

## บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

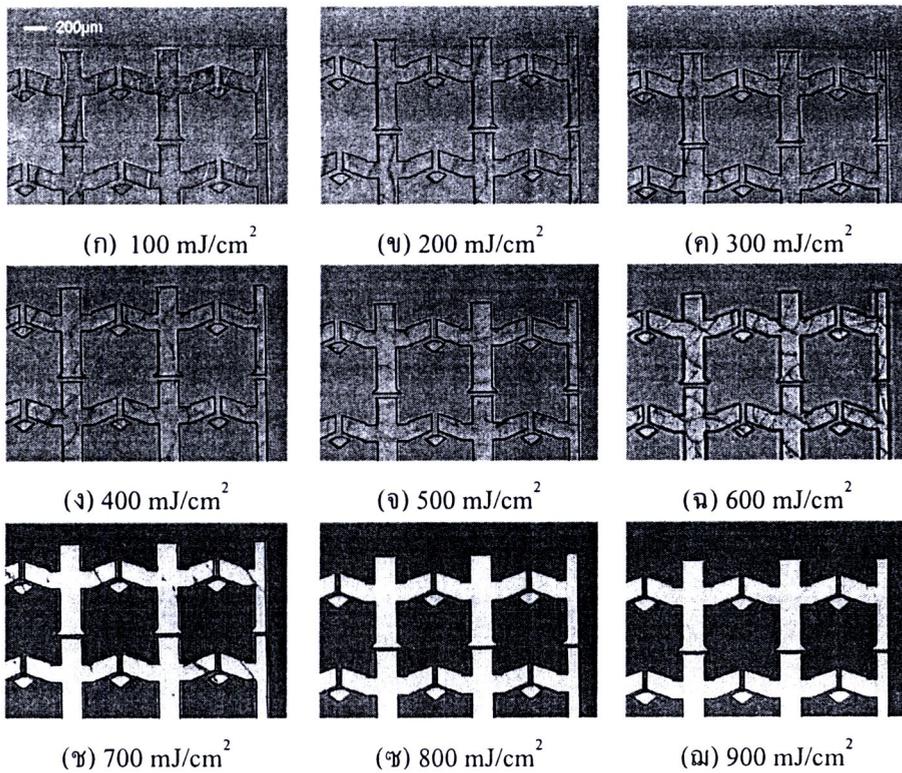
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากแต่ละการทดลอง โดยได้แสดงในรูปแบบของกราฟ ความสัมพันธ์ สมการถดถอย ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ และจากเครื่อง SEM รวมถึงการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.1 ผลของค่าพลังงานในการฉายแสงต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ภายหลังการล้างลาย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวเออร์เบร็วริงนั้นสามารถสร้างได้โดยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้ง โดยใช้ค่าพลังงานในการฉายแสงที่ต่างกันเป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ภายหลังการล้างลายแล้ว และเปรียบเทียบความแตกต่างของผลจากการฉายแสงครั้งเดียวและจากการฉายแสงหลายครั้ง

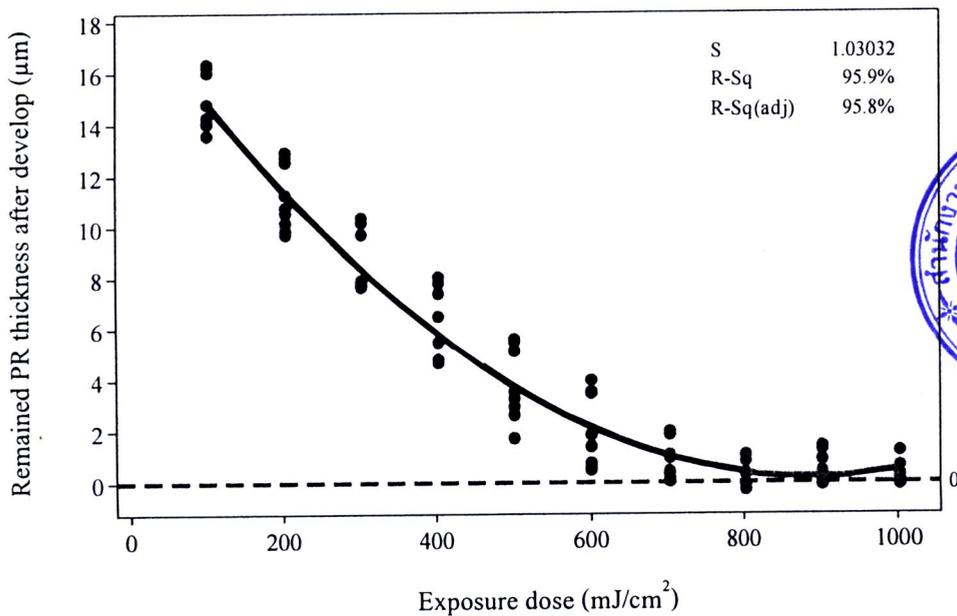
#### 4.1.1 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือหลังการล้างลาย จากการฉายแสงครั้งเดียว

จากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงตั้งแต่ 100 ถึง 900 mJ/cm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ฉายลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหนา 20 ไมโครเมตร พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ ภายหลังการล้างลายด้วยน้ำยา KOH เป็นเวลา 120 วินาทีนั้น จะมีค่าลดน้อยลง เมื่อค่าพลังงานในการฉายแสงเพิ่มมากขึ้น โดยจากรูปที่ 4.1 (ก) ถึงรูปที่ 4.1 (ข) พบว่าที่ค่าพลังงานในการฉายแสงต่ำกว่า 800 mJ/cm<sup>2</sup> จะมีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลงเหลืออยู่ในส่วนที่ถูกฉายแสง แต่เมื่อค่าพลังงานในการฉายแสงมีค่าตั้งแต่ 800 mJ/cm<sup>2</sup> ขึ้นไป ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสงจะละลายไปกับน้ำยาล้างลาย จนหมด เรียกว่าค่าพลังงานขีดเริ่ม (Dose-to-Clear หรือ  $E_0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) และรูปที่ 4.1 (ฉ)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของพื้นผิวแอร์แบริง ที่ผ่านการฉายแสงเพียงครั้งเดียว ด้วยค่าพลังงานที่แตกต่างกัน

เมื่อนำค่าความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบถดถอย (Regression plot) เทียบกับค่าพลังงานในการฉายแสง พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงพลังงานการฉายแสงตั้งแต่  $0 \text{ mJ/cm}^2$  ถึง  $1,000 \text{ mJ/cm}^2$  ได้ด้วยสมการที่ 4.1 โดยมีค่าประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Predicted  $R^2$  adjusted หรือ  $R^2_{adj}$ ) ซึ่งเป็นค่าความถูกต้องในการทำนายความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ที่ 95.8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ  
หลังการล้างลายกับค่าพลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว

$$TI_{PR, Dev} = 18.81 - 0.04176E + 0.000023E^2, \quad 0 \leq E \leq 1,000 \text{ mJ/cm}^2 \quad (4.1)$$

