



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวัดปริมาตรของลายพิมพ์โซลเดอร์ริงเจดด้วยเทคนิคการวาดภาพฉาย  
Solder paste volume inspection using orthographic drawing technique

ประธาน บุรณศิริ

b. 12829575  
i.

เลขท무.....  
เลขทะเบียน 145194  
รับเดือนปี 31 อ.ค. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การวัดปริมาตรของลายพิมพ์โซลเดอร์ริงเจลดด้วยเทคนิคการวาดภาพฉาย  
 แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ ประเภท ส่งเสริมนักวิจัย  
 ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558  
 ชื่อ – สกุล หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ  
 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เสนอการวัดคุณสมบัติของสารเชื่อมประสาน (solder paste) ที่มีส่วนผสมของกราฟีน (GPN) และกราฟีนออกไซด์ (GPNO) ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษได้แก่ความสูงและมุมสัมผัสของสารเชื่อมประสาน (solder paste) โดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี (digital holography) ในการวิเคราะห์ โดยในเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี (digital holography) เพื่อวาดภาพฉายของสารเชื่อมประสานนี้ ได้ใช้การติดตั้งระบบแบบถ่ายภาพได้สองมุมมองในรูปเดียว โดยการใช้กระจกเงาสองบานสะท้อนให้เกิดภาพ ซึ่งกระจกเงาสองบานนี้จะทำหน้าที่ในการสะท้อนกลับ ทำให้เกิดด้านของวัตถุสองด้านจึงเป็นเสมือนกับการวาดภาพฉายของวัตถุนั้นเอง

คำสำคัญ: ดิจิทัลโฮโลกราฟี, สารเชื่อมประสาน, ของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์

Research Title : Solder paste volume inspection using orthographic drawing technique

Researcher : Asst. Prof. Dr. Prathan Buranasiri

Department of Applied Physics, Faculty of Science,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## ABSTRACT

In this paper we propose a modern technique to evaluate the shape changes of solder paste by using double-view in-line digital holography. We observed the transformation of three different kinds of solder paste composition: pure solder paste, solder paste mixed with 0.02%, 0.05%, 0.10% graphene (GPN) and 0.02%, 0.05%, 0.10% graphene oxide (GPNO), respectively. The shape of the solder pastes was investigated at different melt temperatures (i.e. 200°C, 250°C, and 300°C) for 30 seconds using a collimated beam propagating through the solder paste, then being double reflected on a mirror and second incident on another sides of the solder paste. The double images bearing beams were recorded with a CCD sensor simultaneously. The single recorded digital hologram from double view technique was reconstructed using digital holography. The results show that the double-view technique provides reliably data. Moreover, it would be developed for observing more than two images by single holography writing in the future.

**Keywords:** Digital Holography, Solder paste, Reconstruction, Graphene, Graphene Oxide

## กิตติกรรมประกาศ

รายนางนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัยของการวัดปริมาตรของลายพิมพ์โซลเดอร์ริงเจลด้วยเทคนิคการวาดภาพฉาย ผู้ดำเนินโครงการวิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เล็งเห็นความสำคัญของงานวิจัยและให้เงินทุนวิจัยจากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558

ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 สารเชื่อมประสาน (Solder Paste)	4
2.1.1 SAC 305	4
2.2 ความสามารถในการเปียก (wetting)	6
2.3 การแทรกสอด (interference)	7
2.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction of Wave)	9
2.5 โฮโลแกรม (Hologram)	10
2.5.1 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟีและโฮโลแกรม	10
2.5.2 หลักการอ่านภาพ (Reconstruction) ของโฮโลแกรม	11
2.5.3 ดิจิตอลโฮโลแกรม	11
2.5.4 หลักการอ่านภาพ (Reconstruction ) ของโฮโลแกรม โดยวิธี Angular spectrum	11
2.6 คาร์บอนอัลโลโทรปป์ (Carbon Allotropes)	13
2.6.1 แกรฟีน (Graphene)	14
2.6.2 แกรฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)	15
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.8 เทคโนโลยีการเชื่อมบนพื้นผิว (surface mount technology : SMT)	16
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>17</b>
3.1 วิธีการทดลอง (เตรียมสารเชื่อมประสาน)	18
3.2 วิธีการทดลอง (จัดเครื่องมือดิจิตอลโฮโลกราฟี)	20
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>22</b>
4.1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผสม	22

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.02%	25
4.3 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.05%	28
4.4 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.1%	31
4.5 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.02%	34
4.6 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.05%	37
4.7 ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.1%	40
4.8. การวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสาน	44
4.9 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02%	45
4.10 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05%	46
4.11 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1%	47
4.12 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02%	48
4.13 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05%	49
4.14 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1%	50
4.15 ตารางค่ามุมสัมผัสรวมที่วัดได้	51
4.16 รูปของตัวอย่างที่ได้ทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>54</b>
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	57

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 1	22
4.2 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 2	23
4.3 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 3	24
4.4 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 1	25
4.5 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 2	26
4.6 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 3	27
4.7 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 1	28
4.8 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 2	29
4.9 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 3	30
4.10 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 1	31
4.11 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 2	32
4.12 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 3	33
4.13 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 1	34
4.14 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 2	35
4.15 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 3	36
4.16 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 1	37
4.17 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 2	38
4.18 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 3	39
4.19 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 1	40
4.20 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 2	41
4.21 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 3	42
4.22 ตารางแสดงความสูงของสารเชื่อมประสานที่วัดจากเวอร์เนียและจากภาพที่ผ่านการ Reconstruction	43
4.23 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสม	44
4.24 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02%	45
4.25 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05%	46
4.26 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1%	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.27	แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่การผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02%	48
4.28	แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่การผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05%	49
4.29	แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่การผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1%	50
4.30	แสดงค่ามัมสัมพันธ์ของแต่ละตัวอย่าง	51
4.31	ตารางแสดงค่าความต้านทานของสารเชื่อมประสาน	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงวิธีการทาโซลเดอริงลงบนแผ่น PCB	1
1.2	แสดงการฉายภาพของโซลเดอริงเพื่อหาปริมาตร	2
1.3	แสดงการจัดระบบแสง	3
2.1	รูปแสดงบรรจุภัณฑ์ของสารเชื่อมผสม	4
2.2	รูปแสดงโลหะดีบุก	5
2.3	รูปแสดงโลหะเงิน	5
2.4	รูปแสดงโลหะทองแดง	5
2.5	รูปแสดงฟลักซ์ของสารเชื่อมผสม	6
2.6	รูปแสดงมุมสัมผัส (contact angle, $\theta$ )	6
2.7	แสดงการเปียก (Wetting) และมุมสัมผัสการเปียก (Contact angle)	7
2.8	รูปแสดงการแทรกสอดของคลื่นแบบเสริม	8
2.9	รูปแสดงการแทรกสอดของคลื่นแบบหักล้าง	8
2.10	รูปแสดงการแทรกสอดของคลื่นแสง	9
2.11	รูปการเลี้ยวเบนของคลื่น	9
2.12	รูปแสดงการสร้างภาพโฮโลแกรม	11
2.13	รูปแสดงการอ่านของภาพโฮโลแกรม	11
2.14	รูปแสดงโคลงสร้างของคาร์บอน	14
2.15	แสดงโครงสร้างของแกรฟีน	14
2.16	แสดงแบบจำลองของแกรไฟต์ออกไซด์ที่มีกลุ่มออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิว	15
2.17	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.18	รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมพื้นผิว	16
3.1	รูปแสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสม	17
3.2	รูปแสดงการเก็บสารตัวอย่าง	18
3.3	รูปแสดงการล้างแผ่นทองแดง	18
3.4	รูปแสดงบล็อกและสารที่ลงบล็อกเสร็จ	19
3.5	แทนความร้อนที่มีอุณหภูมิ 250 องศาเซียส	19
3.6	การจับเวลาที่ทำการหลอมสารเชื่อมผสม	19
3.7	รูปแสดงลำแสงขนานของเลเซอร์	20
3.8	รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และทางเดินแสง	20
3.9	รูปแสดงภาพหลังจากการถ่ายภาพ	20
3.10	รูปแสดงภาพหลังการReconstruction	21
4.1	แสดงภาพถ่ายของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์	52

## บทที่ 1

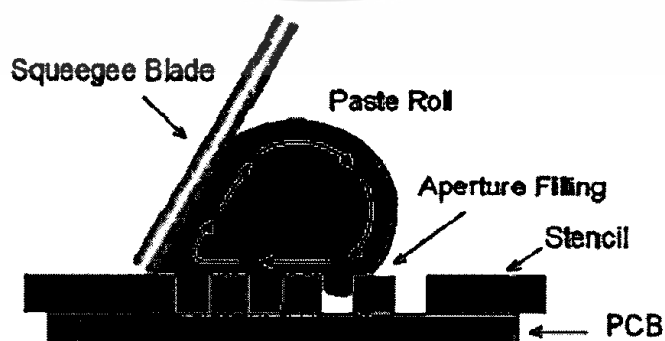
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในการดำรงชีวิตของมนุษย์นั้นจำเป็นต้องพึ่งปัจจัยสี่ ได้แก่ อาหาร ที่อยู่อาศัย เครื่องนุ่งห่ม และยารักษาโรค อย่างไรก็ตามในยุคสมัยแห่งเทคโนโลยีนี้เทคโนโลยีคือสิ่งสำคัญในการผลิตสร้างและพัฒนาปัจจัยสี่ทั้งสิ้น เนื่องจากประชากรได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างมากความต้องการในปัจจัยสี่จึงมีมากขึ้นตามไปด้วยดังนั้นเพื่อที่จะผลิตปัจจัยสี่ให้ได้มากพอกับความต้องการที่มหาศาลในปัจจุบันนั้นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมถือเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ซึ่งสิ่งที่เปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานอุตสาหกรรมคือเทคโนโลยีทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) หรือรวมไปถึง วงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ล้วนเป็นชิ้นส่วนสำคัญในเครื่องมือที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในสมัยก่อนชิ้นส่วนอุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นชิ้นส่วนที่มีขาซึ่งเชื่อมต่อกับแผ่นวงจรที่เจาะรูไว้โดยซึ่งเรียกว่า แบบทรูโฮล (Through hole) เนื่องด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและความต้องการในการลดต้นทุนการผลิต จึงได้มีการคิดค้นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ขึ้น เรียกว่าเซอร์เฟซเมาท์ (Surface mount) ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกตัดขาที่ไว้ใช้เสียบลงบนแผ่นวงจรออกอย่างใดก็ตามการจะนำชิ้นส่วนอุปกรณ์เหล่านี้มาใช้งานร่วมกันบนแผ่นวงจรได้นั้นจำเป็นต้องมีตัวเชื่อมระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้กับแผ่นวงจรเพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอุปกรณ์ได้ซึ่งตัวเชื่อมนี้เรียกว่าโซลเดอริง (Soldering)

จากที่กล่าวมาโซลเดอริงถูกนำมาใช้กับเครื่องมือที่ต้องใช้ไฟฟ้าในการทำงานทั้งสิ้นดังนั้นการทราบปริมาณของโซลเดอริงที่ใช้ไปในแต่ละครั้งนั้นมีความสำคัญอย่างมากโดยปกติแล้ววิธีที่ใช้หาปริมาณของโซลเดอริงที่ป้ายลงบนแผ่นวงจรมักจะใช้การตรวจดูผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) แล้วจึงนำมาคำนวณหาปริมาณที่ใช้ อย่างไรก็ตามกล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอมนั้นมีราคาที่สูงมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบวิธีการวัดปริมาณของโซลเดอริงที่ใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้หลักการเขียนแบบด้วยภาพฉายด้วยการบันทึกภาพฉายด้วยกล้องดิจิทัลนี้จะทำให้สามารถวัดขนาดและคำนวณหาปริมาณของโซลเดอริงได้

#### กระบวนการโซลเดอริง



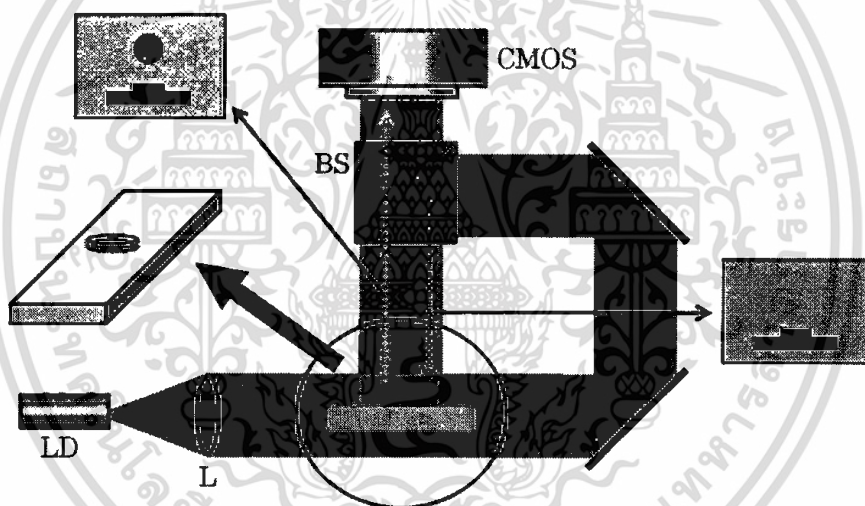
รูปที่ 1.1 แสดงวิธีการทำโซลเดอริงลงบนแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการโฮลเดอร์ริงคือการปายสารที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กับแผ่น PCB และใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส ทำให้สารดังกล่าวละลาย เมื่อทิ้งไว้จนเย็นสารนี้จะแข็งตัวและชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่น PCB จะถูกยึดติดกัน อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้พื้นที่ของโฮลเดอร์ริงที่ปายลงบนแผ่น PCB มีขนาดที่พอดีกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ จะต้องมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Stencil วางอยู่บนแผ่น PCB เพื่อกำหนดขนาดและความหนาของโวลเดอร์ริง ดังรูปที่ 1.1

### การวัดปริมาตรของโฮลเดอร์ริง

โดยทั่วไปแล้วการวัดปริมาตรจะทำการนำไปตรวจสอบคุณภาพผิวและความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอมตามที่ได้กล่าวในข้างต้น อย่างไรก็ตามด้วยต้นทุนของเครื่องมือดังกล่าวมีราคาที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้ใช้การวัดปริมาตรด้วยเทคนิคการวาดภาพฉาย ซึ่งมีแนวความคิดดังรูปที่ 1.2 แสงจากแหล่งกำเนิดชนิดเลเซอร์ไดโอดถูกขยายและส่องผ่านโฮลเดอร์ริงที่ปายอยู่บนแผ่นจากการฉายแสงลักษณะนี้จะทำให้ได้ภาพฉายด้านข้างของโฮลเดอร์ริง จากนั้นแสงนี้จะถูกจัดให้มาตกกระทบบและสะท้อนที่ด้านบนของโฮลเดอร์ริงจะได้ภาพฉายจากด้านบนจากนั้นภาพฉายจะถูกบันทึกลงบนกล้องดิจิทัลเพื่อนำไปคำนวณหาความสูง พื้นที่ และปริมาตร



รูปที่ 1.2 แสดงการฉายภาพของโฮลเดอร์ริงเพื่อหาปริมาตร

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อวัดปริมาตรของโฮลเดอร์ริงโดยใช้เทคนิคการวาดภาพฉาย
2. เพื่อเปรียบเทียบการวัดปริมาตรโฮลเดอร์ริงด้วยเทคนิคการวาดภาพฉายกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอม

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

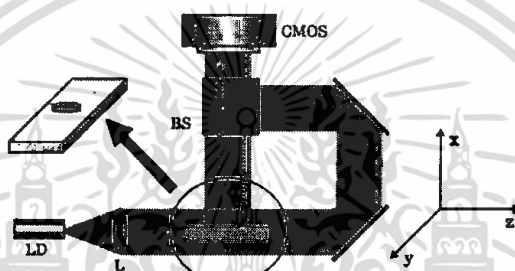
ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดปริมาตรของโฮลเดอร์ริงที่ปายลงบนแผ่นแก้วด้วยเทคนิคการวาดภาพฉายโดยการฉายลำแสงขนานไปยังด้านข้างของโฮลเดอร์ริงที่ปายอยู่บนแผ่นแก้วจากนั้นจึงจัดให้แสงที่ผ่านออกมาไปตกกระทบบด้านบนของโฮลเดอร์ริงที่วางบนแผ่นแก้วดังรูปที่ 2 แสงที่สะท้อนกลับออกมาจากแก้วซึ่งประกอบไปด้วยภาพจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านข้างและด้านบนของแผ่นแก้วจะถูกบันทึกลงบนกล้องถ่ายรูปจากนั้นจึงนำความสูงและพื้นที่ที่วัดโดยใช้พิเซลในกล้องดิจิตอลมาคำนวณหาปริมาตรของโซลเดอร์ริงสุดท้ายจึงนำมาเทียบกับค่าที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอม

#### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนและวิธีการทำโซลเดอร์ริง เช่นการป้ายโซลเดอร์ริงลงบนแผ่น
2. จัดหาอุปกรณ์การทำวิจัย
3. ออกแบบการจัดอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 1.3 แสดงการจัดระบบแสง

ใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้เลนส์ช่วยในการขยายลำแสง จากนั้นส่องผ่านโวลเดอร์ริงที่ทาบบนแผ่น ภาพที่ได้จากการฉายนี้จะถูกสะท้อนด้วยกระจกและบีมสปลิตเตอร์ดังรูป จากนั้นภาพของภาพฉายจากทางด้านข้าง และภาพที่สะท้อนจากด้านบนของโซลเดอร์ริงจะถูกบันทึกลงบนกล้องดิจิตอล เนื่องจากกล้องดิจิตอลมีขนาดของพิเซลภายในกล้องที่ทราบค่าแน่ชัด (ข้อมูลรายละเอียด สามารถหาได้จาก Datasheet ของกล้องแต่ละรุ่น) จึงทำให้สามารถคำนวณหาความสูงและพื้นที่ของโซลเดอร์ริงที่ป้ายอยู่บนแผ่นได้ สุดท้ายจึงนำมาคำนวณหาปริมาตรของโซลเดอร์ริงที่ป้าย

4. นำปริมาตรที่ได้จากวิธีนี้ไปเทียบกับการวัดด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงดันอะตอม
5. สรุปผลการทดลอง
6. จัดทำรูปเล่มรายงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ได้สารเชื่อมผสมชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารเชื่อมผสมในปัจจุบันและวิธีการตรวจสอบลักษณะด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟีที่แสดงให้เห็นถึงความละเอียดในการวัดของลักษณะสารเชื่อมผสม เพื่อเป็นการลดต้นทุนและระยะเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นแนวทางในการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากมนุษย์ โดยภายในของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแผงวงจร(Printed Circuit Board : PCB) ต่างๆ ซึ่งแผงวงจรเหล่านี้ก็จะมีชิ้นส่วนเล็กๆจำนวนมากติดอยู่ ไม่ว่าจะเป็น ตัวIC (Integrated Circuit) ตัวต้านทาน (Resistance) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นต้น โดยชิ้นส่วนเหล่านั้น ต้องทำการบัดกรีเพื่อทำให้ยึดติดกับแผงวงจรเพื่อให้ได้ความคงทนของตัวอุปกรณ์และอายุการใช้งานที่ยั่งยืน

### 2.1 สารเชื่อมผสมาน (Solder Paste)

เป็นสารเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ติดกับแผงวงจร (PCB) สารบัดกรีทั่วไปจะเป็นโลหะที่หลอมเหลว ง่ายผสมกับโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีแต่ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีเชื่อมพื้นผิว (Surface Mount Technology : SMT) ในการบัดกรีแบบกึ่งของเหลวผสมของแข็ง(Solder Paste) ทำให้เชื่อมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กได้ดี ทั้งนี้สารบัดกรีที่ใช้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติด โดยมีเงื่อนไขว่าสารนี้จะต้องมีสภาพต้านทานต่ำเพื่อให้กระแสไหลได้ดีและอายุการใช้งานให้นานยิ่งขึ้นและในสารเชื่อมผสมานที่ใช้คือSAC 305

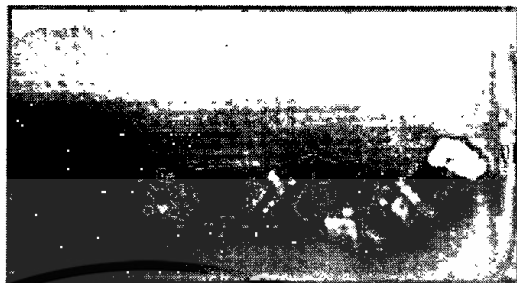


รูปที่ 2.1 แสดงบรรจุภัณฑ์ของสารเชื่อมผสมาน

2.1.1 SAC 305 คือสารเชื่อมผสมานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลายโดยมีส่วนประกอบตั้งต่อไปนี้คือ ดีบุก (Sn) 96.5% เงิน (Ag) 3% และ ทองแดง (Cu) 0.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 ดีบุก (Tin) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 50 มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและนำความร้อนได้แต่ไม่ดีมากและยังออกซิไดซ์ได้ดีอากาศ มีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 230 องศาเซลเซียสแล้วยังมีราคาถูก



รูปที่ 2.2 แสดงโลหะดีบุก

2.1.1.2 เงิน (silver) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 47 เป็นธาตุทรานซิชันมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก มีจุดหลอมเหลวสูงแล้วมีราคาสูงมาก



รูปที่ 2.3 แสดงโลหะเงิน

2.1.1.3 ทองแดง (Copper) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 29 เป็นธาตุทรานซิชันมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีจุดหลอมเหลวสูงแล้วมีราคาสูง



รูปที่ 2.4 แสดงโลหะทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

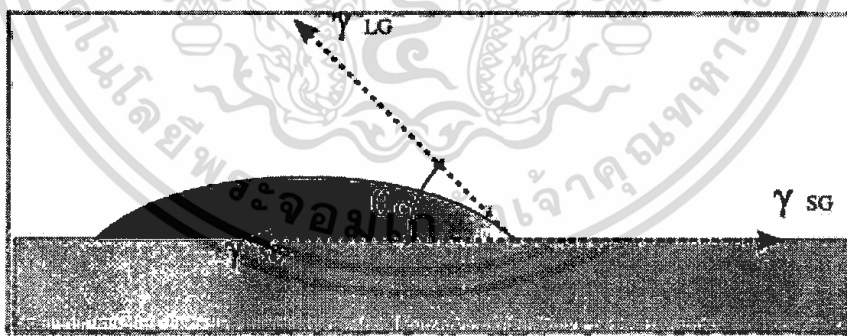
2.1.1.4 ฟลักซ์ (Flux) ตัวช่วยประสานที่ใช้ในการแล่นประสานโดยทำมาจากกรดทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์เพื่อช่วยในการป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ที่เกิดจากตีบุกเพื่อให้สารเชื่อมประสานมาอายุในการใช้งานได้ยั่งยืนขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงฟลักซ์ของสารเชื่อมประสาน

### 2.2 ความสามารถในการเปียก (wetting)

ความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลโดยระดับชั้นของสภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่างแอดฮีชันและโคฮีชัน สภาวะการเปียกมีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุสองชิ้น แร้งยกตัว (Capillary Effect) ก็เป็นผลมาจากสภาวะการเปียกและแรงพื้นผิวที่กำหนดสภาวะการเปียก รูปร่างของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งจะมีรูปร่างเป็นรูปทรงหยดน้ำค้าง



