



5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางผลึกและองค์ประกอบของชั้นเอพิแทกซี

5.1.1 การดูความเป็นผลึกเดี่ยวโดยการถ่ายภาพ

การกระเจิงกลับของรังสีเอ็กซ์แบบเลาอ์ (Lave X-rays backscattering) (43) ได้นำตัวอย่างที่ทำการปลูกชั้นเอพิแทกซีไว้หน้าประมาณ 44 ไมครอน ไปวิเคราะห์ที่ห้องทดลอง สารกึ่งตัวนำ ให้ผิวหน้าชั้นเอพิแทกซีรับและวางตัวตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดที่ใช้ อิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ ที่ค่ากระแส 25 มิลลิแอมแปร์ ชนเข้าทองแดง โดยมีฟิล์มวางอยู่เบื้องหน้าชั้นเอพิแทกซีห่างเป็นระยะ 4 ซม. และใช้เวลาทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง แบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ที่ปรากฏมีลักษณะดังรูปที่ 5.1 และ เป็นลักษณะเดียวกับที่พบในกรณีการกระเจิงกลับของรังสีเอ็กซ์ที่ยิงตัวฉากกับหน้าผลึกแคลเซียมอาร์โซไนด์ที่ใช้ เป็นชั้นสเตรทก่อนการปลูกผลึก แสดงให้เห็นถึงสมมาตร 4 ทบ (4-folds symmetry) ของระนาบ (100) และความเป็นผลึกเดี่ยวของชั้นเอพิแทกซี



รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายของการเลี้ยวเบนเนื่องจากการกระเจิงกลับของรังสีเอ็กซ์แบบเลาอ์ โดยผลึกชั้นเอพิแทกซี



## 5.2 ผลการตรวจคุณภาพพันผิวของชั้นเอพิแทกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

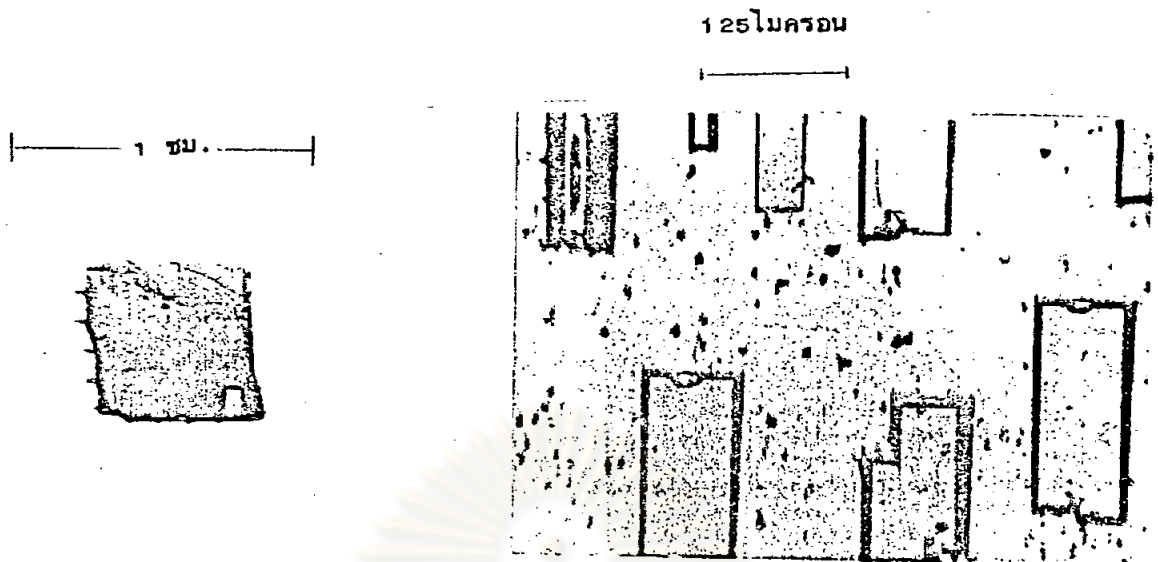
เมื่อนำตัวอย่างซึ่งมีการปลูกชั้นเอพิแทกซ์ในเงื่อนไขและวิธีการต่าง ๆ กันมาพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพพันผิวด้วยตาเปล่า และทั้งขยายดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพบว่า มีลักษณะของหลุมกระจายอยู่ทั่วไปในทุกกรณี สาเหตุอาจเกิดจากฝุ่นละอองหรือออกไซด์ที่เกาะผิวขั้วสเตรคก่อนการจุ่ม (45) ฝุ่นแกรไฟต์ซึ่งหลุดออกมาจากเนื้อของตัวขั้วสเตรคและลอยอยู่ที่ผิวสารละลาย อาจเป็นตัวการสำคัญ มีเส้นเมนิคัส (menicus) ซึ่งเป็นร่องรอยของขอบบนของผิวของสารละลาย ปรากฏให้เห็นอยู่เสมอ และสำหรับตัวอย่างซึ่งผ่านขั้นตอนการปลูกผลึกที่ต้องลดอุณหภูมิของสารละลายต่ำกว่าอุณหภูมิที่สารละลายถูกทำให้ร้อนตัวลงไปประมาณ 5 °C มักมีสารละลายเกาะติด และมีการตกผลึกเพิ่มเติมไปบนผิวหน้าชั้นเอพิแทกซ์เป็นบริเวณกว้าง ผลึกเหล่านั้นมีเนื้อที่หยาบและเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา สำหรับลักษณะพันผิวที่แตกต่างกันไปในการปลูกผลึกด้วยวิธีต่าง ๆ นอกเหนือไปจากลักษณะที่กล่าวข้างต้นนี้ จะเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มของตัวอย่าง

### 5.2.1 พันผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีอีควิลิเบรียมคูลลิ่ง

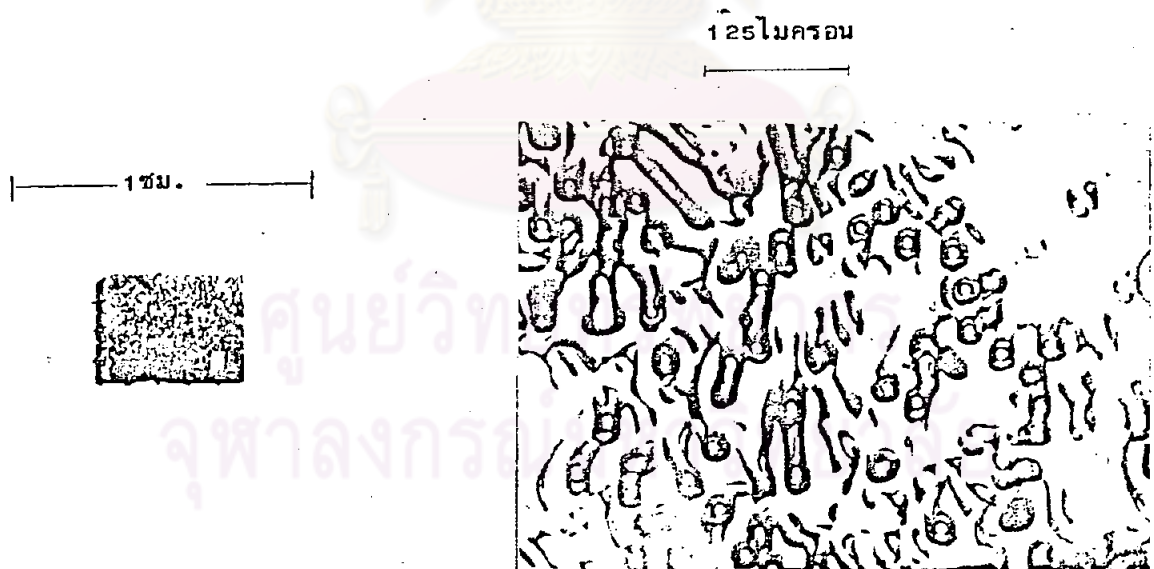
พันผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีนี้มีลักษณะขรุขระ และสะท้อนให้เห็นถึงกลไกการก่อตัวของผลึกใหม่บนขั้วสเตรคว่า เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งพันผิว เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และภาพถ่ายลักษณะพันผิวของตัวอย่างเหล่านั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.5 ตามลำดับก่อนหลังของหมายเลข

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีอีควิลิเบรียมคูลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้ร้อนตัวที่อุณหภูมิ 792 °C

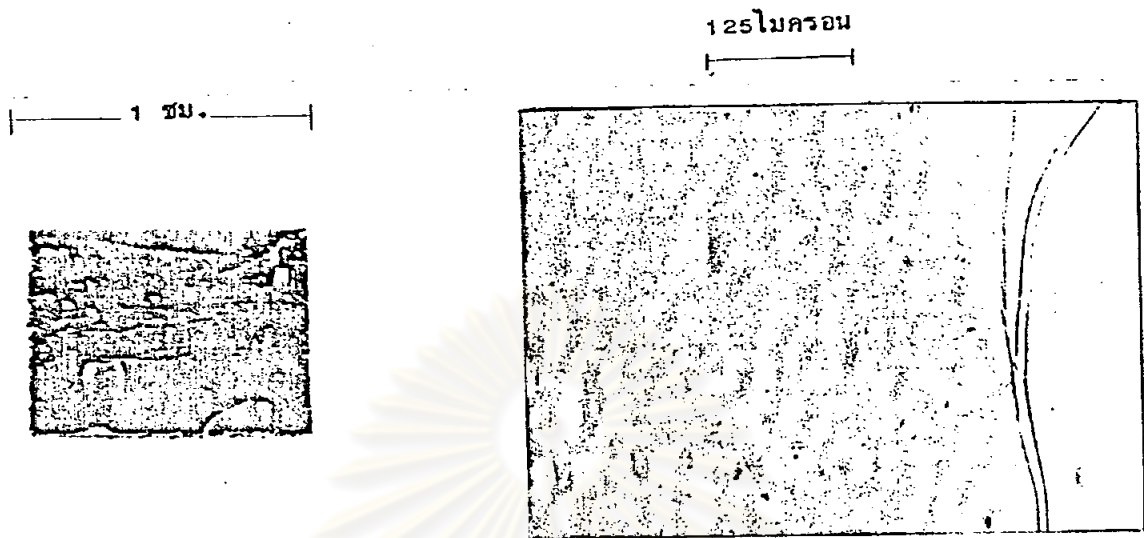
| หมายเลขตัวอย่าง | อุณหภูมิที่เริ่มจุ่ม<br>(°C) | อุณหภูมิที่ดึงผลึกขึ้น<br>(°C) | อัตราการลด<br>อุณหภูมิระหว่างการ<br>ปลูกผลึก<br>(°C/นาที) | ช่วงเวลาในการ<br>ปลูกผลึก<br>(นาที) |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|
| 3               | 792                          | 786                            | 2   | 3                                   |
| 4               | 792                          | 777                            | 2.5   | 6                                   |
| 17              | 792                          | 787                            | 1   | 5                                   |



รูปที่ 5.3 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 3 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.4 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 4 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.5 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 17 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) หรือภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

#### 5.2.2 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสเต็มเซลล์

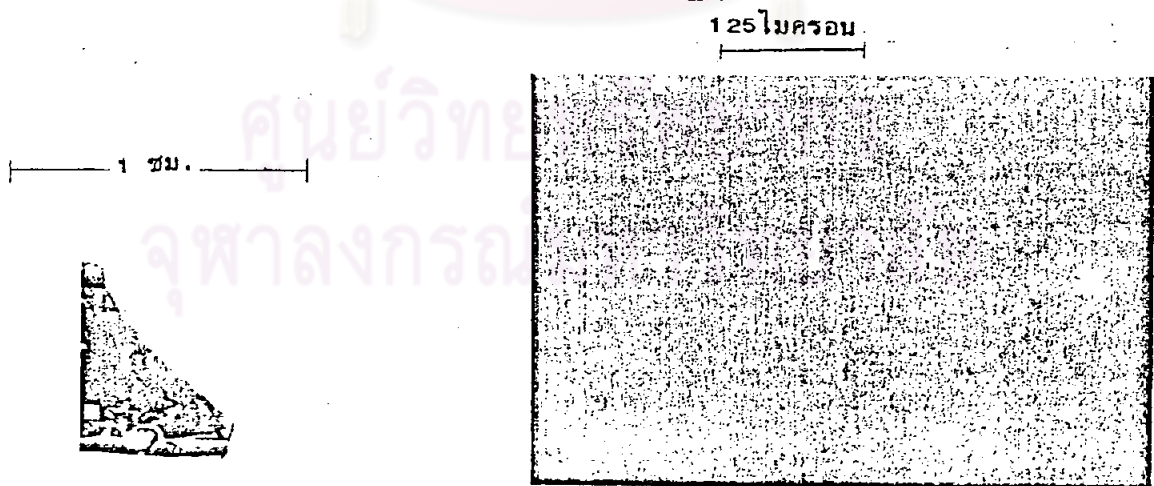
พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นด้วยวิธีนี้มีความเรียบดี อีกทั้งการปลูกผลึกที่ใช้เวลานานยังสามารถลดความหนาแน่นของหลุมลึก ๆ ได้อย่างมาก แม้ชั้นสเตรตจะมีผิวหน้าเบี่ยงเบนไปจากระนาบ (100) ไปถึง  $2^\circ$  แต่ชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้นั้นเรียบก็สันนิษฐานกันว่า (46) สภาพวะการเย็นอย่างรวดเร็วจึงทำให้จำนวนผลึกแรกเกิดบนผิวชั้นสเตรตมีความหนาแน่นสูงนั่นเอง เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเหล่านั้น ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.6 ถึง 5.32 ตามลำดับก่อนหลังหมายเลข



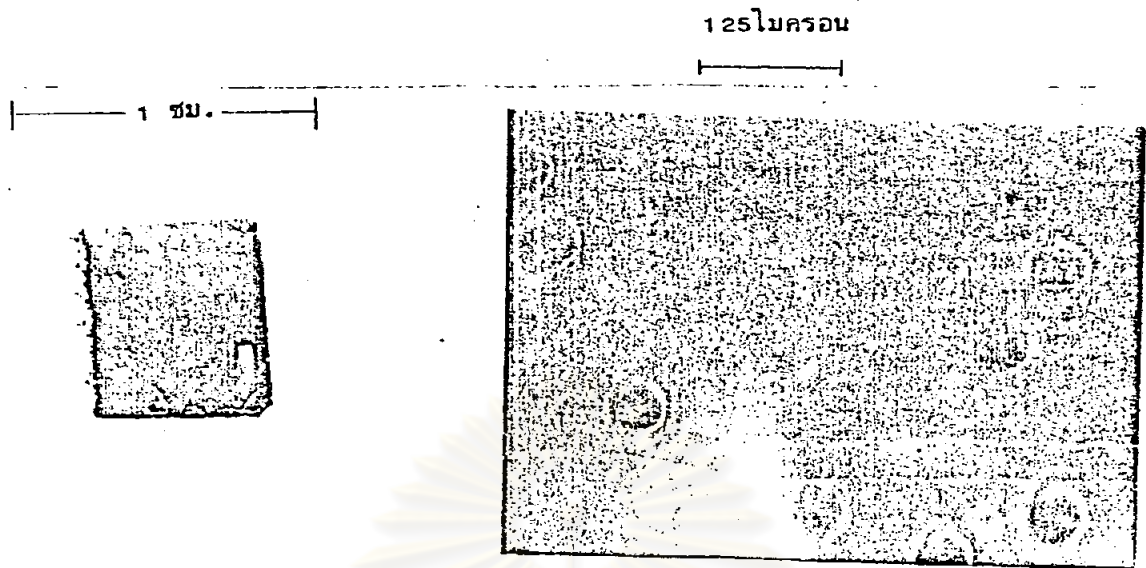
| หมายเลขตัวอย่าง | $\Delta T$<br>(°ซ) | ช่วงเวลาการจุ่ม<br>(นาที) |
|-----------------|--------------------|---------------------------|
| 6               | 5                  | 10                        |
| 7               | 5                  | 40                        |
| 8               | 5                  | 20                        |
| 9               | 5                  | 10                        |
| 10*             | 5                  | 20                        |
| 11              | 5                  | 20                        |
| 13              | 5                  | 45                        |
| 14              | 5                  | 60                        |
| 15              | 5                  | 45                        |
| 19              | 5                  | 20                        |
| 20              | 5                  | 20                        |
| 22              | 5                  | 30                        |

| หมายเลขตัวอย่าง | $\Delta T$<br>(°ซ) | ช่วงเวลาการจุ่ม<br>(นาที) |
|-----------------|--------------------|---------------------------|
| 23              | 5                  | 40                        |
| 24              | 5                  | 40                        |
| 25              | 5                  | 40                        |
| 26              | 5                  | 40                        |
| 27              | 1                  | 40                        |
| 29              | 2                  | 40                        |
| 40              | 3                  | 40                        |
| 46              | 4                  | 30                        |
| 47              | 4                  | 40                        |
| 48              | 4                  | 40                        |
| 49              | 5                  | 30                        |
| 50              | 5                  | 45                        |

\* ชั้นสเตรตซนิกที่โตไปด้วยสังกะสี



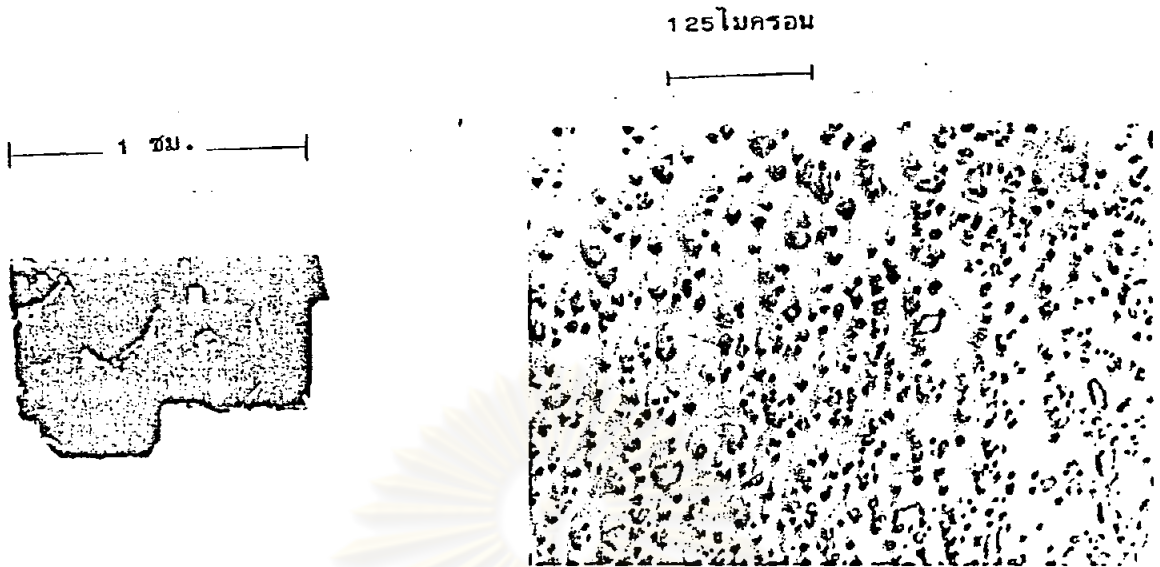
รูปที่ 5.6 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 6  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.7 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 7  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.8 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 8  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

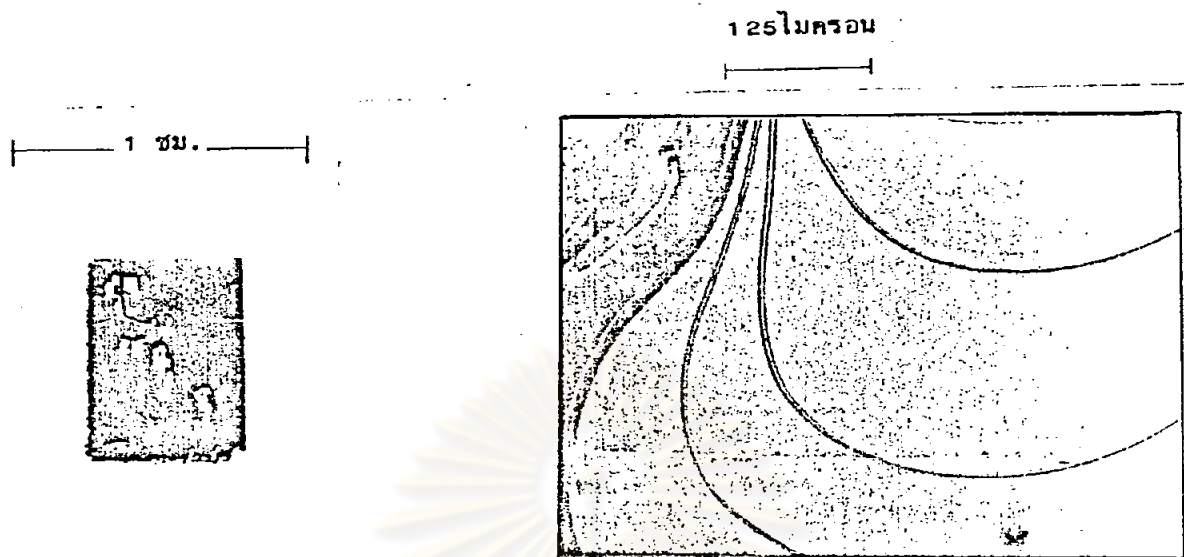


รูปที่ 5.9 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 9  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

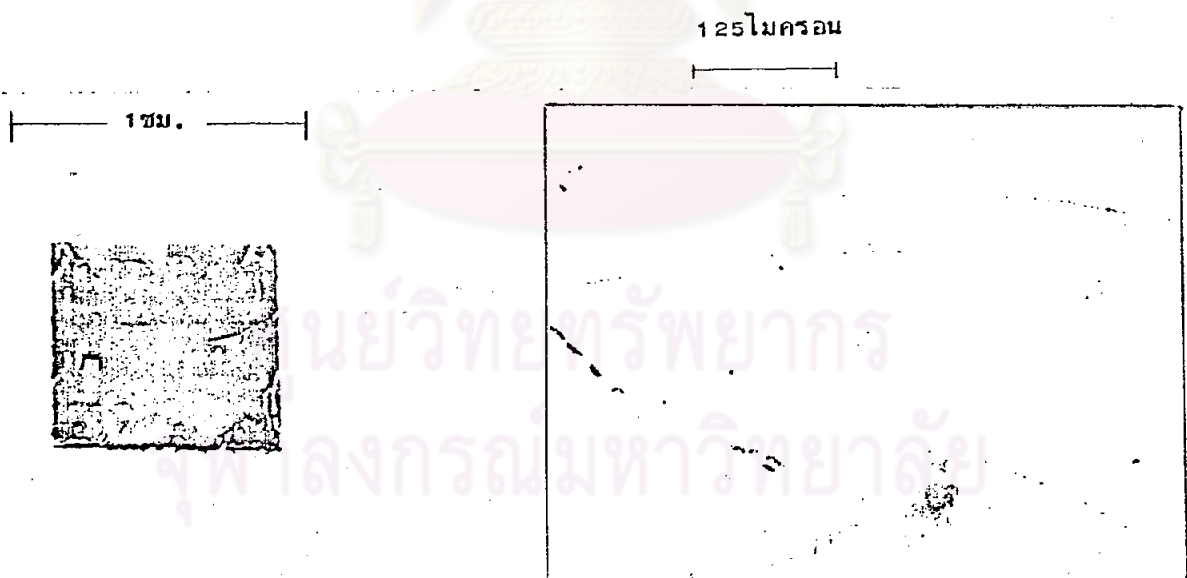


รูปที่ 5.10 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 10  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

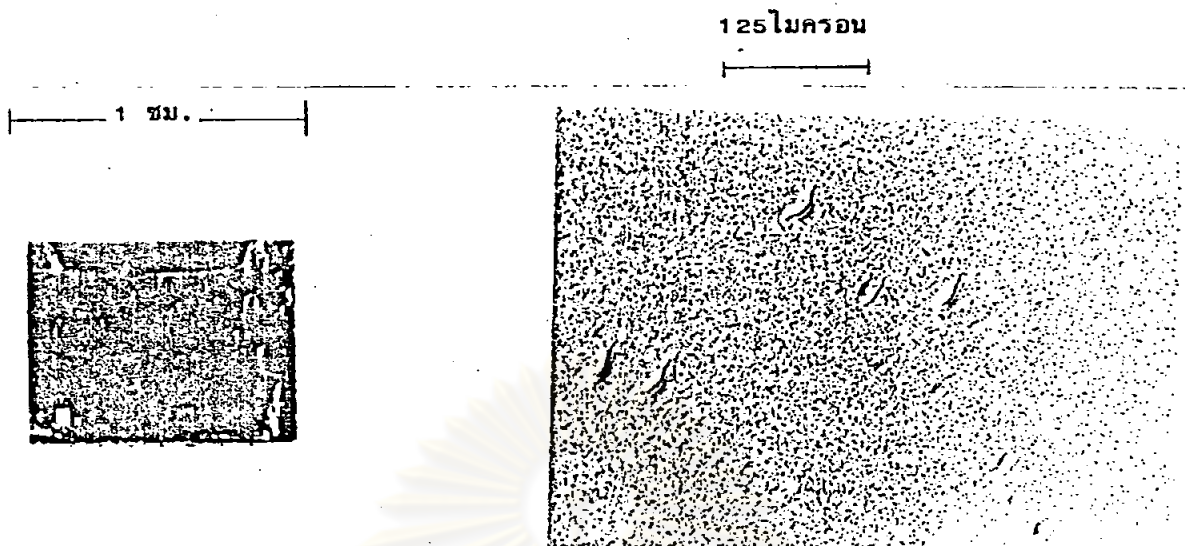




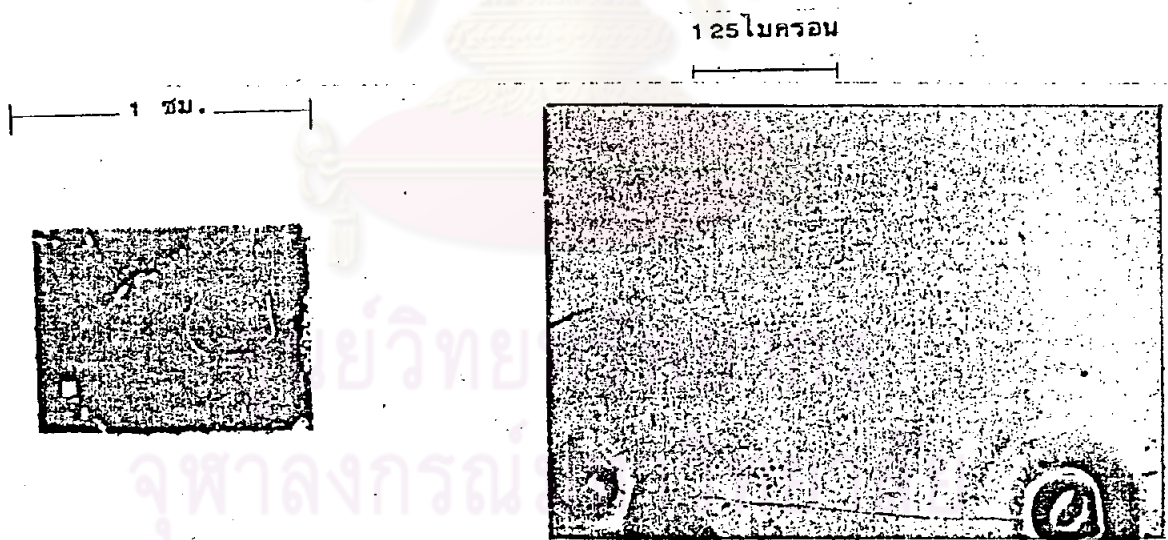
รูปที่ 5.11 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 11  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



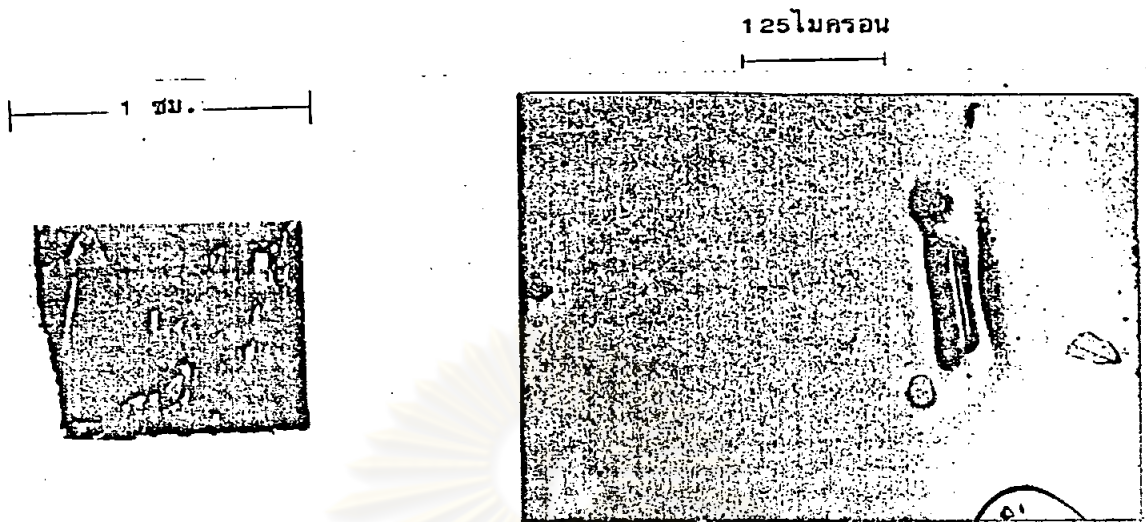
รูปที่ 5.12 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 13  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



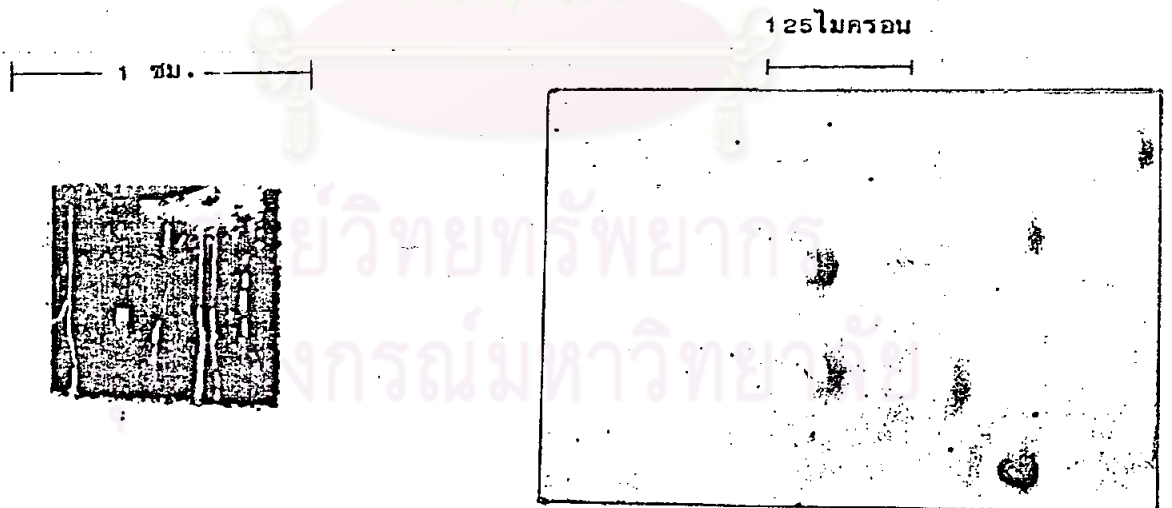
รูปที่ 5.13 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 14  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



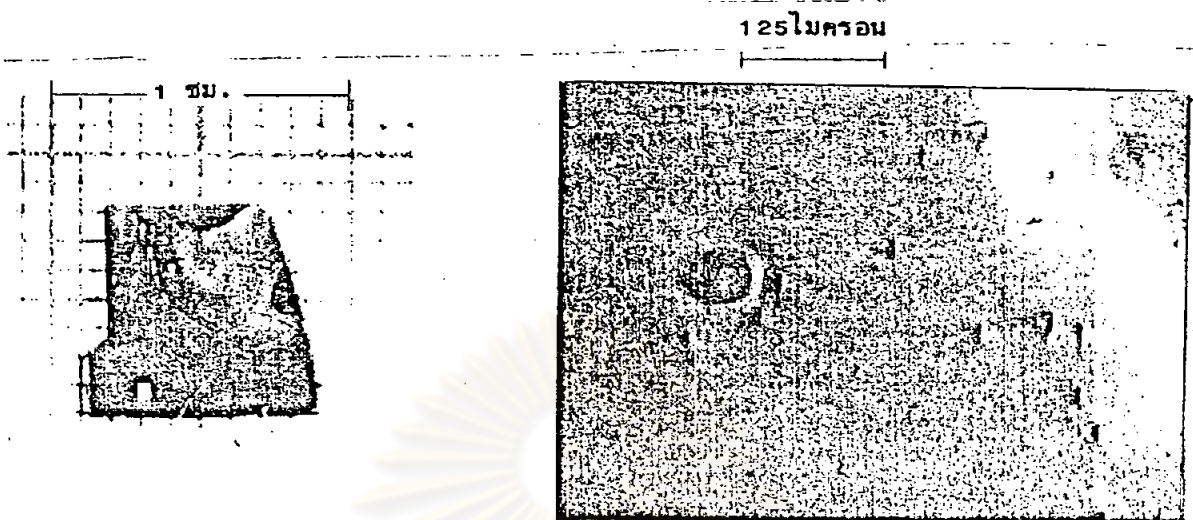
รูปที่ 5.14 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 15  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



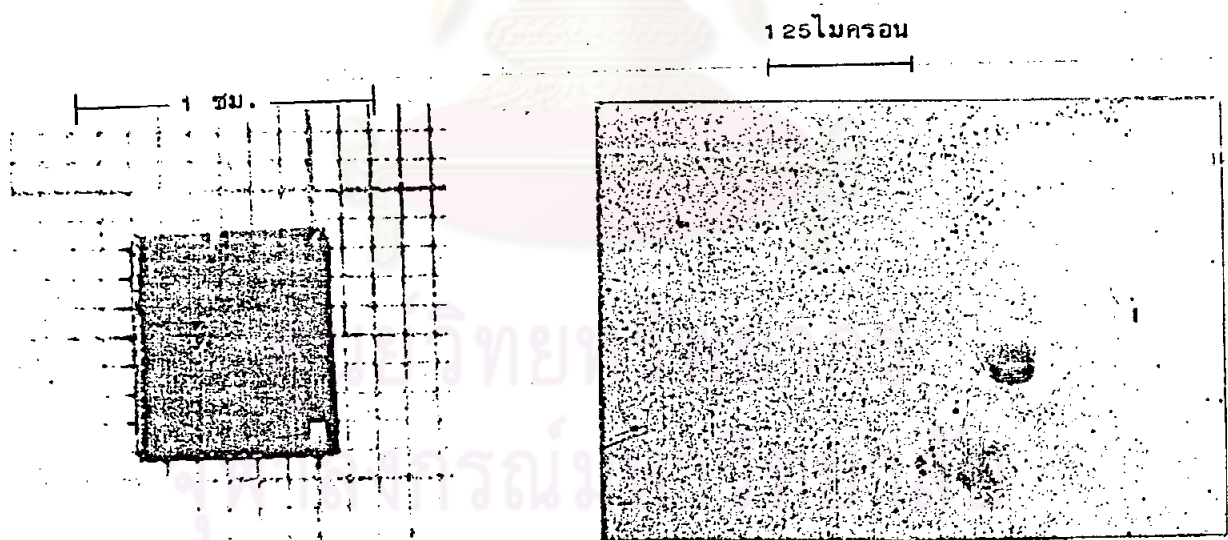
รูปที่ 5.15 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 19  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
หรือภาพถ่ายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.16 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 20  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
หรือภาพถ่ายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)

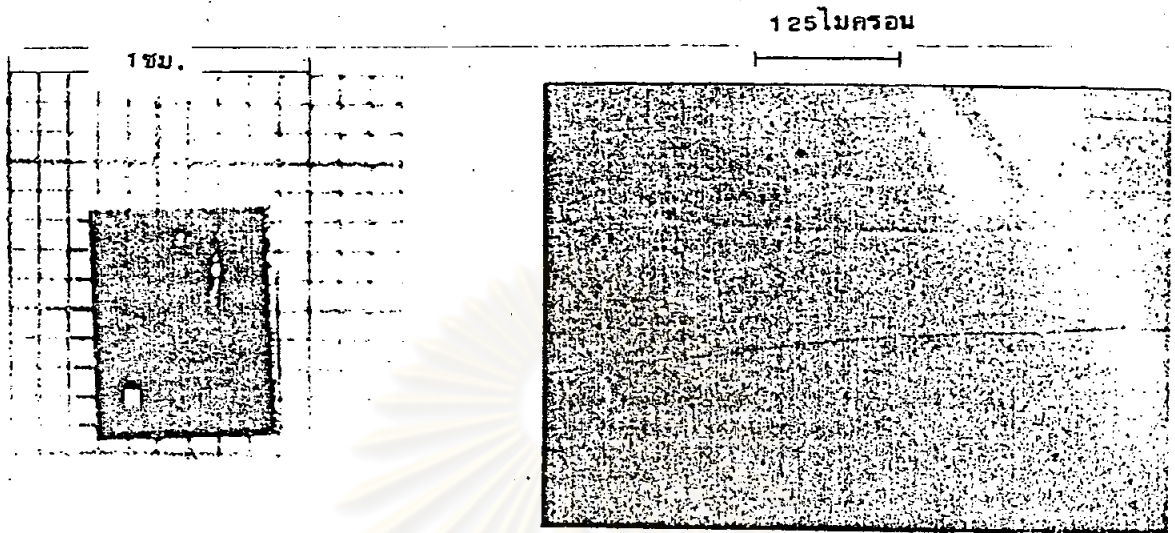


รูปที่ 5.17 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 22  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)

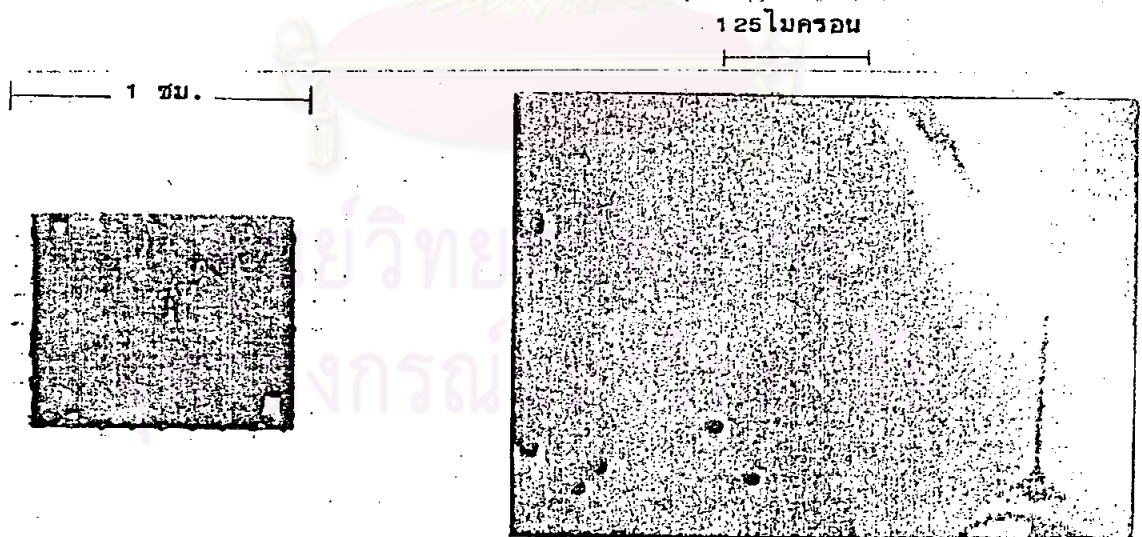


รูปที่ 5.18 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 23  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