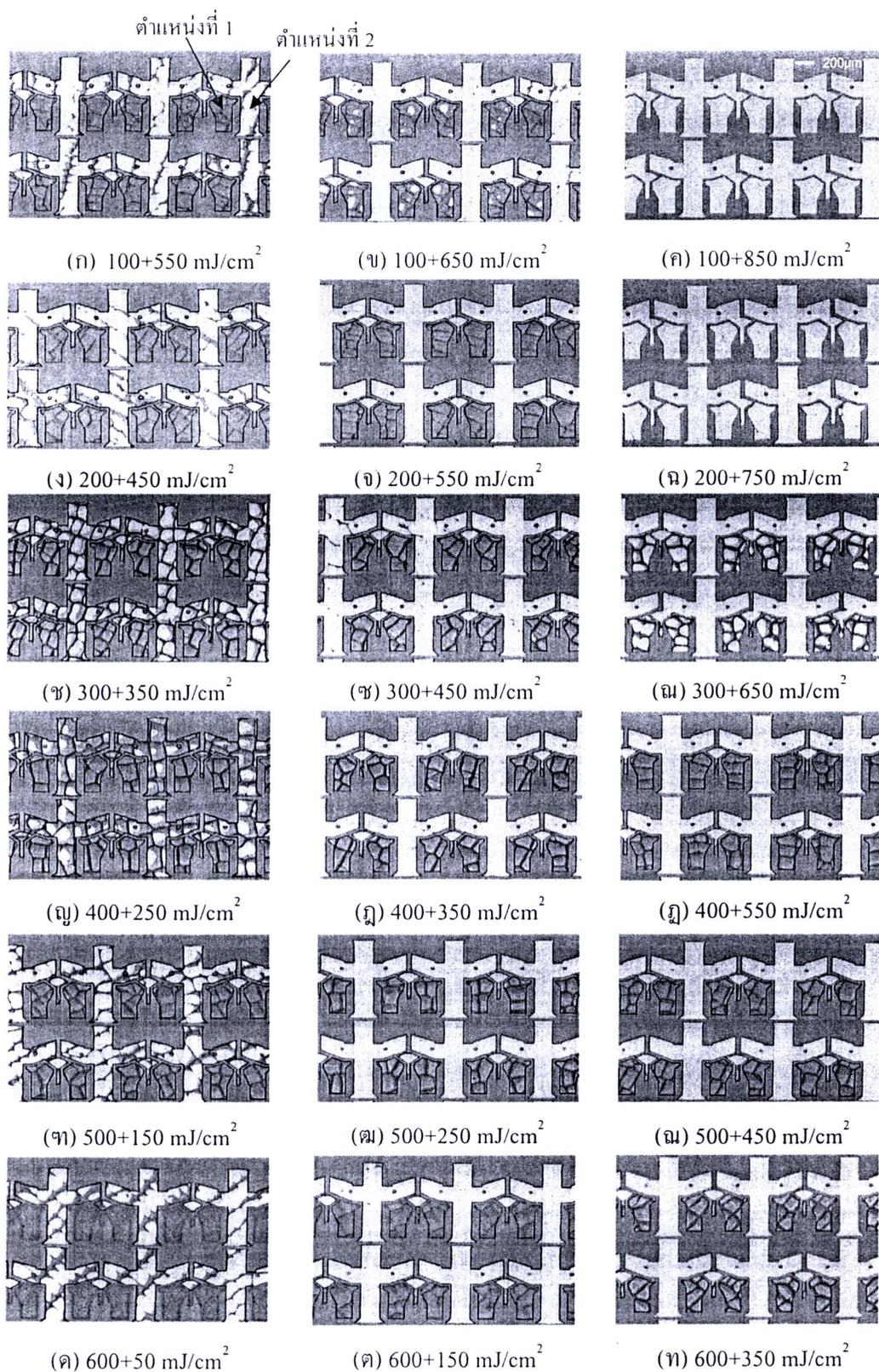
เมื่อ  $TI_{PR, Dev}$  แทน ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ( $\mu\text{m}$ )  
 $E$  แทน ค่าพลังงานในการฉายแสง ( $\text{mJ/cm}^2$ )

#### 4.1.2 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือหลังการล้างลาย จากการฉายแสงหลายครั้ง

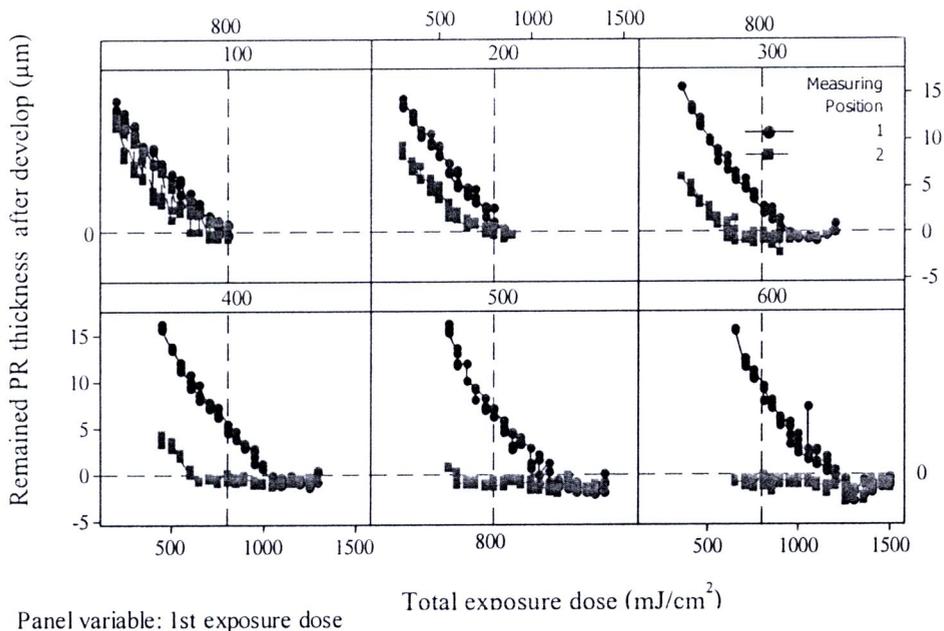
ในการสร้างโครงสร้างของพื้นผิวแอร์เบริงสามมิติ แบบ 2 ระดับ โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดไบนารี (Binary Intensity Mask หรือ BIM) ร่วมกับการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง ระหว่างการฉายแสงสองครั้งนั้น จะต้องศึกษาผลของค่าพลังงานรวม (Cumulative dose หรือ  $E_c$ ) ที่เกิดจากการฉายแสงสองครั้ง กับความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายเพียงครั้งเดียว โดยเมื่อพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 (First exposure dose หรือ  $E_1$ ) ที่ 100 ถึง 600  $\text{mJ/cm}^2$  และค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 (Second exposure dose หรือ  $E_2$ ) ที่ 50 ถึง 850  $\text{mJ/cm}^2$  พบว่าเมื่อค่าพลังงาน  $E_c$  มีค่าน้อยกว่า 750  $\text{mJ/cm}^2$  จะยังคงมีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลงเหลืออยู่ในส่วนที่ถูกฉายแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 หลักที่ 1 และหลักที่ 2 แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าพลังงาน  $E_c$  ที่มากกว่า 750  $\text{mJ/cm}^2$  จะไม่มีส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลงเหลืออยู่ในบริเวณที่ถูกฉายแสง 2 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 หลักที่ 3 จึงกล่าวได้ว่า ค่าพลังงานขีดเริ่ม ( $E_0$ ) สำหรับการฉายแสง 2 ครั้ง บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหนา 20 ไมโครเมตร คือ 750  $\text{mJ/cm}^2$  ที่เวลาการล้างลายเท่ากับ 120 วินาที

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งแรก ( $E_1$ ) นั้น ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในกระบวนการฉายแสงสองครั้ง กล่าวคือ การฉายแสงที่ใช้ค่าพลังงาน  $E_1$  สูง จะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือมีค่าน้อยกว่าการฉายแสงที่ใช้ค่าพลังงาน  $E_1$  ต่ำ ถึงแม้ว่าค่าพลังงานรวมจะมีค่าเท่ากันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวเออร์เบริงสามารถสร้างได้ด้วยการฉายแสงหลายครั้ง โดยความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ภายหลังจากล้างลาย สามารถควบคุมด้วยค่าพลังงานการฉายแสงครั้งที่ 1 ซึ่งจากข้อมูลในรูปที่ 4.4 ซึ่งค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีค่าติดลบนั้น เนื่องมาจากในการคำนวณนั้นจะใช้ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ 20 ไมโครเมตร แต่ในบางชิ้นงานนั้น ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเริ่มต้นนั้น มีค่ามากกว่า 20 ไมโครเมตร จึงทำให้ข้อมูลดังกล่าวมีค่าติดลบ

