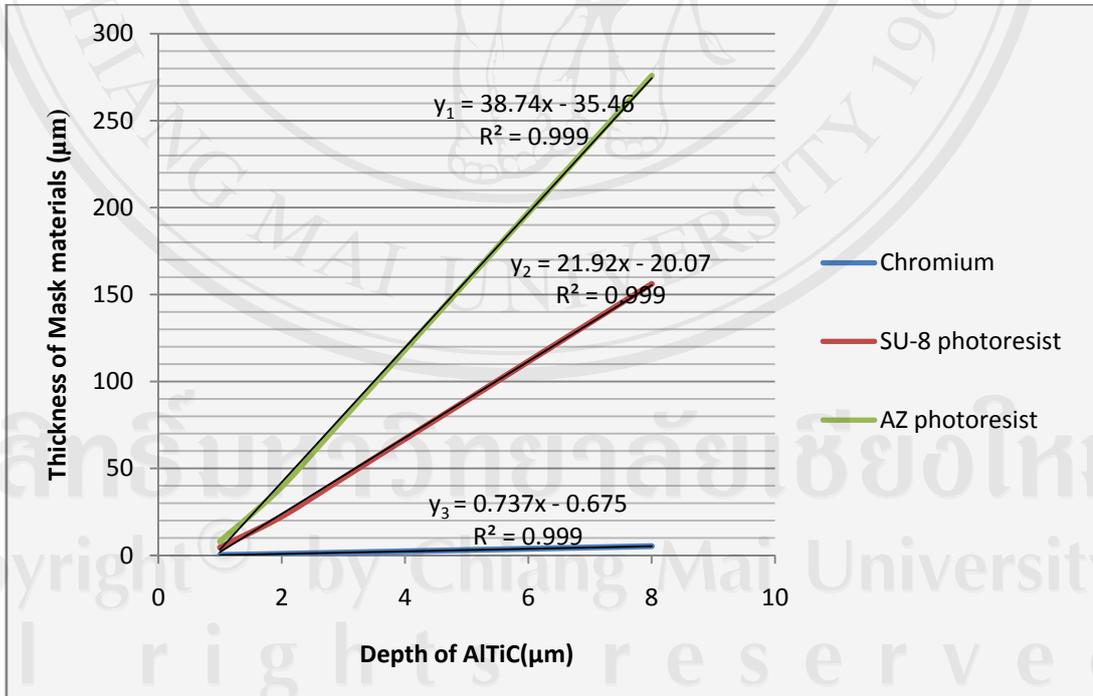
โดยที่ x คือ ค่าความลึกของแผ่น AITiC ที่เราต้องการ(μm)

y_1 คือ ค่าความหนาของสารไวแสง AZ ที่ถูกใช้เป็นหน้ากอกแข็ง (μm)

y_2 คือ ค่าความหนาของสารไวแสง SU-8 ที่ถูกใช้เป็นหน้ากอกแข็ง (μm)

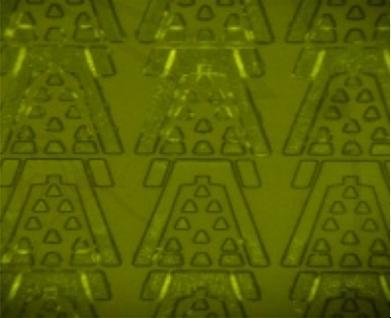
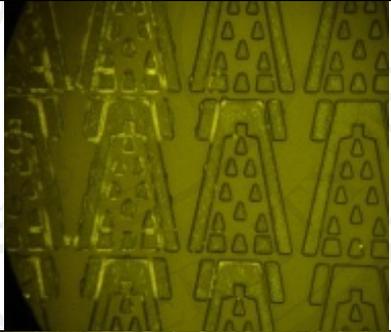
y_3 คือ ค่าความหนาของโลหะโครเมียมที่ถูกใช้เป็นหน้ากอกแข็ง(μm)

จากการทำวิจัยนี้เราจะใช้สารไวแสง SU-8 แทนการใช้โครเมียมที่ปัจจุบันใช้ในการผลิตจริง โดยเราจะใช้รังสีเอกซ์แทนรังสีอัลตราไวโอเลต แต่จากการทดลองการใช้สารไวแสง SU-8 ที่ความหนาเท่ากับ 133.8 μm พบว่าเกิดการกัดทะลุ โดยผู้วิจัยได้เซตค่าการทดลองไว้ที่ ความหนา 133.8 150 180 และ 200 เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมก่อนจะทำการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ซึ่งผลเป็นดังตารางที่ 4.4



รูป 4.4 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของหน้ากอกแข็งแต่ละชนิดกับความลึกของAITiC

ตารางที่ 4.4 แสดงภาพการกัดโดยเครื่อง RIE ตามความหนาของสารไวแสง SU-8

ความหนาของสารไวแสง SU-8 (μm)	ภาพแสดงผลหลังจากการกัดโดยเครื่อง RIE
133.8	
150	
180	
200	

จากตาราง 4.4 จะเห็นว่าค่าความหนาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการกัดจริงมีค่าอยู่ที่ 200 μm ขึ้นไป เนื่องจากมีค่าความ Error ของประสิทธิภาพของเครื่องกัด RIE ซึ่งจากการสอบถามวิศวกรและผู้ปฏิบัติงาน พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องกัดแต่ละเครื่องไม่เท่ากัน ซึ่งสำหรับการนำไปทำการทดลองโดยการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง ผู้ทดลองจะทำการกำหนดการใช้เครื่อง RIE เพียงเครื่องเดียว นั่นคือ RIE#2 เพื่อเป็นการควบคุมค่าความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น

และจากการเตรียมชั้นสเตรต สำหรับการใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งปัจจุบันการเตรียมชั้นสเตรตโดยการใช้สารไวแสง SU-8 คือ การหยอดสารไวแสงลงบนแผ่น AITiC แล้วทำการขัดหน้าผิวของสารไวแสง SU-8 ด้วยการขัดแบบน้ำ ซึ่งยังไม่มีเครื่องมืออัตโนมัติสำหรับการควบคุมความหนาของสารไวแสงให้มีความเรียบสม่ำเสมอทั้งระนาบ ทำให้ระนาบผิวของชิ้นงานมีความลาดเอียงซึ่งส่งผลทำให้เกิดความ Error ได้ ซึ่งในการขัดจะให้ความหนาลาดเอียงต่างกันไม่เกิน 50 μm ที่จะไม่ส่งผลต่อการนำไปอบรังสีเอกซ์

4.1.4 ผลการทดลองการหาค่าพลังงานที่นำมาใช้ในการฉายแสงด้วยการใช้รังสีเอกซ์

จากกระบวนการการฉายแสง ซึ่งแต่เดิมกระบวนการผลิต Burnishing head ในกระบวนการฉายแสงจะใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่เมื่อเราทำการเปลี่ยนกระบวนการฉายแสงด้วยการใช้รังสีเอกซ์แทนนั้น ผู้วิจัยต้องทำการทดลองก่อนเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมต่อการฉายแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการหาค่าที่เหมาะสมต่อการฉายแสงด้วยการใช้รังสีเอกซ์

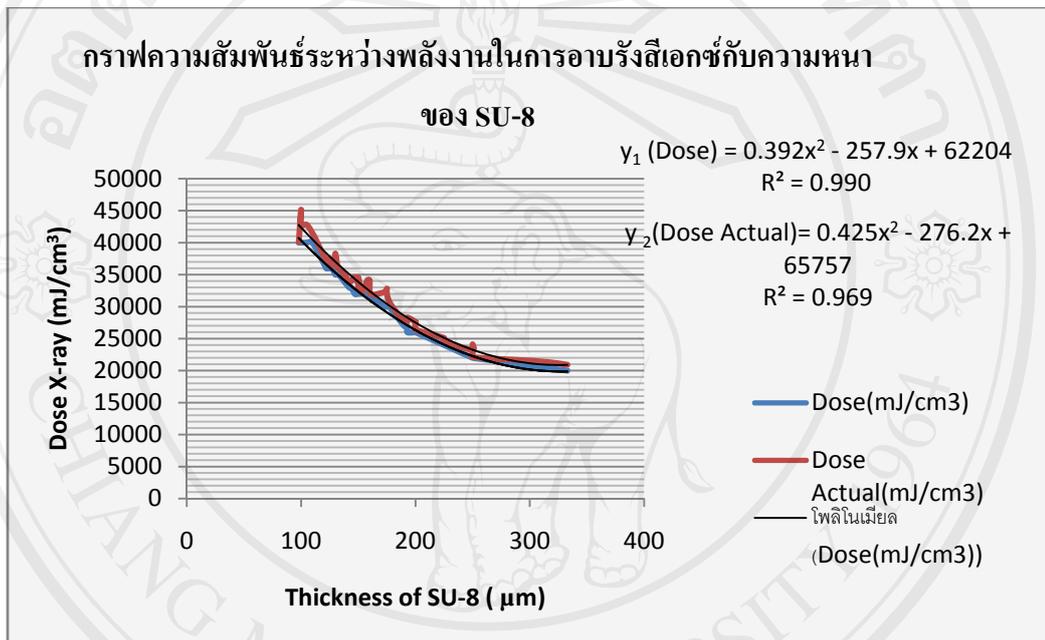
Thicknees (SU-8)	Dose (mJ/cm^3)	Dose Acture (mJ/cm^3)	Power(mA)
98	40000	40100	78.43
100	40000	45100	107.68
100	40000	42800	92.33
105	40000	42800	92.33
110	40000	41500	61.24
122	36000	37200	112.84
123	36000	37200	112.84
124	36000	37400	93.55
125	36000	36500	108.28
127	36000	37400	93.55
130	35000	36500	64.67
130	35000	38300	99.95
132	35000	36100	105.57
133	35000	36100	105.57
142	33000	34000	104.63
144	33000	34000	104.63

