

การศึกษาสารเชื่อมประสานเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปโดยใช้อินไลน์

ดิจิตอลโฮโลกราฟี

OBSERVING MELTING SOLDER PASTE MIX WITH CARBON

ALLOTROPES BY USING IN-LINE DIGITAL HOLGRAPHY TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ฟิลิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิลิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-030-063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OBSERVING MELTING SOLDER PASTE MIX WITH CARBON
ALLOTROPES BY USING IN-LINE DIGITAL HOLGRAPHY TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2022-SC-M-030-063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสารเชื่อมประสานเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปโดยใช้ อินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี OBSERVING MELTING SOLDER PASTE MIX WITH CARBON ALLOTROPEES BY USING IN-LINE DIGITAL HOLGRAPHY TECHNIQUE
ชื่อนักศึกษา	นางสาววิภาสมา มามาตย์
รหัสนักศึกษา	62605046
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุนสมบัติและความสัมพันธ์ของสารโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์ กราฟีนควอนตัมดอทและฟูลเลอร์ีนที่ความเข้มข้น 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 และ 0.1 wt.% โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านสัณฐานวิทยา การตกต่ำ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว ค่ามัมสัมผัสเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเปียกหรือการยึดติดของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้อินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟีในการศึกษาสัณฐานวิทยา ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายและค่ามัมสัมผัสของตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลว โดยในการทดลองจะใช้แสงลำแสงเดี่ยวเป็นลำแสงวัตถุและลำแสงอ้างอิง ใช้กล้องซีมอสในการบันทึกภาพโฮโลแกรม หลังจากนั้นนำภาพที่ได้ไปสร้างภาพด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การสร้างภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีสเปกตรัมเชิงมุม ซึ่งภาพที่ได้จะสามารถศึกษารูปร่าง ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายและค่ามัมสัมผัสของสารโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเปียกหรือการยึดติด

คำสำคัญ : โลหะบัดกรี คาร์บอนอัลโลโทรป แกรไฟต์ กราฟีนควอนตัมดอท ฟูลเลอร์ีน อินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี มัมสัมผัส

Thesis Title	Observing Melting Solder Paste Mix with Carbon Allotropes by Using In-Line Digital Holography Technique
Student Name	Miss Wikatsama Mamart
Student ID	58051140
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2022
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Prathan Buranasiri

Abstract

In this research we investigated the properties and relevance of commercial SAC305 solder paste mixing with some carbon allotropes such as graphite, graphene quantum dots and fullerene of varying concentrations 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 and 0.1 wt.% by investigated on morphological, slumping temperature, melting temperature, spread factor, spread ratio and contact angle to analyze wettability. Which in this research was used in-line digital holography for determining the morphological, spread factor, spread ratio and contact angle of samples at each temperature which the samples have been heating from room temperature until the melting temperature. In the experiment, only one beam was used as the object and reference beams which recorded by a CMOS camera. The recorded image was reconstructed by the angular spectrum digital holography numerical programing. Using the reconstructed images of our results, the shape, spread factor, spread ratio and contact angle of solder pastes can be investigated to analyze wettability.

Keywords : solder paste, carbon allotropes, graphite, graphene quantum dots, fullerene, in-line digital holography, contact angel

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ความสามารถและทักษะความเชี่ยวชาญในด้านต่างๆหลายด้าน ซึ่งผู้ทำการวิจัยไม่สามารถดำเนินการวิจัยและทำงานวิจัยนี้ให้ประสบผลสำเร็จลุล่วงออกมาเป็นรูปธรรมได้ หากขาดบุคคลที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ลำดับแรก ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบหมายและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยให้ได้ทำงานในหัวข้อวิจัยนี้ ให้ความรู้และคำแนะนำในต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานและเป็นผู้ดูแลผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์นี้

ลำดับที่สอง ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ณัฐกฤษ สมดอก ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการเตรียมสารตัวอย่างรวมถึงในการทำการทดลอง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ลำดับที่สาม ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.จันทิรา บุญศรี ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับการปฏิบัติงาน คอยให้ความรู้และเทคนิค วิธีการต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงาน

ลำดับที่สี่ ผู้วิจัยขอขอบคุณประธานกรรมการและกรรมการที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้

และท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รัก ที่ช่วยสนับสนุนทางการเงินและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน สำหรับความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้

วิรัชมา มามาตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โฮโลกราฟีและดิจิตอลโฮโลกราฟี	6
2.1.1 โฮโลกราฟี (Holography).....	6
2.1.2 ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital holography)	7
2.1.3 หลักการการทำงานของดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	8
2.1.4 การสร้างภาพโฮโลแกรม (Holographic Reconstruction).....	9
2.1.5 การจัดระบบดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital holography configuration).....	11
2.2 ความสามารถในการเปียก (Wetting).....	12
2.2.1 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)	13
2.2.2 ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)	14
2.2.3 อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)	14
2.3 สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี (Solder Paste) และการบัดกรี (Soldering) ...	14
2.3.1 สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี (Solder Paste).....	14
2.3.2 การตกต่ำ (Slumping).....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การบัดกรี (Soldering).....	15
2.4 คาร์บอนอัลโลโทรป (Carbon Allotropes).....	16
2.4.1 แกรไฟต์ (Graphite)	17
2.4.2 กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene Quantum dots).....	18
2.4.3 ฟูลเลอร์รีน (Fullerene).....	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	23
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	25
3.2.1 Set-up ระบบแบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี.....	25
3.2.2 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปวางบนแท่นทำความร้อน.....	26
3.2.3 ถ่ายภาพชิ้นตัวอย่าง.....	26
3.3 ขั้นตอนการประมวลผล	27
3.3.1 การหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle).....	28
3.3.2 การหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor).....	29
3.3.3 การหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio).....	29
3.3.4 การตกต่ำ (Solder paste slump).....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	31
4.1 ความคมชัดของภาพ (Shape).....	31
4.2 ประสิทธิภาพของการตกต่ำ (Solder paste slump).....	31
4.3 อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting).....	33
4.4 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle).....	34
4.5 ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)	35
4.6 อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)	36
4.7 การวัดค่า XRD (XRD Measurement).....	37
4.8 การวัด EDS (EDS Measurement).....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 การวัดรูพรุน (Porosity measurement).....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก. ภาพไฮโลแกรมของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรป.....	45
ภาคผนวก ข. ภาพของการสร้างภาพและการหาค่ามุมสัมผัส.....	79
ภาคผนวก ค. ผลงานทางวิชาการ.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงอุณหภูมิของการหลอมเหลวของสารบัดกรีไร้สารตะกั่ว	15
3.1 แสดงอัตราส่วนของสารโลหะบัดกรีกับสารคาร์บอนอัลโลโทรปที่ใช้	23
4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของการตกต่ำ	32
4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของการหลอมเหลว	33
4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัส	34
4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัว	35
4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัว	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพแสดงการบันทึกภาพโฮโลแกรม.....	7
2.2 ภาพแสดงการสร้างภาพดิจิทัลโฮโลแกรม.....	8
2.3 ภาพแสดงการอ่านภาพดิจิทัลโฮโลแกรม.....	9
2.4 ภาพแสดงการจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออฟเอซิส.....	11
2.5 ภาพแสดงการจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์.....	12
2.6 ภาพแสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้ Euclidean geometry.....	13
2.7 ภาพแสดงอัญรูปของคาร์บอน.....	16
2.8 ภาพแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์.....	18
2.9 ภาพแสดงกราฟีนควอนตัมดอท.....	19
2.10 ภาพแสดงโครงสร้างของฟูลเลอร์รีน.....	20
3.1 ภาพแสดงสารตัวอย่างของโลหะบัดกรี แกรไฟต์ กราฟีนควอนตัมดอทและฟูลเลอร์รีน.....	24
3.2 ภาพแสดงสารตัวอย่างเมื่อวางบนแผ่นทองแดง.....	24
3.3 ภาพแสดงการจัดระบบแบบ In-Line Digital Holography.....	25
3.4 ภาพแสดงไดอะแกรมของการจัดระบบแบบ In-Line Digital Holography.....	25
3.5 ภาพแสดงการหลอมเหลวของสารโลหะบัดกรีเมื่อผสมคาร์บอนอัลโลโทรป.....	26
3.6 ภาพแสดงไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลอง.....	27
3.7 ภาพแสดงภาพที่ได้จากการสร้างภาพ.....	28
3.8 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่ามุมสัมผัสของสารบัดกรี.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว	29
3.10 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว	29
3.11 ภาพแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์การตกต่ำ	30
4.1 ภาพแสดงการเปรียบเทียบของความคมชัด	31
4.2 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของการตกต่ำ	32
4.3 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของอนุกรมของการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเมื่อผสมแกรไฟต์ กราฟีน ควอนตัมดอทและฟูลเลอร์ีน	33
4.4 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี	35
4.5 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี	37
4.6 ภาพแสดงผล XRD ของการผสมแกรไฟต์หลังจากหลอมเหลวที่ 230 °C	38
4.7 ภาพแสดงการวิเคราะห์ EDS ของสารประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีเมื่อผสมแกรไฟต์	38
4.8 ภาพแสดงลักษณะรูพรุนของสารตัวอย่าง	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โฮโลกราฟี (Holography) คือเทคนิคที่ใช้ในการถ่ายภาพและการสร้างภาพใหม่ โดยในการถ่ายภาพของ โฮโลกราฟีนั้นไม่ใช่เพียงแค่การฉายรังสีไปยังแต่ละจุดของภาพเท่านั้นแต่ยังรวมไปถึงทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นที่แพร่กระจาย ณ จุดต่างๆบนวัตถุนั้นด้วย ซึ่งคำว่า holography มาจากคำในภาษากรีก โดยที่คำว่า “holos” หมายถึงทั้งหมด ส่วนคำว่า “graphein” หมายถึงการเขียน ดังนั้นเมื่อนำมารวมกันคำว่า holography จึงหมายความว่า การบันทึกภาพอย่างสมบูรณ์ ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้จะประกอบไปด้วยความเข้มหรือแอมพลิจูดและเฟสโดยใช้เทคนิคการบันทึกการแทรกสอดของแสง (Interference Pattern) โดยเทคนิคดังกล่าวถูกค้นพบโดยเดนนิส กาบอร์ (Dennis Gabor) ในปี ค.ศ. 1947 ซึ่งภาพที่ถ่ายได้นั้นเรียกว่าภาพโฮโลแกรม (Hologram) โดยภาพโฮโลแกรมนี้มีลักษณะเป็น 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นจากการแทรกสอดของลำแสง 2 ลำ ได้แก่ ลำแสงอ้างอิง (Reference beam) และลำแสงวัตถุ (Object beam) โดยการแทรกสอดของลำแสงจะถูกบันทึกไว้บนแผ่นฟิล์ม (Holographic film) และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการการล้างฟิล์ม จะสามารถสังเกตเห็นภาพโฮโลแกรมภายในแผ่นฟิล์มได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งของการมองภาพ ซึ่งเห็นได้ว่าภาพโฮโลแกรมที่เกิดขึ้นมีความชัดลึกและดูมีมิติมากกว่าภาพทั่วไป ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องมือหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาใช้ในเทคโนโลยีโฮโลกราฟีเพื่อบันทึกภาพแทนที่แผ่นฟิล์ม เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัลชนิด CCD หรือ CMOS โดยจะเรียกว่าดิจิทัลโฮโลกราฟี (Digital holography) ดิจิทัลโฮโลกราฟีเป็นเทคนิคสำหรับการถ่ายภาพโฮโลแกรมผ่านกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและสร้างภาพภายในคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบเดิมมีข้อจำกัดในเรื่องของแผ่นรับแสงที่ทำจากฟิล์มซึ่งสามารถใช้ได้แค่เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ทำให้ภาพที่ได้เป็นแบบไม่เรียลไทม์ ดังนั้นดิจิทัลโฮโลกราฟีจึงถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ไขในเรื่องการใช้งานที่ใช้ได้เพียงแค่ครั้งเดียวนี้ โดยการนำกล้องดิจิทัลเป็นตัวบันทึกข้อมูลของภาพยังทำให้สามารถถ่ายภาพได้แบบค่อนข้างที่จะเรียลไทม์อีกด้วย ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆมากมายไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์รูปแบบของตัวอย่าง การวัดการกระจายตัวของอนุภาค การวัดรูปร่างและไมโครสโคปี เป็นต้น หรือแม้กระทั่งในทางการแพทย์ เช่นการวิเคราะห์รูปร่างในเนื้อเยื่อของวัตถุที่นำส่งสียเพื่อจะช่วยให้สามารถวินิจฉัยและเลือกการรักษาได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมและเนื่องจากโฮโลกราฟีเป็นวิธีการถ่ายภาพเฟสจึงมีการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆมากมายไม่ใช่แคในด้านอุตสาหกรรมเท่านั้น [1,2]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ เครื่องมือ หรือ อุปกรณ์ใหม่ๆขึ้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีประสิทธิภาพและความพร้อมในการทำงานมากขึ้น โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม ความรวดเร็วและขนาดที่เล็กลง ซึ่งประเด็นหลักประการหนึ่งของประสิทธิภาพทางอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อหรือการต่ออุปกรณ์ เช่นการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผงวงจรพิมพ์ (PCB) โดยการเชื่อมประสานหรือการบัดกรี (Soldering) นั้นเป็นวิธีการเชื่อมวัสดุเข้าด้วยกัน นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี (Solder Past) เป็นส่วนผสมระหว่างตะกั่วและดีบุก แต่ในปัจจุบันมีการใช้ตะกั่วลดลง เนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารเคมีที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในอุตสาหกรรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจึงหันมาใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วแทน (Lead-Free Solder) ในบรรดาโลหะบัดกรีที่ปราศจากตะกั่ว นั้น SnAgCu ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น จุดหลอมเหลวต่ำและความสามารถในการบัดกรีสูง ในการบัดกรีนั้น เรามักจะให้ความสนใจคุณสมบัติบางอย่างไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting), ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Interface Intermetallic compound) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือคุณสมบัติด้านการเปียกหรือการยึดติด (Wetting) รวมไปถึงค่าของมุมสัมผัสด้วย คุณสมบัติการเปียกหรือการยึดติด (Wetting) ของโลหะบัดกรีเป็นสิ่งสำคัญในการทำให้เกิดพื้นผิวที่ราบเรียบ ไม่แตกหัก สม่ำเสมอและมีรอยต่อที่ติดกับพื้นผิวของชิ้นงาน ในการปรับปรุงคุณภาพของโลหะบัดกรีโดยการเพิ่มองค์ประกอบของสารประกอบนั้น ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและสามารถอธิบายได้ในรูปของความสามารถในการเปียกหรือความสามารถในการยึดติด (Wettability) ก็คือหากโลหะบัดกรีมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายที่ดี แสดงว่ามีความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดได้ดีซึ่งสามารถศึกษาได้จากมุมสัมผัส (Contact angle) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการบัดกรีเนื่องจากมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของข้อต่อบัดกรี โดยทั่วไปแล้วระดับของการเปียก (Wetting) จะแสดงโดยมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวกับของเหลว ดังนั้น การศึกษาจำนวนมากมักจะศึกษาถึงจุดหลอมเหลวและความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดของโลหะบัดกรีรวมถึงมุมสัมผัส (Contact angle) ด้วย ในการวัดมุมสัมผัสในปัจจุบันสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานไปวัดมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle measurement) แต่จะเป็นการวัดมุมสัมผัสสุดท้ายเมื่อกระบวนการหลอมเหลวจบลงซึ่งไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของมุมตั้งแต่เริ่มทำการบัดกรีจนถึงกระบวนการของการหลอมเหลวสิ้นสุดลงได้และในปัจจุบันคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าเชิงกล ความร้อนและคุณสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะคุณสมบัติที่มีการนำไฟฟ้าได้ดีได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยในปัจจุบันได้มีการนำกราฟีนมาใช้ในการปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

คุณสมบัติเหล่านี้ และยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการศึกษาการผสมระหว่างคาร์บอนนาโนเมทิลเรย์ลบนโครงสร้างในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีความน่าสนใจโดยเฉพาะในกระบวนการเชื่อมประสานหรือการบัดกรี [3-7]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษถึงการเปลี่ยนแปลงของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี ทั้งด้านสัณฐานวิทยาารวมไปถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting) และความสามารถในการเปียกหรือการยึดติด (Wettability) ของโลหะบัดกรีเมื่อผสมคาร์บอนอัลโลโทรปเข้าไป โดยความสามารถในการเปียกสามารถวัดได้จากการวัดค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) โดยใช้อินไลน์ดิจิตอลโฮโลกราฟี (In-Line Digital Holography) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการบัดกรี (Solder wettability) ของตัวอย่างได้ โดยจะทำการศึกษาสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์, กราฟีนควอนตัมดอท, และฟูลเลอร์ีนเข้าไปในสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีชนิด SnAgCu ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ในการศึกษาคุณสมบัติและความสามารถในการบัดกรีโดยใช้วิธีการดิจิตอลโฮโลกราฟีมีประโยชน์เป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถที่จะทำการศึกษาชิ้นตัวอย่างได้ตั้งแต่เริ่มกระบวนการเชื่อมประสานจนกระบวนการเชื่อมประสานเสร็จสิ้น ทั้งยังเป็นการสังเกตแบบค่อนข้างที่จะเรียลไทม์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา (Morphological) ของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมแกรไฟต์, กราฟีนและฟูลเลอร์ีนที่ความเข้มข้น 0.00%, 0.01%, 0.02%, 0.04%, 0.05%, 0.06%, 0.08%, 0.10% โดยน้ำหนัก ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนจบกระบวนการของการหลอมเหลว
- 2) ศึกษาการตกต่ำ (Slumping), อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting), ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor), อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเปียกหรือการยึดติด (Wettability)
- 3) ใช้อินไลน์ดิจิตอลโฮโลกราฟี (In-line digital holography) ในการศึกษาค่าต่างๆที่ต้องใช้ของตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิของการหลอมเหลว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการใช้ระบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (In-line digital holography) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางด้านสัณฐานวิทยา (Morphological), การตกต่ำ (Slumping), อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting), ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor), อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปที่ความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิของการหลอมเหลว
- 2) ศึกษาการเตรียมโลหะบัดกรีเมื่อผสมคาร์บอนอัลโลโทรปที่ความเข้มข้น 0.00%, 0.01%, 0.02%, 0.04%, 0.05%, 0.06%, 0.08%, 0.10% โดยน้ำหนัก

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษาคุณสมบัติ ประโยชน์ และโครงสร้างของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีและสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์, กราฟีนควอนตัมดอทและฟูลเลอร์รีน
- 2) ศึกษาการใช้ระบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (In-line digital holography)
- 3) เตรียมสารตัวอย่าง
- 4) จัดระบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (In-line digital holography)
- 5) ถ่ายภาพขึ้นตัวอย่าง
- 6) สร้างภาพ (Reconstruction)
- 7) ศึกษาการตกต่ำ (Slumping), อุณหภูมิของการหลอมเหลว (melting), ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor), อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปียกหรือการยึดติด (Wettability)
- 8) เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรป
- 9) สรุปผลงานวิจัย
- 10) เขียนรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้การจัดระบบทางแสงของดิจิทัลโฮโลกราฟี รวมไปถึงการถ่ายภาพและการสร้างภาพในระบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี

- 2) ได้เรียนรู้การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปทั้งด้านการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ, การตกต่ำ (Slumping), อุณหภูมิของการหลอมเหลว (melting), ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor), อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเปียกหรือการยึดติด (Wettability)
- 3) ลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

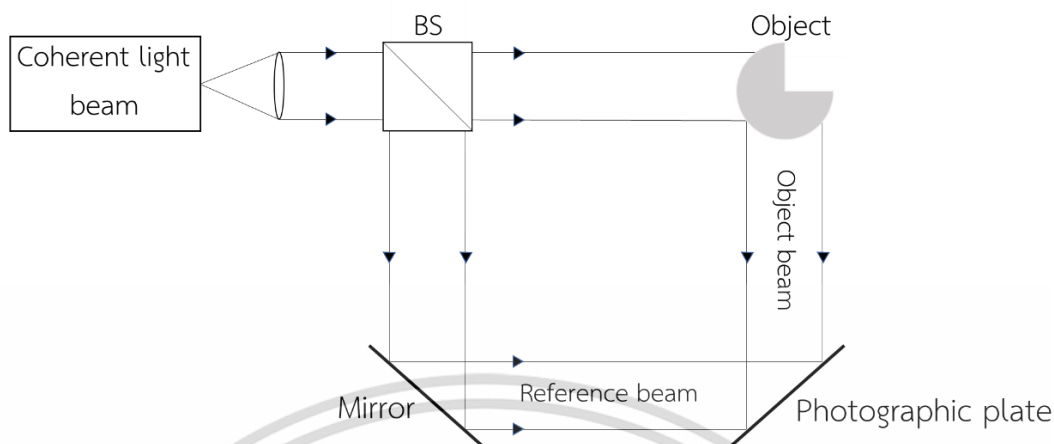
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงประวัติความเป็นมา หลักการทำงาน การสร้างภาพและการจัดระบบตลอดจนการประยุกต์ใช้งานของดิจิทัลโฮโลกราฟี รวมไปถึงความสามารถในการเปียก การวัดมุมสัมผัส โลหะบัดกรี การบัดกรี สารคาร์บอนอัลโลโทรป

2.1 โฮโลกราฟีและดิจิทัลโฮโลกราฟี [1,2]

2.1.1 โฮโลกราฟี (Holography)

โฮโลกราฟี (Holography) คือกระบวนการถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคการบันทึกริ้วของการแทรกสอดของแสง (Interference Pattern) ซึ่งภาพที่ได้เรียกว่า ภาพโฮโลแกรม (Hologram) ภาพโฮโลแกรมจะมีลักษณะเป็น 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นจากการแทรกสอดของลำแสง 2 ลำ ได้แก่ ลำแสงอ้างอิง (Reference beam) และลำแสงวัตถุ (Object beam) โดยการแทรกสอดของลำแสงจะถูกบันทึกไว้บนแผ่นฟิล์ม (Holographic film) หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการการล้างฟิล์มก็จะสามารถสังเกตภาพโฮโลแกรมภายในแผ่นฟิล์มได้จากการนำภาพไปส่องสว่างด้วยแสงโดยการขยับภาพเพื่อหาตำแหน่งของการเกิดภาพหรือส่องด้วยแสงเลเซอร์ที่มีรูปแบบของหน้าคลื่นที่สอดคล้องกัน โดยเทคนิคโฮโลกราฟีเป็นเทคนิคที่ช่วยให้วัตถุที่ได้รับการบันทึกและสร้างภาพขึ้นใหม่นั้นเป็นภาพที่แสดงถึงตำแหน่งเดิมของวัตถุที่ถ่ายภาพ ซึ่งเราสามารถมองเห็นได้ราวกับว่าวัตถุชิ้นนั้นยังคงเป็นปัจจุบันอยู่ ซึ่งภาพที่บันทึกได้นั้นจะแสดงในลักษณะภาพสามมิติ โดยทั่วไปแล้วโฮโลแกรมนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ white-light hologram โดยภาพโฮโลแกรมที่ได้นั้นจะสามารถอ่านภาพได้ด้วยการนำแผ่นฟิล์มที่ผ่านการบันทึกภาพไปส่องสว่างด้วยแสงธรรมชาติและประเภทที่สองคือภาพโฮโลแกรมที่อ่านภาพด้วยการส่องสว่างจากแสงเลเซอร์หรือแสงที่มีหน้าคลื่นเดียวกัน โดยหลักการการทำงานของโฮโลกราฟีดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงการบันทึกภาพโฮโลแกรม