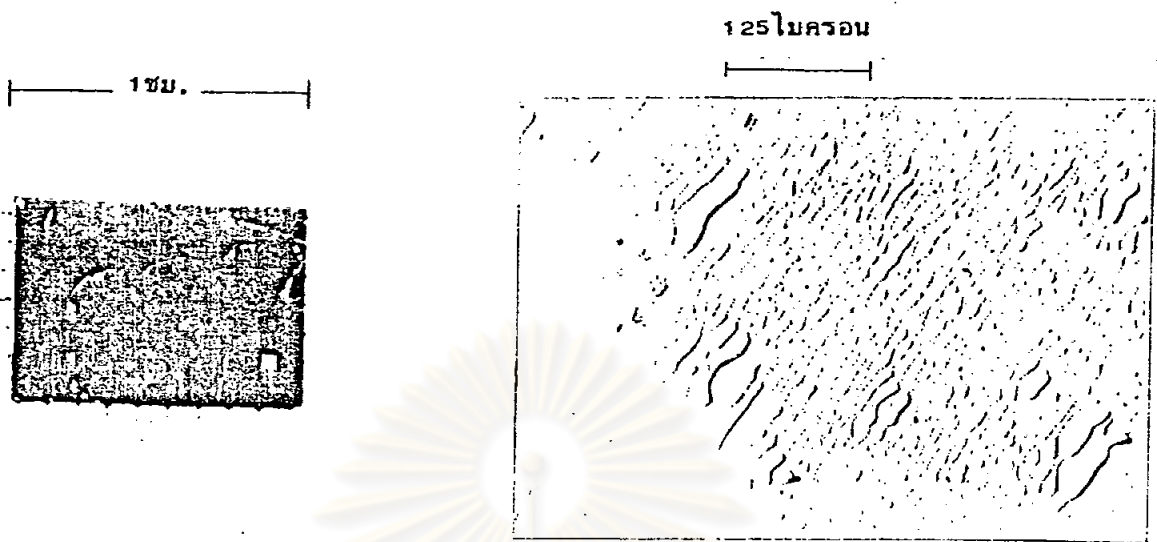


รูปที่ 5.19 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 24  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

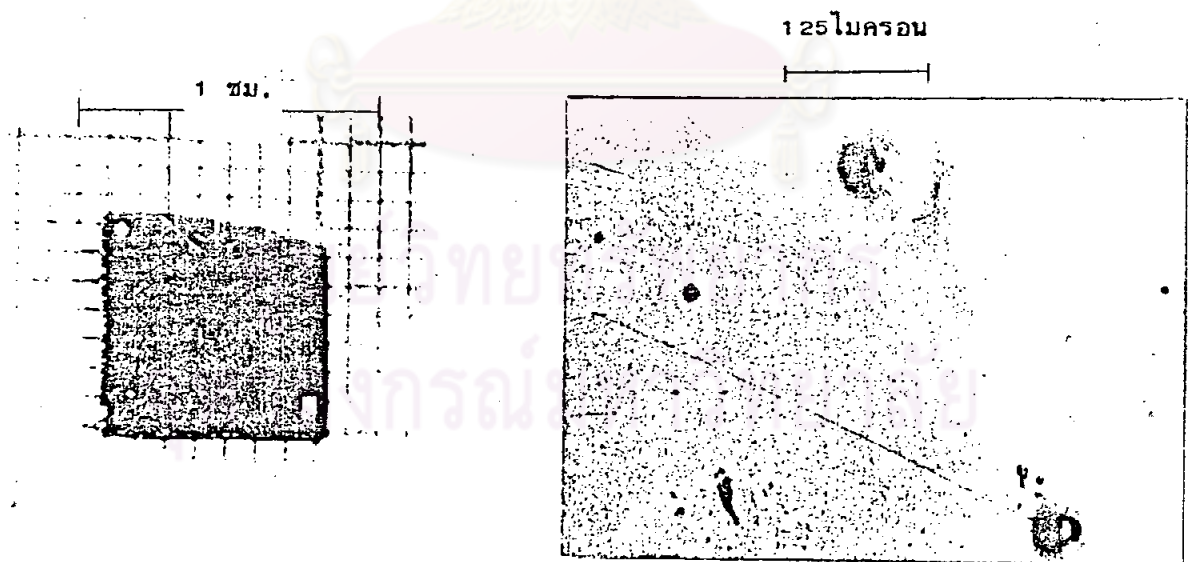


รูปที่ 5.20 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 25  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

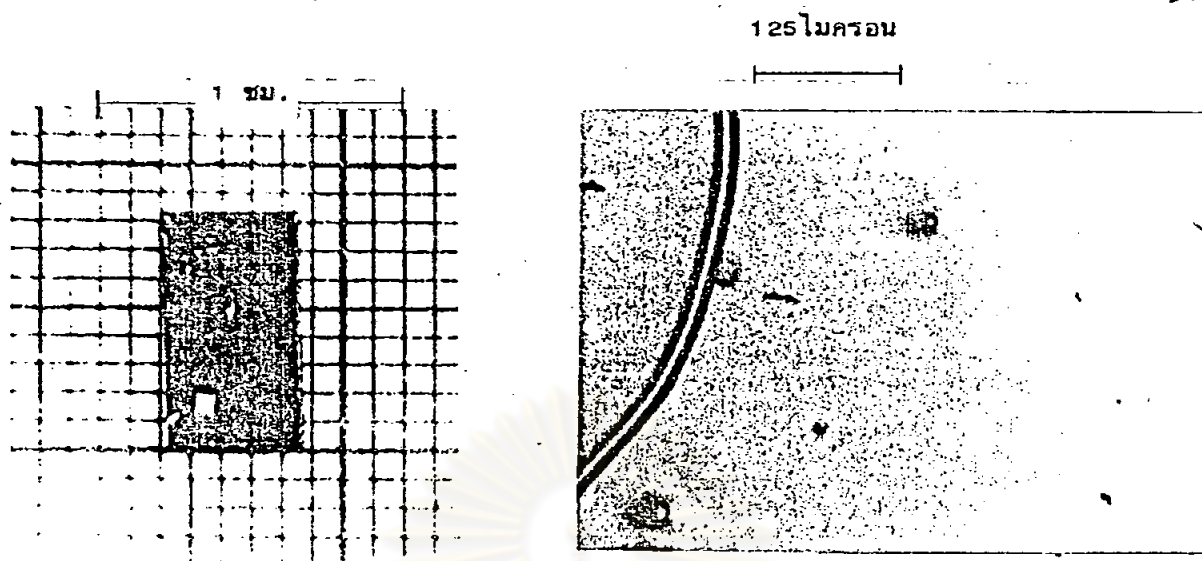




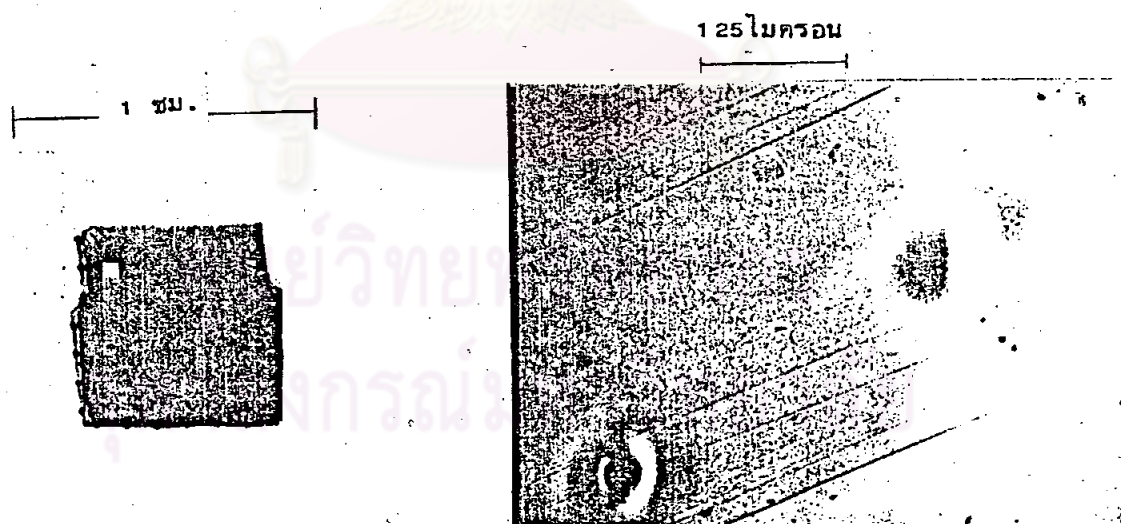
รูปที่ 5.21 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 26  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



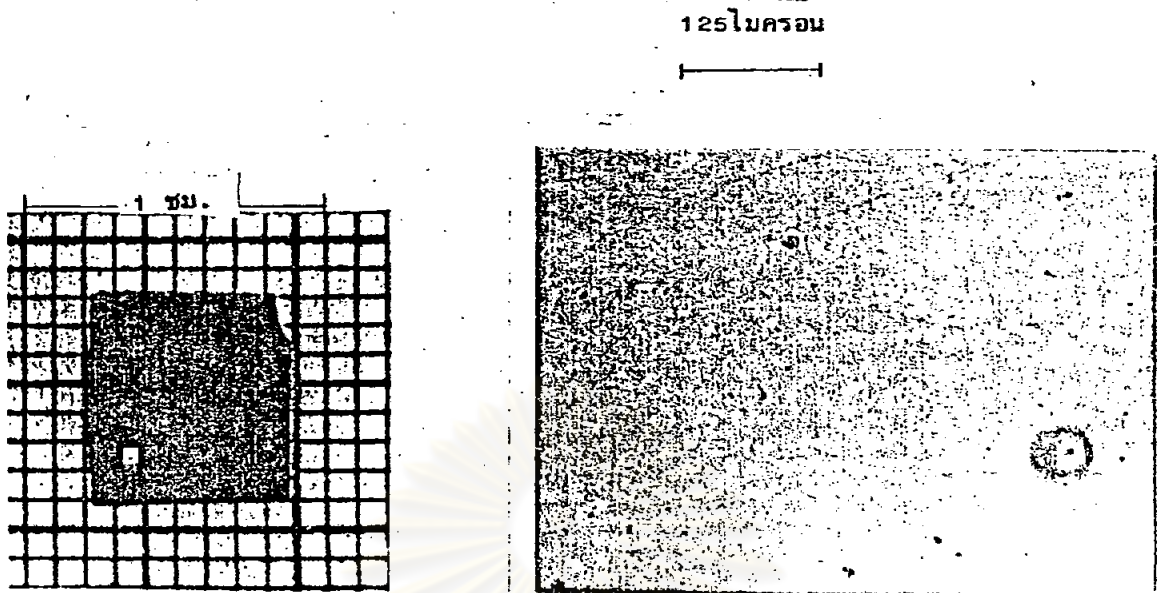
รูปที่ 5.22 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 27  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



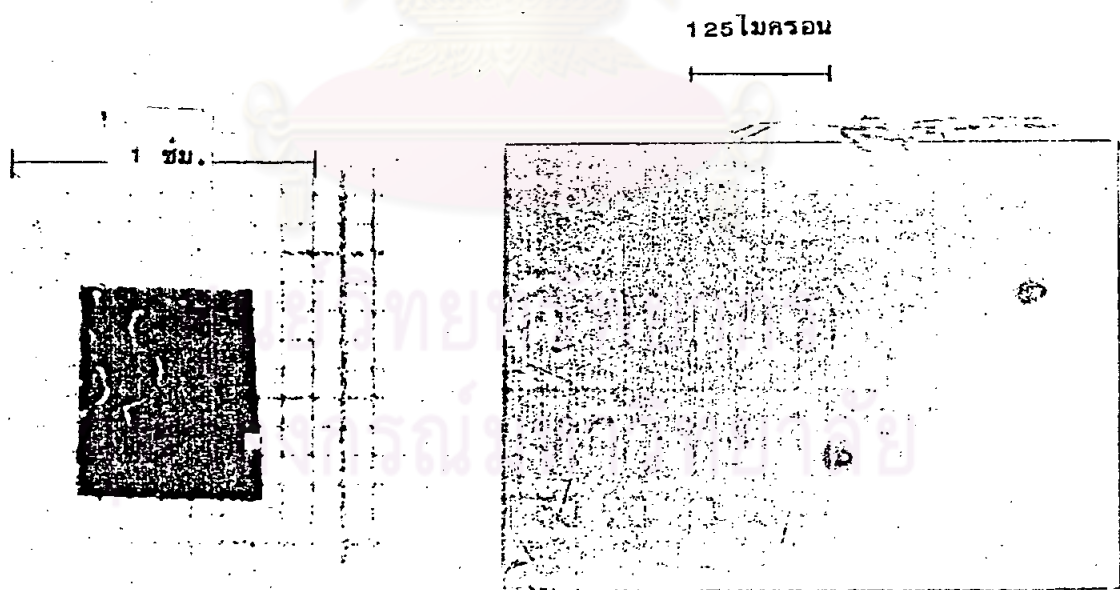
รูปที่ 5.23 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 29  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



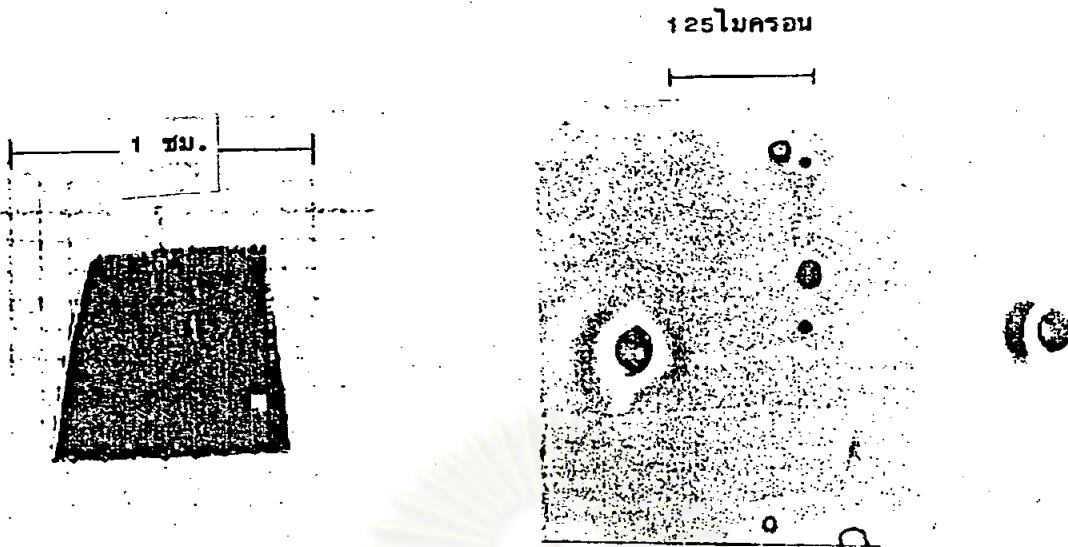
รูปที่ 5.24 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 40  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



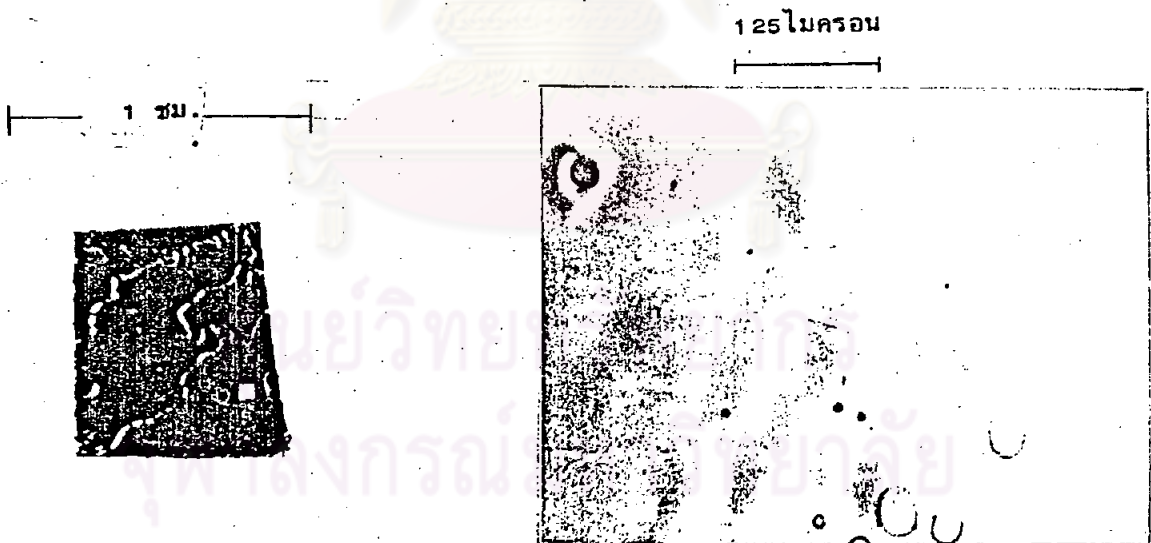
รูปที่ 5.25 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 46  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพถ่ายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



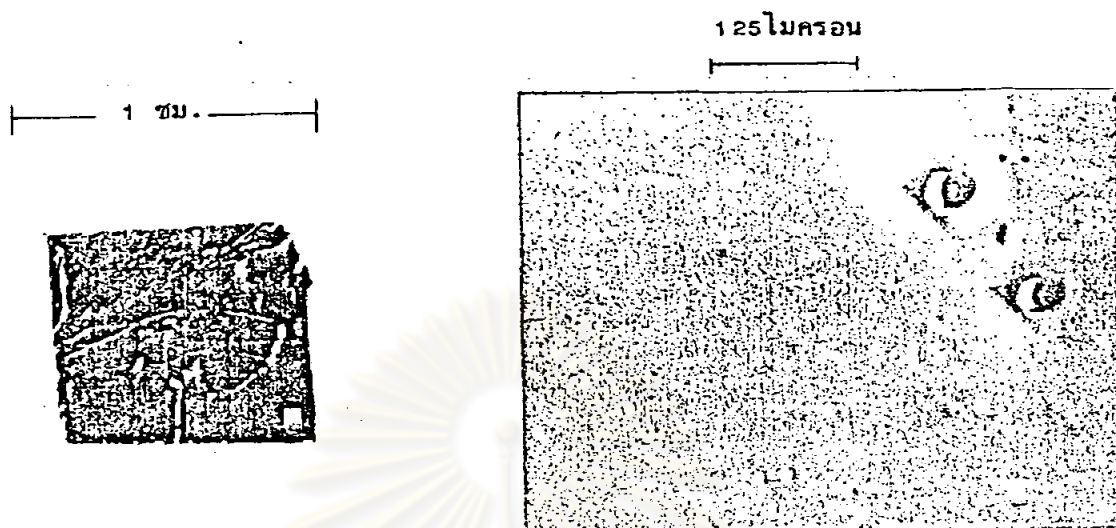
รูปที่ 5.26 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 47  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพถ่ายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.27 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 48  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.28 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 49  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.29 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 50 หลังจากที่มีการคัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



### 5.2.3 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีชุบเปอร์คลูลิ่ง

สำหรับอัตราการลดอุณหภูมิเนื่องจากการดับเตาซึ่งค่อนข้างสูงอยู่นั้น เราก็ยังได้ชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งยังนับว่าเรียบ เมื่อเริ่มต้นการจุ่มขณะอุณหภูมิลดลงไปจากอุณหภูมิที่สารละลายอิมมัตวประมาณ 2 °C และตั้งชั้นก่อนที่การเกิดผลึกในสารละลายจะเป็นไปอย่างกว้างขวาง และแม้ว่าอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ด้วยการใช้มือปรับจะไม่ดีไปกว่าสิ่งที่พอที่จะเรียกเป็นการปลูกด้วยวิธีชุบเปอร์คลูลิ่งได้อย่างเต็มตัว แต่จากผลที่ได้ก็สะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะปลูกผลึกให้มีพื้นผิวเรียบหัดเทียบกับผลึกที่ปลูกโดยวิธีสเติปคลูลิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิจนเป็นไปอย่างช้า ๆ เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเหล่านั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.33 ถึง 5.37 ตามลำดับหมายเลข

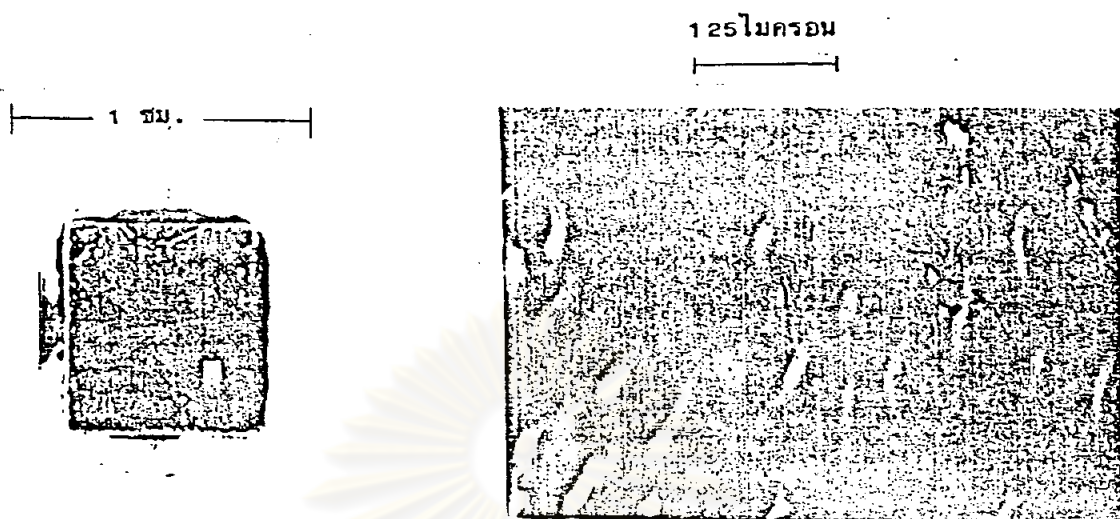


ตารางที่ 5.3 เงามโซการทดลองปลูกผักด้วยวิธีปุ๋ยมุ่รคูลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ  
เมื่อสารละลายถูกทำให้หมักด้วยอุณหภูมิ 79<sup>๒</sup> ซ

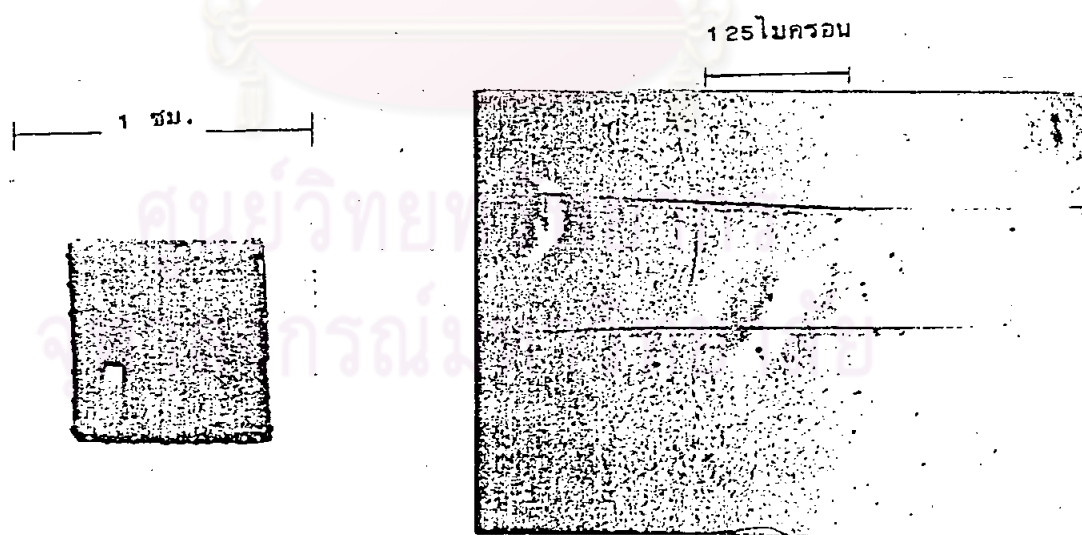
| หมายเลขตัวอย่าง | อุณหภูมิที่เริ่ม<br>จุมซึบสเตรต<br>( <sup>๐</sup> ซ) | $\Delta T$<br>( <sup>๐</sup> ซ) | อุณหภูมิที่<br>คั้งผลึก<br>ซึน( <sup>๐</sup> ซ) | อัตราการลด<br>อุณหภูมิเฉลี่ย<br>ในระหว่าง<br>การปลูกผลึก<br>( <sup>๐</sup> ซ/นาทึ) | ช่วงเวลา<br>ในการปลูก<br>ผลึก<br>(นาทึ) |
|-----------------|--|---------------------------------|---|--|---|
| 38              | 790  | 2                               | 784.9   | 0.25   | 19.5                                    |
| 39              | 790  | 2                               | 785   | 0.125  | 40                                      |
| 44              | 791  | 1                               | 786   | 0.125  | 40                                      |
| 54              | 790  | 2                               | 786.3   | 3.7  | 1                                       |
| 55*             | 790  | 2                               | 784   | 3  | 2                                       |

\* ซึบสเตรตเป็นแกลเลียมอาร์เซไนคั้งจนวน ซนิกเอิน โทปควยโครเมียม

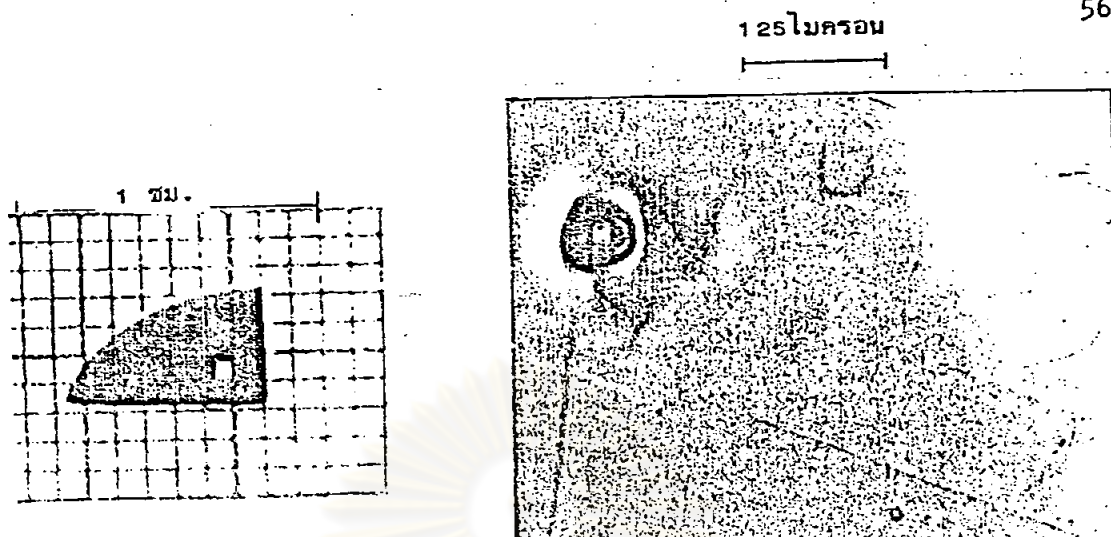
ศูนย์วิทยุพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



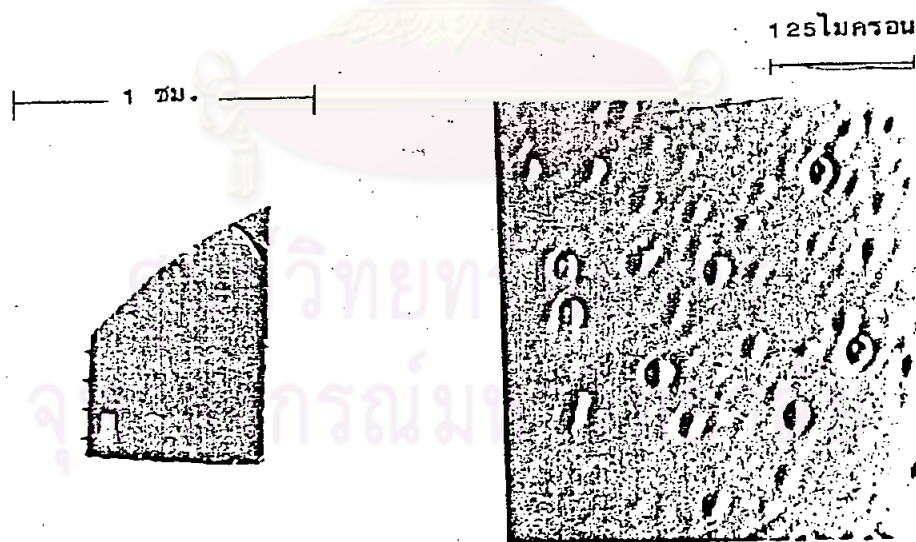
รูปที่ 5.30 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 38  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



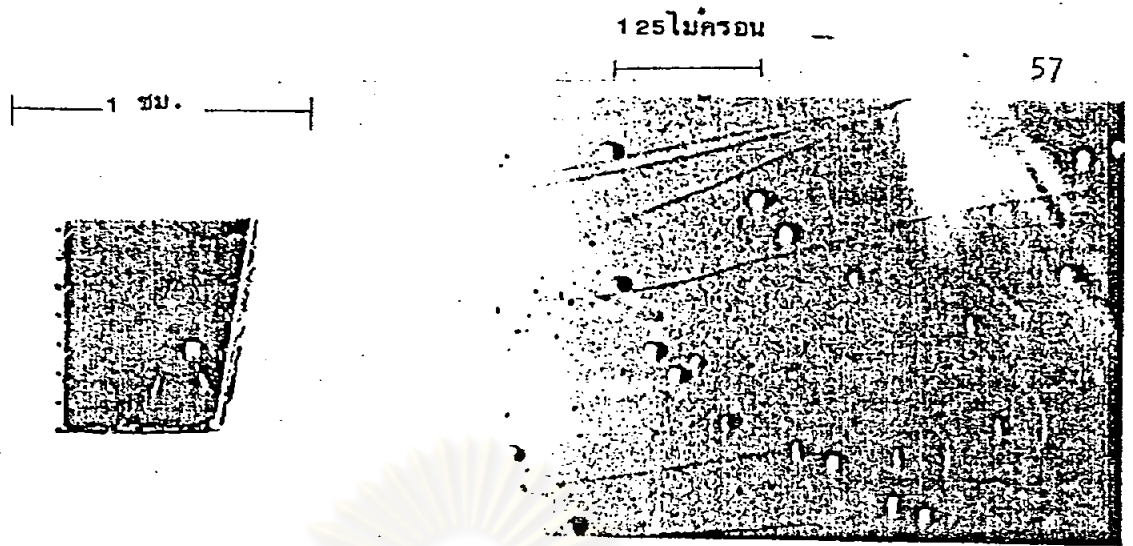
รูปที่ 5.31 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 39  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.32 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 44  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.33 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 54  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.34 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 55  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

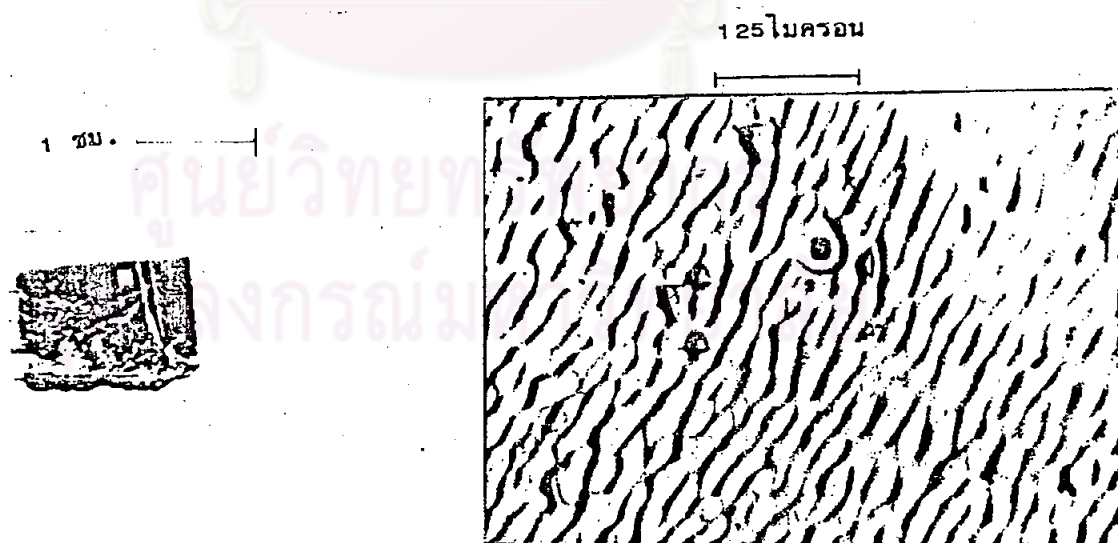


#### 5.2.4 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นด้วยวิธีทุฟเฟสโซลูชันคูลลิ่ง

จากการสังเกตได้ว่าค่าจำกัดของ  $\Delta T$  ซึ่งจะยังไม่มีปัญหาของการตกผลึกเองในสารละลายมีค่าเพียงประมาณ 5 °C สำหรับระบบที่ใช้ยูนีนี้ จึงได้มีการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีทุฟเฟสโซลูชันคูลลิ่ง และผลก็ปรากฏตามที่คาดคิด คือชั้นเอพิแทกซ์จะมีผิวลักษณะเป็นคลื่นนูน ซึ่งอาจจะเนื่องจากการเกิดสภาวะแปรปรวนรอบกวนบริเวณผิวต่อจากการเกิดผลึกเล็ก ๆ ในสารละลายนั้น เจื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเหล่านั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.38 และ 5.39 ตามลำดับหมายเลข

ตารางที่ 5.4 เองไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีฟูเฟสโซลูชันคูลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 792 °ซ

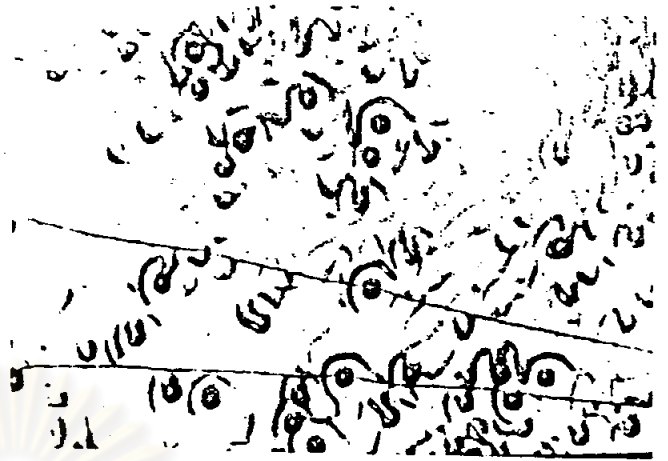
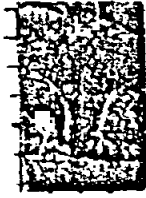
| หมายเลขตัวอย่าง | อุณหภูมิที่เริ่มจุ่มชั้น<br>สเตรต.<br>(°ซ) | $\Delta T$<br>(°ซ) | อุณหภูมิที่ถึงผลึก<br>ชั้น<br>(°ซ) | อัตราการลดอุณหภูมิเฉลี่ย<br>ระหว่างการปลูกผลึก<br>(°ซ/นาที) | ช่วงเวลาในการปลูกผลึก<br>(นาที) |
|-----------------|--|--------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1               | 769  | 23                 | 757                                | 4   | 3                               |
| 2               | 784  | 8                  | 776                                | 4   | 2                               |



รูปที่ 5.35 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 1 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



1 ซม.



รูปที่ 5.36 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 2  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

#### 5.2.5 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีทรานเซียนโทมดลิวิดเอพิแทกซ์

ในกรณีของอาร์จุ่มซัสเตรทที่เย็นลงในสารละลายอิมิตัวยิ่งยวดที่ร้อนกว่านั้น ดูเหมือนว่าการปลูกผลึกด้วยวิธีนี้จะสามารถให้เกิดสภาวะเย็นยิ่งยวดได้ในระดับที่สูงกว่าการปลูกผลึกด้วยวิธีสตีปคูลลิ่ง โดยไม่มีปัญหาของการตกผลึกเองมากเท่าใดนัก ผิวของชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้ก็เรียบดี กว่า การจุ่มซัสเตรทที่เย็นลงในสารละลายอิมิตัวพอดีน ได้ชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งบางมาก แต่จะใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้ในตอนนี้ จนกว่าจะสามารถจัดปัญหาของการเกิดหลุมลงได้เสียก่อน เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.5 และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเหล่านั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.40 ถึง 5.42 ตามลำดับหมายเลข

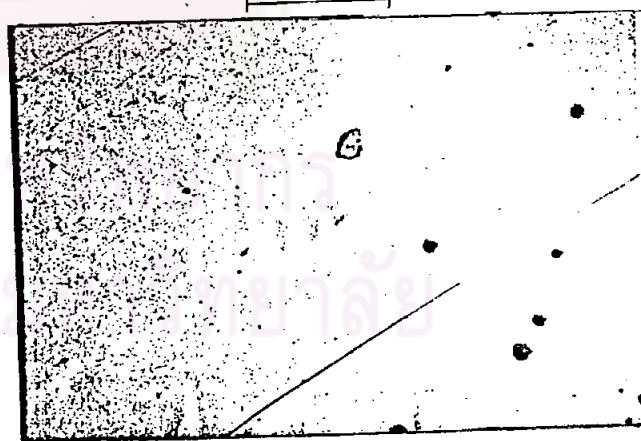
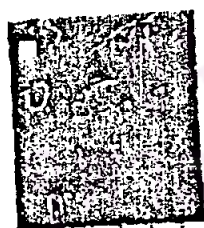
ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีทรานเซียน โหมคลิควิดเอทิกแกซี  
สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792° ซ

| หมายเลข<br>ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>เริ่มต้นของ<br>ซึบสเตรต<br>(° ซ) | อุณหภูมิสารละลาย<br>เมื่อเริ่มจุ่ม<br>ซึบสเตรต<br>(° ซ) | อุณหภูมิที่ถึงผลึกขึ้น<br>(° ซ) | ช่วงเวลาในการปลูกผลึก<br>(นาที) |
|---------------------|--|---|---------------------------------|---------------------------------|
| 32*                 | 748  | 792   | 792                             | 3                               |
| 35                  | 745  | 789   | 789                             | 60                              |
| 37                  | 724  | 789   | 789                             | 40                              |

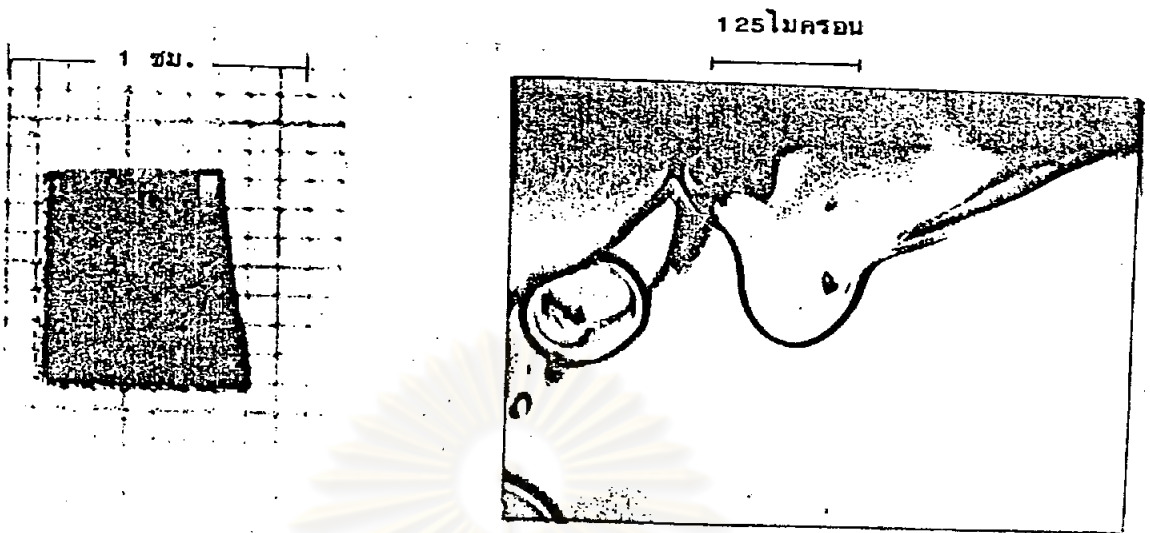
\* ซึบสเตรตเป็นแกลเลียมอาร์เซไนด์กึ่งฉนวน ชนิดเอ็นโคปควายโคโรเมียม

125 ไมครอน

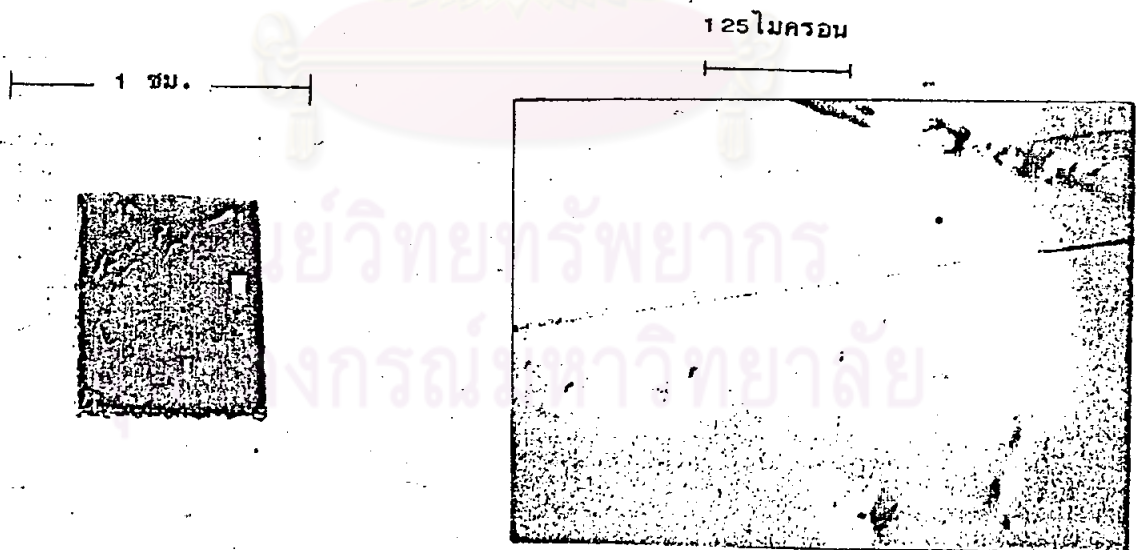
1 ซม.