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการหาค่าที่เหมาะสมต่อการฉายแสงด้วยการใช้รังสีเอกซ์ (ต่อ)

Thicknees (SU-8)	Dose(mJ/cm ³)	Dose Acture(mJ/cm ³)	Power(mA)
147	32000	34600	111.14
150	32000	33600	97.03
150	32000	32600	103.88
150	32000	34600	111.14
153	32000	32300	96.73
158	32000	34100	116.74
160	32000	34100	116.74
160	32000	32400	122.95
162	31000	31900	85.15
165	31000	31900	85.15
173	30000	32300	91.72
175	30000	32800	110.73
175	30000	32300	91.72
177	30000	30800	63.5
190	27000	27700	65.42
193	27000	27700	101.77
193	26000	28300	105.73
200	26000	27600	115.96
200	26000	27300	104.07
200	26000	27600	96.44
200	26000	27000	94.17
200	26000	26400	92.17
225	24000	25100	99.73
225	24000	24600	90.04
250	22000	23200	105.18
250	22000	24100	107.94
250	22000	23300	104.03

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการหาค่าที่เหมาะสมต่อการฉายแสงด้วยการใช้รังสีเอกซ์ (ต่อ)

Thicknees (SU-8)	Dose(mJ/cm ³)	Dose Acture(mJ/cm ³)	Power(mA)
250	22000	22700	101.45
250	22000	22100	98.88
312	20500	21400	111.38
333	20000	20900	100.79



รูป 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบรังสีเอกซ์กับความหนาของสารไวแสง SU-8

จากรูป 4.5 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบรังสีเอกซ์กับความหนาของ SU-8 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 ดังนี้

$$y_1(\text{Dose}) = 0.392x^2 - 257.9x + 62204 \quad (4.4)$$

$$R^2(\text{Dose}) = 0.99$$

$$y_2(\text{Dose Actual}) = 0.425x^2 - 276.2x + 65757 \quad (4.5)$$

$$R^2(\text{Dose Actual}) = 0.969$$

โดยที่ x คือ ค่าความหนาของสารไวแสง SU-8 (μm)

y_1 คือ ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับอบรังสีเอกซ์ที่เป็นค่าประมาณ (mJ/cm^3)

y_2 คือ ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับอบรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจริงๆหลังจากฉายรังสีเรียบร้อยแล้ว (mJ/cm^3)

จากสมการ 4.4 เป็นสมการแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานประมาณที่เราใช้ในการอาบรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเป็นค่าที่ใช้ในการใส่ในโปรแกรมการฉายรังสีเอกซ์ ส่วนสมการ 4.5 จะเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานจริงที่ได้หลังจากการอาบรังสีแล้ว จากรูปที่ 4.6 และจากค่า R^2 ของทั้งสองสมการจะเห็นว่ามีความใกล้เคียง 1 แสดงว่าข้อมูลของตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมากและ จากการทดลองหาความหนาที่เหมาะสมกับการฉายแสง พบว่าค่าความหนาที่เหมาะสมมีค่าตั้งแต่ 200 μm ขึ้นไปดังตาราง 4.4 นั่นคือ เราจะได้ค่าที่ใช้ในการฉายแสงดังตาราง 4.6 ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานที่เหมาะสมต่อความหนาที่เหมาะสมดังสมการ 4.1 และ 4.2

ความหนา SU-8	ค่า y_1	ค่า y_2
200	26224	27517
225	23920.25	25127.63
250	22104	23269.5

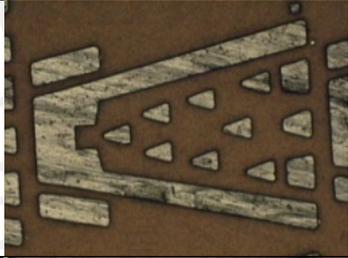
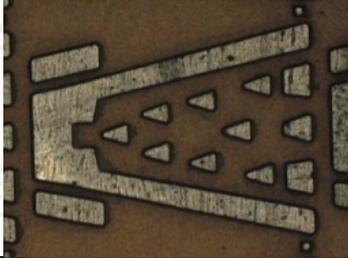
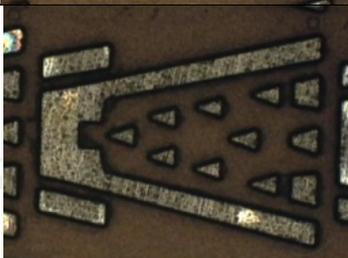
รูปที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการอาบรังสีเอกซ์

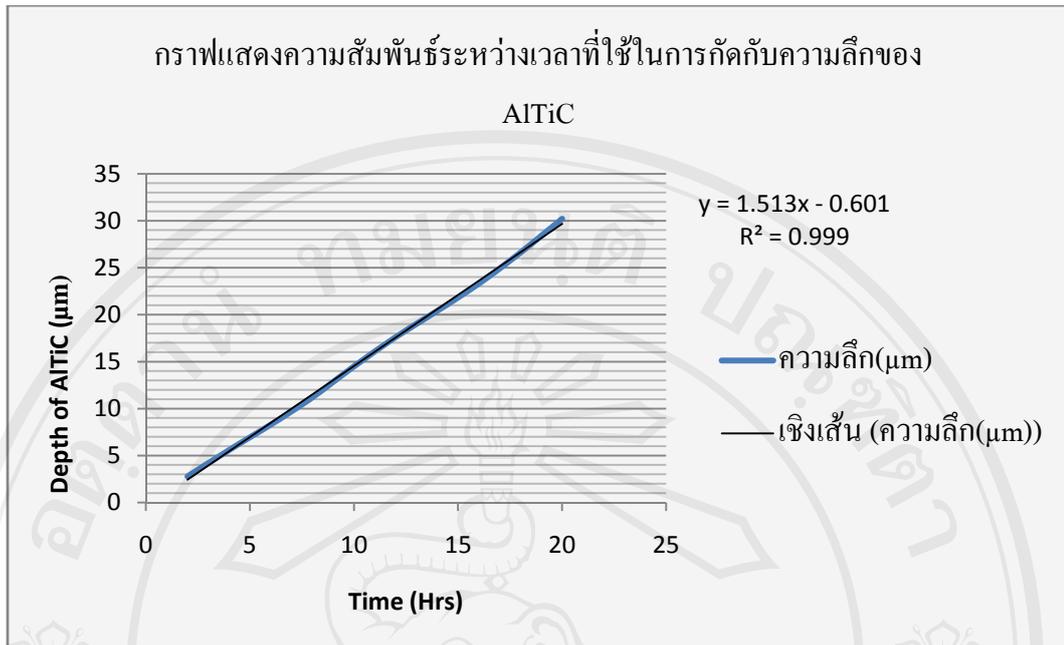
4.1.5 ผลการทดลองเพื่อหาค่ากระบวนการสร้างลายโดยเครื่องกัด RIE

การกรองปัจจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างลายโดยเครื่องกัด RIE โดยสอบถามจากวิศวกรที่ดูแลกระบวนการดังกล่าวและทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยด้วยตนเอง โดยการทดลองโดยใช้ปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อกระบวนการสร้างลวดลายโดยเครื่องกัด RIE ได้แก่ เวลา

ที่ใช้ในการกัดลาย ดังผลการทดลองดังตาราง 4.7 และสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.7 โดยปัจจัยอื่นๆเรากำหนดให้คงที่ดังได้กล่าวในบทที่ 3

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการกัดตามระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาในการกัด (hr)	ผลการกัด	ความลึกของ AlTiC (μm)
2		2.78
4		5.6
6		8.3
8		11.2
10		14.5



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดกับความลึกของ AITiC

จากรูป 4.7 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์เวลาที่ใช้ในการกัดกับความลึกของ AITiC มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งจากสมการจะเห็นว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.999 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ตัว แสดงว่า แปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมาก

$$y = 1.513x - 0.601 \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0.999$$

โดยที่ x คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการกัดโดยเครื่อง RIE (Hrs)

y คือ ค่าความลึกของชิ้นงานที่ได้ (Depth of AITiC; μm)

4.2 ผลการออกแบบการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยการใช้เทคนิคการทดลองตามหลักการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม (Classical DOE) โดยจากการทดลองจะพบว่ามี 3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการดังกล่าว คือ 1.พลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ 2.ค่าความหนาของสารไวแสงSU-8 และ 3.ระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) กับรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