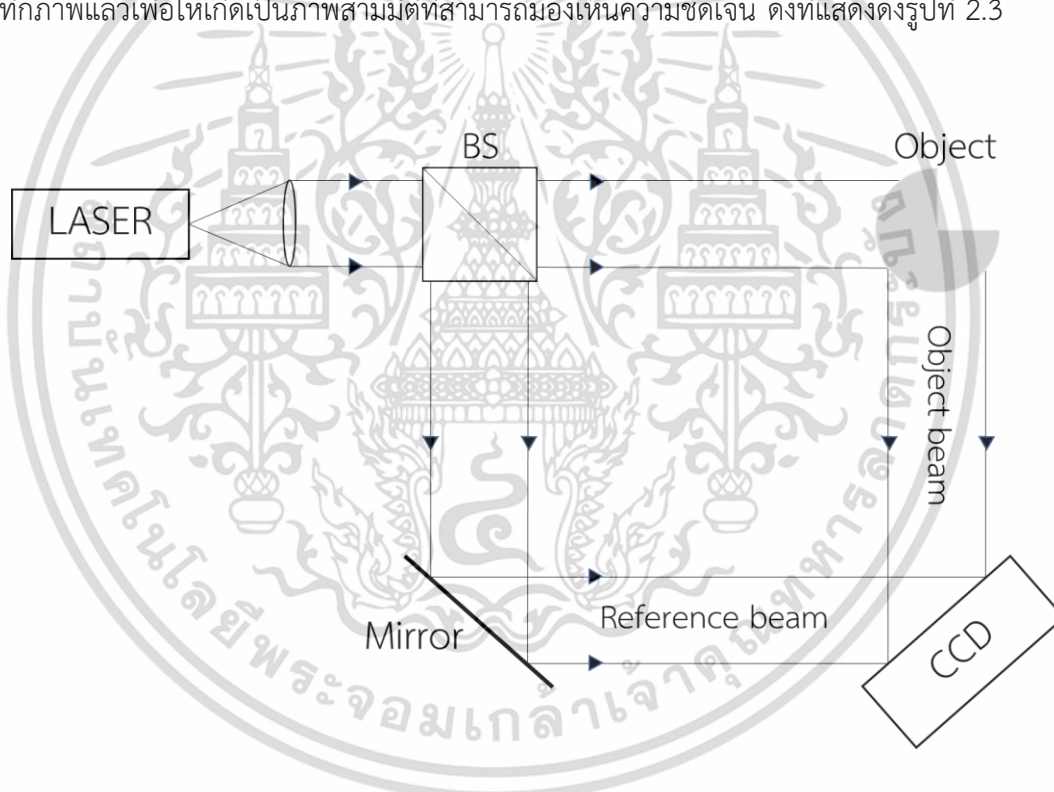
2.1.2 ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital holography)

ส่วนของดิจิตอลโฮโลกราฟีนั้นได้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อบันทึกภาพแทนที่แผ่นฟิล์ม เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิตอลชนิดเซนเซอร์รับภาพแบบซีซีดี (CCD : Charge Coupled Devices) หรือแบบซีมอส (CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor) เนื่องจากการถ่ายโฮโลแกรมแบบเดิมจะมีข้อจำกัดเนื่องจากแผ่นรับแสงที่ทำจากฟิล์มนั้นสามารถใช้ได้เพียงแค่ครั้งเดียวเท่านั้น ทำให้ภาพที่ได้เป็นแบบไม่เรียลไทม์ ดังนั้นดิจิตอลโฮโลกราฟีจึงถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ไขในเรื่องของการใช้งานที่ใช้ได้เพียงแค่ครั้งเดียวนี้ โดยจะใช้กล้องดิจิตอลเป็นตัวบันทึกข้อมูลภาพ โดยข้อมูลภาพที่ได้นั้นจะประกอบไปด้วยแอมพลิจูดและเฟส โดยภาพดิจิตอลโฮโลแกรมที่ถูกบันทึกได้จะอยู่ในรูปแบบดิจิตอลโฮโลแกรม ที่สามารถเปิดชมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์หรือกล้องถ่ายภาพดิจิตอลได้ทันทีซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถถ่ายภาพได้แบบเรียลไทม์ ทำให้ภาพดิจิตอลโฮโลแกรมมีข้อได้เปรียบกว่าการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบเดิมทั้งสามารถเก็บรักษาภาพได้นานในแหล่งเก็บข้อมูลดิจิตอล ไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรแผ่นฟิล์มและเสี่ยงต่อความเป็นพิษเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในการล้างรูปโฮโลแกรม นอกจากนี้ ยังสามารถแก้ไขและปรับเปลี่ยนระยะโฟกัสของภาพดิจิตอลโฮโลแกรมได้ตลอดเวลาอีกด้วย ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆมากมาย เช่น การวิเคราะห์รูปแบบของตัวอย่าง การวัดการกระจายตัวของอนุภาค การวัดรูปร่าง ไมโครสโคป เป็นต้น แม้กระทั่งในทางการแพทย์ เช่นการวิเคราะห์รูปร่างในเนื้อเยื่อของวัตถุที่น่าสงสัยเพื่อจะช่วยให้สามารถวินิจฉัยและเรื่องการรักษาได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เนื่องจากโฮโลกราฟีคือวิธีการถ่ายภาพเฟสจึงมีการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆมากมายไม่ใช่เพียงแค่ในด้านอุตสาหกรรมเท่านั้น

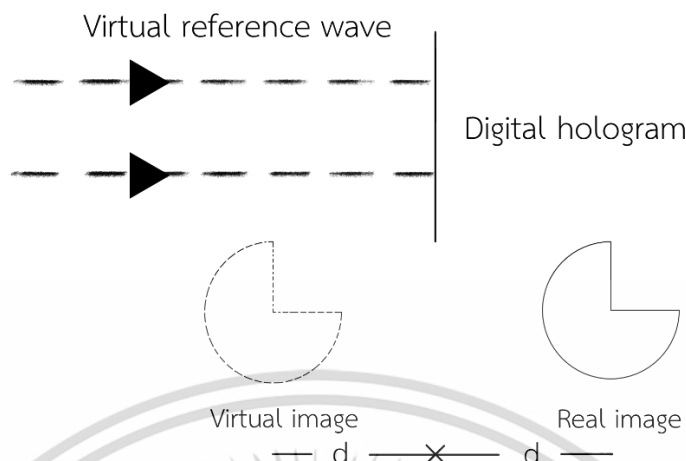
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 หลักการการทำงานของดิจิตอลโฮโลกราฟี

การสร้างภาพโฮโลแกรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือการสร้างภาพหรือการบันทึกภาพ (recording of image) โดยดิจิตอลโฮโลกราฟีใช้หลักการในการบันทึกภาพด้วยการฉายแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงแล้วแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยแสงลำแรกเป็นลำแสงอ้างอิงสะท้อนไปยังเซ็นเซอร์ของกล้องดิจิตอลชนิดซีซีดีหรือซีมอส แสงลำที่สองส่งผ่านไปตกกระทบวัตถุและสะท้อนไปยังเซ็นเซอร์ของกล้องดิจิตอล หลังจากนั้นแสงทั้งสองลำจะถูกบันทึกไว้ด้วยกล้องดิจิตอลในรูปแบบของการแทรกสอดของแสง (Interference Pattern) โดยภาพที่ถูกบันทึกได้นั้นจะอยู่ในรูปแบบของดิจิตอลโฮโลแกรม (digital hologram) ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 ในขั้นตอนที่สองคือการอ่านภาพหรือการสร้างภาพใหม่ (reconstruction of image) เป็นการสร้างภาพให้เกิดเป็นภาพสามมิติหลังจากที่ได้ผ่านขั้นตอนการบันทึกภาพแล้วเพื่อให้เกิดเป็นภาพสามมิติที่สามารถมองเห็นความชัดเจน ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการสร้างภาพดิจิตอลโฮโลแกรม



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงการอ่านภาพดิจิทัลโฮโลแกรม

2.1.4 การสร้างภาพโฮโลแกรม (Holographic Reconstruction)

เมื่อผ่านขั้นตอนการบันทึกภาพดิจิทัลโฮโลแกรมแล้ว ในกระบวนการนี้จะทำการสร้างภาพโฮโลแกรม โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ได้แก่ ค่าประมาณของเฟรสเนล (Fresnel approximation) หลักการคอนโวลูชัน (Convolution) หลักการสเปกตรัมเชิงมุม (Angular spectrum) และวิธีการกู่คินเฟส ส่วนในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสร้างภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีสเปกตรัมเชิงมุม โดยวิธีการสเปกตรัมเชิงมุมคือการใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายสนามทางแสงของระนาบการแพร่ของแสง รวมทั้งยังใช้ในการสร้างภาพในดิจิทัลโฮโลแกรม โดยวิธีนี้จะใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) และแปลงฟูเรียร์กลับ (Inverse Fourier Transform) เพื่อสร้างดิจิทัลโฮโลแกรม เช่นเดียวกับวิธีคอนโวลูชัน (Convolution) แต่มีข้อดีกว่าในระยะทางของการสร้างภาพ ซึ่งสามารถสร้างภาพขึ้นใหม่ได้อย่างถูกต้องในระยะที่วัตถุอยู่ใกล้ๆ

หลักการสเปกตรัมเชิงมุม (Angular spectrum)

กำหนดให้ระนาบ $z = 0$ คือระนาบที่วัตถุ (ξ, η) และระนาบของสนามวัตถุ $O(\xi, \eta)$ และใช้การแปลงฟูเรียร์แบบ 2 มิติ จะได้

$$\begin{aligned} O'(f_\xi, f_\eta; 0) &= F\{O(\xi, \eta, 0)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] d\xi d\eta \end{aligned} \quad (2.1)$$

และการแปลงฟูเรียร์กลับ (inverse Fourier Transform) ของ Angular spectrum จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
O(f_\xi, f_\eta; 0) &= F^{-1}\{O'(\xi, n, 0)\} \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'(\xi, n, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] df_\xi df_\eta \quad (2.2)
\end{aligned}$$

โดยที่ f_ξ และ f_η เป็นส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่ (spatial frequency) พิจารณาให้เป็นระนาบที่คลื่นแพร่ไปด้วยทิศแบบโคไซน์ (cosine) ส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่คือ

$$\alpha = \lambda f_\xi \beta = \lambda f_\eta \gamma = \sqrt{1 - (\lambda f_\xi)^2 - (\lambda f_\eta)^2} \quad (2.3)$$

จึงทำให้สมการที่ 2.2 เป็น

$$O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, n, 0) \exp[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)] d\xi d\eta \quad (2.4)$$

เนื่องจากแสงมีการแพร่ไปเป็นระยะทาง z จึงเกิดส่วนประกอบในเลขชี้กำลัง $\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z)$ ทำให้ angular spectrum ของสนามวัตถุเป็น

$$\begin{aligned}
O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, n, 0) \exp[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)] \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z) d\xi d\eta \\
&= F\{O(\xi, n, 0) \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z)\} \quad (2.5)
\end{aligned}$$

เมื่อสมการที่ 2.5 มีการแปลงฟูเรียร์กลับ สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
O\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)] \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \\
&= F^{-1}\{O'(\xi, n, 0) \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z)\} \quad (2.6)
\end{aligned}$$

จากการแพร่ของคลื่นจากระนาบวัตถุไปยังระนาบโฮโลแกรมไปเป็นระยะ z สนามทางแสงบนระนาบโฮโลแกรมจึงเป็นดังสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned}
h(x, y, z) &= O(x, y, z) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)] \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= F^{-1}\{F\{O(x, y, 0)\}\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z)\} \quad (2.7)$$

ในส่วนของสนามแสงบนระนาบการสร้างภาพโฮโลแกรม สามารถเขียนอยู่ในรูป $R(\xi', \eta')$ ส่วนกลับของการแปลงฟูเรียร์จากสนามโฮโลแกรม

$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1}\{h(x, y, 0)\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z)\} \quad (2.8)$$

2.1.5 การจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี (Digital holography configuration)

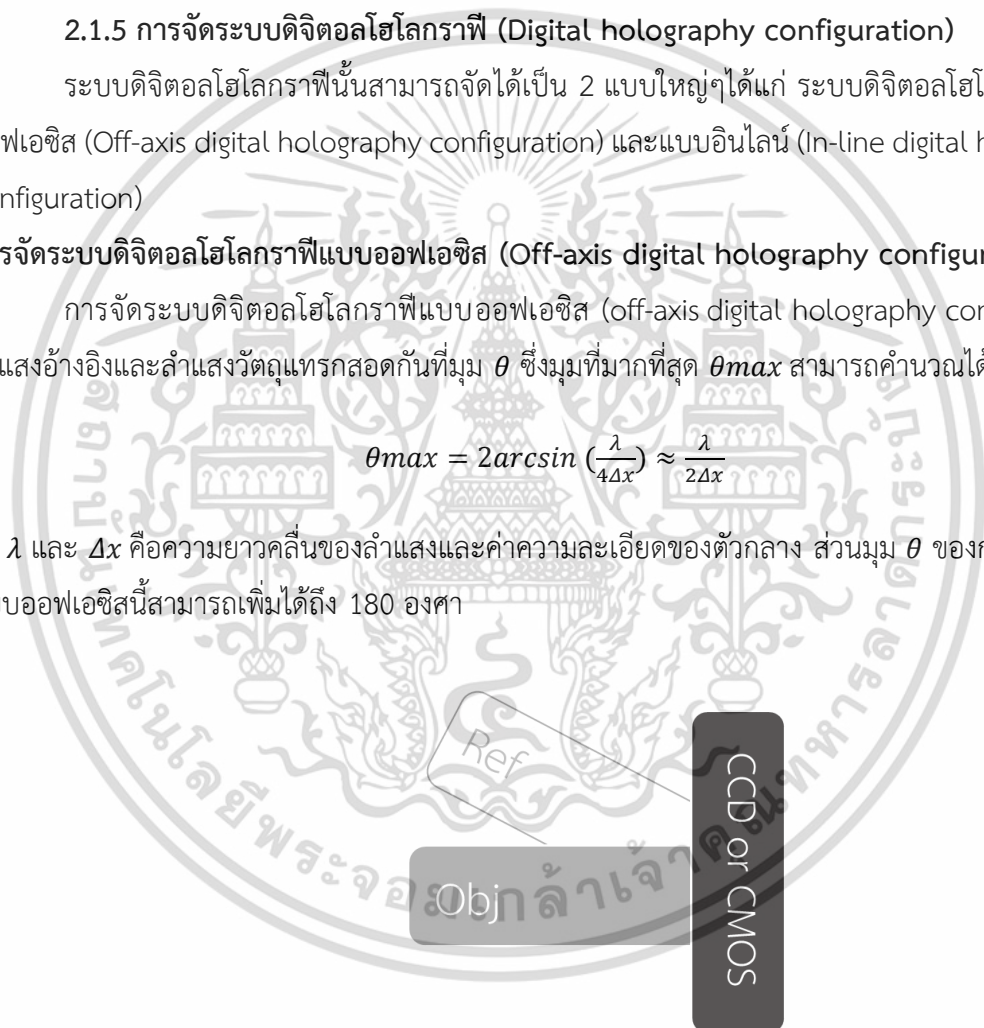
ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีนั้นสามารถจัดได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆได้แก่ ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออฟเอซิส (Off-axis digital holography configuration) และแบบอินไลน์ (In-line digital holography configuration)

การจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออฟเอซิส (Off-axis digital holography configuration)

การจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออฟเอซิส (off-axis digital holography configuration) ลำแสงอ้างอิงและลำแสงวัตถุแทรกสอดกันที่มุม θ ซึ่งมุมที่มากที่สุด θ_{max} สามารถคำนวณได้จาก

$$\theta_{max} = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta x}\right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (2.9)$$

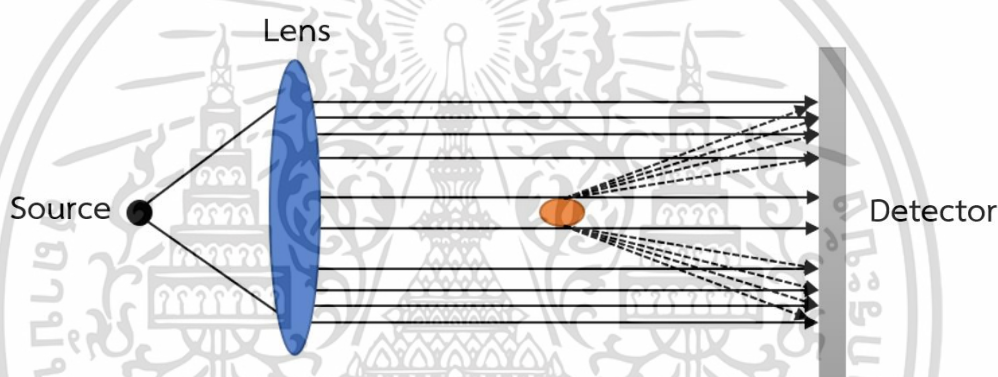
ซึ่ง λ และ Δx คือความยาวคลื่นของลำแสงและค่าความละเอียดของตัวกลาง ส่วนมุม θ ของการจัดระบบแบบออฟเอซิสนี้สามารถเพิ่มได้ถึง 180 องศา



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออฟเอซิส

การจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (In-line digital holography configuration)

เนื่องจากมุมของการบันทึกภาพดิจิทัลโฮโลแกรมมีค่าเข้าใกล้ 0 องศา จึงเรียการจัดระบบนี้ว่า การจัดระบบแบบอินไลน์ (In-line holography) หรืออีกอย่างว่าเรียกว่า การจัดระบบแบบกาบอร์ (Gabor configuration) ซึ่งถูกคิดค้นโดยเดนนิส กาบอร์ ซึ่งเป็นผู้ค้นพบเทคนิคการถ่ายภาพดิจิทัลโฮโลกราฟีเป็นคนแรก รูปที่ 2.5 แสดงถึงหลักการของ Gabor's in-line holography จากภาพเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดกระทบกับวัตถุ แสงลำดับแรกไม่มีการกระจายหรือการกระเจิงบนฉากเรียกว่าคลื่นอ้างอิง (reference wave) ลำดับถัดมาแสงมีการเลี้ยวเบนเมื่อตกกระทบกับวัตถุเรียกว่า คลื่นวัตถุ (object wave) และเกิดการแทรกสอดกับแสงส่วนแรกเกิดเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ คลื่นทุกๆจุดบนหน้าคลื่นถือเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการจัดระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์

ที่มา : <https://www.globalsino.com/EM/page2614.html>

2.2 ความสามารถในการเปียก (Wetting) [8]

แรงที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดของเหลวนั้นแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทคือ แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างสารที่เป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นแรงที่ทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกันเป็นหยดน้ำ แรงที่สองคือแรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างสารที่เป็นสารต่างชนิดกัน เช่นแรงที่พยายามทำให้หยดน้ำแตกออกจากกันแล้วไหลกระจายไปบนพื้นผิวของของแข็ง การเปียกนั้นมีความสำคัญต่อการยึดติดกันของวัสดุสองชิ้น การวัดความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของของเหลวหรือสมบัติการเปียกของของเหลวบนพื้นผิวสามารถวัดได้จากมุมสัมผัส (Contact angle) ของของเหลวที่อยู่บนพื้นผิวนั้น ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกที่ดีค่ามุมสัมผัสที่ได้จะมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกที่ต่ำค่ามุม

สัมผัสที่ได้นั้นก็จะมีค่ามาก โดยค่ามุมสัมผัสนั้นยังบอกถึงแนวโน้มของของเหลวที่กระจายตัวบนพื้นผิวของของแข็งได้อีกด้วยโดยค่ามุมสัมผัสนั้นจะแปรผกผันกันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิว ซึ่งเกณฑ์ในการวัดค่ามุมสัมผัสแบ่งได้ดังนี้

1. มุมสัมผัสที่มีค่าเป็น 0° แสดงว่าความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดของของเหลวบนพื้นผิวเปียกอย่างสมบูรณ์ ก็คือของเหลวจะกระจายตัวไปเป็นบริเวณกว้าง
2. มุมสัมผัสที่มีค่า $0^\circ - 90^\circ$ แสดงว่าความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดของของเหลวบนพื้นผิวอยู่ในระดับที่ดีและของเหลวกระจายตัวออกไปเป็นบริเวณกว้างแต่ยังมีการเกาะกันด้วยแรงเชื่อมแน่นเป็นหยดขนาดเล็กน้อยบนพื้นผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสที่มีค่า $90^\circ - 180^\circ$ แสดงว่าความสามารถในการเปียกหรือการยึดติดของของเหลวบนพื้นผิวอยู่ในระดับที่ไม่ดี การกระจายตัวของของเหลวกระจายได้ไม่ดี
4. มุมสัมผัสที่มีค่า 180° แสดงว่าไม่มีการเปียกหรือการยึดติดเลยและไม่มีการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งด้วย

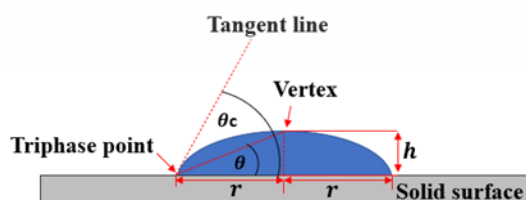
2.2.1 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

โดยการหาค่ามุมสัมผัสของตัวอย่างสามารถพิจารณาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในการวัดมุมสัมผัสจากการหยดของเหลวลงบนพื้นผิว สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณหามุมสัมผัส คือสมการของยัง (Young equation) ค่ามุมสัมผัสคำนวณโดยใช้หลักการของ Euclidean geometry

โดยขั้นตอนแรก สร้างเส้นแทนเจนต์ (มุมสัมผัส) โดยลากเส้นตั้งฉากกับรัศมีของตัวอย่างที่ตัดจุดสัมผัสกับพื้นผิวแนวนอน จะได้จุด Triphase ขั้นตอนที่สอง เรียกว่าวิธีครึ่งมุม (half-angle method) ใช้เส้นลากจากจุด Triphase ไปยังจุดที่สูงสุดของภาพตัวอย่าง จากนั้นมุมสัมผัสจะถูกกำหนดโดยสมการที่ระบุด้านล่าง

$$\tan\theta = \frac{h}{r}$$

$$\theta_c = 2\arctan\left(\frac{h}{r}\right) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้ Euclidean geometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)

ตัวประกอบการกระจายตัวบ่งบอกถึงความสามารถของโลหะบัดกรีที่สามารถแพร่กระจายตัวในสถานะหลอมเหลวบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$\text{ตัวประกอบการกระจายตัว} = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แพร่กระจาย (mm)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

2.2.3 อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

อัตราส่วนการกระจายตัวบ่งบอกถึงความสามารถของโลหะบัดกรีที่สามารถแพร่กระจายตัวในสถานะของแข็งโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\text{อัตราส่วนการกระจายตัว} = \frac{\text{พื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอมเหลว}}{\text{พื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอมเหลว}} \quad (2.12)$$

2.3 สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี (Solder Paste) และการบัดกรี (Soldering)

2.3.1 สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรี (Solder Paste) [3]

โลหะบัดกรีเป็นส่วนประกอบสำคัญในการบัดกรีชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และยังใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้โดยทั่วไปส่วนใหญ่มีส่วนประกอบที่สำคัญคือแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) และแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Flexible printed circuit, FPC) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีไว้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นไอซี (IC) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ชิป (Chip) และอื่นๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิด โดยชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องทำการเชื่อมหรือบัดกรีให้ยึดติดเข้ากับแผ่นวงจรด้วยวัสดุที่เรียกว่าโลหะบัดกรี สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีเป็นส่วนผสมระหว่างตะกั่วและดีบุก แต่ในปัจจุบันมีการใช้ตะกั่วลดลงเนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารเคมีที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในอุตสาหกรรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจึงหันมาใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วแทน (Lead-Free Solder) เพื่อลดการใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว ซึ่งมีอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่ต่ำ โดยอุณหภูมิของการหลอมเหลวแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งช่วงของการหลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของสารโลหะผสม (wt%)

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิของการหลอมเหลวของสารบัดกรีไร้สารตะกั่ว

อุณหภูมิของการหลอมเหลว	โลหะผสม	ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว
ต่ำกว่า 180°	Sn-Bi	138
	Sn-In	118-125
	Bi-In	109
180°-200°	Sn-Zn	198
	Sn-Zn-Bi	188-189
	Sn-Bi-In	143-193
200°-230°	Sn-Ag	221-226
	Sn-Cu	227
	Sn-Ag-Cu	217
	Sn-Ag-Bi	206-213
	Sn-Ag-Cu-Sb	216-222

2.3.2 การตกต่ำ (Slumping) [9,10]

การตกต่ำของโลหะบัดกรีนั้น (Solder paste slump) สามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของแผ่นวงจรพิมพ์ได้ เนื่องจากในทางทฤษฎี หากเราทำการวางสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ สารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีควรจะอยู่ในสถานะหรือลักษณะเดิมจนกว่าจะนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปวาง แต่ในความเป็นจริงสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีนั้นจะเกิดการไหลหรือแพร่กระจายตัว ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้ เช่น หากโลหะบัดกรีแพร่กระจายไปแตะกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ติดกันบนแผ่นวงจรซึ่งไม่ได้ออกแบบมาให้เชื่อมต่อกันอาจทำให้เกิดสะพานบัดกรี (Solder bridges) เกิดไฟฟ้าลัดวงจรซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อแผ่นวงจรพิมพ์ได้