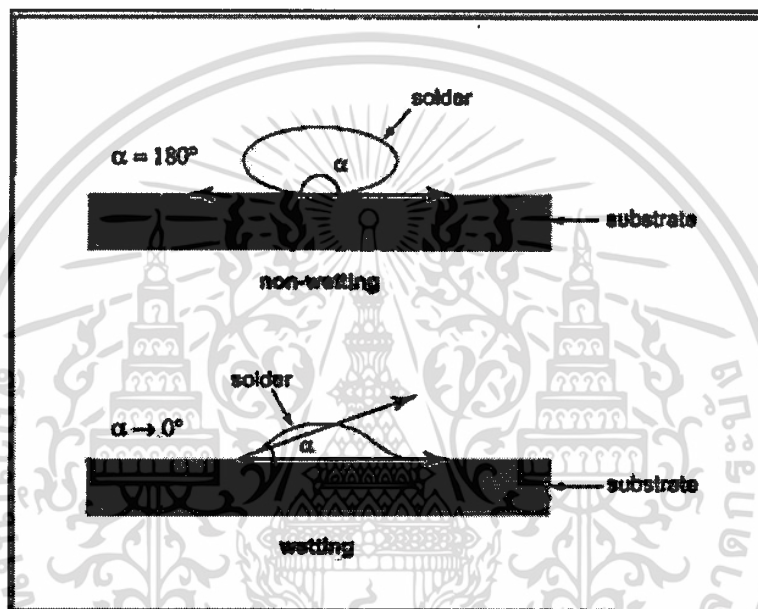
รูปที่ 2.6 แสดงมุมสัมผัส (contact angle,  $\theta$ ) มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจากสมดุลระหว่างแรงแอดฮีชันกับแรงโคฮีชัน

สำหรับแรงดึงผิวก็จะมีผลสัมพัทธ์กับการเปียก โดยหากแรงดึงผิวระหว่างน้ำประสานและผิวชิ้นงานมีมาก นั่นก็หมายความว่าน้ำประสานมีความสามารถในการเปียกต่ำบนผิวชิ้นงานนั้น จากรูปด้านล่าง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิว (Surface Tension:  $\gamma$ ) กับมุมสัมผัส (Contact angle;  $\theta$ )

มุมสัมผัสจะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว ซึ่งมุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไป หมายถึง สภาวะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไป หมายถึง สภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดีและของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

ในกรณีเดียวกันกับการเปียกของน้ำประสานกับชิ้นงาน หากมุมสัมผัสระหว่างน้ำประสานกับผิวชิ้นงานมีขนาด  $180^\circ$  นั่นคือ น้ำประสานและชิ้นงานไม่เกิดการเปียกเลย ซึ่งก็มีผลให้น้ำประสานไม่เกาะกับชิ้นงานและหากมุมสัมผัสที่ว่ามีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จะทำให้น้ำประสานจะสามารถเกาะกับชิ้นงานได้มากขึ้น หากมุมสัมผัสของน้ำประสานกับผิวชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ  $0^\circ$  ก็จะหมายความว่าน้ำประสานสามารถเปียกบนผิวชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าจะให้งานเชื่อมประสานมีคุณภาพดี



รูปที่ 2.7 แสดงการเปียก (Wetting) และมุมสัมผัสการเปียก (Contact angle)

### 2.3 การแทรกสอด (interference)

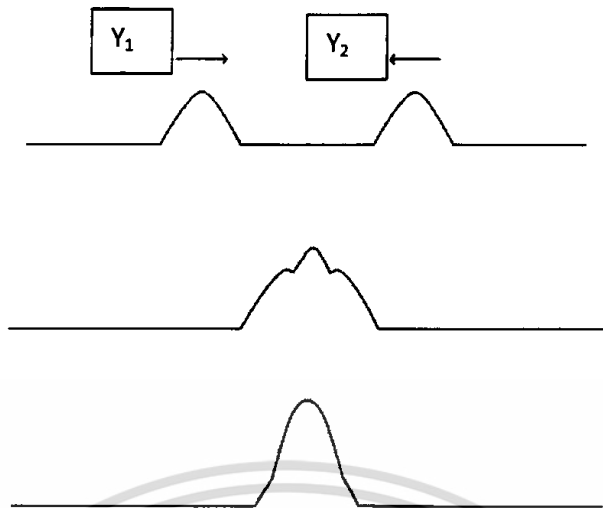
คือคลื่นสองคลื่นหรือมากกว่าสองที่อยู่ในตัวกลางเดียวกันเมื่อมารวมกันแบบหักล้างหรือแบบเสริมกันที่ตำแหน่งใดๆก็จะเป็นไปตามหลักการทับซ้อน (Principle of superposition) ซึ่งกล่าวว่า "ถ้าคลื่นสองคลื่นใดๆหรือมากกว่าเคลื่อนที่มาพร้อมกันในตัวกลางเดียวกัน ผลรวมของคลื่นทั้งสอง ณ จุดใดๆ จะมีค่าเท่ากับผลบวกของแอมพลิจูดของฟังก์ชันคลื่นทั้งสอง ณ จุดนั้น" โดยสมการการแทรกสอดคือ

$$Y_1 + Y_2 + \dots \quad (2.1)$$

เมื่อ  $Y_1$  และ  $Y_2$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่น  $Y_2$  มีทิศทางเหมือนดังรูปที่ 2.8 ก็จะเป็นบวกแต่ถ้าตรงข้ามจะเป็นทิศลบ

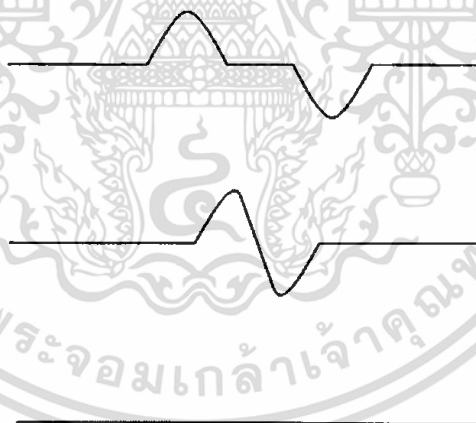
$$Y_1 - Y_2 - \dots \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



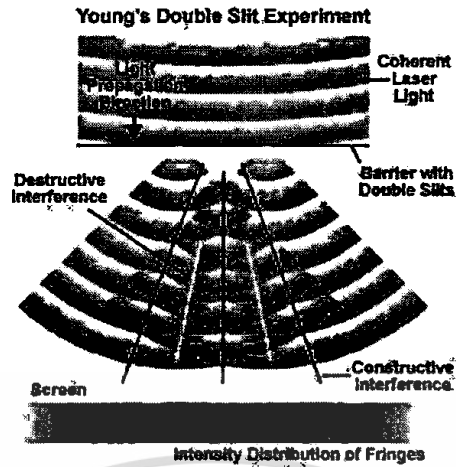
รูปที่ 2.8 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแบบเสริม

เมื่อพิจารณาผลต่างเฟส ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน (anti phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) และถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน (in phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference)



รูปที่ 2.9 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแบบหักล้าง

ถ้าแหล่งกำเนิดเป็นคลื่นแสงโดยแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งหรือมากกว่า กำเนิดคลื่นแสงที่มีเฟสสัมพันธ์กัน คงที่ตลอดเวลาซึ่งเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ โดยความสว่างของแสงรวมจะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ เกิดกับแถบที่มีความสว่างน้อยและความสว่างมากหรือแถบมืดและแถบสว่าง ที่เรียกว่า ริ้วการแทรกสอด (Interference fringes)

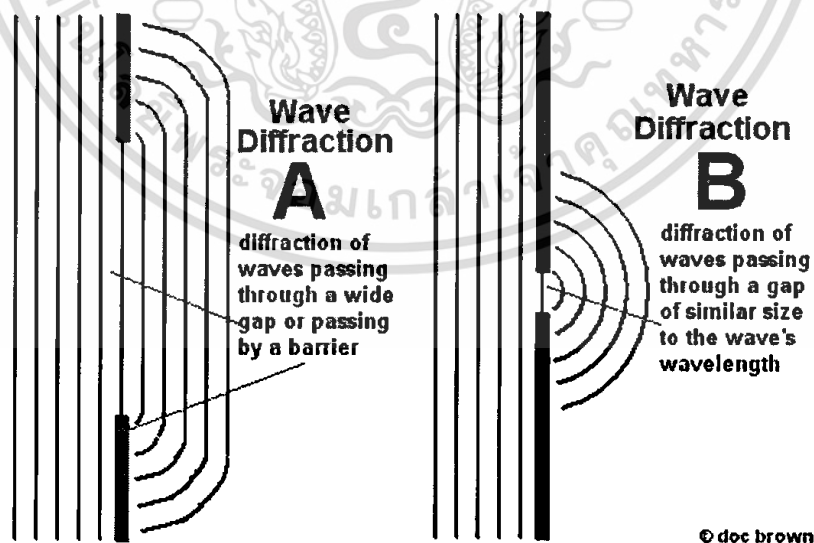


รูปที่ 2.10 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแสง

การแทรกสอดของคลื่นจะเกิดขึ้นได้นั้น คลื่นที่รวมกันจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากัน และการแทรกสอดจะดำรงอยู่ได้อย่างเท่ากันนั้น คลื่นที่รวมกันจะต้องมีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่ คลื่นที่มีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่นี้ เรียกว่า โคฮีเรนซ์ (coherence) ถ้าคลื่นจากสองแหล่งไม่มีเฟสที่สัมพันธ์กัน เรียกว่า อินโคฮีเรนซ์ (incoherence)

#### 2.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction of Wave)

การที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านขอบหรือช่องเล็กๆ จะเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านขอบหรือช่องนั้นได้โดยใช้หลักของฮอยเกนส์ ซึ่งกล่าวไว้ว่า "ทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ที่ให้คลื่นความยาวคลื่นเดิมและเฟสเดียวกัน" หากคลื่นผ่านช่องที่มีขนาดมากกว่าความยาวคลื่นจะทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 โฮโลแกรม (Hologram)

โฮโลกราฟี (Holography) คือ กระบวนการสร้างภาพโฮโลแกรม ซึ่งเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์มหรือแผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้ แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์ โฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ต่อมา เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก การเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่งและทิศทางของการระบบการมองเห็นช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก “โฮโลแกรม ก็คือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ” ภาพที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการแสงเลเซอร์ โดยบันทึกการรบกวนของการแทรกสอด (Interference Pattern) ของแสงเลเซอร์ ทำให้เราสามารถมองเห็นภาพที่แตกต่างจากภาพทั่วไป ซึ่งไม่มีความลึกทางมิติของภาพ โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพแบนๆ เรียบๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าภาพที่มาจากจากการบันทึกโดยเทคนิคโฮโลแกรมนั้นจะดูสวยงามมากขึ้นและยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกด้วย

โฮโลแกรมนี้นักค้นพบโดยเดนนิส กาบอร์ (Dennis Gabor, 1900-1979) วิศวกรไฟฟ้าชาวฮังการี ในวันที่ 11 ตุลาคม ปี ค.ศ. 1947 โดยกาบอร์ได้ค้นพบหลักการของโฮโลกราฟีโดยบังเอิญ ในระหว่างที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่บริษัท British Thomson-Houston ที่เมือง Rugby ประเทศอังกฤษ จากการค้นพบนี้กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1971 เทคนิคที่คิดค้นเดิมยังใช้อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่เป็นที่รู้จักกันในชื่อภาพสามมิติอิเล็กตรอน แต่ภาพสามมิติเป็นเทคนิคแสงซึ่งไม่ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจัง จนกระทั่งมีการพัฒนาของเลเซอร์ในปี 1960

โฮโลแกรมแสงที่ใช้ได้จริงชิ้นแรกนั้นบันทึกอยู่ในรูปของวัตถุ 3D ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี 1962 โดย Yuri Denisyuk ในสหภาพโซเวียตและโดย Emmett Leith และ Juris Upatnieks ที่ University of Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกาความก้าวหน้าในเทคนิคการประมวลผลโฟโตเคมีคัลเป็นการผลิต เพื่อแสดงภาพโฮโลแกรมที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำได้สำเร็จโดย Nicholas J. Phillips

โฮโลแกรมแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ White-light hologram ซึ่งภาพโฮโลแกรมที่บันทึกนั้น สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องสว่างด้วยแสงสว่างจากธรรมชาติและอีกประเภทหนึ่งคือ ภาพโฮโลแกรมที่ต้องถูกส่องสว่างด้วยแสงเลเซอร์หรือแสงที่มีสภาพหน้าคลื่นสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิติได้นอกจากนี้ยังอาจแบ่งโฮโลแกรมออกได้เป็น Transmission hologram, Reflection hologram, Image-plane hologram เป็นต้น

ที่โฮโลแกรมหลายชนิดนั้นสามารถทำได้ การส่งผ่านของโฮโลแกรมเช่นการผลิตโดย Leith และ Upatnieks ซึ่งถูกทำให้มองเห็นได้โดยส่องแสงเลเซอร์ผ่านวัตถุและมองภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากโฮโลแกรมด้านตรงข้ามของแหล่งที่มา การปรับแต่งภายหลังการหรือการส่งผ่านแถบสี โฮโลแกรมช่วยให้แสงสว่างโดยแสงสีขาวมากกว่าโดยเลเซอร์ แถบสีโฮโลแกรมเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบันบนบัตรเครดิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านความปลอดภัย และในการบรรจุสินค้ารุ่นนี้ของการส่งผ่านแถบสีโฮโลแกรมเกิดขึ้นโดยทั่วไป เป็นรูปแบบผิวในฟิล์มพลาสติกและวัตถุรวมเคลือบอะลูมิเนียมสะท้อนแสงที่ให้แสงสว่างจาก "ด้านหลัง" เพื่อสร้างภาพของวัตถุ

### 2.5.1 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟีและโฮโลแกรม

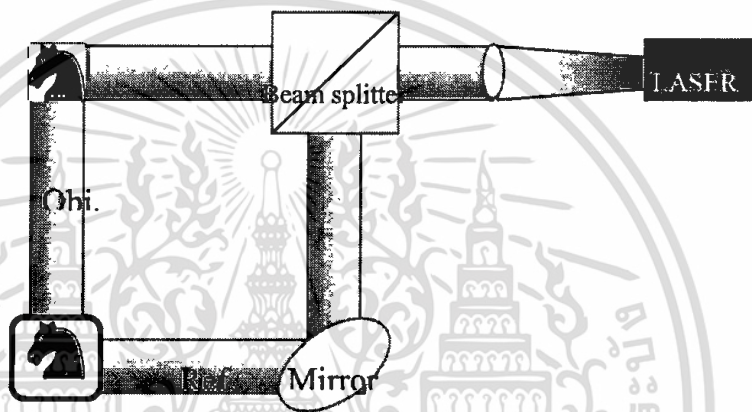
ภาพโฮโลแกรมจะใช้หลักการสร้างภาพให้มีการแทรกสอดของแสงที่มากกระทบรูปภาพโดยการฉายแสงเลเซอร์จากแหล่งเดียวกัน แยกเป็น 2 ลำแสง ลำแสงหนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงเล็งตรงไปที่แผ่นฟิล์ม อีกลำแสงหนึ่งเล็งไปที่วัตถุและสะท้อนไปยังฟิล์ม แสงจากทั้งสองแหล่งจะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มในรูปแบบของการแทรกสอด (Interference Pattern) ซึ่งมองไม่คล้ายกับรูปของวัตถุต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อให้เกิดภาพเสมือน (Virtual image) ขึ้นมาตามมุมของแสงที่มาตกกระทบ ทำให้ตาของเรารับแสงอีกด้านหนึ่งของแผ่น Hologram เกิดเห็นภาพ 3 มิติขึ้น

การสร้างโฮโลแกรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

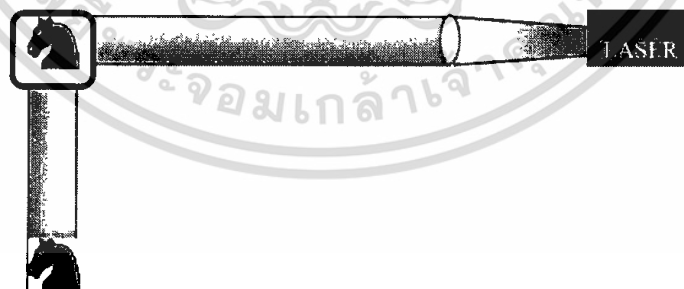
- 1) การบันทึกภาพ (recording of image) เป็นการบันทึกแถบการสอดแทรกเชิงซ้อน (Complex interference patterns) ซึ่งเกิดจากที่แต่ละแสงเลเซอร์ 2 ลำแสงซ้อนทับกันอยู่ (Superposition) แถบการสอดแทรกเชิงซ้อนนี้จะ ถูกบันทึกไว้บนฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film)
- 2) การสร้างภาพ (reconstruction of image) เป็นการสร้างภาพ 3 มิติ ขึ้นจากแผ่น



รูปที่ 2.12 แสดงการสร้างภาพโฮโลแกรม

#### 2.5.2 หลักการอ่านภาพ (Reconstruction) ของโฮโลแกรม

โดยการอ่านของภาพโฮโลแกรมโดยใช้หลักการเกี่ยวกับการสร้างภาพโฮโลแกรม โดยจะต้องใช้แสงที่มีความยาวค่าเดียวกับที่บันทึกและมุมที่ถูกบันทึกเพื่ออ่านภาพที่ถูกบันทึกมา



รูปที่ 2.13 แสดงการอ่านของภาพโฮโลแกรม

#### 2.5.3 ดิจิตอลโฮโลแกรม

โดยหลักการจะเหมือนกับโฮโลแกรมแต่จะต่างกันโดยที่เราจะบันทึกโดยใช้กล้องเป็นฉากรับภาพแทนแผ่นฟิล์มเราจึงเรียกว่าดิจิตอลโฮโลแกรม

#### 2.5.4 หลักการอ่านภาพ (Reconstruction) ของโฮโลแกรม โดยวิธี Angular spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือวิธีการที่ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายสนามทางแสงของระนาบการแพร่ของแสง รวมทั้งยังใช้ในการสร้างภาพขึ้นใหม่ในดิจิตอลโฮโลแกรม วิธีการนี้จะใช้ Fourier transform และ inverse Fourier transformation เพื่อสร้างดิจิตอลโฮโลแกรมเช่นเดียวกับวิธี Huygens convolution แต่จะมีข้อดีกว่าในระยะทางของการสร้างภาพใหม่ วิธีการ Angular Spectrum สามารถสร้างภาพขึ้นใหม่ได้อย่างถูกต้องในระยะทางที่วัดดูอยู่ใกล้ๆ เมื่อเทียบกับวิธีการของ Huygens convolution

สมมติว่าที่ระนาบ  $z = 0$  คือที่ระนาบวัตถุ  $(\xi, \eta)$  และระนาบของสนามวัตถุ  $O(\xi, \eta)$  และใช้ Fourier transform แบบ 2 มิติ จะได้ว่า

$$O'(f_\xi, f_\eta; 0) = F\{O(\xi, \eta, 0)\} \quad (2.3)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] d\xi d\eta \quad (2.4)$$

และสามารถเขียน inverse Fourier Transform ของ angular spectrum ได้ว่า

$$O'(f_\xi, f_\eta; 0) = F^{-1}\{O'(f_\xi, f_\eta, 0)\} \quad (2.5)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'(f_\xi, f_\eta, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] df_\xi df_\eta \quad (2.6)$$

โดยที่  $f_\xi$  และ  $f_\eta$  เป็นส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่ (spatial frequency) โดยพิจารณาเป็นระนาบที่คลื่นแพร่ไปด้วยทิศแบบโคไซน์ (cosines) ส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่นั้นคือ

$$\alpha = \lambda f_\xi \beta = \lambda f_\eta \gamma = \sqrt{1 - (\lambda f_\xi)^2 - (\lambda f_\eta)^2} \quad (2.7)$$

ได้เป็น

$$O'(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp[-j2\pi(\frac{\alpha}{\lambda} \xi + \frac{\beta}{\lambda} \eta)] d\xi d\eta \quad (2.8)$$

หลังจากที่แพร่ไประยะทาง  $z$  ส่วนประกอบในเลขชี้กำลังจะได้รับมาจากตัวประกอบของ

$$O'(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp[-j2\pi(\frac{\alpha}{\lambda} \xi + \frac{\beta}{\lambda} \eta)] \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z) d\xi d\eta \quad (2.9)$$

$\exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)$  ซึ่ง angular spectrum ของสนามวัตถุนั้นคือ

$$= F\{O(\xi, \eta, 0) \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)\} \quad (2.10)$$

และนำสมการที่ได้นั้นมาทำการ inverse ของ Fourier transform

$$O'(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0) \exp[-j2\pi(\frac{\alpha}{\lambda} \xi + \frac{\beta}{\lambda} \eta)] \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2.11)$$

$$= F^{-1}\{O'(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0) \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)\} \quad (2.12)$$

เนื่องจากการแพร่ของคลื่นจากระนาบของวัตถุไปยังระนาบโฮโลแกรมด้วยระยะ  $z$  ดังนั้นสนามทางแสงบนระนาบโฮโลแกรมจะได้ว่า

$$h(x, y, z) = O(x, y, z)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0) \exp[-j2\pi(\frac{\alpha}{\lambda} \xi + \frac{\beta}{\lambda} \eta)] \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2.13)$$

$$= F^{-1}\{O'(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0) \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)\} \quad (2.14)$$

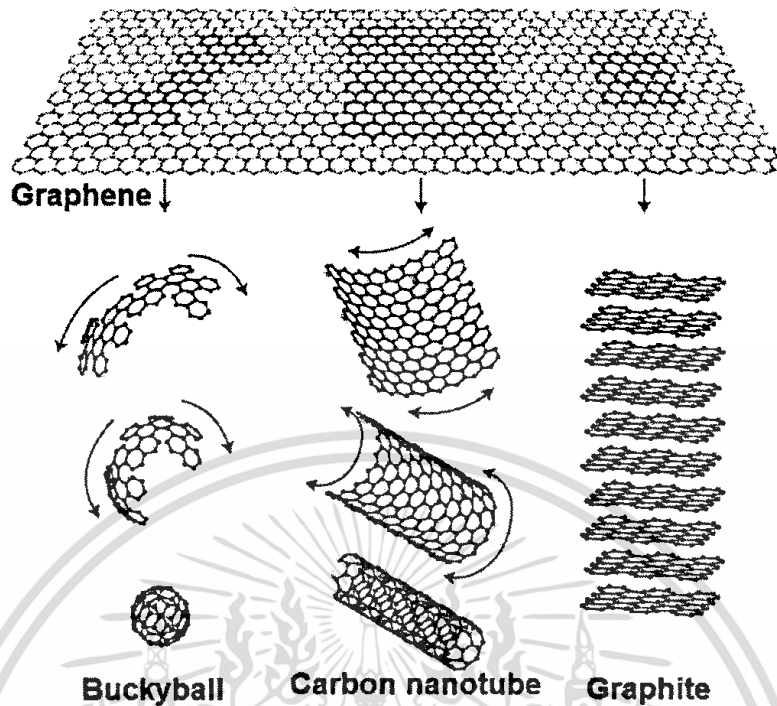
$$= F^{-1}\{F\{O'(x, y, 0)\} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)\} \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกันสนามของแสงบนระนาบของการสร้างภาพขึ้นใหม่  $R(\xi', \eta')$  สามารถเขียนได้ในรูป inverse Fourier transform จากสนามโฮโลแกรม

$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1}\{F\{h(x, y, 0)\} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z)\} \quad (2.16)$$

## 2.6 คาร์บอนอัลโลโทรปป์ (Carbon Allotropes)

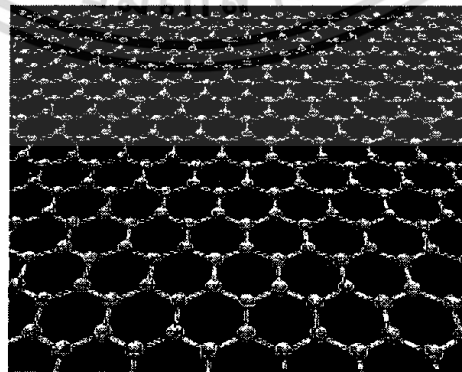
คือกลุ่มของคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันไป เช่น แกรไฟต์คือคาร์บอนที่เรียงเป็นชั้นๆ บัคมินสเตอร์ฟูลเลอรีนที่มีอะตอมของคาร์บอนเกาะกันเป็นวงกลม คาร์บอนนาโนทิวป์คือคาร์บอนที่เรียงต่อกันเป็นท่อมาความแข็งแรงมาก