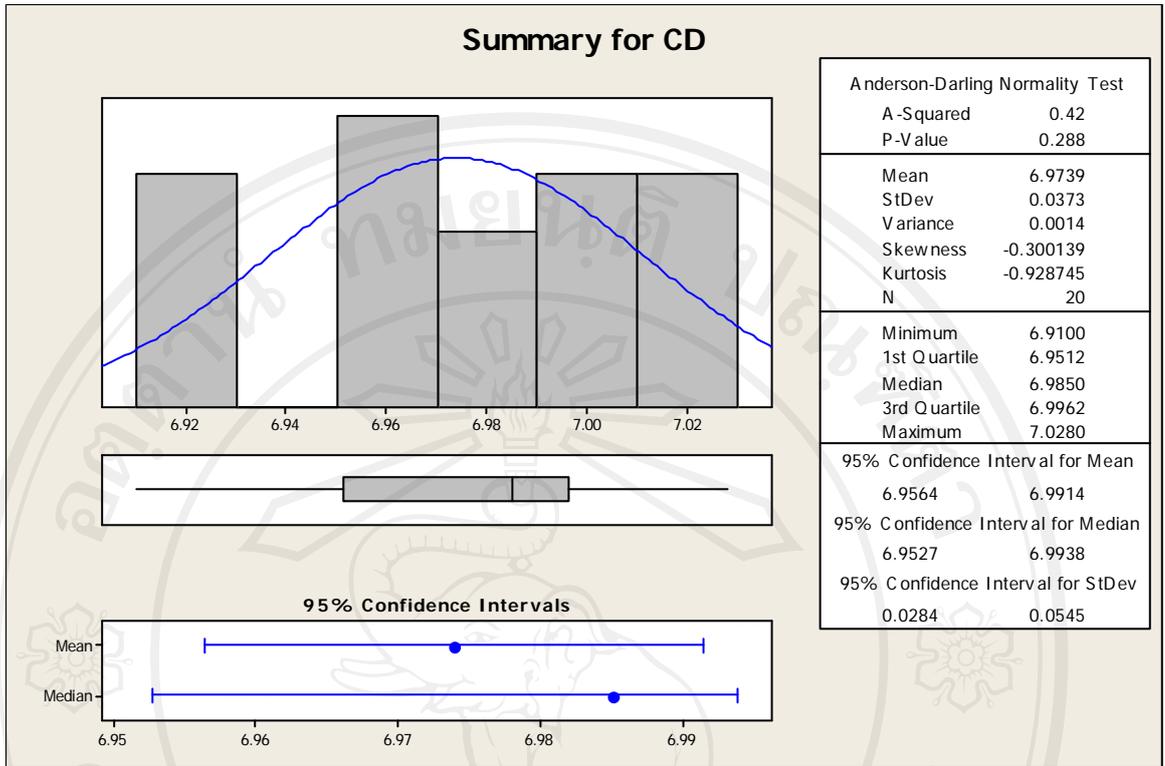
ปัจจัย	แสงอัลตราไวโอเล็ต	รังสีเอกซ์
The energy of photo exposure (mJ/cm ³): พลังงานที่ใช้ในการฉายแสง	มีผล	มีผล
Thickness of photoresist (um) : ความหนาของสารไวแสง	มีผล	มีผล
Exposed Gap (um)/Focus : ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหน้ากาก	มีผล	ไม่มีผล
Timing Developer : ระยะเวลาในการล้างสารไวแสง	มีผล	ไม่มีผล
Timing Etching : ระยะเวลาในการกัด	มีผล	มีผล

จากปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน จะพบว่ามี 3 ปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ 1.พลังงานในการอบรังสีเอกซ์ 2.ค่าความหนาของสารไวแสง SU-8 และ 3.ระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน จากนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง โดยกำหนดให้แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วยระดับต่ำและสูง โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์แสดงดังตารางที่ 3.2 ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และทำการทดลองที่จุด Center Point อีก 4 ครั้ง รวมทำการทดลองจำนวน 20 การทดลอง โดยมีผลตอบคือ ค่า CD (Critical Dimension) และความลึก (Etch Depth) แสดงดังตารางที่ 4.9

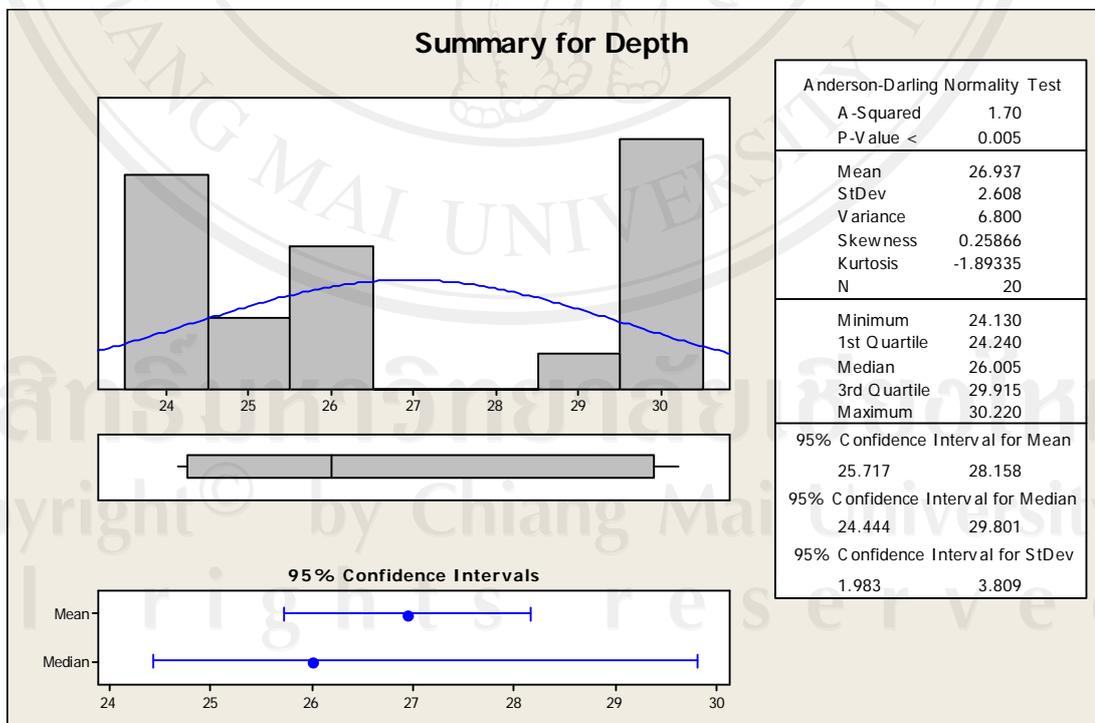
ตาราง 4.9 ผลการทดลอง Factorial Design ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ			
	The energy of photo exposure (mJ/cm ³):A	Thickness of photoresist (μm):B	Time Etching (Hrs):C	มิติวิกฤต (mil)		ความลึก (μm)	
				Run 1	Run 2	Run 1	Run 2
1	22000	200	16	7.022	7.020	24.17	24.15
2	26000	200	16	7.028	7.023	24.13	24.14
3	22000	250	16	6.926	6.921	24.23	24.27
4	26000	250	16	6.969	6.987	25.08	25.01
5	22000	200	20	6.997	6.994	29.48	29.81
6	26000	200	20	6.912	6.910	29.77	29.95
7	22000	250	20	6.988	6.983	30.15	30.03
8	26000	250	20	6.990	6.993	30.22	30.15
9	24000	225	18	6.951	6.952	25.77	25.83
10	24000	225	18	6.955	6.957	26.23	26.18

*mil คือ หน่วยวัดขนาดมีค่าเท่ากับ 1/1000 นิ้ว



รูป 4.8 กราฟแสดงผลการกระจายตัวของค่าผลมิติวิกฤต (CD)



รูป 4.9 กราฟแสดงผลการกระจายตัวของค่าผลตอบความลึก

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองตามแนวทางของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

4.3.1 การประมาณผลกระทบจากการทดลอง (Estimate Factor Effects)

ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์เชิงสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองนั้น ต้องประมาณผลกระทบของเทอมต่าง ๆ ตรวจสอบเครื่องหมาย และขนาดของผลที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าปัจจัยและอันตรกิริยาใดมีความสำคัญ แสดงดังตาราง 4.10 และ 4.11 โดยค่า Effect คือ ค่าผลกระทบของปัจจัยแต่ละตัว ค่า Coefficient คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยแต่ละตัว ค่า Sum Square Error of Coefficient คือ ค่าผลรวมของค่าความผิดพลาด และค่า P คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง และมีผลตอบของการทดลองคือ มิติวิกฤต และความลึก

4.3.2 การสร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form Initial Model)

แบบจำลองเริ่มต้นจะประกอบด้วยผลกระทบหลักและอันตรกิริยาร่วมของปัจจัยทั้งหมด จากค่าสัมประสิทธิ์ของการทดลองในตาราง 4.10 และ 4.11 ซึ่งคำนวณจากค่าผลกระทบของแต่ละปัจจัยหารด้วยสอง โดยสมการ \hat{y} คือ ค่าพยากรณ์ของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึก

4.3.3 การทดสอบทางสถิติ (Perform Statistical Testing)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญและความสำคัญของผลกระทบของปัจจัยของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Montgomery 2005) สัดส่วนของความแปรปรวน (F Distribution) จะนำมาใช้ในการตัดสินใจเกี่ยวกับความแปรปรวนของข้อมูล ตาราง 4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบมิติวิกฤต (CD)