รูปที่ 5.37 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 32  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.38 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 35  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.39 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 37  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

### 5.2.6 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นภายหลังการกัดผิวหน้าซึบสเตรคออกในสารละลายแกลเลียม

หลักการก็เพียงแต่จุ่มซึบสเตรคลงไปในสารละลายที่ยังไม่อิ่มตัว ก่อนที่จะลควุดหนุมิลง

ในการกระทำเช่นนี้จุดประสงค์ใหญ่ก็เพื่อลอกผิวหน้าซึบสเตรค ซึ่งอาจจะเป็นตำหนิของผลึก (defects) หรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกไป ก่อนการปลูกผลึก ข้อเสียสำหรับระบบที่ใช้ทดลองนี้ก็คือ การที่สารละลายอยู่ด้วยเคียว สิ่งสกปรกที่หลุดออกมาจากผิวซึบสเตรคก็จะสะสมอยู่ในเนื้อสารละลาย ซึ่งก็จะใช้ปลูกผลึกต่อไปอีก ในช่วงเวลาที่จำกัดของการทดลองนี้ยังไม่พบเงื่อนไขของการกัดซึบสเตรคในสารละลายให้ได้ผิวเรียบ จากการปลูกชั้นเอพิแทกซ์ข้างไปจึงได้ผิวที่ไม่ดีด้วย และจึงไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างการกัดผิวแล้วแช่ทิ้งไว้ขณะทำการลควุดหนุมิกับการกัดผิวที่ใช้เวลาตามต้องการแล้วดึงขึ้นเหนือสารละลายครั้งหนึ่งก่อนที่จะจุ่มอีกครั้งเพื่อปลูกผลึก เมื่อลควุดหนุมิของสารละลายลดลงไปจนมันอิ่มตัวด้วยควยี้ง เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเหล่านั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.43 ถึง 5.47 ตามลำดับหมายเลข

ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขในการปลูกผลึกภายหลังการกัดผิวหน้าซึบสเตรคออกในสารละลายแกลเลียม สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

| หมายเลขตัวอย่าง | ลควุดหนุมิซึบสเตรคที่ถูกทำให้อิ่มตัว (ช) | ลควุดหนุมิที่เริ่มจุ่มซึบสเตรคเพื่อการกัดผิว (ช) | ลควุดหนุมิที่ดึงซึบสเตรคขึ้นเพื่อยุติการกัดผิว (ช) | เวลาของการกัดผิว (นาที) | ลควุดหนุมิที่เริ่มจุ่มซึบสเตรคเพื่อปลูกผลึก (ช) | การเปลี่ยนแปลงของลควุดหนุมิระหว่างการเริ่มกัดผิวไปจนถึงสิ้นสุดการเกิดผลึก (โดยประมาณ)      | ลควุดหนุมิที่ดึงผลึกขึ้นจากสารละลายเพื่อยุติการเกิดผลึก (ช) |
|-----------------|--|--|--|-------------------------|---|--|---|
| 28              | 792                                      | 794  | -  | -                       | -   | 0ช/นาที สำหรับ 6 นาทีแรก<br>-0.6ช/นาที สำหรับ 6 นาทีต่อมา<br>0ช/นาที สำหรับ 33 นาทีสุดท้าย | 790   |

ตารางที่ 5.6 (ต่อ) เงามโซในการปลูกผลึกภายหลังการกัดผิวหน้าขั้วสเตอรตอกในสารละลาย  
แคลเซียม สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

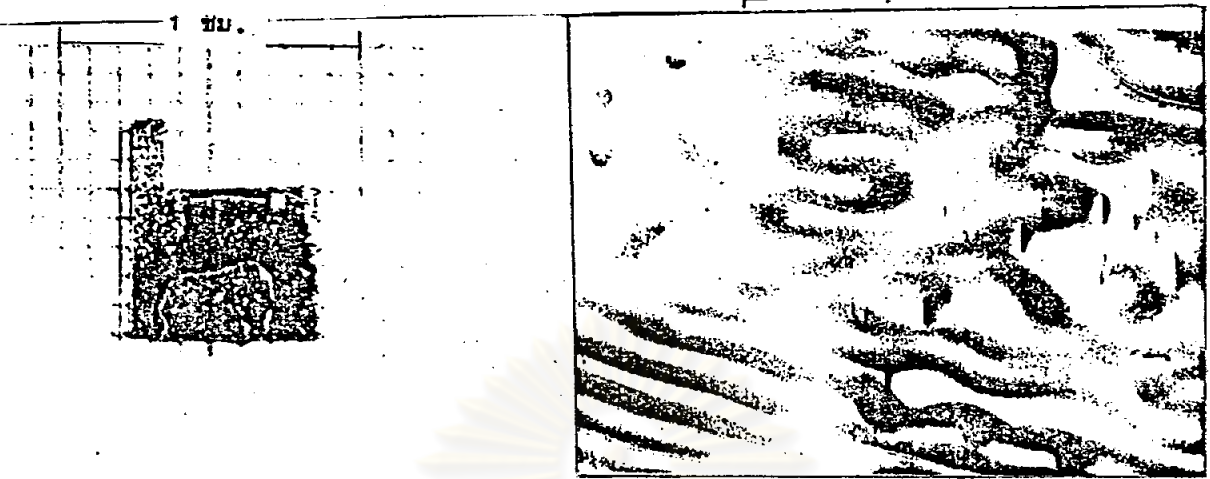
|      |      |     |       |    |     |   |       |
|------|------|-----|-------|----|-----|---|-------|
| 30   | 792  | 792 | -     | -  | -   | +0.2ซ/นาที่สำหรับ<br>14 นาที่แรก<br>-0.8ซ/นาที่สำหรับ<br>6 นาที่ต่อมา<br>0ซ/นาที่ สำหรับ<br>35 นาที่สุดท้าย | 790   |
| 33   | 792  | 792 | 794.5 | 10 | 790 | +0.25ซ/นาที่ใน<br>ช่วง 10 นาที่ของ<br>การกัดผิว และ<br>0ซ/นาที่ในช่วง<br>50นาที่ของการ<br>เกิดผลึก          | 790   |
| 45   | 790* | 791 | -     | -  | -   | -0.125ซ/นาที่ใน<br>ช่วงเวลาทั้งหมด<br>60 นาที่  | 784.5 |
| 56** | 790* | 791 | -     | -  | -   | 0ซ/นาที่สำหรับ<br>20 นาที่แรก<br>-0.14ซ/นาที่<br>สำหรับ 25นาที่<br>ต่อมา                                    | 787.5 |

\* ค่าประมาณเนื่องจากเวลาของการทำให้สารละลายอิ่มตัวที่ 792 ซ น้อยกว่าปกติ

\*\* ขั้วสเตอรตอกชนิดที่โตไปด้วยสังกะสีมีความเข้มข้น  $2 \times 10^{18}$  ซม<sup>-3</sup>



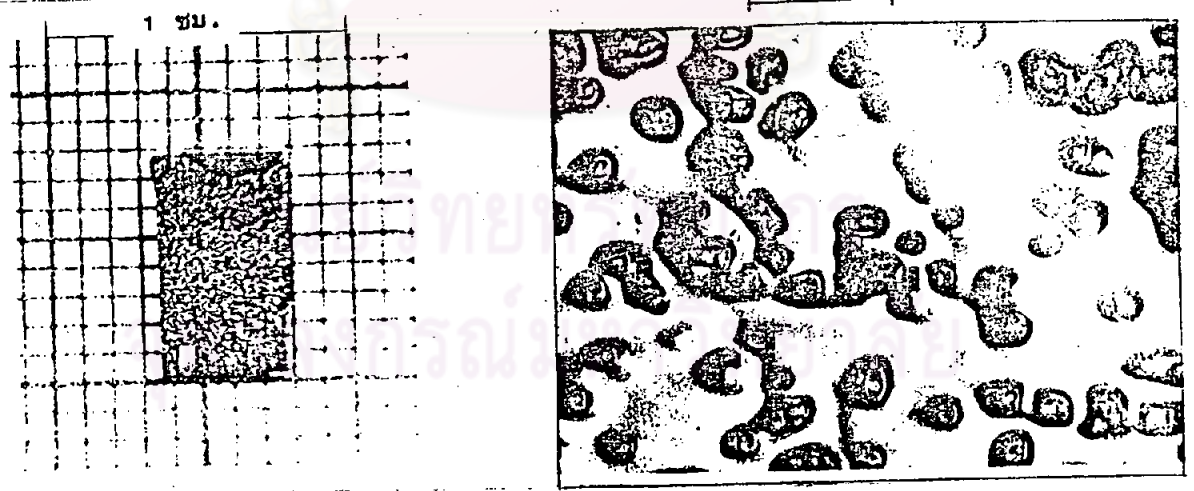
125 ไมครอน



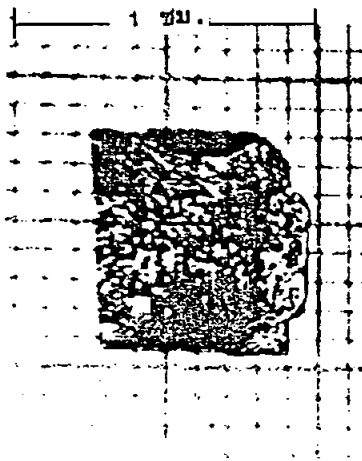
รูปที่ 5.40 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 28  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



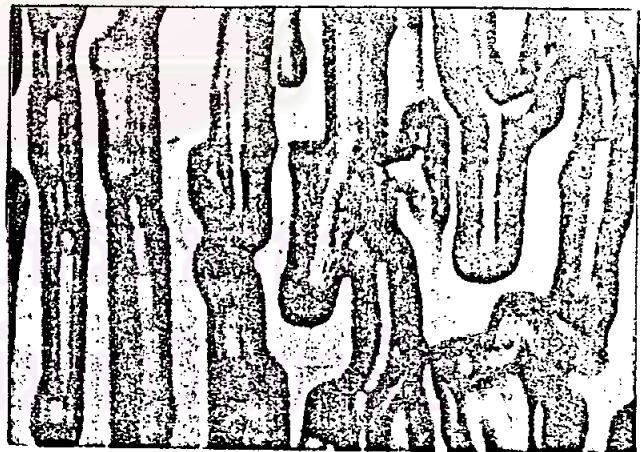
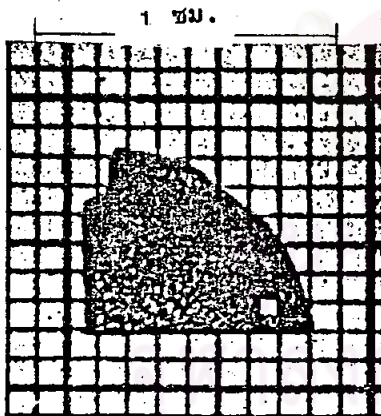
125 ไมครอน



รูปที่ 5.41 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 30  
 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
 พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
 สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

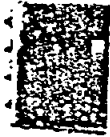


รูปที่ 5.42 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 33  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)



รูปที่ 5.43 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 45  
หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย)  
พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่ง  
สีเหลี่ยมสีขาว (ขวา)

1 ซม.



รูปที่ 5.44 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 56 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)

#### 5.2.7 ผิวหน้าของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นบนชั้นสเตรตตีฟวาทัวในแนวระดับ ในสารละลาย

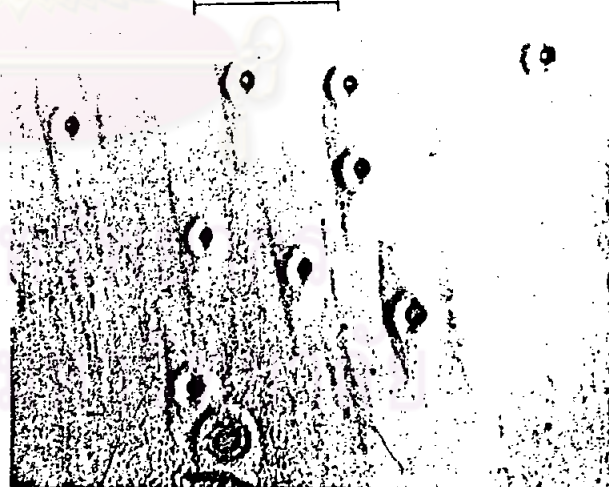
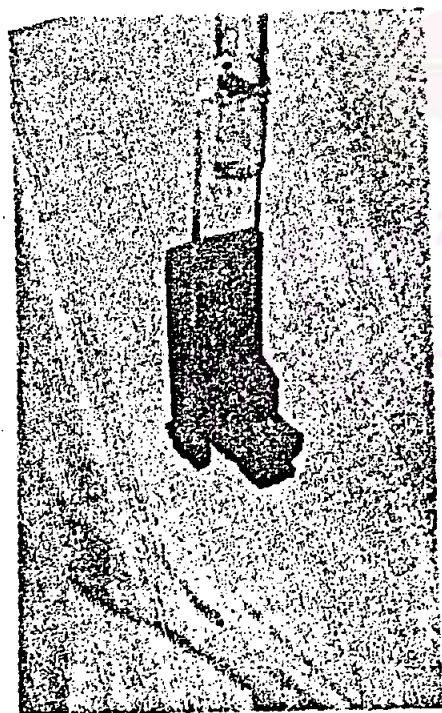
สารละลายแกลเลียมมีแรงดึงผิวสูง ดังนั้น การให้ชั้นสเตรตตีฟวาทัวในแนวตั้ง ก็จึงนับได้ว่ามีความเหมาะสมที่สุดในแง่ของความสะดวกการดึงผลึกขึ้นจากสารละลาย และโอกาสที่แกลเลียมเหลวจะติดผิวชั้นเอพิแทกซ์ขึ้นมาก็มีน้อย อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะศึกษาถึงผลของการวางชั้นสเตรตตีฟวาทัวในแนวระดับในสารละลายก็จึงได้มีการออกแบบด้วยชั้นสเตรตตีฟวาทัวอนึ่งยังคงคุณสมบัติที่ดีของตัวยึดชั้นสเตรตตีฟวาทัวในแนวตั้งไว้ให้มากที่สุดขึ้น ลักษณะของมันก็คล้ายกับตัวยึดชั้นสเตรตตีฟวาทัวแนวตั้งทำด้วยแกรไฟต์ที่ข้อยู่เพียงแต่ส่วนปลายนั้นอิสระสามารถพับงอทำให้ชั้นสเตรตตีฟวาทัวตามแนวระดับได้ด้วยแรงลอยตัวในของเหลว และอยู่ในสภาวะที่ตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 5.45 ได้มีการทดลองปลูกผลึกบนตัวยึดนี้เพียง 2 ครั้ง เนื่องจากมันมิได้ช่วยในการคลี่คลายปัญหาของการเกิดหลุมบนพื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์แม้ว่าลักษณะของหลุมที่พบในกรณีนี้ดูเหมือนจะผิดแผกไป เงื่อนไขในการทดลองสำหรับตัวอย่างทั้งสองมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.7 และภาพถ่ายพื้นผิวของมันได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.46 และ 5.47 ตามลำดับหมายเลข ตัวอย่าง

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบในการปลูกผลึกบนซึบสเตรตที่วางตัวตามแนวระดับในสารละลายซึ่งถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 ซ

| หมายเลขตัวอย่าง | อุณหภูมิที่เริ่มจุ่มซึบสเตรต | อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ<br>( $^{\circ}\text{ซ}/\text{นาท}$ ) | อุณหภูมิที่ถึงผลึกขึ้น | ช่วงเวลาของการปลูกผลึก<br>(นาท) |
|-----------------|------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
| 51*             | 790                          | 0  | 790                    | 30                              |
| 52              | 791                          | 0.125  | 786                    | 40                              |

\*ซึบสเตรตเป็นแกลเลียมอาร์เซไนต์กึ่งฉนวนชนิดเอ็นโตปด้วยโครเมียม

125ไมครอน

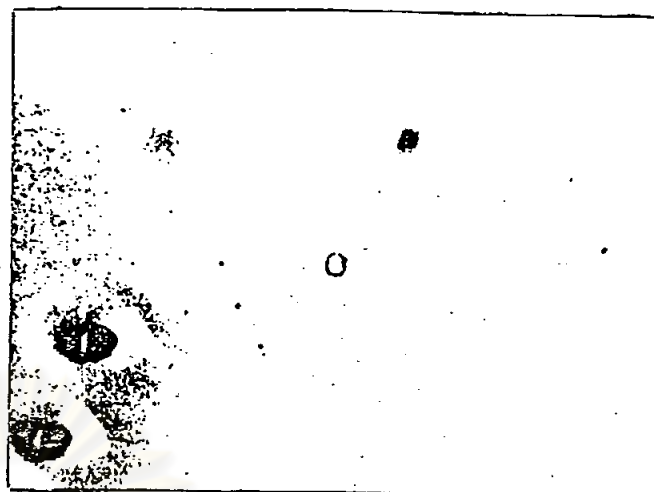
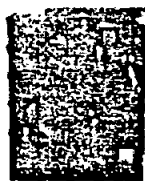


รูปที่ 5.46 ภาพขยายของพื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 51

รูปที่ 5.45 ตัวยึดซึบสเตรตซึ่งส่วนปลายของมันจะหึ่งอยู่ในแนวระดับพื้นที่ที่ถูกแช่ในแกลเลียมเหลว



1 ซม.



รูปที่ 5.47 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลข 52 หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน (ซ้าย) พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวตรงตำแหน่งสี่เหลี่ยมสีขาว (ขวา)



### 5.3 ผลการ ตรวจสอบ และวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning electron microscope )

การดูความหนาของชั้นที่ปลูกลงกระทำโดยการกรีดขอบด้านใดด้านหนึ่งของตัวอย่าง ด้วยเข็มเพชรแล้วคว่ำหน้าผลึก กัดที่ด้านหลังเบา ๆ จะทำให้มันปริออกเองตามแนวธรรมชาติ ผลจะได้สั้นซึ่งเรียบ จากนั้นก็ทำการ stain มันด้วยน้ำยาคัด A - B ตามสูตรของ Olsen (47) ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมปริมาตรเท่ากันระหว่างสารละลาย A (  $40 \text{ cm}^3 \text{H}_2\text{O} + 0.3 \text{ g AgNO}_3 + 40 \text{ cm}^3 \text{HF}$  ) กับสารละลาย B (  $40 \text{ g CrO}_3 + 40 \text{ cm}^3 \text{H}_2\text{O}$  ) เพื่อแยกให้เห็นรอยต่อระหว่างชั้นสเตรคกับชั้นเอพิแทกซ์ โดยใช้เวลาประมาณ 3 วินาทีแล้วล้างออกด้วยน้ำ เนื่องจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาเราไม่สามารถปรับเอียงแทนวางตัวอย่างได้อีกทั้งยังมีกำลังขยายที่ต่ำกว่า การตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ทั้งหมดจึงกระทำโดยนำมันเหล่านั้นไปฉาบทองบาง ๆ แล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดของห้องปฏิบัติการวิจัย ฯ



5.3.1 ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ ซึ่งปลูกโดยวิธีคิวลิเบรียม

กอลลิ่ง

ผลการ วัดความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ซึ่งปลูกด้วยวิธีนี้ สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี แสดงอยู่ในตารางที่ 5.8 และภาพถ่ายของ สันแสดงความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ที่ขอบด้านหนึ่งของ ตัวอย่าง มีแสดงไว้ในรูปที่ 5.48 ถึง 5.50 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่าง

ตารางที่ 5.8 ผลการ วัดความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีคิวลิเบรียมกอลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี

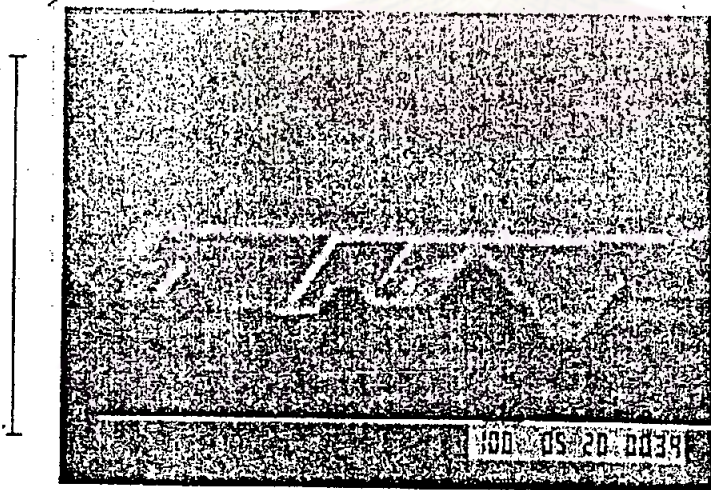
| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่คำนวณ จากทางเทอร์โม ไดนามิกส์ (ไมครอน) | ความหนาที่คำนวณโดย ใช้ทฤษฎีการแพร่ (สมการที่ 24) (ไมครอน) | ความหนาที่วัดได้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง (ไมครอน) |
|-----------------|--|---|---|
| 3               | 455  | 1.8   | 2.5, 7.5, 20*                                       |
| 4               | 381  | 6.0   | 16.0  |
| 17              | 1084   | 1.9   | 15.1  |

\* กรณีนี้ผลึกเกิดไม่เต็มหน้าใบสเตรต ความหนาข้างต้นแทนความสูงของ islands



500 ไมครอน

100 ไมครอน



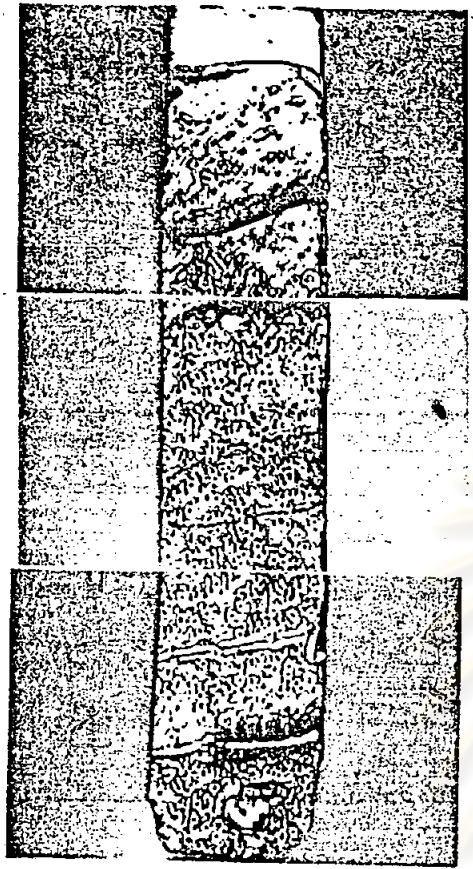
← ชีบสเตรด

ชั้น เอพิแทกซี

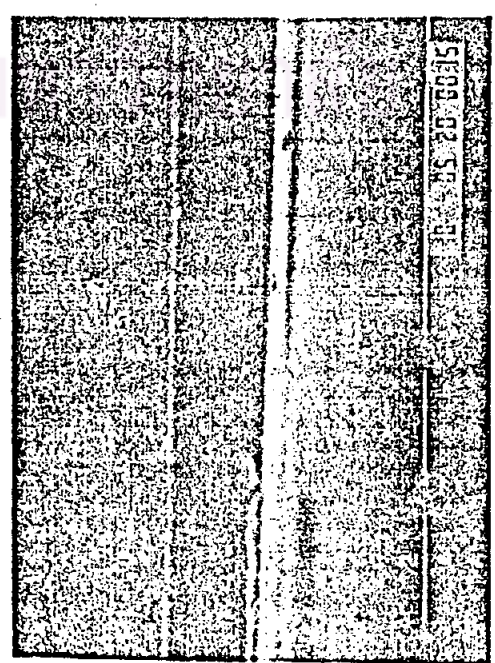
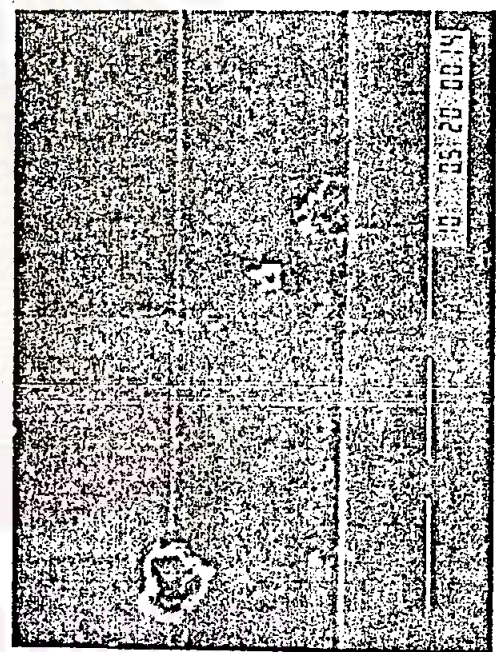
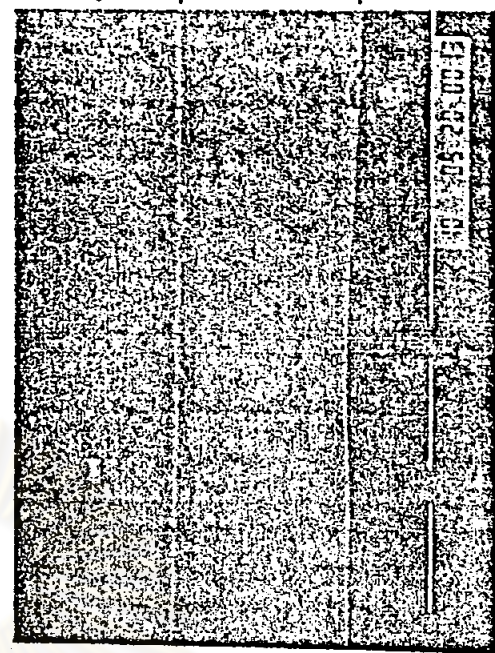
รูปที่

ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 3 (บน) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ล่าง)

ชั้นสเตรด ชั้นเอพิแทกซี

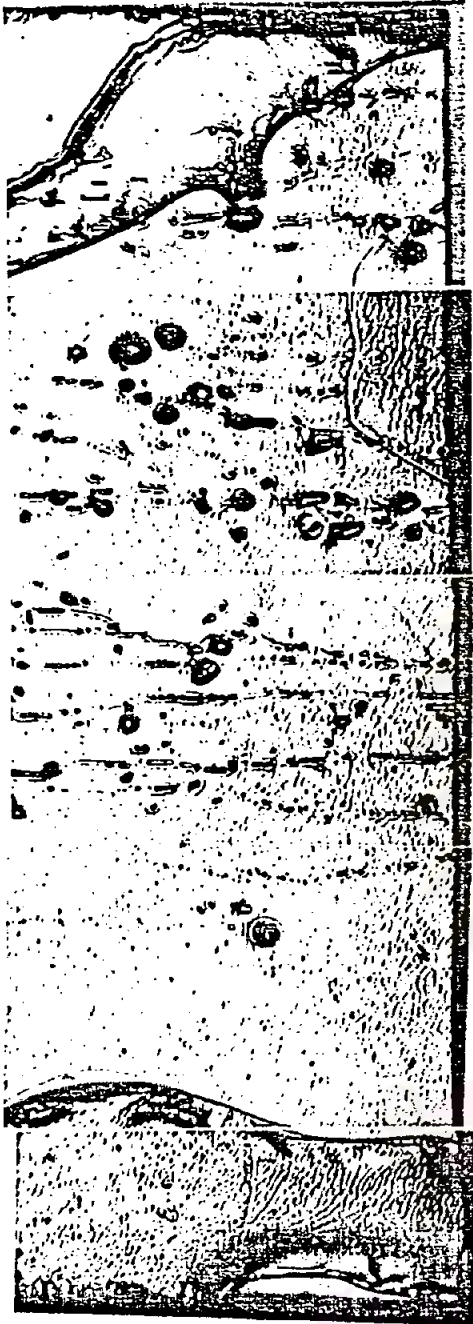


500 ไมครอน

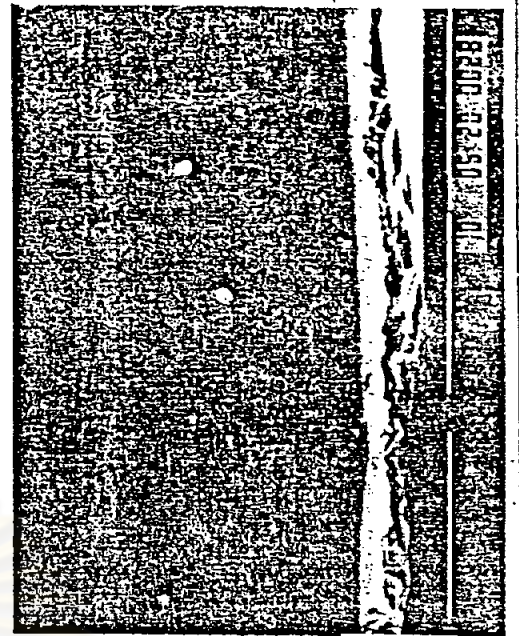


รูปที่ 5.49 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 4 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสัณฐานแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

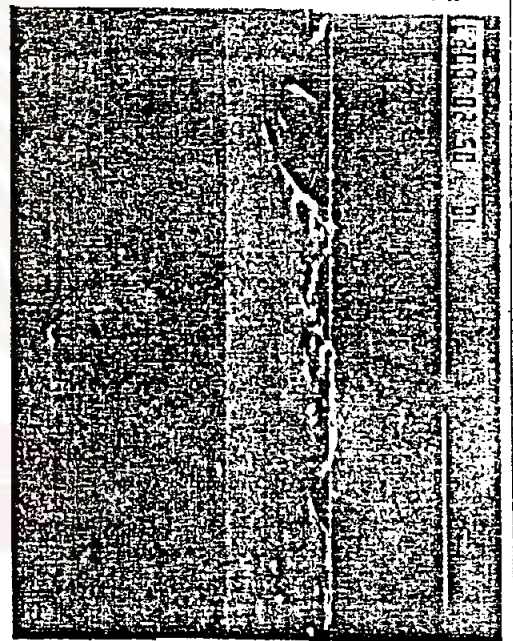




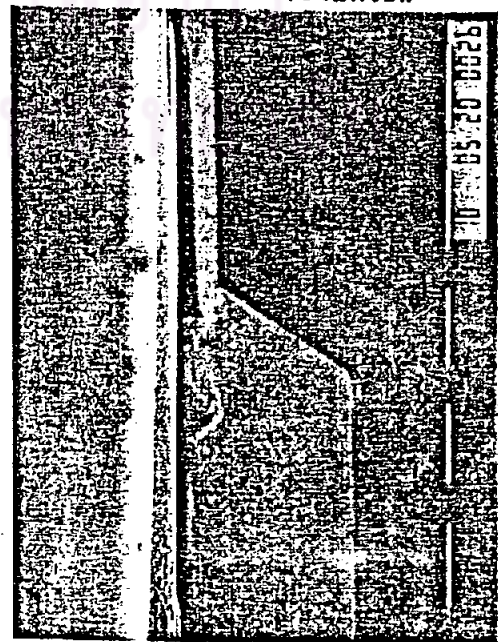
500 ไมครอน



10 ไมครอน



10 ไมครอน



ชั้นเยื่อ

ชั้นลิวซิโนส

รูปที่ 5.50 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่ง  
ของผนังคว่ำอย่างหมายเลข 17  
(ซ้าย) หรือภาพถ่ายสันแสดงความ  
หนาของชั้นเอพิแทกซี ฅ บริเวณที่  
คล้องจองกัน (ขวา)

พิจารณาจากข้อมูลจะเห็นว่าเทอร์โมไดนามิกส์มีบทบาทในการกำหนดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ได้อย่างใด การที่อัตราการเกิดผลึกสูงกว่าที่ควรจะเป็นโดยกลไกของการแพร่ก็เป็นไปตามที่ได้คาดหมายกันเอาไว้ ทั้งนี้เพราะสภาวะแวดล้อมของการเกิดผลึกในระบบนี้ เอื้ออำนวยให้มีการพาเกิดขึ้นโดยง่ายนั่นเอง

### 5.3.2 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสตีป คูลิ่ง

ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นด้วยวิธีนี้สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี แสดงอยู่ในตารางที่ 5.9 รูปที่ 5.51 และรูปที่ 5.52 เป็นการลงจุดข้อมูลเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ 25 ระหว่างความหนากับเวลาที่  $T = 5^{\circ}\text{C}$  และ ระหว่างความหนา กับ  $\Delta T$  เมื่อใช้เวลาการปลูกผลึก 40 นาที เทียบกันสังเกตได้ว่าได้มีการปลูกผลึกด้วยเงื่อนไขซ้ำ ๆ กัน หลายครั้ง แต่ความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ก็มีค่าไม่แน่นอน สะท้อนให้เห็นถึงความไม่แน่นอนในอัตราการเกิดผลึกเนื่องมาจากการกวนบางอย่างที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้นมีความผันแปรในการทดลองแต่ละครั้ง ภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่ขอบหนึ่งขอบใดของตัวอย่าง แสดงไว้ในรูปที่ 5.53 ถึง 5.76 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่างชั้นเอพิแทกซ์ ส่วนใหญ่มีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ ตามแนวตั้งทางตอนบน จะหนากว่าทางตอนล่างสอดคล้องตามสมมุติฐานของการเกิดโซลูทล คอนเวกชัน

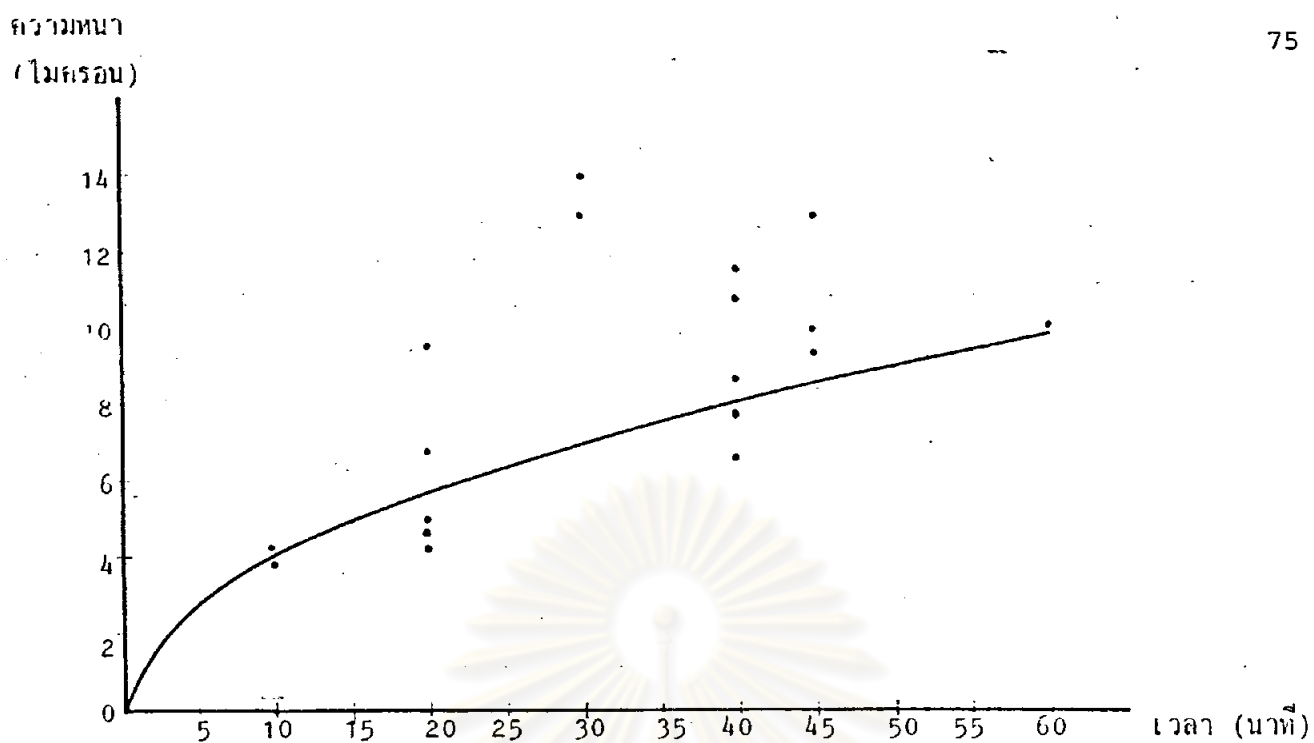
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