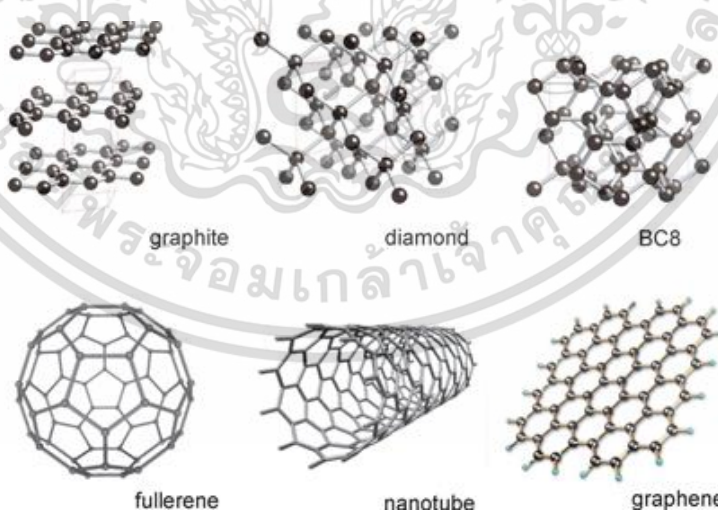
2.3.3 การบัดกรี (Soldering) [4]

การบัดกรีคือวิธีการเชื่อมต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือคนละชนิดกันก็ได้ โดยโลหะที่นิยมใช้นั้นจะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ โลหะที่มีจุดของการหลอมเหลวสูงกับโลหะที่มีจุดของการหลอมเหลวต่ำ โดยโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะนิยมใช้ในด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากสามารถทนความร้อนได้ดี ส่วนโลหะที่มีจุด

หลอมเหลวต่ำอุณหภูมิที่ใช้จะไม่เกิน 280 องศาเซลเซียส เช่นตะกั่ว หรือดีบุก ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการเติมลงไป ในรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะนี้จะถูกหลอมและแทรกตัวลงไป ในช่องว่างระหว่างรอยต่อของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีการบัดกรีนั้นจะไม่หลอมละลายชิ้นงานหรืออุปกรณ์หลักให้เสียรูปทรง นอกจากการบัดกรีด้วยมือแล้วในงานอุตสาหกรรมที่ต้องผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากจะนิยมวิธีการบัดกรีด้วยกัน 2 แบบคือ การบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) การเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาวางไว้บนแผ่นวงจรหลังจากนั้นให้แผ่นวงจรเคลื่อนผ่านอ่างของโลหะบัดกรีหลอมซึ่งมีการทำให้เป็นคลื่นเคลื่อนที่พุ่งเข้ามาสัมผัสกับแผ่นวงจรทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่วางไปเชื่อมต่อกับแผ่นวงจร การบัดกรียีกแบบหนึ่งคือการบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow Soldering) โดยนิยมใช้ในการผลิตแผ่นวงจรแบบเทคโนโลยี SMT (Surface mount technology) โดยการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นวงจร โดยอุปกรณ์ที่วางจะเป็นตัวต้านทาน ไดโอด ไอซีหรือตัวเก็บประจุ สวิตช์และอุปกรณ์อื่นๆ หลังจากนั้นโลหะบัดกรีที่ถูกผสมฟลักซ์ไว้แล้วจะถูกสกรีนลงบนแผ่นวงจรตรงตำแหน่งที่ต้องการวางอุปกรณ์จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้โลหะบัดกรีหลอมตัวและประสานยึดติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่นวงจรพิมพ์

2.4 คาร์บอนอัลโลโทรป (Carbon Allotropes)

คาร์บอนอัลโลโทรปคือกลุ่มของคาร์บอนที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวที่ต่างกันไป เช่น แกรไฟต์ที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ ฟูลเลอร์ีนที่มีอะตอมของคาร์บอนเกาะกันเป็นวงกลม คาร์บอนนาโนทิวป์คือคาร์บอนที่เรียงต่อกันเป็นท่อ เป็นต้น

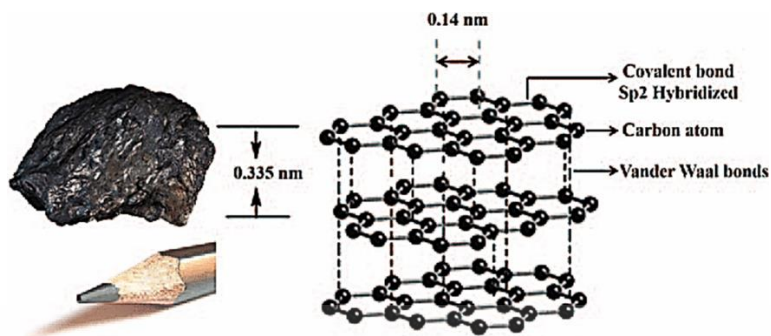


รูปที่ 2.7 ภาพแสดงอัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน

ที่มา : <http://www.icoachmath.com/chemistry/definition-of-allotropy-of-carbon.html>

2.4.1 แกรไฟต์ (Graphite) [11]

แกรไฟต์ (Graphite) เป็นผลึกของธาตุคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นของแข็ง รูปแบบผลึกของแกรไฟต์เป็นแผ่นบางๆ ทึบแสง สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นแร่บริสุทธิ์ แตกหักง่าย แร่แกรไฟต์เกิดขึ้นในหินแปร ซึ่งเกิดจากการลดลงของสารประกอบคาร์บอนในตะกอนในระหว่างการแปรสภาพของเนื้อหิน ลักษณะของแกรไฟต์ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ หลายๆ ชั้นซ้อนกัน ซึ่งแต่ละชั้นเรียกว่ากราฟีน (Graphene) โดยในระนาบเดียวกันนั้นคาร์บอนแต่ละตัวจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์และพันธะโลหะ ส่วนในแนวแกนตั้งนั้นแต่ละชั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ชั้นของแกรไฟต์สามารถหลุดออกมาเป็นชั้นๆ ได้ ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้แกรไฟต์นิยมนำไปใช้ในการผลิตสารหล่อลื่นหรือการทำไส้ดินสอ แกรไฟต์ที่เป็นที่รู้จักมีสองรูปแบบ ได้แก่ อัลฟาหรือโครงสร้างหกเหลี่ยม (hexagonal) และเบตาหรือโครงสร้างสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombohedral) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายๆ กันแต่ต่างกันที่การซ้อนกันของชั้นกราฟีนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แกรไฟต์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเพราะการจัดเรียงตัวในแต่ละระนาบของอิเล็กตรอน เนื่องจากอิเล็กตรอนวงนอกสุดนั้นมีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระบนระนาบ จึงทำให้นำไฟฟ้าได้ และที่สำคัญแกรไฟต์นั้นถือเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่นำไฟฟ้าได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมของคาร์บอนมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายไปทั่วระนาบ คุณสมบัติที่มีการนำไฟฟ้าสูงทำให้มีประโยชน์ต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะเป็นอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่หรือแม้กระทั่งแผงโซลาร์เซลล์ และในด้านอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องเขียน เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ค แม้แต่ในอุตสาหกรรมการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเหล็กกล้า การผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกปลาเนื่องจากเส้นใยแกรไฟต์หรือเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์กีฬา อุตสาหกรรมรถจักรยาน อุปกรณ์เบรกรถยนต์ การผลิตอุปกรณ์ดูดซับเรดาร์ การผลิตอุปกรณ์ที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อนโดยทำจากเชื้อเพลิงถ่านหินที่เผาจนหมดควัน นอกจากนี้แกรไฟต์ยังใช้เป็นตัวช่วยในการลดความเร็วและควบคุมจำนวนอนุภาคของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์

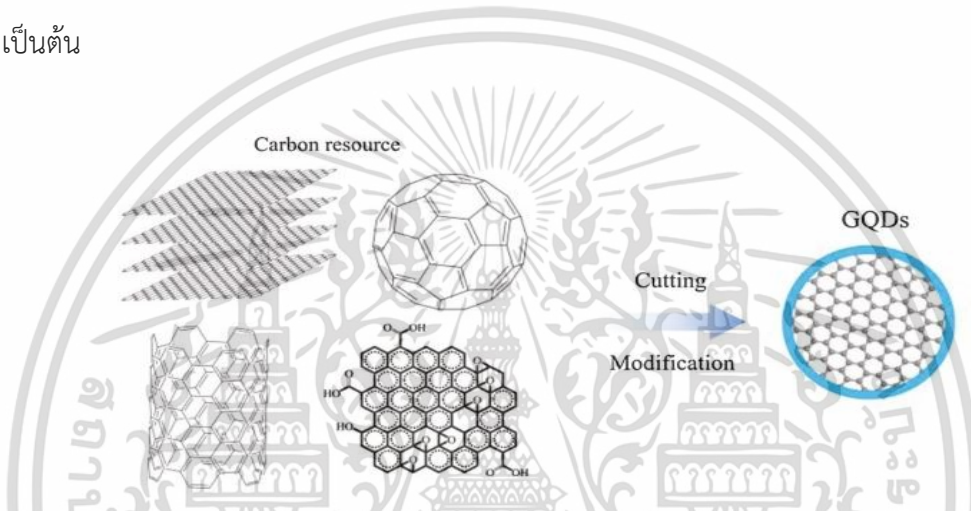
ที่มา : ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-graphite-and-its-bulk-form-use-as-pencil-lead_fig1_325659625

2.4.2 กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene Quantum dots) [12]

กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene Quantum Dots) เป็นหนึ่งในวัสดุนาโนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ มีขนาดเล็ก สามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงยูวี และแสงวิสิเบิลและสามารถคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้เป็นอย่างดี มีความเสถียรทางความร้อนสูง มีความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งมีชีวิต กราฟีนควอนตัมดอทถูกพัฒนามาจากกราฟีนซึ่งถูกค้นพบขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2003 โดย ศ.ดร.อังเดร ไกม์ (Andre Geim) ศ.ดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) และคณะที่มหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Novoselov et al., 2004) โดยการเอาสีถลอกแทบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออกจนกระทั่งได้ชั้นที่บางที่สุดเพียงชั้นเดียวโดยที่โครงสร้างมีการเรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (hexagonal) เรียกว่า “กราฟีน” และเนื่องจากกราฟีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัวต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์เป็นวงหกเหลี่ยมที่แข็งแรงและเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง ทำให้กราฟีนมีความแข็งแรงมากและมีสมบัติที่โดดเด่น เช่น มีความแข็งแรงเชิงกลสูง มีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและนำไฟฟ้าได้ดี และด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้กราฟีนถูกนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น กระจกกันกระสุนแทนเคพลาร์ หรือการทำหน้าจอสัมผัสที่สามารถโค้งงอได้ และขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตาม แต่ละชั้นของกราฟีนจะมีแรงดึงดูดระหว่างกันที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการยึดเกาะกันเป็นชั้นขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ผิวลดลงและมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน นักวิทยาศาสตร์จึงได้พัฒนากราฟีนให้มีขนาดเล็กลงจนได้วัสดุนาโนศูนย์มิติที่มีลักษณะเป็นจุด เรียกว่า กราฟีนควอนตัมดอท ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Dengyu Pan และคณะ ในปี ค.ศ. 2010 โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเข้ามาช่วยในการตัดแผ่น

กราฟีน (Graphene Sheets, GSs) ที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรให้ได้เป็นกราฟีนควอนตัมดอทที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร โดยโครงสร้างของกราฟีนควอนตัมดอทนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 นาโนเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือทรงรีคล้ายไข่ซึ่งเป็นโครงสร้างนาโนแบบศูนย์มิติ โดยกราฟีนควอนตัมดอทจะประกอบไปด้วยแผ่นกราฟีนตั้งแต่ 1 ถึง 10 ชั้น โดยมีระยะห่างภายในระนาบอยู่ที่ 0.18 ถึง 0.24 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างระนาบ 0.33 นาโนเมตร ซึ่งประโยชน์ของกราฟีนควอนตัมดอทสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมายไม่ว่าจะเป็น เซ็นเซอร์ ตัวเร่งเชิงแสง เป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้กระทั่งในทางด้านชีวภาพ เช่น การถ่ายภาพเซลล์ และตัวขนส่งยา เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงกราฟีนควอนตัมดอท

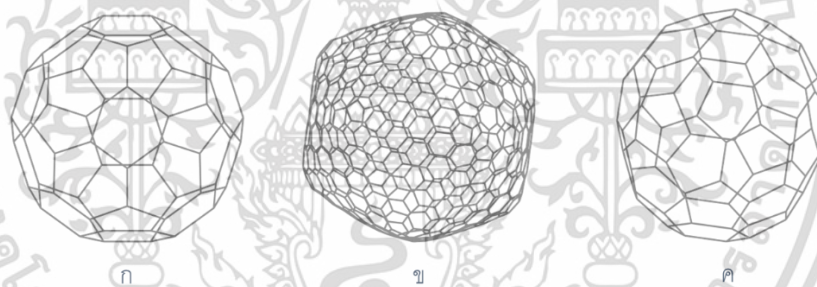
ที่มา : <https://ichi.pro/th/gqds-bthbath-ca-mi-bthbath-ni-xutsahkrmm-phlangnan-261489877396036>

2.4.3 ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) [13]

ฟูลเลอร์รีนก็เป็นหนึ่งในอัลโลโทรปของคาร์บอน มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแกรไฟต์ โดยโครงสร้างของโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนเชื่อมต่อกัน มีลักษณะเป็นทรงกลมภายในกลวงคล้ายกับลูกฟุตบอล มีสถานะเป็นของแข็ง เป็นผงสีดำ ไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพันธะโคเวเลนต์มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางเพราะอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้ไม่นำไฟฟ้า ไม่นำความร้อน จุดเดือดและจุดหลอมเหลวจะขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอน โครงสร้างของโมเลกุลจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 นาโนเมตร ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นวงแหวนหกเหลี่ยมและวงแหวนห้าเหลี่ยม(หรือบางครั้งก็เป็นวงแหวนเจ็ดเหลี่ยม) กันไม่ให้แผ่นวงแหวนนั้นกลายเป็นแผ่นเรียบ โดยโครงสร้างของฟูลเลอร์รีนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของฟูลเลอร์รีนคือสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดี ซึ่งสามารถรับอิเล็กตรอนสามตัวขึ้นไปได้ ดังนั้นจึงสามารถทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีและเมื่อนำเอา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของธาตุที่เป็นชนิดของอัลคาไล เช่น โปแทสเซียมหรือโซเดียม มายึดติดกับตัวฟูลเลอร์ีนจะทำให้ได้คุณสมบัติในการเป็นตัวนำยิ่งยวดหรือไม่มีความต้านทานไฟฟ้าเลยเนื่องจากฟูลเลอร์ีนมีคุณสมบัติเป็นลบบในทางเคมี ในขณะที่โลหะอัลคาไลมีคุณสมบัติที่เป็นบวกทางเคมีจึงทำให้จับคู่กันได้เป็นอย่างดี และที่สำคัญในฟูลเลอร์ีนมีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่จำนวนมากทำให้ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ รูปแบบของฟูลเลอร์ีนมีหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน, เอนโดฮีทรีล ฟูลเลอร์ีน, บักกี้บอล คลัสเตอร์, ท่อนาโนคาร์บอน, Herbal fullerenes, Megatubes และ Linked bucky ball and chain Dimers ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีโครงสร้างและประโยชน์ที่แตกต่างกันออกไป ประโยชน์ของฟูลเลอร์ีนมีมากมายไม่ว่าจะเป็นตัวนำไฟฟ้า ดูดซับก๊าซ ใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยฟูลเลอร์ีนบางชนิดสามารถเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางหรือแม้กระทั่งในงานด้านชีวการแพทย์ ซึ่งสามารถใช้เป็นยาในการต่อต้านเชื้อไวรัสเอชไอวี (HIV) หรือไวรัสเอดส์ได้ หรือแม้แต่เป็นสารที่ใช้ในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย และใช้ในการต่อต้านหรือยับยั้งเซลล์มะเร็ง และยังมีคุณสมบัติที่ทำหน้าที่ในการยับยั้งขั้นตอนในการตายโดยอัตโนมัติของเซลล์ปกติได้อีกด้วย (anti-apoptosis agent) ของ หรือเป็นสารตั้งต้นในการสร้าง carbon nanotubes ที่ใช้ในการผลิตผ้าหรือเส้นใย เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงโครงสร้างของฟูลเลอร์ีน ก) ฟูลเลอร์ีน C60 ข) ฟูลเลอร์ีน C540 ค) ฟูลเลอร์ีน C70

ที่มา : <https://wiki2th.com/th/Carbon#wiki-3>

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Properties of SAC0307 Lead-Free Solder Paste [14]

ได้ทำการสังเกตและศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperatures), ความสามารถในการเปียกหรือการยึดติด (wettability), ความสามารถในการพิมพ์ (printability), การตกต่ำหรือการยุบตัว (slump) และรอยต่อประสานระดับโครงสร้างจุลภาค (Interfacial microstructure) เมื่อทำการผสมกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ที่ความเข้มข้น 0.0, 0.25, 0.50, 0.75, และ 1.0 wt.% พบว่าไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวแรก (solidus temperatures) และอุณหภูมิของการหลอมเหลวสุดท้าย (liquidus temperatures) ความสามารถในการเปียกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมอนุภาคนาโนซิงค์ ออกไซด์ที่ 0.25% ความสามารถในการพิมพ์ลดลงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น การตกต่ำสูงสุดและชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะสูงสุดเกิดขึ้นที่ 0.25% ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อผสมกับโลหะบัดกรี

2.5.2 The Study of Wettability and Microstructure for SAC305 and SAC305-0.5In Lead-Free Solders on Copper Substrate [15]

ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเปียกและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแบบไร้ตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305 0.5In บนแผ่นทองแดง เพื่อหาความสัมพันธ์ของการกระจายตัว, อัตราส่วนการกระจายตัว, พื้นที่การกระจายตัว และมุมสัมผัส ที่อุณหภูมิการบัดกรี 240, 260 และ 300 °C และเวลาการบัดกรี 20, 30 และ 60 วินาที พบว่าเมื่อเติมสารเจืออินเดียม 0.5 wt.% ในโลหะบัดกรีแบบไร้ตะกั่วชนิด SAC305 จุดหลอมเหลวมีการลดลงถึง 3.8 °C สำหรับตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัวและพื้นที่การกระจายมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการบัดกรีที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $91.25 \pm 0.53\%$ และ 7.75 ± 0.34 เท่าตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดงมีค่าเฉลี่ยลดลงเมื่ออุณหภูมิของการบัดกรีเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามุมสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ $19.88 \pm 1.29^\circ$ ที่อุณหภูมิของการบัดกรี 300 °C ที่เวลาของการบัดกรี 30 วินาที และมีความสามารถการเปียกที่ดีที่สุด นอกจากนี้ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีแบบไร้ตะกั่วชนิด SAC305 ที่อุณหภูมิการบัดกรี 260 °C และเวลาการบัดกรี 60 วินาที และโลหะบัดกรีแบบไร้ตะกั่วชนิด SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C และเวลาการบัดกรี 30 วินาที มีค่าเพิ่มขึ้นและชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น คือ Cu_6Sn_5

2.5.3 Wettability and printability of SAC305-xTiO₂ Pb-free solder paste on Cu Substrate [16]

ศึกษาความสามารถในการเปียกหรือการยึดติด (wettability) และความสามารถในการพิมพ์ (printability) ของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ nanoparticles) เมื่อผสมโลหะบัดกรีชนิด SAC305 ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, และ 1.00 wt% จากการศึกษพบว่าที่ 0.33 wt% ของ TiO₂ ให้ความสามารถในการเปียกที่ดีที่สุดและการพิมพ์ลดลงเมื่อเพิ่ม TiO₂ ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเปียกและการพิมพ์ได้ว่าที่ 0.04 wt% มุมของค่าสัมผัสและการพิมพ์มีค่าที่ดีที่สุดซึ่งอยู่ที่ 11.61 องศาและ 92.04% ตามลำดับ

2.5.4 Silver nanoparticles effect on the wettability of Sn-Ag-Cu solder pastes and solder joints microstructure on copper [17]

ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเปียกของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีชนิด Sn96.5Ag3Cu0.5 ขนาด 20-38 μm เมื่อเติมอนุภาคนาโนเงินที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2 และ 4 wt.% เข้าไปโดยที่อนุภาคนาโนเงินมีขนาด 9 ถึง 138 nm โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 220, 230, 240 และ 250 องศา และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ(EDS) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาครวมไปถึงความหนาของสารประกอบระหว่างโลหะ (IMCs) และองค์ประกอบทางเคมี จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มอนุภาคนาโนเงินเข้าไปในสารเชื่อมประสาน SAC มีคุณสมบัติด้านการเปียกที่ดีกว่าการใช้โลหะบัดกรีแบบไม่ผสมอนุภาคนาโนเงินบนทองแดง โดยที่ความสามารถในการเปียกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารอนุภาคนาโนเงินที่เพิ่มขึ้นและขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่ลดลง

2.5.5 Interfacial Reaction of Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Alloy on Cu [18]

ศึกษาการทำงานและความสำคัญของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu ในด้านอุตสาหกรรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงศึกษาปฏิกิริยาของพื้นผิวรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu กับแผ่นทองแดง (Cu) และตรวจสอบผลกระทบจากการบัดกรีต่อการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี (Intermetallic compounds: IMC), โครงสร้างเฟส, สัณฐานวิทยา, การเจริญเติบโต, อุณหภูมิและเวลาของการบัดกรี จากการศึกษาพบว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu เป็นโลหะบัดกรีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ปฏิกิริยาของการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะของรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงที่ได้คือ Cu₆Sn₅ และ Cu₃Sn โดยที่ Cu₆Sn₅ เกิดขึ้นก่อนและมีโครงสร้างคล้ายกับหอยเชลล์ ในขณะที่ Cu₃Sn เกิดขึ้นที่รอยต่อประสานระหว่าง Cu₆Sn₅ กับแผ่นทองแดงและมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาขึ้นอยู่กับความเสถียรของเฟส และการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาตามกระบวนการบัดกรี

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเตรียมสารตัวอย่าง การทดลอง และการประมวลผล โดยในขั้นตอนแรกจะอธิบายถึงขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างที่ใช้สำหรับงานวิจัย ขั้นตอนที่สองจะเป็นการอธิบายถึงการจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงในระบบดิจิทัลไฮโลกราฟีและการทดลองและขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการประมวลผล

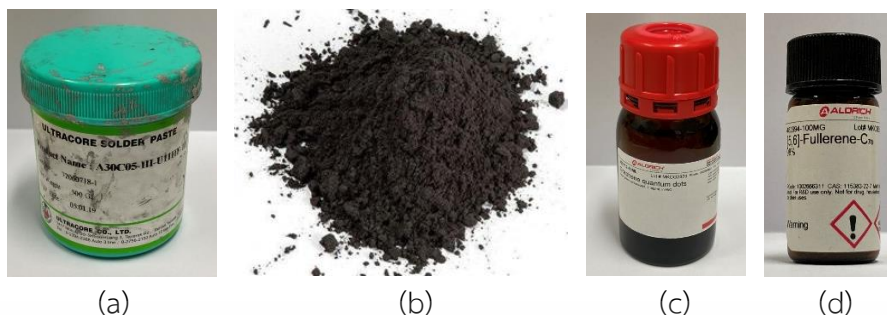
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

- ทำการเตรียมสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีโดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โลหะบัดกรีชนิด A30C05-III-U11HF-11 นำมาผสมกับแกรไฟต์ชนิดผงที่มีขนาดน้อยกว่า $20 \mu m$, กราฟีนควอนตัมดอทชนิด aqua green luminescent ขนาด 1 mg/mL และฟูลเลอร์รีนชนิด Fullerene-C70 ของบริษัท Sigma-Aldrich ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในปีกเกอร์ ดังสมการที่ 3.1

$$WT\% = \frac{\text{carbon allotropes weight}}{\text{carbon allotropes material weight} + \text{solder paste weight}} \times 100\% \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารโลหะบัดกรีกับสารคาร์บอนอัลโลโทรปที่ใช้

Solder Paste	Graphite (wt%)	Solder Paste	GQD (wt%)	Solder Paste	Fullerene (wt%)
SAC305	0.00 wt%	SAC305	0.00 wt%	SAC305	0.00 wt%
	0.01 wt%		0.01 wt%		0.01 wt%
	0.02 wt%		0.02 wt%		0.02 wt%
	0.04 wt%		0.04 wt%		0.04 wt%
	0.05 wt%		0.05 wt%		0.05 wt%
	0.06 wt%		0.06 wt%		0.06 wt%
	0.08 wt%		0.08 wt%		0.08 wt%
	0.10 wt%		0.10 wt%		0.10 wt%



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงสารตัวอย่าง (a) โลหะบัดกรี (Solder Paste) (b) แกรไฟต์ (Graphite) (c) กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene quantum dots) และ (d) ฟูลเลอร์รีน (Fullerene)

เมื่อทำการซั่งสารตามอัตราส่วนที่ต้องการแล้วใช้แท่งแก้วคนสารตัวอย่างให้เข้ากันเป็นเวลา 25-30 นาที เพื่อให้สารตัวอย่างกระจายตัวเข้ากัน โดยใช้ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง

- เตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 97% ซึ่งมีขนาดหนา 2 มม. ขนาด 30 มม. X 30 มม. ไปล้างด้วยน้ำไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อขจัดไอออนและป้องกันการเกิดออกไซด์บนแผ่นทองแดง หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยเอทานอลเพื่อล้างความเป็นกรดออก

- นำสารโลหะบัดกรีที่ผ่านการผสมแล้วใส่ลงไปในบล็อกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. สูง 1.24 มม. วางบนแผ่นทองแดง



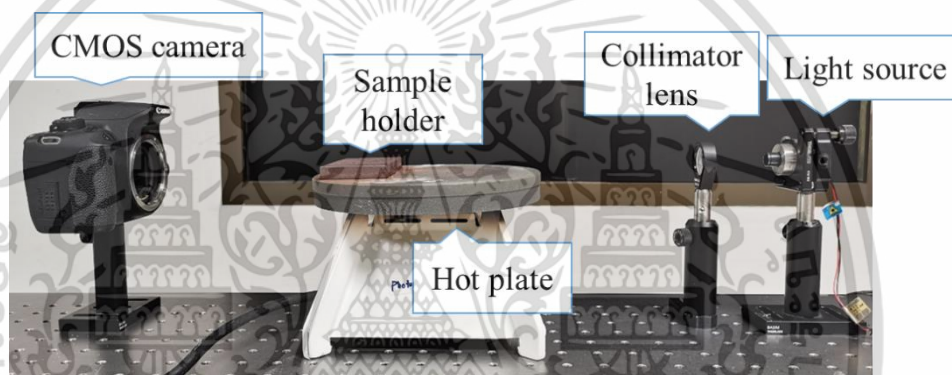
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงสารตัวอย่างเมื่อวางบนแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

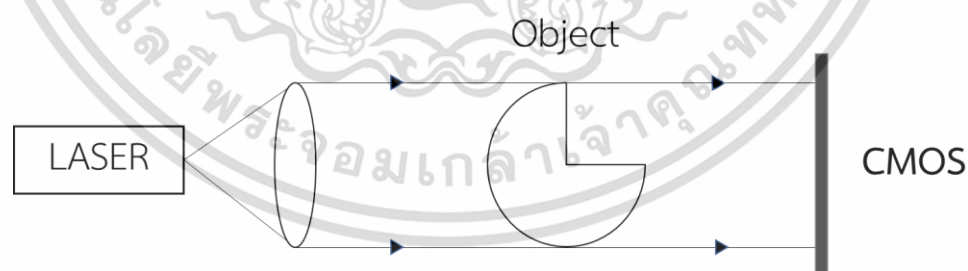
3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 Set-up ระบบแบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (In-Line Digital Holography)

ระบบ In-Line Digital Holography จะถูก Set-up อยู่บนโต๊ะการทดลองทางแสงในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3 หรือไดอะแกรมดังรูปที่ 3.4 ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้เป็นแบบเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร โดยลำแสงถูกปรับให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ด้วยคอลลิเมเตอร์ แหล่งกำเนิดแสงจะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบโดยผ่านคอลลิเมเตอร์เลนส์เพื่อให้แสงเป็นแสงขนานและเดินทางไปตามทิศทางยังตัวอย่าง ใช้กล้อง CMOS ชนิด Canon EOS 550D ในการจับภาพ โดยรูปแบบของแสงที่ได้จะเป็นรูปแบบแสงของการแทรกสอด



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการจัดระบบแบบ In-Line Digital Holography



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงไดอะแกรมของการจัดระบบแบบ In-Line Digital Holography

3.2.2 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปวางบนแท่นทำความร้อน

นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปวางบนแท่นทำความร้อน (Hot plate) เพื่อให้ความร้อนซึ่งหลอมที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting) ซึ่งอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 27-250 องศา



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการหลอมเหลวของสารโลหะบัดกรีเมื่อผสมคาร์บอนอัลโลโทรป

3.2.3 ถ่ายภาพชิ้นตัวอย่าง

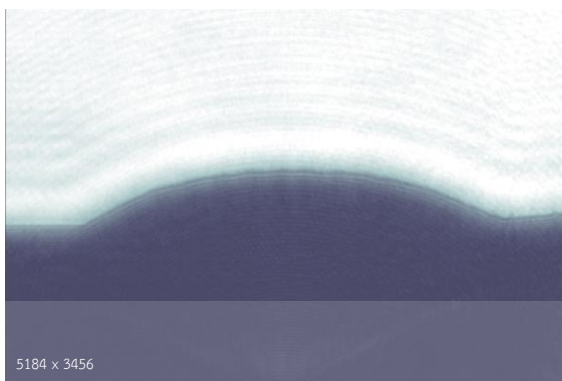
ทำการถ่ายภาพของชิ้นตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง โดยกดถ่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการประมวลผล

นำภาพที่ได้จากการทดลองไปสร้างภาพ (Reconstruction) ในกระบวนการทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักการสเปกตรัมเชิงมุม (Numerical computing) เพื่อหาความคมชัดของภาพ เมื่อได้ภาพที่คมชัดแล้วนำภาพที่ได้ไปหาค่าต่างๆตามที่ต้องการ โดยค่าที่ได้จากโปรแกรมจะอยู่ในรูปของระยะทาง โดยระยะทางที่วัดได้นั้นเทียบจากความละเอียดของพิกเซล (Max resolution) และขนาดของเซ็นเซอร์ (Sensor size) ของกล้องที่ใช้มาอ้างอิงในการวัดระยะทางของภาพในการหาค่ามุมต่างๆ โดยในงานวิจัยได้ใช้กล้อง Canon EOS 550D (CMOS) ความละเอียดพิกเซลอยู่ที่ 5184×3456 ส่วนขนาดเซ็นเซอร์เท่ากับ 22.3×14.9 mm [19]

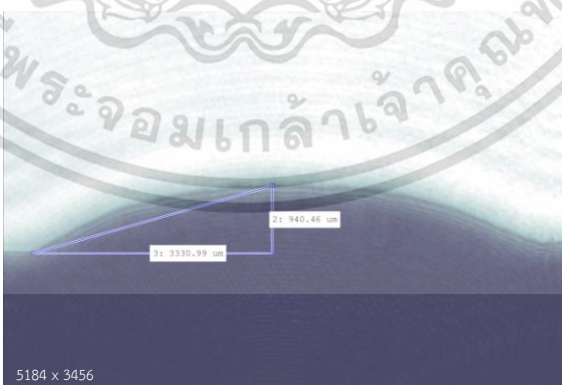


รูปที่ 3.7 ภาพแสดงภาพที่ได้จากการสร้างภาพที่ผ่านการหาความคมชัดแล้ว

เมื่อได้ภาพที่ผ่านกระบวนการการสร้างภาพแล้วหลังจากนั้นนำภาพที่ได้ไปหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) และอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

3.3.1 การหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

ในการหาค่ามุมสัมผัส เมื่อผ่านกระบวนการสร้างภาพและปรับความคมชัดแล้ว จะทำการหาค่ามุมสัมผัสของสารบัดกรี โดยใช้หลักการของ Euclidean geometry โดยการลากเส้นสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของตัวอย่างที่ตัดจุดสัมผัสกับพื้นผิวแนวนอนหลังจากนั้นลากจากจุดตัดไปยังจุดที่สูงที่สุดของภาพเพื่อคำนวณหาค่ามุมสัมผัส

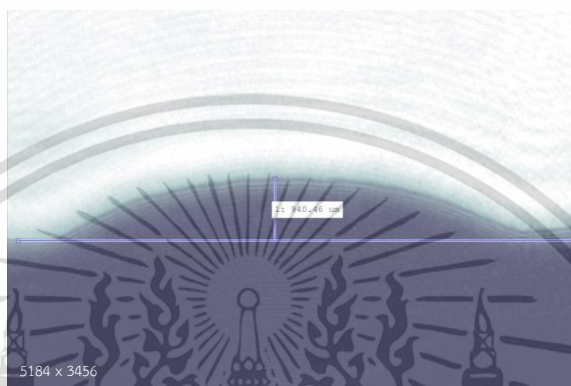


รูปที่ 3.8 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่ามุมสัมผัสของสารบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)

โดยจะหาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบและความสูงของโลหะบัดกรีหลังจากการหลอมเหลวแล้วโดยลากเส้นจากฐานตัวอย่างของพื้นผิวในแนวนอนไปจนถึงจุดที่สูงที่สุดของภาพ หลังจากนั้นคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวตามสมการที่ 2.11



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว

3.3.3 การหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

ในการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัวจะหาได้จากพื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอมเหลวหารกับพื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอมเหลว ซึ่งเราสามารถหาได้จากการลากเส้นหาระยะทางของโลหะบัดกรีได้จากโปรแกรมที่ใช้ในกระบวนการสร้างภาพ

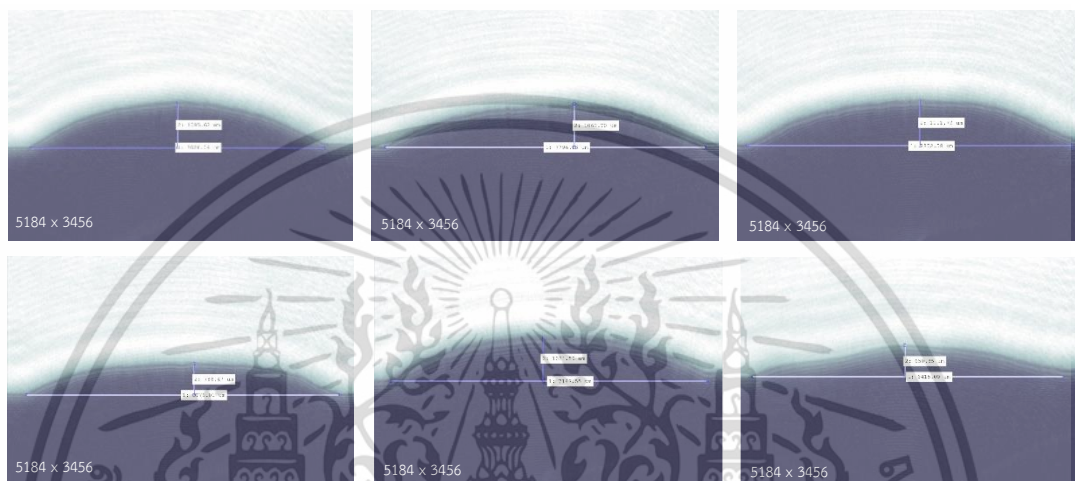


รูปที่ 3.10 ภาพแสดงตัวอย่างของการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การตกต่ำ (Solder paste slump)

โดยการตกต่ำ (Solder paste slump) คือการประมาณแนวโน้มของการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีก่อนอุณหภูมิของการหลอมเหลว โดยในการทดลองได้ทำการวัดระยะการแพร่กระจายเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิของการตกต่ำ (Slumping)



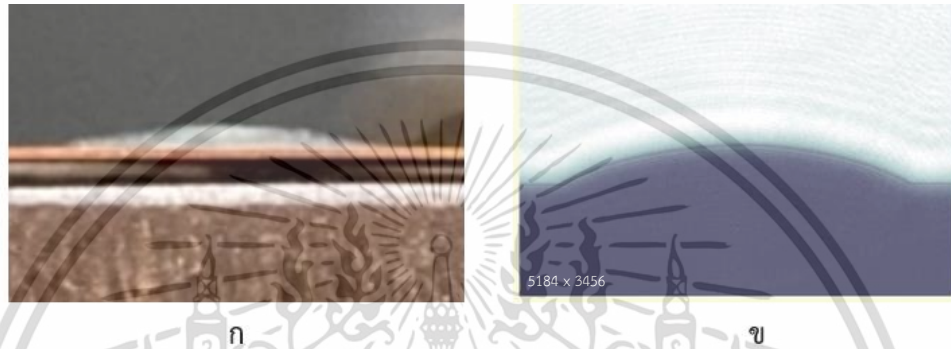
รูปที่ 3.11 ภาพแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์การตกต่ำ

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การตกต่ำ (Solder paste slump) และอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting) ตลอดจนประสิทธิภาพของการยึดติด (Wettability) ของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังการผสมคาร์บอนอัลโลโทรปจากการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) และอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ความคมชัดของภาพ (Shape)



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงการเปรียบเทียบของความคมชัด ก) ภาพจากกล้องมือถือ ข) ภาพจากการสร้างภาพ

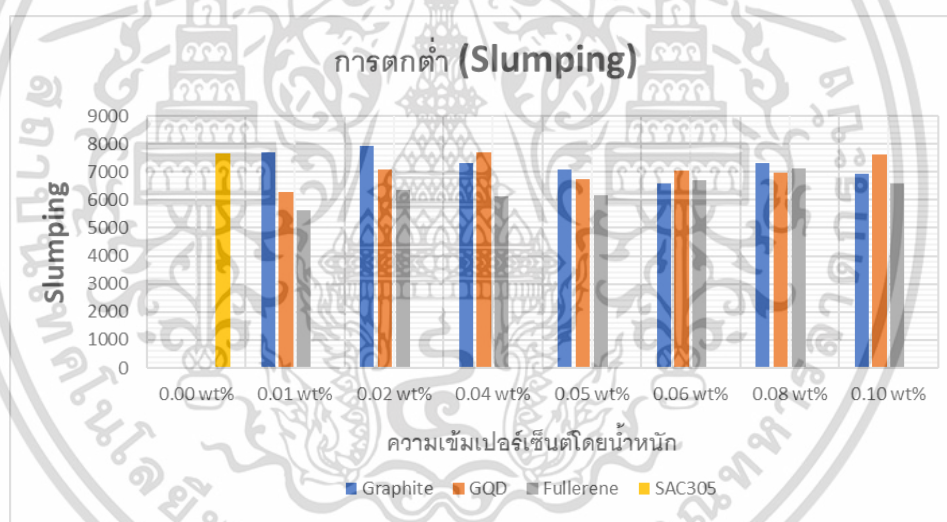
จากภาพจะเห็นว่าภาพที่ได้จากการสร้างภาพ (Reconstruction) นั้น มีความคมชัดเมื่อเทียบกับการถ่ายกับกล้องมือถือทั่วไปและสามารถเห็นถึงลักษณะรูปร่างของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีได้อย่างชัดเจน ซึ่งเราสามารถที่จะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลวได้

4.2 ประสิทธิภาพของการตกต่ำ (Solder paste slump)

ได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของแนวโน้มของการตกต่ำ (Slumping) ของสารตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของการตกต่ำ (Slumping) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของการตกต่ำ (Solder paste slump)

Solder Paste	Graphite (wt%)	Slumping (μm)	GQD (wt%)	Slumping (μm)	Fullerene (wt%)	Slumping (μm)
SAC305	0.00 wt%	7644.17	0.00 wt%	7644.17	0.00 wt%	7644.17
	0.01 wt%	7679.71	0.01 wt%	6271.89	0.01 wt%	5644.24
	0.02 wt%	7925.95	0.02 wt%	7102.46	0.02 wt%	6358.00
	0.04 wt%	7309.54	0.04 wt%	7713.11	0.04 wt%	6143.05
	0.05 wt%	7091.43	0.05 wt%	6728.21	0.05 wt%	6180.91
	0.06 wt%	6570.63	0.06 wt%	7059.06	0.06 wt%	6717.80
	0.08 wt%	7306.26	0.08 wt%	6956.72	0.08 wt%	7128.52
	0.10 wt%	6933.95	0.10 wt%	7639.91	0.10 wt%	6597.27



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของการตกต่ำ (Slumping)

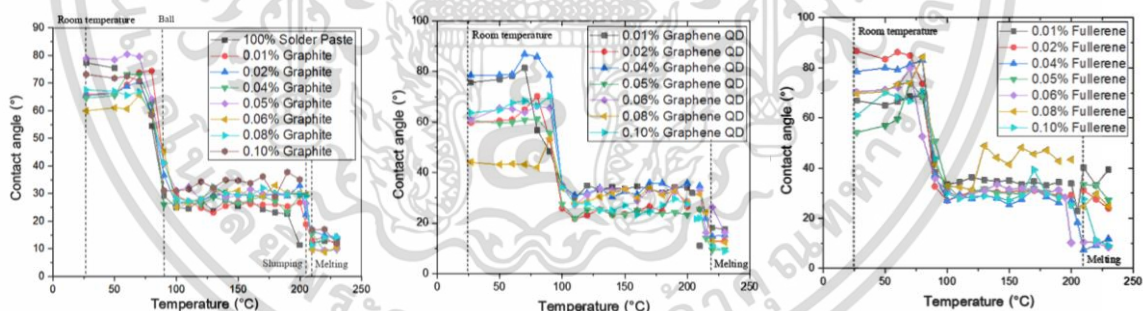
ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเข้าไปที่แต่ความเข้มข้นแนวโน้มการแพร่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของทองแดงส่วนใหญ่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปซึ่งเป็นสิ่งที่ดีเนื่องจากการตกต่ำ (Slumping) คือการหาแนวโน้มของการแพร่ของโลหะบัดกรีหากมีค่าน้อยแสดงว่าโอกาสที่โลหะบัดกรีแพร่กระจายไปแตะกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ติดกันบนแผ่นวงจรจะมีค่าลดลงซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดสะพานบัดกรี (Solder bridges)

4.3 อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting)

ได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของการหลอมเหลวจากการทดลองของสารตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของการหลอมเหลวแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของการหลอมเหลว

Solder Paste	Graphite (wt%)	Melting (°C)	GQD (wt%)	Melting (°C)	Fullerene (wt%)	Melting (°C)
SAC305	0.00 wt%	213	0.00 wt%	213	0.00 wt%	213
	0.01 wt%	210	0.01 wt%	207	0.01 wt%	210
	0.02 wt%	210	0.02 wt%	217	0.02 wt%	214
	0.04 wt%	210	0.04 wt%	226	0.04 wt%	214
	0.05 wt%	210	0.05 wt%	217	0.05 wt%	210
	0.06 wt%	214	0.06 wt%	224	0.06 wt%	200
	0.08 wt%	210	0.08 wt%	220	0.08 wt%	210
	0.10 wt%	210	0.10 wt%	220	0.10 wt%	210



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเมื่อผสมแกรไฟต์ กราฟีน ควอนตัมดอทและฟูลเลอร์รีน ตามลำดับ

จากการทดลองจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 213 °C สำหรับ 100% solder paste และ 210 °C เมื่อผสมแกรไฟต์ (Graphite) และฟูลเลอร์รีน (Fullerene) และ 219 °C เมื่อผสมกราฟีนควอนตัมดอท (graphene quantum dots) ที่แต่ละความเข้มข้น จะเห็นว่าเมื่อผสมแกรไฟต์ (Graphite) และฟูลเลอร์รีน (Fullerene) เข้าไปส่งผลให้อุณหภูมิของการหลอมเหลวมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับโลหะบัดกรีประเภทที่มีจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งใช้ในงานสำหรับเติมลงไป ในรอยต่อระหว่าง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรพิมพ์

4.4 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

ในการวัดค่ามุมสัมผัสได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่ามุมสัมผัสของสารตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัส

The different % wt.	Contact angle of Graphite		Contact angle of GQD	Contact angle of Fullerene
	Reconstructed image	Optical contact angle measuring	Reconstructed image	Reconstructed image
0.00%	10.8	10.3	10.8	10.8
0.01%	12.1	13.6	11.8	21.7
0.02%	14.0	16.6	15.5	16.7
0.04%	12.3	12.7	13.7	10.3
0.05%	11.8	14.3	11.2	16.4
0.06%	13.0	15.1	12.5	10.4
0.08%	13.3	14.5	10.0	14.1
0.10%	13.7	14.8	12.1	10.9

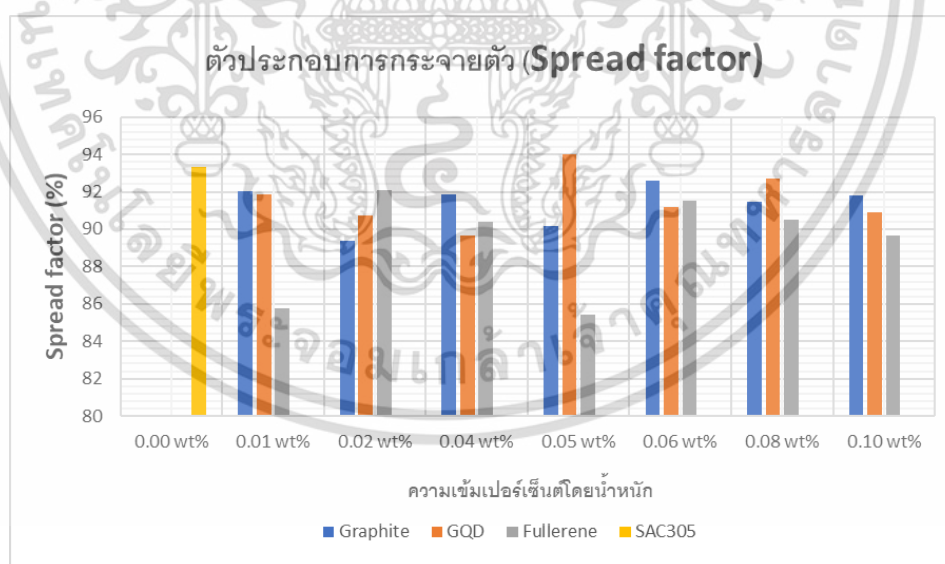
จากการวัดค่ามุมสัมผัสจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมกราฟีนควอนตัมดอทที่ 0.08% และฟลูเลอรีนที่ 0.04% ให้ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ไม่ผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปซึ่งในทางทฤษฎียิ่งค่ามุมสัมผัสมีค่าน้อยแสดงว่าประสิทธิภาพในการเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น

4.5 ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)

ได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวจากการทดลองของสารตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัว

Solder Paste	Graphite (wt%)	Spread factor (%)	GQD (wt%)	Spread factor (%)	Fullerene (wt%)	Spread factor (%)
SAC305	0.00 wt%	93.3195	0.00 wt%	93.3195	0.00 wt%	93.3195
	0.01 wt%	92.0150	0.01 wt%	91.8512	0.01 wt%	85.7754
	0.02 wt%	89.3678	0.02 wt%	90.7095	0.02 wt%	92.1033
	0.04 wt%	91.8650	0.04 wt%	89.6818	0.04 wt%	90.3772
	0.05 wt%	90.1425	0.05 wt%	94.0295	0.05 wt%	85.4042
	0.06 wt%	92.5833	0.06 wt%	91.2060	0.06 wt%	91.5033
	0.08 wt%	91.4744	0.08 wt%	92.7290	0.08 wt%	90.5055
	0.10 wt%	91.8169	0.10 wt%	90.9155	0.10 wt%	89.6306



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

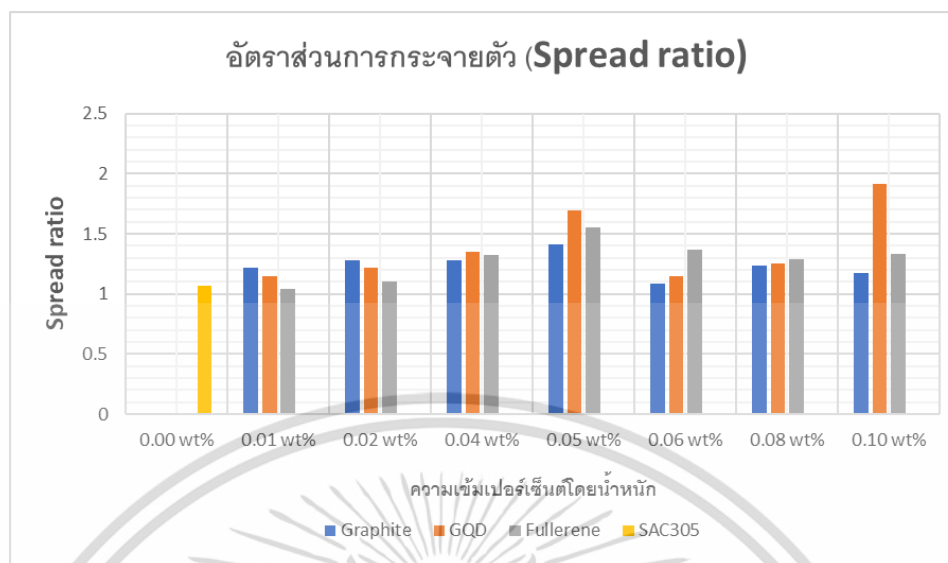
ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมสารกราฟีนควอนตัมต่อที่ความเข้มข้น 0.05% ให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวสูงที่สุด ซึ่งตัวประกอบการกระจายตัวแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีในสภาวะหลอมเหลว

4.6 อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

ได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัวจากการทดลองของสารตัวอย่างที่แต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัวแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัว

Solder Paste	Graphite (wt%)	Spread ratio	GQD (wt%)	Spread ratio	Fullerene (wt%)	Spread ratio
SAC305	0.00 wt%	1.0637	0.00 wt%	1.0637	0.00 wt%	1.0637
	0.01 wt%	1.2199	0.01 wt%	1.1507	0.01 wt%	1.0418
	0.02 wt%	1.2780	0.02 wt%	1.2171	0.02 wt%	1.1054
	0.04 wt%	1.2793	0.04 wt%	1.3485	0.04 wt%	1.3210
	0.05 wt%	1.4120	0.05 wt%	1.6929	0.05 wt%	1.5574
	0.06 wt%	1.0879	0.06 wt%	1.1463	0.06 wt%	1.3647
	0.08 wt%	1.2325	0.08 wt%	1.2514	0.08 wt%	1.2878
	0.10 wt%	1.1699	0.10 wt%	1.9166	0.10 wt%	1.3321

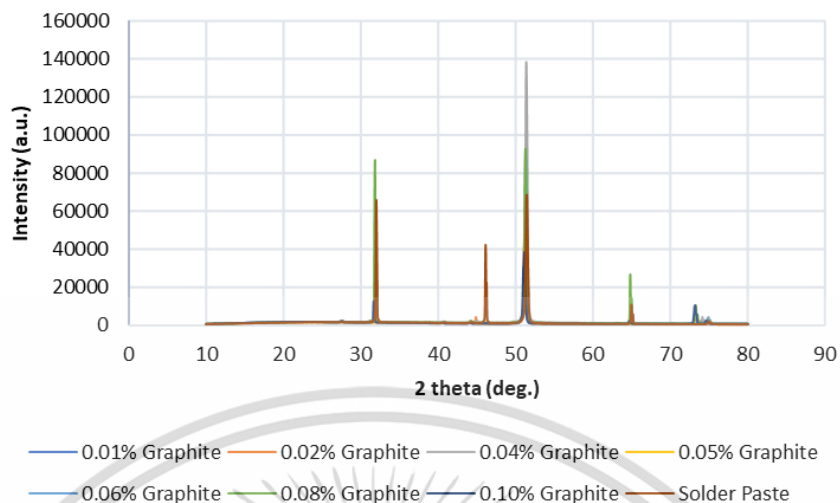


รูปที่ 4.5 ภาพแสดงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปทั้ง 3 ชนิดที่แต่ละความเข้มข้นจะให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ไม่ผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรป ซึ่งแสดงว่าเมื่อเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเข้าไปในโลหะบัดกรีจะทำให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถของโลหะบัดกรีในการบัดกรีมีค่าที่ดีขึ้น

4.7 การวัดค่า XRD (XRD Measurement)

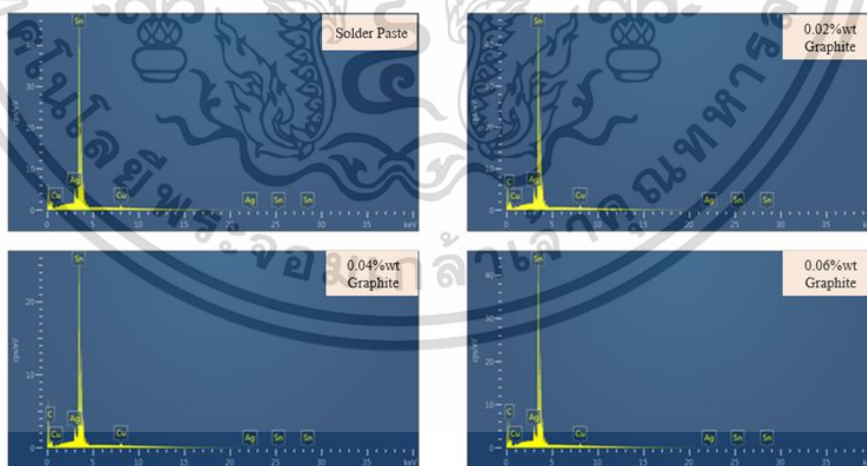
เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี (Solder Paste) เมื่อผสมแกรไฟต์ (Graphite) ที่แต่ละความเข้มข้นเราจะใช้การวิเคราะห์ XRD โดยแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่าสารประกอบที่ใหญ่ที่สุดประกอบด้วย Tin (Sn) และ Tin Oxide (SnO) ค่าความเข้มของ SnO เพิ่มขึ้นเมื่อผสมแกรไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.02 and 0.04 wt% ของโลหะบัดกรีและลดลงเมื่อผสมแกรไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.06, 0.08 และ 0.10 wt% ของโลหะบัดกรี



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงผล XRD ของการผสมแกรไฟต์หลังจากหลอมเหลวที่ 230 °C.

4.8 การวัด EDS (EDS Measurement)

Surface morphology และ Cross-section ของตัวอย่างของโลหะบัดกรี (Solder Paste) เมื่อผสมแกรไฟต์ (Graphite) ที่ความเข้มข้น 0.02, 0.04 และ 0.06 wt%. สำหรับการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีเมื่อผสมแกรไฟต์ประกอบด้วย Sn, Cu, Ag and C ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.7

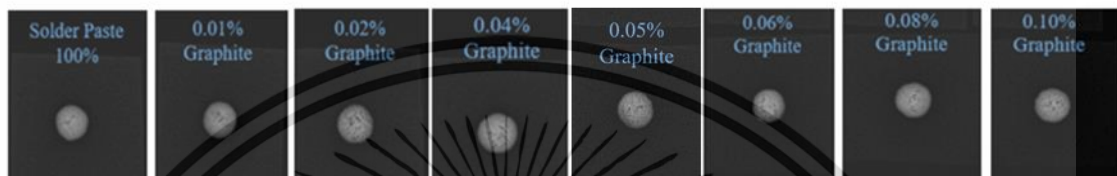


รูปที่ 4.7 ภาพแสดงการวิเคราะห์ EDS ของสารประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีเมื่อผสมแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การวัดรูพรุน (Porosity measurement)

ลักษณะของรูพรุนในข้อต่อของสารเชื่อมประสานอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของข้อต่อ ความพรุนในข้อต่อบัคกรีถูกตรวจสอบโดยใช้รังสีเอ็กซ์เรย์และการวัดเศษส่วนพื้นที่เชิงปริมาตรโดยการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 แสดงการวัดรูพรุนของโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังผสมแกรไฟต์ที่แต่ละความเข้มข้น



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงลักษณะรูพรุนของสารตัวอย่าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา (Morphological) การตกต่ำ (Slumping) อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting) รวมไปถึงการศึกษาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเปียกหรือการยึดติด (Wettability) ของสารเชื่อมประสานหรือโลหะบัดกรีชนิด Sn-3Ag-0.5Cu (SAC305) เมื่อผสมกับแกรไฟต์ (Graphite), กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene quantum dots) และฟูลเลอร์รีน (Fullerene) ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.00%, 0.01%, 0.02%, 0.04%, 0.05%, 0.06%, 0.08% และ 0.10% ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลว โดยใช้อินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (In-line digital holography) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภาพที่ได้จากการสร้างภาพ (Reconstruction) มีความคมชัดและเห็นถึงลักษณะรูปร่างของสารเชื่อมประสานอย่างชัดเจนจึงสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของสารเชื่อมประสานตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลวได้

2. การตกต่ำ (Slumping) ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเข้าไปที่แต่ความเข้มข้นแนวโน้มการแพร่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของทองแดงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป ยกเว้นที่ความเข้มข้น 0.02% Graphite และ 0.04% Graphene quantum dots

3. การเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์และฟูลเลอร์รีนในโลหะบัดกรีส่งผลให้อุณหภูมิของการหลอมเหลวมีค่าลดลง ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดกราฟีนควอนตัมดอทมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป

4. ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีเมื่อเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดฟูลเลอร์รีนและกราฟีนควอนตัมดอทมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปโดยค่ามุมสัมผัสที่ดีที่สุดเมื่อเติมฟูลเลอร์รีนที่ความเข้มข้น 0.04 wt% และกราฟีนควอนตัมดอทที่ 0.08 wt% ส่วนเมื่อเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์มีค่ามุมสัมผัสที่

เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป โดยค่ามัมสัมพัทธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเติมแก๊สอยู่ที่ความเข้มข้น 0.05 wt%

5. ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) ของโลหะบัดกรีเมื่อเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป ชนิดกราฟีนควอนตัมต่อหมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมกราฟีนควอนตัมต่อที่ 0.05 wt% และเมื่อเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรปชนิดแกรไฟต์และฟูลเลอร์รีนมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวลดลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป

6. อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) ของโลหะบัดกรีเมื่อเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป ชนิดแกรไฟต์ กราฟีนควอนตัมต่อ และฟูลเลอร์รีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีที่ปราศจากการเติมสารคาร์บอนอัลโลโทรป

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงคุณภาพของโลหะบัดกรีเมื่อผสมสารคาร์บอนอัลโลโทรปเพื่อให้ได้มัมสัมพัทธ์และความสามารถในการเปียกที่ดีนั้นควรศึกษาถึงคุณสมบัติของสารแต่ละชนิดรวมถึงคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของโลหะบัดกรีและสารคาร์บอนอัลโลโทรปแต่ละชนิดด้วยเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิดของสารคาร์บอนอัลโลโทรปและประสิทธิภาพที่สูงสุดในการใช้งานด้านการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์บนทางแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันวิธีการในการศึกษาและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ค่ามัมสัมพัทธ์ รวมไปถึงค่าการกระจายตัวมีวิธีการที่หลากหลายในการตรวจสอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดิจิทัลโฮโลกราฟีเข้ามาช่วยในการตรวจสอบนี้ซึ่งทำให้เห็นว่าสามารถลดขั้นตอนหรือกระบวนการตรวจสอบให้น้อยลงได้ และเพื่อให้เกิดความแม่นยำและได้ภาพที่คมชัดมากขึ้นเรามาออกแบบโปรแกรมหรือปรับปรุงคุณภาพของโปรแกรมในกระบวนการสร้างภาพหรือออกแบบการจัดอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพขึ้นตัวอย่างให้ชัดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Myung K. Kim. 2011. **Digital Holographic Microscopy: Principles Techniques and Applications**. Springer Series in Optical Sciences 162.
- [2] Li, Y. 2009. “DIGITAL HOLOGRAPHY AND OPTICAL CONTOURING”. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Liverpool John Moores University.
- [3] ธรรมบุญ อุดมมัน. 2564. Solder paste ในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. [Online]. Available : <https://www.mut.ac.th/uploaded/Solder%20paste%20ในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์>.
- [4] Abteu, M. and G. Selvaduray. 2000. “Lead-free Solders in Microelectronics”. Materials Science and Engineering. 27(5–6): 95-141.
- [5] Soares, D., Leitão, H., Lau, C.S. et al. “Effect of the Soldering Atmosphere on the Wettability Between Sn4.0Ag0.5Cu (in wt.%) Lead-Free Solder Paste and Various Substrates”. J. of Materi Eng and Perform 27, 5011–5017 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3419-2>.
- [6] Chien-Tai Lin, Kwang-Lung Lin, “Contact angle of 63Sn–37Pb and Pb-free solder on Cu plating”. Applied Surface Science. Vol 214. 2003. 243-258. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00342-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00342-8).
- [7] K. Sukpimai, W. Suwannakrue and K. Kanlayasiri. 2019. “Wettability and printability of SAC305-xTiO₂ Pb-free solder paste on Cu substrate”. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [8] ธิรัตน์ เจริญแก้ว. 2555. “ผลของตัวแปรในกระบวนการโซลเจลต่อสมบัติของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS”. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [9] Jennifer Nguyen, David Geiger, and Dongkai Shangguan, Ph.D. “Evaluation of Lead Free Solder Paste Materials for PCBA”. 2011. Initially Published in the IPC Proceedings.

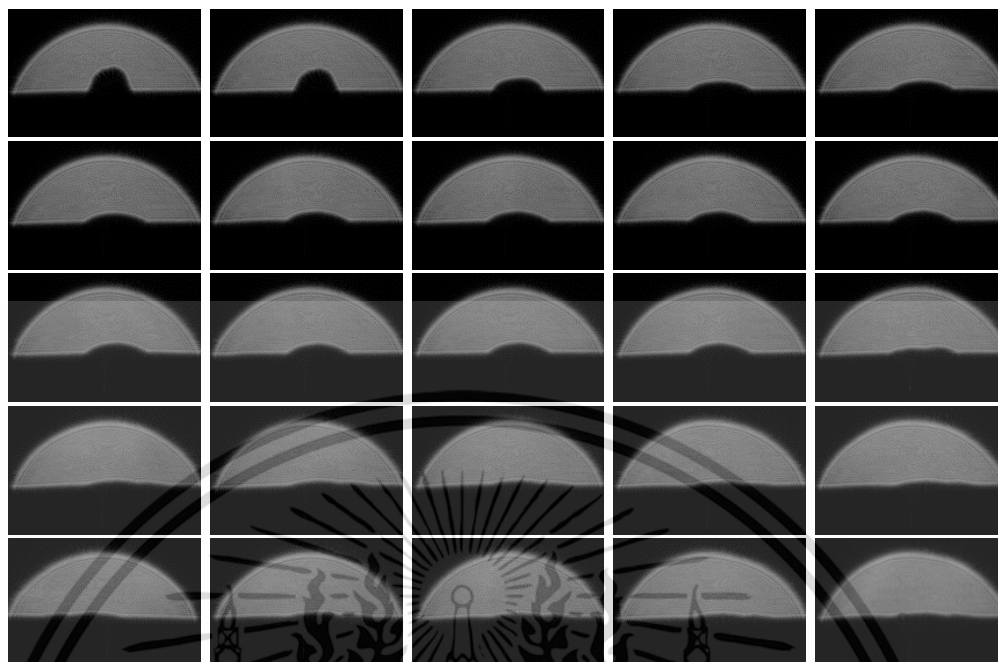
- [10] **Characteristics of Solder Paste** [online]. Available : http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Characteristics_of%20Solder_Paste.pdf
- [11] Geologyscience.com. 2021. **Graphite**. [online]. Available : <https://geologyscience.com/minerals/graphite/>.
- [12] วิสสุตา บุญทา และศิรินันท์ กุลชาติ. 2562. “Graphene Quantum Dots and its Potential Applications”. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 47(4): 576-597.
- [13] Jeremy J. Ramsden. 2011. **Nanotechnology: An Introduction**. Cranfield University. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20342-4>.
- [14] Kanlayasiri, W. and Meesathien, N. “Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Properties of SAC0307 Lead-Free Solder Paste”. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, Article ID 3750742, 10 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2018/3750742>.
- [15] สุชาติ จันทรมณีย์ และไพโรจน์ สังขไพฑูรย์. 2561. “The Study of Wettability and Microstructure for SAC305 and SAC305-0.5In Lead-Free Solders on Copper Substrate”. *วารสารข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย*. 4(1): 42-51.
- [16] K. Sukpimai et al. 2019. “Wettability and printability of SAC305-xTiO₂ Pb-free solder paste on Cu substrate”. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 635. 012009.
- [17] K. Bukat, M. KoŚcielski, J. Sitek, M. Jakubowska, A. MłoŻniak. “Silver nanoparticles effect on the wettability of Sn-Ag-Cu solder pastes and solder joints microstructure on copper”. 2011. *Soldering and Surface Mount Technology* 23(3):150-160
DOI:10.1108/09540911111146908.
- [18] Liu Mei Lee, Ahmad Azmin Mohamad. 2013. “Interfacial Reaction of Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Alloy on Cu: A Review”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, Article ID 123697, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/123697>.
- [19] Digital Photography Review All Rights Reserved. 2022. **Canon EOS 550D (EOS Rebel T2i / EOS Kiss X4) Overview**. [online]. Available : https://www.dpreview.com/products/canon/slr/canon_eos550d/overview



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

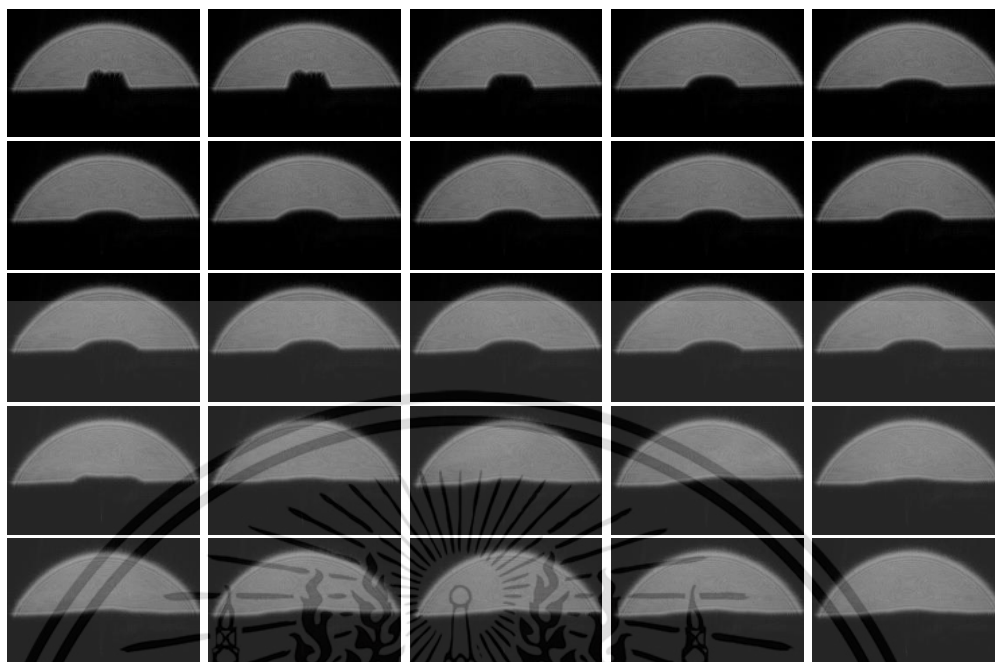


รูปที่ ก.1 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 1



รูปที่ ก.2 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

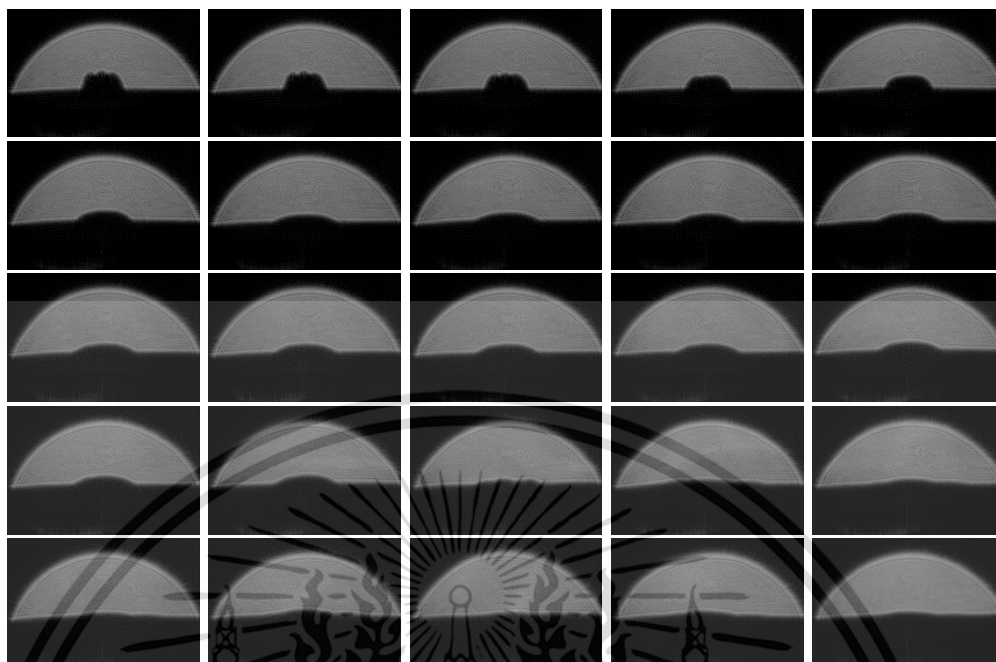


รูปที่ ก.3 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.4 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.01% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

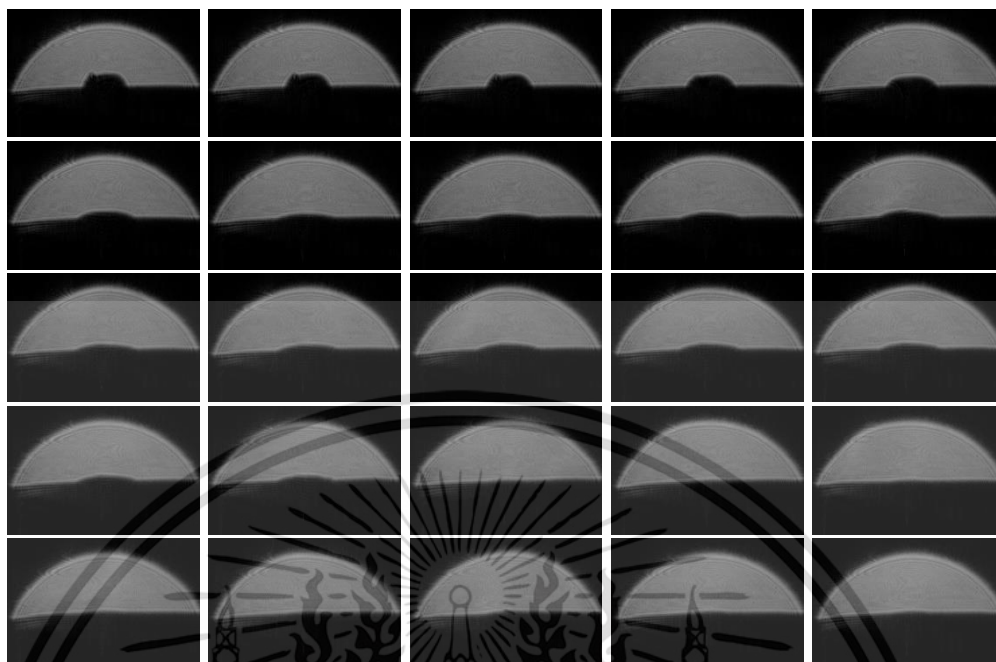


รูปที่ ก.5 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Graphite ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.6 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

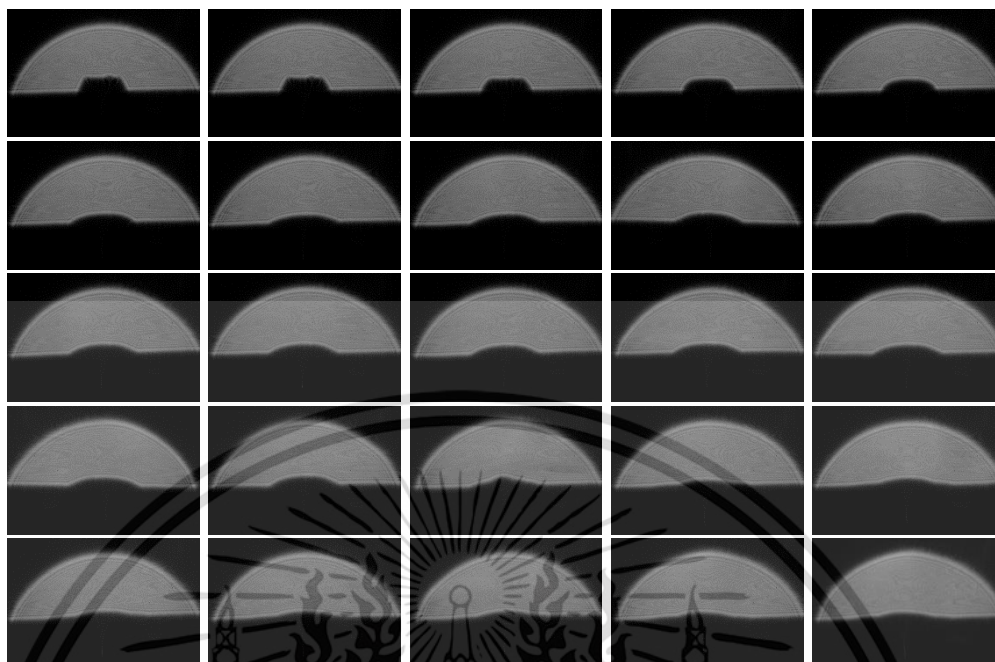


รูปที่ ก.7 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.02% Graphite ครั้งที่ 1



รูปที่ ก.8 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.02% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