Estimated Effects and Coefficients for CD (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		6.97894	0.001156	6036.44	0.000
B	-0.01862	-0.00931	0.001156	-8.05	0.000
C	-0.01612	-0.00806	0.001156	-6.97	0.000
A*B	0.03513	0.01756	0.001156	15.19	0.000
A*C	-0.03437	-0.01719	0.001156	-14.87	0.000
B*C	0.05387	0.02694	0.001156	23.30	0.000
A*B*C	0.01012	0.00506	0.001156	4.38	0.001
Ct Pt		-0.02519	0.002585	-9.74	0.000

ตาราง 4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบมิติวิกฤต (CD) (ต่อ)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
S = 0.00462454 PRESS = 0.00376316					
R-Sq = 99.11% R-Sq (pred) = 85.78% R-Sq(adj) = 98.46%					

ตาราง 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบความลึก (Etch Depth)

Estimated Effects and Coefficients for Depth (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		27.171	0.03775	719.68	0.000
A	0.270	0.135	0.03775	3.58	0.004
B	0.442	0.221	0.03775	5.86	0.000
C	5.547	2.774	0.03775	73.47	0.000
A*B	0.175	0.087	0.03775	2.32	0.041
A*B*C	-0.235	-0.118	0.03775	-3.11	0.010
Ct Pt		-1.169	0.08442	-13.84	0.000
S = 0.151019 PRESS = 6.74201					
R-Sq = 99.81% R-Sq (pred) = 94.78% R-Sq(adj) = 99.66%					

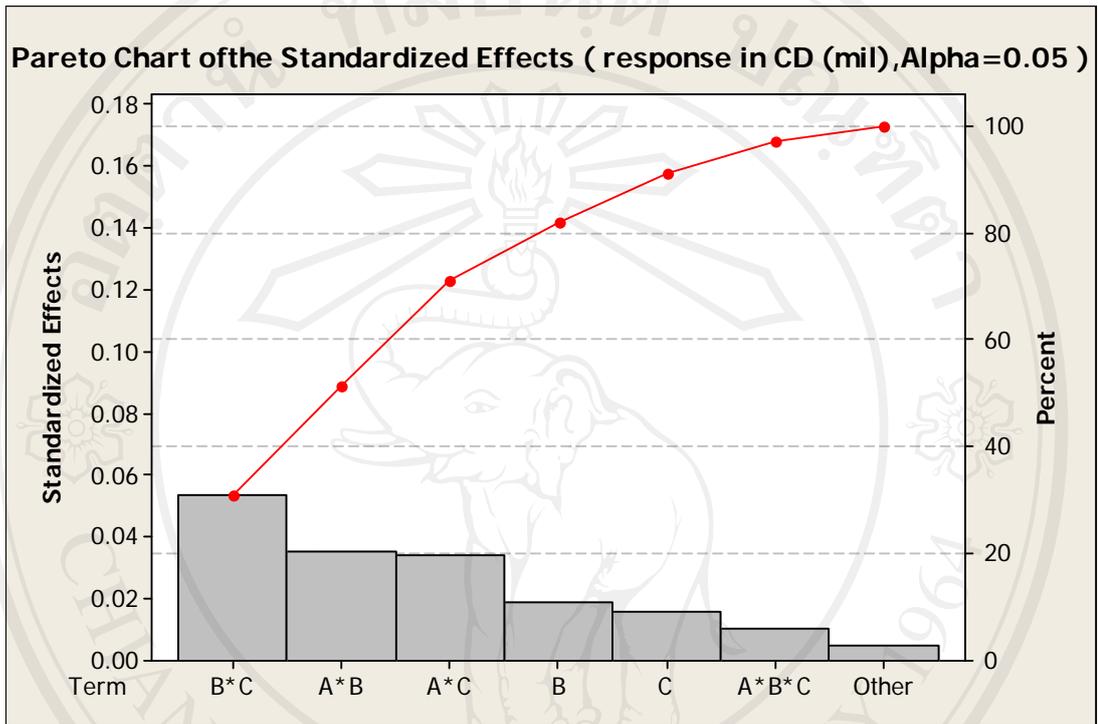
หมายเหตุ : เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ใน Minitab 15 สำหรับผลของตาราง 4.10 และ 4.11

4.3.4 แก้ไขแบบจำลอง (Refine Model)

เป็นการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ (Initial Model) เมื่อวิเคราะห์ผลจากตาราง 4.10 และ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟพารโตแสดงผลกระทบต่อผลตอบมิติวิกฤต และความลึก ดังรูป 4.10 และ 4.11 สามารถสรุปจากการทดลองดังกล่าว ได้ว่าผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อข้อมูลการเปลี่ยนแปลงมิติวิกฤตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามกฎของระบบการแบ่งลำดับ (Hierarchical Principle) (Montgomery 2005) ดังนี้ (รูป 4.10)

- 1) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ความหนาของสารไวแสง SU-8 กับระยะเวลาในการกัด (A*B*C)
- 2) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ กับ ความหนาของสารไวแสง SU-8 (A*B)
- 3) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ กับ ระยะเวลาในการกัด (A*C)

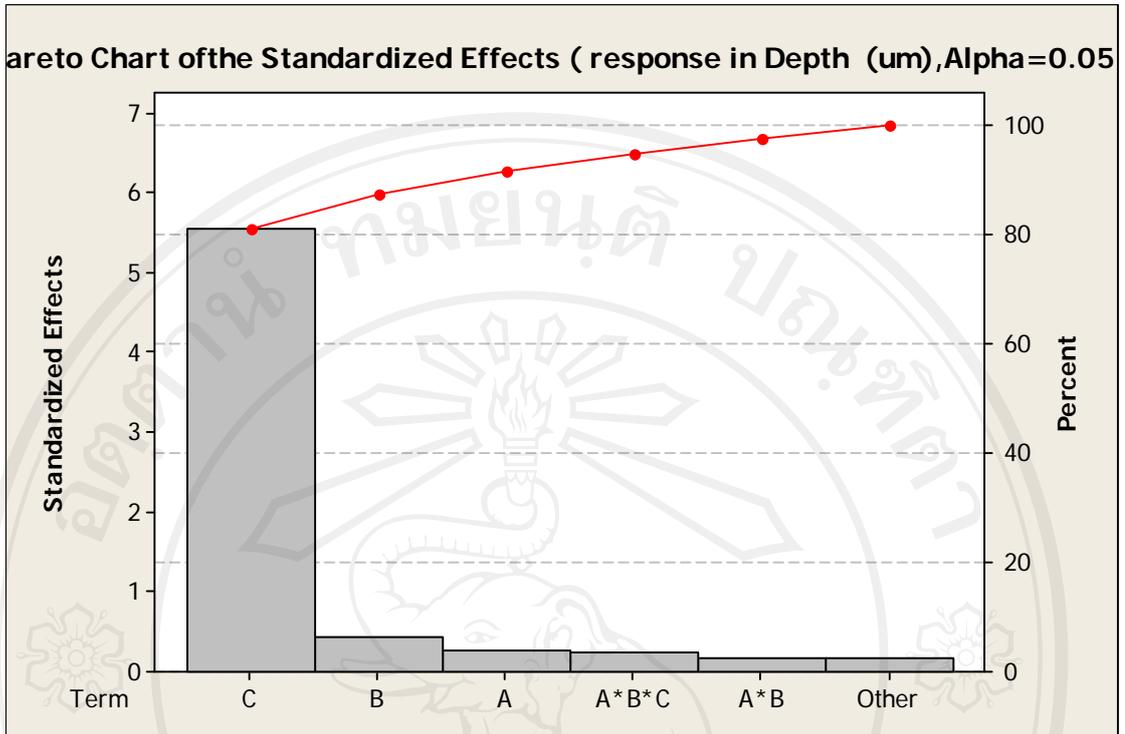
- 4) อันตรกิริยาระหว่าง ความหนาของสารไวแสง SU-8 กับ ระยะเวลาในการกัด (B*C)
- 5) ความหนาของสารไวแสง SU-8 (B)
- 6) ระยะเวลาในการกัด (C)



รูป 4.10 กราฟพาร์โตแสดงผลกระทบต่อผลตอบมีติวิกฤต

และผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความลึกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามกฎของระบบการแบ่งลำดับดังนี้ (รูป 4.11)

- 1) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ความหนาของสารไวแสง SU-8 กับ ระยะเวลาในการกัด (A*B*C)
- 2) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ กับ ความหนาของสารไวแสง SU-8 (A*B)
- 3) พลังงานในการอบรังสีเอกซ์ (A)
- 4) ความหนาของสารไวแสง SU-8 (B)
- 5) ระยะเวลาในการกัด (C)



รูป 4.11 กราฟพารेटโแสดงผลกระทบต่อผลความลึก

จากรูป 4.10 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อมิติวิกฤต คือ ความหนาของสารไวแสง SU-8 เวลาในการกัด โดยความหนาของสารไวแสง SU-8 มีผลต่อมิติวิกฤตมากที่สุด และอันตรกิริยาที่มีผลต่อมิติวิกฤต คือ อันตรกิริยาระหว่างความหนาของสารไวแสง SU-8 กับ ระยะเวลาในการกัด ($B*C$) มีผลต่อมิติวิกฤตมากที่สุด และอันตรกิริยาที่มีผลต่อมิติวิกฤต คือ อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ความหนาของสารไวแสง SU-8 กับ ระยะเวลาในการกัด อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ กับ ความหนาของสารไวแสง SU-8 และ อันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ กับ ระยะเวลาในการกัด ($A*C$)