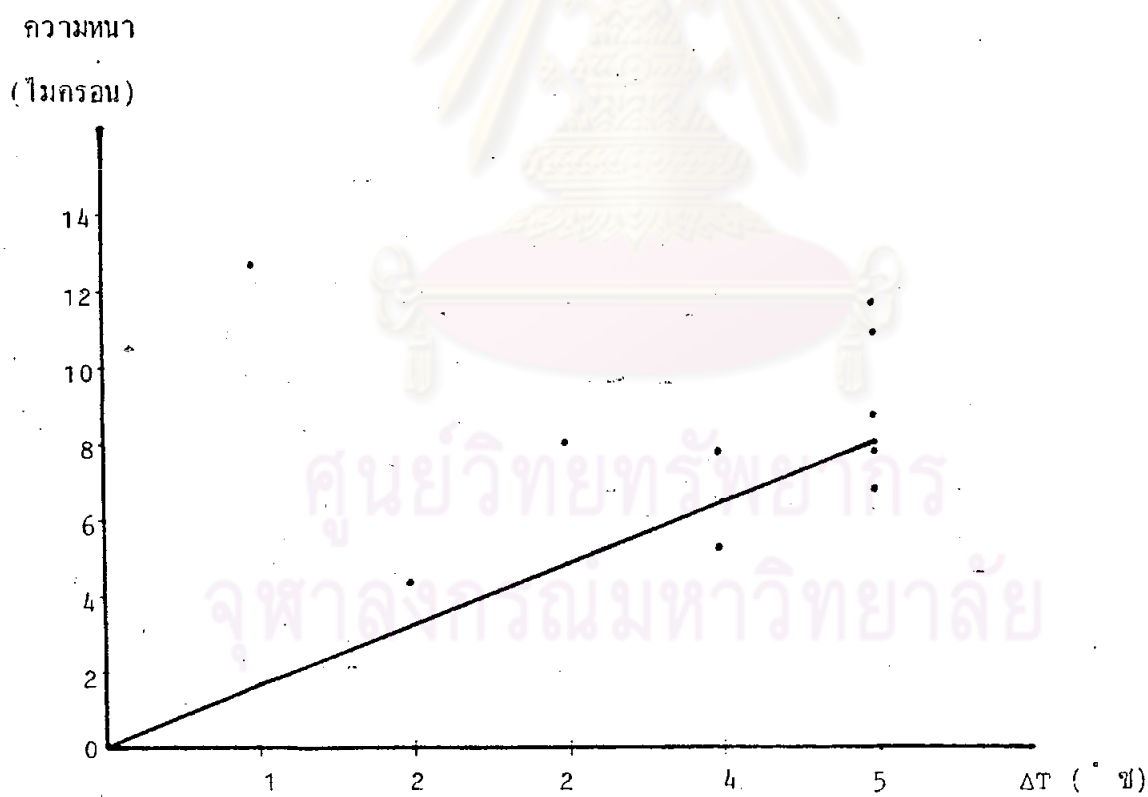
ตารางที่ 5.9 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธี สตีป คุลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี

| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่คำนวณ<br>จากทางเทอร์โม<br>ไดนามิกส์<br>(ไมครอน) | ความหนาที่คำนวณ<br>โดยใช้ทฤษฎีการ<br>การแพร่<br>(สมการที่ 25)<br>(ไมครอน) | ความหนาที่วัดได้<br>ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง<br>ตัวอย่าง<br>(ไมครอน) |
|-----------------|---|---|---|
| 6               | 381.2   | 4.0   | 4   |
| 7               | 381.2   | 8.0   | 11.6  |
| 8               | 381.2   | 5.7   | 6.8   |
| 9               | 381.2   | 4.0   | 4.3   |
| 10*             | 381.2   | 5.7   | 4.7   |
| 11              | 381.2   | 5.7   | 4.3   |
| 13              | 381.2   | 8.5   | 9.4   |
| 14              | 381.2   | 9.8   | 10  |
| 15              | 381.2   | 8.5   | 13  |
| 19              | 381.2   | 5.7   | 9.6   |
| 20              | 381.2   | 5.7   | 5   |
| 22              | 381.2   | 6.9   | 14  |
| 23              | 381.2   | 8.0   | 8.7   |
| 24              | 381.2   | 8.0   | 7.8   |
| 25              | 381.1   | 8.0   | 6.7   |
| 26              | 381.2   | 8.0   | 10.8  |
| 27              | 77.9  | 1.7   | 12.6  |
| 29              | 154.9   | 3.3   | 4.3   |
| 40              | 231.1   | 4.9   | 8   |
| 46              | 306.6   | 5.6   | 10.9  |
| 47              | 306.6   | 6.5   | 5.2   |
| 48              | 306.6   | 6.5   | 7.8   |
| 49              | 381.2   | 6.9   | 13  |
| 50              | 381.2   | 8.5   | 10  |

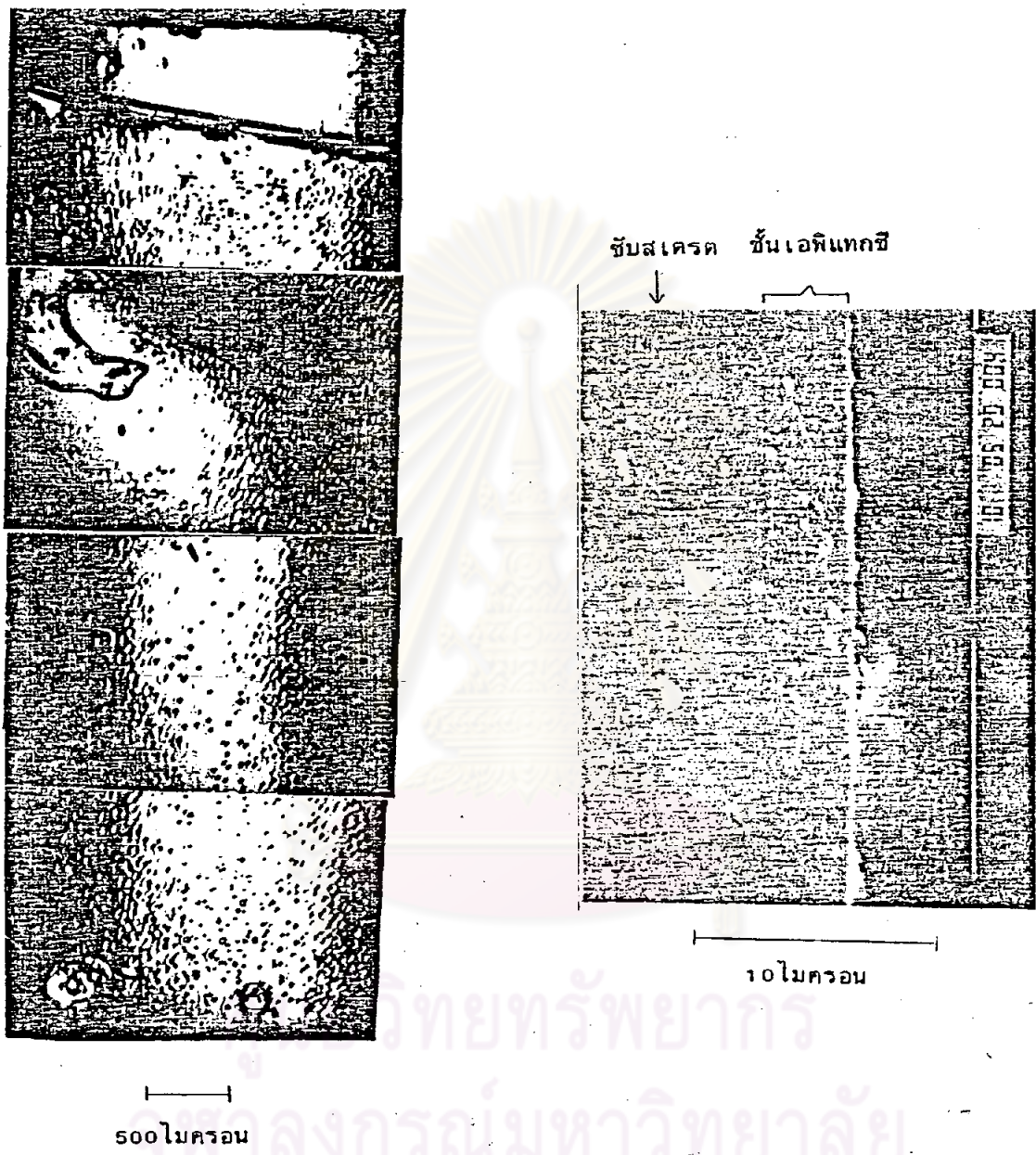
\* ชั้นสเตรตเป็นชนิดพี โดปด้วยสังกะสี



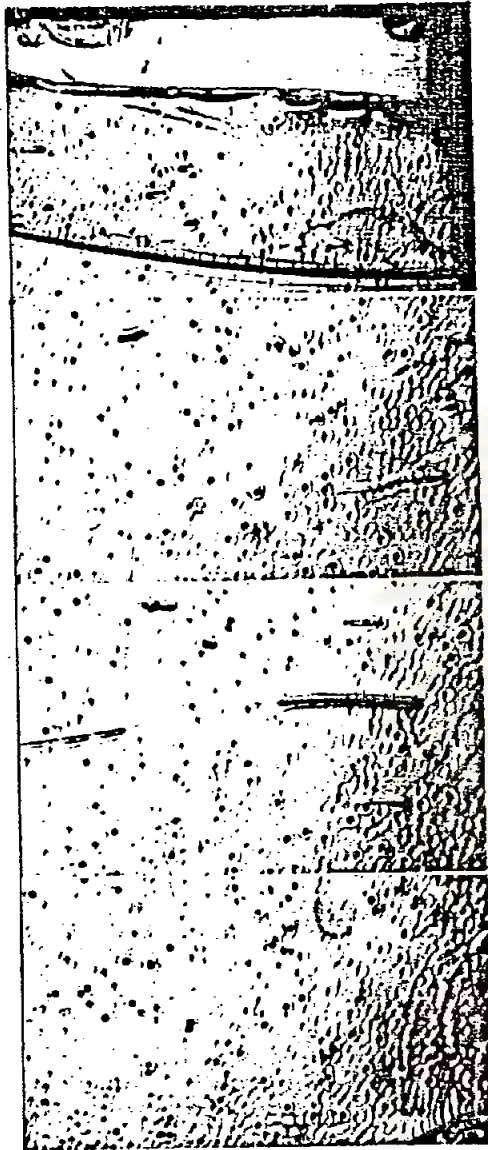
รูปที่ 5.51 จุดข้อมูลความหนาของชั้นเอทิลเทกซี (จุดดำ) ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีสเติ้ปคูลลิ่ง  $\Delta T = 5^{\circ}\text{ซ}$  ที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับความหนาทางทฤษฎีโดย Hsieh (เส้นโค้ง)



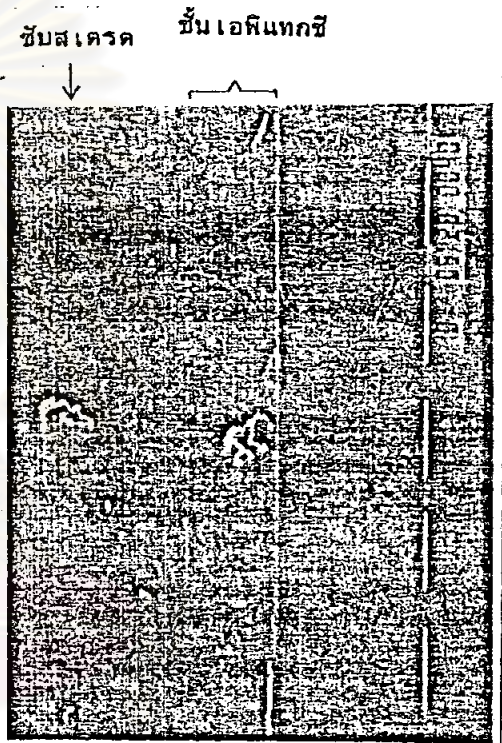
รูปที่ 5.52 จุดข้อมูลความหนาของชั้นเอทิลเทกซี (จุดดำ) ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีสเติ้ปคูลลิ่ง  $\Delta T$  ค่าต่าง ๆ โดยใช้เวลา 40 นาทีเท่ากัน เปรียบเทียบกับความหนาทางทฤษฎีโดย Hsieh (เส้นตรง)



รูปที่ 5.53 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 6 (ซ้าย) หรือภาพถ่ายสั่นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทลชี ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

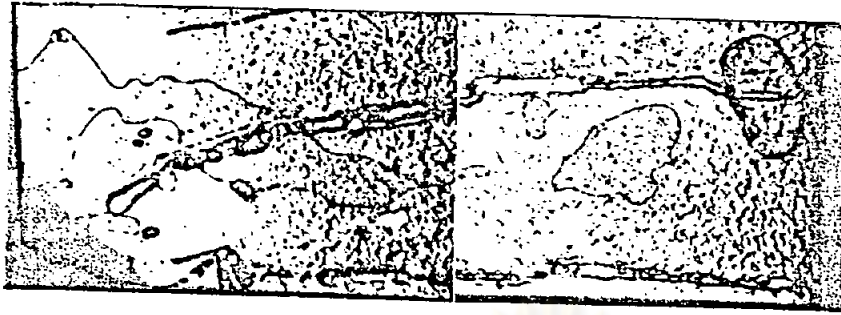


500 ไมครอน

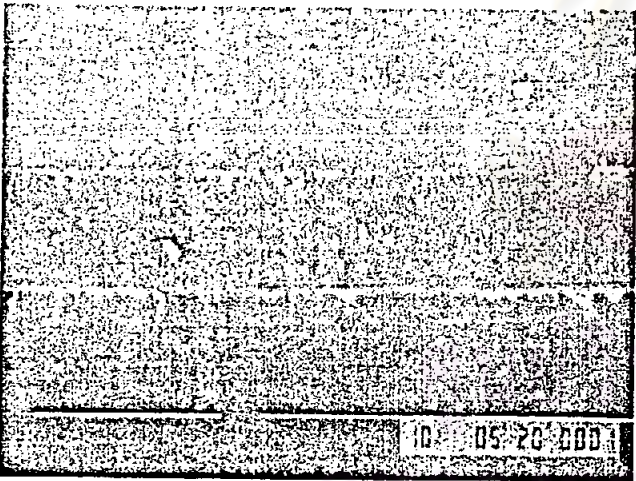


10 ไมครอน

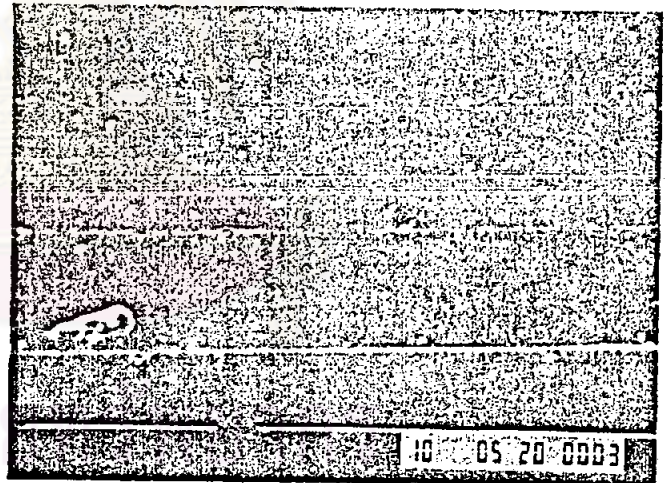
รูปที่ 5.54 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวหนังตัวอย่าง  
หมายเลข 7 (ชาย) พร้อมภาพถ่ายสั่นแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล่องจองกัน (ขวา)



500 ไมครอน



10 ไมครอน



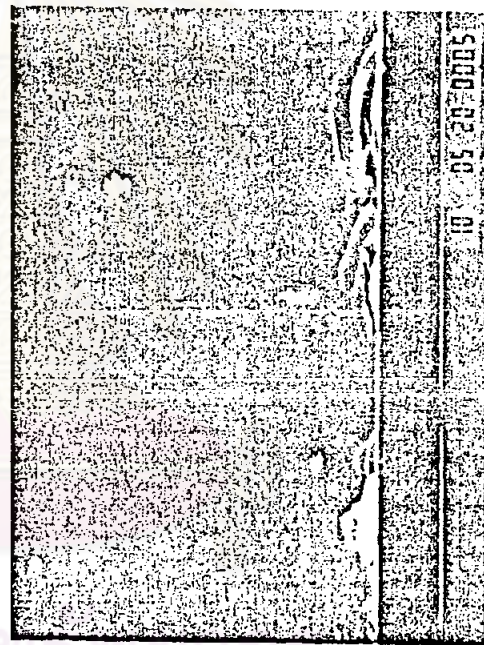
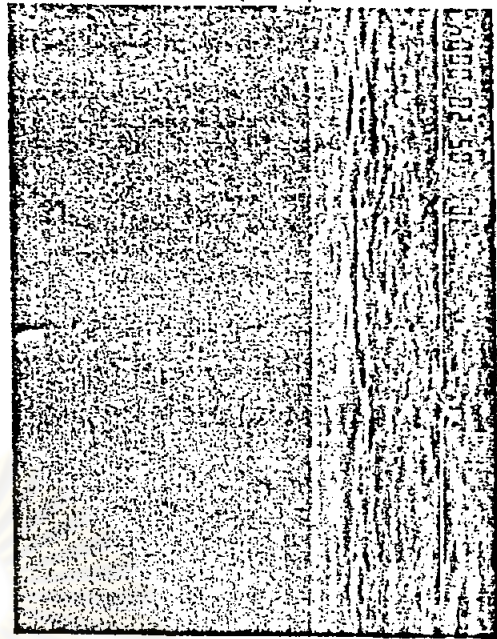
ชั้นเอพิแทกซ์  
ชั้นสเตรค

รูปที่ 5.55 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 8 (บน) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซ์ ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ล่าง)





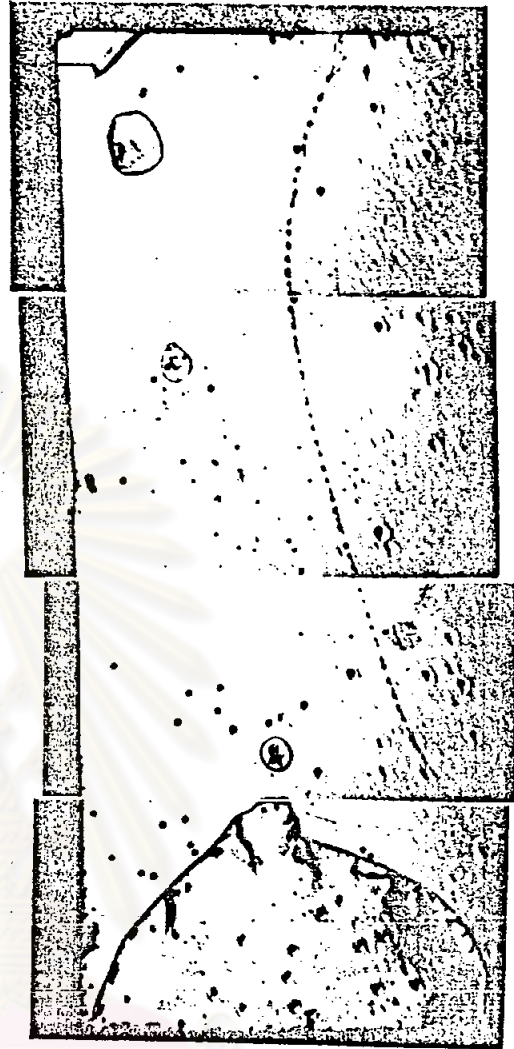
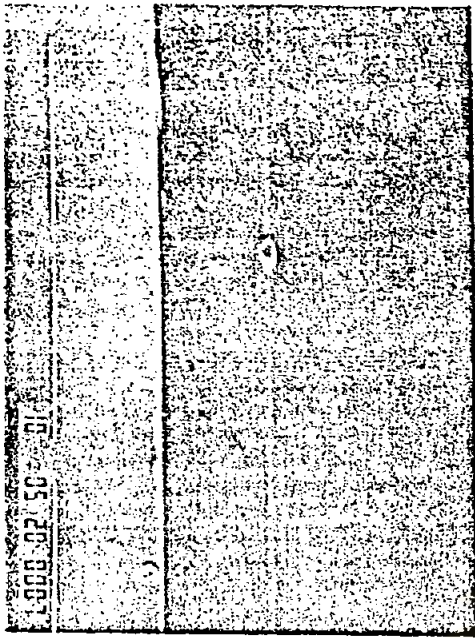
500 ไมครอน



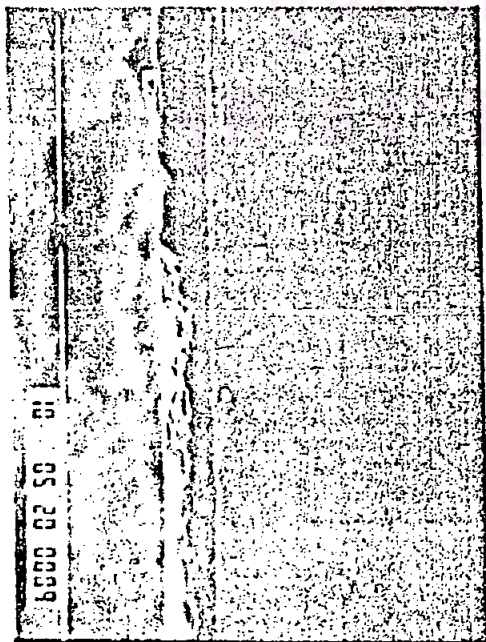
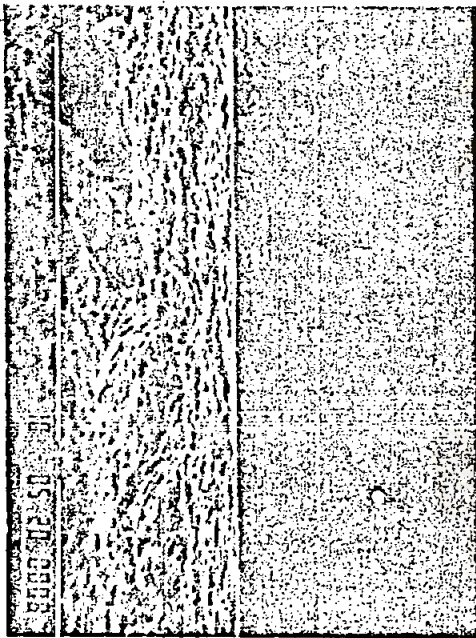
รูปที่ 5.56 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 9 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

10 ไมครอน

10ไมครอน



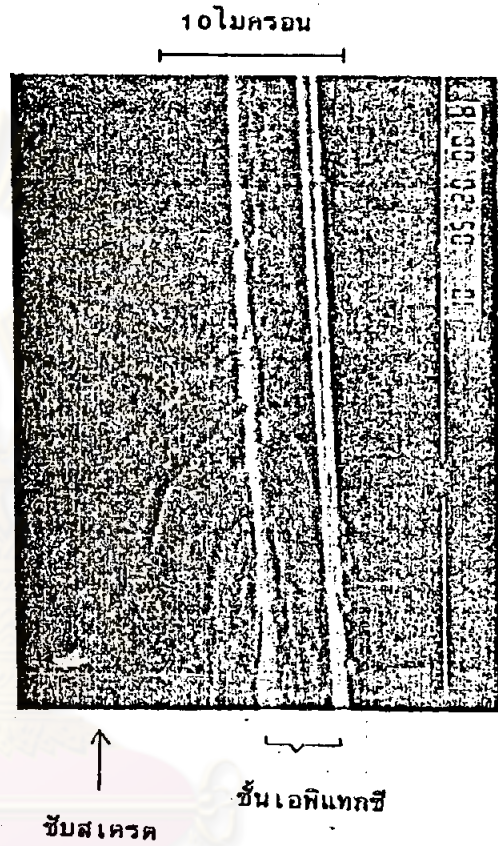
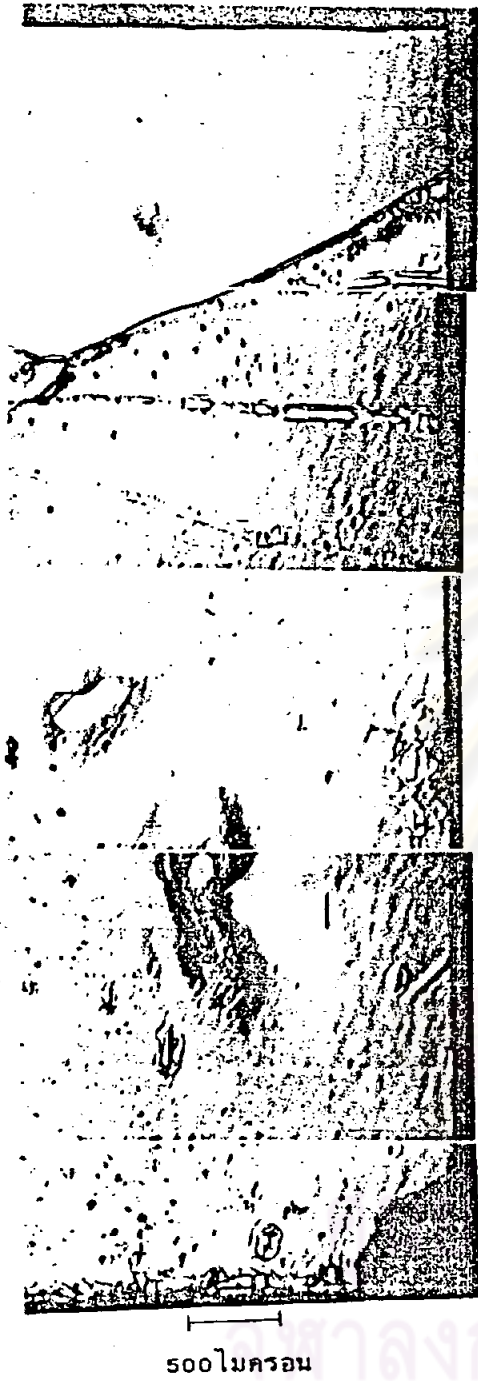
500ไมครอน



ชั้นเอพิแทกซี

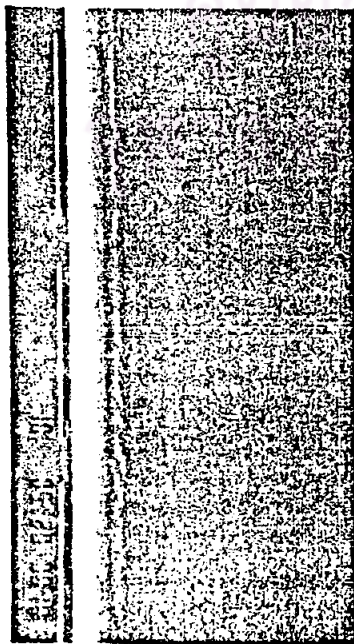
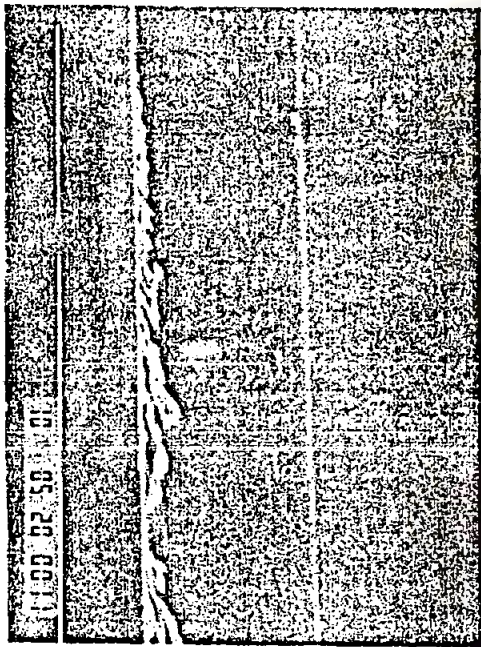
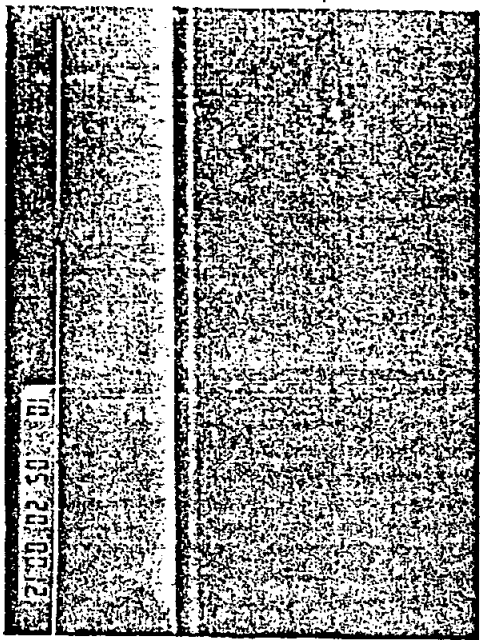
รูปที่ 5.57 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 10 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ๓ บริเวณที่กล้องจ้องกัน (ซ้าย)





รูปที่ 5.58 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้ผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 11 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

๑๐ ไมครอน

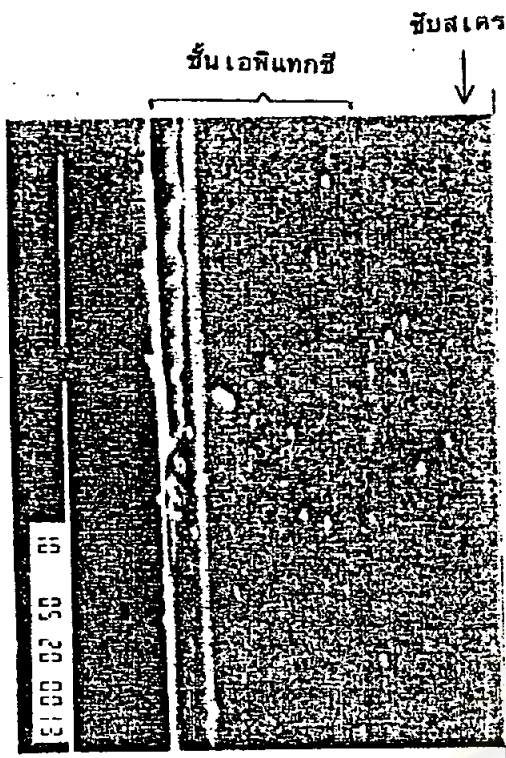


ชั้นเอพิแทกซี ↑ ชั้นสเครต

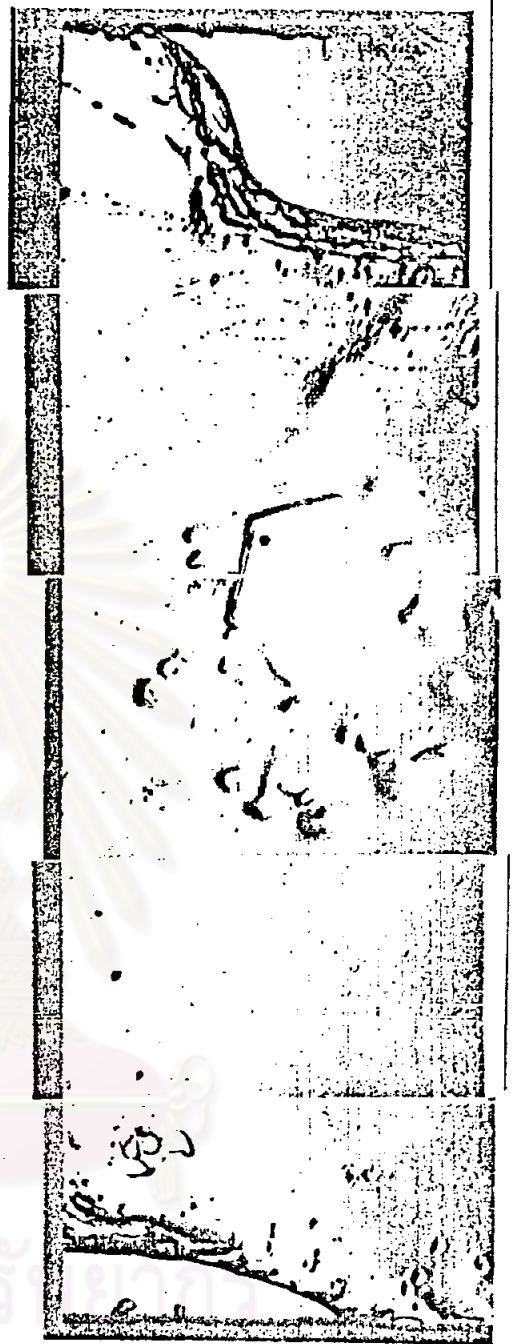
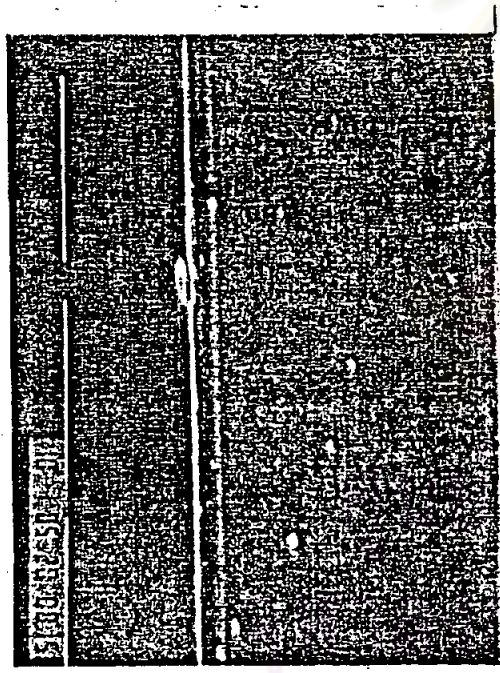


500 ไมครอน

รูปที่ 5.59 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของฟันคิ้วตัวอย่างหมายเลข 13 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสัณฐานแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)



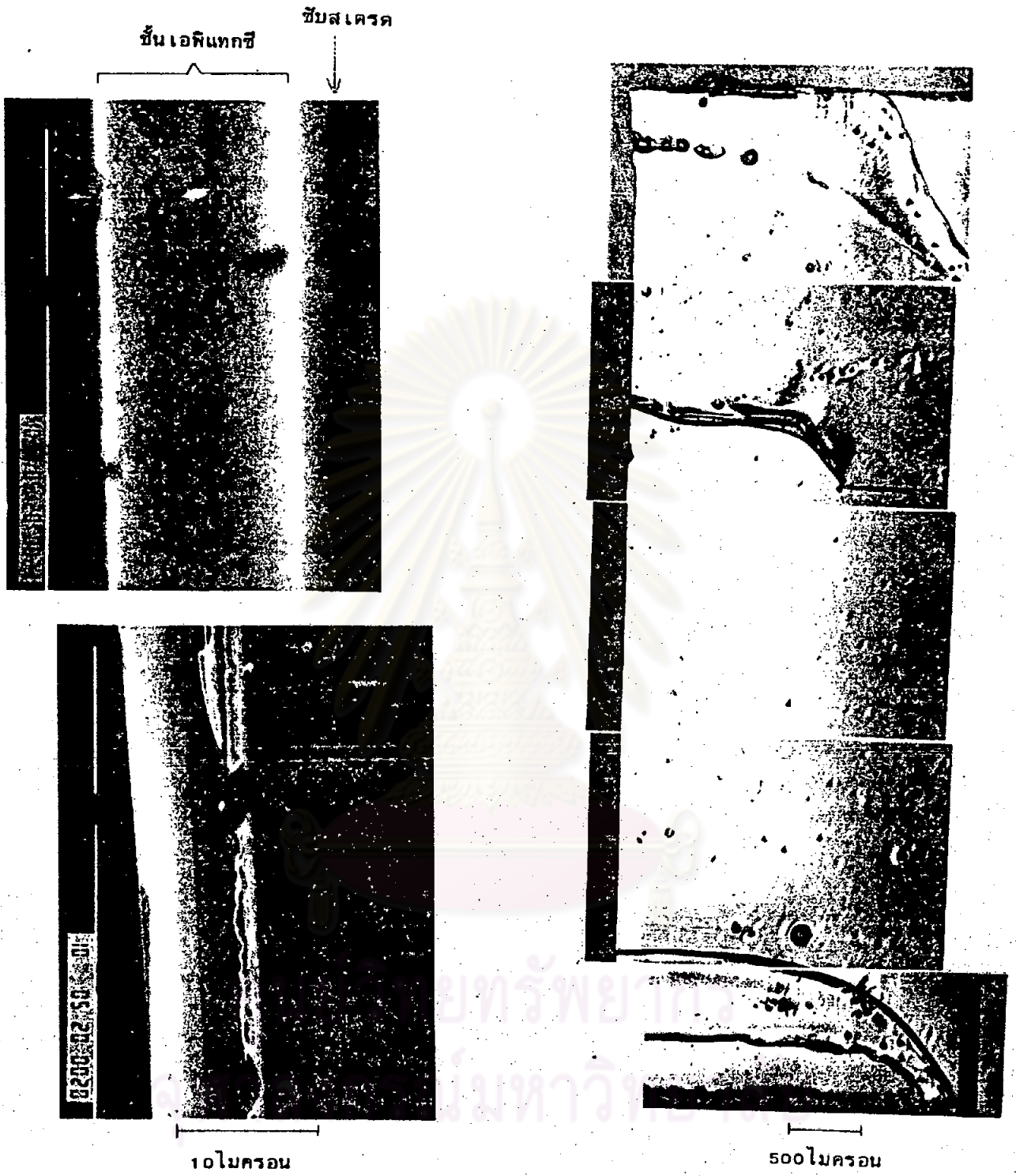
10 ไมครอน



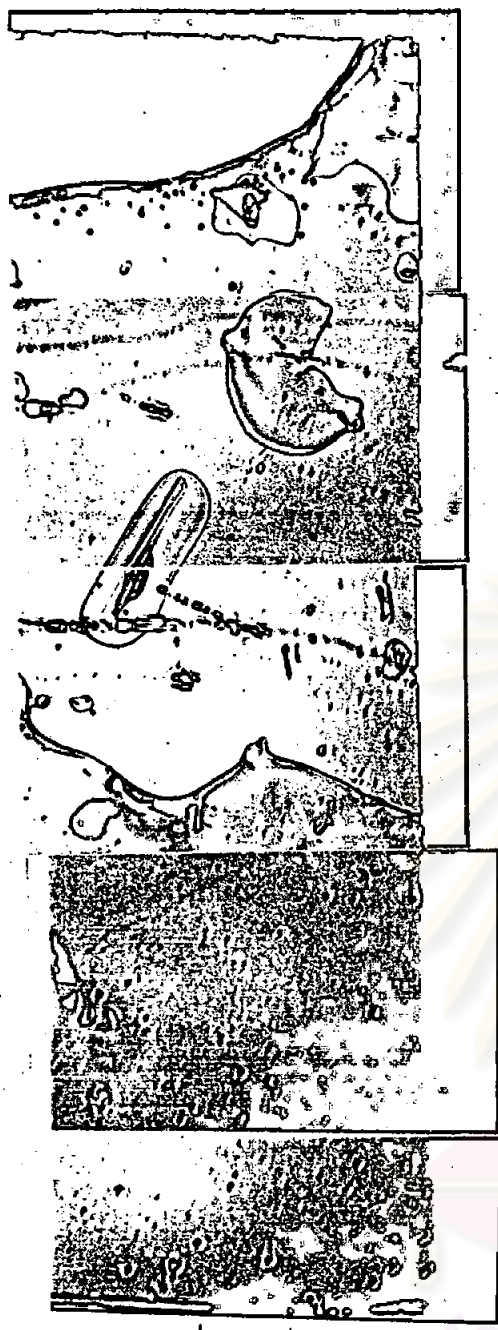
500 ไมครอน

รูปที่ 5.60 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีตหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 14 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)

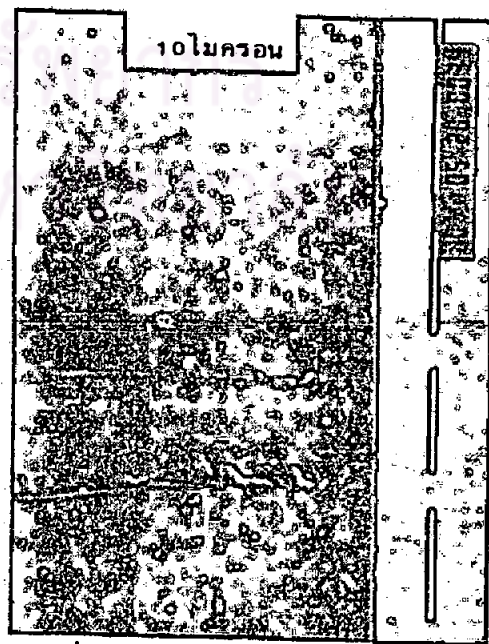
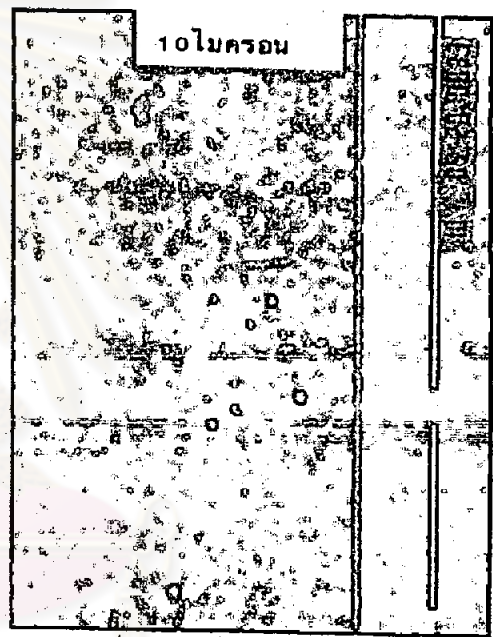
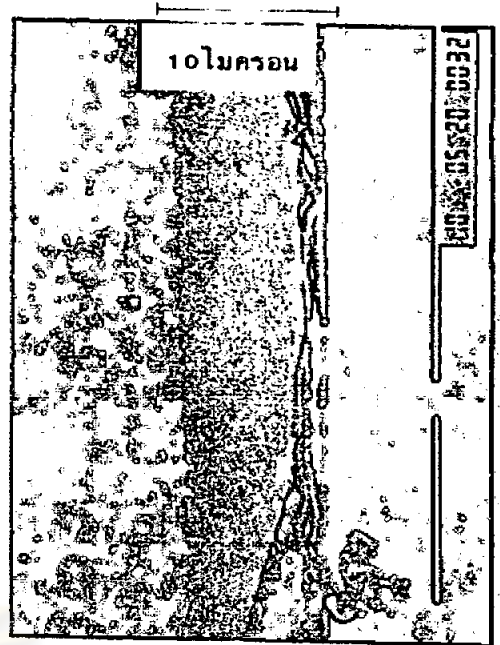