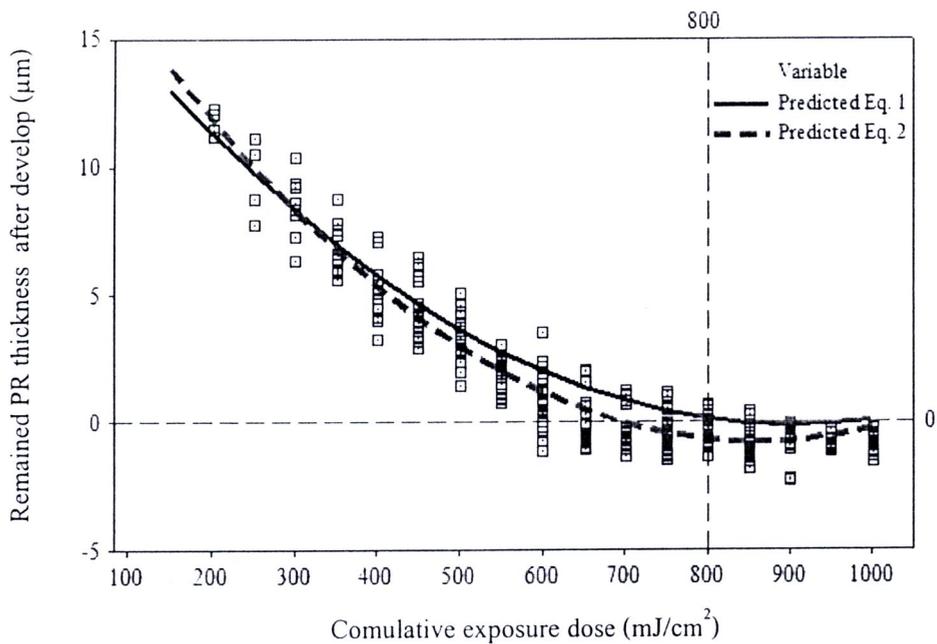
เมื่อนำค่าความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังจากล้างลาย ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบถดถอย (Regression plot) เทียบกับค่าพลังงานในการฉายแสง พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบถดถอยดังกล่าว เทียบกับค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ที่ได้จากการฉายแสงเพียงครั้งเดียว จะพบว่ากราฟทั้งสองเส้นจะไม่ซ้อนทับกัน จึงกล่าวได้ว่าไม่สามารถใช้สมการถดถอยของการฉายแสงครั้งเดียวมาทำนายความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่จากการฉายแสงสองครั้งได้ โดยสมการถดถอยสำหรับการฉายแสงสองครั้งในช่วงพลังงานการฉายแสงรวม ( $E_c$ ) ตั้งแต่ 0  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  ถึง 1,000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  จะแสดงในสมการที่ 4.2 โดยมีค่าประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Predicted  $R^2$  adjusted หรือ  $R^2_{adj}$ ) ซึ่งเป็นค่าความถูกต้องในการทำนายความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ที่ 91.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเครื่อง optical microscope (OM) จากด้านบนของพื้นผิวเอิร์แบริง  
 ที่ผ่านการฉายแสงสองครั้งที่ค่าพลังงานฉายแสงต่างกัน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มฯ ที่เหลือในบริเวณที่ถูกฉายแสงเพียงครั้งเดียว และบริเวณที่ถูกฉายแสงสองครั้ง

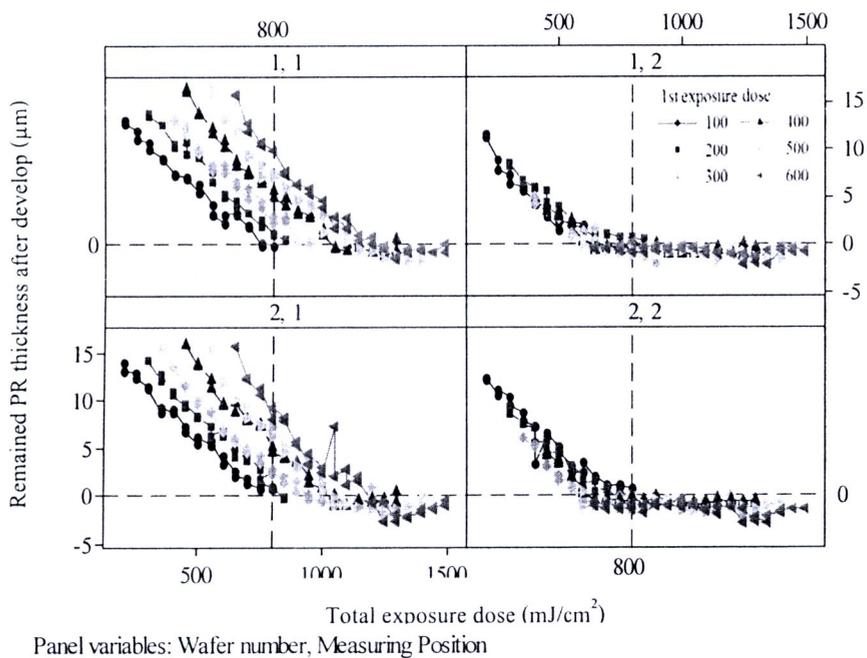


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มฯ ที่เหลือภายหลังการล้างลายสำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียวและการฉายแสงสองครั้ง

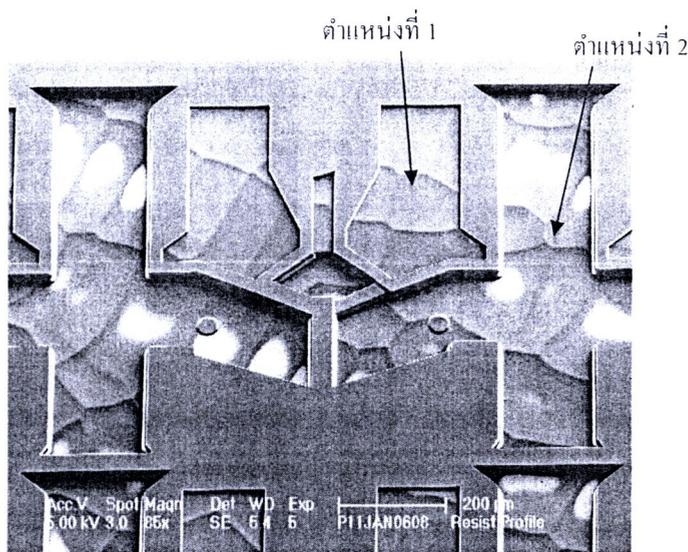
$$T2_{PR, Dev} = 20.71 - 0.04995E_c + 0.000029E_c^2, \quad 0 \leq E_c \leq 1,000 \text{ mJ/cm}^2 \quad (4.2)$$

เมื่อ  $T2_{PR, Dev}$  แทน ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ( $\mu\text{m}$ )  
 $E_c$  แทน ค่าพลังงานการฉายรวมแสง ( $\text{mJ/cm}^2$ )

เมื่อพิจารณาความสามารถในการทำซ้ำของกระบวนการผลิต (Process repeatability) ระหว่างการฉายแสงเพียงครั้งเดียว และการฉายแสงสองครั้ง พบว่าค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการฉายแสงเพียงครั้งเดียวนั้น สามารถควบคุมและทำซ้ำได้ดีกว่าการฉายแสงสองครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ของพื้นผิวเออร์เบริงที่ใช้ค่าพลังงานในการฉายที่ตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ  $100 \text{ mJ/cm}^2$  และค่าพลังงานรวมในการฉายแสงที่ตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ  $600 \text{ mJ/cm}^2$  แสดงในรูปที่ 4.7