จากรูป 4.11 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความลึก คือ ระยะเวลาในการกัด พลังงานในการอบรังสีเอกซ์ และความหนาของสารไวแสง SU-8 โดยระยะเวลาในการกัดมีผลต่อความลึกมากที่สุด และอันตรกิริยาที่มีผลต่อความลึก คือ อันตรกิริยาระหว่าง พลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ความหนาของสารไวแสง SU-8 และ ระยะเวลาในการกัด มีผลต่อความลึกมากที่สุดและอันตรกิริยาระหว่างพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ และ ความหนาของสารไวแสง SU-8

จากการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบทำให้สามารถได้สมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อข้อมูลการแปลงผล

ตอบมิติวิกฤต และความลึกของการกัด ได้ดังสมการ (4.7) และ (4.8) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละสมการได้จากตารางที่ 4.10 และ 4.11

$$y_1 = 6.97894 - 0.00931B - 0.00806C + 0.01756AB - 0.01719AC + 0.02694BC + 0.00506ABC \quad (4.7)$$

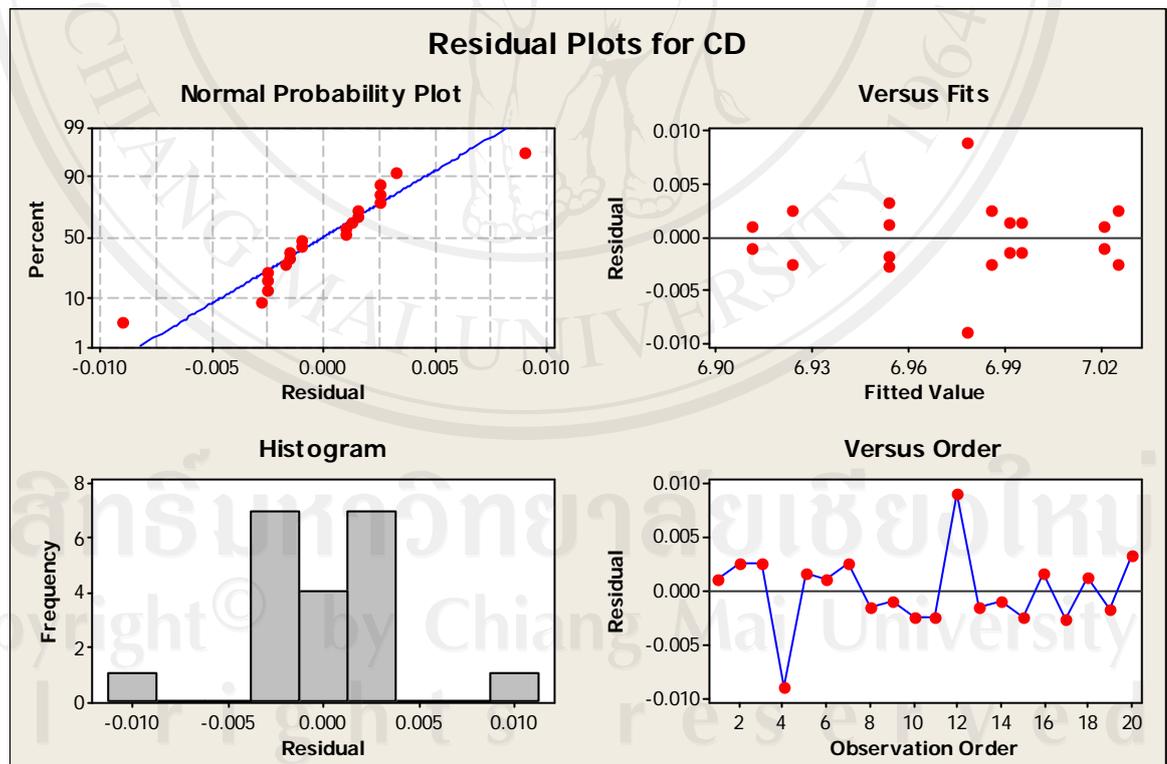
$$y_2 = 27.171 + 0.135A + 0.221B + 2.774C + 0.087AB - 0.118ABC \quad (4.8)$$

โดยที่ y_1 คือ ค่าผลตอบของมิติวิกฤต

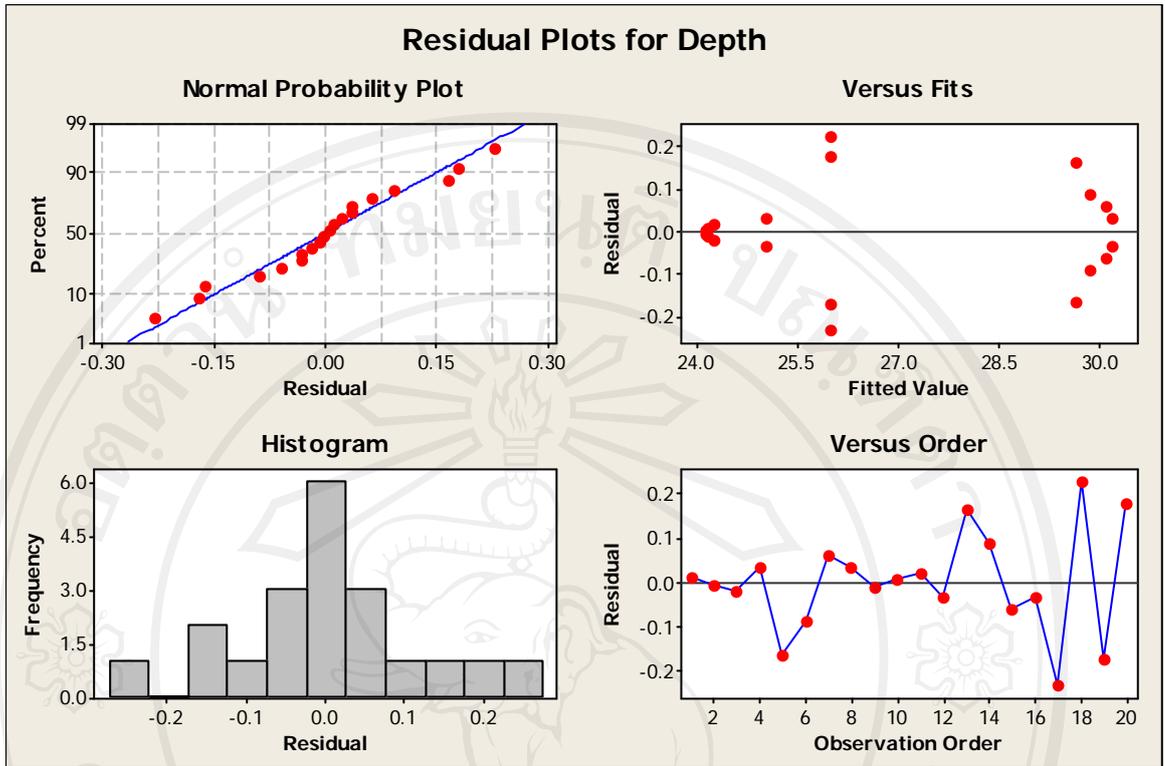
y_2 คือ ค่าผลตอบของความลึก AITiC

4.3.5 วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Analyze Residuals)

เพื่อที่จะตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้นดังสมการ (4.7) และ (4.8) และเป็น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4.12



รูป 4.12 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต



รูป 4.13 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบความลึก

จากรูป 4.12 และ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Residual Analysis for Model Adequacy) โดยเมื่อเราทดลองแทนค่าตัวแปรลงไปในแบบจำลองที่ได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อทำนายผลตอบนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพยากรณ์ (\hat{y}_i) ค่าจริง (y_i) และส่วนตกค้าง (e_i) ได้ดังสมการ (4.9) นี้

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.9)$$

โดยแบบจำลองดังกล่าวต้องตั้งอยู่บนสมมติฐานหลัก 3 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่

$$H_0 : \text{ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ}$$

$$H_1 : \text{ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ}$$

(4.10)

จากรูป 4.12 และ 4.13 ในส่วนของกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of the Residuals) พบว่าผลที่ได้จากการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของ

ส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใด ๆ ออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด มีแนวโน้มของการกระจายตัวเป็นแบบปกติ และสามารถอ้างอิงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และค่า P-Value ได้จากการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างด้วย Anderson-Darling Normality Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

กล่าวคือ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใด ๆ ออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างของข้อมูลมิติวิกฤต และอัตราการกัด มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ศูนย์

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากรูป 4.12 และ 4.13 ในส่วนของกราฟฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง (Histogram of the Residuals) พบว่ามีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในทุกช่วงของกราฟฮิสโตแกรม จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลมิติวิกฤต และอัตราการกัด มีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ

2. ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัยหรือขึ้นอยู่กับค่าพยากรณ์ของผลตอบ

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2 \\ H_1 : \text{at least one } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

จากรูป 4.12 และ 4.13 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Residuals Versus the Fitted Values) ของผลตอบของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้ม สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้าง และเนื่องจากส่วนตกค้างของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด มีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งมี P-value ค่าน้อยกว่า 0.05 สำหรับส่วนตกค้างของผลตอบข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด ตามลำดับ แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบความแปรปรวนคงที่ (Test for Equal Variances) ดังนั้นหมายความว่าค่าความแปรปรวนส่วนตกค้างไม่มีความคงที่ ดังสมมติฐานสมการ 4.11