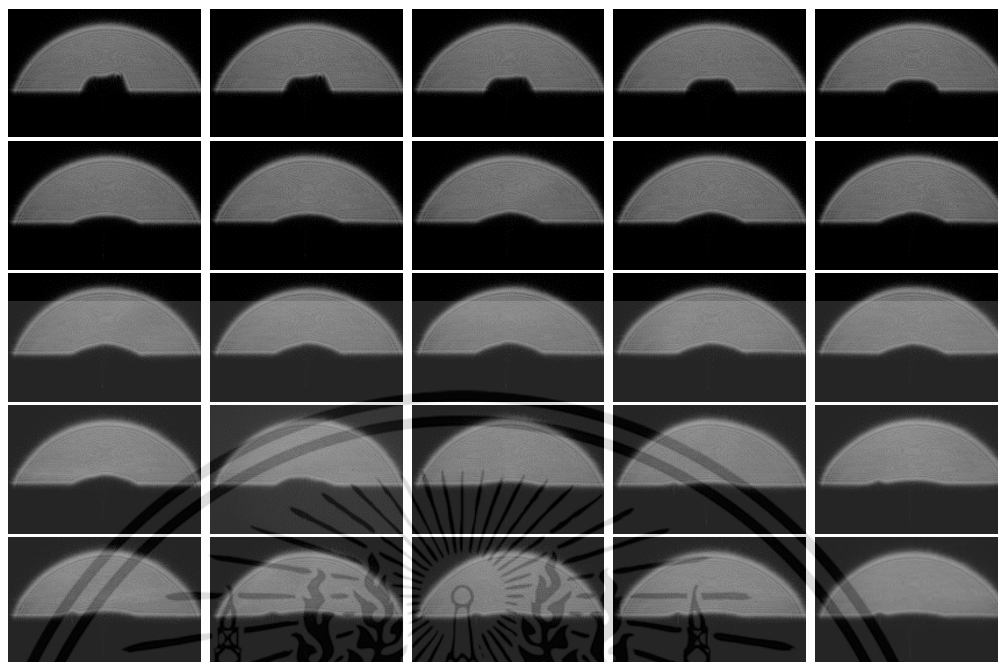


รูปที่ ก.9 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.02% Graphite ครั้งที่ 3

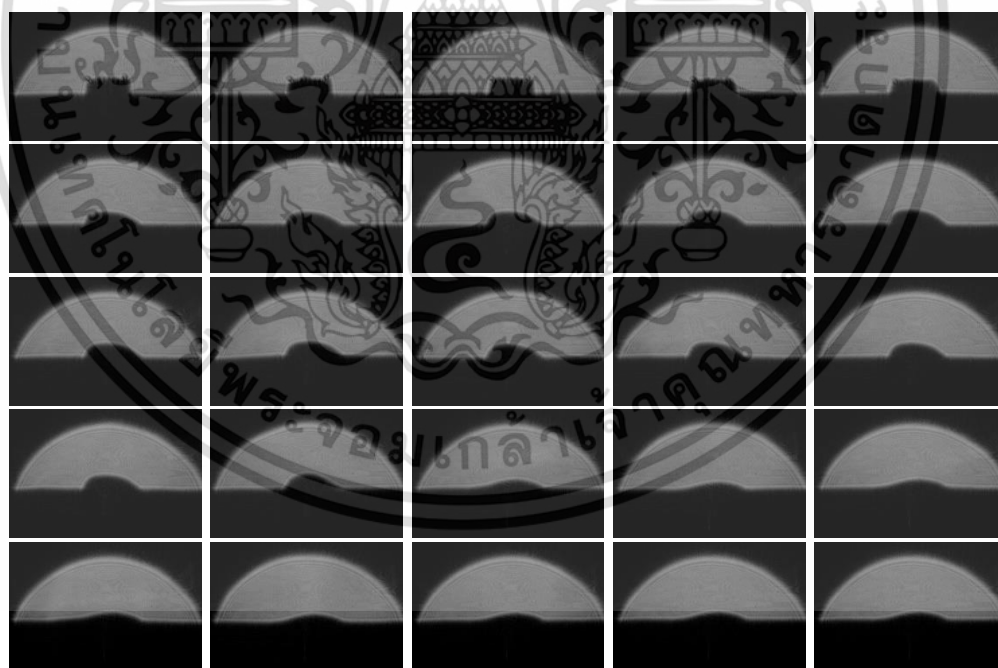


รูปที่ ก.10 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

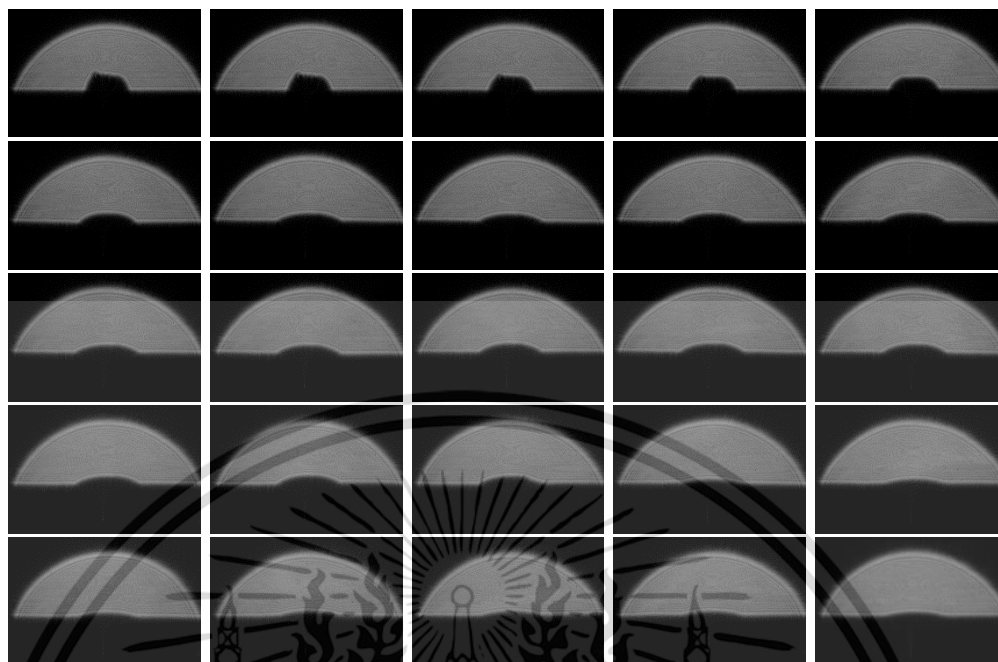


รูปที่ ก.11 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphite ครั้งที่ 2

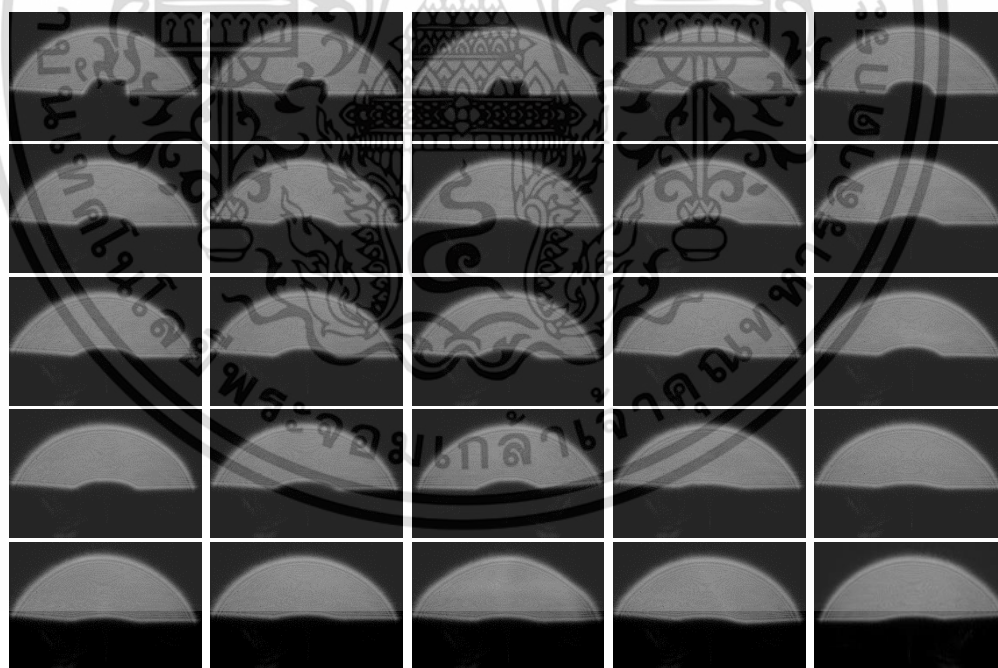


รูปที่ ก.12 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

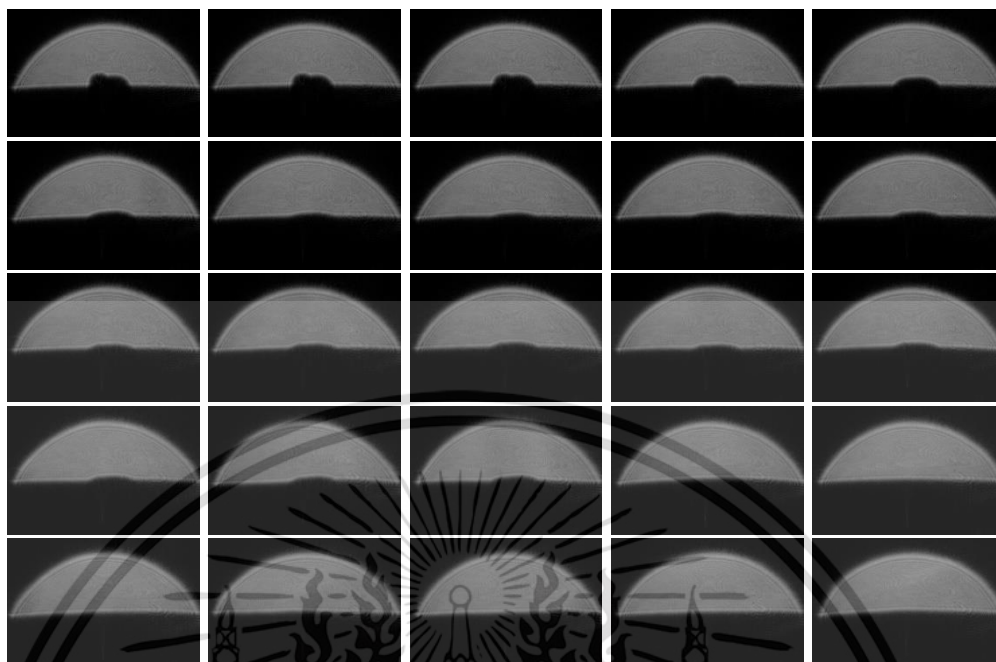


รูปที่ ก.13 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphite ครั้งที่ 1



รูปที่ ก.14 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

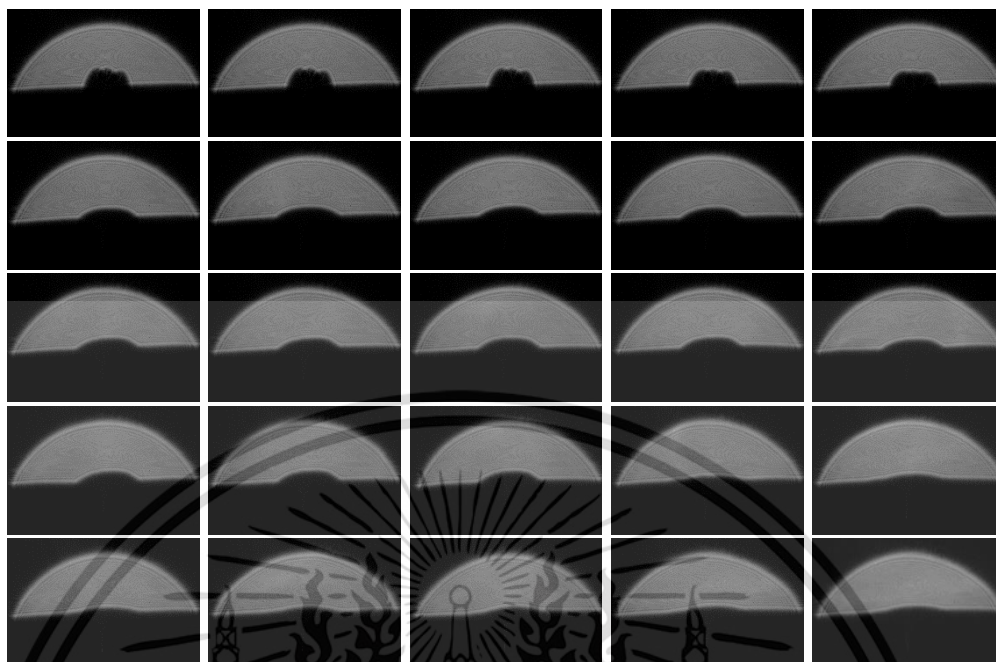


รูปที่ ก.15 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphite ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.16 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

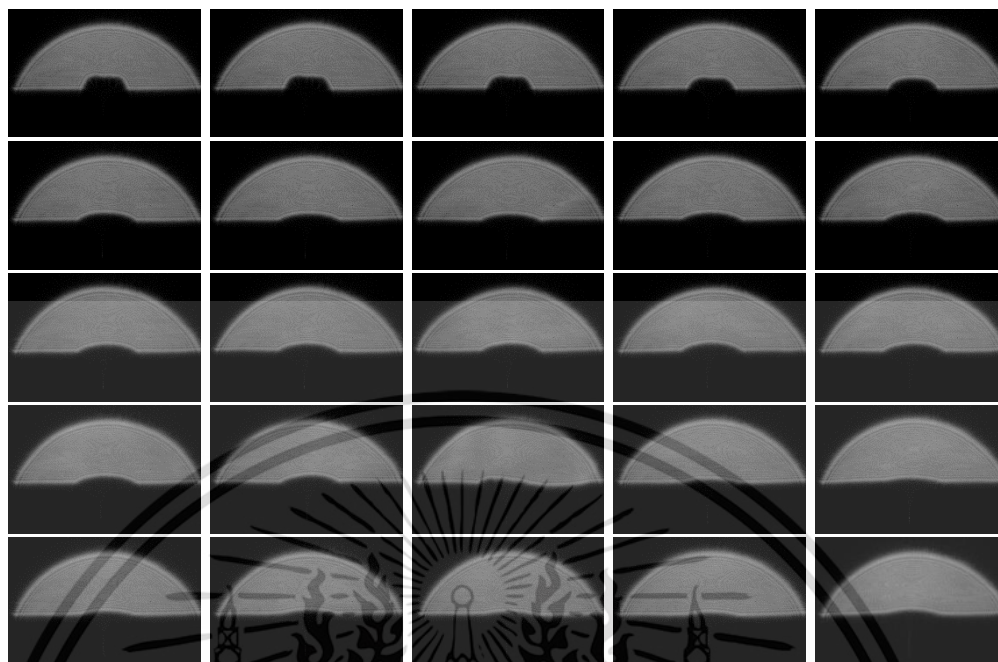


รูปที่ ก.17 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 2

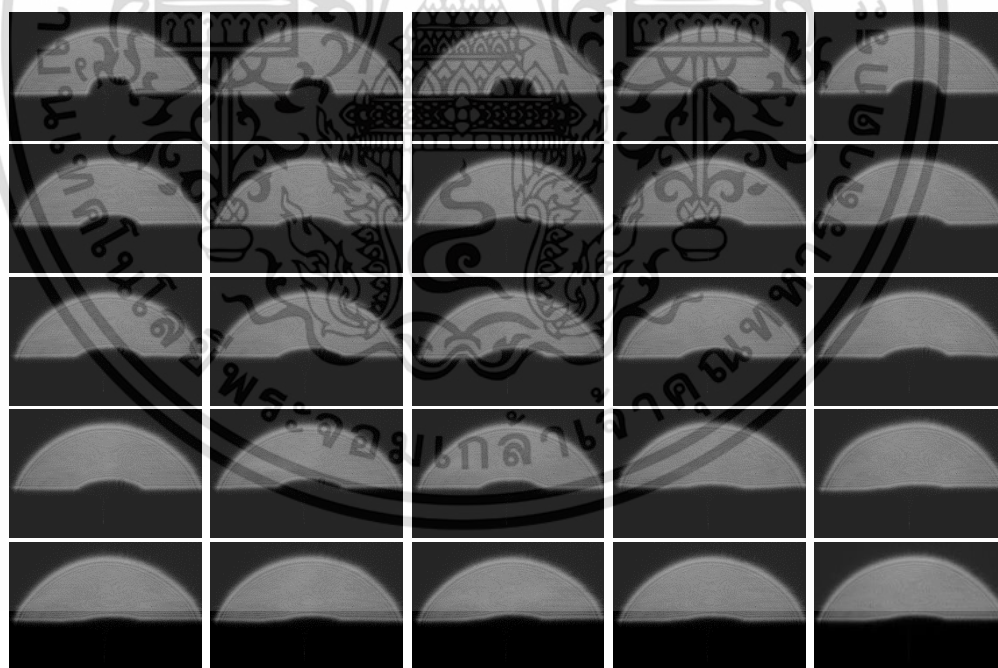


รูปที่ ก.18 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

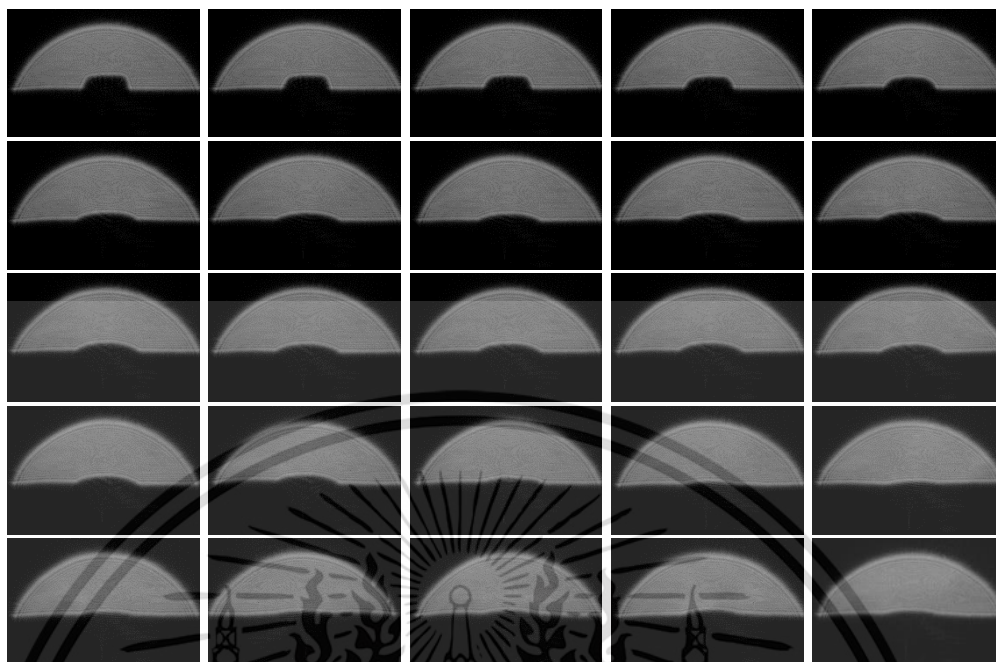


รูปที่ ก.19 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 1

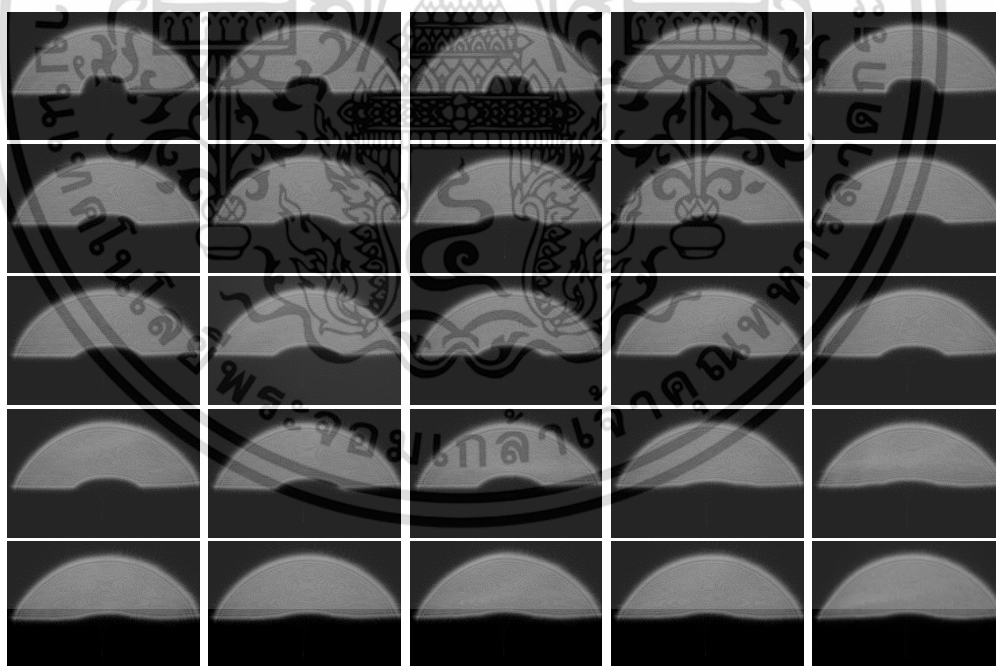


รูปที่ ก.20 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

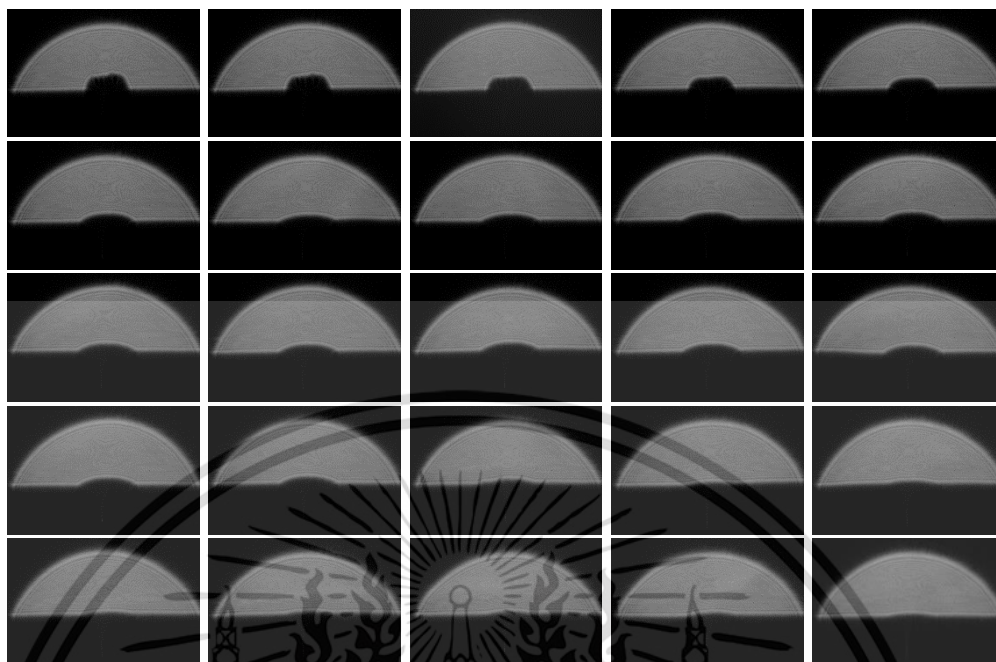


รูปที่ ก.21 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.22 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

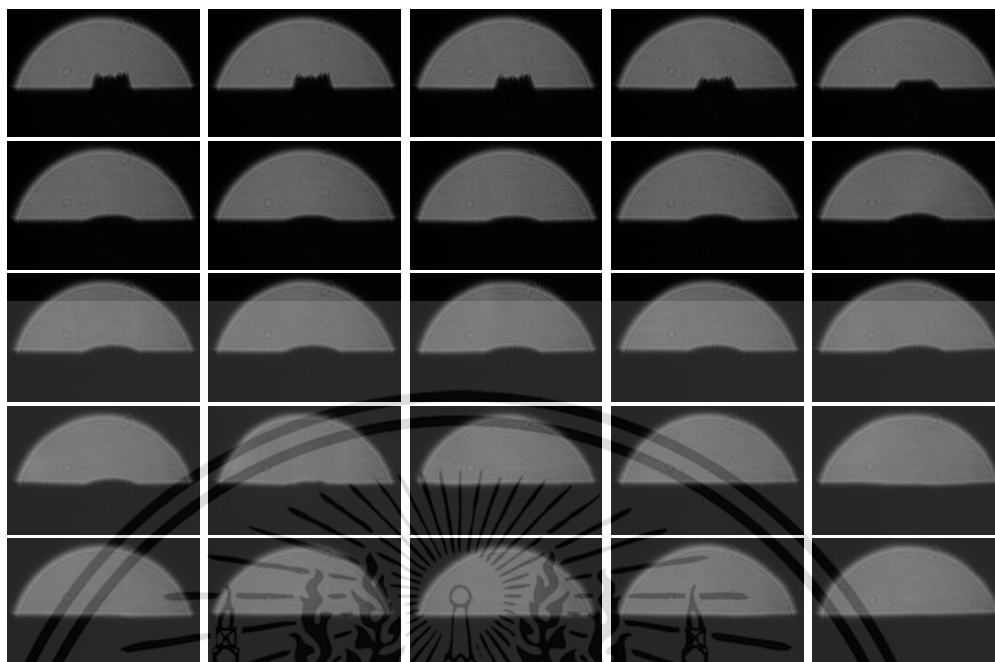


รูปที่ ก.23 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.24 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