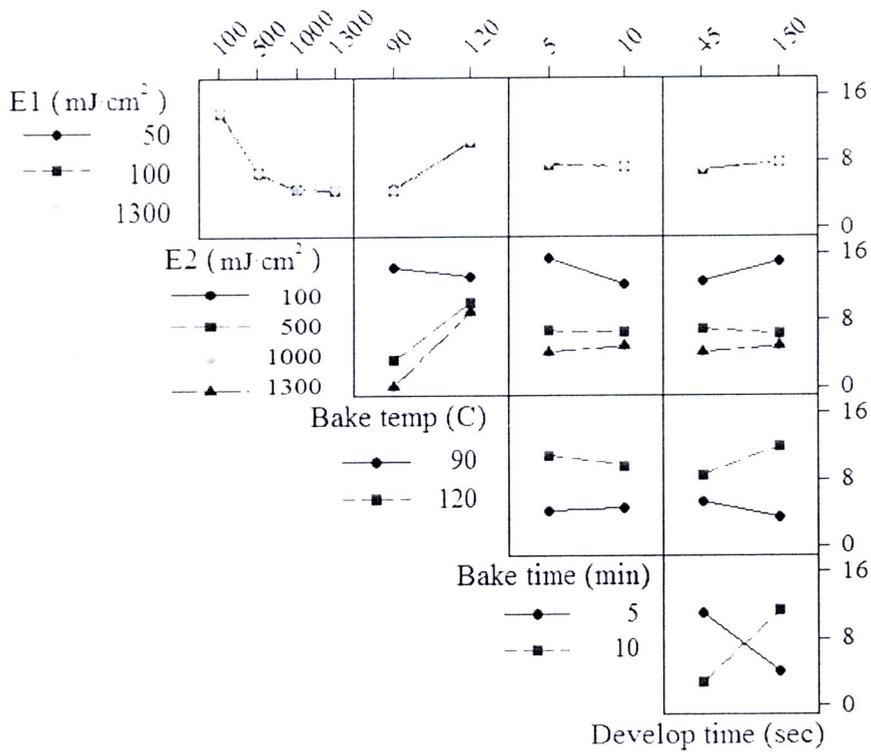
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาชั้นฟิล์มที่เหลือหลังการฉายแสงกับค่าพลังงาน  $E_c$  ของตำแหน่งที่ 1 (single exposure area) และตำแหน่งที่ 2 (double exposure area) เมื่อปรับเปลี่ยนพลังงาน  $E_c$



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของพื้นผิวเออร์เบริง ที่สร้างด้วยเทคนิคการฉายแสงสองครั้ง

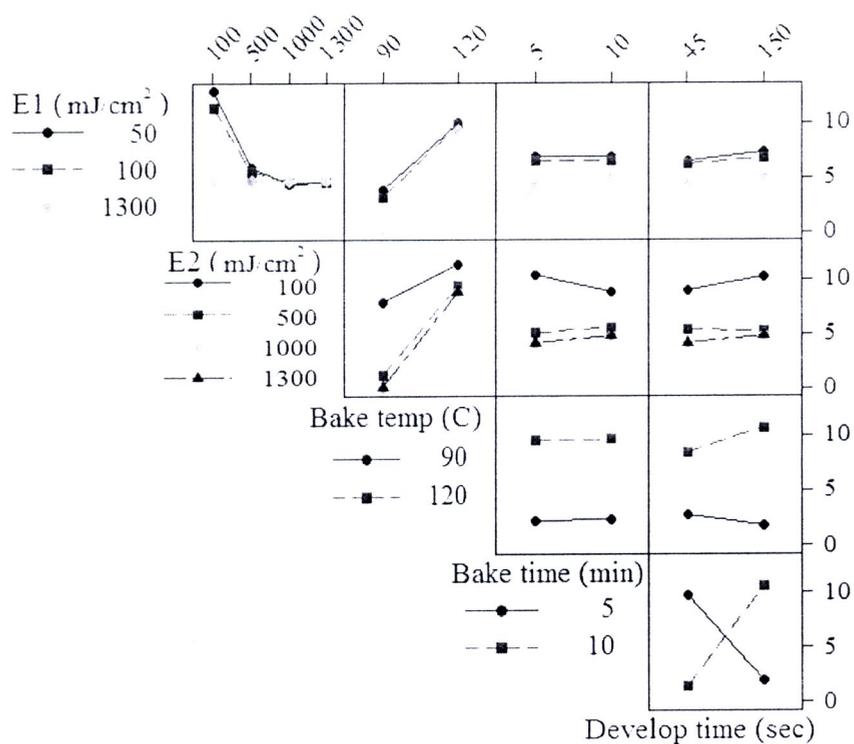
#### 4.2 ปัจจัยในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงภายหลังการฉายแสงหลายครั้ง

ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหลายครั้ง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง คือ เมื่อค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่หนึ่ง ( $E_1$ ) ครั้งที่สอง ( $E_2$ ) และเวลาในการล้างลาย ( $t_{Dev}$ ) เพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่จะลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิในการอบ ( $T_{PB}$ ) และเวลาในการอบ ( $t_{PB}$ ) เพิ่มมากขึ้น ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่เหลืออยู่จะมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ร่วม (Interaction plots) ในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบริเวณตำแหน่งที่ 1 ( $P_1$ ) ตามรูปที่ 4.10 จะเป็นการฉายแสงครั้งเดียว โดยใช้ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่สอง ( $E_2$ ) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงของพันธะโพลีเมอร์ภายในตัวฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวก ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีอัตราการละลาย (Dissolution rate) ในน้ำยาล้างลายชนิดโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide หรือ KOH) ต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มพลังงานการฉายแสงครั้งที่สอง และเพิ่มระยะเวลาในการล้างลาย อัตราการละลายของฟิล์มน้ำยาไวแสงก็จะเพิ่มขึ้น

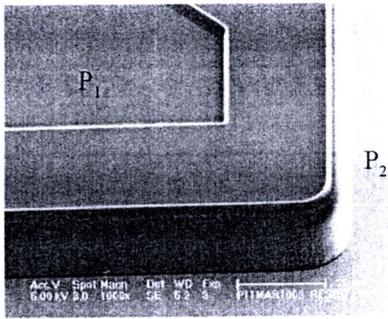


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ร่วม (Interaction plots) ระหว่างปัจจัยในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร กับความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือน ตำแหน่งที่ 1 (Single exposure)

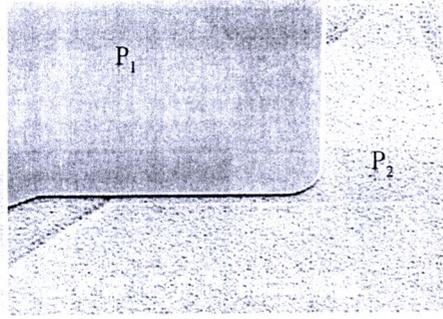
เมื่อพิจารณาการฉายแสงสองครั้งในบริเวณตำแหน่งที่ 2 ( $P_2$ ) ตามรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิการอบ ( $T_{PB}$ ) ระยะเวลาในการอบ ( $t_{PB}$ ) และระยะเวลาในการล้างลาย ( $t_{Dev}$ ) ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 ( $E_1$ ) และค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 ( $E_2$ ) จะส่งผลกับความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลายเช่นเดียวกับการฉายแสงเพียงครั้งเดียว ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ร่วม (Interaction plots) ในรูปที่ 4.9 โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร ต่อรูปร่างและความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง จะแสดงโดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ของโครงสร้างของพื้นผิวแอร์แบร์ริง เมื่อเอียงชิ้นงานเป็นมุม 45 องศา ในรูปที่ 4.10 (ก)-(ข) ได้แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ ( $T_{PB}$ ) รูปที่ 4.10 (ค)-(ง) ได้แสดงผลของระยะเวลาที่ใช้ในการอบ ( $t_{PB}$ ) และในรูปที่ 4.10 (จ)-(ฉ) ได้แสดงผลของค่าพลังงานการฉายแสงทั้งสองครั้ง ( $E_2$ )



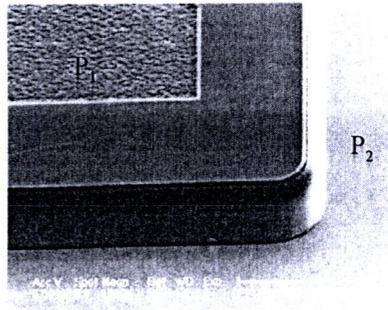
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ร่วม (Interaction plots) ระหว่างปัจจัยในกระบวนการถ่ายภาพหลายวงจร กับความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ณ ตำแหน่งที่ 2 (Double exposure)



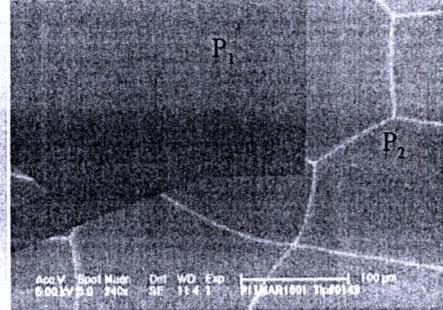
(ก)  $T_{PB}=90^\circ, t_{PB}=5\text{min}, t_{Dev}=45\text{s}$ .