รูปที่ 5.61 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 15 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)



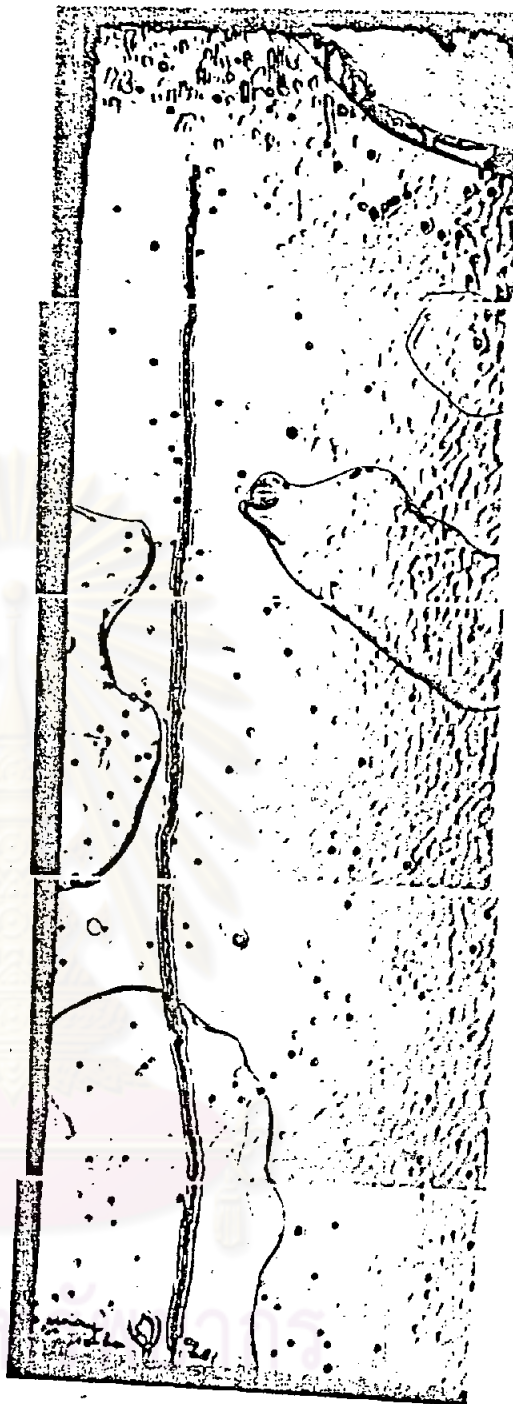
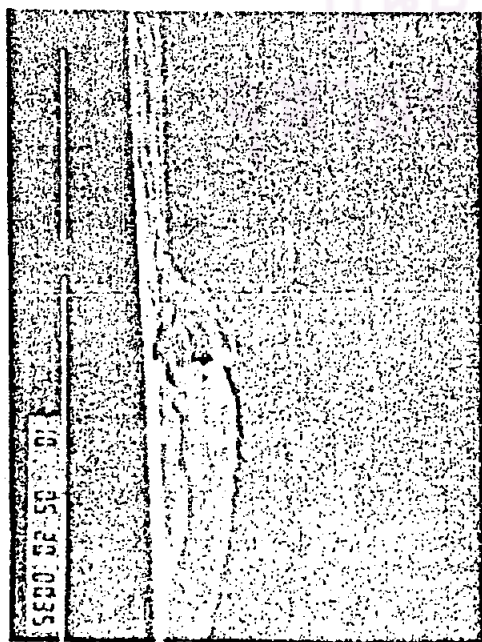
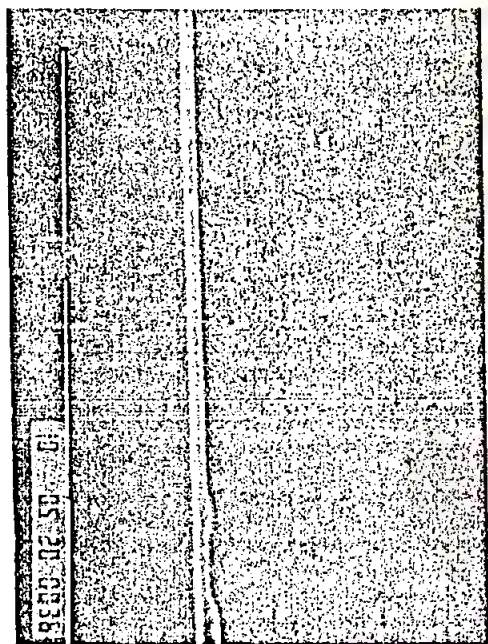
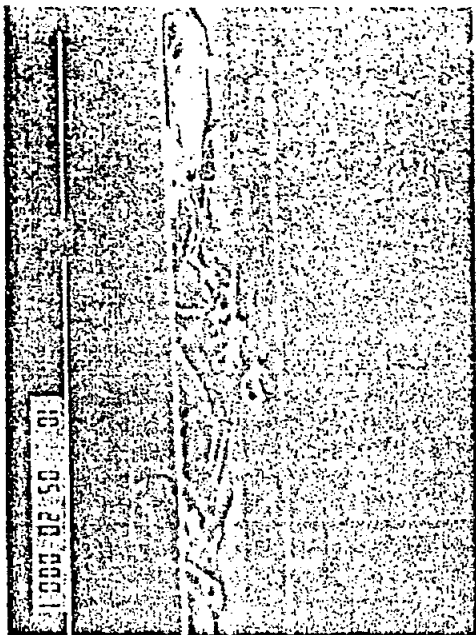
500ไมครอน



ชั้นสเตเรต

ชั้นเอพิแทกซี

รูปที่ 5.62 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 19 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



500 ไมครอน

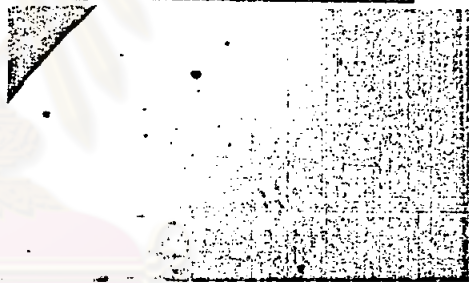
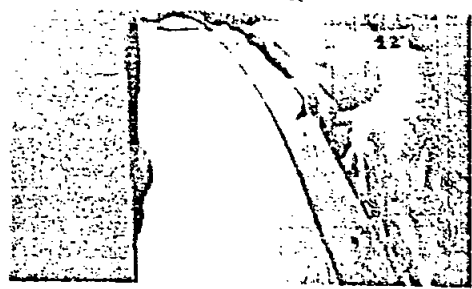
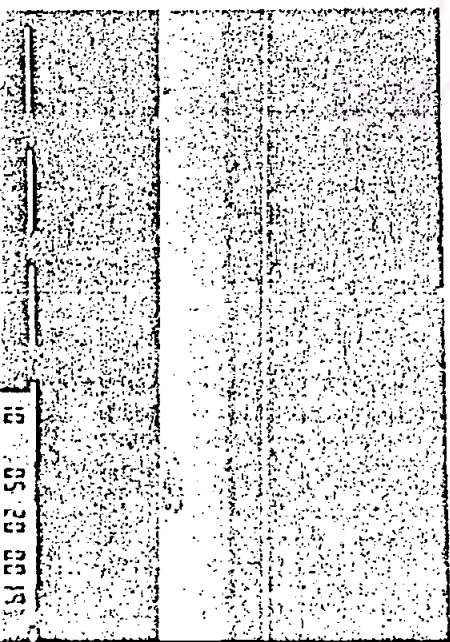
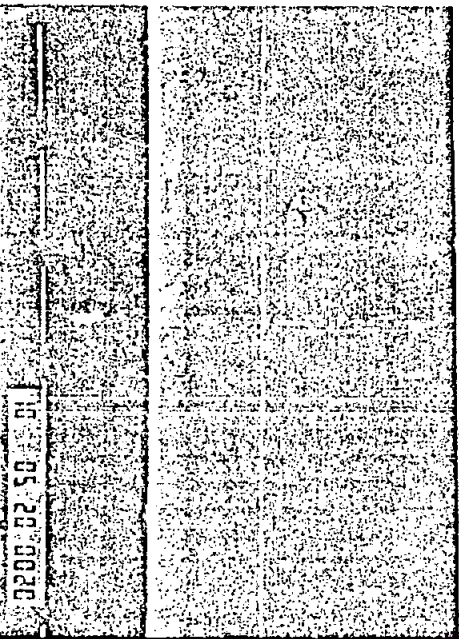
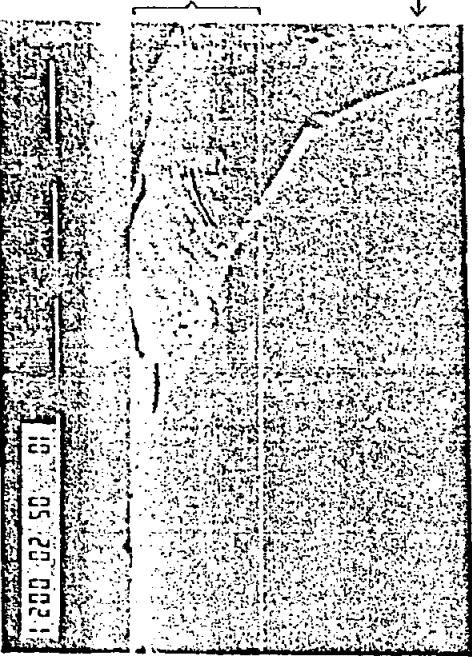
รูปที่ 5.63 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นที่ตัวอย่างหมายเลข 20 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล่องจองกัน (ซ้าย)

ชั้นเอพิแทกซี      ชั้นท่อลำเลียง



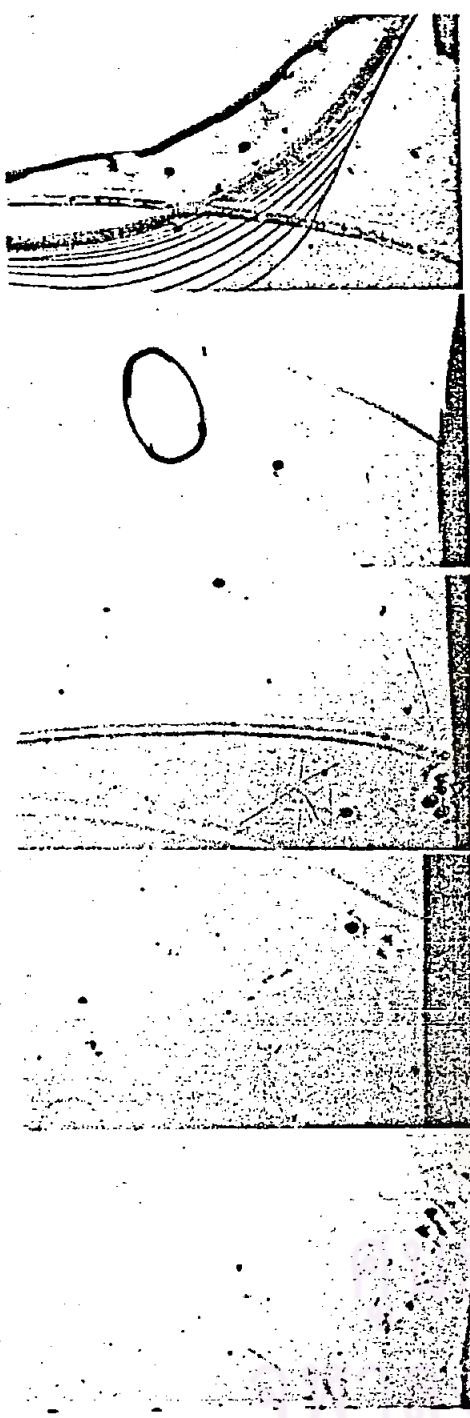
ชั้นเอพิแทกซี

ซิปสแควด

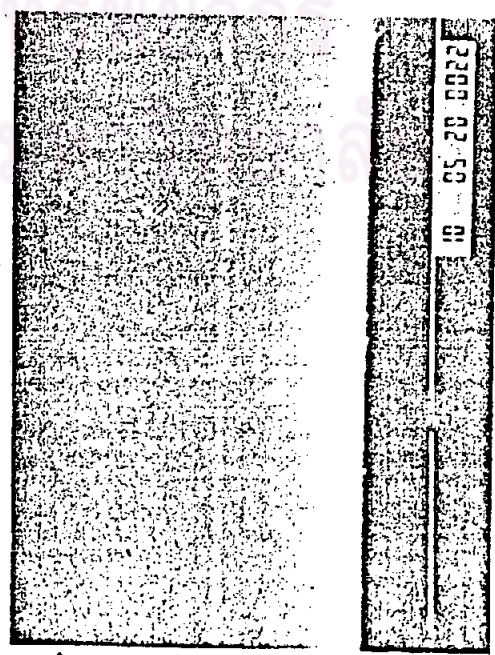
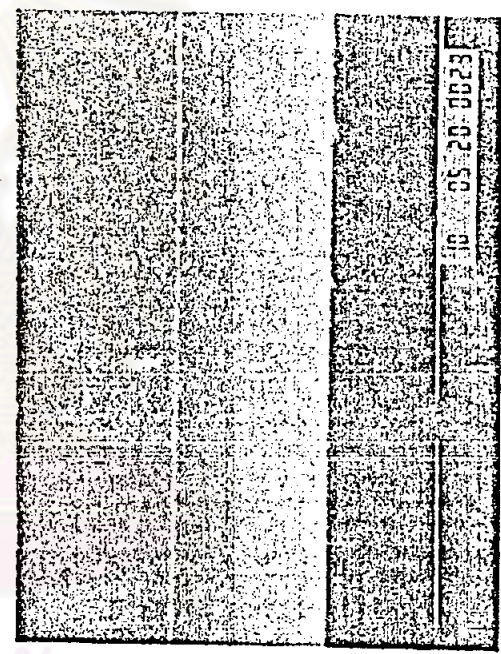
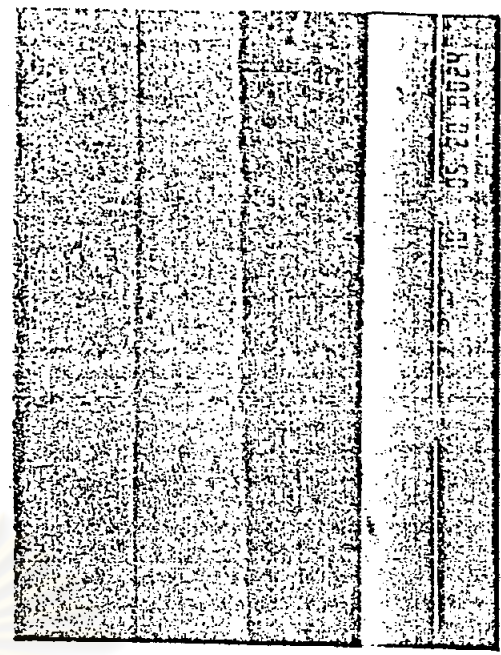


500 ไมครอน

รูปที่ 5.64 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 22 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คลังขงจอกกัน (ซ้าย)



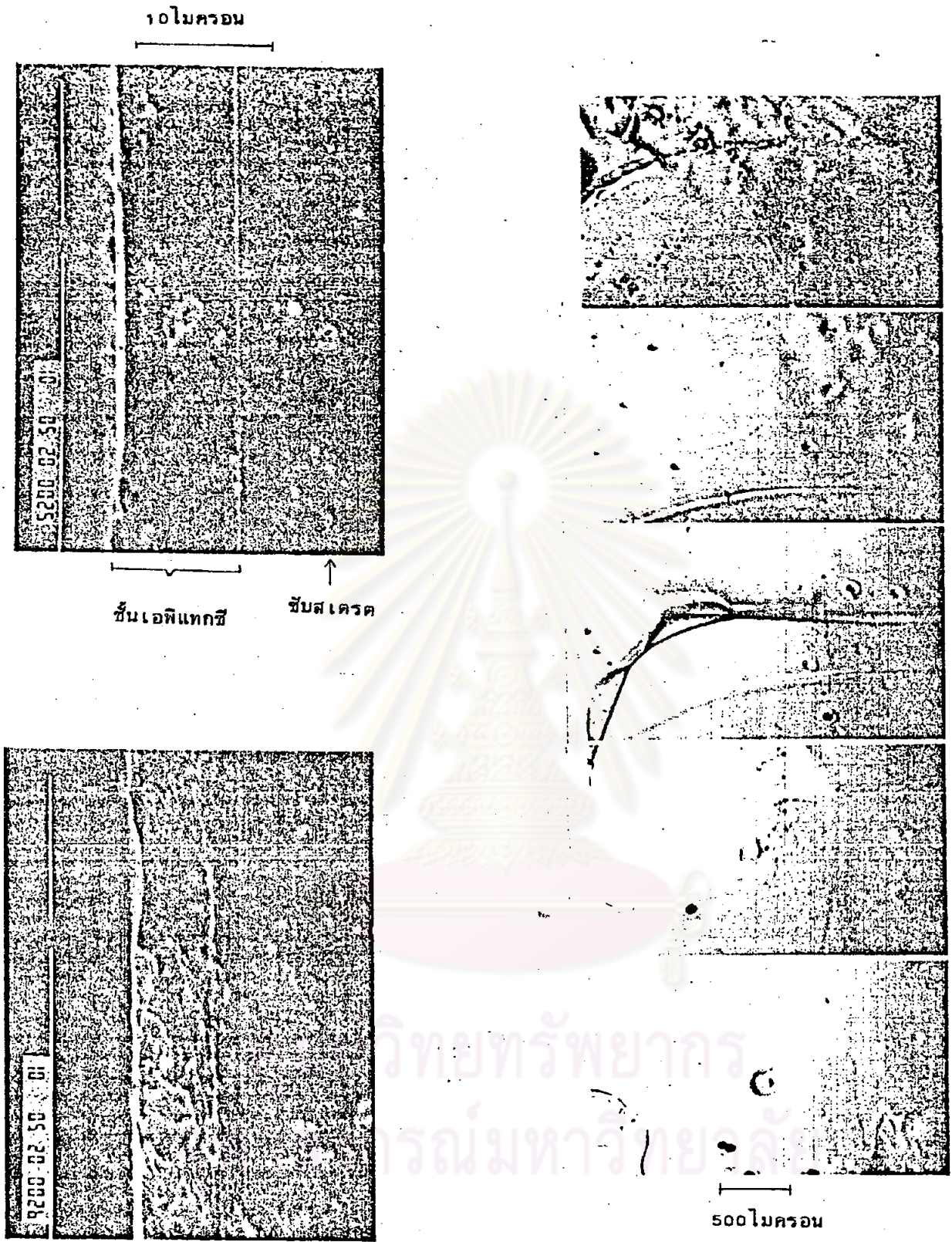
500 ไมครอน



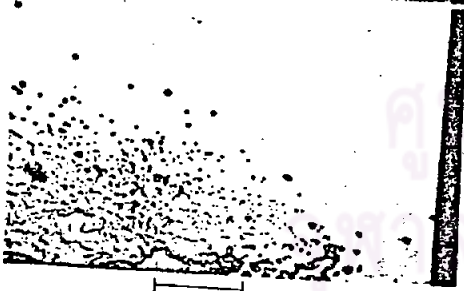
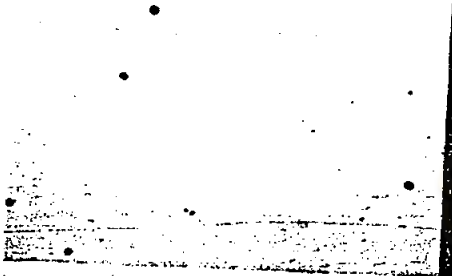
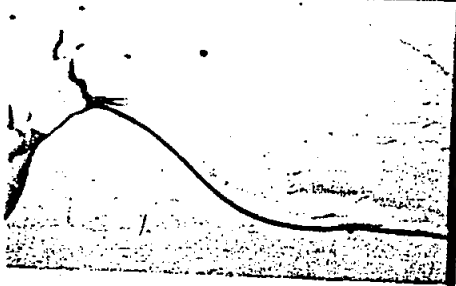
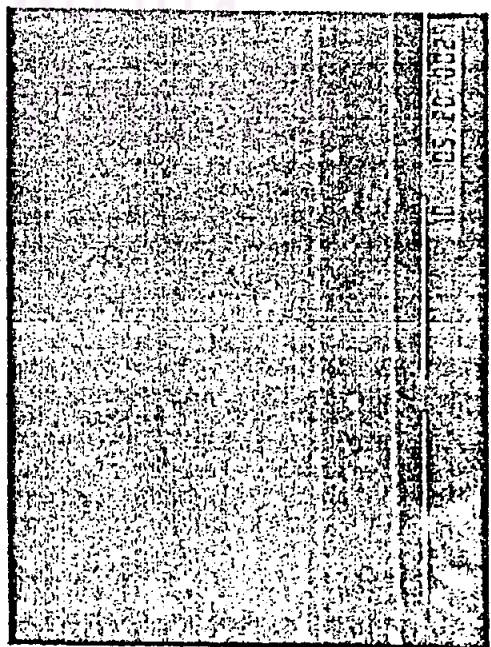
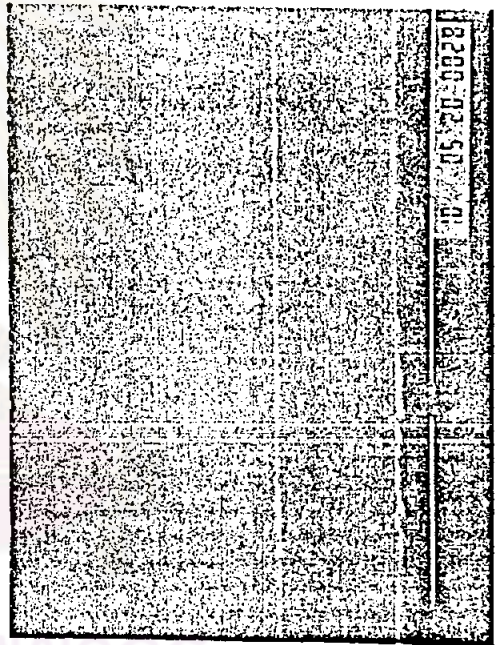
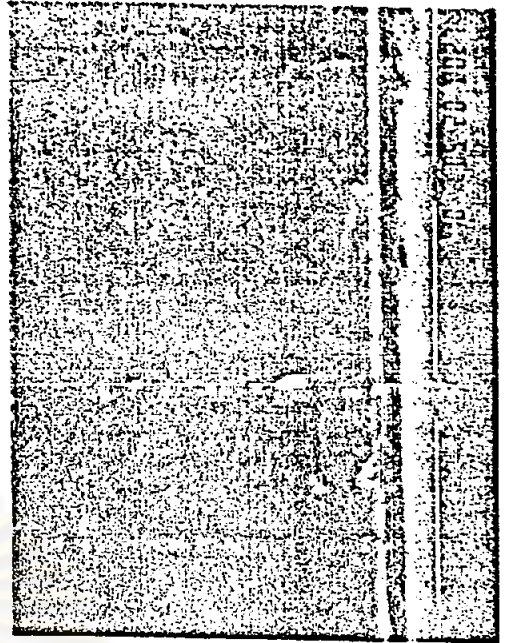
↑ ชับสเตรค      ชันเอพิแทกซี

รูปที่ 5.65 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่ง  
 ของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 23  
 (ข้าว) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความ  
 หนาของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่  
 คล้องจองกัน (ขวา)





รูปที่ 5.66 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง หมายเลข 24 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)



500 ไมครอน

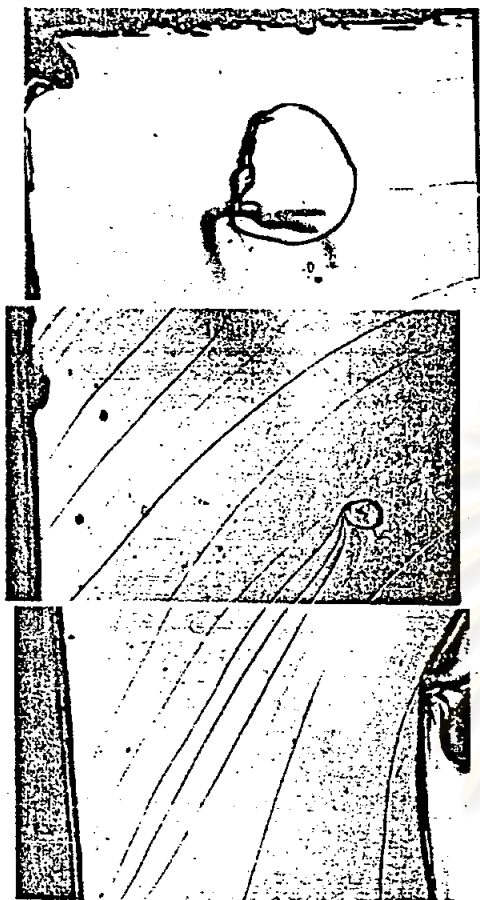
รูปที่ 5.67

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 25 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายเส้นแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

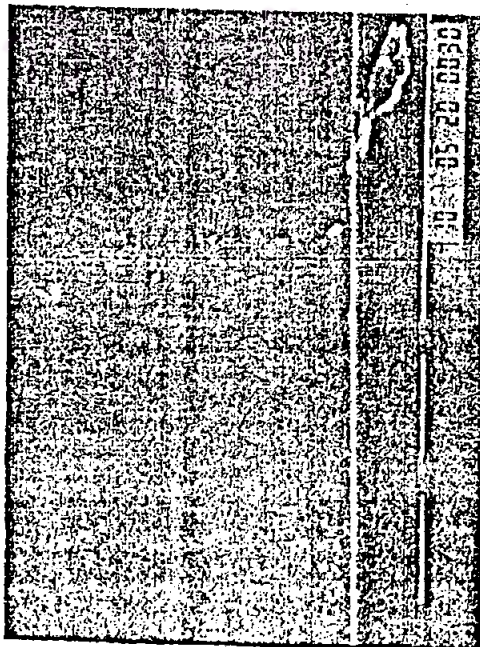
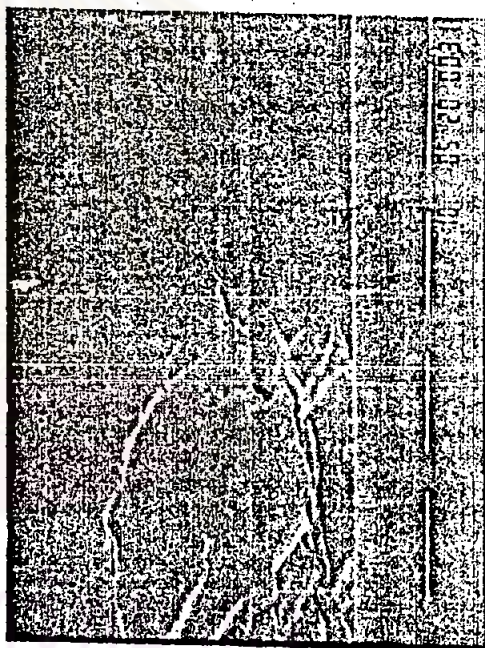
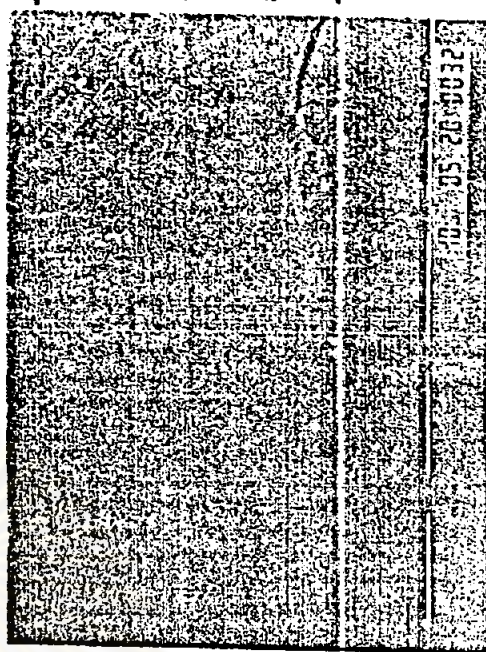


ชั้นสเตรค

ชั้นเอพิแทกซี

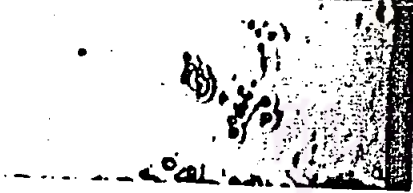
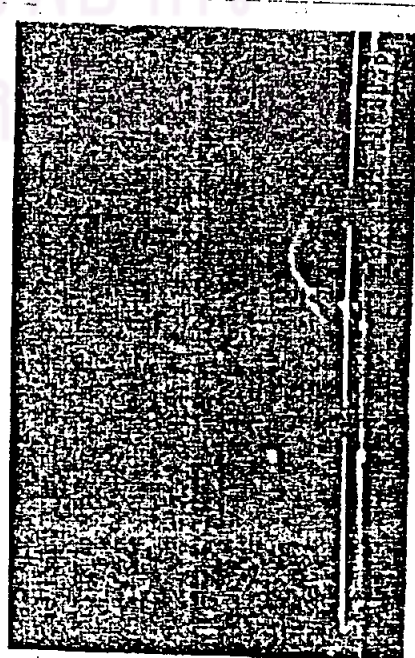
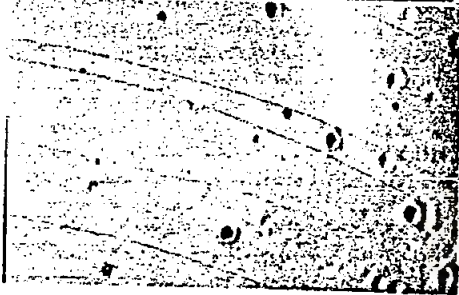
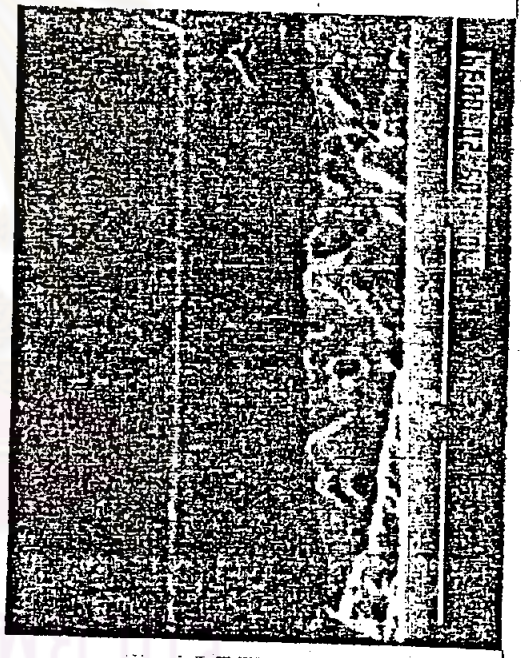
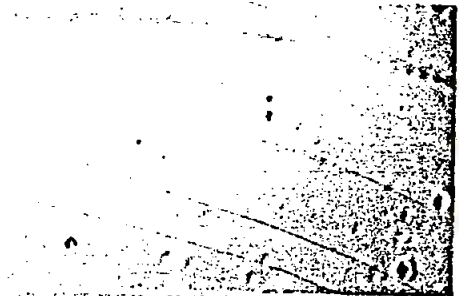
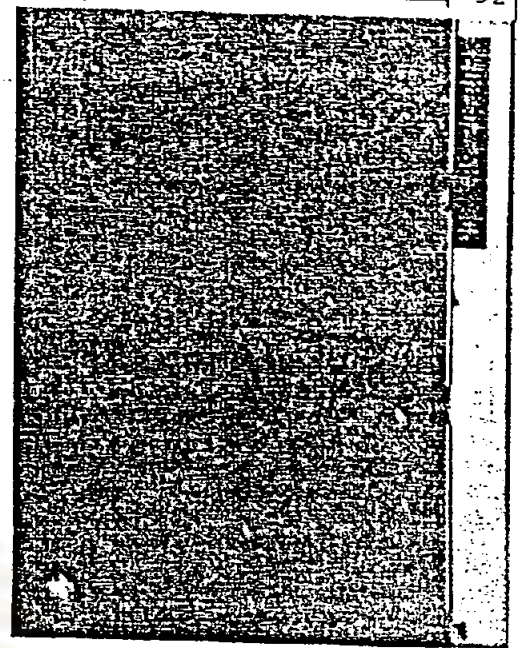
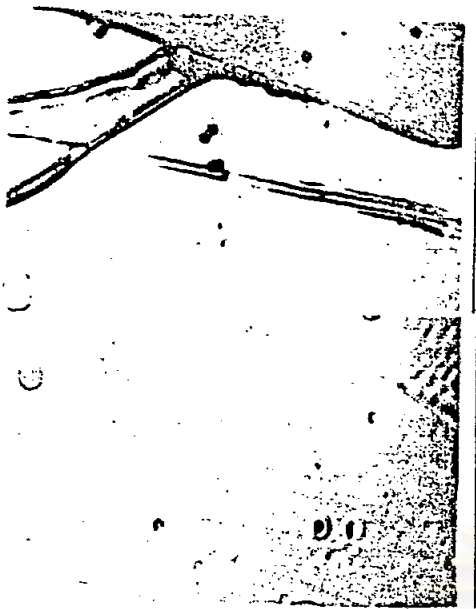


500 ไมครอน



รูปที่ 5.68

ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 26 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



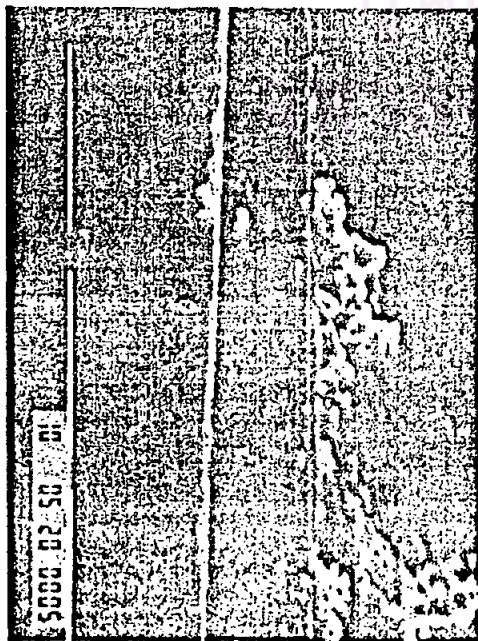
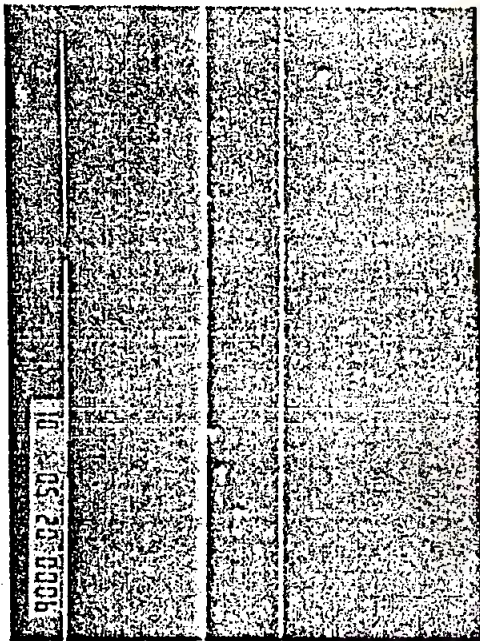
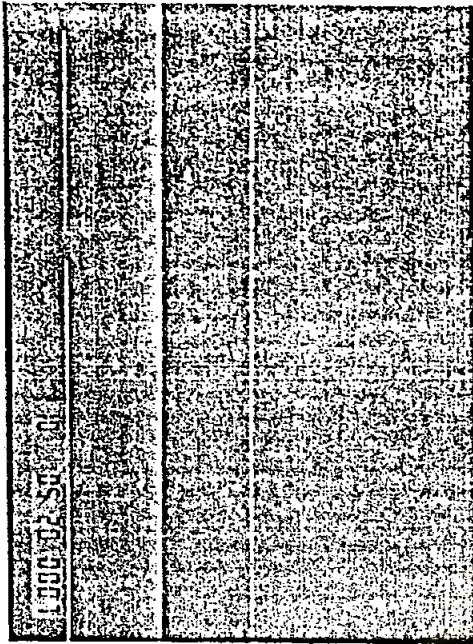
500 ไมครอน

10 ไมครอน

รูปที่ 5.69

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 27 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

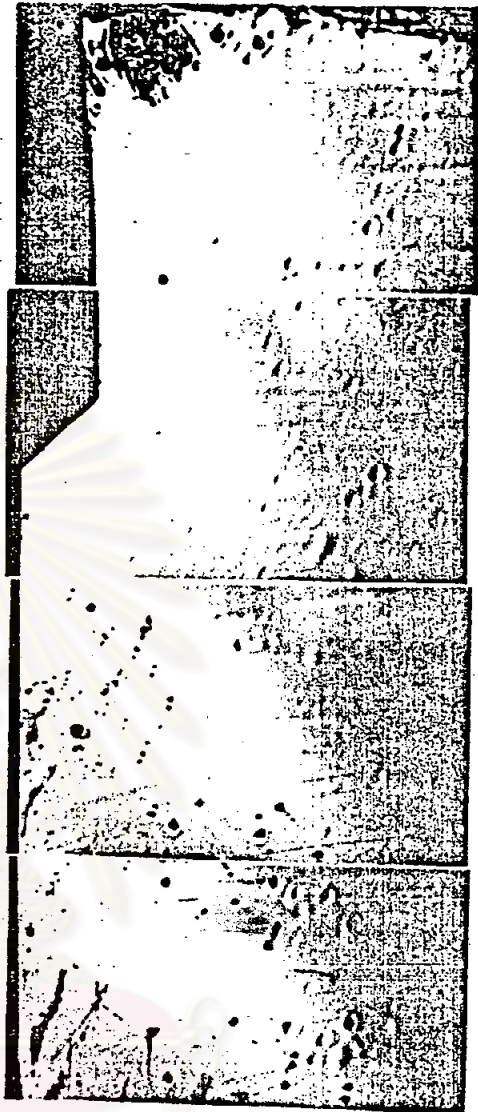
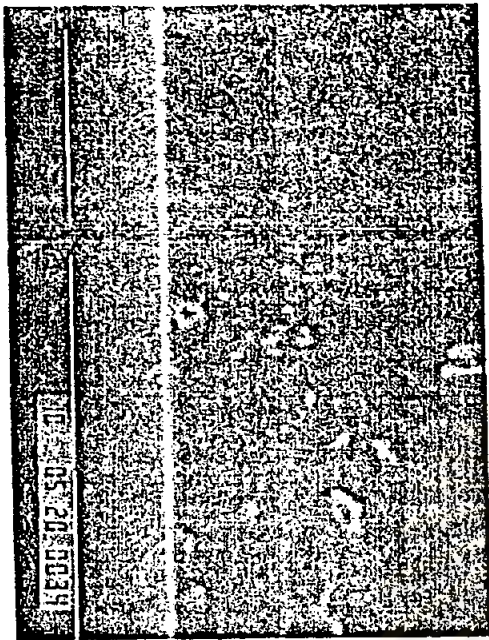
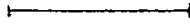