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของคาร์บอน

### 2.6.1 แกรฟีน (Graphene)

หรือ กราฟีน เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอนเคียงข้างกับเพชร, กราไฟท์ (Graphite), ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) และ fullerenes โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรังผึ้งทั่วไป แกรฟีนสามารถอธิบายได้ว่าเป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟต์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (แกรฟีนขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) เกือบโปร่งใสและเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี การที่มันมีปฏิสัมพันธ์ที่ดื่กับวัสดุอื่นๆและกับแสง การที่โดยธรรมชาติเป็นแบบสองมิติของมัน ทำให้มันมีคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่เหมือนใคร



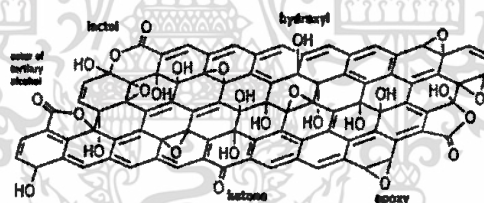
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของแกรฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรฟีนแตกต่างจากวัสดุสามมิติทั่วไป แกรฟีนที่แท้จริงเป็นสารกึ่งตัวนำแบบกึ่งโลหะหรือแบบช่องว่างเป็นศูนย์ การทำความเข้าใจโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแกรฟีนเป็นจุดเริ่มต้นในการหาแถบโครงสร้างของแกรไฟท์ ในปี 1947 พ็อล วอลเลซ ได้รับรู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับโมเมนตัม (ความสัมพันธ์แบบกระจาย) เป็นเส้นตรง สำหรับพลังงานต่ำใกล้มุมทั้งหกของ Brillouin โซนหกเหลี่ยมสองมิติ นำไปสู่มวลที่มีประสิทธิภาพเป็นศูนย์สำหรับอิเล็กตรอนและโฮล อิเล็กตรอนและโฮลใกล้จุดทั้งหกเหล่านี้ มีสองตัวที่ไม่เหมือนกัน ทำตัวเหมือนอนุภาคสัมพันธ์ ที่อธิบายได้โดยสมการ Dirac สำหรับอนุภาคสปิน 1/2 ดังนั้น อิเล็กตรอนและโฮลจึงถูกเรียกว่า Dirac fermions และหมุมของ Brillouin โซนจะถูกเรียกว่าจุด Dirac

## 2.6.2 แกรฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

คือ แกรฟีนอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีด้วยการใช้กรดแก่หรือตัวออกซิแดนท์มาทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับแกรไฟท์ คุณสมบัติของกลุ่มออกไซด์ (Oxide), ไฮดรอกซิล (Hydroxyl), คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และคาร์บอนิล (Carbonyl) จะเข้าไปแทรกและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของแกรไฟท์ ทำให้ในแต่ละชั้นของแกรไฟท์มีขนาดกว้างขึ้นและยังช่วยลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้นของแกรไฟท์อีกด้วย ถ้าหากแกรไฟท์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูงเพียงชนิดเดียวก็จะทำให้ได้แกรฟีนออกไซด์

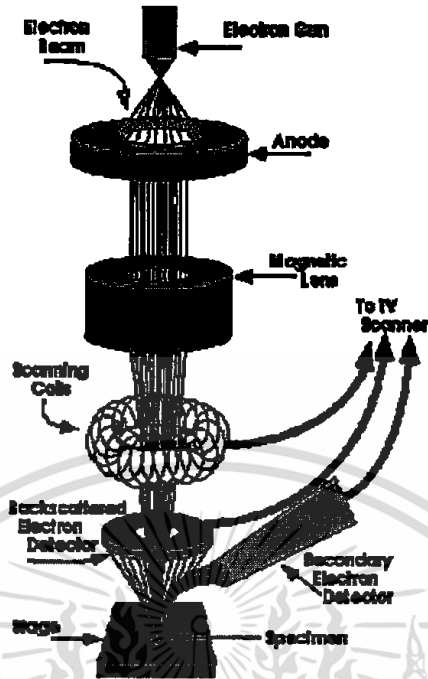


รูปที่ 2.16 แสดงแบบจำลองของแกรไฟท์ออกไซด์ที่มีกลุ่มออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิว

## 2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.5.1 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์ - วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.8 เทคโนโลยีการเชื่อมบนพื้นผิว (surface mount technology : SMT)

เทคโนโลยีเชื่อมพื้นผิว (SMT) เป็นวิธีหอยอดสารเชื่อมผสมลงบนแผงวงจร โดยจะใช้กับอุปกรณ์ที่ผลิตมาเพื่อใช้กับเทคโนโลยีเชื่อมพื้นผิว ในการใช้เทคโนโลยีนี้ทำให้มีขนาดวงจรที่เล็กลงทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กตามไปด้วย



รูปที่ 2.18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3  
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการทดลอง (เตรียมสารเชื่อมประสาน)

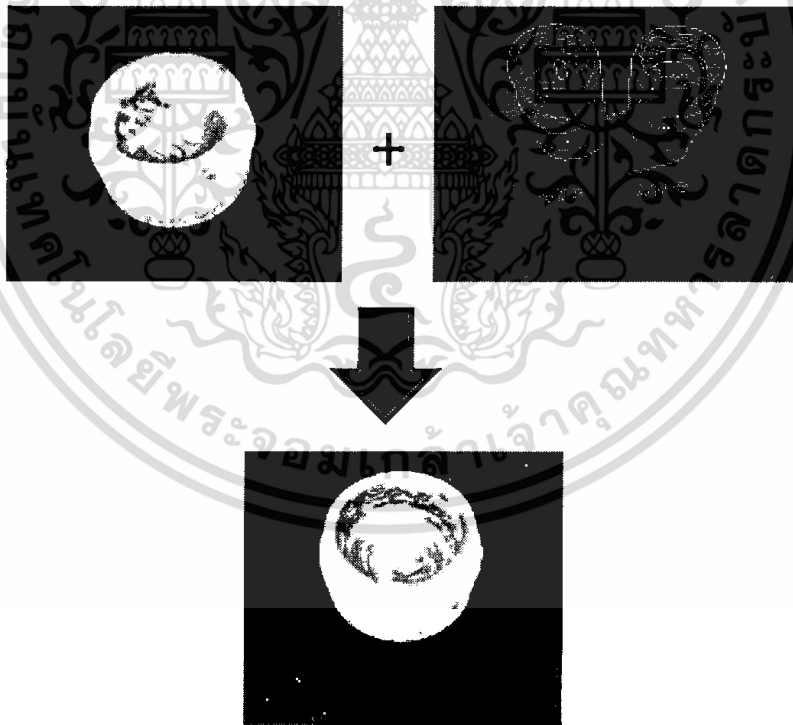
ขั้นตอนที่ 1 ผสมสารเชื่อมประสานกับ แกรฟีนและแกรฟีนออกไซด์โดยใช้การผสมต่อน้ำหนักตามสูตร

$$WT\% = \frac{\text{weight nano}}{\text{weight nano} + \text{weight solder}} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยใช้  $WT\% = 0.02\% \approx \frac{0.001}{5+0.001} \times 100\%$

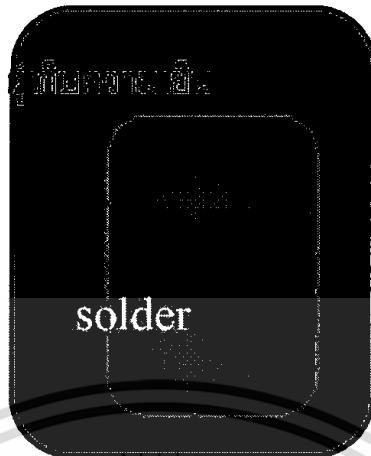
$WT\% = 0.05\% \approx \frac{0.0025}{5+0.025} \times 100\%$

$WT\% = 0.1\% \approx \frac{0.005}{5+0.005} \times 100\%$



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสาน

ขั้นตอนที่ 2 นำสารเชื่อมประสานที่เตรียมไว้นำไปเก็บไว้ในตู้เก็บความเย็นเพื่อเก็บความชื้นหรือทำให้สารตัวอย่างมีสภาพคงตัวตามอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังรูป 3.2  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการเก็บสารตัวอย่าง

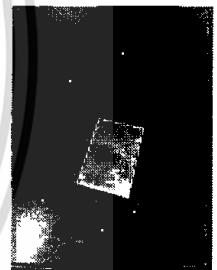
ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นทองแดงไปล้างในกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เพื่อขจัดไอออนต่างๆบนแผ่นทองแดงออก และเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ จากนั้นนำไปล้างต่อด้วยเอทานอลเพื่อล้างความเป็นกรดออก ตากแห้งในบรรยากาศห้อง ดังรูปที่ 3.3



(ก)



(ข)



(ค)

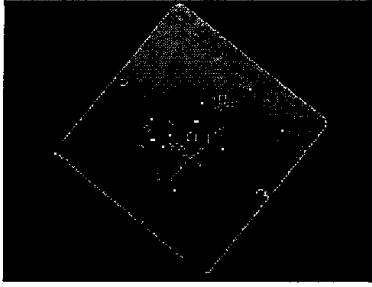
รูปที่ 3.3 แสดงการล้างแผ่นทองแดง

(ก) ล้างแผ่นทองแดงในกรดไฮโดรคลอริก

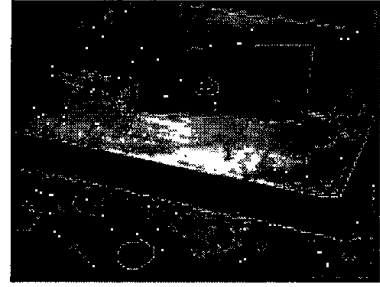
(ข) ล้างแผ่นทองแดงในเอทานอลเพื่อล้างกรดไฮโดรคลอริก

(ค) ตากให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 4 นำสารตัวอย่างออกจากตู้เก็บความเย็นปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้สารตัวอย่างอยู่ในสถานะพร้อมใช้งาน ใช้ช้อนตักสารตัวอย่างแถมลงในบล็อกพิมพ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.5 mm สูง 1.5 mm จากนั้นใช้บล็อกกดสารตัวอย่างที่เกินออก ดังรูปที่ 3.4



ก)



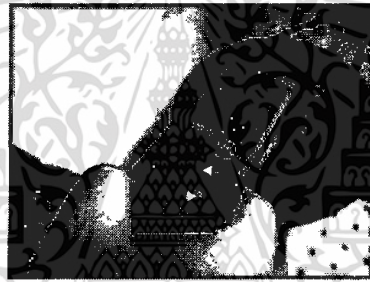
(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกและสารที่ลงบล็อกเสร็จ

(ก) บล็อกพิมพ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.5 mm สูง 1.5 mm

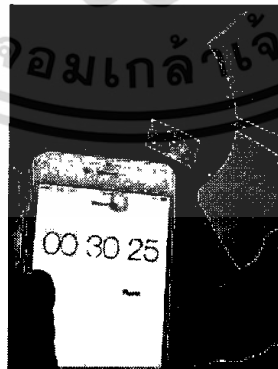
(ข) เมื่อทำการลงบล็อกสารเสร็จ

ขั้นตอนที่ 5 เปิดเครื่องแทนความร้อนให้พร้อมใช้งานที่อุณหภูมิ 250 – 260 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 แสดงแทนความร้อนที่มีอุณหภูมิ 250 องศาเซียส

ขั้นตอนที่ 6 นำแผ่นทองแดงที่มีสารตัวอย่างเต็มไว้ วางไว้บนแท่นฮอทเพลทเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นหยิบแผ่นทองแดงออกทิ้งไว้ให้เย็น



รูปที่ 3.6 แสดงการจับเวลาที่ทำการหลอมสารเชื่อมผสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

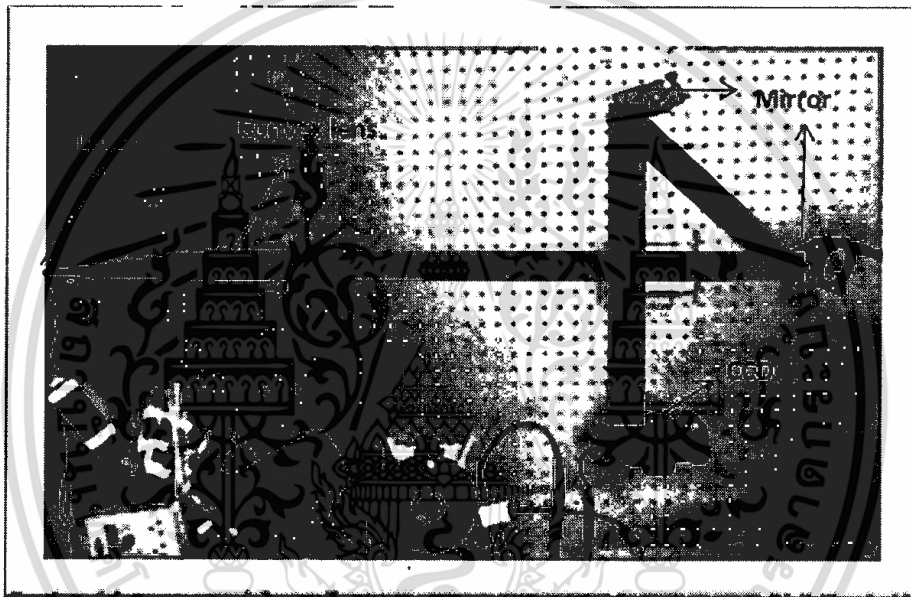
### 3.2 วิธีการทดลอง (จัดเครื่องมือดิจิทัลโฮโลกราฟี)

ขั้นตอนที่ 1 นำเลเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดยิงเข้าเลนส์นูนเพื่อทำให้เป็นลำแสงขนาน ดังรูป 3.7



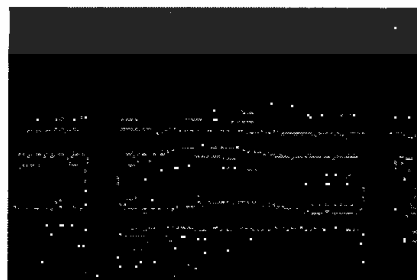
รูปที่ 3.7 แสดงลำแสงขนานของเลเซอร์

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกสะท้อนมาวางบนระนาบของแสงเพื่อให้เกิดการสะท้อนดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และทางเดินแสง

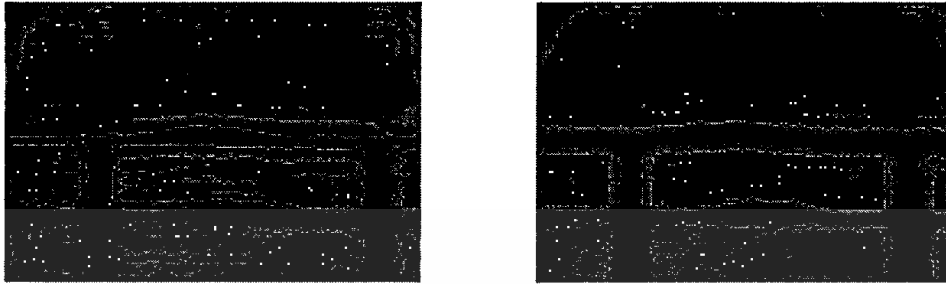
ขั้นตอนที่ 3 ทำการบันทึกภาพก่อนทดลองและหลังการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง ซึ่งเราจะได้ภาพทั้งหมด 2 มุมด้วยกัน



รูปที่ 3.9 แสดงภาพหลังจากการถ่ายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 นำภาพที่ได้ไปทำการ Reconstruction ในโปรแกรม Math Lab เพื่อปรับความละเอียดภาพที่ชัดที่สุดและหาค่าองศาของsolder ที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.10 แสดงภาพหลังการReconstruction

ขั้นตอนที่ 5 นำภาพหลังจาก Reconstruction ที่ได้มาวัดค่าความสูงในโปรแกรม Math Lab พร้อมบันทึกภาพที่ทำการวัดความสูงแล้ว

ขั้นตอนที่ 6 ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบละเอียดวัดค่าความสูงของตัวอย่างที่ทำการหลอมละลายแล้วมาวัดความสูง พร้อมบันทึกผล

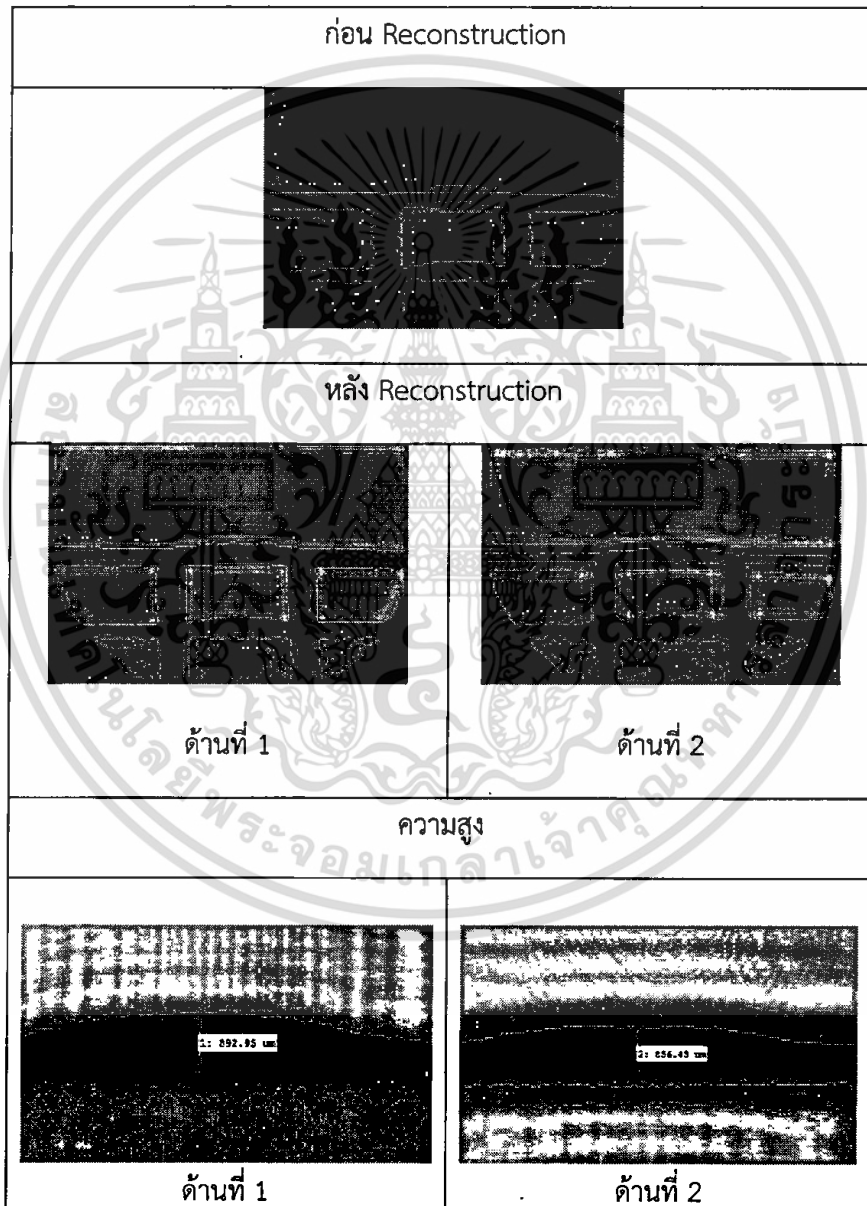
ขั้นตอนที่ 7 นำผลการทดลองในขั้นตอนที่ 4-6 มาทำการเปรียบเทียบพร้อมทั้งหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความสูงและสรุปผลการทดลอง

## บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย

จากการทดลองนี้เราได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี เพื่อใช้ในการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของสารเชื่อมประสานที่นำกราฟีนและกราฟีนออกไซด์มาผสมผสานเข้าด้วยกัน ดังนี้

### 4.1) ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผสม

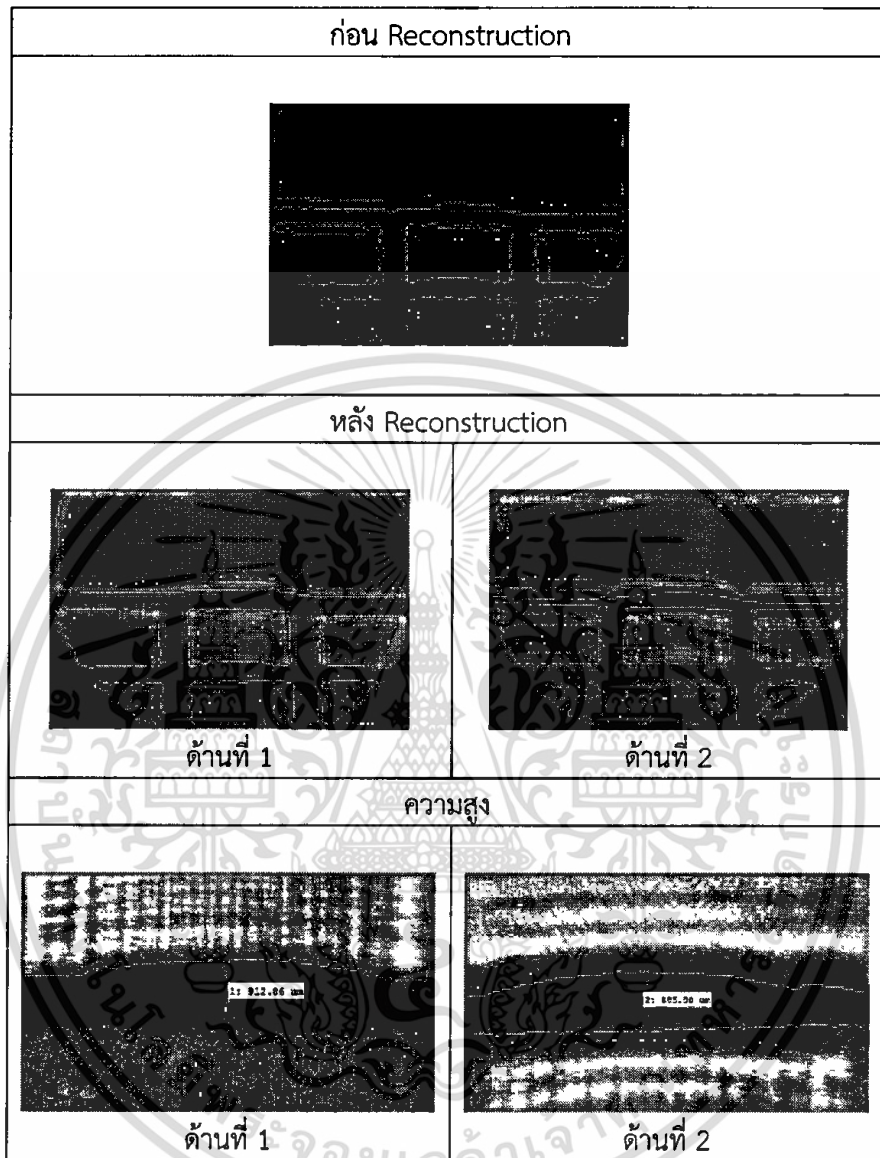
4.1.1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสมที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสมที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 1



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 892.95 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 856.43 ไมโครเมตร ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 874.69 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