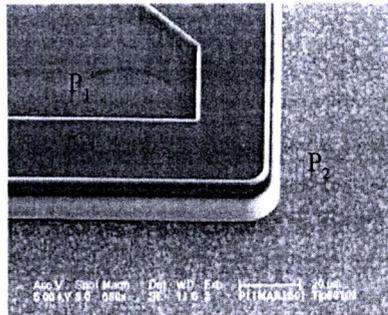
(ข)  $T_{PB}=120^\circ, t_{PB}=5\text{min}, t_{Dev}=45\text{s}$ .



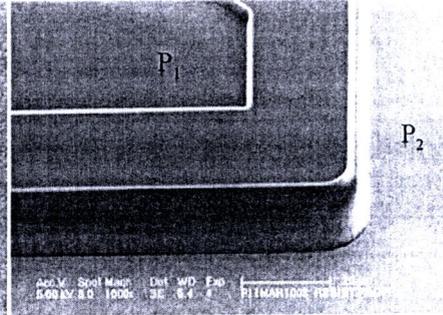
(ค)  $T_{PB}=120^\circ, t_{PB}=5\text{min}, t_{Dev}=150\text{s}$ .



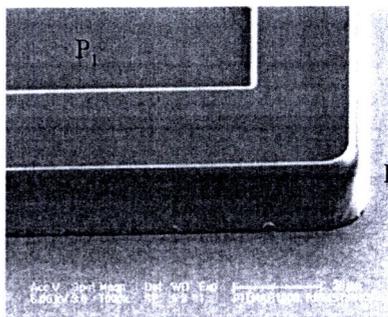
(ง)  $T_{PB}=120^\circ, t_{PB}=10\text{min}, t_{Dev}=150\text{s}$ .



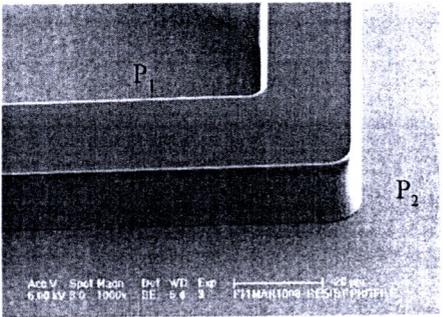
(จ)  $T_{PB}=90^\circ, t_{PB}=10\text{min}, t_{Dev}=45\text{s}$ .



(ฉ)  $T_{PB}=90^\circ, t_{PB}=10\text{min}, t_{Dev}=150\text{s}$ .



(ช)  $T_{PB}=90^\circ, t_{PB}=5\text{min}, t_{Dev}=150\text{s}$ .



(ซ)  $T_{PB}=90^\circ, t_{PB}=5\text{min}, t_{Dev}=150\text{s}$ .

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

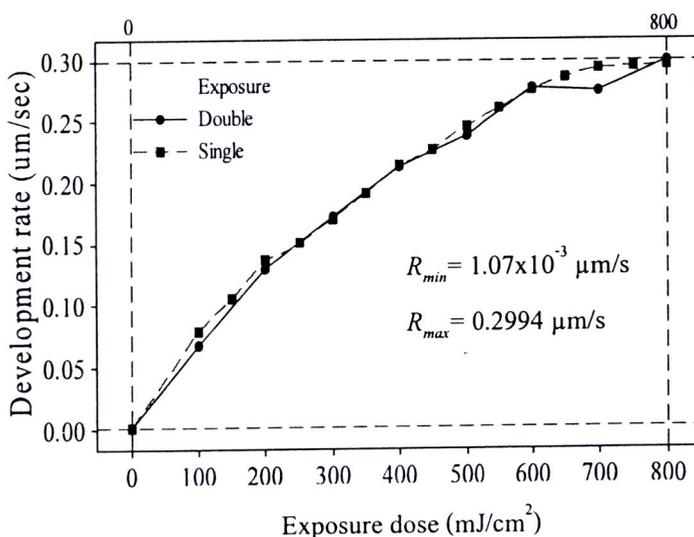
เมื่อปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

(ก-ข)  $E_1=1,300\text{ mJ/cm}^2$  และ  $E_2=50\text{ mJ/cm}^2$

(ข)  $E_1=50\text{ mJ/cm}^2$  และ  $E_2=1,300\text{ mJ/cm}^2$

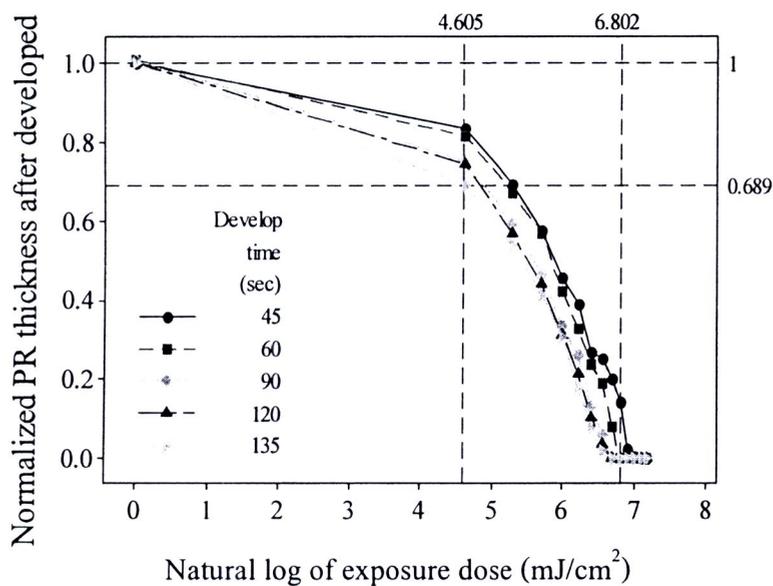
### 4.3 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของแมคเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลาย สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง

ในการใช้โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation software) ชนิด OPTOLITH มาใช้เพื่อคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมานั้น จะต้องใส่ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไปในโปรแกรม เพื่อที่จะได้ค่าจากการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ โดยค่าคงที่ที่สำคัญคือค่าคงที่ของแมค (Mack's parameters) ที่ใช้ในการอธิบายจลพลศาสตร์ในขั้นตอนการล้างลาย ซึ่งประกอบด้วย  $R_{min}$ ,  $R_{max}$ ,  $M_{th}$  และ  $n$  รวมถึงค่าคงที่ของคิลล์ (Dill's parameters) ซึ่งอธิบายจลพลศาสตร์ของขั้นตอนการฉายแสง อันประกอบด้วย  $Dill's A$ ,  $Dill's B$  และ  $Dill's C$  ซึ่งโดยทั่วไปค่าคงที่ของแมคและคิลล์จะเป็นค่าเฉพาะของแต่ละกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร และต้องคำนวณหาค่าดังกล่าวจากการทดลองจริง โดยสำหรับการหาค่าอัตราการละลายสูงสุด ( $R_{max}$ ) และอัตราการละลายต่ำสุด ( $R_{min}$ ) นั้น สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงตั้งแต่ 0 จนถึง  $800 \text{ mJ/cm}^2$  ซึ่งเป็นค่าพลังงาน  $E_0$  จากนั้นวัดค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ละลายไปกับน้ำยาล้างลาย KOH และคำนวณหาอัตราการละลายของฟิล์มน้ำยาไวแสงเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการล้างลาย [8, 30, 31] โดยพบว่าอัตราการละลายของการฉายแสงเพียงครั้งเดียว (Single exposure) และอัตราการละลายของการฉายแสงหลายครั้ง (Double exposure) นั้น ไม่มีความแตกต่างกันมาก ดังกราฟในรูปที่ 4.11 และสามารถคำนวณค่าอัตราเร็วการละลายน้อยสุด ( $R_{min}$ ) เท่ากับ  $1.07 \times 10^{-3}$  ไมโครเมตรต่อตารางเมตร ( $\mu\text{m/s}$ ) และค่าอัตราเร็วการละลายมากที่สุด ( $R_{max}$ ) เท่ากับ  $0.2994$  ไมโครเมตรต่อตารางเมตร ( $\mu\text{m/s}$ )