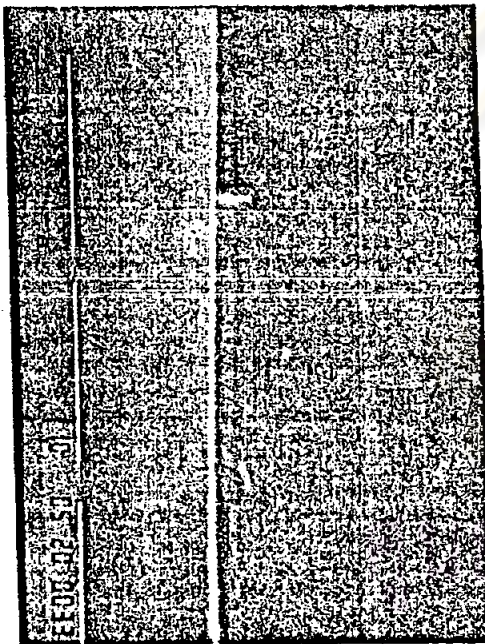
รูปที่ 5.70 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 29 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ๗ บริเวณที่กลิ้งจอกัน (ซ้าย)



10ไมครอน

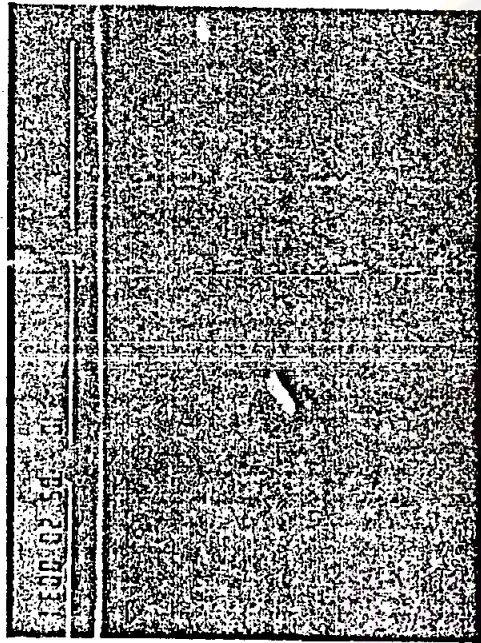
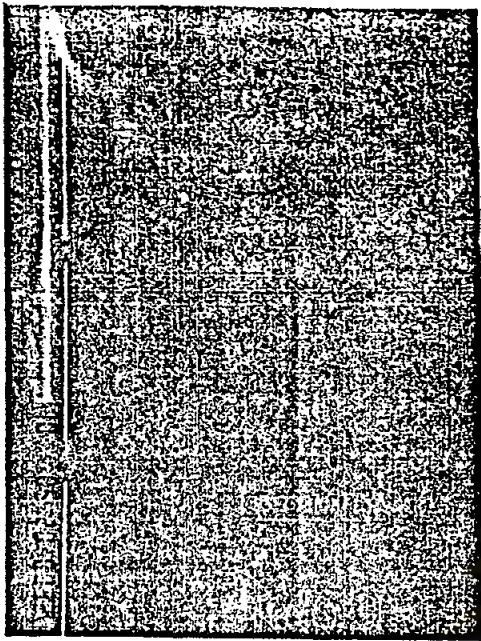


500ไมครอน



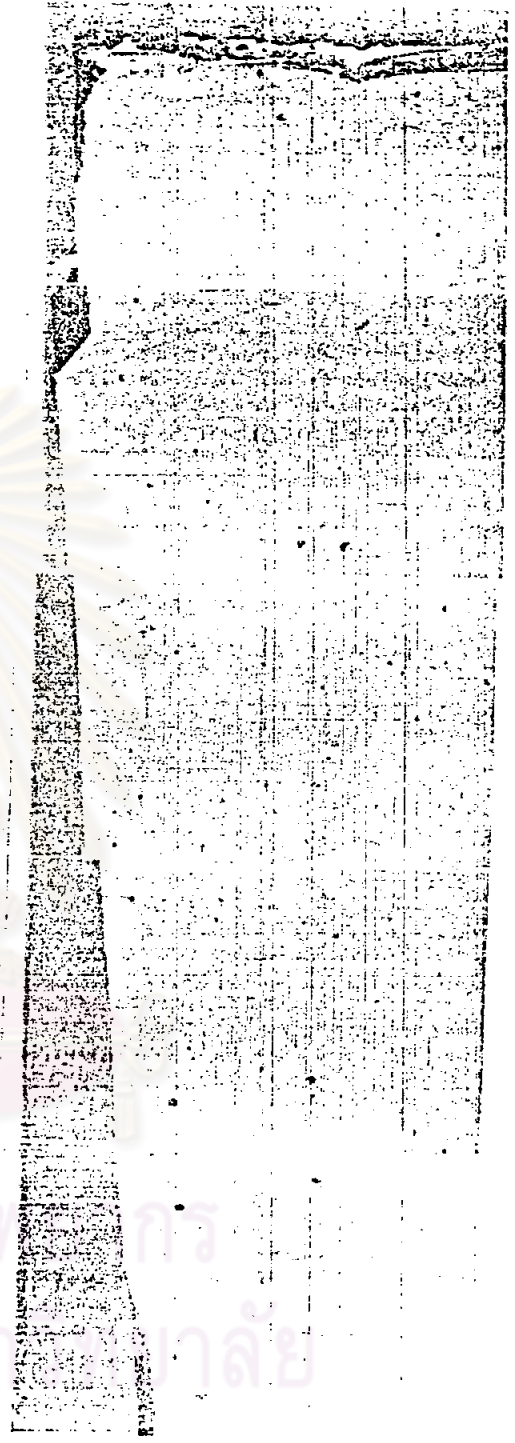
↑ ชั้นเอพิแทกซี ชั้นสเตรต

รูปที่ 5.71 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 40 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)



ชั้น เอพิแทกซี

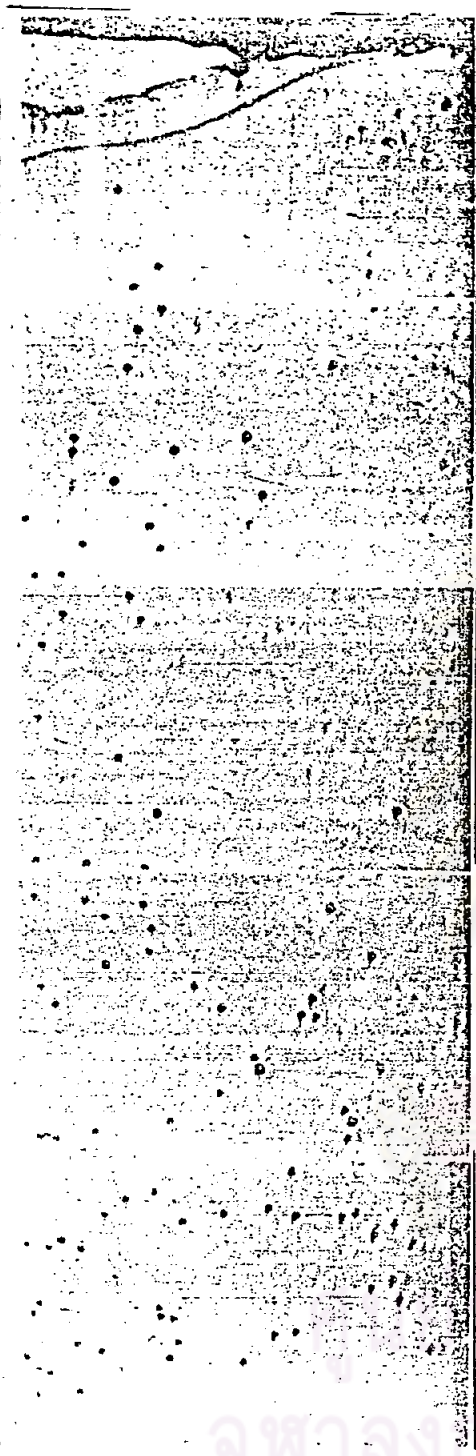
↑ สิบสเตรด



500 ไมครอน

รูปที่ 5.72 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 46 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายเส้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)

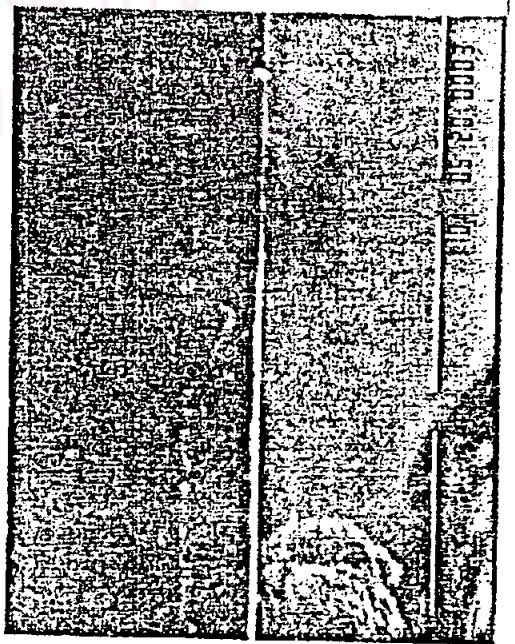
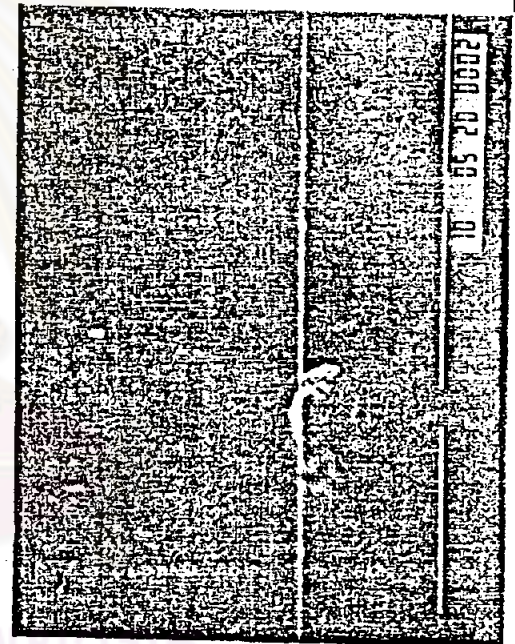
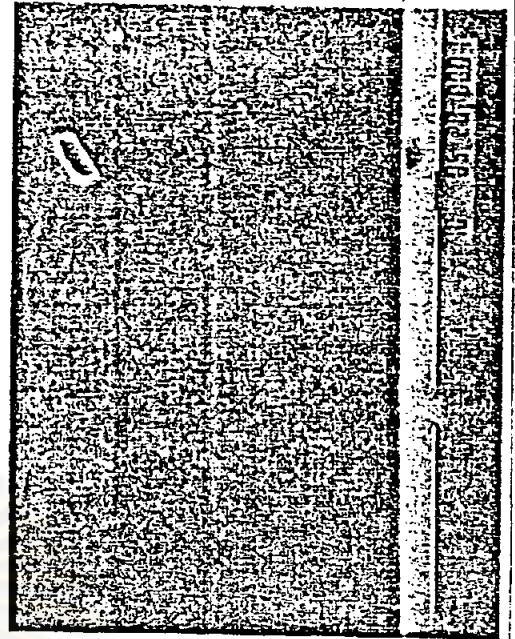




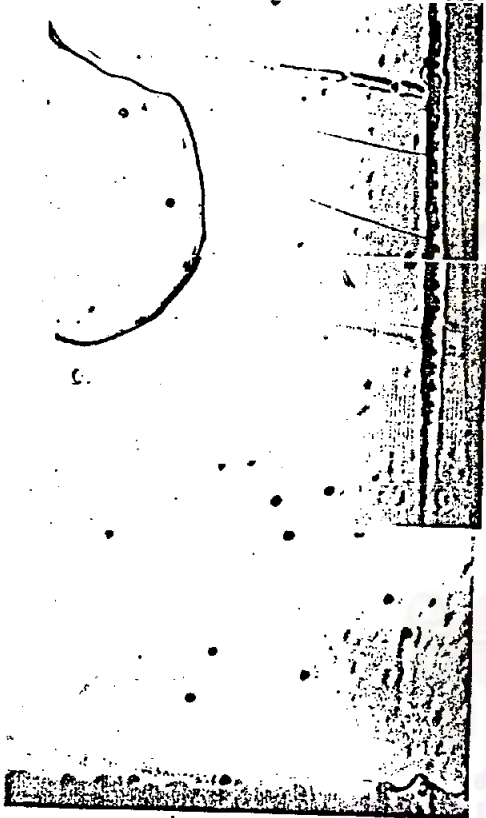
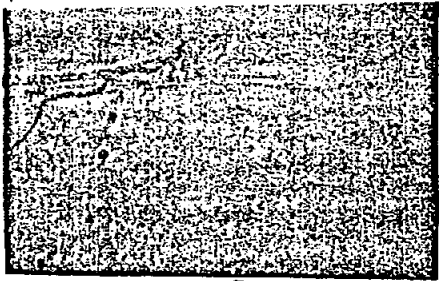
500 ไมครอน

รูปที่ 5.73

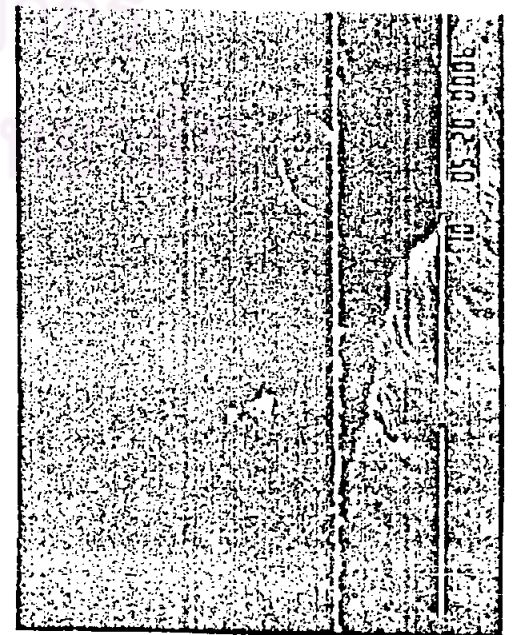
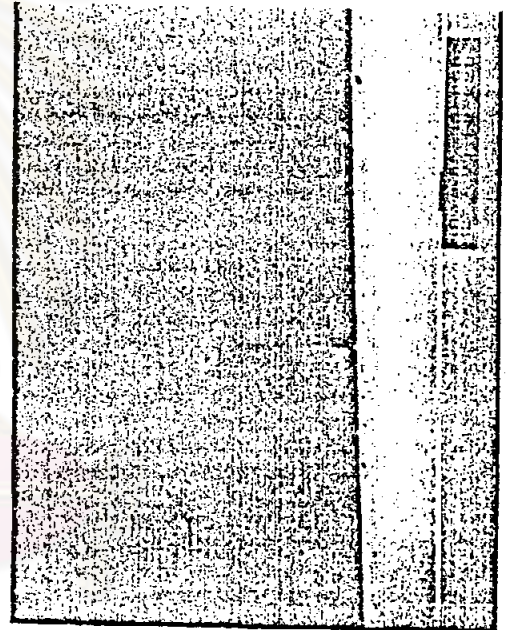
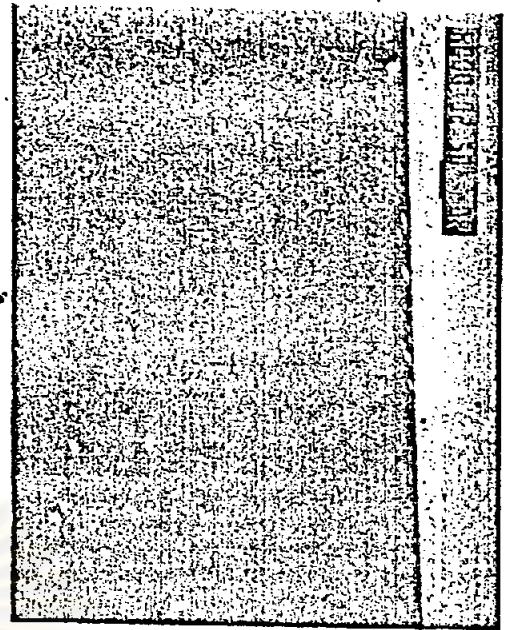
ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของฟันฉี่ตัวอย่าง  
 หมายเลข 47 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



10 ไมครอน



500 ไมครอน

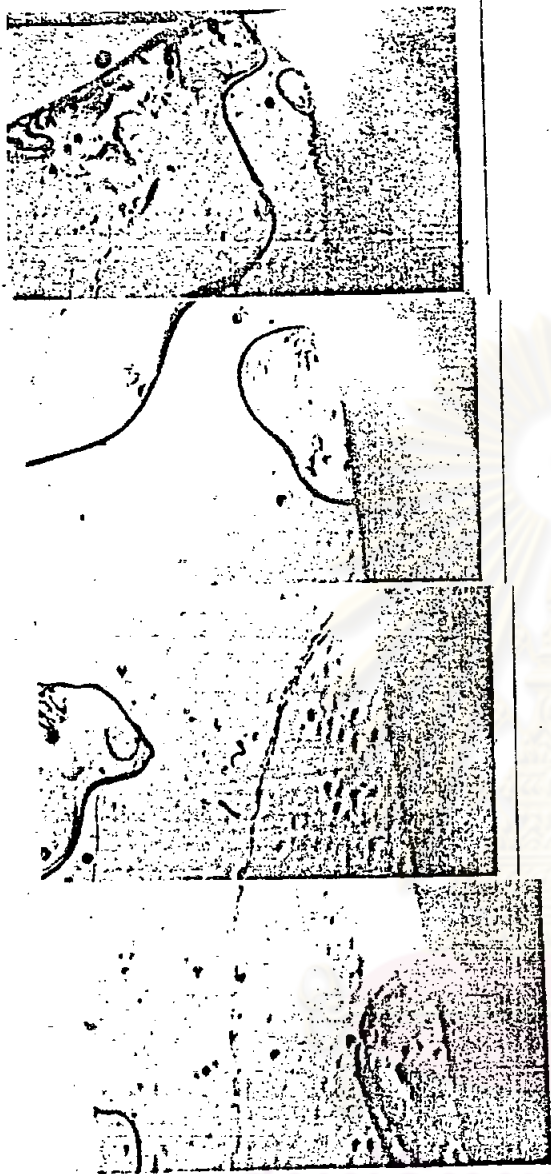


↑ ชับสเตรต      ชั้นเอพิแทกซี

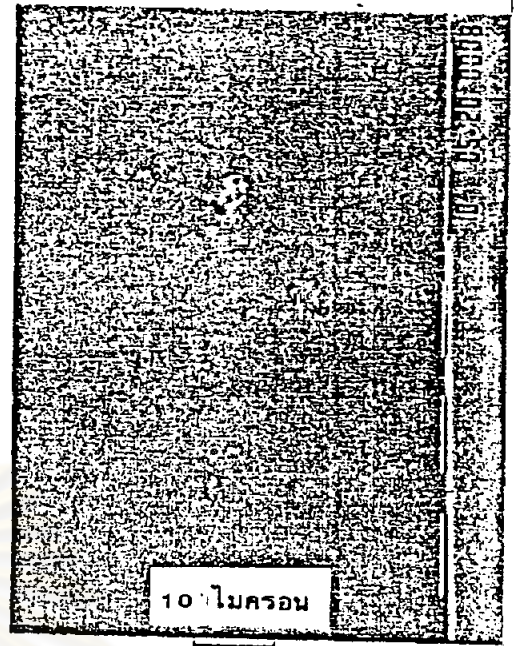
รูปที่ 5.74

ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของฟันคิ้วตัวอย่าง  
หมายเลข 48 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

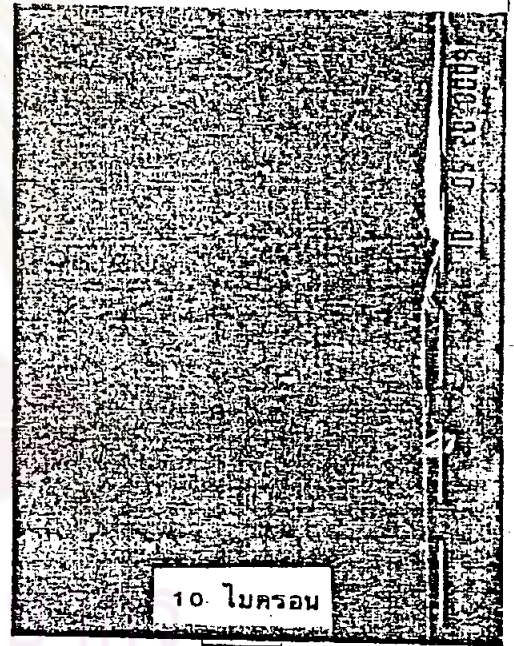




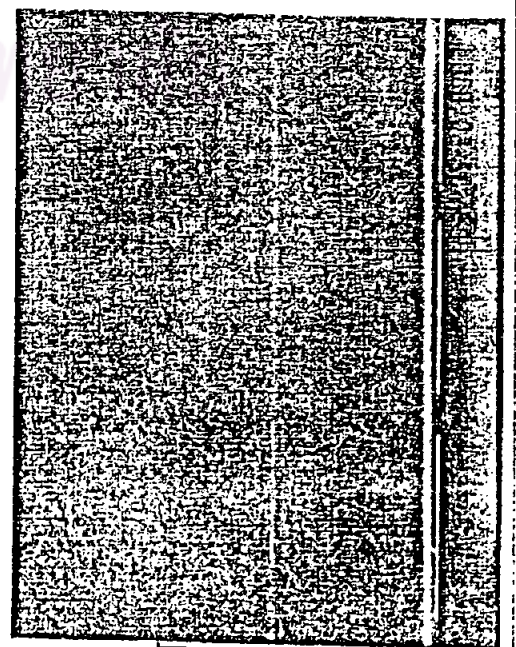
500 ไมครอน



10 ไมครอน



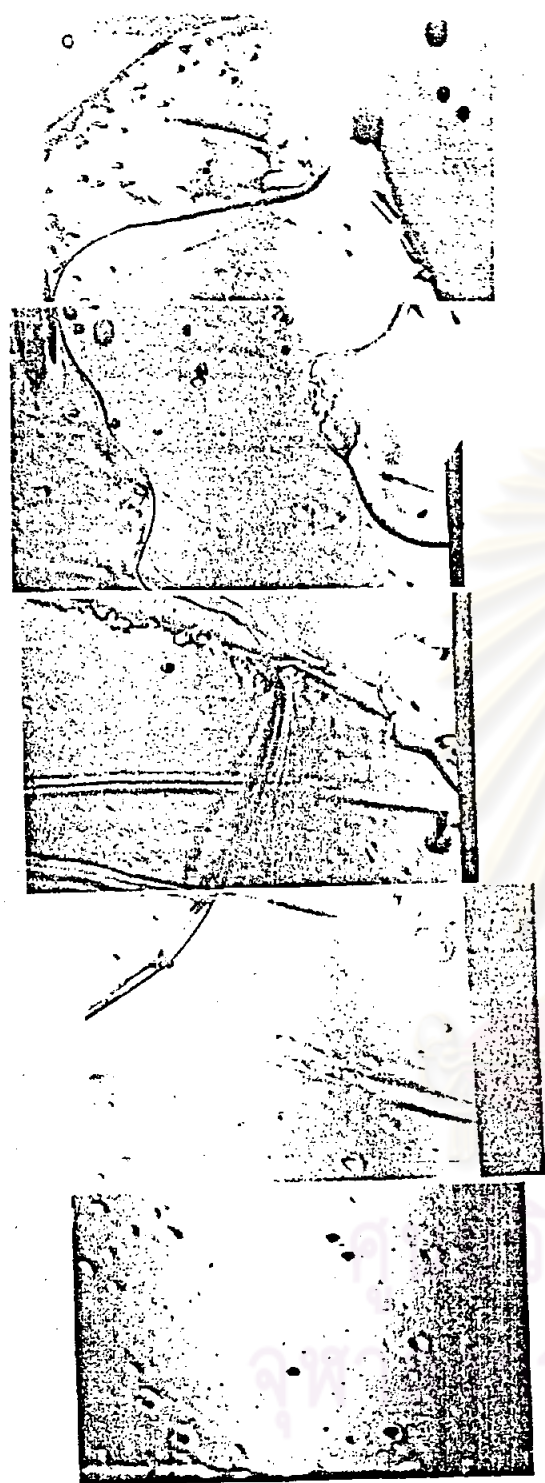
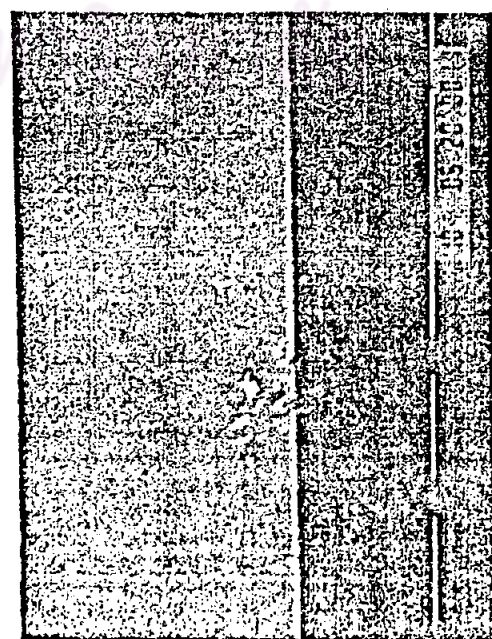
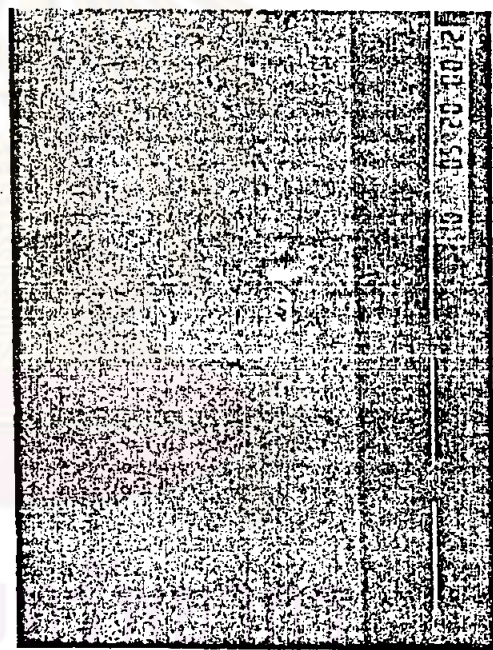
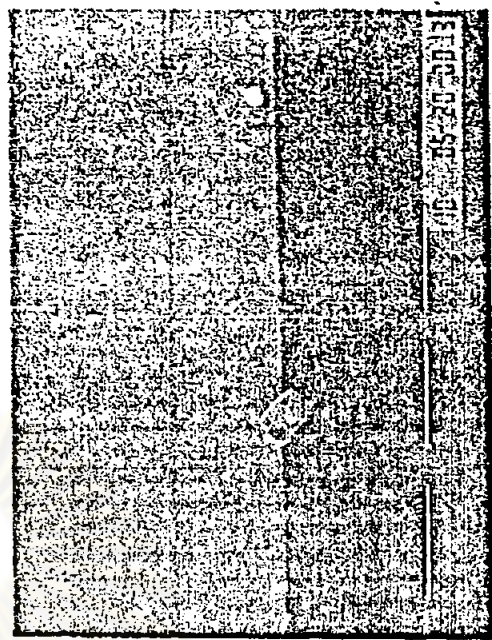
10 ไมครอน



รูปที่ 5.75

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 49 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

ชั้นเสลด      ชั้นเอพิแทกซี



500 ไมครอน

รูปที่ 5.76

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 50 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



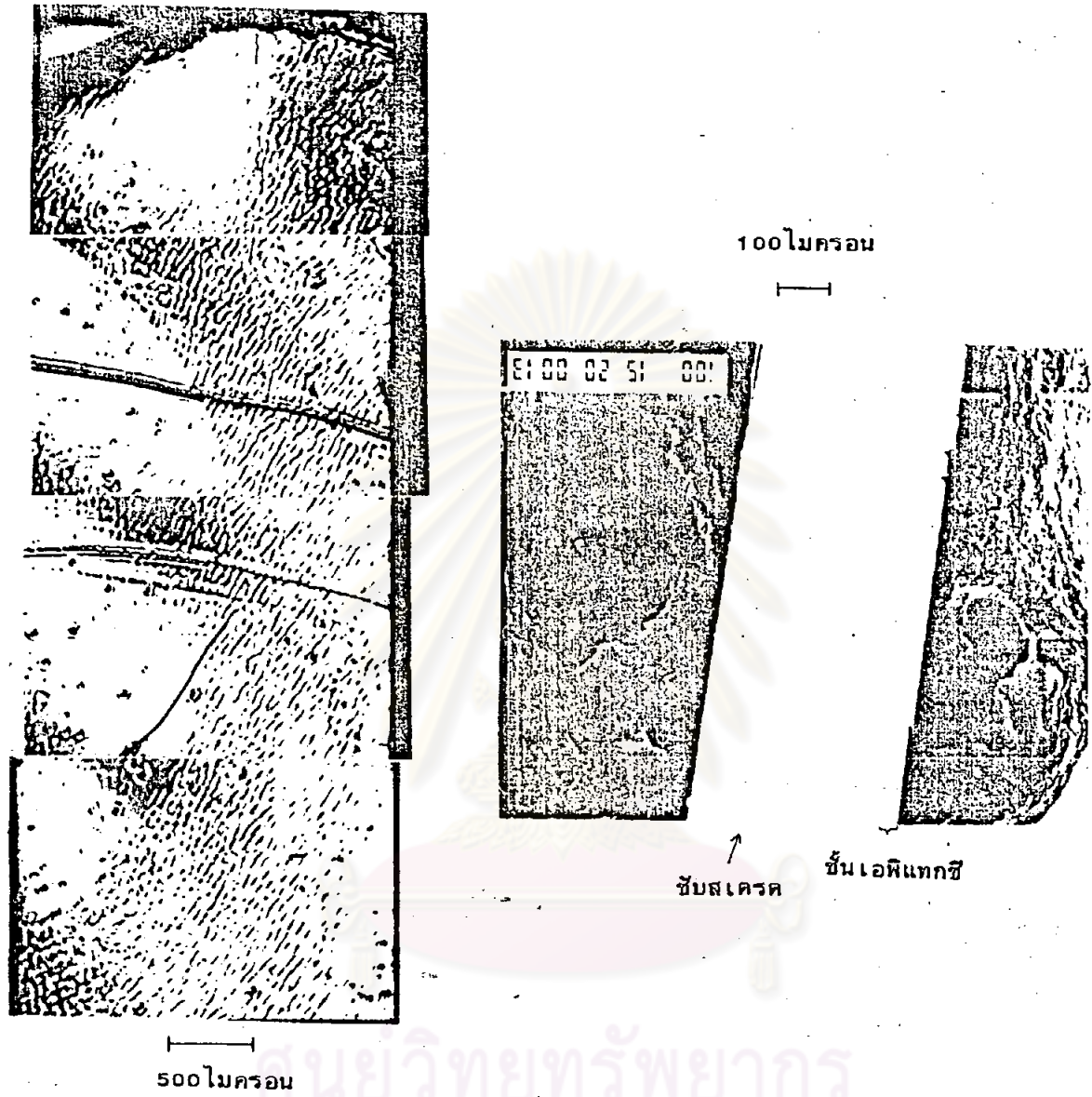


ตารางที่ 5.10 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีชุปเปอร์คูลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี

| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่คำนวณจากทางเทอร์โมไดนามิกส์ (ไมครอน) | ความหนาที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีจากแพร่ (สมการที่ 26) (ไมครอน) | ความหนาที่วัดได้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง (ไมครอน) |
|-----------------|--|--|---|
| 38              | 518  | 5.9  | 27  |
| 39              | 528  | 8.6  | 18.7  |
| 44              | 455  | 7.1  | 21.5  |
| 54              | 455  | 1.2  | 2.6   |
| 55              | 600  | 2.2  | 5   |

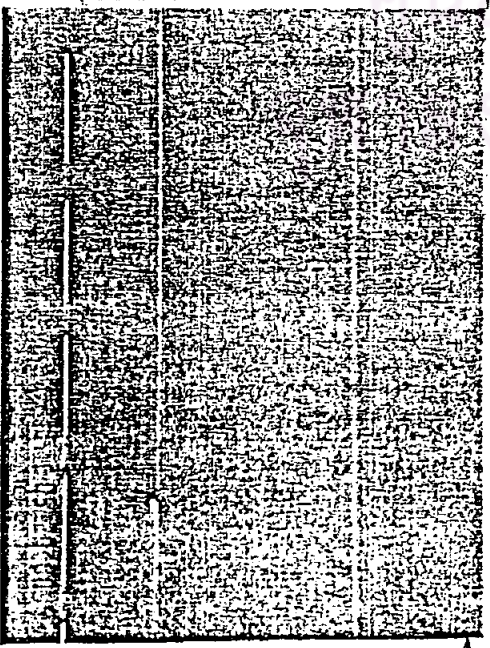
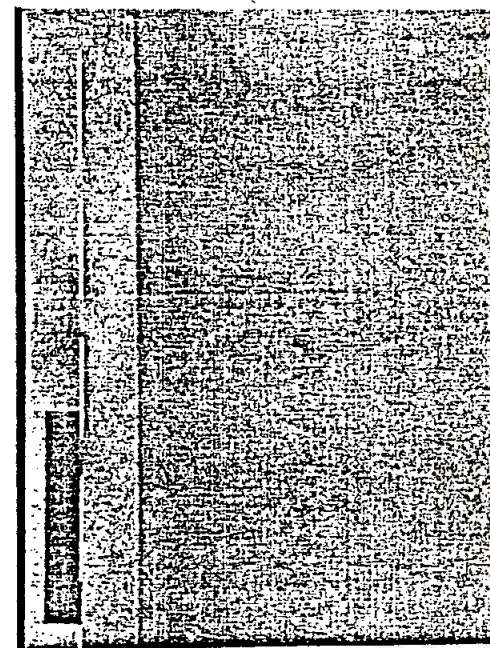
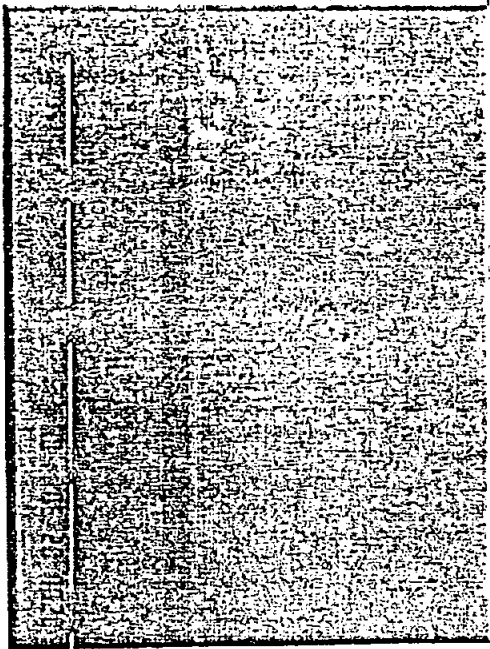
5.3.3 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีชุปเปอร์คูลิ่ง

ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกด้วยวิธีนี้ สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี แสดงอยู่ในตารางที่ 5.10 และภาพถ่ายของสัน แสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่ขอบด้านใดด้านหนึ่งของตัวอย่าง แสดงไว้ในรูปที่ 5.77 ถึง 5.81 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่าง ลักษณะทั่วไปของข้อมูลนั้น ก็อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกัน แต่ที่ควรจะชี้ให้เห็นในที่นี้ก็คือจากผลการทดลองที่ปรากฏออกมาในสภาพพื้นผิวที่ไม่ค่อยไปกว่าเท่าใดกันนั้น การปลูกผลึกด้วยวิธีชุปเปอร์คูลิ่งจะสามารถได้ชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งหนากว่า การปลูกผลึกด้วยวิธีสตีป คูลิ่ง ในช่วงอุณหภูมิที่ลดลงไปเท่า ๆ กัน ในกรณีที่อยู่ระหว่างการลดอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้า ๆ



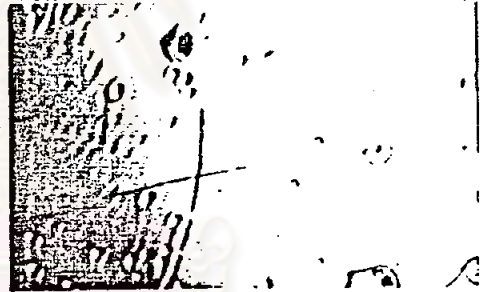
รูปที่ 5.77 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 38 (ข้าว) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิเทกซ์ ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)





ชั้นเอพิแทกซี

ชั้นสเตรด



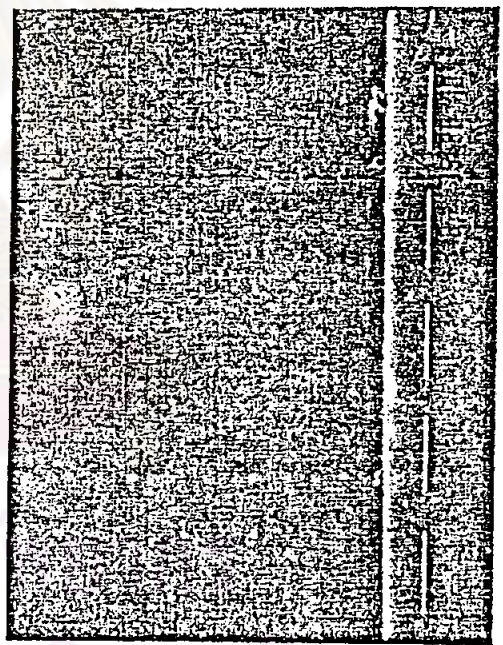
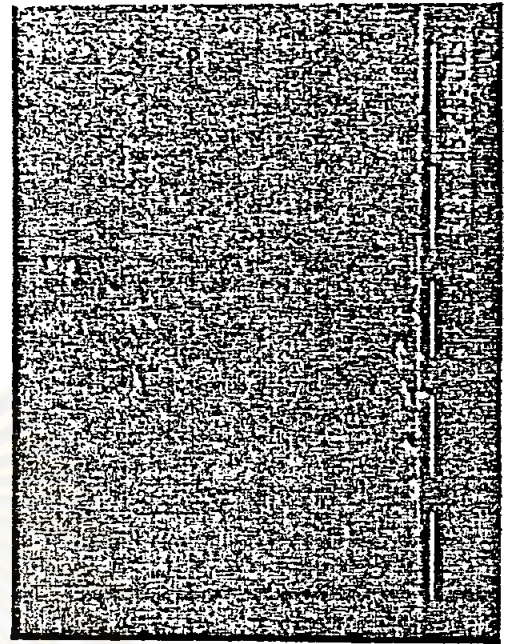
500 ไมครอน

รูปที่ 5.78

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 39 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)



500 ไมครอน

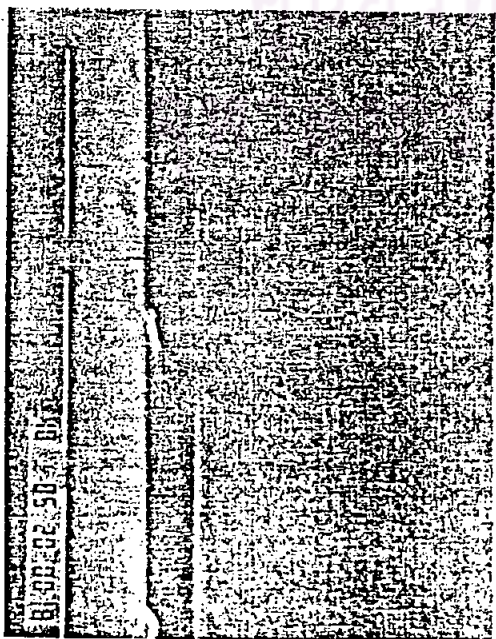
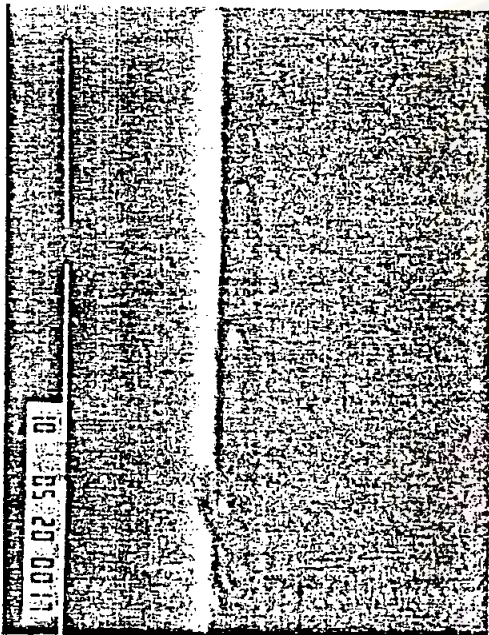
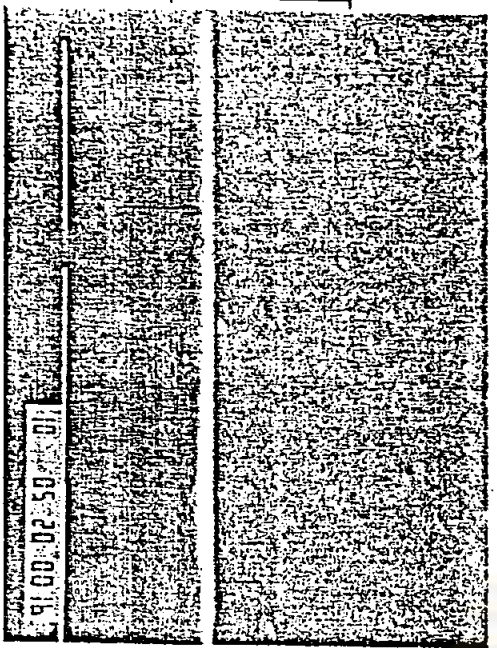