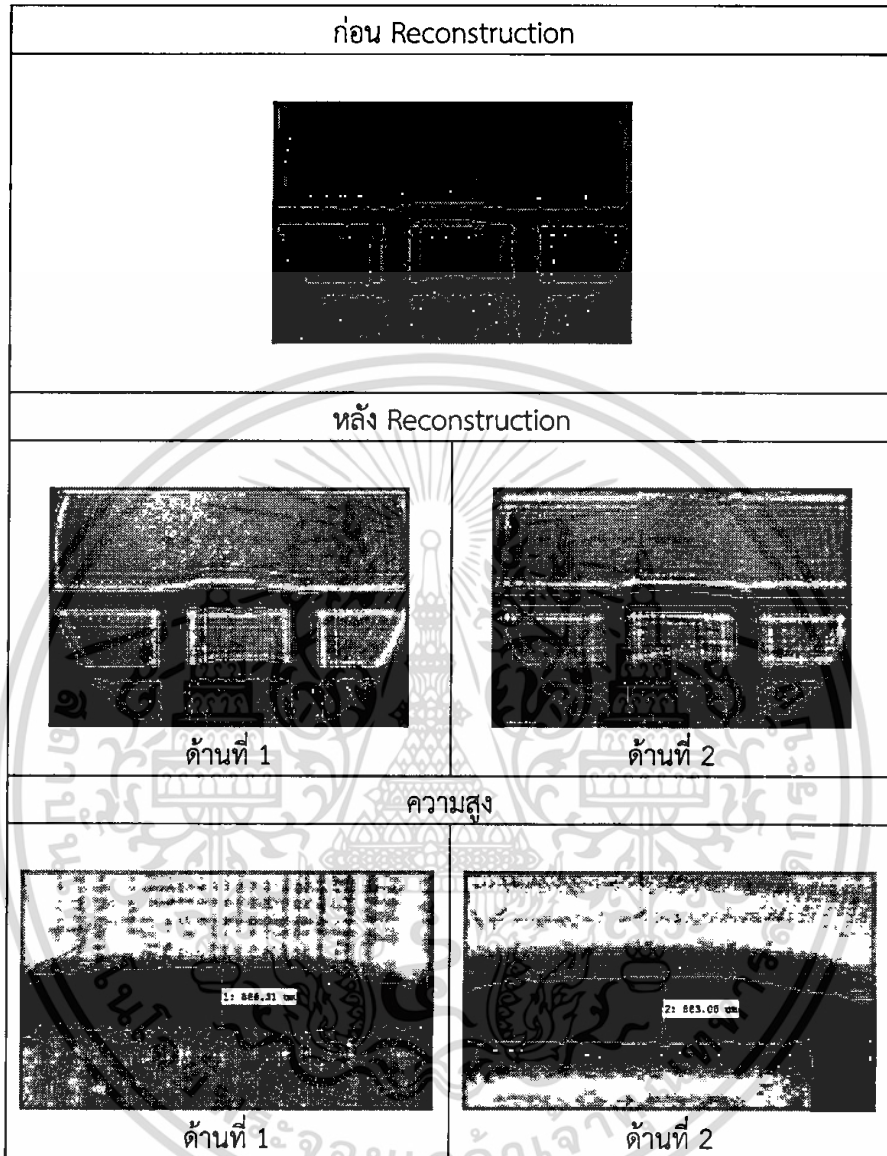
4.1.2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมของตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 912.86 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 883.00 ไมโครเมตร ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 897.93 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีารผสมของตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีารผสมของตัวอย่างที่ 3

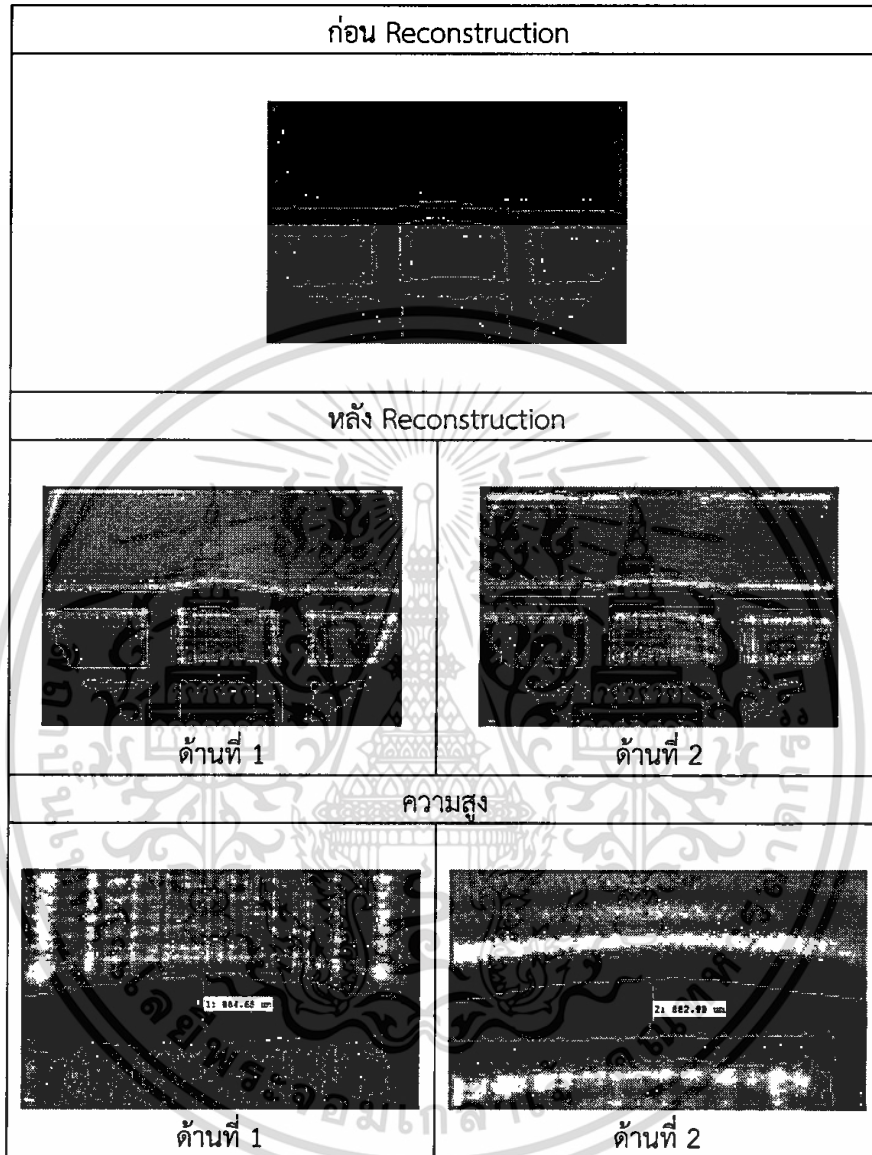


ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 886.31 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 883.00 ไมโครเมตร  
ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 884.65 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.02%

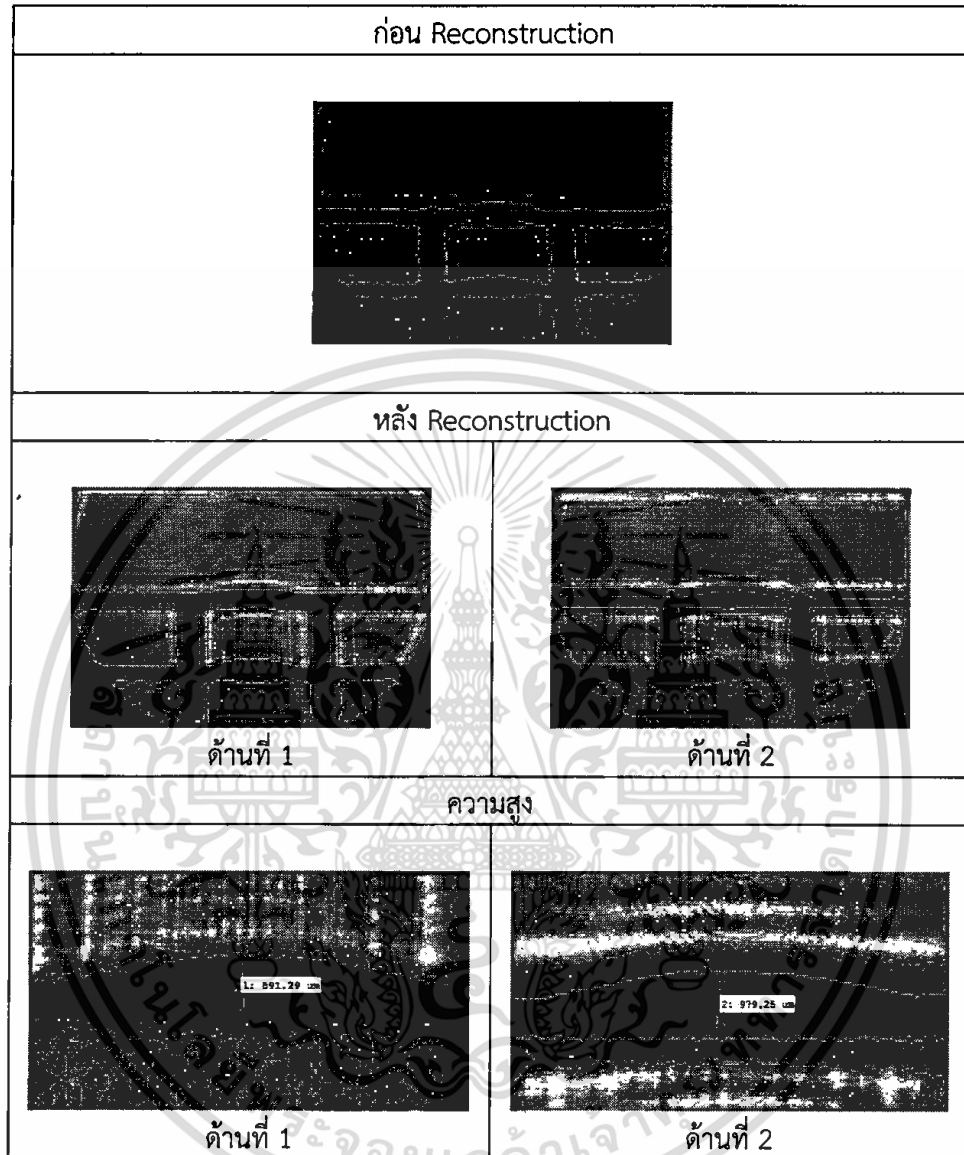
4.2.1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.4 ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 1



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 884.65 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 882.99 ไมโครเมตร ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 883.82 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

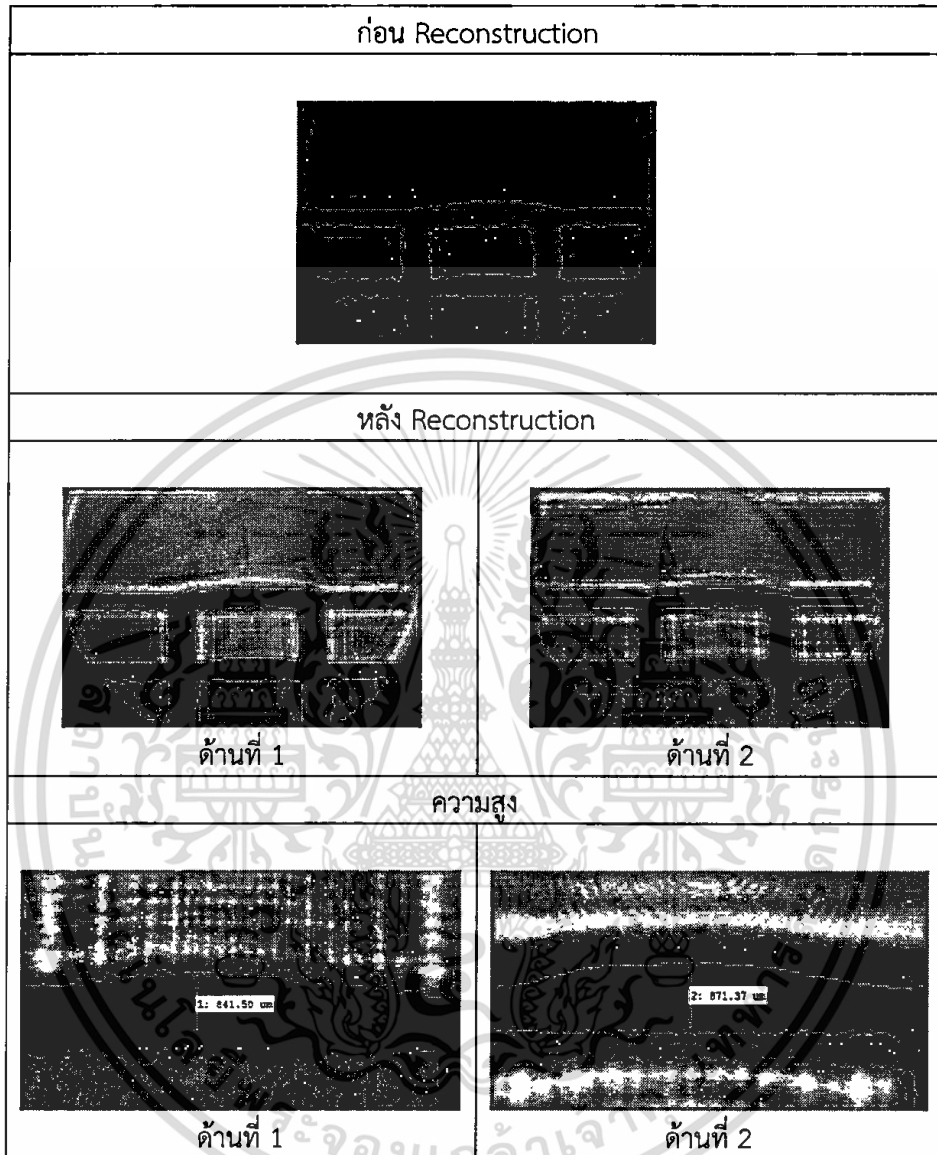
4.2.2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 891.29 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 979.25 ไมโครเมตร ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 935.27 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.6 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 3



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 841.50 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 871.37 ไมโครเมตร ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับความสูงเท่ากับ 856.43 ไมโครเมตร

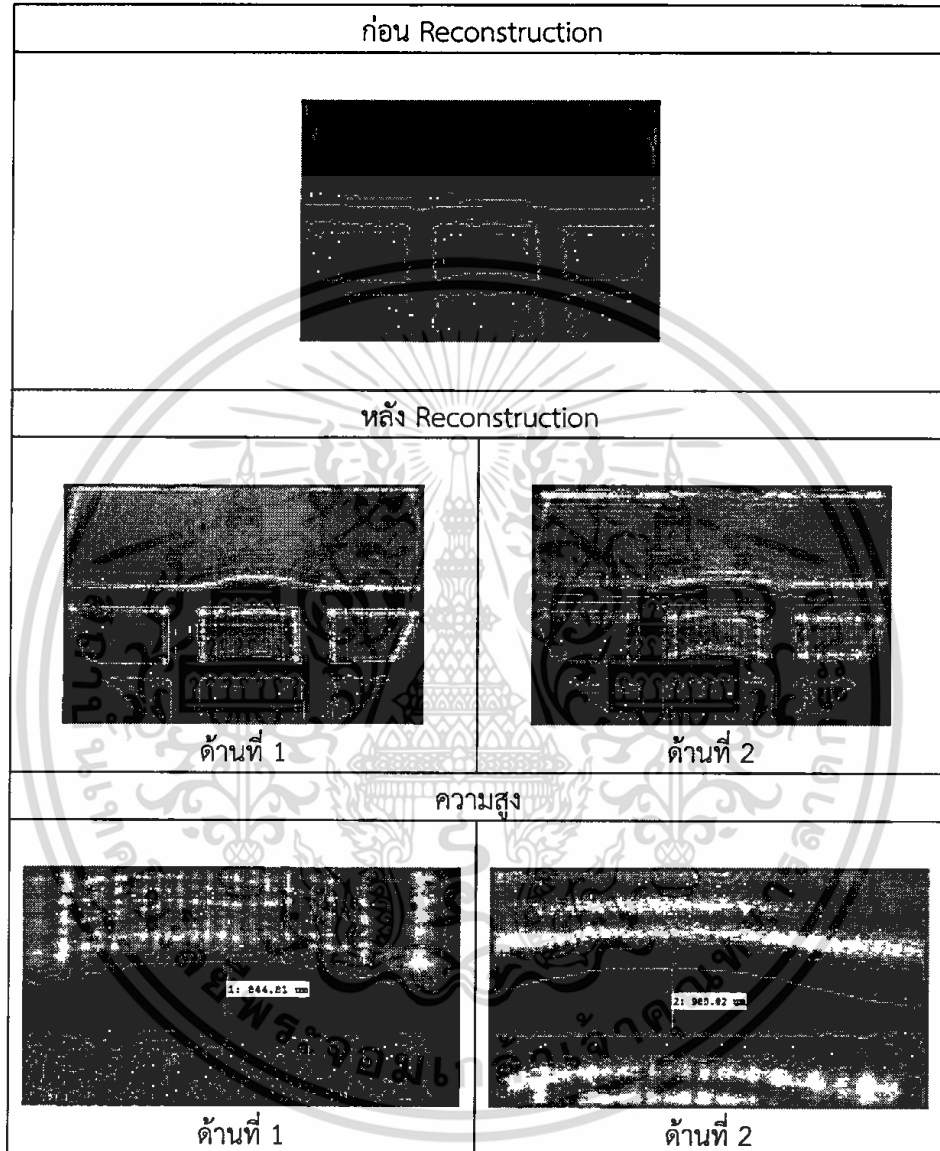
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.05%

4.3.1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่

4.7

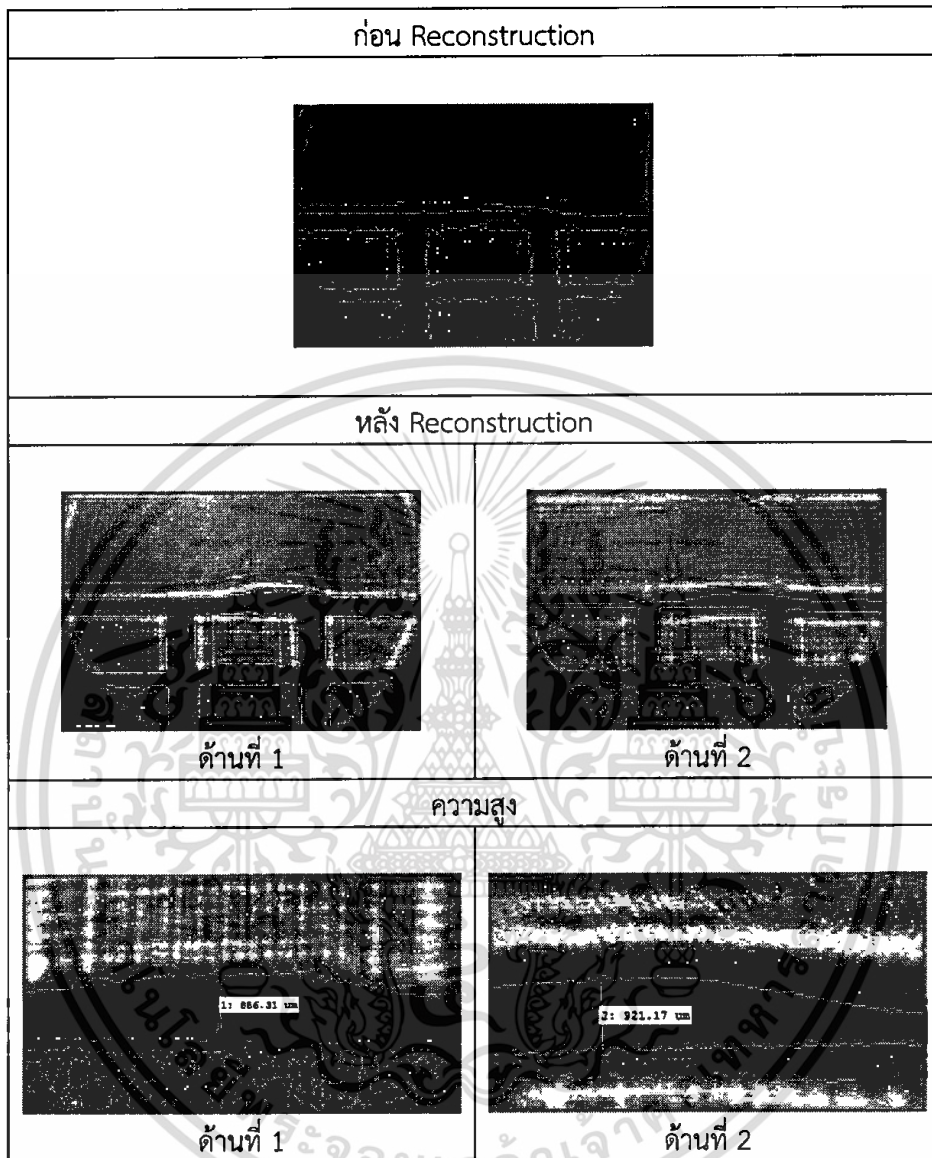
ตารางที่ 4.7 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 1



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 844.81 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 980.92 ไมโครเมตร ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 912.86 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


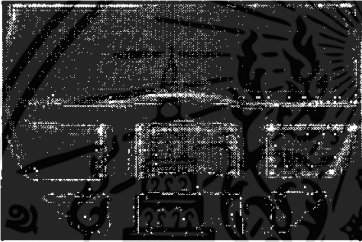


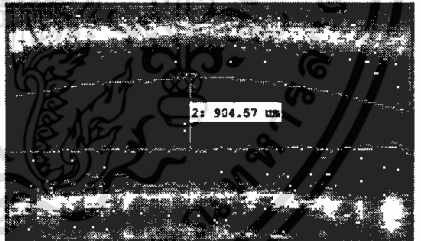
4.3.2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.8 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือด้านที่ 1 เท่ากับ 886.31 ไมโครเมตร และด้านที่ 2 เท่ากับ 921.17 ไมโครเมตร ได้ค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 903.74 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

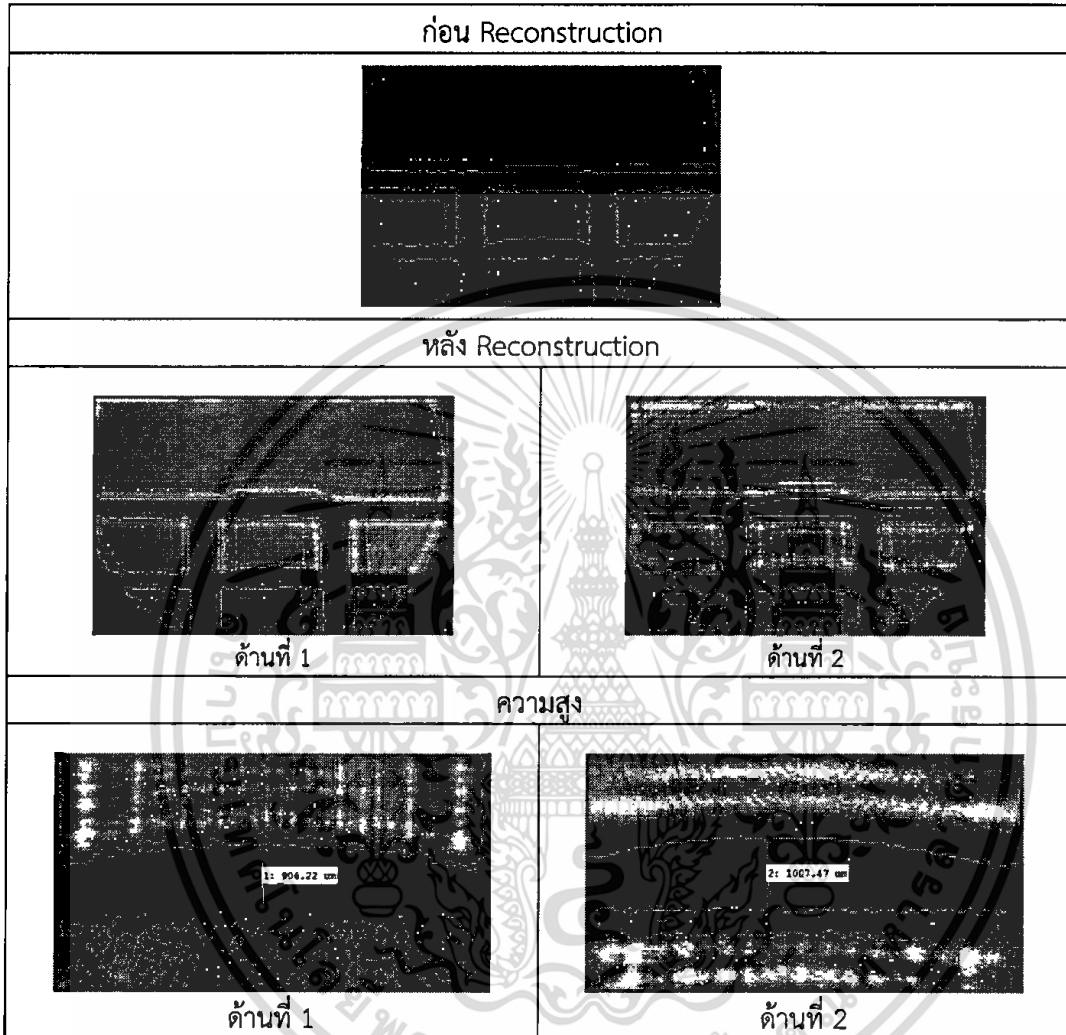
4.3.3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.9 ตารางที่ 4.9 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 3