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการล้างลายกับค่าพลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว และค่าพลังงานในการฉายแสงสองครั้ง

จากนั้นต้องทดลองเพื่อหาค่าความสามารถในการละลาย (dissolution selectivity หรือ  $n$ ) หรือค่าความไวของน้ำยาไวแสง (Photoresist sensitivity) โดยสามารถหาได้จากจุดตัดและจุดเปลี่ยนความชันของกราฟความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังจากการล้างลายสัมพันธ์กับลอการิทึมของค่าพลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว [8, 30, 31] เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลายตั้งแต่ 45 ถึง 135 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งสามารถหาค่า photoresist contrast หรือ  $a$  ได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งเท่ากับ 0.313609 และสามารถหาค่าความสามารถในการเลือกทำลาย (Dissolution selectivity หรือ  $n$ ) ได้จากจุดตัดแกน  $x$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.80239 จากนั้นจึงนำค่า  $a$  และ  $n$  ที่ได้มาแทนใช้สมการที่ 4.4 และคำนวณหาค่าเกณฑ์ความเข้มข้นของตัวบัพยังปฏิบัติกริยา ( $M_{th}$ ) ได้เท่ากับ 0.192659 ส่วนสมการที่ 4.3 นั้นเป็นความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณมาได้



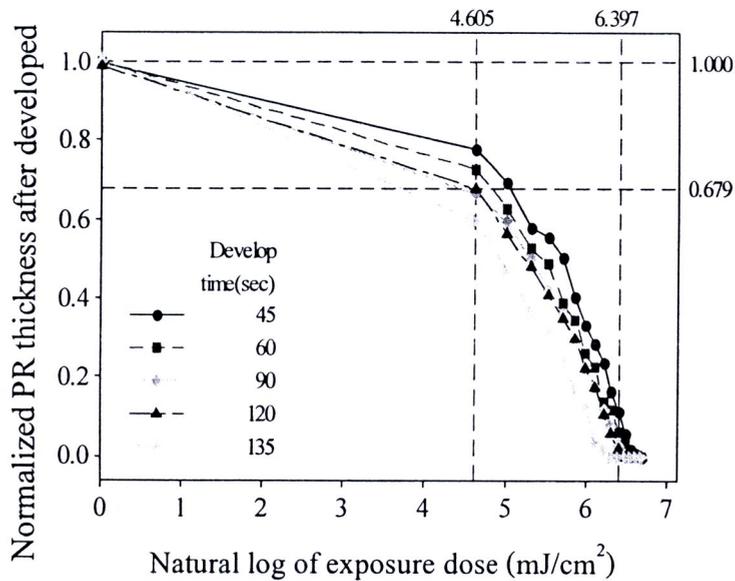
รูปที่ 4.12 กราฟความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังจากการล้างลายสัมพันธ์กับลอการิทึมของค่าพลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลายตั้งแต่ 45 ถึง 135 วินาที

$$R(m) = R_{max} \frac{(a+1)(1-m)^n}{a+(1-m)^n} + R_{min} \tag{4.3}$$

เมื่อ

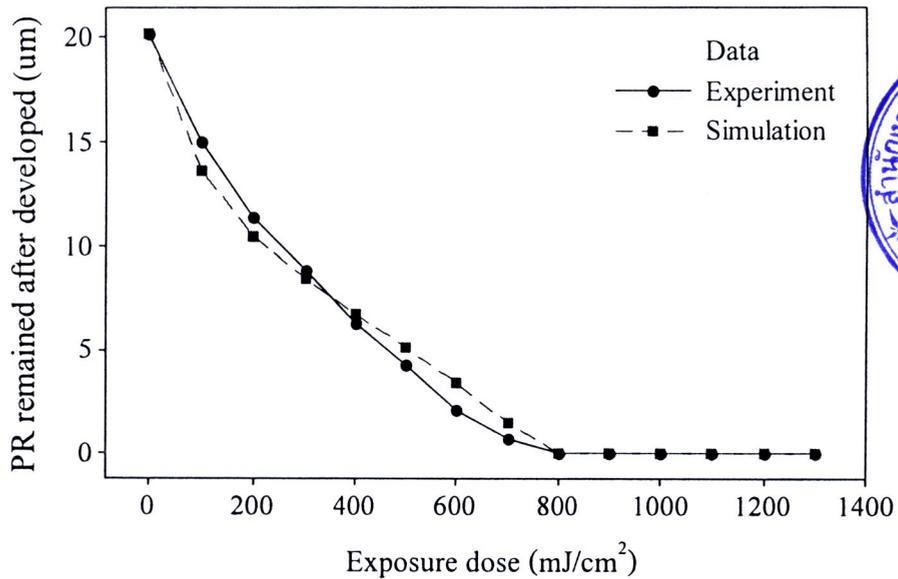
$$a = \frac{(n+1)}{(n-1)} (1 - M_{th})^n \tag{4.4}$$

ในส่วนของการฉายแสงสองครั้งนั้น ก็สามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ด้วยวิธีเดียวกับการฉายแสงเพียงครั้งเดียว โดยจากกราฟความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายสัมพัทธ์กับลอการิทึมของค่าพลังงานในการฉายแสงรวม เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลายตั้งแต่ 45 ถึง 135 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะหาค่า photoresist contrast หรือ  $\alpha$  ได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งเท่ากับ 0.37037 และค่าความสามารถในการเลือกทำลาย (Dissolution selectivity หรือ  $n$ ) เท่ากับ 6.3969 และสามารถคำนวณค่าเกณฑ์ความเข้มข้นของตัวบ่งชี้ปฏิกิริยา ( $M_{th}$ ) ได้เท่ากับ 0.1849

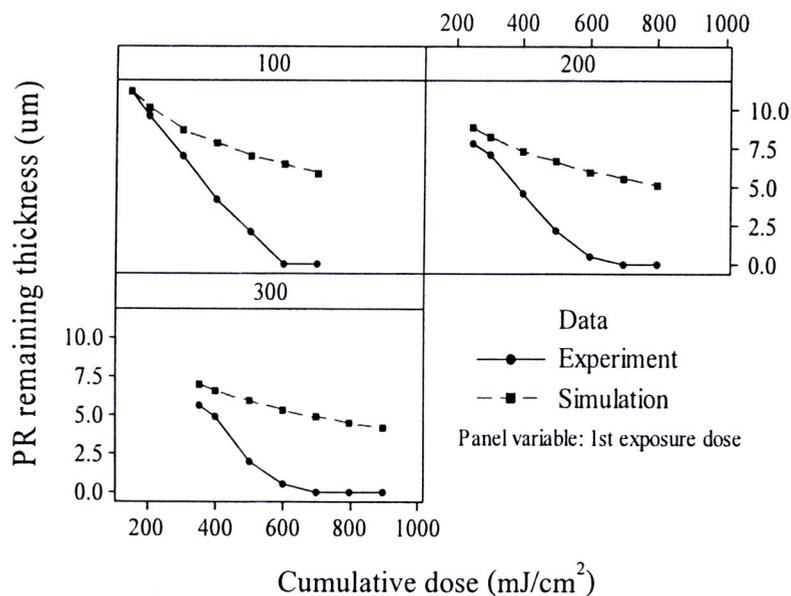


รูปที่ 4.13 กราฟความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายสัมพัทธ์กับลอการิทึมของค่าพลังงานในการฉายแสงรวม เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลายตั้งแต่ 45 ถึง 135 วินาที

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์การล้างลายของแมคแล้ว จะนำค่าคงที่ต่างๆ เหล่านี้มาใช้ในโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ OPTOLITH เพื่อคำนวณหาค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการฉายแสงเพียงครั้งเดียวและการฉายแสงสองครั้ง ผลการทดลองพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสงเพียงครั้งเดียวที่ได้จากโปรแกรมจำลองนั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้จากการทดลองจริง ตลอดช่วงพลังงานในการฉายแสงที่ 0 ถึง 1400 mJ/cm<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่เมื่อฉายแสงสองครั้ง พบว่าผลที่ได้จากโปรแกรมนั้น มีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยเมื่อค่าพลังงานรวมในการฉายแสง ( $E_c$ ) เพิ่มมากขึ้น ก็จะมีค่าแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองจริงมากขึ้น