↑  
ซึบสเตรต

ซึนเอพิแทกซี

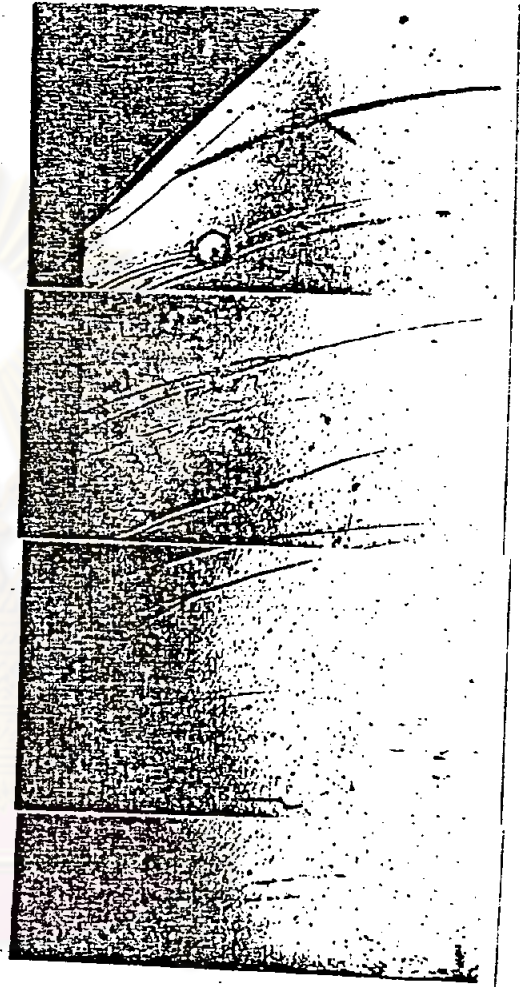
รูปที่ 5.79 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างหมายเลข 44 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)





ชั้นเอพิแทกซี

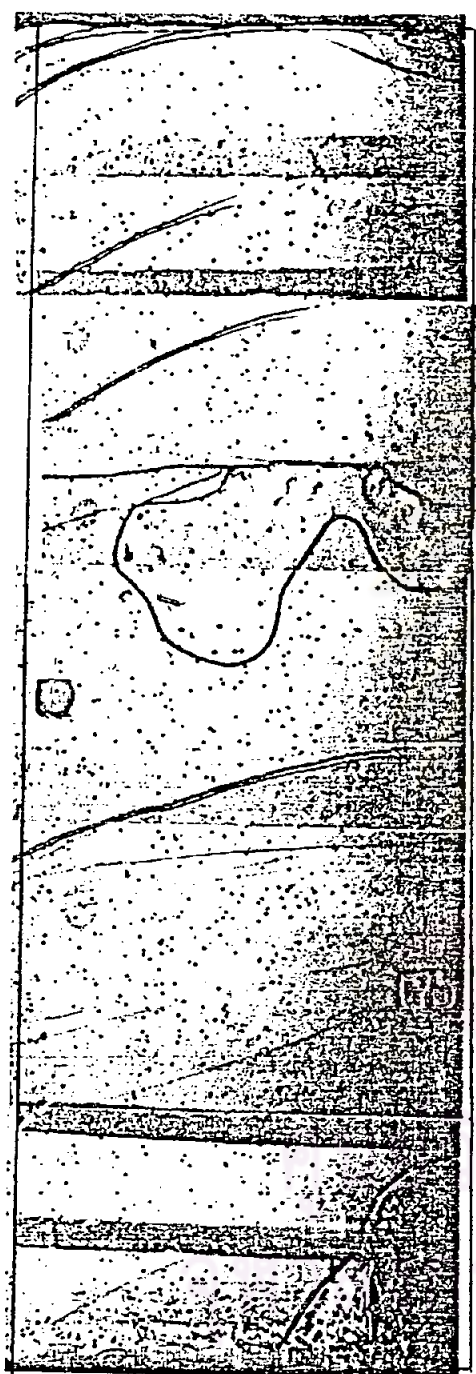
↑  
ชั้นสเตรด



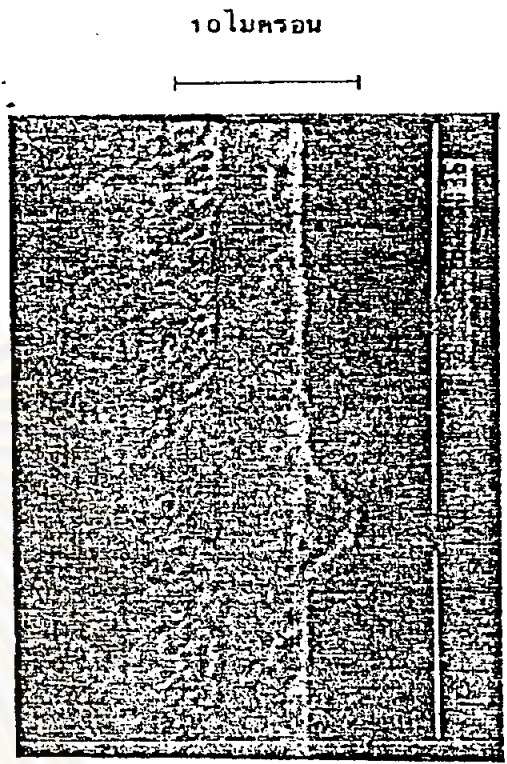
500 ไมครอน

รูปที่ 5.80

ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 54 (ขวา) หรือภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจ้องกัน (ซ้าย)



500 ไมครอน



10 ไมครอน

↑ ชั้นสเตรด

ชั้นเอพิแทกซี

รูปที่ 5.81 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้ผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 55 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสั้แสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)

ทยทรัพยากร  
 รมหาวิทยาลัย



ตารางที่ 5.11 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทุฟเฟส  
โซลูชัน คูลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่วัดได้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง<br>(ไมครอน) |
|-----------------|--|
| 1               | 22   |
| 2               | 18   |

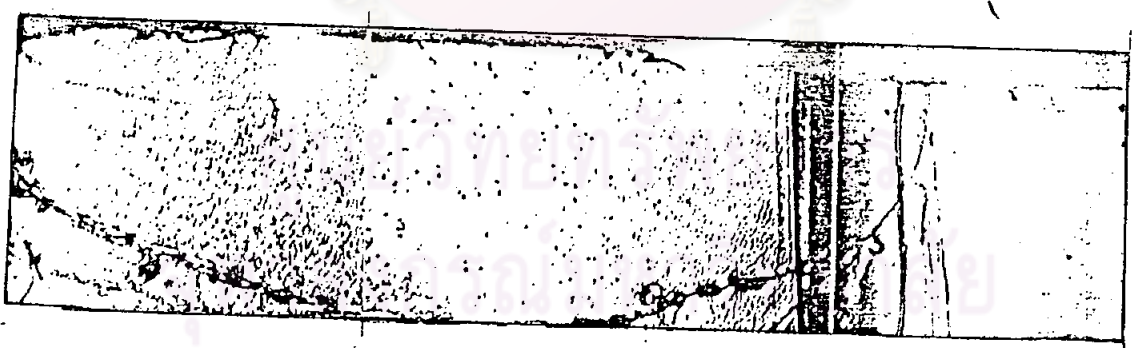
5.3.4 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธี  
ทุฟเฟส โซลูชัน คูลิ่ง

ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกด้วยวิธีนี้สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ  
แสดงอยู่ในตารางที่ 5.11 และภาพถ่ายของสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่ขอบ  
ด้านหนึ่งของตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 5.82 และ 5.83 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่าง  
แม้การปลูกผลึกในลักษณะนี้จะได้ผลึกที่หนาในระยะเวลาอันสั้น แต่ก็ใช้ประโยชน์ไม่ได้  
เพราะผิวขรุขระมากนั่นเอง

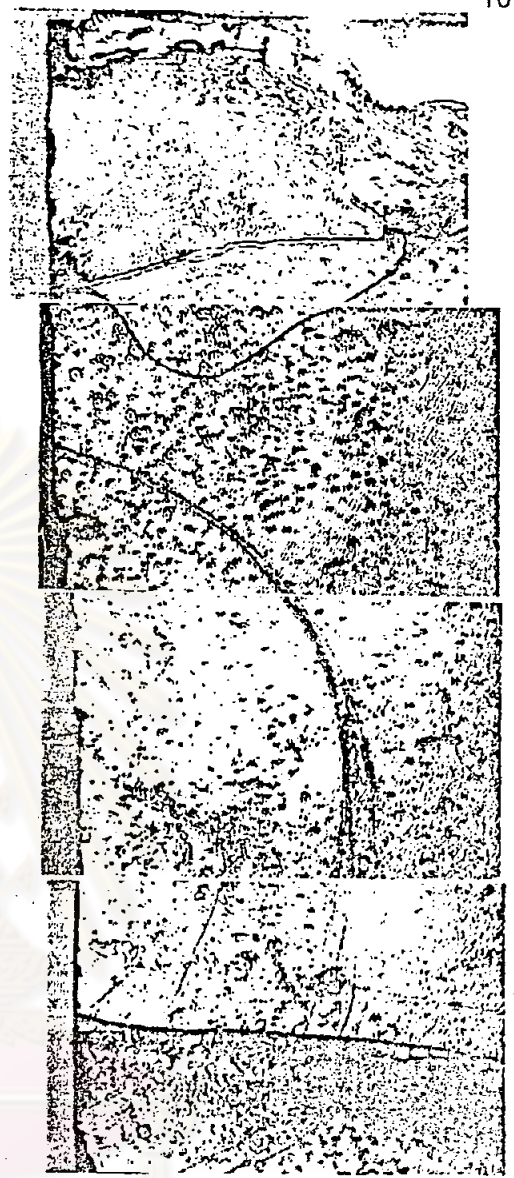
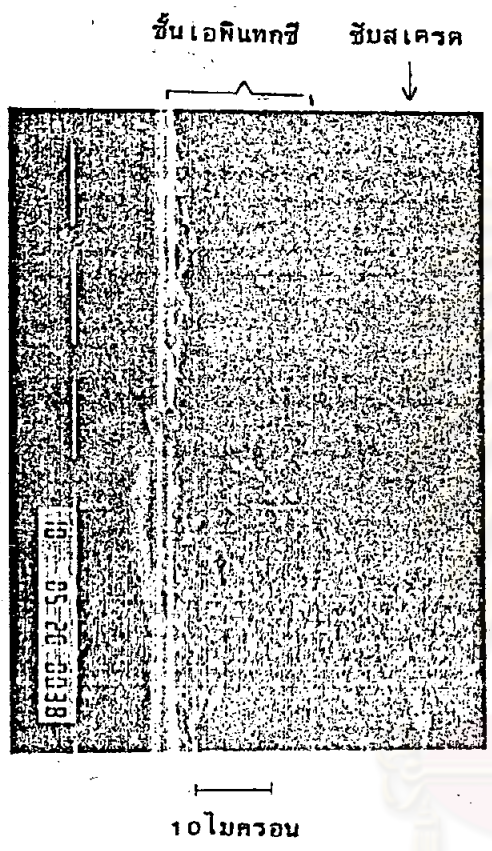
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.82 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 1 (ล่าง) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (บน)



500 ไมครอน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.83 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 2 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)

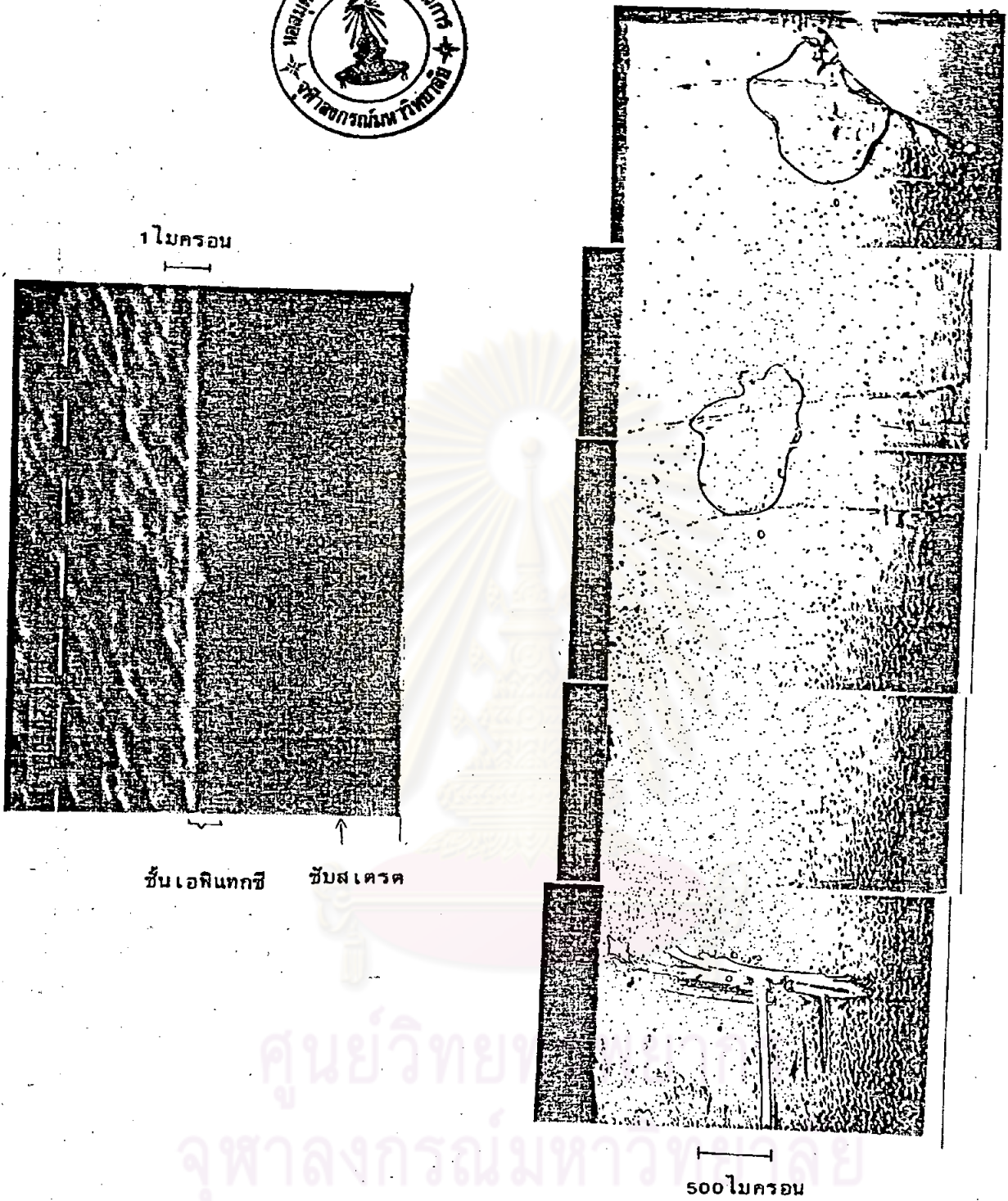
ตารางที่ 5.12 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทรานเซียนโทมค  
ลิควิดเอพิแทกซี สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่วัดได้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง<br>(ไมครอน) |
|-----------------|--|
| 32              | 0.8  |
| 35              | 10.9   |
| 37              | 10.9   |

5.3.5 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทรานเซียนโทมคลิควิด เอพิแทกซี

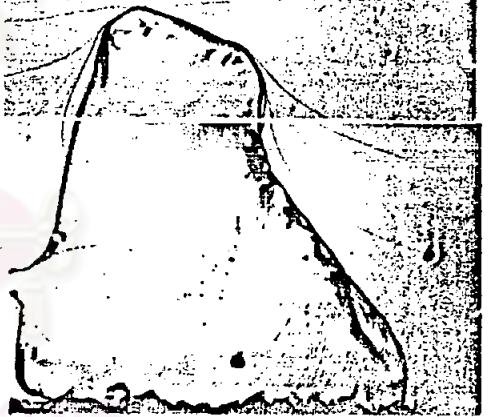
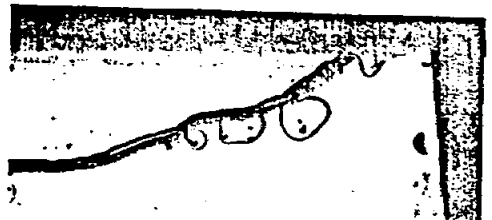
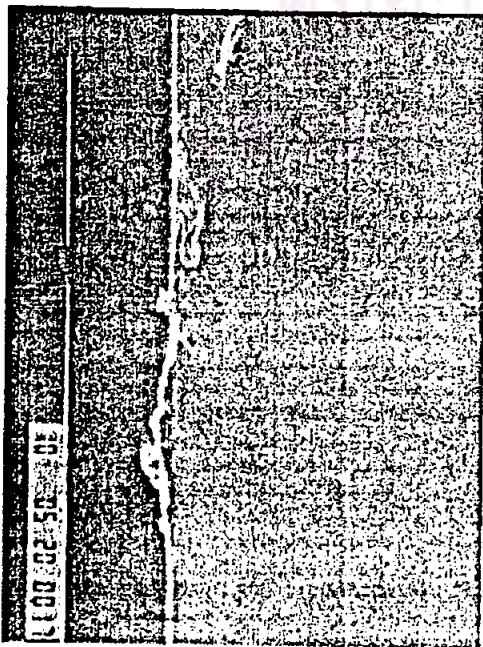
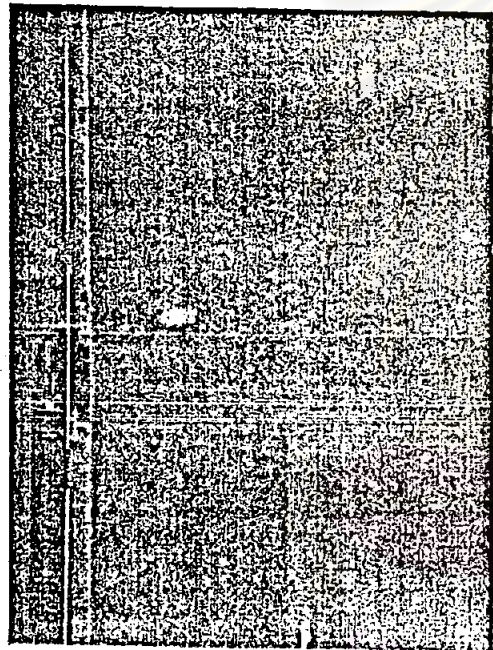
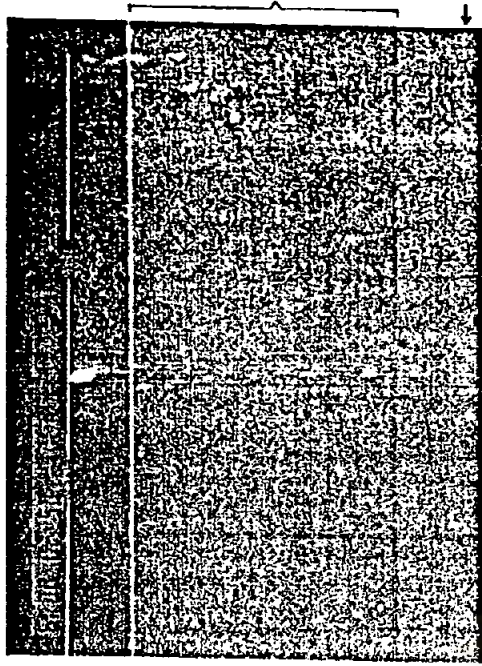
ผลของการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกขึ้นด้วยวิธีนี้ สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 5.12 และภาพถ่ายของสันของขอบคานใดคานหนึ่งของตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.84 ถึง 5.86 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่าง การปลูกผลึกโดยที่สารละลายอิมมัวอยู่พอดีนั้นเป็นกรณีที่น่าสนใจมากเพราะได้ชั้นเอพิแทกซีซึ่งบางกว่า 1 ไมครอน และถ้าไม่มีปัญหาของการขัดขวางการเกิดผลึกเป็นหย่อม ๆ บนพื้นผิวอันเนื่องมาจากฝุ่นละอองหรือ oxide แล้ว ก็เชื่อว่าจะสามารถประยุกต์ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์ได้ต่อไป





รูปที่ 5.84 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นที่ตัวอย่าง  
 หมายเลข 32 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่ค้ำจองงอกกัน (ซ้าย)

ชั้นเอพิแทกซี      ชั้นสเตรด



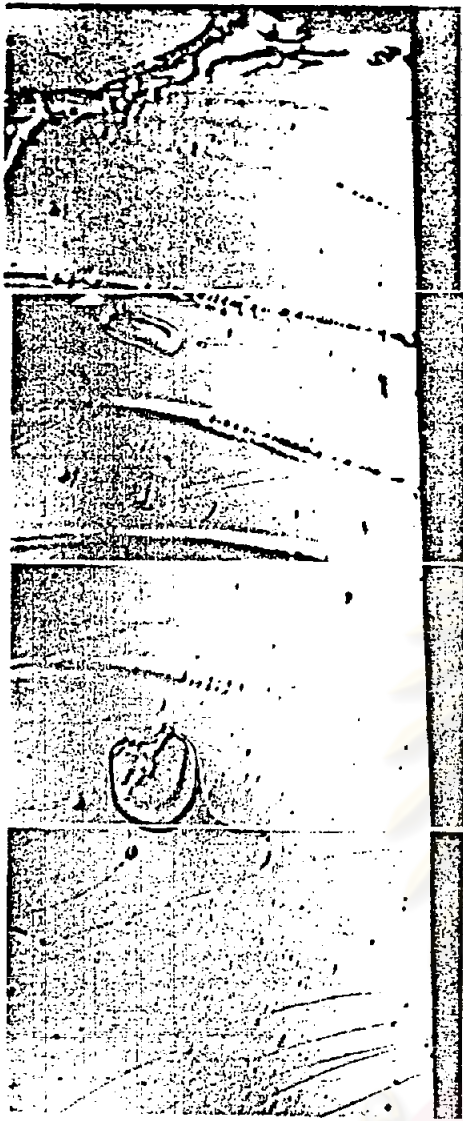
500 ไมครอน

รูปที่ 5.85

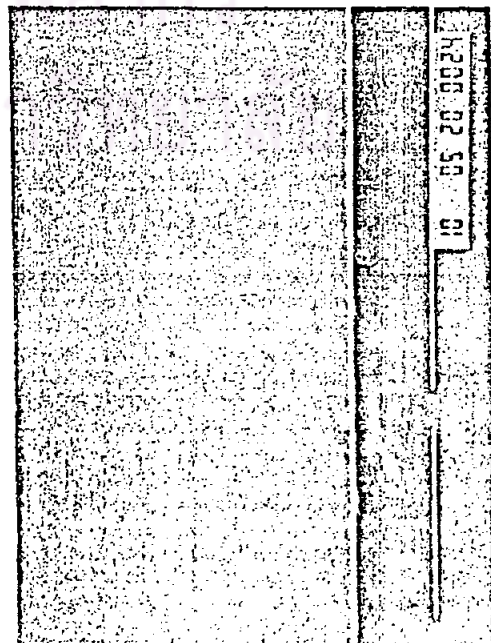
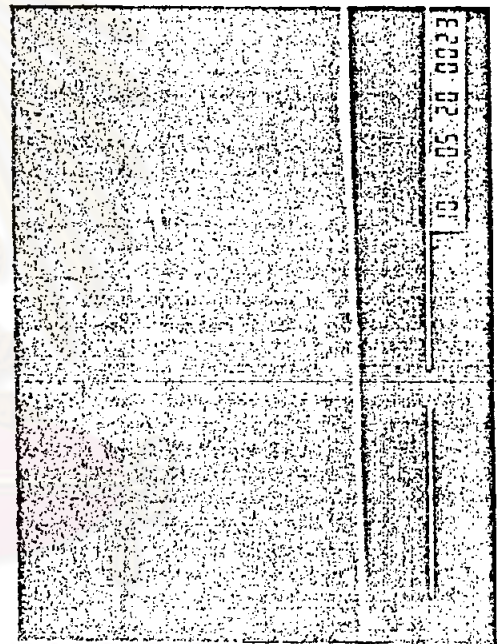
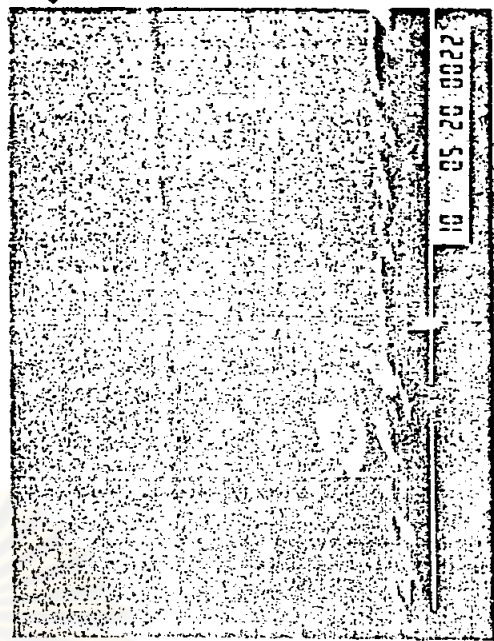
ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง หมายเลข 35 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)

10 ไมครอน





500 ไมครอน



10 ไมครอน

รูปที่ 5.86

ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 37 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



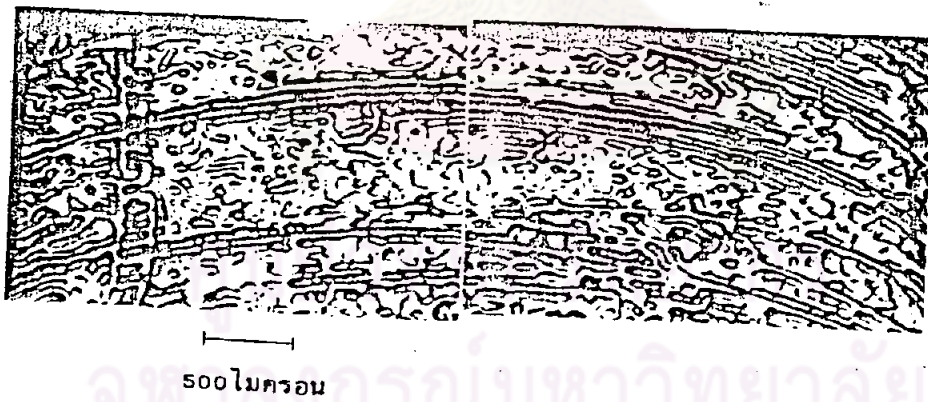
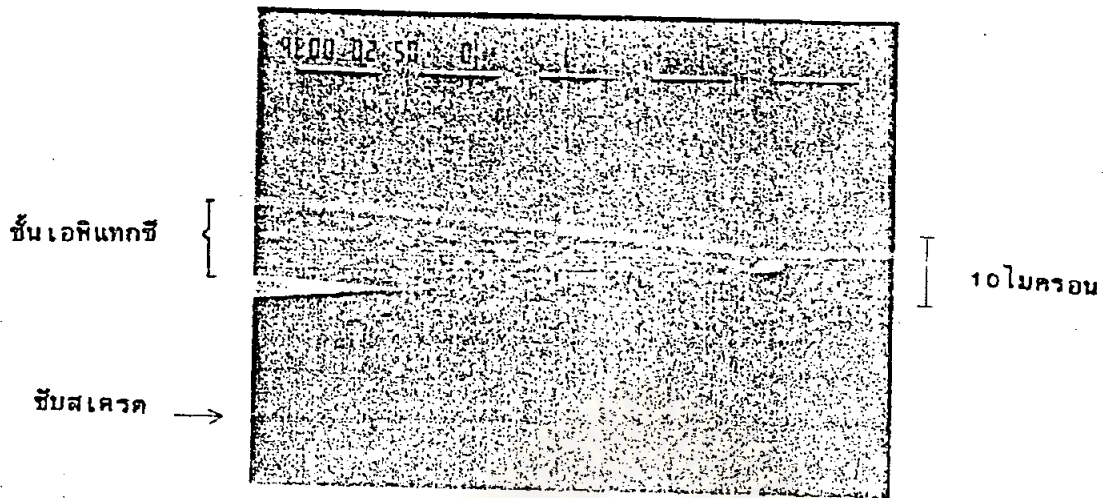
ตารางที่ 5.13 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกภายหลังจากการกัดผิวหน้า  
ซึบสเตรตออกในสารละลายแคลเซียมสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

| หมายเลขตัวอย่าง | ความหนาที่วัดได้จากบริเวณ<br>กึ่งกลางตัวอย่าง<br>(ไมครอน) |
|-----------------|---|
| 28              | 10  |
| 30              | 24  |
| 33              | 11  |
| 45              | 44  |
| 56              | 14.3  |

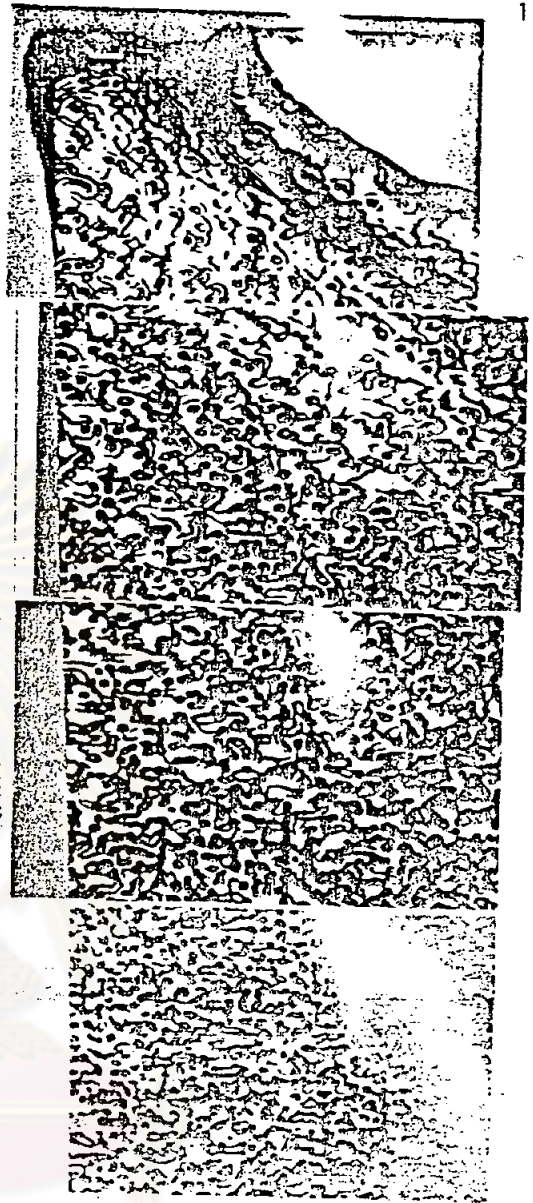
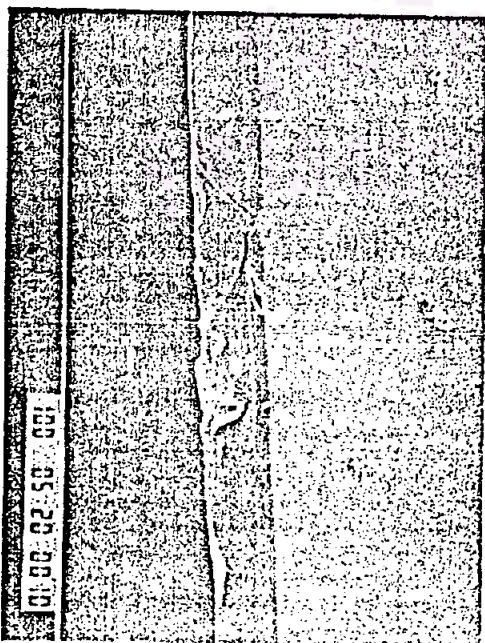
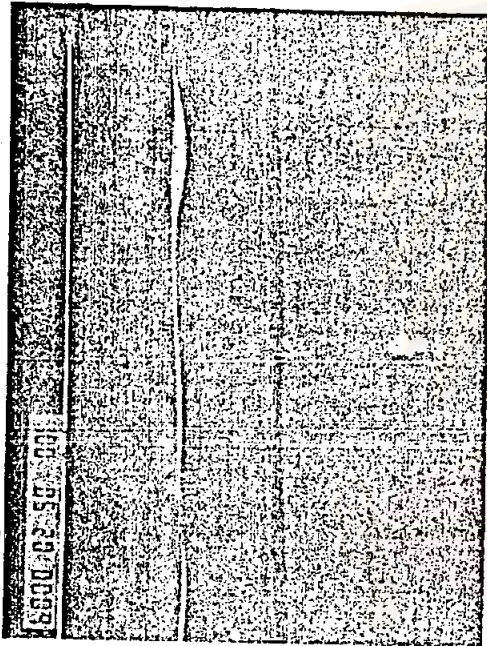
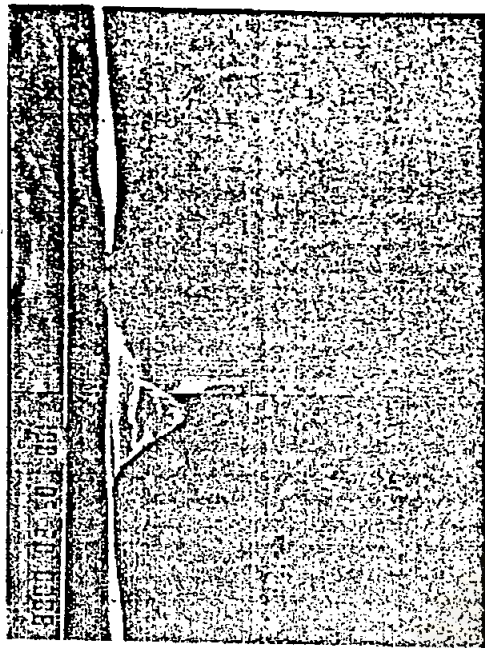
5.3.6 ผลการตรวจสอบและวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซี ซึ่งปลูกภายหลังจาก  
กัดผิวหน้าซึบสเตรตออกในสารละลายแคลเซียม

ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกด้วยวิธีนี้ สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

แสดงอยู่ในตารางที่ 5.13 และภาพถ่ายของสันของขอบด้านใดด้านหนึ่งของตัวอย่างได้  
แสดงไว้ในรูปที่ 5.86 ถึง 5.91 ตามลำดับหมายเลขตัวอย่างสิ่งที่น่าสนใจก็คือ ในกรณีนี้  
รอยต่อผลึกระหว่างซึบสเตรตกับชั้นเอพิแทกซี มักไม่เรียบเป็นเส้นตรงตลอด ลักษณะของ  
หลุมหรือร่องปรากฏให้เห็นทางภาคตัดของชั้นเอพิแทกซีได้อย่างชัดเจนในตัวอย่างที่ 30 และ  
45 และชี้ให้เห็นว่าเกิดจากธรรมชาติที่แตกต่างกัน การกัดผิวในสารละลายในเงื่อนไข  
ของตัวอย่างหมายเลข 45 ทำให้เกิดร่องชั้นบนซึบสเตรตคอน แต่สำหรับกรณีของตัวอย่าง  
ที่ 30 รอยต่อผลึกค่อนข้างเรียบในขณะที่การวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 56 พบว่ารูที่ปรากฏ  
บนพื้นผิวนั้น มีตำแหน่งตรงกับลักษณะโหนกบนพื้นผิวซึบสเตรตคอน ก็อย่างไรก็ตาม  
วิเคราะห์หาค่าตอบยังไม่อาจกระทำได้ในขณะนี้ และคาดว่าจะยังไม่มีคำตอบ



รูปที่ 5.87 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวดังตัวอย่าง  
หมายเลข 28 (ล่าง) พร้อมภาพถ่ายสั้นแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิเทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (บน)



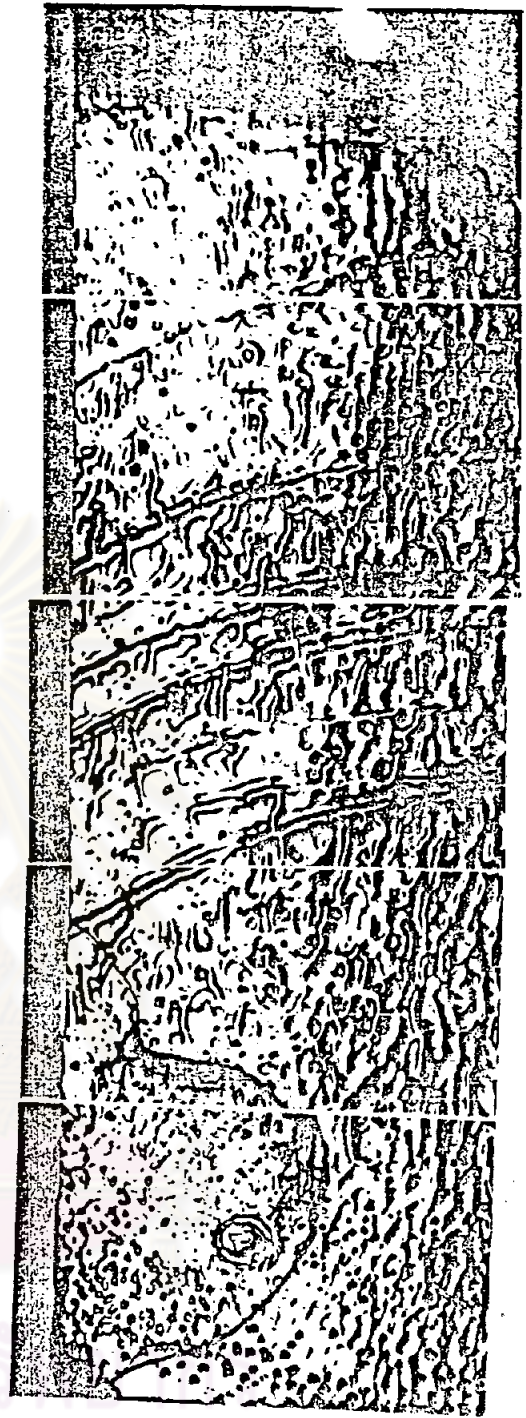
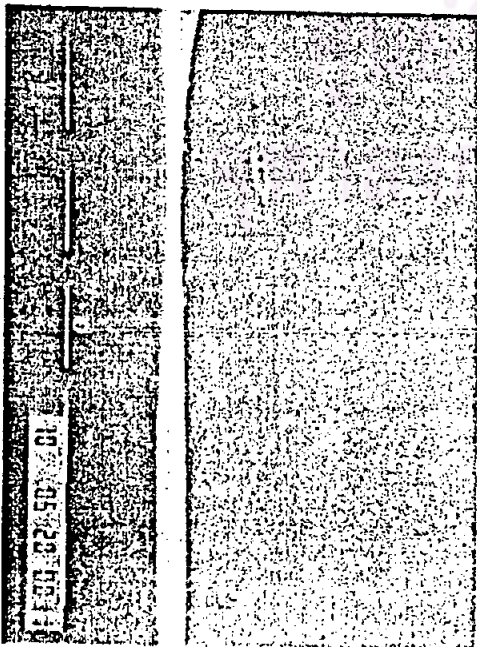
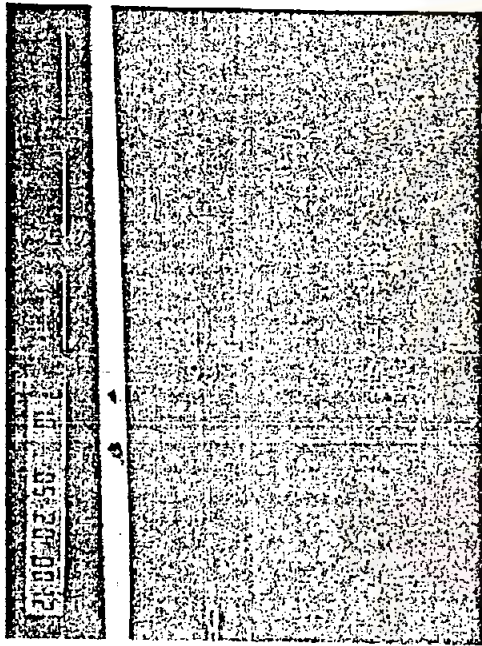
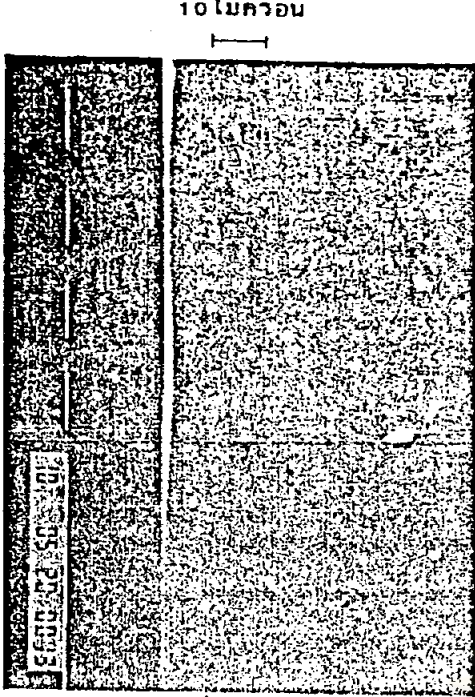
500 ไมครอน