ก่อน Reconstruction	
	
หลัง Reconstruction	
	
ด้านที่ 1	ด้านที่ 2
ความสูง	
	
ด้านที่ 1	ด้านที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีน 0.1%

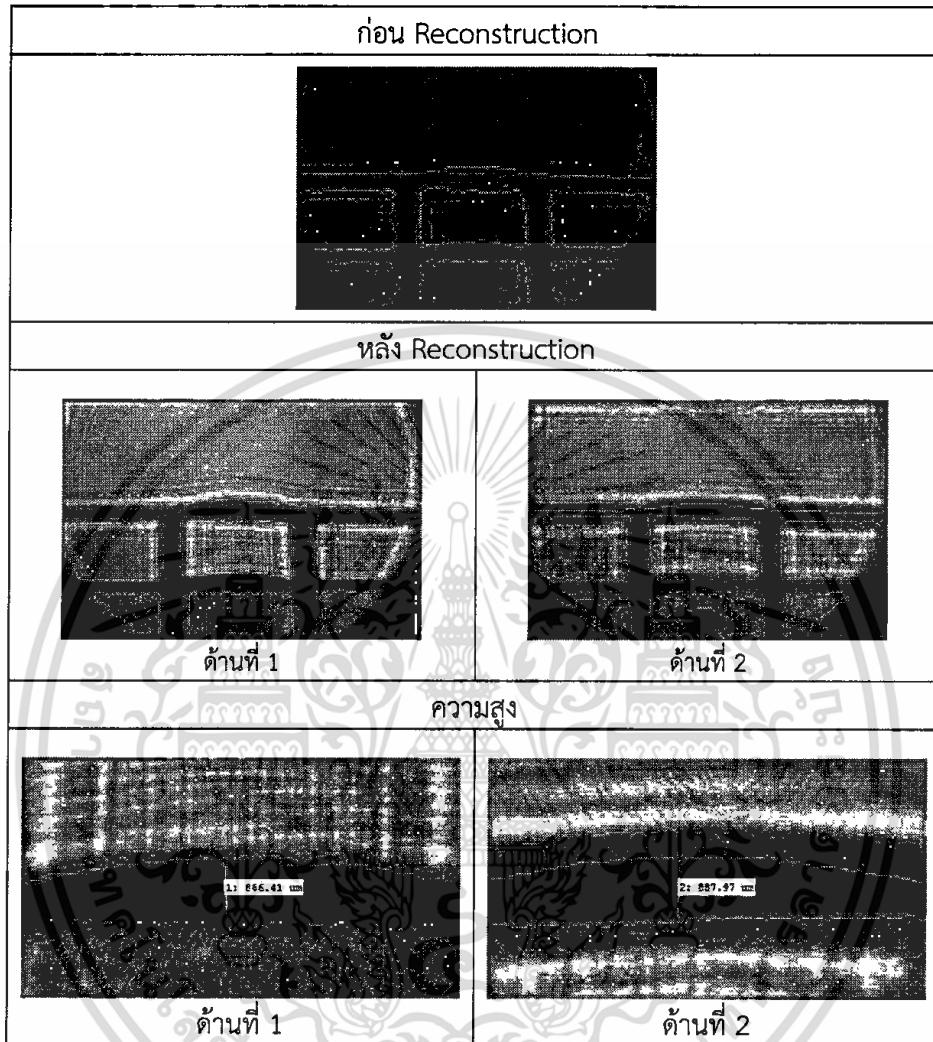
4.4.1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.10 ตารางที่ 4.10 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 1



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 603.22 um และ 1007.47 um ได้ค่าเฉลี่ย 956.84 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

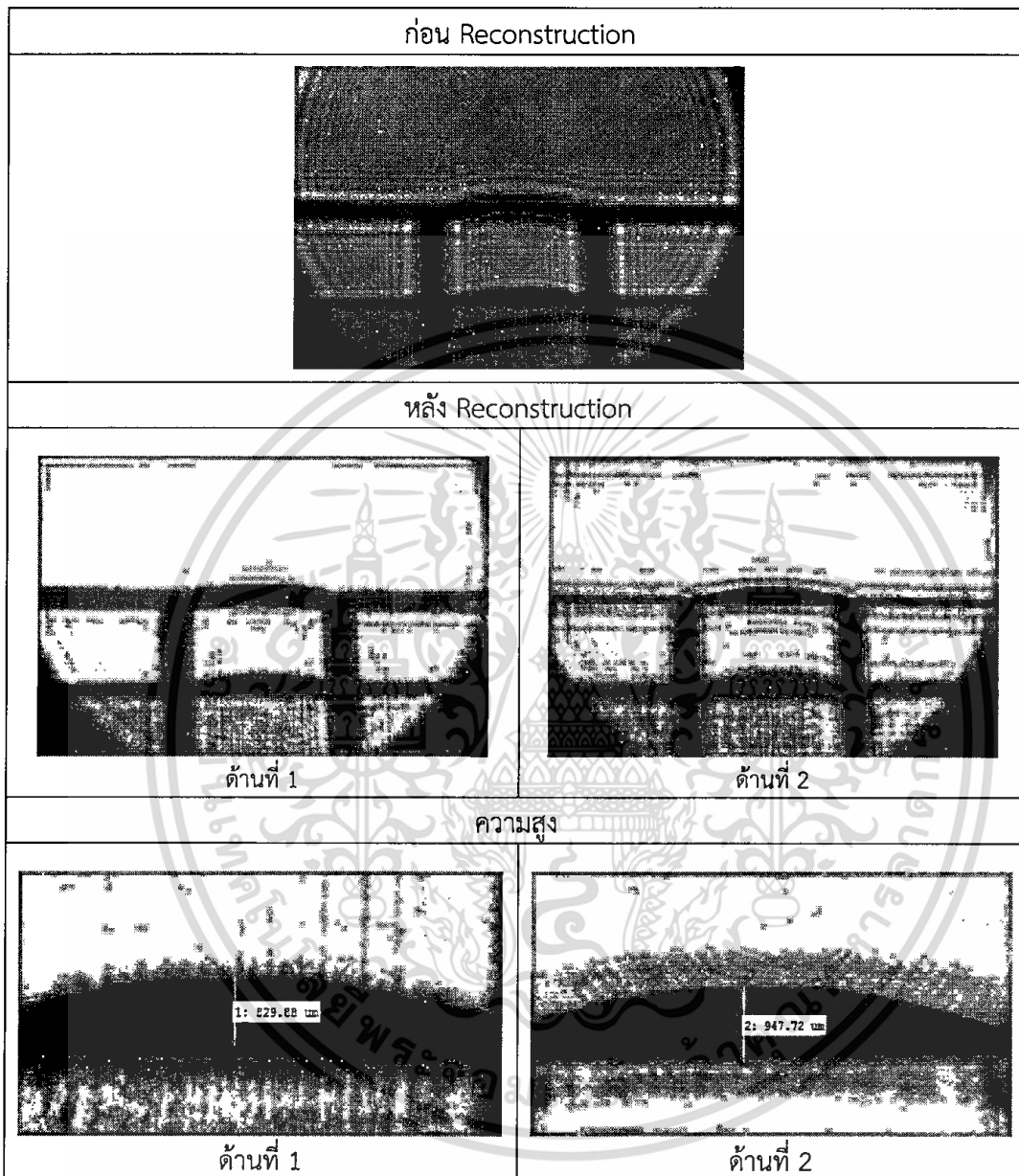
4.4.2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.11 ตารางที่ 4.11 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 866.41 um และ 887.97 um ได้ค่าเฉลี่ย 903.74 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.12 ตารางที่ 4.12 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 3



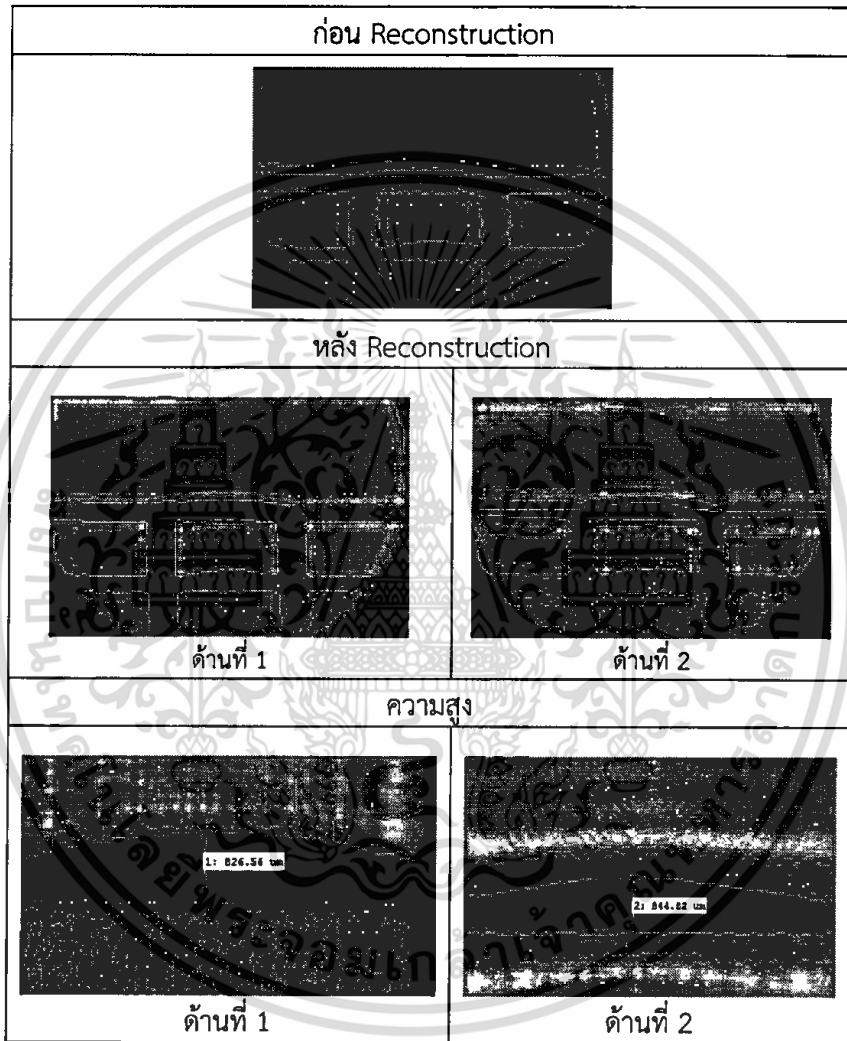
ค่าความสูงที่วัดได้คือ 829.88 um และ 947.72 um ได้ค่าเฉลี่ย 888.80 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.02%

1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.13

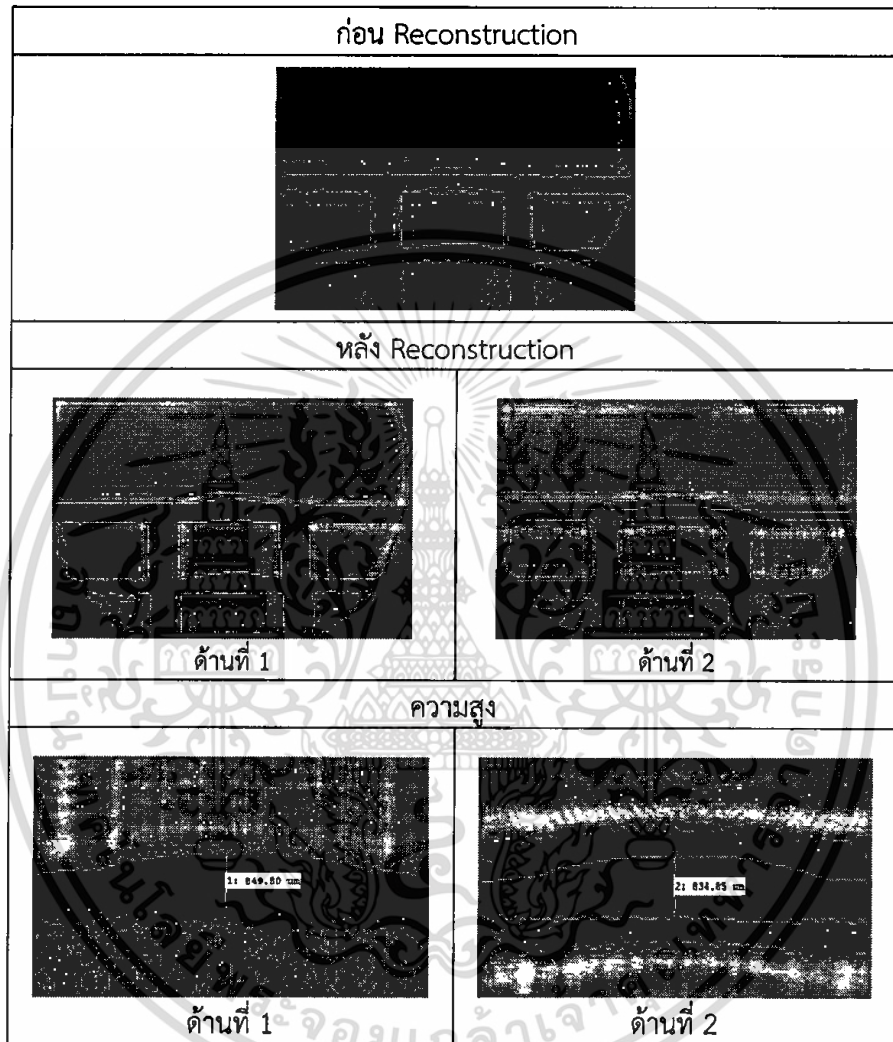
ตารางที่ 4.13 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 1



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 826.56 um และ 884.82 um ได้ค่าเฉลี่ย 855.69 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

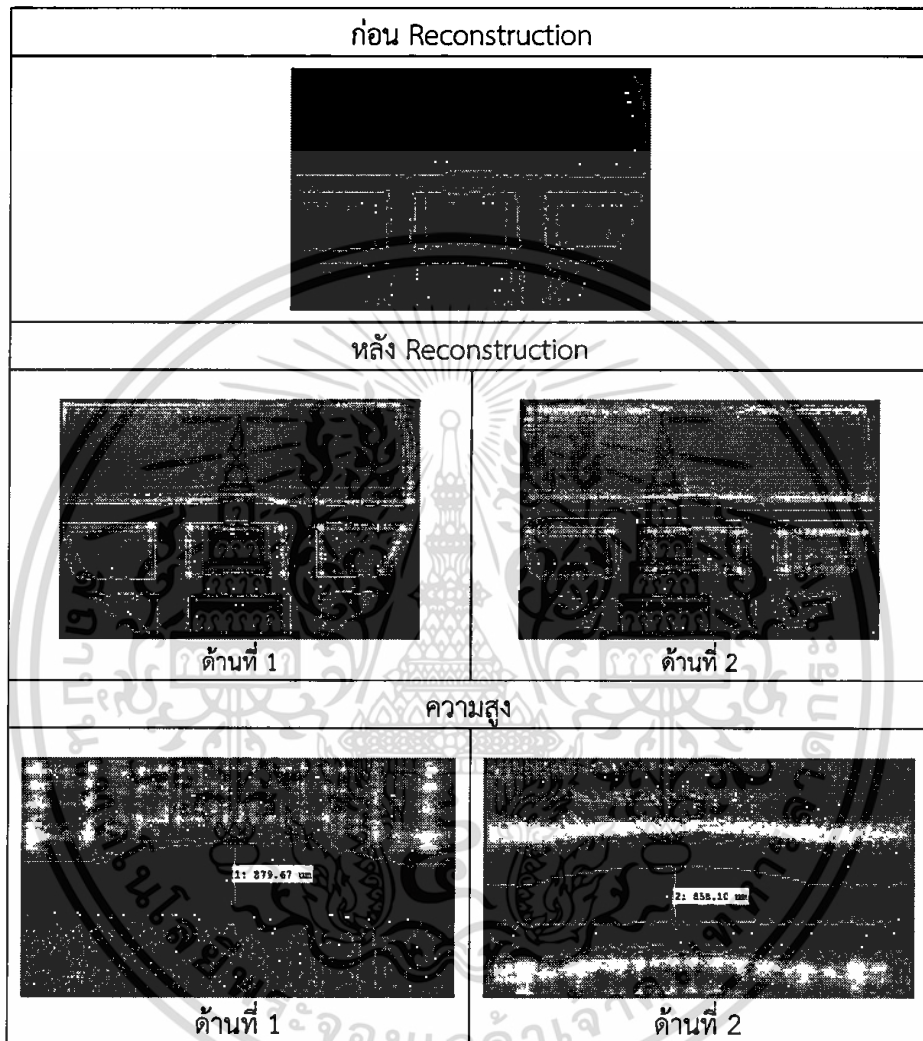
- 2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.14
- ตารางที่ 4.14 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 849.80 um และ 834.85 um ได้ค่าเฉลี่ย 842.32 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.15
- ตารางที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 3



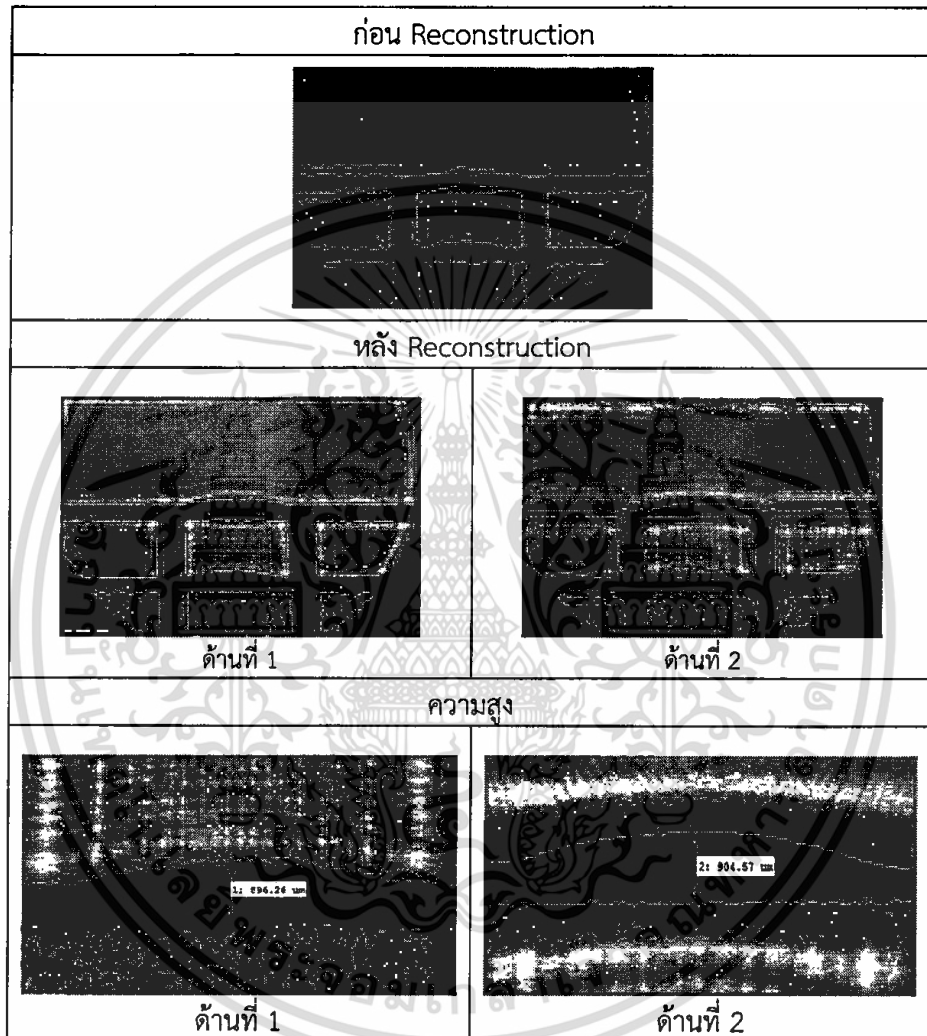
ค่าความสูงที่วัดได้คือ 879.67 um และ 858.10 um ได้ค่าเฉลี่ย 868.88 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.05%

1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 1

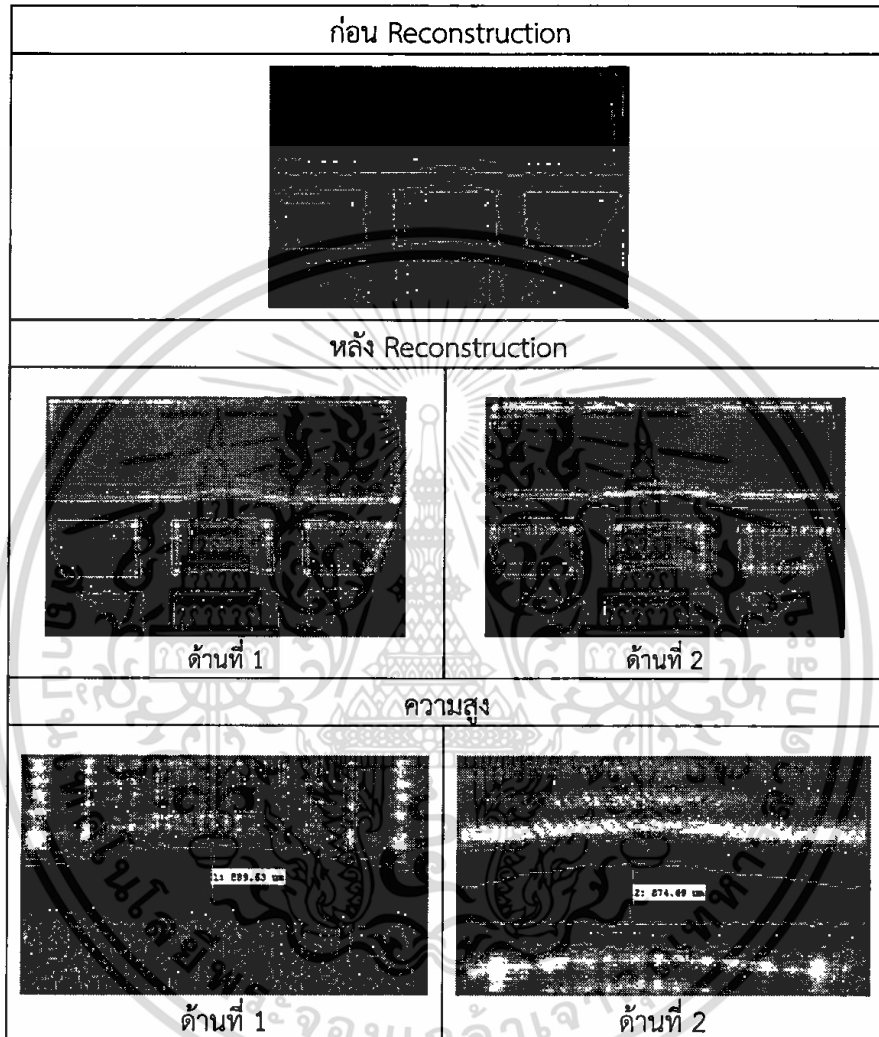


ค่าความสูงที่วัดได้คือ 896.26 um และ 904.57 um ได้ค่าเฉลี่ย 900.41 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) รูปแสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.17