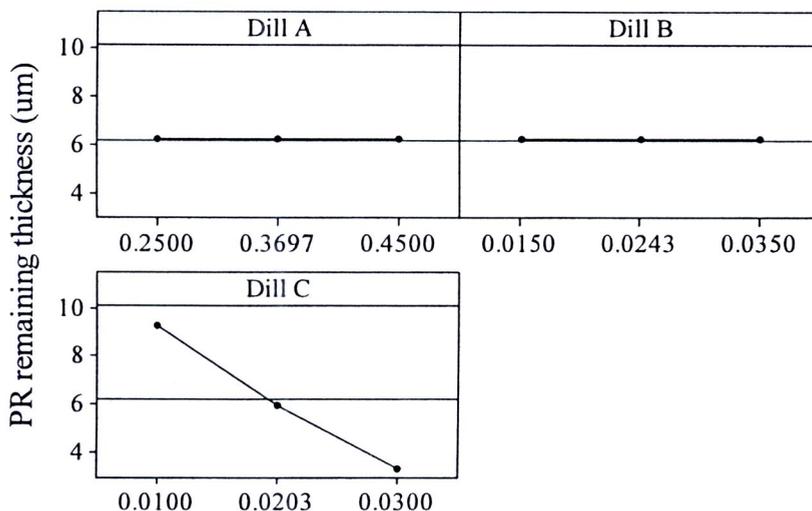
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังจากการล้างลายที่ได้จากโปรแกรม OPTOLITH และการทดลองจริง สำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียว



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังจากการล้างลายที่ได้จากโปรแกรมและการทดลองจริง สำหรับการฉายแสงสองครั้ง

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น จึงสรุปได้ว่ายังมีค่าคงที่บางตัว ที่ใช้ในโปรแกรมแบบจำลอง OPTOLITH ที่ยังไม่ถูกต้องสำหรับการฉายแสงสองครั้ง โดยได้มุ่งพิจารณาไปที่ค่าพารามิเตอร์ของดิลล์ (Dill's parameters) ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่ใช้ดังกล่าว นั้น เป็นค่าที่ได้จาก Datasheet ซึ่งทาง

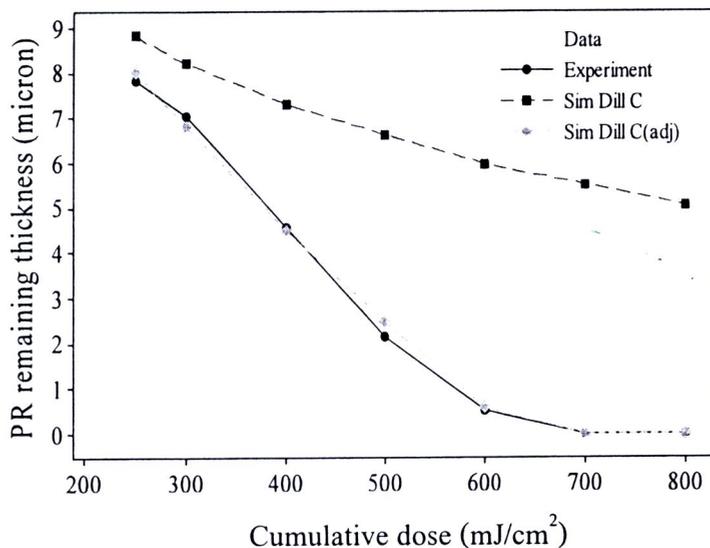
บริษัทผู้ผลิตน้ำยาไวแสงชนิด Clariantz AZ-P4620 นั้น ได้ทำการทดลองหามา และเป็นค่ามาตรฐาน สำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียว ซึ่งโดยทั่วไปการหาค่าพารามิเตอร์ของดิลล์เอ (*Dill's A*) และดิลล์ บี (*Dill's B*) นั้น จะต้องวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmittance) ผ่านชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงด้วยค่าพลังงานที่แตกต่างกัน จึงต้องเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นฐานที่มีความใสและแสงสามารถส่องผ่านได้ เช่น กระดาษ เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องวัดค่าการส่องผ่านของแสงภายใต้บรรยากาศของแสงเหลือง เพื่อป้องกันไม่ให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกฉายแสงซ้ำด้วยแสงขาว ซึ่งวิธีการดังกล่าวข้างต้นไม่สามารถทำการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการวิจัย ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมแบบจำลอง OPTOLITH เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่า *Dill's parameters* ต่างๆ คือ *Dill's A* *Dill's B* และ *Dill's C* ต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการฉายแสงสองครั้ง จากผลการคำนวณพบว่าการปรับเปลี่ยนค่า *Dill's A* และ *Dill's B* นั้น ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ในขณะที่การปรับค่า *Dill's C* นั้น ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโครงสร้างโมเลกุลของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการถูกฉายแสงครั้งที่ 1 ทำให้ความแข็งแรงของพันธะโมเลกุลและความว่องไวต่อค่าพลังงานของน้ำยาไวแสงนั้นเปลี่ยนแปลงไป ในระหว่างการฉายแสงครั้งที่ 2 จึงส่งผลให้ไม่สามารถใช้ค่า *Dill's C* ที่ทางบริษัทผู้ผลิตน้ำยาไวแสงกำหนด มาใช้กับการฉายแสงหลายครั้งได้ และทำให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้จากการคำนวณ มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาก



รูปที่ 4.16 ผลของค่าดิลล์พารามิเตอร์ (*Dill's parameters*) ต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ภายหลังการฉายแสงสองครั้ง

#### 4.4 การหาค่าคงที่ของดิลล์ซีเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสง สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง

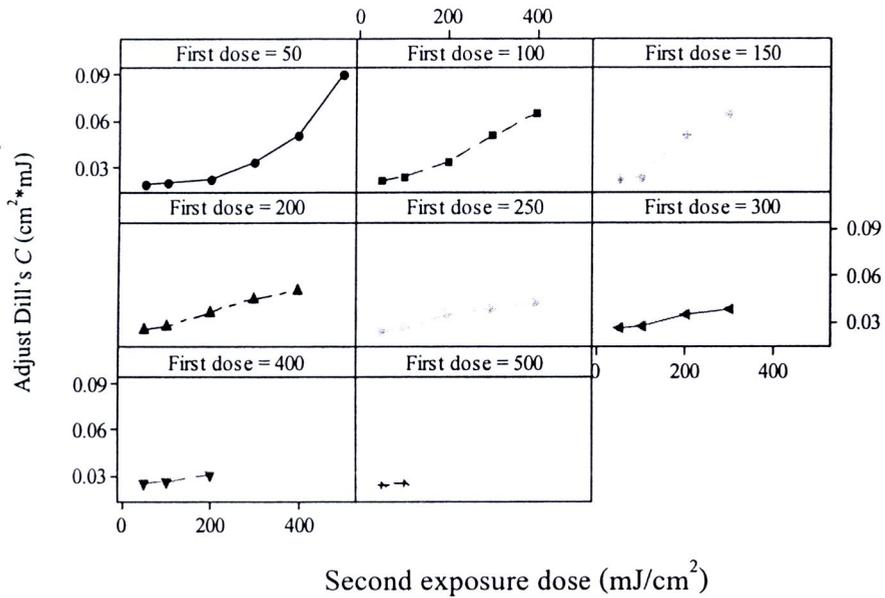
ในการหาค่าดิลล์ซี ( $Dill's C$ ) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรด้วยเทคนิคการฉายแสงสองครั้งโดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) นั้น จะใช้โปรแกรมแบบจำลอง OPTOLITH ในการปรับเปลี่ยนค่า  $Dill's C$  เพื่อหาค่า  $Dill's C$  ที่ได้ซัดเซยแล้ว ( $Dill's C_{adj}$ ) ที่ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจากการคำนวณของโปรแกรม มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยพบว่าการปรับเปลี่ยนค่า  $Dill's C$  นั้น ทำให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจากการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสง 2 ครั้ง ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า  $Dill's C$  ที่ได้ซัดเซยแล้วกับผลการทดลองจริง

จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่า  $Dill's C$  เพื่อหาค่า  $Dill's C_{adj}$  สำหรับแต่ละค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งแรก โดยสามารถสร้างกราฟสมการถดถอย (Regression plot) เพื่อพยากรณ์ค่า  $Dill's C_{adj}$  สำหรับแต่ละค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 ( $E_1$ ) และเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 ( $E_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยสำหรับค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 50 mJ/cm<sup>2</sup> นั้น จะต้องใช้สมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential regression equation) ในการคำนวณค่า  $Dill's C_{adj}$  ในขณะที่ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 ที่เท่ากับ 100 150 200 250 300 และ 400 mJ/cm<sup>2</sup> นั้น จะใช้สมการที่ 4.6 ถึง 4.11 ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression equation) ในการคำนวณค่า  $Dill's C_{adj}$  ซึ่งสมการถดถอยดังกล่าวจะมีค่าประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Predicted  $R^2$  adjusted หรือ  $R^2_{adj}$ ) เท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ 97.3 เปอร์เซ็นต์ 94.7 เปอร์เซ็นต์

98.5 เปอร์เซ็นต์ 94.7 เปอร์เซ็นต์ 94.3 เปอร์เซ็นต์ และ 95.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้สมการถดถอยดังกล่าว สามารถใช้งานได้ดีตลอดช่วงของค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 ( $E_2$ ) เท่ากับ 0 ถึง 400  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  นอกจากนี้ยังไม่สามารถสร้างสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่า  $Dill's C_{adj}$  ที่ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งแรกเท่ากับ 500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  ได้ เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิลล์ซีที่ปรับเปลี่ยนแล้ว ( $Dill's C_{adj}$ ) กับค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่หนึ่ง และค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่สอง

$$T_{PR} = 1 \times 10^{-6} (E_2)^2 - 1.39 \times 10^{-4} (E_2) + 2.58 \times 10^{-2} \quad (4.5)$$

$$T_{PR} = 1.31 \times 10^{-4} (E_2) + 1.07 \times 10^{-2} \quad (4.6)$$

$$T_{PR} = 1.87 \times 10^{-4} (E_2) + 9.59 \times 10^{-3} \quad (4.7)$$

$$T_{PR} = 7.60 \times 10^{-5} (E_2) + 2.07 \times 10^{-2} \quad (4.8)$$

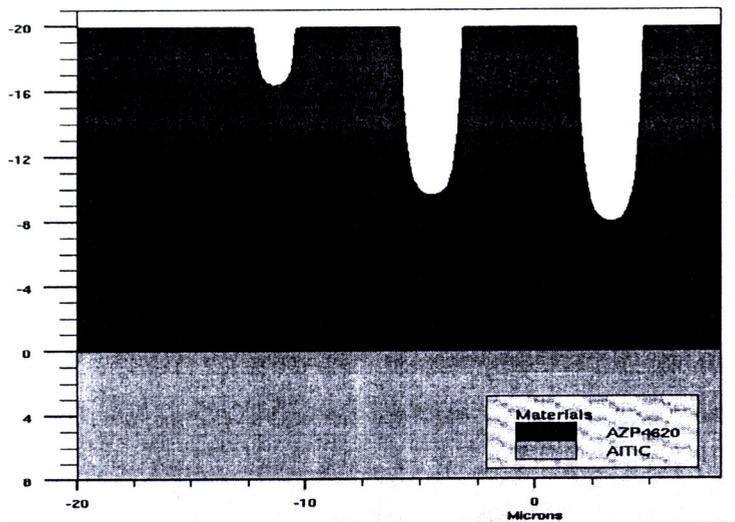
$$T_{PR} = 5.40 \times 10^{-5} (E_2) + 2.15 \times 10^{-2} \quad (4.9)$$

$$T_{PR} = 5.40 \times 10^{-5} (E_2) + 2.26 \times 10^{-2} \quad (4.10)$$

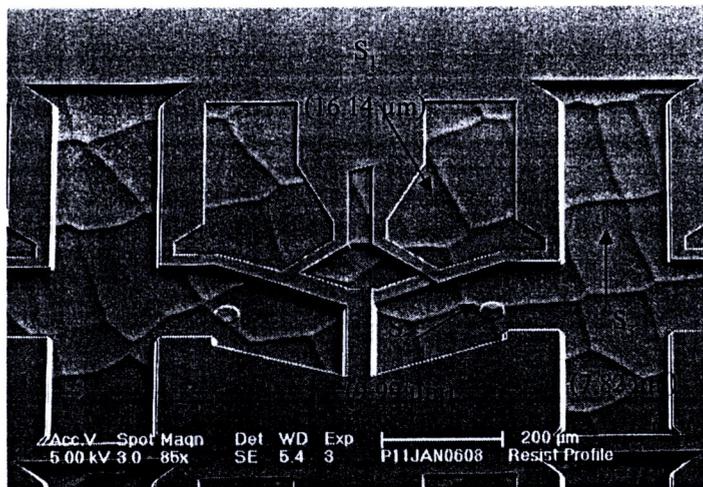
$$T_{PR} = 3.40 \times 10^{-5} (E_2) + 2.40 \times 10^{-2} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $T_{PR}$  แทน ค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย (ไมโครเมตร)  
 $E_2$  แทน ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่สอง ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )

จากนั้นนำค่าดิลล์ซีที่ได้ปรับเปลี่ยนแล้ว ( $Dill's C_{adj}$ ) มาทดลองเพื่อคำนวณหาความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ ภายหลังการฉายแสง 2 ครั้ง และเปรียบเทียบกับค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งกำหนดให้ค่าความหนาเริ่มต้นของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเท่ากับ 20 ไมโครเมตร โดยในโปรแกรมแบบจำลองจะกำหนดให้บริเวณพื้นผิว 1 ( $S_1$ ) จะถูกฉายแสงเพียงครั้งเดียว ด้วยค่าพลังงานในการฉายแสง ( $E_2$ ) เท่ากับ  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  และบริเวณพื้นผิว 2 ( $S_2$ ) จะถูกฉายแสงเพียงครั้งเดียวเช่นกัน แต่ใช้ค่าพลังงานในการฉายแสง ( $E_1$ ) เท่ากับ  $200 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  และกำหนดให้บริเวณพื้นผิว 3 ( $S_3$ ) เป็นบริเวณที่ถูกฉายแสงสองครั้ง โดยมีค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งแรก ( $E_1$ ) เท่ากับ  $200 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  และค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่สอง ( $E_2$ ) เท่ากับ  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  ซึ่งจะมีค่าพลังงานในการฉายแสงรวม ( $E_c$ ) เท่ากับ  $250 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  โดยจากผลการทดลองพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสง 2 ครั้ง จากโปรแกรมแบบจำลอง OPTOLITH ที่พื้นผิว  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  มีค่าเท่ากับ 16.30 ไมโครเมตร 9.64 ไมโครเมตร และ 8.02 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ในขณะที่ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสง 2 ครั้ง จากการทดลองจริง ที่พื้นผิว  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  มีค่าเท่ากับ 16.14 ไมโครเมตร 9.99 ไมโครเมตร และ 7.82 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งค่าจากโปรแกรมจำลองนั้น จะมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง สำหรับการฉายแสงด้วยค่าพลังงาน  $E_1$ ,  $E_2$  และ  $E_c$  เท่ากับ  $\pm 0.99$  เปอร์เซ็นต์  $\pm 3.50$  เปอร์เซ็นต์ และ  $\pm 2.56$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ที่เท่ากับ  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ จึงถือว่ายอมรับได้



รูปที่ 4.19 ภาพความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ภายหลังการล้างลายจากโปรแกรม โดยใช้ค่าคลัสซ์ที่ได้ชัดเจนแล้ว สำหรับการฉายแสง 2 ครั้ง



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างพื้นผิวแอร์แบริง ที่สร้างโดยการฉายแสงหลายครั้ง