3. ส่วนตกค้างต้องมีการกระจายตัวอิสระ (Independence Assumption) ไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลอง

จากรูป 4.12 และ 4.13 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus the Observation Order of the Data) ของข้อมูลมิติวิกฤต และความลึกของการกัด พบว่าจุดที่พล็อตไม่มีแนวโน้มใด ๆ จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง กล่าวคือ จากผลการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อของส่วนตกค้างของ

ข้อมูลการแปลงผลตอบโดยมิติวิกฤต และความลึกของการกัด สามารถสรุปได้ว่าผลตอบ มีส่วนตลก้างของข้อมูล มีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนคงที่ และ มีการกระจายตัวอิสระ

จากค่า P-Value ของการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติด้วยวิธีการของ Anderson-Darling ที่มีค่าเท่ากับ 0.288 และ 0.005 ในกราฟแสดงผลการกระจายตัวของข้อมูลค่ามิติวิกฤต และ อัตราการกัด ดังรูป 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่า ผลตอบมิติวิกฤตมีธรรมชาติการกระจายตัวปกติ ส่วนผลตอบความลึกของการกัดมีธรรมชาติการกระจายตัวไม่ปกติ

4.4 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD)

เนื่องจากการทำการทดลองตอนแรกผลปรากฏว่า ปัจจัยด้าน Curvature มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 นั้นหมายความว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลองอาจมีปัจจัยกำลังสองเกิดขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยได้กำหนดการทดลองเพิ่มเติมดังตารางที่ 4.12

ตาราง 4.12 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ	
	Dose X-ray (mJ/cm ³)	Thickness SU-8(μm)	Time Etching (Hrs)	CD (mil)	Depth (μm)
1	26000	250	20	7.011	30.22
2	24000	250	18	7.003	26.18
3	26000	200	16	7.028	24.13
4	24000	225	18	6.955	26.17
5	22000	250	16	7.021	24.25
6	22000	225	18	6.951	26.13
7	24000	225	18	6.955	26.25
8	22000	250	16	6.995	24.17
9	24000	225	16	6.998	24.13
10	26000	250	16	7.022	24.3
11	24000	225	18	6.952	25.84
12	26000	200	20	6.912	29.77
13	24000	225	20	7.022	30.02

ตาราง4.12 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการ ทดลอง มาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ	
	Dose X-ray (mJ/cm ³)	Thickness SU-8(μm)	Time Etching (Hrs)	CD (mil)	Depth (μm)
14	22000	250	20	7.013	30.15
15	24000	225	18	6.957	26.03
16	26000	250	20	7.004	30.15
17	22000	225	18	6.955	26.15
18	24000	225	18	6.951	25.99
19	24000	225	18	6.956	26.38
20	24000	225	18	6.953	25.95
21	26000	200	16	7.023	24.14
22	22000	250	20	7.002	30.03
23	26000	225	18	6.958	26.04
24	24000	225	18	6.954	26.18
25	22000	200	20	7.016	29.48
26	24000	200	18	6.963	26.34
27	24000	225	20	7.023	30.05
28	24000	225	16	7.001	24.21
29	26000	200	20	6.91	29.95
30	24000	225	18	6.956	26.28
31	22000	200	16	7.022	24.17
32	24000	250	18	6.948	26.2
33	24000	200	18	6.965	26.31
34	26000	225	18	6.953	26.35
35	24000	225	18	6.951	25.93
36	22000	200	16	7.02	24.15
37	24000	225	18	6.957	26.24
38	26000	250	16	7.019	24.27

ตาราง 4.12 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ	
	Dose X-ray (mJ/cm ³)	Thickness SU-8(μm)	Time Etching (Hrs)	CD (mil)	Depth (μm)
39	22000	200	20	6.994	29.81
40	24000	225	18	6.953	26.37

ในการพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่อค่าคุณภาพของชิ้นงานสำหรับข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึกของการกัด เมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.13 พบว่า พลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ค่าความหนาของ SU-8 และระยะเวลาในการกัด มีผลต่อมิติวิกฤตอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลตอบของความลึกของการกัด ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ คือ ค่าความหนาของ SU-8 และระยะเวลาในการกัด ส่วนค่าพลังงานในการอบรังสีเอกซ์ ไม่มีผลต่อความลึกของการกัด ดังตารางที่ 4.14

เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึกของการกัด ดังกราฟรูป 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ตาราง 4.13 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลตอบมิติวิกฤตสำหรับ CCD

Estimated Regression Coefficients for CD

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.95794	0.003954	1759.717	0.000
A	-0.00745	0.003637	-2.048	0.049
B	0.00925	0.003637	2.543	0.016
C	-0.01210	0.003637	-3.327	0.002
A*A	-0.00934	0.006936	-1.347	0.188
B*B	0.00616	0.006936	0.888	0.382
C*C	0.04741	0.006936	6.835	0.000
A*B	0.01275	0.004066	3.135	0.004
A*C	-0.01387	0.004066	-3.412	0.002
B*C	0.01462	0.004066	3.596	0.001

S = 0.0162659 PRESS = 0.0169820

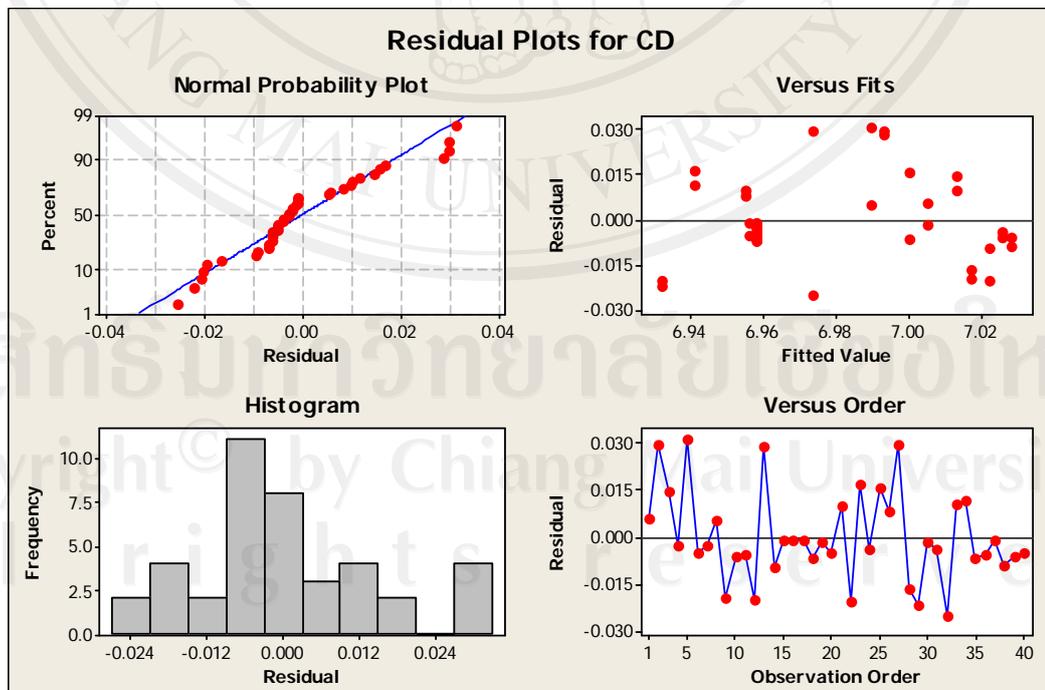
R-Sq = 81.97% R-Sq (pred) = 61.42% R-Sq (adj) = 76.56%

ตาราง 4.14 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลตอบความลึกสำหรับ CCD

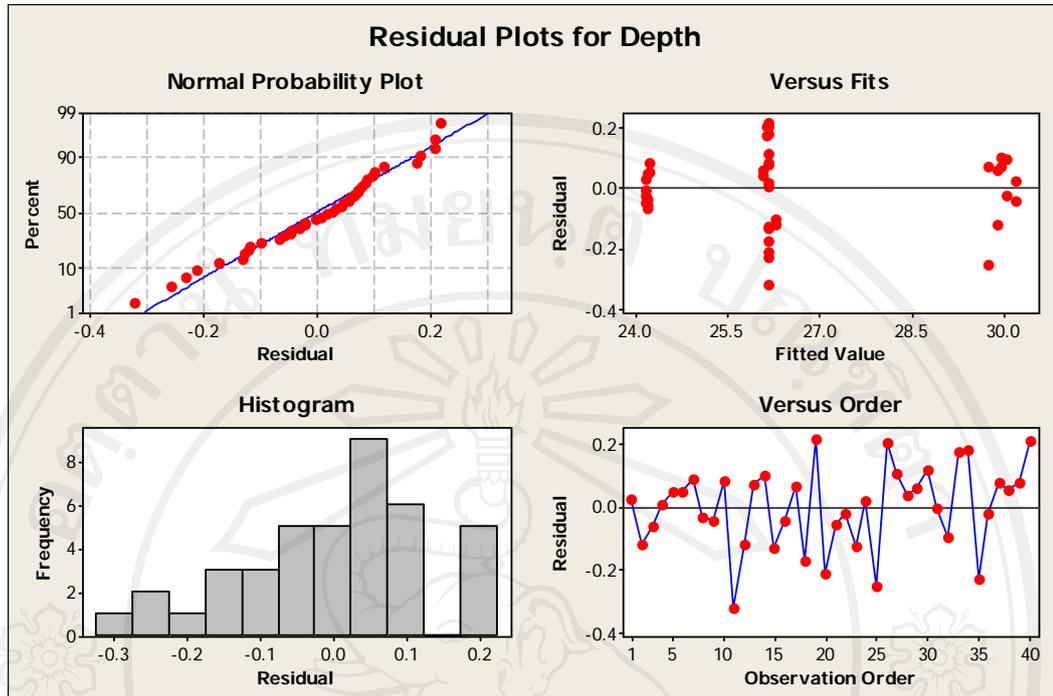
Estimated Regression Coefficients for Depth