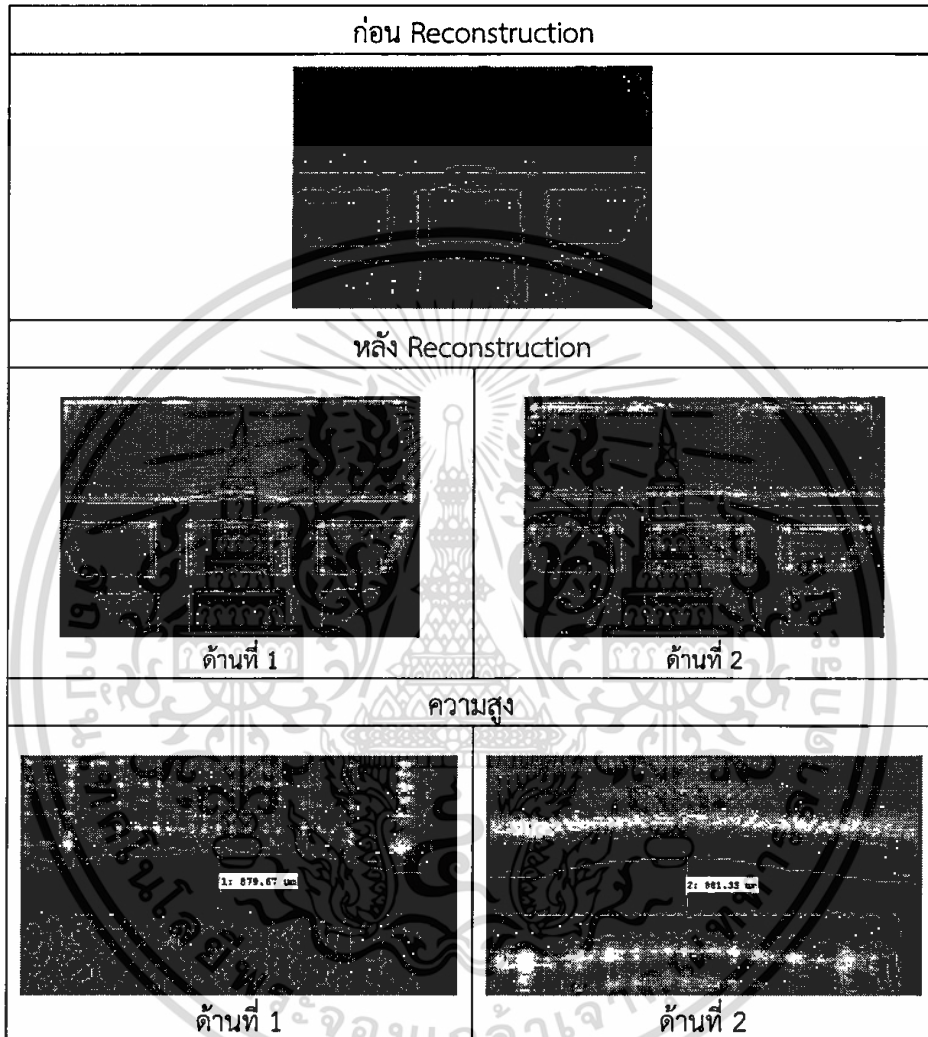
ตารางที่ 4.17 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 2



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 889.63 um และ 874.69 um ได้ค่าเฉลี่ย 882.16 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสมที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.18
- ตารางที่ 4.18 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสมที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 3



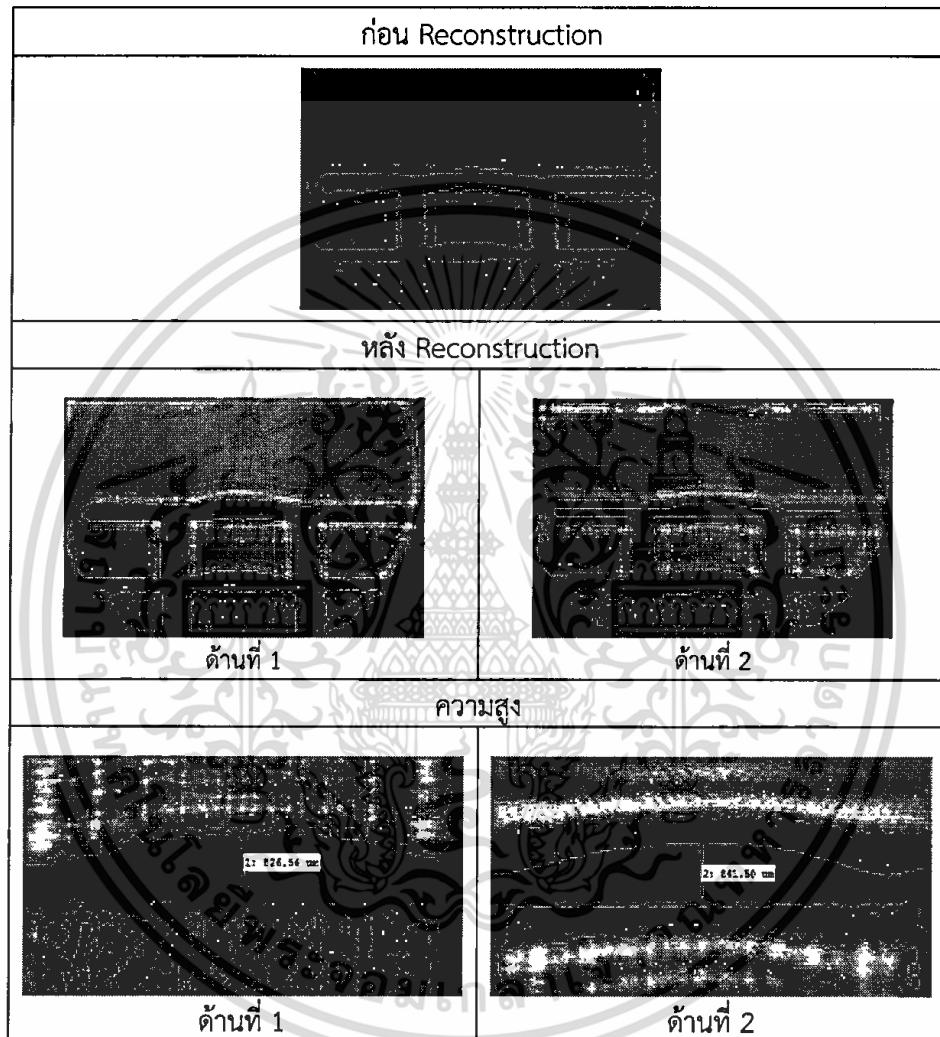
ค่าความสูงที่วัดได้คือ 879.67 um และ 881.33 um ได้ค่าเฉลี่ย 880.50 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7) ผลการทดลองเมื่อมีการผสมกราฟีนออกไซด์ 0.1%

4.7.1) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 1

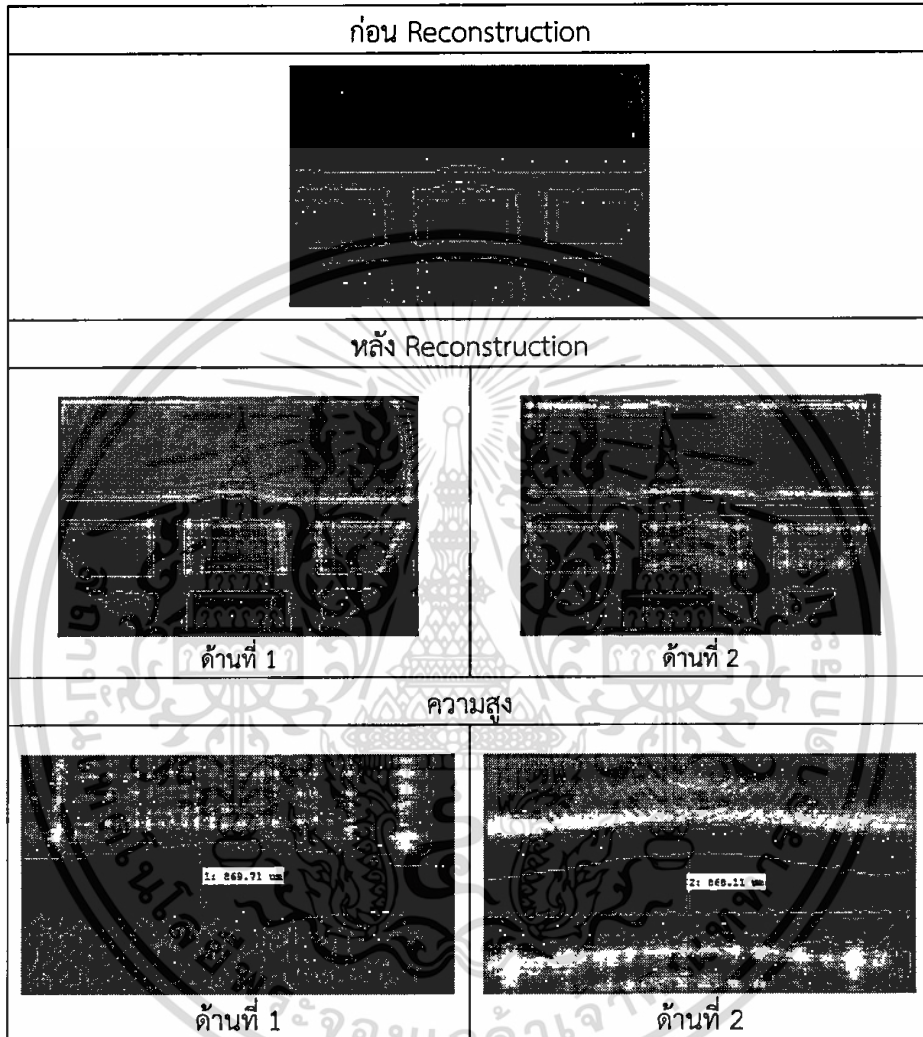


ค่าความสูงที่วัดได้คือ 826.56 um และ 841.50 um ได้ค่าเฉลี่ย 834.03 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2) แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 2

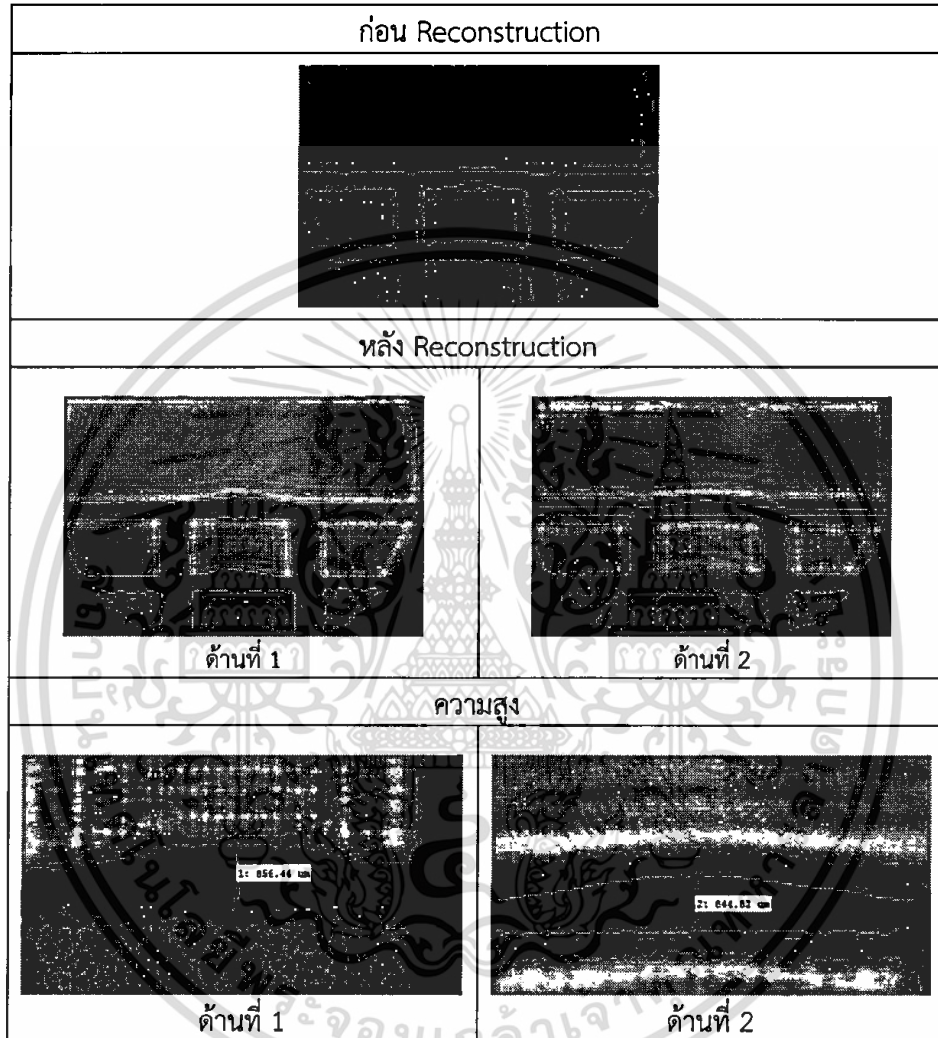


ค่าความสูงที่วัดได้คือ 869.71 um และ 868.11 um ได้ค่าเฉลี่ย 868.91 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3) รูปแสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 3



ค่าความสูงที่วัดได้คือ 856.44 um และ 844.82 um ได้ค่าเฉลี่ย 850.63 um

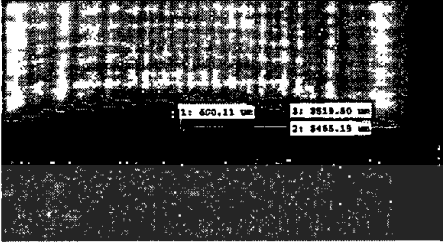
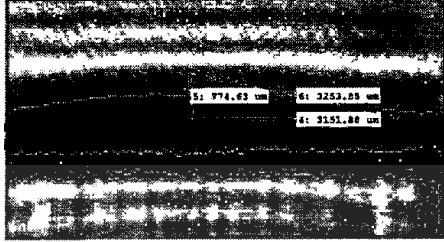


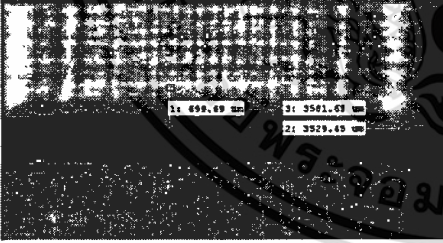
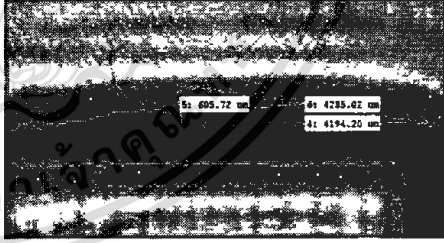
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ตารางแสดงความสูงของสารเชื่อมประสานที่วัดจากเวอร์เนียและจากภาพที่ผ่านการ Reconstruction

สารเชื่อมประสานที่ความเข้มข้นต่างๆ	เวอร์เนีย	Reconstruction	ค่าความแตกต่าง
ไม่มีการผสม	820	874.69	6.454
	850	897.93	5.484
	860	884.655	2.826
ผสมกราฟีน 0.02%	860	956.845	10.66
	850	877.19	3.148
	840	888.8	5.645
ผสมกราฟีน 0.05%	900	912.865	1.419
	880	903.74	2.661
	840	898.76	6.758
ผสมกราฟีน 0.1%	870	883.82	1.575
	880	935.27	6.089
	840	856.435	1.937
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.02%	800	834.03	4.165
	820	868.91	5.791
	850	850.63	0.074
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.05%	810	900.415	10.572
	820	882.16	7.303
	810	880.5	8.34
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.1%	810	855.69	5.486
	840	842.325	0.276
	800	868.885	8.255
ค่าความแตกต่างเฉลี่ย			4.996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

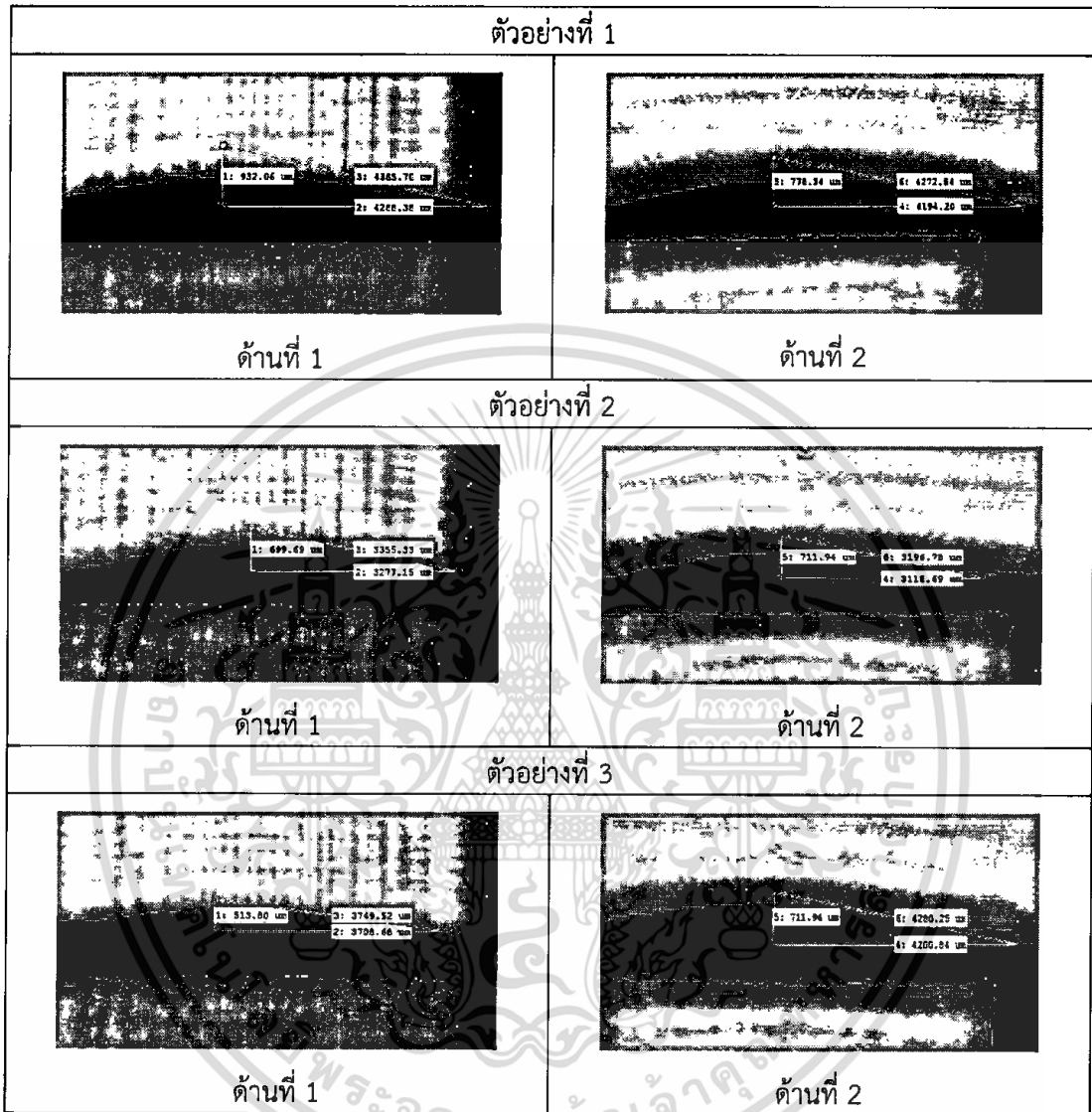
4.8. การวัดค่ามุมสัมพัทธ์ของสารเชื่อมประสาน  
 ตารางที่ 4.23 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสม

ตัวอย่างที่ 1	
 <p>1: 600.13 <math>\mu\text{m}</math>    2: 3219.80 <math>\mu\text{m}</math>                      2: 3465.15 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>3: 974.63 <math>\mu\text{m}</math>    4: 3252.83 <math>\mu\text{m}</math>                      4: 3151.88 <math>\mu\text{m}</math></p>
ด้านที่ 1	ด้านที่ 2
ตัวอย่างที่ 2	
 <p>1: 699.69 <math>\mu\text{m}</math>    3: 3166.30 <math>\mu\text{m}</math>                      2: 3080.06 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>3: 699.34 <math>\mu\text{m}</math>    4: 3644.36 <math>\mu\text{m}</math>                      4: 3729.72 <math>\mu\text{m}</math></p>
ด้านที่ 1	ด้านที่ 2
ตัวอย่างที่ 3	
 <p>1: 699.69 <math>\mu\text{m}</math>    3: 3581.63 <math>\mu\text{m}</math>                      2: 3529.49 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>3: 699.72 <math>\mu\text{m}</math>    4: 4285.62 <math>\mu\text{m}</math>                      4: 4194.20 <math>\mu\text{m}</math></p>
ด้านที่ 1	ด้านที่ 2

ทำการหาค่ามุมสัมพัทธ์ด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่ไม่มีการผสม ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $9.85^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $13.80^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $11.83^\circ$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $12.75^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $10.93^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $11.84^\circ$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $11.21^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $8.22^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $9.72^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

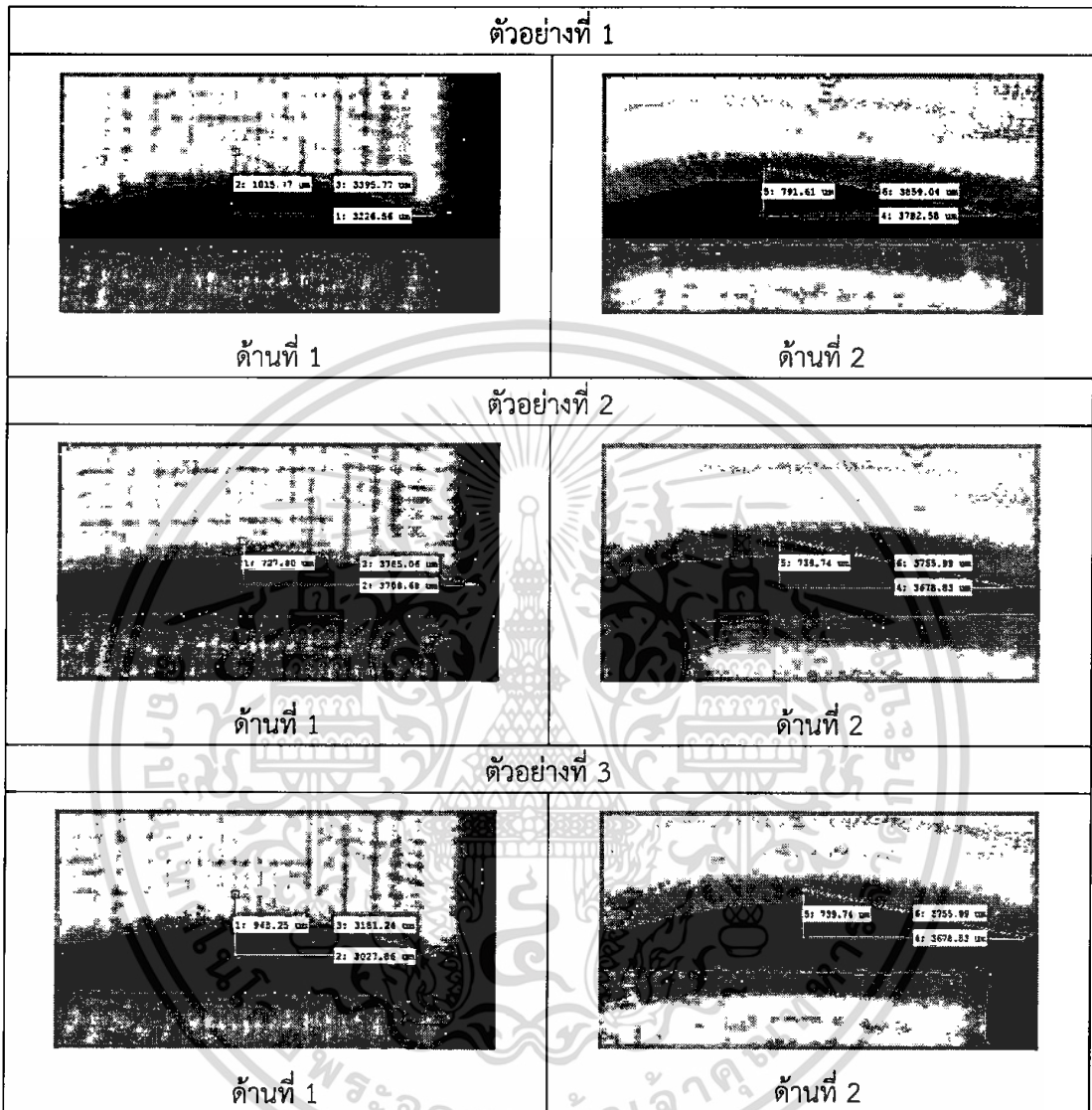
4.9 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02%  
ตารางที่ 4.24 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.02%