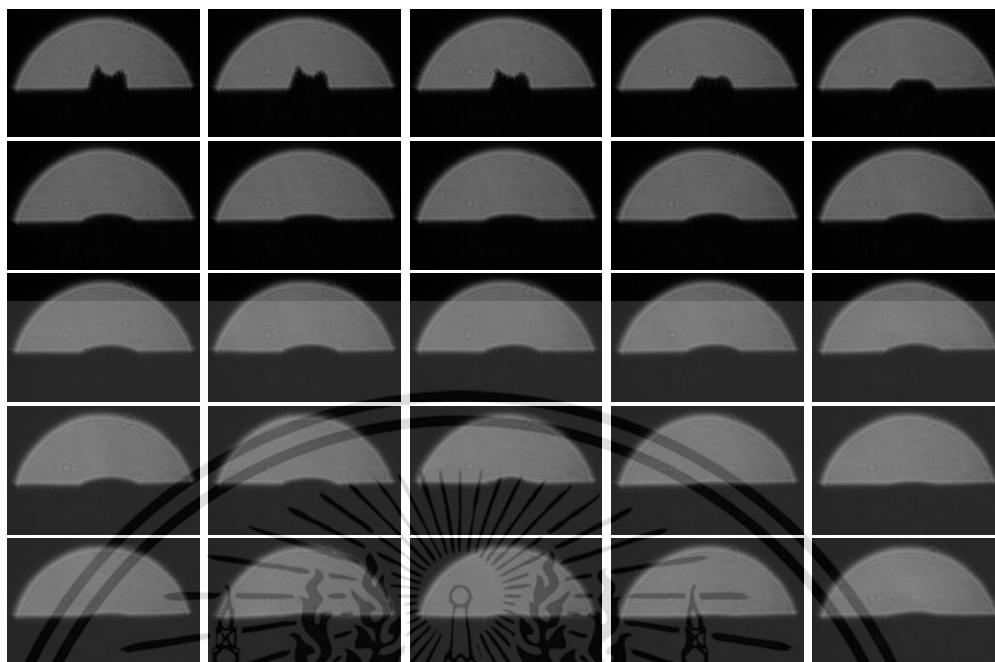


รูปที่ ก.25 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1



รูปที่ ก.26 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

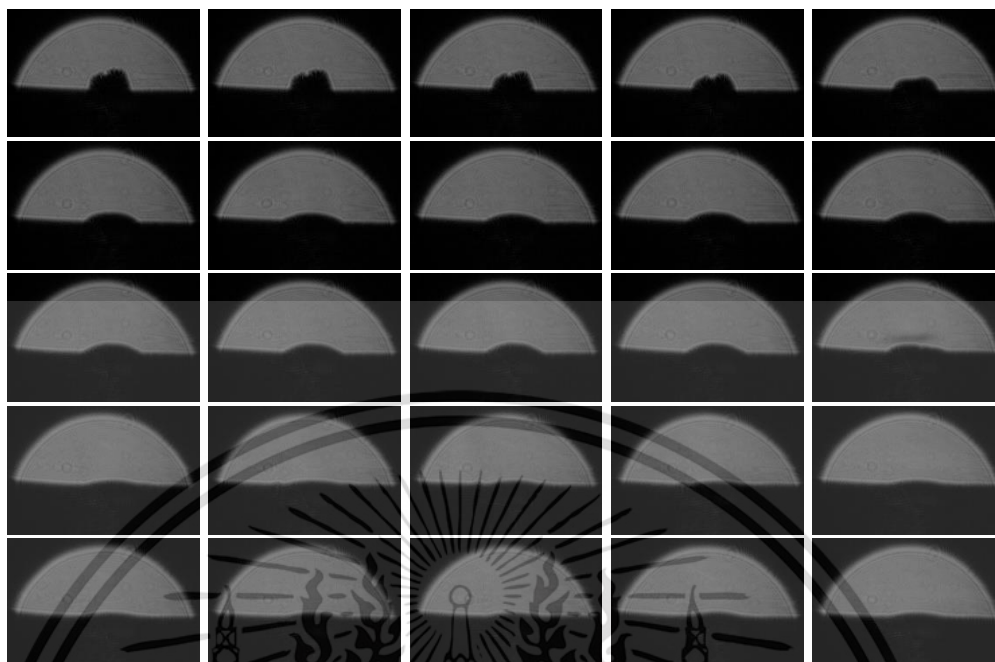


รูปที่ ก.27 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.28 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

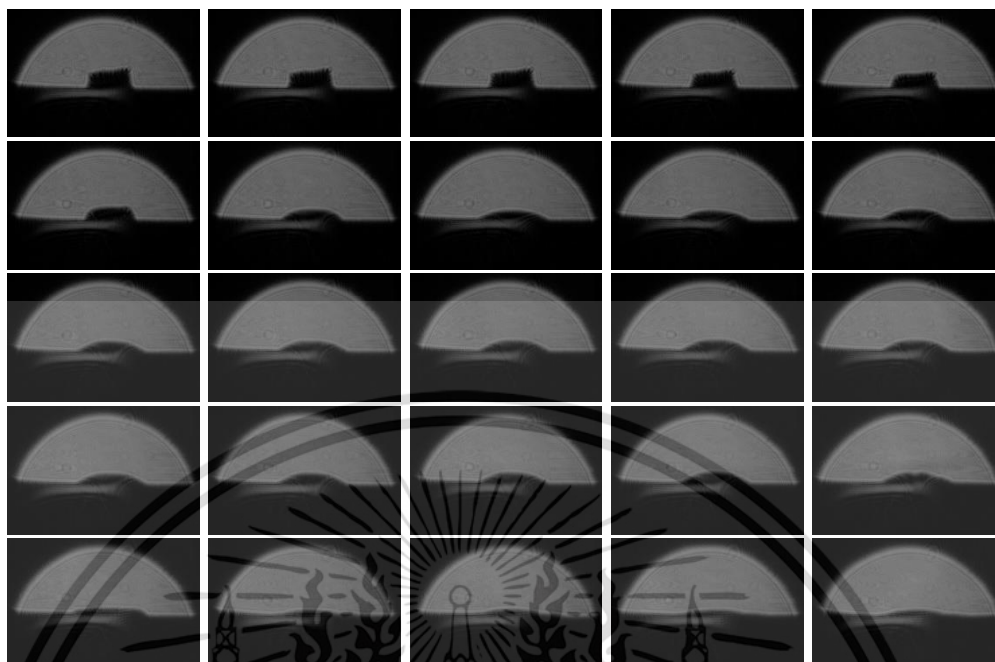


รูปที่ ก.29 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.30 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

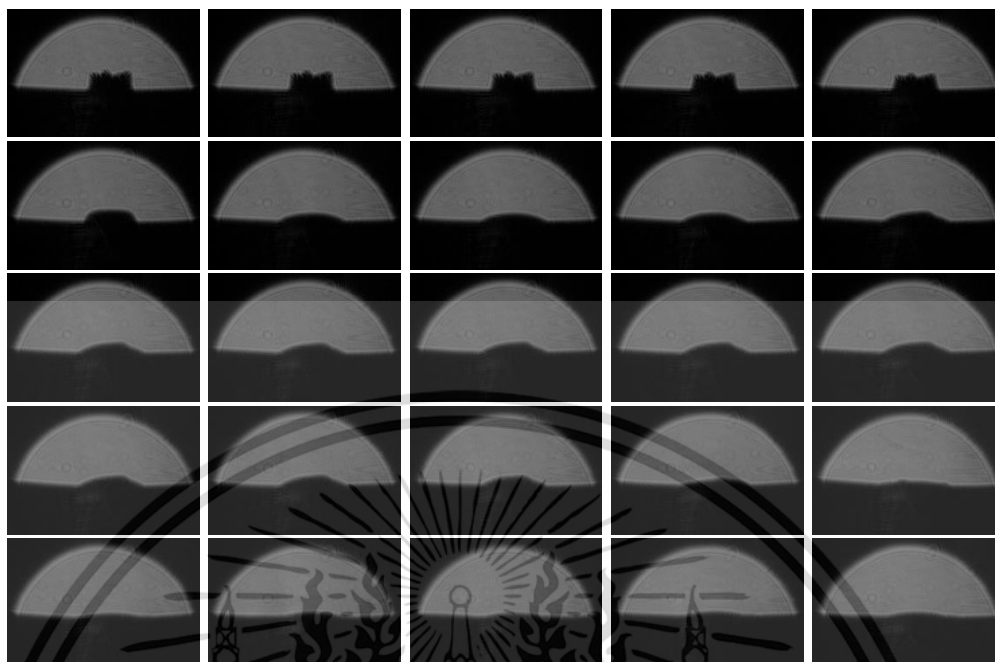


รูปที่ ก.31 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

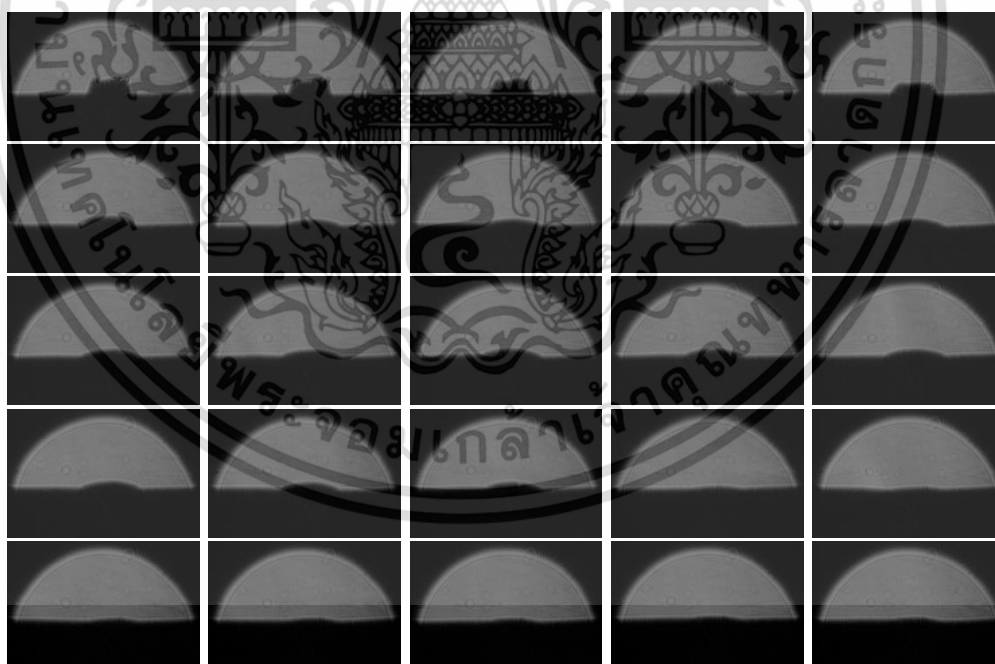


รูปที่ ก.32 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

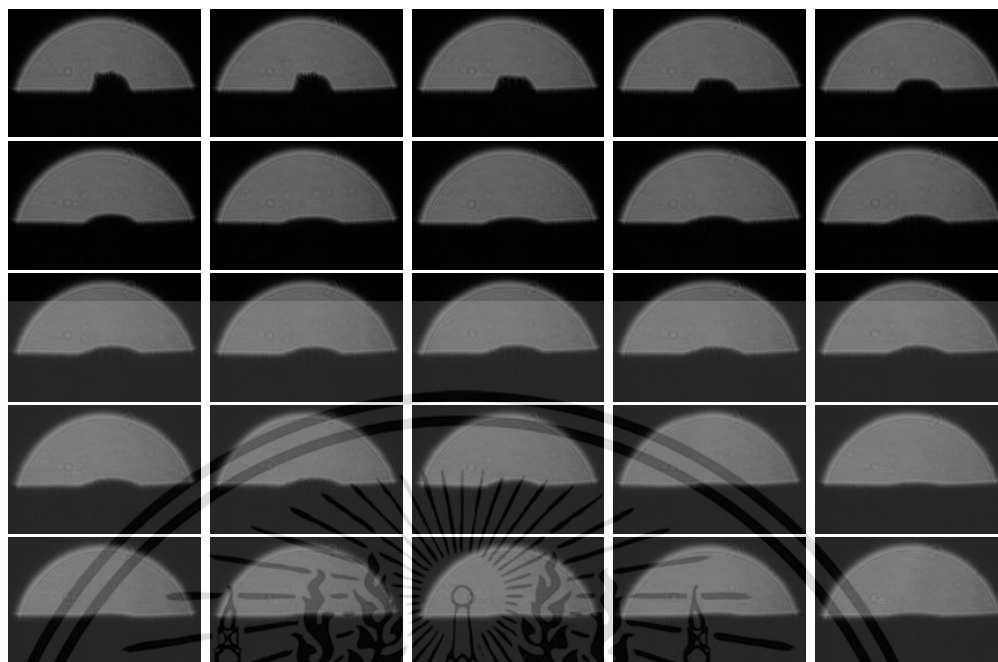


รูปที่ ก.33 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

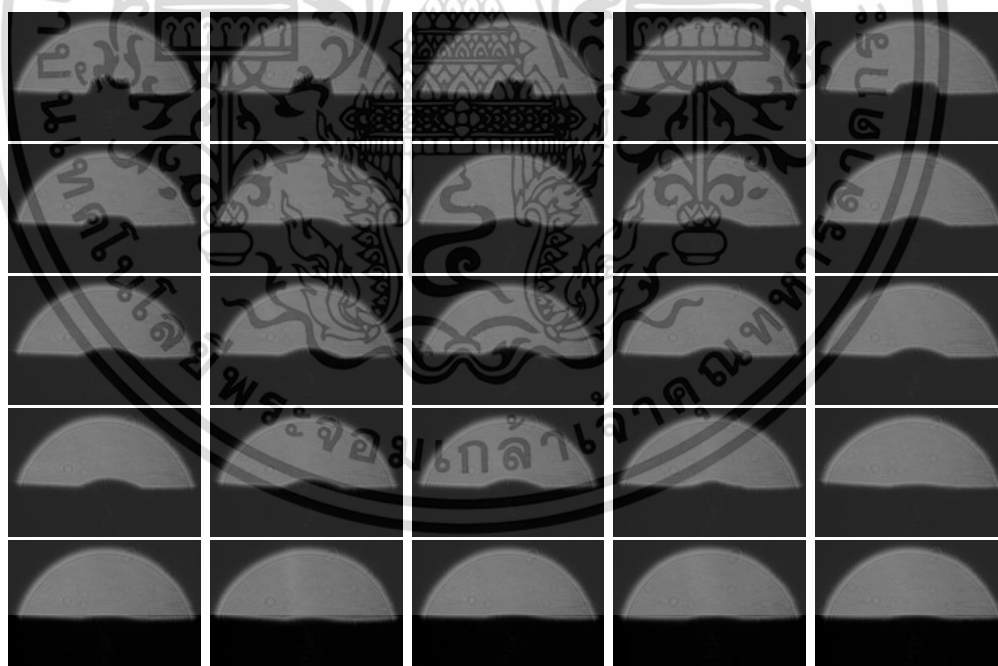


รูปที่ ก.34 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

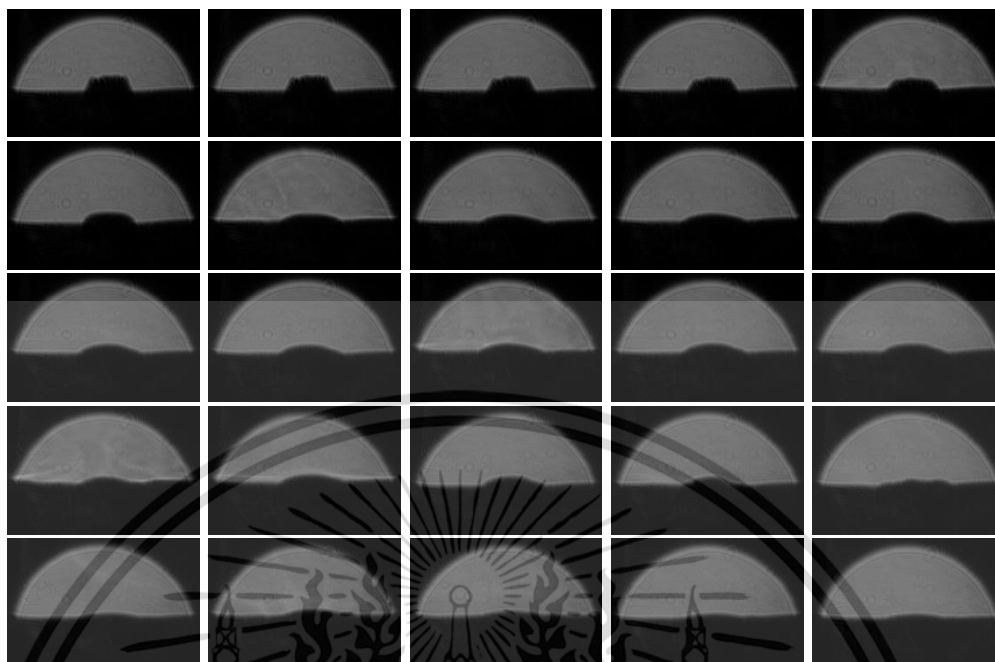


รูปที่ ก.35 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.36 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

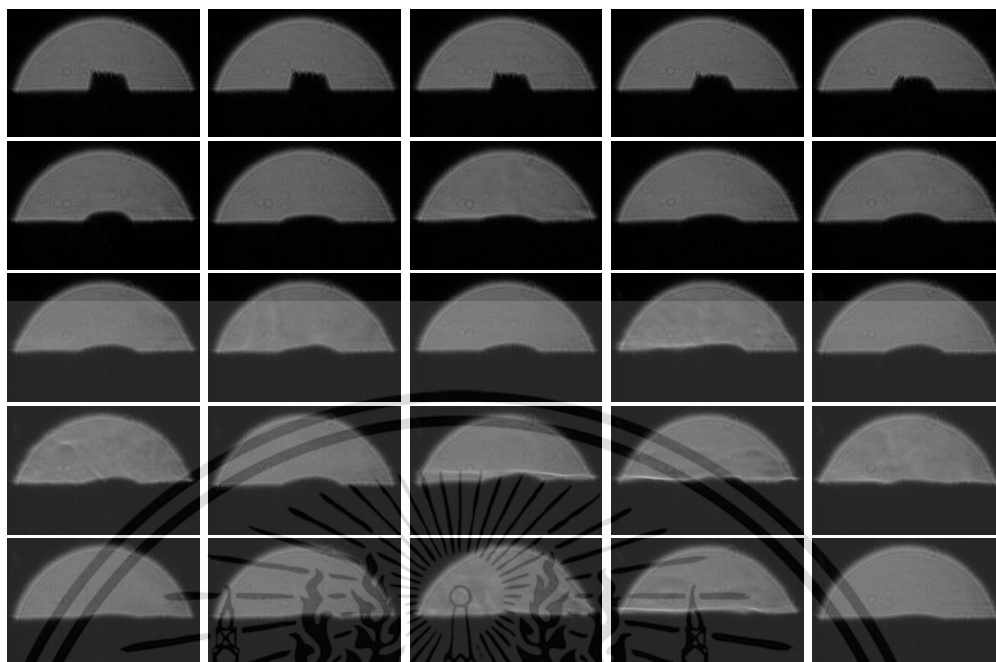


รูปที่ ก.37 ภาพแสดงโพลแกรมของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

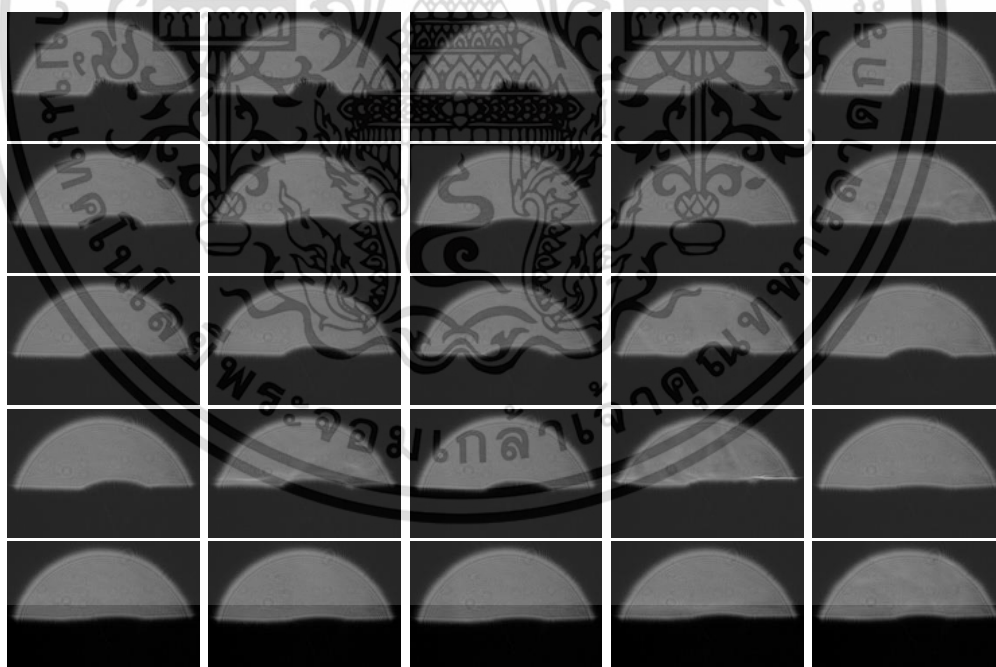


รูปที่ ก.38 ภาพแสดงโพลแกรมของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

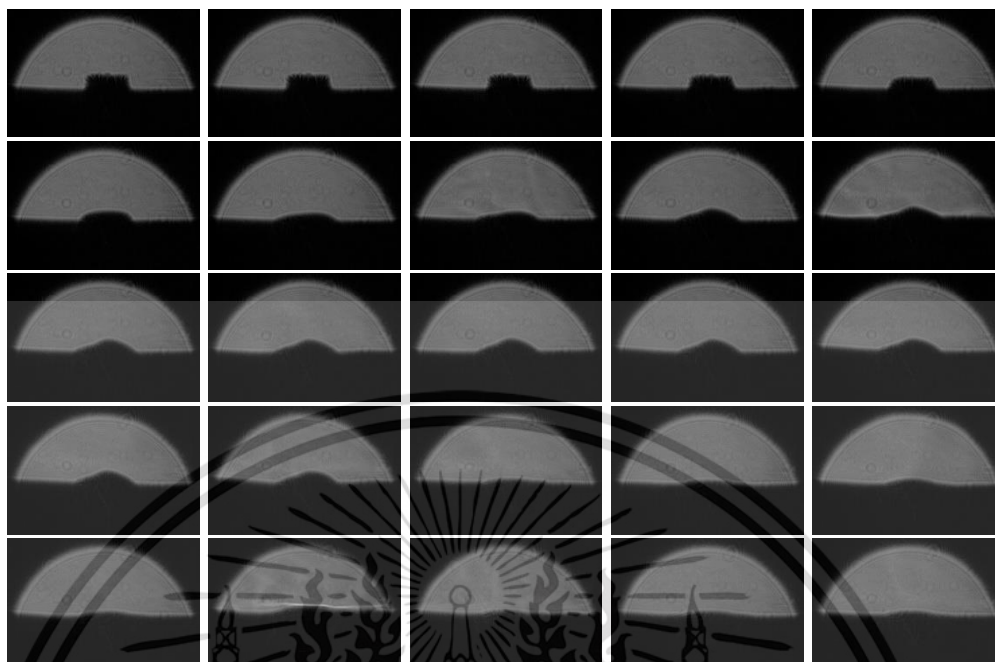


รูปที่ ก.39 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.40 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.08% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