รูปที่ 5.88

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 30 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายเส้นแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ซ้าย)

ชั้นเอพิแทกซี      ชีบสเตรด





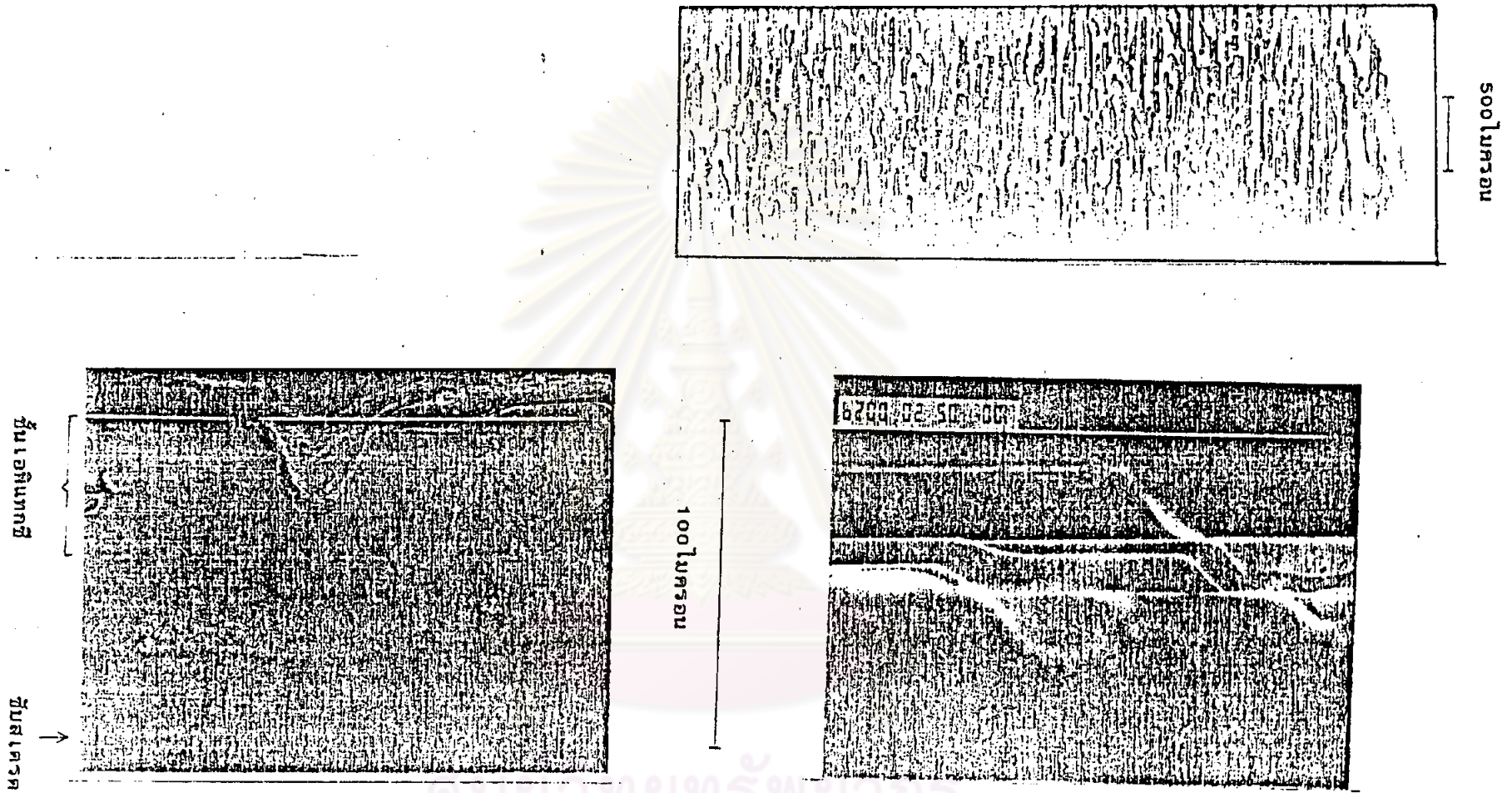
500 ไมครอน

รูปที่ 5.89

ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
 หมายเลข 33 (ขวา) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
 ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่กล้งจ้องกัน (ซ้าย)

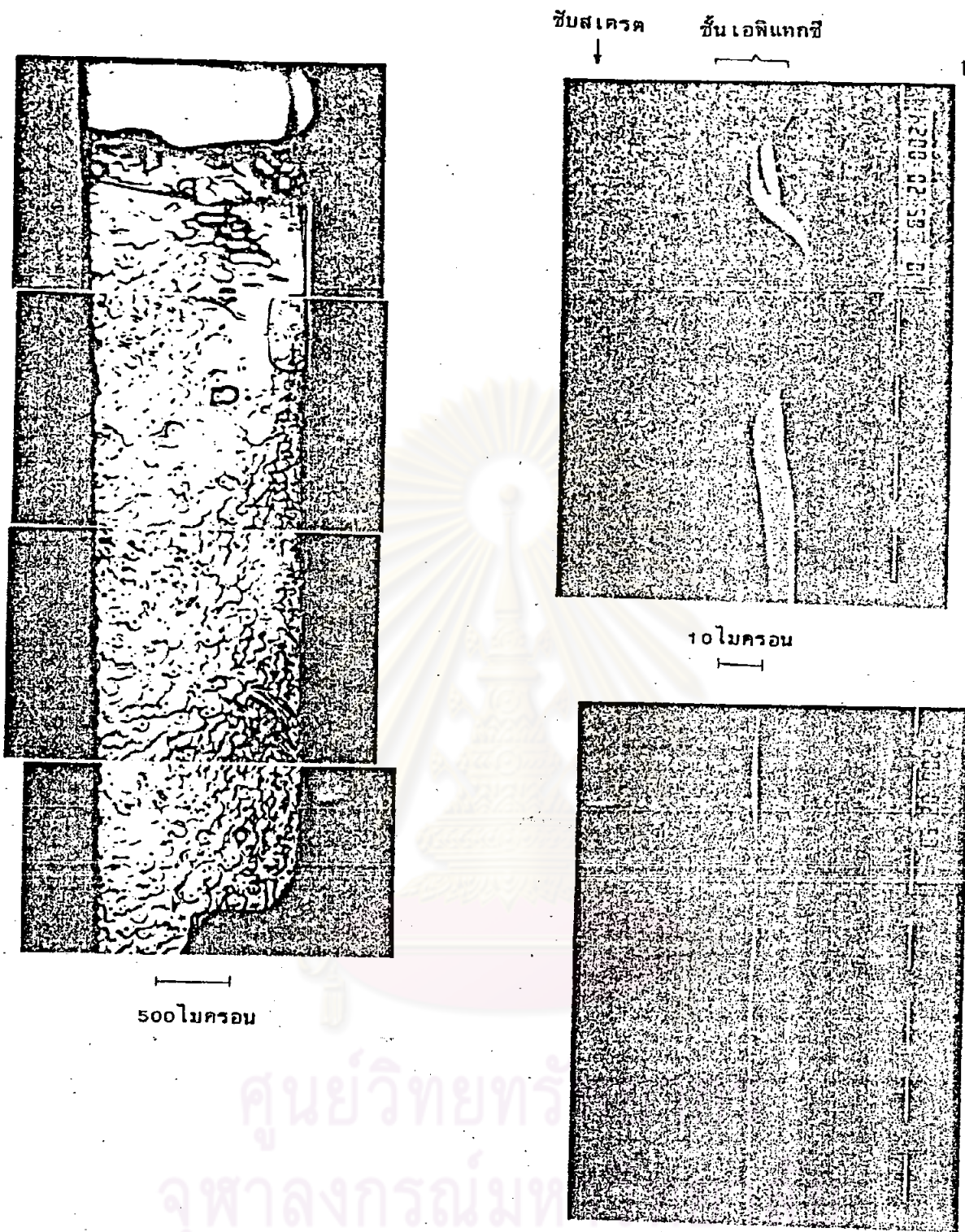
ชั้นเอพิแทกซี

ชั้นสเตรด



รูปที่ 5.90 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 45 (บน) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ๗ บริเวณที่คล้องจองกัน (ล่าง)





รูปที่ 5.91 ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่าง  
หมายเลข 56 (ซ้าย) พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนา  
ของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คล้องจองกัน (ขวา)



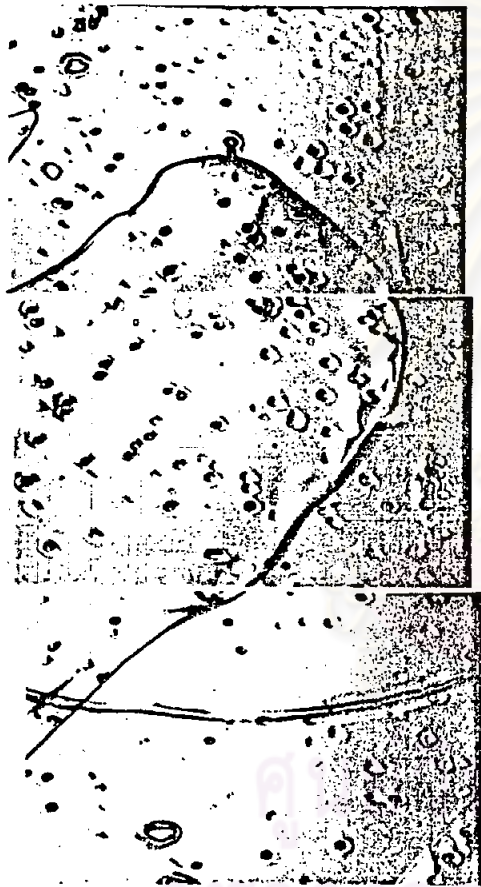
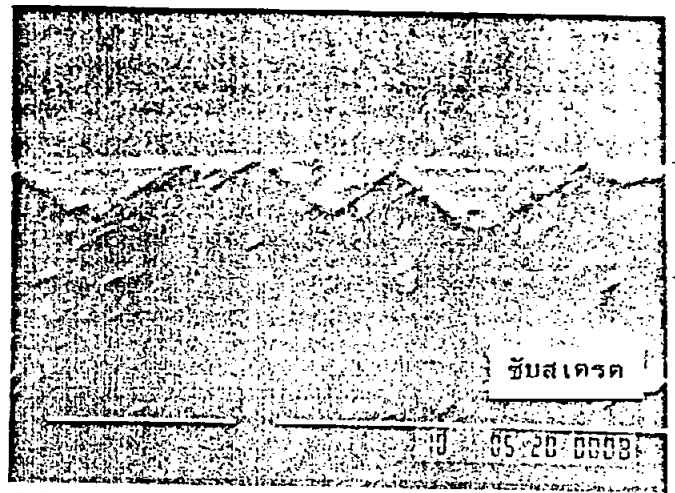
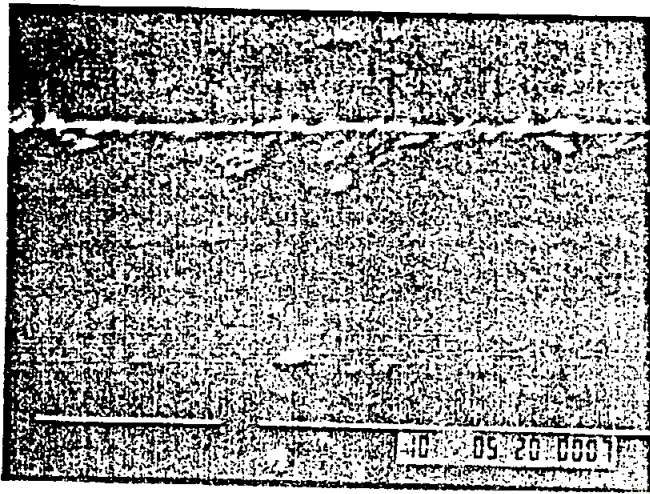
ตารางที่ 5.14 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกบนชั้นสเตรตซ์วางตัว  
ในแนวดิ่งในสารละลาย สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ

| หมายเลข | ความหนาที่วัดได้<br>(ไมครอน) |
|---------|------------------------------|
| 51      | 5*                           |
| 52      | 8.3                          |

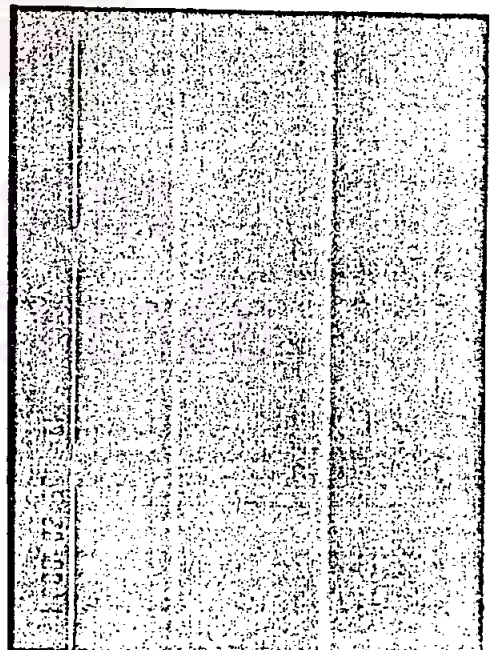
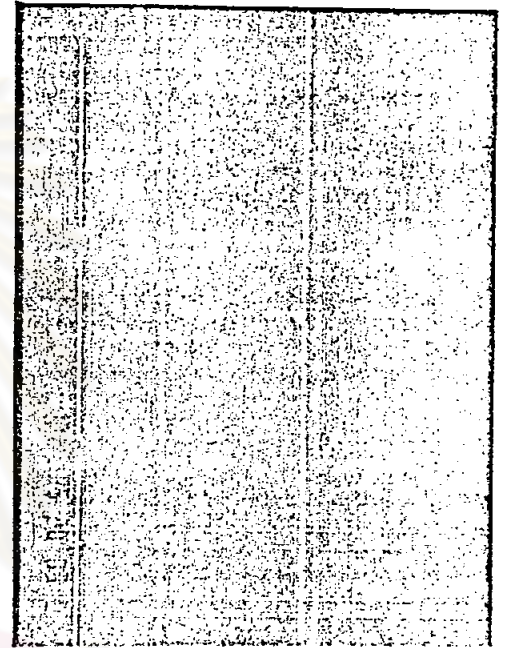
\* ค่าซึ่งได้จากการคำนวณน้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นภายหลังการปลูกผลึก

### 5.3.7 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นบนชั้นสเตรตซ์วางตัวในแนวระดับ

ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นจากการกระทำในลักษณะนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 5.14 และภาพถ่ายสั้นของขอบ 2 ด้านซึ่งตั้งฉากกัน สำหรับตัวอย่างหมายเลข 52 แสดงไว้ในรูปที่ 5.92 แสดงให้เห็นแนวโน้มน้ำที่ชั้นเอพิแทกซ์จะมีความหนาที่ใกล้เคียงกันตลอดทั่วทั้งแผ่น อนึ่ง ในที่นี้กำลังเกิดควาอัตรการเกิดผลึกบนชั้นสเตรตซ์ในแนวระดับนี้ ช้ากว่ากรณีที่ชั้นสเตรตซ์วางตัวในแนวดิ่ง ในเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดีการจะใช้ตัววัดชั้นสเตรตซ์แบบนี้โดยปราศจากการเกาะของแกเลเลียมกระทำไ้สำหรับตัวอย่างที่ 51 เมื่อในสารละลายไม่มีการตกผลึกเองเกิดขึ้น



500ไมครอน



รูปที่ 5.92

ภาพแสดงการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซี  
ในแนวที่ตั้งฉากกับบนตัวอย่างหมายเลข 52

↑  
ชั้นสเตรค

ชั้นเอพิแทกซี

#### 5.4 สมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเอพิแทกซี

ในระบบที่จะสามารถใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวางนั้น ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในชั้นผลึกที่ปลูกขึ้นมาโดยไม่มีเจตนาใส่สารเจือปนควรมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำ แม้วัยเครื่องมือวิเคราะห์เท่าที่มีอยู่ในประเทศไทยเรายังไม่มีความสามารถที่จะทราบถึงชนิดและตลอดจนค่าความเข้มข้นของสิ่งเจือปนเหล่านั้นได้ ทว่าการวัดสมบัติทางไฟฟ้าอันได้แก่ สภาพความต้านทาน ความเข้มข้น และสภาพคล่องตัวของพาหะข้างมาก ก็นับว่าเป็นการเพียงพอซึ่งก็ได้มีการพิจารณาในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้ อาจเป็นเพียงลักษณะของการประมาณอยู่มาก เพราะการวัดค่าที่แท้จริงจำเป็นต้องสามารถกำจัดลักษณะหลุมบนผิวชั้นเอพิแทกซี ให้ได้เสียก่อน และนอกจากนี้ก็ยังต้องพึงผลของการวิจัยถึงวิธีการทำผิวต่อโอห์มิก (ohmic contact) ของโลหะบนแกเลเลียมอาร์เซไนด์ของห้องปฏิบัติการวิจัย ซึ่งยังไม่แล้วเสร็จอีกด้วย การวัดที่กระทำไปแล้วนั้น ก่อนอื่นเราได้พิจารณาเลือกชนิดของโลหะให้เหมาะกับการที่วางชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกขึ้นเป็นชนิด พี หรือ เอ็น

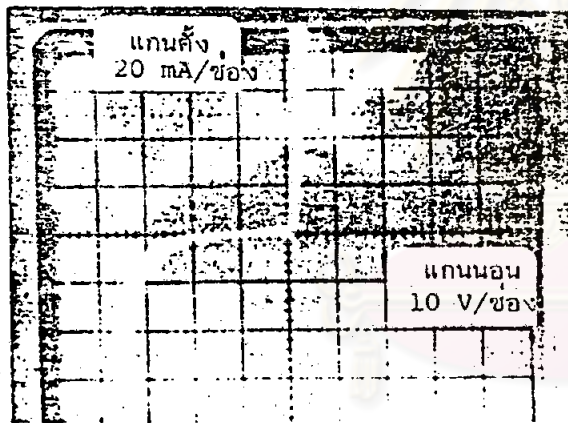
##### 5.4.1 การตรวจดูลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

##### 5.4.1 (ก) ในกรณีของหัวต่อที่เกิดระหว่างชั้นเอพิแทกซีกับซึบสเตรตชนิดเอ็น

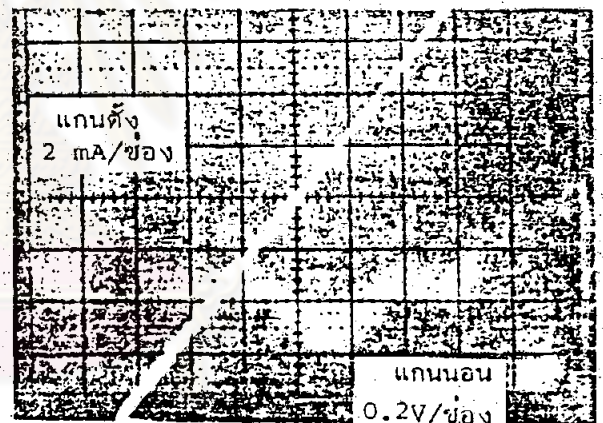
ได้มีการเลือกเอาตัวอย่างหมายเลข 13 ซึ่งเป็นกรณีของการปลูกชั้นเอพิแทกซีกับซึบสเตรตชนิดเอ็นบวก ( $n+$ ) มาทำการฉาบไอของทองผสมเยอรมันเนียม 12% ในสุญญากาศทั้งสองผิวหน้าให้มีความหนา 2000 อังสตรอมจากนั้นก็ทำการฉาบไอของนิกเกิลพอกเข้าไปอีก หนา 500 อังสตรอม เฉพาะด้านหน้าซึ่งเป็นชั้นเอพิแทกซีนั่นมีหน้าฉากโลหะ (metallic mask) กันไอระเหยไม่ให้ไปตกในบริเวณนอกเหนือจากบริเวณจุดวงกลมจำนวนมากซึ่งต่างมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร วงกลมโลหะปรากฏให้เห็นอยู่ในรูปที่ 5.44 ด้วยเช่นกัน ทำการดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันด้วยการใช้เครื่อง curve tracer และ oscilloscope พบว่ามีลักษณะดังรูปที่ 5.93 (ก) โดยการไบอัส (bias) ตามนั้น กำหนดโดยให้ทางชั้นเอพิแทกซีเป็นบวกเทียบกับซึบสเตรต หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแอนนัล (anneal)



ในบรรยากาศของโฟมมิ่งก๊าซ ( foaming gas , 10 ไซโครเจนใน  
 ก๊าซไนโตรเจน ) ที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 นาที นำมาพิจารณาใหม่  
 ปรากฏจากรูป 5.93 ( ข ) พบว่าลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิมคือ กระแสแรงดันแปรตาม  
 กันและมีค่าความชันสูงชี้ให้เห็นว่าหัวต่อระหว่างโลหะกับตัวอย่างนั้นเป็นโอห์มิกทั้งสองด้าน  
 เป็นที่ทราบกันว่า การใช้ ทอง-เยอรมันเนียม-นิกเกิล จะให้หัวต่อโอห์มิกกับเทลลูไรด์  
 เซในคซินิกเอ็น ดังนั้นจึงทราบได้ทางหนึ่งว่าชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นในช่วงแรกของการ  
 ทดลองนั้นเป็นซินิกเอ็น และนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าของศักย์ทั้งหลายของการ ไบอัส  
 ย้อน ( reverse bias ) ในรูปที่ 5.93 ( ก ) นั้นซึ่งมีค่ามากกว่า 30 โวลต์  
 กับข้อมูลที่มีในรายงานทั่ว ๆ ไป (48) จึงอาจกล่าวโดยประมาณหยาบ ๆ ว่าชั้นเอพิแทกซ์  
 ที่ปลูกขึ้นมีความเข้มข้นของพาหะอยู่ในระดับของ  $10^{16}$  ซม<sup>-3</sup>



(ก)



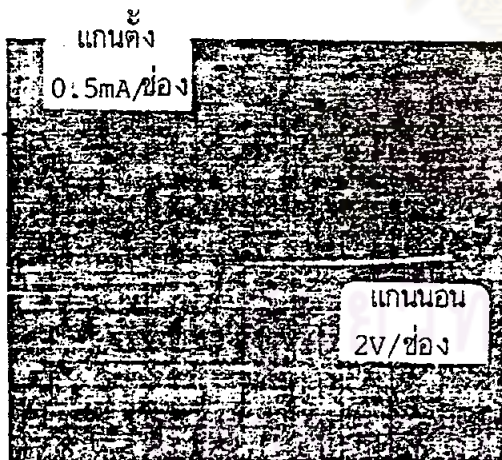
(ข)

รูปที่ 5.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในกรณีของ  
 ชั้นเอพิแทกซ์กับขั้วสเตรคซินิกเอ็น เมื่อหลังจากการฉายไอ  
 ทอง เยอรมันเนียม และนิกเกิล ( ก ) ก่อนแกนนี้  
 ( ข ) หลังการแอนเนลที่ 450 °C ในโฟมมิ่งก๊าซเป็นเวลา  
 1 นาที

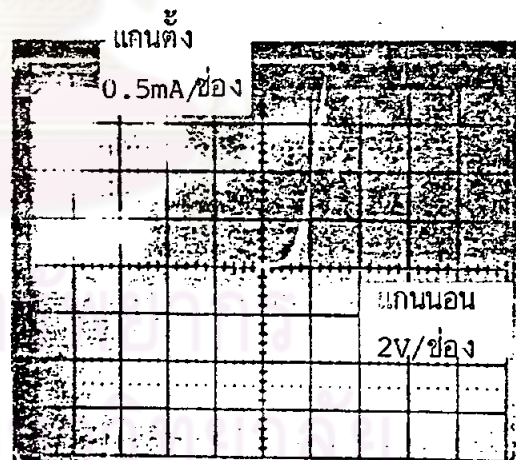


5.4.1 (ข) ในกรณีของหัวต่อที่เกิดระหว่างชั้นเอพิแทกซ์กับซับสเตรตชนิดพี

เพื่อเป็นการยืนยันอีกทางหนึ่งได้มีการนำตัวอย่างหมายเลข 56 ซึ่งเป็นกรณีของชั้นเอพิแทกซ์บนซับสเตรตชนิดพีบวก (p +) มาทำการฉาบไอทอง-เยอรมันเนียมและตามด้วยนิเกิลที่ด้านของชั้นเอพิแทกซ์ด้วยวิธีการผ่านหน้ากากโลหะเช่นเดิม ทางด้านหลังของซับสเตรตได้ทำการฉาบไอทองผสมสังกะสี 5% ทน 3000 องศาเซลเซียสเต็มทั้งหน้า นำตัวอย่างมาดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยกำหนดให้การไบอัสตามกึ่งทางด้านซับสเตรตเป็นบวก เมื่อเทียบกับชั้นเอพิแทกซ์ ผลปรากฏเป็นดังรูปที่ 5.94 (ก) และเมื่อนำตัวอย่างไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 450 °C ในบรรยากาศของโพรมิ่งก๊าซ 1 นาที นำมาพิจารณาใหม่ความสัมพันธ์เปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 5.94 (ข) จะเห็นว่ายังคงมีลักษณะของหัวต่อ ซึ่งเมื่อดูจากค่า built-in voltage ทางการไบอัสตาม และค่าศักย์พังทะลายทางการไบอัสย้อนกลับ สอดคล้องกับกรณีที่ควรจะพบในหัวต่อพีเอ็นของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ทางด้านพีมีความเข้มข้นของพาหะสูงหรือที่บวกนั่นเอง



(ก)



(ข)

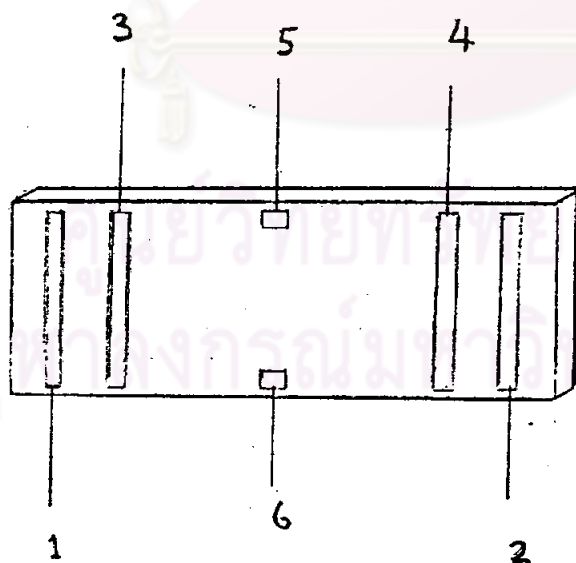
รูปที่ 5.94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในกรณีของชั้นเอพิแทกซ์กับซับสเตรตชนิดพี เมื่อหลังจากการฉาบไอทอง-เยอรมันเนียมและนิเกิลที่ด้านของชั้นเอพิแทกซ์และฉาบไอทอง-สังกะสีที่ด้านของซับสเตรต

(ก) ก่อนแอนนัล

(ข) หลังแอนนัล

#### 5.4.2 การวัดโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์

เดิมได้มีความคิดที่จะวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าชนิดพีและความเข้มข้นของพาหะข้างมากโดยวิธีแวนเคอร์เพาว์ (Van der Pauw) (49) แต่ก็มีปัญหายากในการเตรียมตัวอย่าง จึงได้หันไปใช้วิธีการในแบบดั้งเดิมคือ เลือกตัวอย่างหมายเลข 55 ซึ่งเป็นการปลูกผลึกบนแคลเซียมอาร์เซไนต์กึ่งฉนวน มาทำการฉาบไอระเหยของ ทอง-เยอรมันเนียม และ Ni เช่นเคย แต่กระทำผ่านหน้ากากอันใหม่ซึ่งให้ขั้วสี่เหลี่ยมจำนวน 4 ขั้ว เรียงกัน โดยมีขั้วจุดเล็ก ๆ 2 ขั้ว อยู่ตรงกึ่งกลาง หลังจากการแอนนัลในโหม่งก๊าซ 1 นาทีที่อุณหภูมิ 450° ซ แล้วทำการตัด ปรากฏขั้วและแนวการตัดมีลักษณะเห็นขนาดได้ชัดเจน บนผิวของตัวอย่างในรูปที่ 5.81 และใช้เป็นตัวอย่างของฮอลล์ (Hall Sample) กำหนดหมายเลขขั้วให้เป็นไปตามรูปที่ 5.95 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลระหว่างขั้วที่ 1 และ 2 กับความต่างศักย์คร่อมระหว่างขั้วที่ 3 และ 4 เป็นไปดังรูปที่ 5.96 และเมื่อพิจารณาข้อมูลนั้นร่วมกับรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดของตัวอย่างและความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ทำให้ทราบว่าชั้นเอพิแทกซ์ในตัวอย่างนี้มีสภาพความต้านทาน 0.02 โอห์ม-ซม.



รูปที่ 5.95 ภาพแสดงการระบุขั้วของตัวอย่างฮอลล์

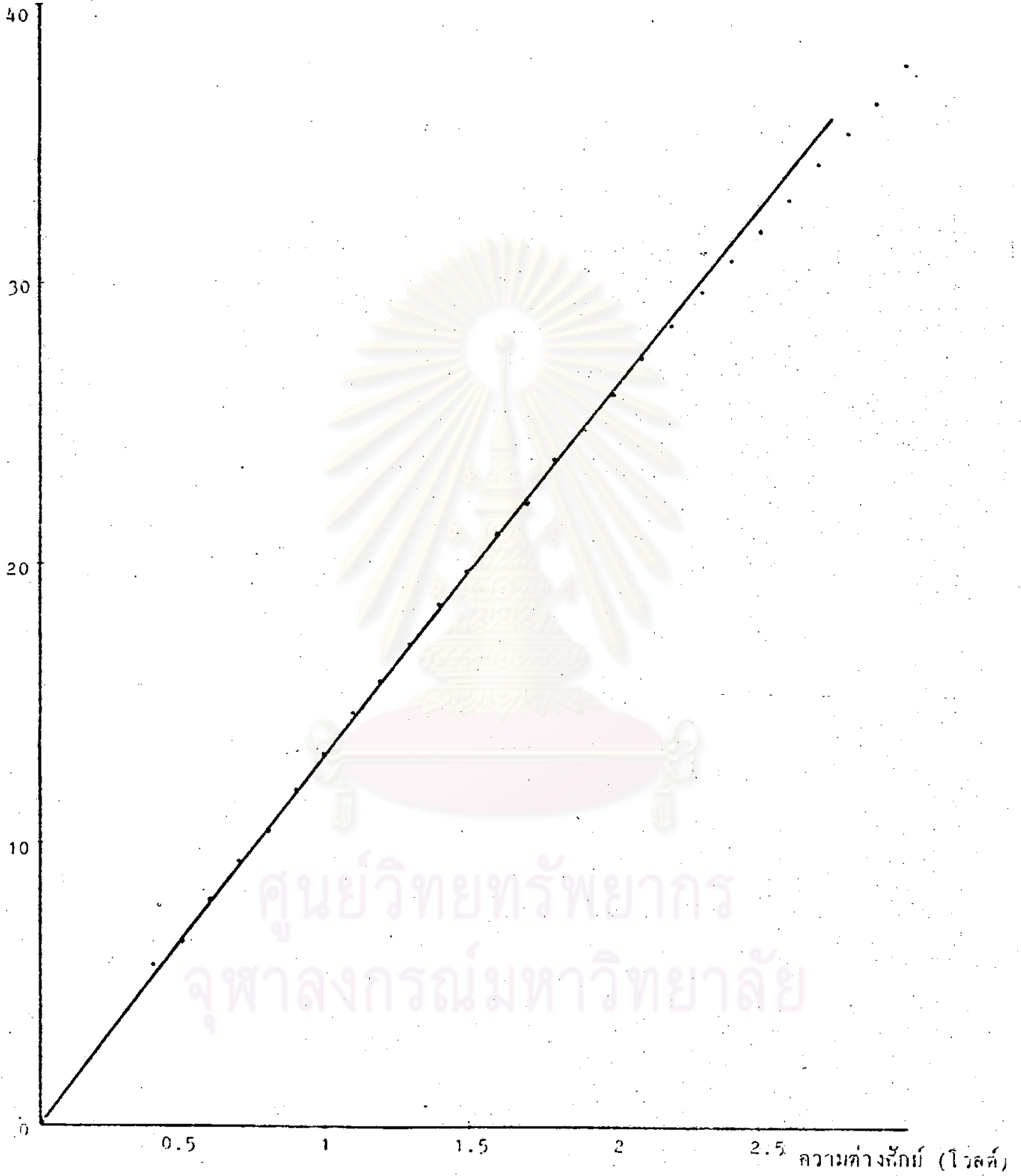


ได้มีการนำตัวอย่างนี้ไปวัดค่าความต่างศักย์ของฮอลล์ (Hall Voltage) ที่ห้องปฏิบัติการ NMR ของภาควิชาฟิสิกส์ โดยวางตัวอย่างในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กและให้กระแสไหลผ่านระหว่างขั้วที่ 1 และ 2 ทำการวัดความต่างศักย์คร่อมระหว่างขั้วที่ 5 และ 6 โดยมีการกลับทิศกระแสและกลับทิศสนามแม่เหล็ก เพื่อตัดความต่างศักย์ที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป และพิจารณาทิศทางบวกและลบของกระแส ความต่างศักย์ และสนามแม่เหล็ก ให้สอดคล้องกับทิศทางมาตรฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ตามวิธีการที่ใช้กันทั่วไป (50) ผลของการวัดค่าความต่างศักย์คร่อมระหว่างขั้วที่ 5 และ 6 ในกรณีต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนค่ากระแสและสนามแม่เหล็กมีปรากฏอยู่ในตารางที่ 5.15

พร้อมกันนั้นก็แสดงค่าความต่างศักย์ของฮอลล์ซึ่งคำนวณได้ เมื่อประกอบกับการประมาณที่ว่าในตัวอย่่างมีพาหะเพียงชนิดเดียวและใช้ความสัมพันธ์ของฮอลล์เท่ากับ 1 ทำให้ทราบว่าชั้นเอพิแทกซ์นี้เป็นชนิดเอ็น มีความเข้มข้นของพาหะข้างมากคืออิเล็กตรอนนั้นเท่ากับ  $4.9 \times 10^{16} \text{ ซม}^{-3}$  จากค่าตั้งกล่าวและค่าสภาพความต้านทาน สามารถคำนวณหาค่าสภาพถ่วงของอิเล็กตรอนในตัวอย่่างนี้ได้เท่ากับ  $6390 \text{ ซม}^2 \text{ โวลต์}^{-1} \text{ วินาที}^{-1}$  การที่ตัวอย่างนี้ทำการทดลองในระยะหลัง และเมื่อพิจารณาาร่วมกับการคาดประมาณชนิดและความเข้มข้นของพาหะข้างมากในตัวอย่่างหมายเลข 13 มาแล้วนั้น จึงสามารถพอจะกล่าวได้อย่างมั่นใจว่าชั้นเอพิแทกซ์ทั้งหมดที่ทำการทดลองเป็นชนิดเอ็น และมีความเข้มข้นของพาหะข้างมากในระดับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระแส  
(มิลลิแอมแปร์)



รูปที่

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คร่อมระหว่าง  
ขั้วคู่ในของตัวอย่าหมายเลข 55

ตารางที่ 5.15 ข้อมูลการทดลองปรากฏการณ์ของซอลล์ และผลการคำนวณหาความเข้มข้นของ  
พาหะในชั้นเอพิแทกซ์ของตัวอย่างหมายเลข 55

| กระแส I<br>(มิลลิแอมแปร์)                | ความเข้มข้น<br>แม่เหล็ก B<br>(เวเบอร์) | ความต่างศักย์<br>ที่วัดได้ v<br>(มิลลิโวลต์) | ความต่างศักย์ของซอลล์<br>$V_H = \frac{V_1 + V_4 - V_2 - V_3}{4}$<br>(มิลลิโวลต์) | ความเข้มข้นของ<br>พาหะ n<br>( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|--|--|--|--|--|
| + 16.65<br>+ 16.65<br>- 16.65<br>- 16.65 | + 0.27<br>- 0.27<br>+ 0.27<br>- 0.27   | - 112.21<br>+ 102.02<br>+ 127.59<br>- 101.54 | $V_1$<br>$V_2$<br>$V_3$<br>$V_4$<br>- 110.84                                     | $5.08 \times 10^{16}$                            |
| + 11.91<br>+ 11.91<br>- 11.91<br>- 11.91 | + 0.27<br>- 0.27<br>+ 0.27<br>- 0.27   | - 90.10<br>+ 72.51<br>+ 90.82<br>- 72.72     | $V_1$<br>$V_2$<br>$V_3$<br>$V_4$<br>- 81.54                                      | $4.93 \times 10^{16}$                            |
| + 16.65<br>+ 16.65<br>- 16.65<br>- 16.65 | + 0.19<br>- 0.19<br>+ 0.19<br>- 0.19   | - 94.52<br>+ 69.66<br>+ 95.59<br>- 70.44     | $V_1$<br>$V_2$<br>$V_3$<br>$V_4$<br>- 82.55                                      | $4.79 \times 10^{16}$                            |
| + 1.00<br>+ 1.00<br>- 1.00<br>- 1.00     | + 0.23<br>- 0.23<br>+ 0.23<br>- 0.23   | - 7.00<br>+ 5.31<br>+ 6.49<br>- 4.81         | $V_1$<br>$V_2$<br>$V_3$<br>$V_4$<br>- 5.90                                       | $4.77 \times 10^{16}$                            |
| + 0.62<br>+ 0.62<br>- 0.62<br>- 0.62     | + 0.27<br>- 0.27<br>+ 0.27<br>- 0.27   | - 4.79<br>+ 3.85<br>+ 4.73<br>- 3.79         | $V_1$<br>$V_2$<br>$V_3$<br>$V_4$<br>- 4.29                                       | $4.87 \times 10^{16}$                            |
|  |  |  |  | ค่าเฉลี่ย<br>$\bar{n} = 4.89 \times 10^{16}$     |