ทำการหาค่ามุมสัมผัสด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกราฟีน 0.02% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $12.26^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $10.51^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $11.39^\circ$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $12.05^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $12.85^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $12.45^\circ$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $7.88^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $9.62^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $8.75^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

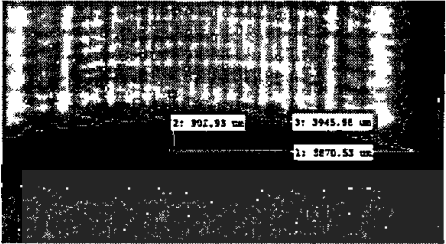
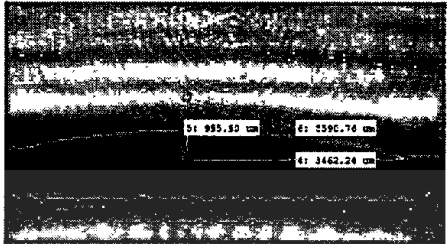
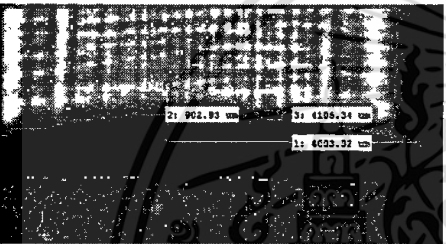
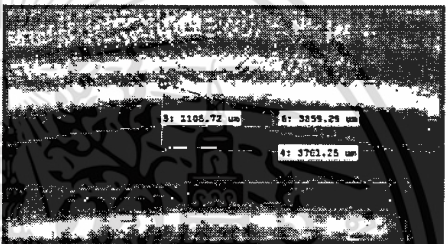
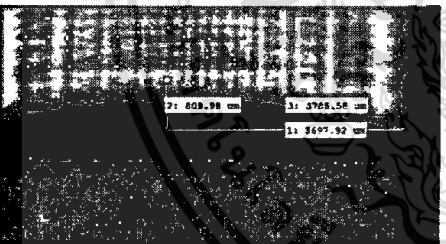
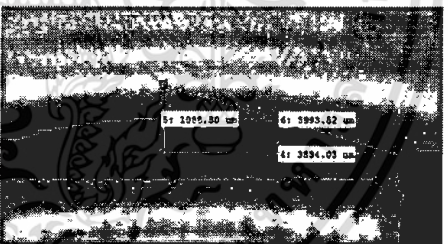
4.10 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมพัทธ์ของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกรากฟีน 0.05%  
ตารางที่ 4.25 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกรากฟีน 0.05%



ทำการหาค่ามุมสัมพัทธ์ด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพิทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกรากฟีน 0.05% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $17.47^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $11.82^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.65^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $11.10^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $11.37^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $11.24^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $17.39^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $11.37^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.38^{\circ}$

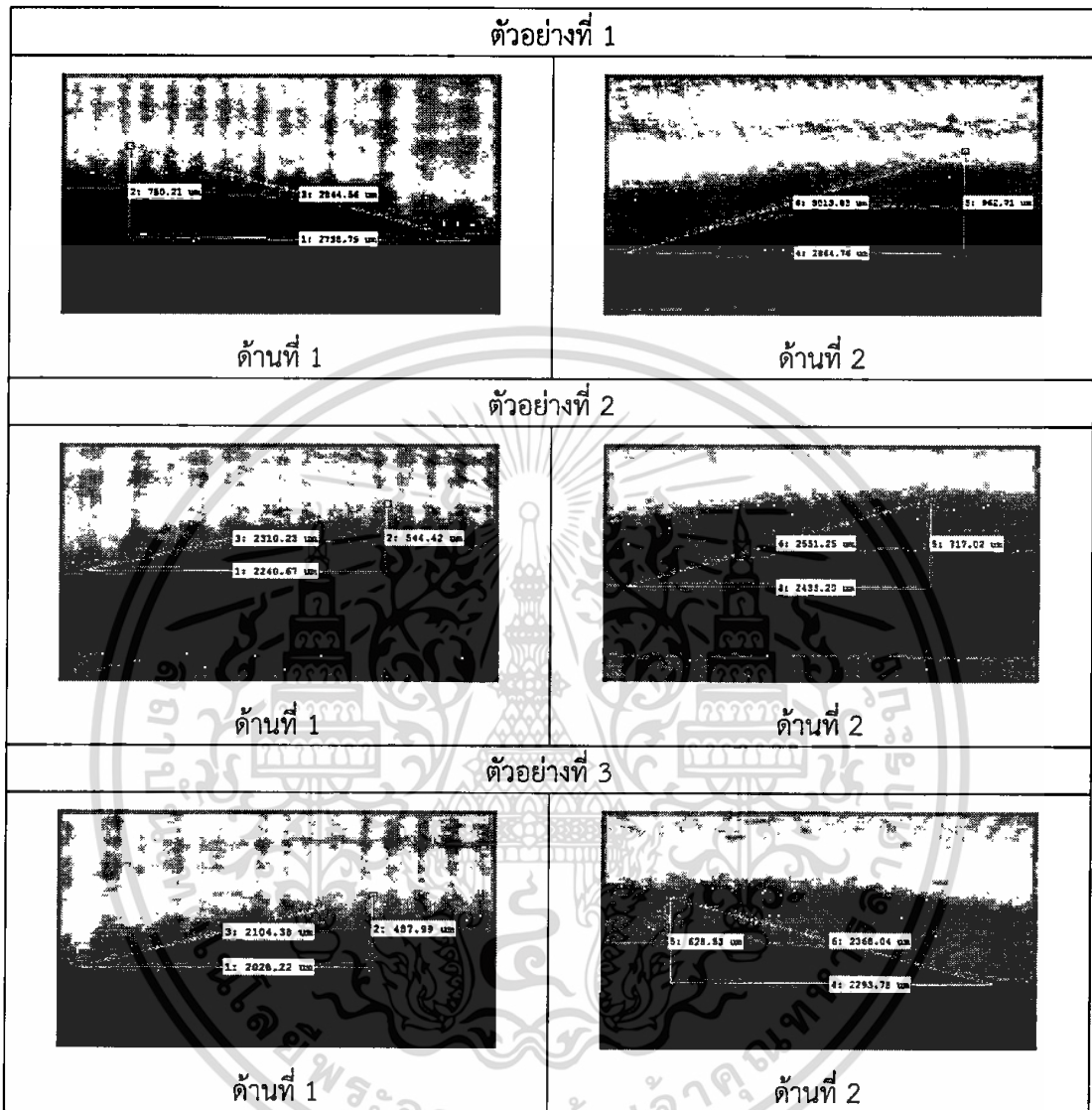
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1%  
 ตารางที่ 4.26 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของกราฟีน 0.1%

ตัวอย่างที่ 1	
 <p>ด้านที่ 1</p>	 <p>ด้านที่ 2</p>
ตัวอย่างที่ 2	
 <p>ด้านที่ 1</p>	 <p>ด้านที่ 2</p>
ตัวอย่างที่ 3	
 <p>ด้านที่ 1</p>	 <p>ด้านที่ 2</p>

ทำการหาค่ามุมสัมผัสด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกราฟีน 0.1% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $13.13^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $16.05^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.59^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $12.71^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $16.68^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.70^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $12.35^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $15.85^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.10^{\circ}$

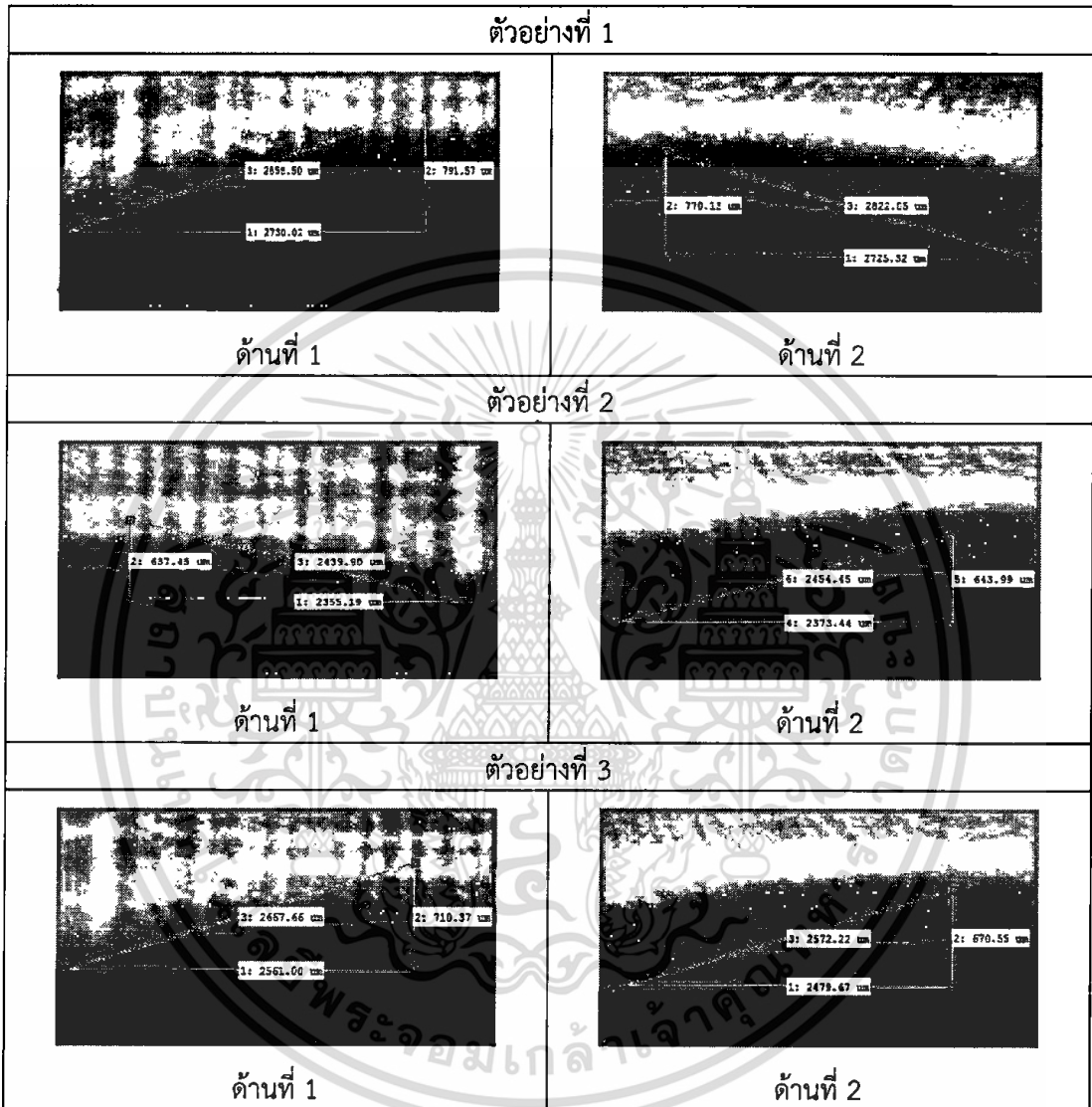
4.12 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมพันธ์ของสารเชื่อมผสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตารางที่ 4.27 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02%



ทำการหาค่ามุมสัมพันธ์ด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.02% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ 15.32° และด้านที่ 2 เท่ากับ 18.57° มุมเฉลี่ยเท่ากับ 16.95° ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ 13.65° และด้านที่ 2 เท่ากับ 16.42° มุมเฉลี่ยเท่ากับ 15.04° ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ 13.53° และด้านที่ 2 เท่ากับ 15.32° มุมเฉลี่ยเท่ากับ 14.43°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

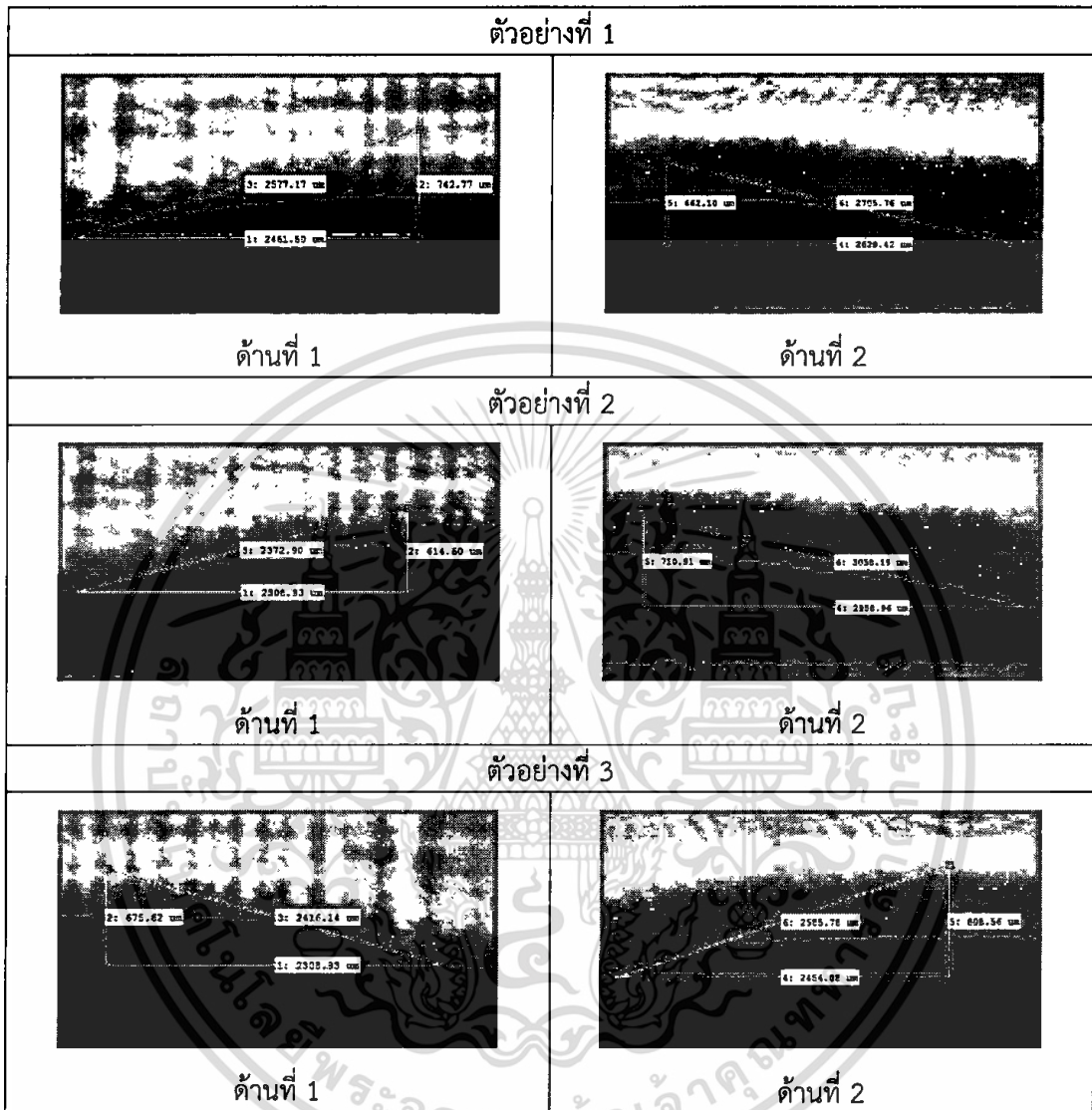
4.13 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมพันธ์ของสารเชื่อมผสมที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05%  
 ตารางที่ 4.28 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสมที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05%



ทำการหาค่ามุมสัมพันธ์ด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.05% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $16.17^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $15.78^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $15.97^\circ$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $15.14^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $15.63^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $15.39^\circ$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $15.50^\circ$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $15.12^\circ$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $15.31^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 รูปแสดงการวัดค่ามุมสัมพันธ์ของสารเชื่อมผสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1%  
 ตารางที่ 4.29 แสดงตัวอย่างของสารเชื่อมผสานที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1%



ทำการหาค่ามุมสัมพันธ์ด้วยวิธีรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพีทาโกรัสในแต่ละด้านของตัวอย่างที่มีการผสมของกราฟีนออกไซด์ 0.1% ตัวอย่างที่ 1 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $16.79^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $14.13^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $15.46^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 2 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $14.91^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $13.51^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $14.21^{\circ}$  ตัวอย่างที่ 3 ด้านที่ 1 เท่ากับ  $16.31^{\circ}$  และด้านที่ 2 เท่ากับ  $18.24^{\circ}$  มุมเฉลี่ยเท่ากับ  $17.27^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

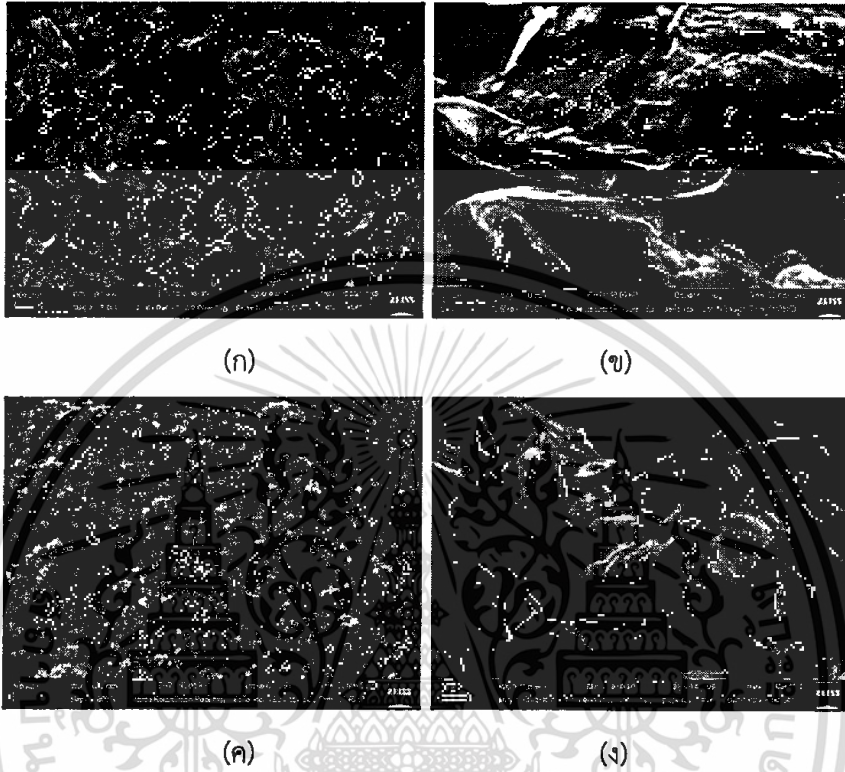
## 4.15 ตารางค่ามุมสัมพัทธ์รวมที่วัดได้

ตารางที่ 4.30 แสดงค่ามุมสัมพัทธ์ของแต่ละตัวอย่าง

สารเชื่อมประสานที่ความเข้มข้นต่างๆ	มุมด้านที่ 1	มุมด้านที่ 2	มุมเฉลี่ยทั้ง 2 ด้าน
ไม่มีการผสม	9.85	13.8	11.825
	12.75	10.93	11.840
	11.21	8.22	9.715
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>11.127</b>
ผสมกราฟีน 0.1%	13.13	16.05	14.590
	12.71	16.68	14.695
	12.35	15.85	14.100
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>14.462</b>
ผสมกราฟีน 0.05%	17.47	11.82	14.645
	11.1	11.37	11.235
	17.39	11.37	14.380
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>13.420</b>
ผสมกราฟีน 0.02%	12.26	10.51	11.385
	12.05	12.85	12.450
	7.88	9.62	8.750
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>10.862</b>
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.1%	16.79	14.13	15.462
	14.91	13.51	14.207
	16.31	18.24	17.272
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>15.647</b>
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.05%	16.17	15.78	15.974
	15.14	15.63	15.386
	15.50	15.12	15.311
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>15.557</b>
ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.02%	15.32	18.57	16.946
	13.65	16.42	15.037
	13.53	15.32	14.425
<b>มุมเฉลี่ย</b>			<b>15.470</b>

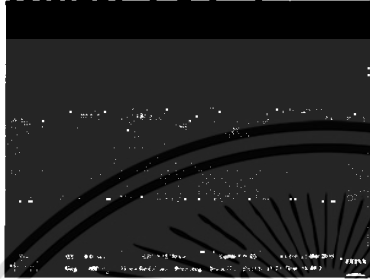
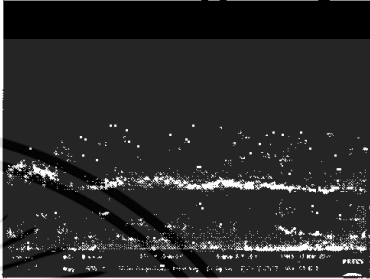


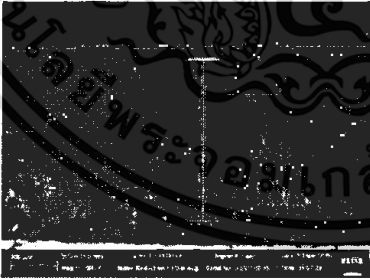
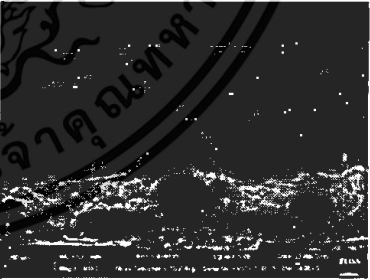
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 รูปของตัวอย่างที่ได้ทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์ ก)กราฟีนที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า ข)กราฟีนที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า ค)กราฟีนออกไซด์ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า ง)กราฟีนออกไซด์ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า

ตารางที่ 4.31 แสดงภาพที่ถ่ายจาก SEM ของสารเชื่อมประสานที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นต่อ มวล	กราฟิน	กราฟีนออกไซด์
0.02%		
0.05%		
0.1%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของสารเชื่อมประสานและระบบการทำงานและพัฒนาเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีในการถ่ายภาพดิจิทัลโฮโลแกรมให้ได้ 2 มุมมองในการถ่ายครั้งเดียว โดยในการศึกษาเราได้กำหนดตัวแปรและเงื่อนไขในการศึกษาไว้ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารเชื่อมประสานได้กำหนดความเข้มข้นต่อมวลไว้ 0.1%, 0.05% และ 0.02% โดยได้ชั่ง น้ำหนักตามสมการที่ 3.1

$$WT\% = \frac{\text{weight nano}}{\text{weight nano} + \text{weight solder}} \times 100\%$$

2. การเตรียมสารเชื่อมประสานที่จะใช้การหลอมได้ใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.8 mm สูง 1.5 mm ในการเตรียมเพื่อให้ได้ความสูงของสารเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษามีขนาดที่กัน