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26.1615	0.03619	722.971	0.000
A	0.0415	0.03329	1.247	0.222
B	0.0835	0.03329	2.509	0.018
C	2.8855	0.03329	86.687	0.000
A*A	-0.0350	0.06347	-0.551	0.585
B*B	0.0550	0.06347	0.866	0.393
C*C	0.9000	0.06347	14.179	0.000
A*B	-0.0025	0.03722	-0.067	0.947
A*C	0.0325	0.03722	0.873	0.389
B*C	0.0713	0.03722	1.915	0.065

S = 0.148861 PRESS = 1.05889
R-Sq = 99.62% R-Sq (pred) = 99.40% R-Sq (adj) = 99.51%



รูป 4.14 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤตสำหรับ CCD



รูป 4.15 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบความลึกสำหรับ CCD

จากกราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมุม และความลึก พบว่าข้อมูลดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐานหลัก 3 ประการดังนี้

- 1) ข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Normality Assumption)

จากรูป 4.14 และ 4.15 ในส่วนของกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of the Residuals) พบว่าผลที่ได้จากการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างทั้งสองผลตอบมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใด ๆ ออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึก มีแนวโน้มของการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากรูป 4.14 และ 4.15 ในส่วนของกราฟฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง (Histogram of the Residuals) พบว่ามีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในทุกช่วงของกราฟฮิสโตแกรม จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึก มีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ

- 2) ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัยหรือขึ้นอยู่กับค่าพยากรณ์ของผลตอบ

จากรูป 4.14 และ 4.15 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Residuals Versus the Fitted Values) ของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึก พบว่าการกระจายตัวของส่วน

ตกค้างทั้งสองผลตอบไม่มีแนวโน้มอย่างชัดเจน สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย

3.) ส่วนตกค้างต้องมีการกระจายตัวอิสระ (Independence Assumption) ไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลอง

จากรูป 4.14 และ 4.15 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus the Observation Order of the Data) ของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึกพบว่าจุดที่พล็อตไม่มีแนวโน้มใด ๆ จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างทั้งสองผลตอบมีลักษณะการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง กล่าวคือ

จากผลการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อของส่วนตกค้างของข้อมูลสามารถสรุปได้ว่าผลตอบมีส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมิติวิกฤต และความลึก (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนคงที่ และ มีการกระจายตัวอิสระ

4.5 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับผลตอบทั้งสองแบบ

จากข้อมูลในตาราง 4.10 สามารถสร้างแบบจำลองของผลตอบมุม และความลึกได้ดังสมการ 4.12 และ 4.13 โดยค่าสัมประสิทธิ์ใช้ค่าตามตาราง 4.15 และ 4.16

$$y_1 = 6.95794 - 0.00745A + 0.00925B - 0.0121C + 0.04741C^2 + 0.01275AB - 0.01387AC + 0.01462BC \quad (4.12)$$

$$y_2 = 26.1615 + 0.0835B + 2.8855C + 0.9C^2 + 0.0713BC \quad (4.13)$$

โดยที่ y_1 คือ ผลตอบของมิติวิกฤต (CD)

y_2 คือ ผลตอบของค่าความลึก AITiC

ตาราง 4.15 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลตอบมิติวิกฤต (CD) ของค่าที่เหมาะสม

Estimated Regression Coefficients for CD

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.95794	0.003954	1759.717	0.000
A	-0.00745	0.003637	-2.048	0.049
B	0.00925	0.003637	2.543	0.016
C	-0.01210	0.003637	-3.327	0.002
C*C	0.04741	0.006936	6.835	0.000
A*B	0.01275	0.004066	3.135	0.004
A*C	-0.01387	0.004066	-3.412	0.002

ตาราง 4.15 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลตอบมิติวิกฤต (CD) ของค่าที่เหมาะสม
(ต่อ)

Term	Coef	SE Coef	T	P
B*C	0.01462	0.004066	3.596	0.001
S = 0.0162659		PRESS = 0.0169820		
R-Sq = 81.97% R-Sq (pred) = 61.42% R-Sq (adj) = 76.56%				

ตาราง 4.16 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการผลตอบความลึก (Depth)
Estimated Regression Coefficients for Depth

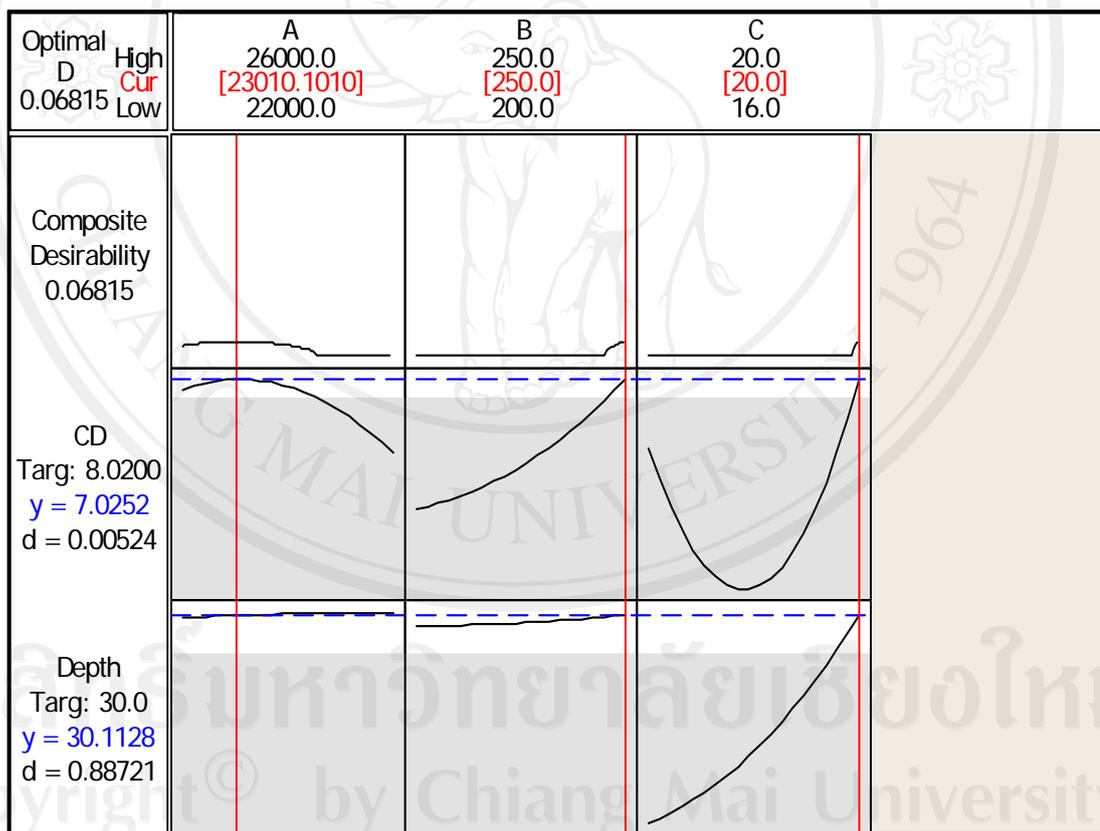
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26.1615	0.03619	722.971	0.000
B	0.0835	0.03329	2.509	0.018
C	2.8855	0.03329	86.687	0.000
C*C	0.9000	0.06347	14.179	0.000
B*C	0.0713	0.03722	1.915	0.065
S = 0.148861		PRESS = 1.05889		
R-Sq = 99.62% R-Sq(pred) = 99.40% R-Sq(adj) = 99.51%				

เมื่อได้แบบจำลองขั้นสุดท้ายสำหรับผลตอบทั้งสองแล้ว ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้การค้นหาแบบ Gradient Search ในโปรแกรม Minitab 15 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในการสร้างลวดลาย Burnishing head ABS ซึ่งทางบริษัทต้องการมิติวิกฤตขนาด 8.02 mil และความลึกขนาด 30 μm

หลังจากการค้นหาค่าตามค่าเป้าหมายในกระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในการสร้างลวดลาย Burnishing head ABS พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยสำหรับผลตอบ ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ และค่าความพึงพอใจโดยรวม แสดงดังตาราง 4.17

ตาราง 4.17 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับแต่ละผลตอบ (ที่มีมิติวิกฤต = 8.02 mil และความลึก = 30 μm)