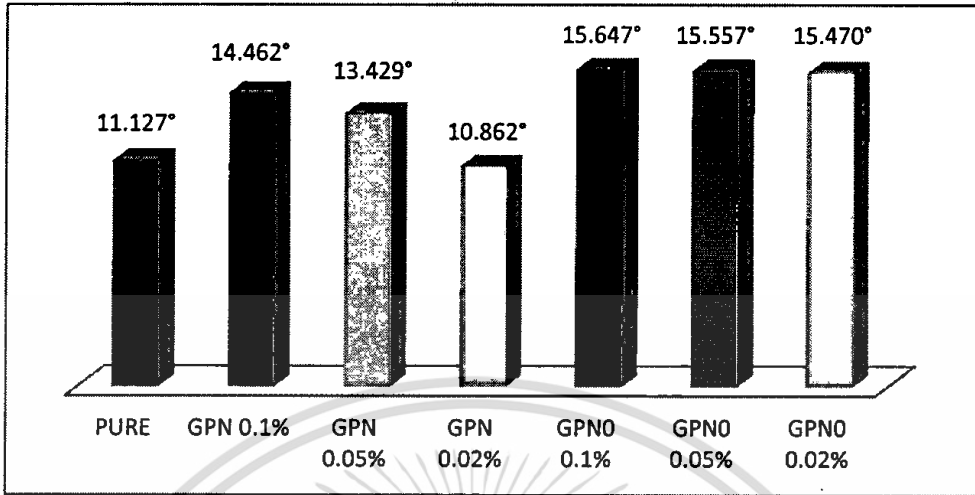
3. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอมของสารเชื่อมประสานได้กำหนดอุณหภูมิ 250-260 องศาเซียสและเวลาที่ใช้ในการหลอมอยู่ที่ 30 วินาที

ในการศึกษาในครั้งนี้เราได้ศึกษาความสูงของสารเชื่อมประสานที่ได้แสดงในบทที่ 4 ทำให้ได้ความสูงของสารเชื่อมประสานมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงโดยเฉลี่ยรวมคือ 5.174% เนื่องจากที่ยอมรับได้ใช้เวอร์เนียในการวัดทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนที่มาก แต่ในตารางที่ 4.22 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของแต่ละตัวอย่างมีบางตัวอย่างเท่านั้นที่มีความคลาดเคลื่อนเกิน 10% ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะแผ่นทองไม่เรียบเสมอกันจึงทำให้เกิดการผิดพลาดในการReconstruction ทำให้ได้ค่าที่ผิดพลาดไป

ในการหามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานได้ว่าสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมจะเห็นได้ว่ามีค่ามุมเฉลี่ย 11.127 องศาโดยจะใช้ค่ามุมของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสมเป็นค่ามาตรฐาน และมุมของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของแกรฟีน 0.1%, 0.05% และ 0.02% โดยมีค่าเป็น 14.462 องศา, 13.420 องศา และ 10.802 องศา ตามลำดับโดยจะเห็นได้ว่ามุมของสารเชื่อมประสานที่มีการผสมของแกรฟีนมีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสารเชื่อมประสานที่มีการผสมแกรฟีนออกไซด์ 0.1%, 0.05% และ 0.02% โดยมีค่าเป็น 15.647 องศา, 15.557 องศา และ 15.470 องศา จะเห็นได้ว่ามีค่าลดลงแต่ไม่มากเท่ากับสารเชื่อมประสานที่ผสมด้วยแกรฟีน แต่หว่ามุมสัมผัสของทั้งสองชนิดยังมีค่ามากกว่าค่ามุมของสารเชื่อมประสานที่ไม่มีการผสม เว้นแต่สารเชื่อมประสานที่ผสมด้วยแกรฟีน 0.02% มีค่ามุม 10.802 องศา ที่มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานจึงสรุปได้ว่า สารเชื่อมประสานที่มีการผสมด้วยแกรฟีนที่มีความเข้มข้นต่อมวล 0.02% เป็นสารตัวอย่างที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

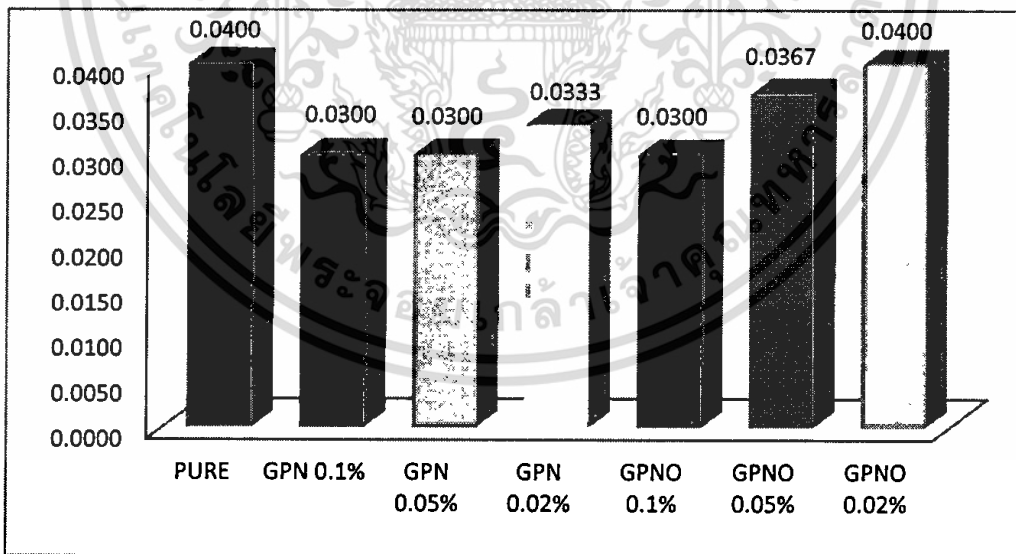
กราฟแท่งแสดงค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสานที่ความเข้มข้นต่อมวลที่ค่าต่างๆ



กราฟที่ 5.1 แสดงค่ามุมสัมผัสที่ความเข้มข้นต่อมวลต่างๆ

จากรูปที่11และกราฟที่1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกับค่ามุมสัมผัสของสารเชื่อมประสาน จะเห็นได้ชัดว่ากราฟีนมีขนาดใหญ่มากกว่ากราฟีนออกไซด์มากเมื่อเราเราได้ใส่กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่อมวลต่างๆลงไปแล้วทำให้ได้ว่ากราฟีนออกไซด์มีจำนวนมากกว่ากราฟีนจึงทำให้สารเชื่อมประสานมีการจับตัวไม่แผ่ออก ซึ่งต่างจากผลการทดลองของกราฟีน จะได้มุมที่แผ่ออกมากกว่าเพราะมีการจับตัวกันที่น้อยกว่าและในปริมาณที่มีความเข้มข้นต่อมวลน้อยลงก็ยิ่งมีการแผ่ออกที่ดีขึ้นด้วย

กราฟแท่งแสดงค่าความต้านทานของสารเชื่อมประสาน



กราฟที่ 5.2 แสดงค่าความต้านทานของสารเชื่อมประสานที่ความเข้มข้นต่อมวลที่ค่าต่างๆ

จากการจะเห็นได้ว่าสารเชื่อมประสานที่ผสมด้วยกราฟีนจะมีความต้านน้อยกว่าในสารเชื่อมประสานแบบปกติ แต่เมื่อผสมกราฟีนน้อยลงทำให้ค่าความต้านทานมากขึ้นไปด้วยที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกราฟีนมีการนำไฟฟ้าที่ดีทำสภาพนำไฟฟ้ามากขึ้นจึงทำให้มีความต้านทานน้อยลงแต่ในทางกลับกันกราฟีนออกไซด์มีการนำไฟฟ้าที่ไม่ค่อยดีจึงทำให้มีค่าความต้านทานที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับกราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กมลวิภา พึ่งเจียก,ชัยพนม หนูแก้ว และภรณ์ชัย กัลป์ยาศิริ. 2556. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลา บัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2014. กราฟีน. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%9F%E0%B8%B5%E0%B8%99>
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015. ทองแดง. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87>
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015. ไฮโลกราฟี. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AF%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9F%E0%B8%B5>
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015. ดีบุก. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%94%E0%B8%B5%E0%B8%9A%E0%B8%B8%E0%B8%81>
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2015. เงิน(โลหะ). [Online]. Available : [http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99\\_%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%29](http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99_%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%29)
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2012. นาโนเทคโนโลยีจากการสังเคราะห์ [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-7.html>
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2012. การแทรกสอด. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/waves/properties/interference.html>
- สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. 2556. การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการทางเคมี(Chemical Exfoliation). [Online]. Available : [http://thep-center.org/src/article\\_edu\\_t.php?article\\_edu\\_id=57](http://thep-center.org/src/article_edu_t.php?article_edu_id=57)
- ธรรมบุญ อุดมมัน. 2556. Solder Paste ในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. [Online]. Available : [http://www.eng.mut.ac.th/article\\_detail.php?id=31](http://www.eng.mut.ac.th/article_detail.php?id=31)
- Rinny. 2012. Hologram Technology ประตูลูกแห่งโลกเสมือนจริง. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/blog/115383/60580>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

ผลของงานนี้ได้นำไปเสนองานที่ International Conference on Photonics Solutions (ICPS)  
ครั้งที่ 2 July 6-8, 2015 @ Dusit Thani hotel, Hua Hin, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The investigation of thermal effect on dynamical shape changing of solder paste by using double-view Digital holography

T. Thong-on, T. Prakobsang, W. Pedsantad, , C. Boonsri, S. Plaipichit<sup>b</sup>, P. Buranasiri\*, and K. Yoshimori<sup>c</sup>

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

<sup>b</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand, 10110

<sup>c</sup>Department of Electrical Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka city, Iwate Pref 020-8551, Japan

## ABSTRACT

In this paper we propose a modern technique to evaluate the shape changes of solder paste by using double-view in-line digital holography. We observed the transformation of three different kinds of solder paste composition: pure solder paste, solder paste mixed with 0.02%, 0.05%, 0.10% graphene (GPN) and 0.02%, 0.05%, 0.10% graphene oxide (GPNO), respectively. The shape of the solder pastes was investigated at different melt temperatures (*i.e.* 200°C, 250°C, and 300°C) for 30 seconds using a collimated beam propagating through the solder paste, then being double reflected on a mirror and second incident on another sides of the solder paste. The double images bearing beams were recorded with a CCD sensor simultaneously. The single recorded digital hologram from double view technique was reconstructed using digital holography. The results show that the double-view technique provides reliably data. Moreover, it would be developed for observing more than two images by single holography writing in the future.

**Keywords:** Digital Holography, Solder paste, Reconstruction, Graphene, Graphene Oxide

## 1. INTRODUCTION

Digital holography (DH), a two-step process, composes of recording a hologram on CCD instead of photographic plate as in conventional holography and recovering the object wavefront by back-propagating the numerically reconstructed hologram to the object plane instead of using reconstructed light. DH technology is applying to a number of imaging research fields such as in microscopy and metrology. DH offers a number of significant advantages such as the ability to acquire holograms rapidly, availability of complete amplitude and phase information of the optical field, and versatility of the interferometric and image processing techniques as well known for being able to record and reconstruct image in three dimensions. Recently, DH and digital holographic image processing have become more advantage due to advances in megapixel electronic sensor, such as CCD (charge-coupled device) and CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor), with high space-bandwidth products<sup>1-7</sup>. Margins

Nowadays, the technology of printed circuit boards (PCB) has been improved to very small scale. With the Surface Mount Technology (SMT), the electronic component pitches have been decreased down to very small, thus the quality inspection of melted solder pastes is critical in surface mounting process due to ensuring solder joint reliability. In the SMT process, the inter-welding between electronic components and PCB is realized by solder paste. To reduce solder paste defects and save costs, inspecting melted solder paste immediately after the printing process is indispensable.

The solder paste is a compound of the metal powder containing mixture of liquid called flux which is used to inter-welding electronic components on printed circuit boards (PCB). In the recent years, the electronic industry is moving towards lead free manufacturing processes, so SnAgCu (SAC305) solder paste compositions emerged as a new choice. Solder paste has to fulfill several aspects such as good wetting, which means the shape of a smooth, unbroken, uniform, good joint on the base metal. Solder paste wettability can be determined from the contact angle between the solder paste and PCT (the best angle need to be closed to 0°). The research fields for investigation the effect of solder paste with different conditions such as influence of soldering from temperature, time, thickness, composition etc.<sup>8-12</sup>, are needed to

\*kbpratha@kmitl.ac.th

International Conference on Photonics Solutions 2015, edited by N. Chattham, A. Pattanapokratana, S. Chiangga, S. Sumriddetchajorn, Proc. of SPIE Vol. 9659, 965912 · © 2015 SPIE  
CCC code: 0277-786X/15/\$18 · doi: 10.1117/12.2196277

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารใช้งานเพื่อการสื่อสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Proc. of SPIE Vol. 9659 965912-1

ไม่ควรถูกใช้โดยที่อื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
Downloaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 09/25/2015 Terms of Use: <http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx>

be done. The quality inspection of solder paste print by using Optical geometry methods<sup>13-14</sup> also have been one of effective approaches, in order to come up with an effective way to investigate the physical, thermal and mechanical properties of solder paste.

Recently, graphene, a single layer of graphite, has been attracted for its excellence properties, such as extraordinary electrical, thermal and physical properties. One of the advantage properties of graphene is a zero-overlap semimetal (with both holes and electrons as charge carriers) with very high electrical conductivity<sup>15-16</sup>. In addition, the bulk carbon allotrope disperses in basic solutions to yield monomolecular sheets, known as graphene oxide by analogy to graphene. Graphene oxide sheets have been used to prepare a strong paper-like material, and have recently attracted substantial interest as a possible intermediate for the manufacture of graphene. Hence, solder paste would potentially take full advantage of the superior thermal, electrical and mechanical properties of graphene and graphene oxide.

In this research, the dynamical shape changing of three different composition of concentration by weight of graphene and graphene oxide SnAgCu solder pastes with different melt temperatures have been investigated by using double view Digital Holography (DH) in our laboratory. By using this technique, the two size images of transformation of solder paste sides can be observed simultaneously.

## 2. EXPERIMENTAL METHOD

### 2.1 Materials

The materials that we used in our research were graphene and graphene oxide, which were mixed and stirred to solder paste with 0.02%, 0.05% and 0.1% concentration by weight as following equation

$$WT\% = \frac{\text{GPN or GPNO weight}}{\text{GPN or GPNO weight} + \text{solder weight}} \times 100\% \quad (1)$$

Then, the completed samples will be chilled in a refrigerator for treating solder's humidity. Next, the solder paste was put into a mold block dimension of 5.5 mm diameter and 1.5 mm height. As shown in figure 1, then, the fit solder was heated by put on a copper plate and a hot plate with different temperatures of 200°C, 250°C and 300°C successively, for 30 seconds and captured dried solder paste's images by in-line DH system with a CCD camera. The shape transformation and resistances of a pure solder paste and solder paste with different amount of graphene and graphene oxide have been investigated.



Figure 1. A completely solder paste with a copper plate on a hot plate.

### 2.2 In-line Digital Holography setup

The experimental setup of an in-line DH system was shown in Figure 2. In our setup, a laser diode (LCM115/633/1, 1 mW, 635 nm) was used as the light source and a lens  $L_1$  ( $f_1 = 175$  mm and 25.4 mm diameter) was used for expanding

the beam that propagated through a heated sample plate. Two mirrors were used for reflecting the laser light to do a double view of solder paste and writing the hologram of two sides of the solder paste on a CCD camera simultaneously.

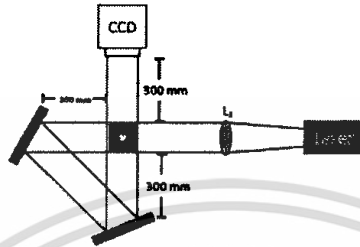


Figure 2. The schematic diagram of double view In-line Digital Holography setup.

For the reconstruction step, the reconstructed images are reconstructed by numerical process based on Angular spectrum which was written in equation (2). The optical field on reconstruction plane  $R(\xi', \eta', z)$  can be written by inverse Fourier transform of hologram field.

$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1} \left\{ F \{ h(x, y, 0) \} \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z \right) \right\} \quad (2)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The solder paste without GPN and GPNO images are shown in Table 1. Here, recorded and reconstructed images of a double-view of a pure solder paste sides have been used as a reference for carbon allotrope mixed solder paste. Two sides of a solder paste recording were shown in the first column of the table 1 and reconstructed images of both sides were shown in the first row of reconstructed images column. The height of solder paste after heating was shown in the second row of the reconstructed images column using for determining the contact angles. Images of solder paste with different graphene (GPN) and graphene oxide (GPNO) concentration was shown in Table 2. For measuring the contact angle ( $\theta_c$ ) between the liquid-vapor interface and the solid-liquid interface, first, the solder height has been measured and then used trigonometric function for calculating as  $\theta_c = \tan^{-1}(\text{height} / \text{base})$  as shown in Figure 4. The experimental image results of solder with 0.02%, 0.05%, and 0.1% by weight of graphene and graphene oxide concentration at 250°C have been shown in Table 2. From our experimental observing, solder paste has not melted completely at 200°C as shown in Figure 3. At 300°C, flux was melted around the sample and uncovers solder paste as shown in Figure 3. From our exploring, an increase GPN and GPNO concentration brought larger the average contact angle. It maybe happen from a graphene sheet piles up, layer by layer. The average resistance of the solder paste was decreasing, with the increasing of the concentration of GPN and GPNO in the solder paste.

Table 1. Recorded and reconstructed images of a double-view of a pure solder paste sides used as a reference for carbon allotrope mixed solder paste. The contact angle on first and second sides of the solder images is 11.27° and 10.98°, respectively, *i.e.* the average contact angle of a reference is 11.127°.

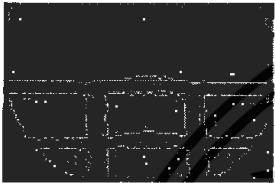
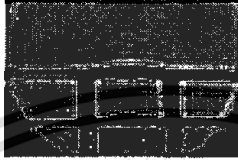
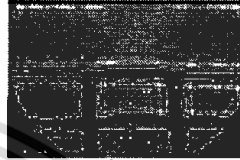

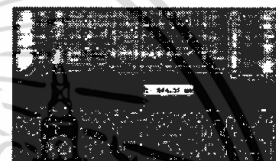
Recorded image	Reconstructed images	
	<p style="text-align: center;">1</p>  <p style="text-align: center;">1<sup>st</sup> view</p>	<p style="text-align: center;">2</p>  <p style="text-align: center;">2<sup>nd</sup> view</p>
	<p style="text-align: center;">3</p>  <p style="text-align: center;"><math>\theta_c = 11.27^\circ</math></p>	<p style="text-align: center;">4</p>  <p style="text-align: center;"><math>\theta_c = 10.98^\circ</math></p>

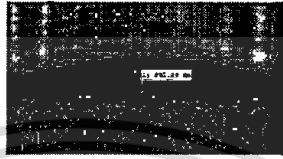
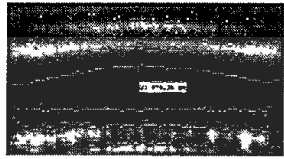



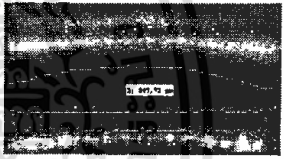


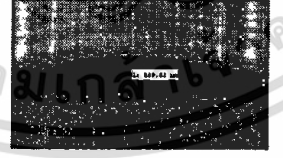

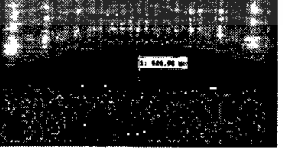
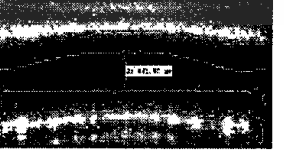


Figure 3 (a) a solder paste melting images at 200°C and (b) at 300°C.



Fig. 4 (a) A schematic diagram for measuring a contact angle of a solder paste on an surface and (b) The measurement of different dimension of a solder paste from its reconstructed image.

Table 2. Recorded and reconstructed of a double-view images of solder pastes with different graphene and graphen oxide concentration.

Concentration (% by weight)		Average contact angle (degree)	Average resistance ( $\Omega$ )	Reconstructed images	
				1 <sup>st</sup> view	2 <sup>nd</sup> view
Graphene	0.02	10.862	0.0333		
	0.05	13.420	0.0300		
	0.1	14.462	0.0300		
Graphene Oxide	0.02	15.470	0.0400		
	0.05	15.557	0.0367		
	0.1	15.647	0.0300		

#### 4. CONCLUSION

In this paper, dynamical of the shape changes of solder paste using double-view digital holography was investigated. We explored three different solder paste composition: pure solder paste, solder paste mixed with 0.02%, 0.05%, and 0.10% graphene (GPN) and 0.02%, 0.05%, 0.10% graphene oxide (GPNO), respectively. The sample at 200°C wasn't changed from the solid state to liquid state and its physical has been changed to grey color and ruggedness bottom. At 250°C, the solder paste was changed the state and smooth surface cover by flux. At 300°C the solder paste was burned and flux melted around and uncovers solder paste as well. The best of shape was found when solder paste mixed with concentration by weight of Graphene 0.02%, the angle of this shape is 10.802 degree and the best conductivity found when solder paste mixed with concentration by weight of Graphene 0.02%, 0.05% and 0.1%.

#### REFERENCES

- [1] D.Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*. 161, PP. 777-778, 1948.
- [2] D.Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts," *Proc.Roy.Soc.* 197, PP.454-487, 1949.
- [3] D.Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts2," *Proc.Phy.Soc.* 64, PP.449-469, 1951.
- [4] Lei Tian, Nick Loomis, Jose A. Dominguez-Caballero, George Barbastathis, "Quantitative measurement of size and three-dimensional position of fast-moving bubbles in air-water mixture flows using digital holography," *Applied Optics*, Vol. 49, No. 9, 20 March 2010.
- [5] Myung-K. Kim, "Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy," *Journal of the Optical Society of Korea*. Vol. 14, Issue 2, PP. 77-89, 2010.
- [6] D. Carl, B. Kemper, G. Wernicke, G. Bally, "Parameter optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell analysis," *Appl. Opt.* 43, pp. 6536-6544, 2004.
- [7] Suwan Plaipichit, Prathan Buranasiri, "Moisture effect of fingerprint using total internal reflection digital in-line holography," *Optical Engineering* 53(11), 112315, November, 2014.
- [8] Xinyu Wu, Wing Kwong Chung, Jun Cheng, Hang Tong, and Yangsheng X "A Parallel-Structure Solder Paste Inspection System" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 14, no. 5, pp. 590-597, October, 2009.
- [9] S. Nurmi, J. Sundelin, E. Ristolainen, T. Lepisto. "The effect of solder paste composition on the reliability of SnAgCu joints," *Micron Electronics Reliability* 44, pp. 485-494, 2004.
- [10] Kamolwipa Puengchiak, Chaipanom Nookeaw, Kannachai Kanlayasiri. "A study on influence of soldering Temperature and Time on Thickness of Intermetallic Compound Layer Between Sn-58Bi Solder and Copper Substrate", *IE Network Conference* 2014, October.
- [11] X.D. Liu, Y.D. Han, H.Y. Jing, J. Wei, L.Y. Xu, "Effect of graphene nanosheets reinforcement on the performance of Sn-Ag-Cu lead-free solder," *Materials Science and Engineering*, A562, pp. 25-32, 2013.
- [12] P. Arulvanan, Z.W. Zhong, "Assembly and reliability of PBGA packages on FR-4 PCBs with SnAgCu solder," *Microelectronic Engineering* 83, pp. 2462-2468, 2006.
- [13] Richard R. Lathrop, Jr. "Solder Paste Print Qualification Using Laser Triangulation", *IEEE Transactions on components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part C*, Vol. 20, No. 3, July 1997.
- [14] Hsu-Nan Yen, Du-Ming Tsai, and Jun-Yi Yang, "Full-Field 3-D Measurement of Solder Pastes Using LCD-Based Phase Shifting Techniques", *IEEE Transactions on components, Packaging, and Manufacturing*, vol. 29, No. 1, January 2006.
- [15] Jesus de La Fuente., <http://www.graphenea.com/> <http://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.VW1w7M8irIV>
- [16] John Colapinto., *annals of innovation*, <http://www.newyorker.com/magazine/2014/12/22/materialquestion>, (December 22, 2014)