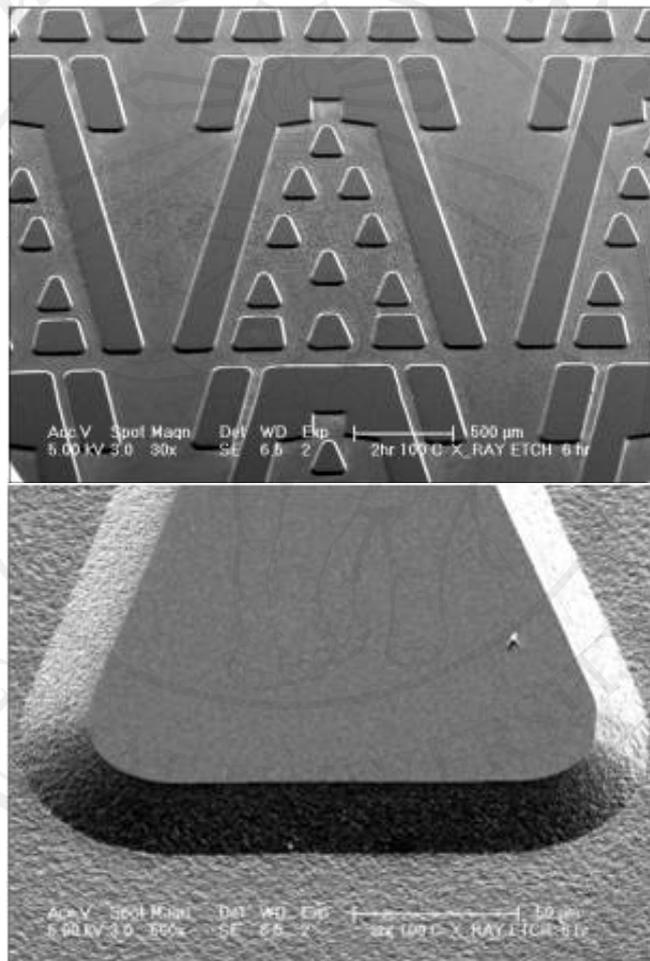
ผลตอบ	Dose X-ray (mJ/cm^3)	Thickness SU-8 (μm)	Etch Time (Hrs)	Desirability Value*	Composite Desirability
มิติวิกฤต = 7.0252 mil	23010.1	250	20	0.005235	0.068154
ความลึก = 30.1128 μm				0.887213	



รูป 4.16 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยสำหรับผลตอบมิติวิกฤต และความลึก

4.6 ทำการสร้างลวดลาย Burnishing head ABS ด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เพื่อยืนยันผลจากเงื่อนไขค่าที่เหมาะสมของแต่ละแบบจำลอง

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยจากการทดลองขั้นสุดท้าย จึงทำการปรับตั้งค่าปัจจัยตามค่าที่เหมาะสมที่สุดจากขั้น 4.5 ได้ผลลัพธ์ดังรูป 4.17



รูป 4.17 ภาพ SEM ของชิ้นงาน โดยวิธีการสร้างลวดลายด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิด

ซินโครตรอน ในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

โดยการทดลองยืนยันผลพบว่าเงื่อนไขระดับค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย (Exposure Dose = 23010.1 mJ/cm^3 , Thickness SU-8 = 250 µm และ Time Etching = 20 hrs) เมื่อนำไปทดลองใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนพบว่าค่ามิติวิกฤต และค่าความลึกของการกัด มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ คือผลที่ได้จากการทดลองด้วยสร้างลวดลายด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน วัดค่ามิติวิกฤตได้ 7.028 mil และความลึกได้ 30.02 µm แสดงดังตาราง 4.18 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณจากการหาเงื่อนไขที่ดี

ที่สุดคิดเป็น 0.04% ของผลตอบมิติวิกฤต และ 0.28% ของผลตอบความลึก และมีความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมาย คิดเป็น 12.37% ของผลตอบมิติวิกฤต และ 0.67% ของผลตอบความลึก

ตาราง 4.18 ค่ามิติวิกฤต และความลึกที่วัดได้จากผลลัพท์ที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

ผลตอบ	ค่าเป้าหมาย	ค่า Optimize	ค่าจากการทดลองจริง	ค่าคลาดเคลื่อนจากเป้าหมาย	ค่าคลาดเคลื่อน Optimize
มิติวิกฤต (mil)	8.02	7.0252	7.028	12.37%	0.04%
ความลึก (μm)	30	30.1128	30.2	0.67%	0.28%

4.7 ทำการวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของผลตอบทั้งสองแบบ

จากการทดลองตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่ามิติวิกฤตมีค่อนข้างสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเจาะวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีขั้นตอนแต่ละขั้นตอนที่อาจส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดดังกล่าว จึงได้ทำการวัดค่าแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลอง นั่นคือ 1. ช่วงการฉายแสงเสร็จแล้วทำการล้างสารไวแสงออก 2. ช่วงหลังการกัดชิ้นงานเสร็จ 3. ช่วงหลังการล้างสารไวแสงออกด้วยสารละลาย PG Remover ซึ่งผลเป็นดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 แสดงผลตอบค่ามิติวิกฤตตามช่วงการทดลอง 3 ช่วงการทดลอง

ช่วงการทดลอง	มิติวิกฤต (mil)	ความคลาดเคลื่อนจากเป้าหมาย (CD= 8.02)	Sigma < 0.08
1. ช่วงหลังการฉายแสง	6.998	12.74%	0.008
2. ช่วงหลังการกัด	7.012	12.57%	0.056
3. ช่วงหลังการล้างสารด้วย PG Remover	7.028	12.37%	0.065

จากตารางที่ 4.19 จะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในการสร้างลวดลาย Burnishing head ต้องทำการสร้างหน้ากากสำหรับกันรังสีเอกซ์โดยเฉพาะ ซึ่งขั้นตอนการสร้างได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1.4.1 ซึ่งสามารถวัดค่ามิติวิกฤต โดยได้ทำการวัดความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดจริง ได้ดังตาราง 4.20

ตารางที่ 4.20 แสดงค่ามิติวิกฤตของหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์และความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดจริง

ช่วงการทดลอง	มิติวิกฤต (mil)	ความคลาดเคลื่อน หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ (CD=6.968)	Sigma < 0.08
1. ช่วงหลังการฉายแสง	6.998	0.43%	0.008
2. ช่วงหลังการกัด	7.012	0.63%	0.056
3. ช่วงหลังการล้างสาร ด้วย PG Remover	7.028	0.86%	0.065

4.8 การศึกษาเปรียบเทียบหน้าฉากแข็งระหว่างสารไวแสง SU-8 สารไวแสง AZP4620 และโลหะโครเมียม

หน้าฉากแข็งจากสารไวแสง SU-8 ที่ถูกพิจารณานำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะถูกศึกษาเปรียบเทียบกับ หน้าฉากแข็งจากสารไวแสง AZP4620 และโลหะโครเมียม เนื่องจากสารไวแสง AZP4620 เป็นสารไวแสงชนิดบวกซึ่งสามารถจะถูกสร้างลวดลายและล้างออกได้ง่ายกว่า สารไวแสง SU-8 แต่สารไวแสง AZP4620 ไม่สามารถขึ้นลวดลายที่มีความหนาหลายๆได้ เพราะลวดลายที่ถูกสร้างจะผิเค็ยขึ้นไปจากลวดลายต้นแบบ ส่วนโลหะโครเมียม เป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการกัดลวดลาย ซึ่งถูกนำมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมอยู่แล้ว แต่เนื่องจากต้องใช้เวลาในการเคลือบที่ยาวนาน อีกทั้งสารเคมีที่ถูกนำมาใช้ในการกัดเอาโครเมียมออกมีราคาค่อนข้างสูง และไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาในการนำสารไวแสง SU-8 มาใช้เป็นหน้าฉากแข็งแทน โดยตั้งเงื่อนไขในการทดลองที่เหมือนกัน คือ ค่า CF_4 Flow Rate = 20 ± 1 sccm Chamber Pressure = 2 ± 0.1 mTorr และ Power = 250 ± 10 Watt และสิ่งที่แตกต่างกัน คือ ความหนาของหน้าฉากแข็งแต่ละชนิด ซึ่งจากการทดลองเราจะศึกษาผลตอบค่ามิติวิกฤต และค่ามุมของการกัด เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าเปรียบเทียบผลตอบค่ามิติวิกฤต และค่ามุมของการกัด จากการใช้หน้าฉากแข็งแต่ละชนิด

Mask materials	Wall angle	CD error	Sigma < 0.08
Chromium	65°	0.23%	0.008
SU-8 photoresist	44.8°	0.86%	0.065

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าเปรียบเทียบผลตอบค่ามิติวิกฤต และค่ามุมของการกัด จากการใช้น้ำกากแข็งแต่ละชนิด (ต่อ)

Mask materials	Wall angle	CD error	Sigma < 0.08
AZ photoresist	17.489°	8.05%	0.304

จากตารางที่ 4.22 พบว่าการใช้สารไวแสง SU-8 เป็นน้ำกากแข็งในการป้องกันการกัด ให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกับน้ำกากแข็งจากการใช้โลหะโครเมียม กล่าวคือ ให้ค่ามิติวิกฤตที่คลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน และค่า CD Sigma ได้ค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งแตกต่างกับการใช้สารไวแสง AZP4620 ซึ่งให้ผลตอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าค่ามาตรฐาน