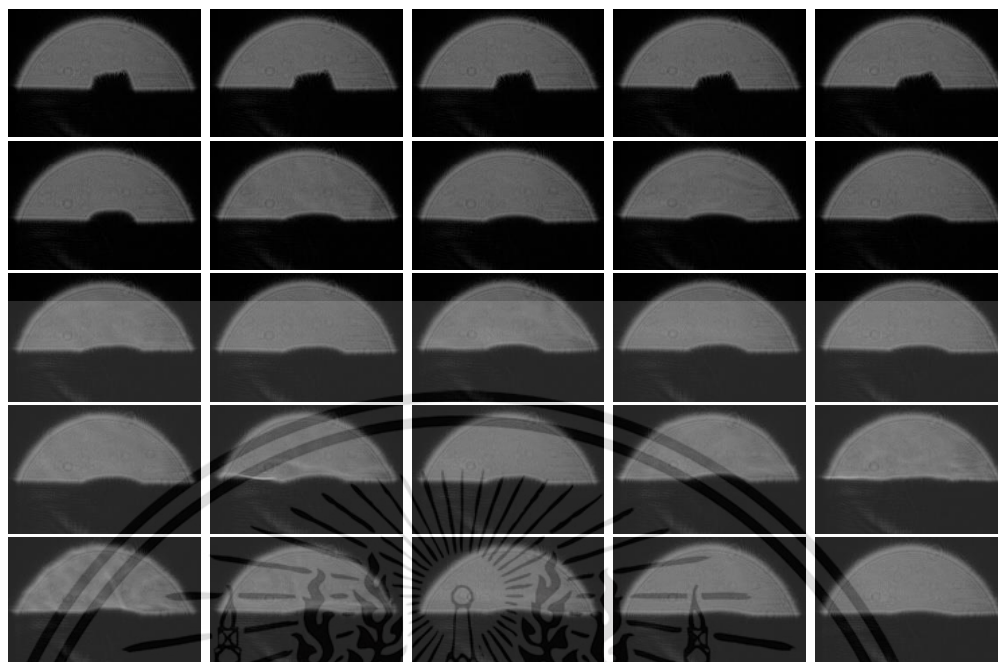


รูปที่ ก.41 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.08% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.42 ภาพแสดงโพลีแกรมของ 0.08% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

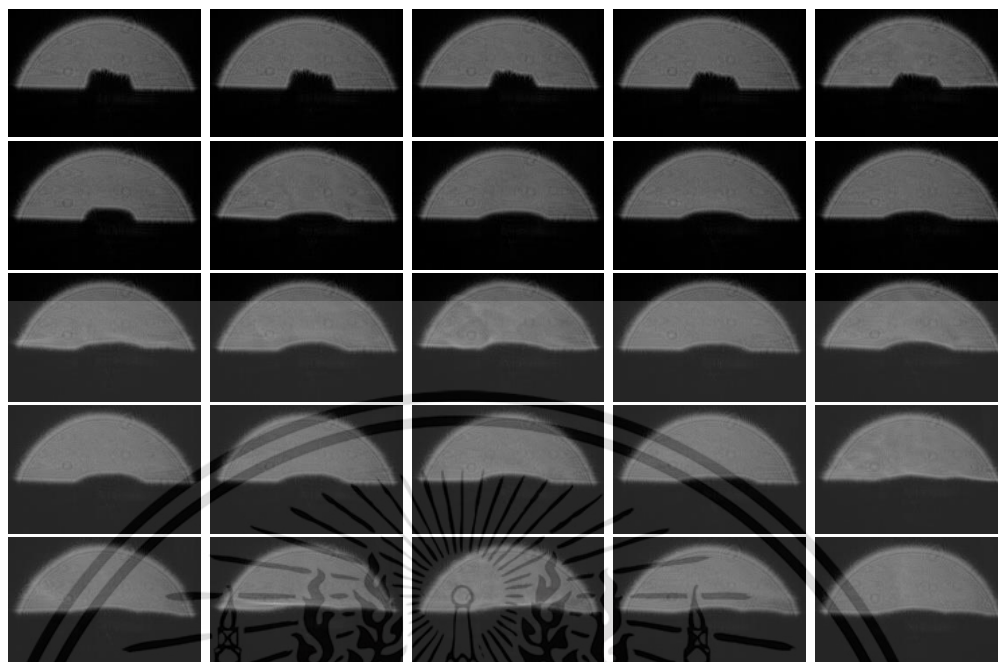


รูปที่ ก.43 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

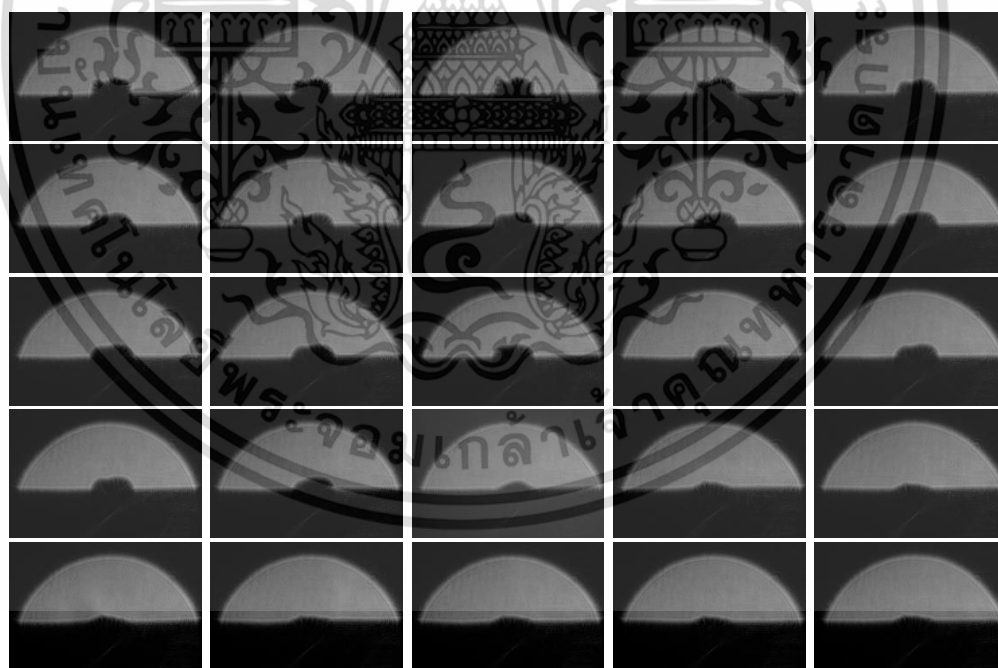


รูปที่ ก.44 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

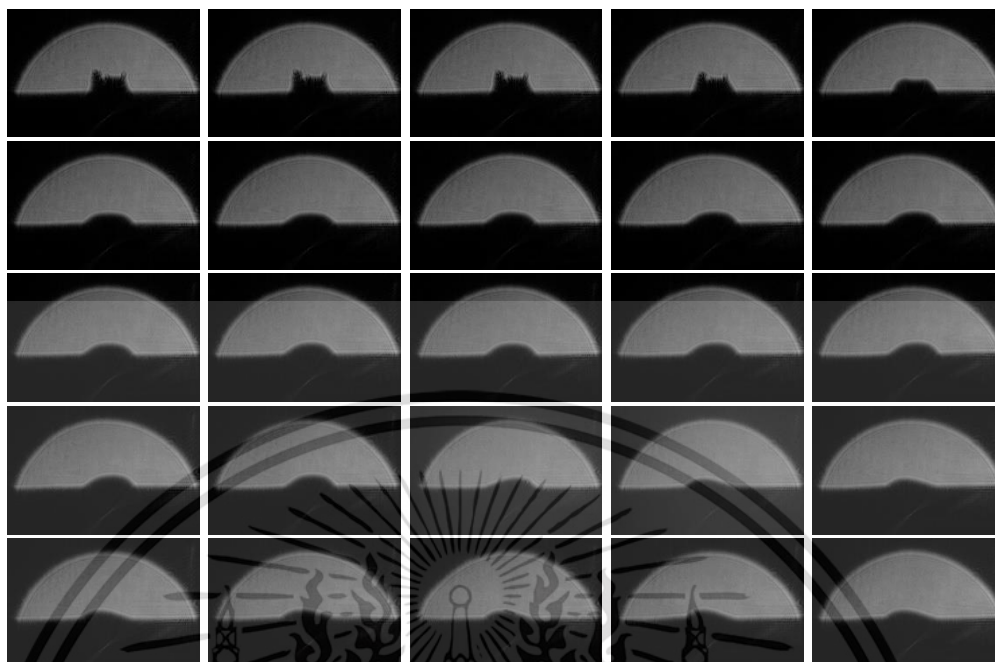


รูปที่ ก.45 ภาพแสดงโพลแกรมของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

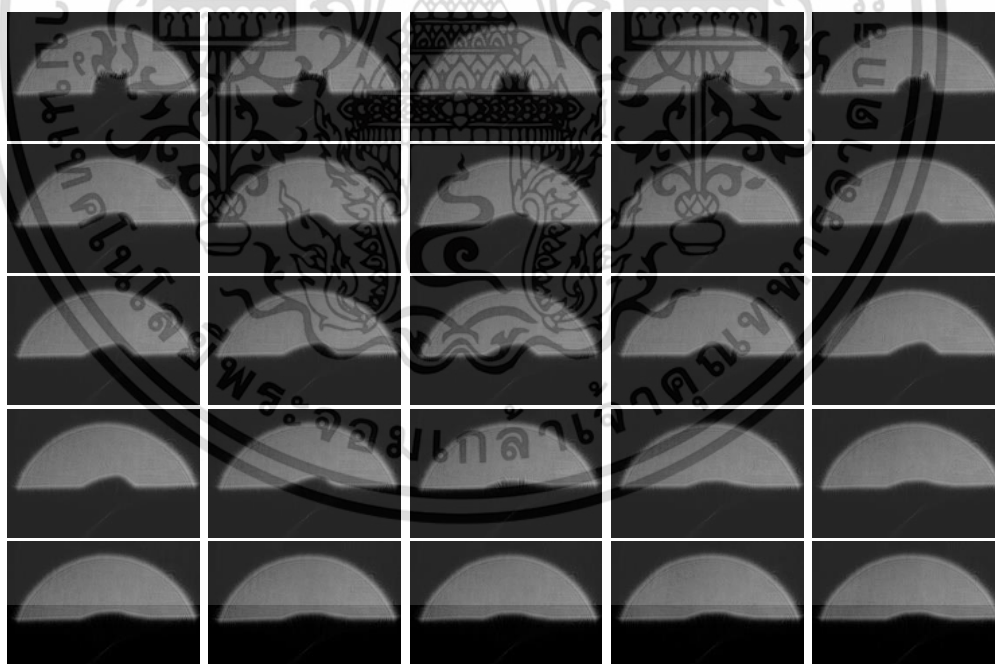


รูปที่ ก.46 ภาพแสดงโพลแกรมของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

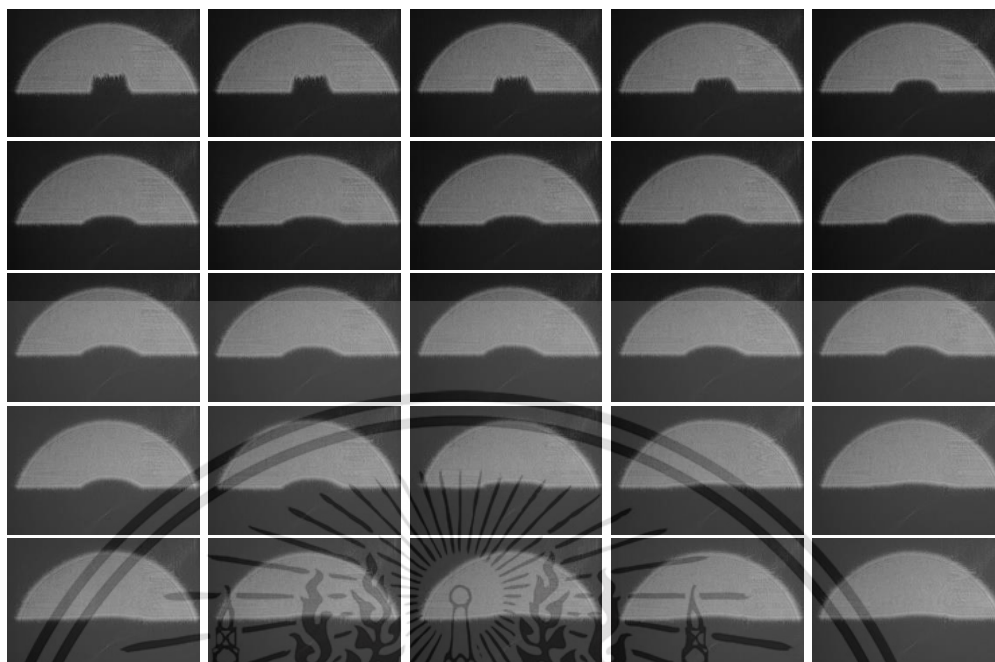


รูปที่ ก.47 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 2



รูปที่ ก.48 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

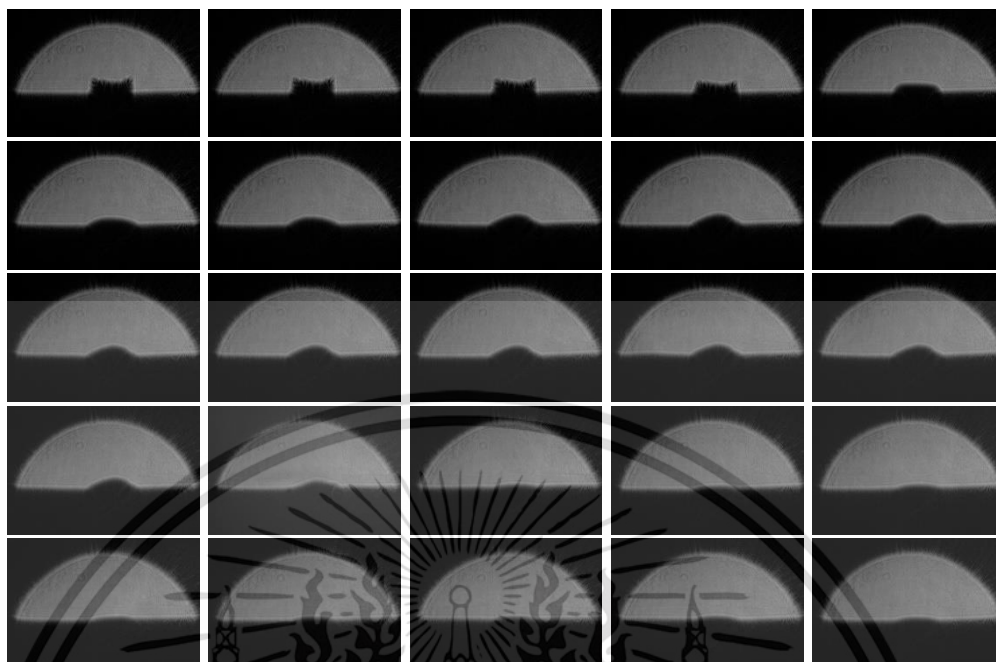


รูปที่ ก.49 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 1

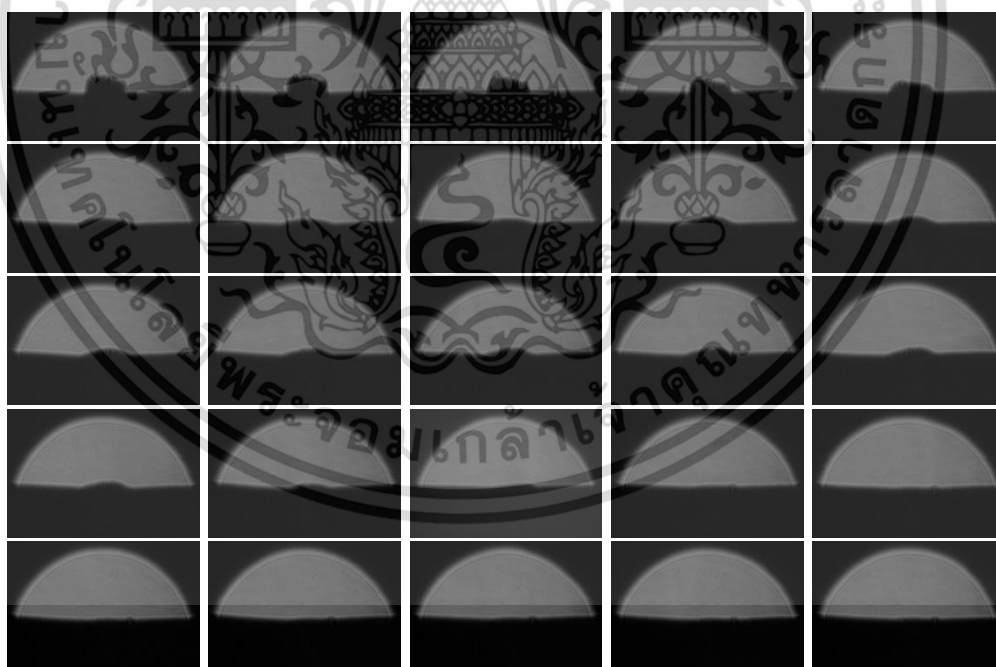


รูปที่ ก.50 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

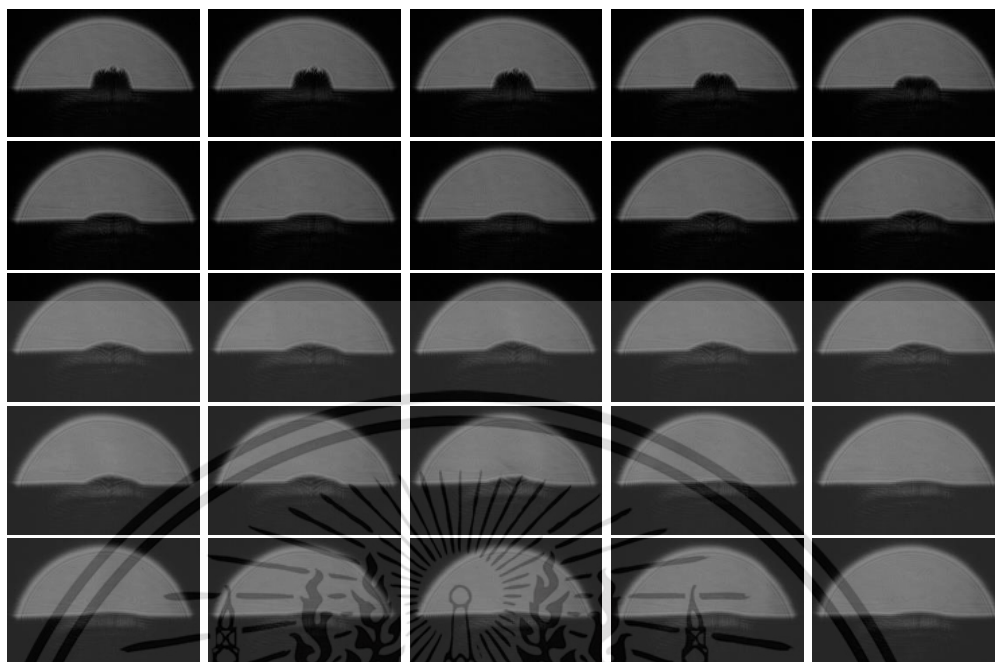


รูปที่ ก.51 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.52 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.04% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

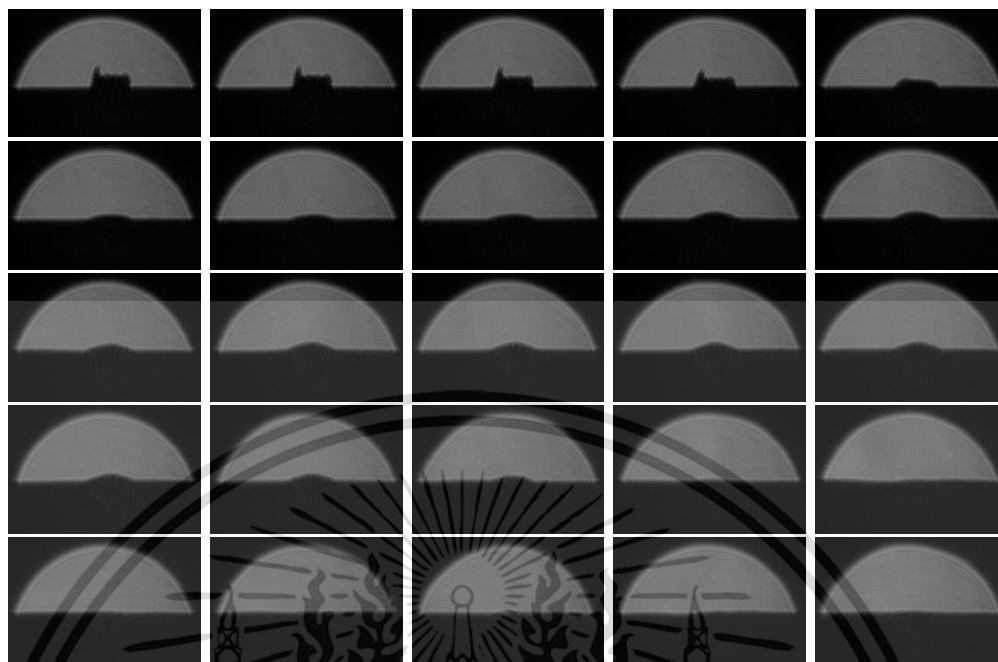


รูปที่ ก.53 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.04% Fullerene ครั้งที่ 2

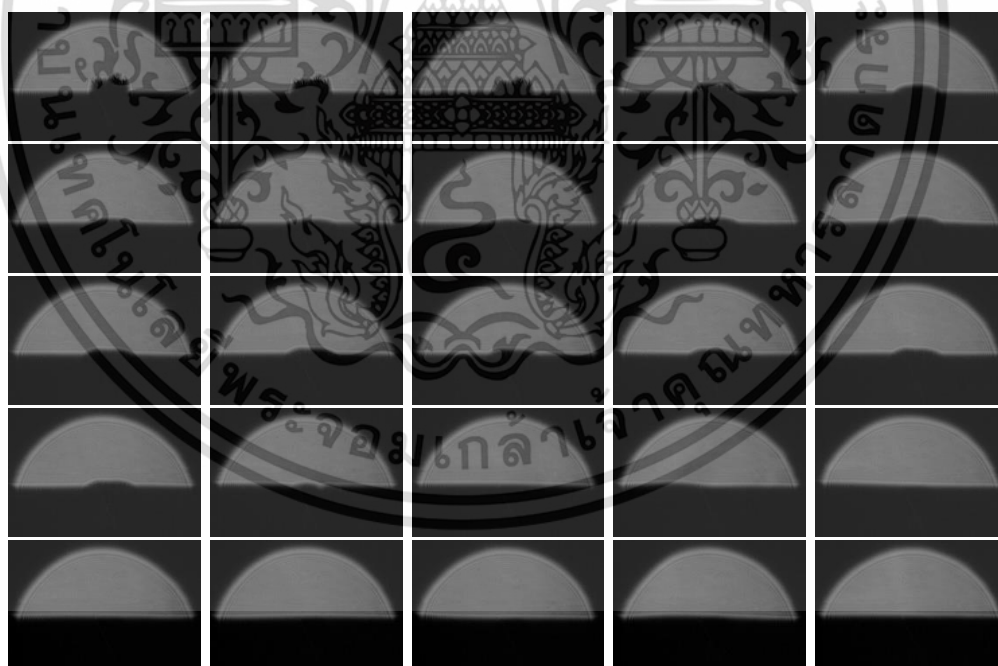


รูปที่ ก.54 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.04% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

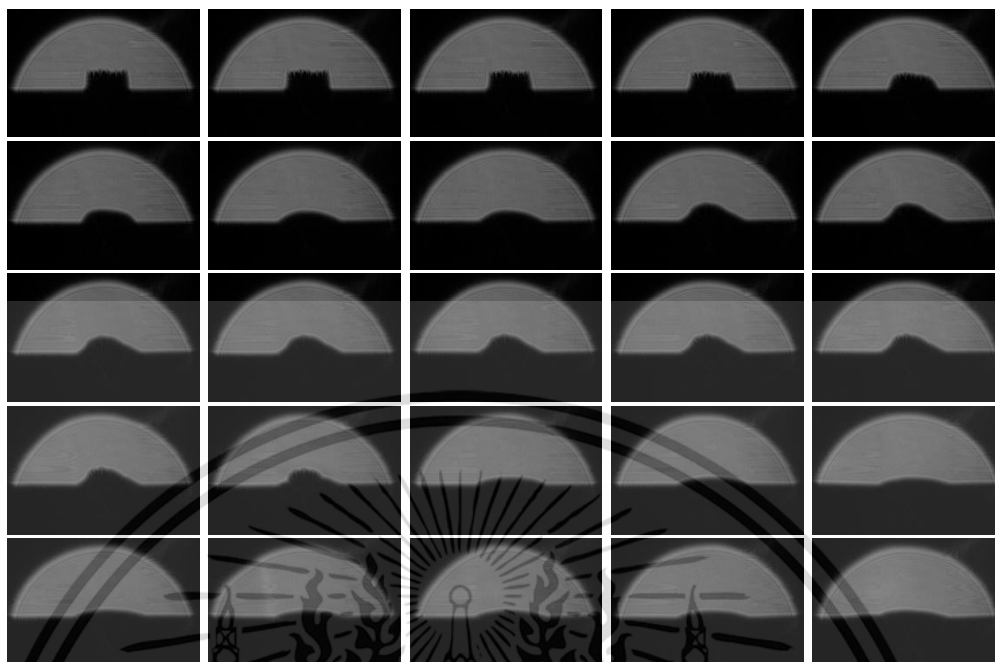


รูปที่ ก.55 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.05% Fullerene ครั้งที่ 1

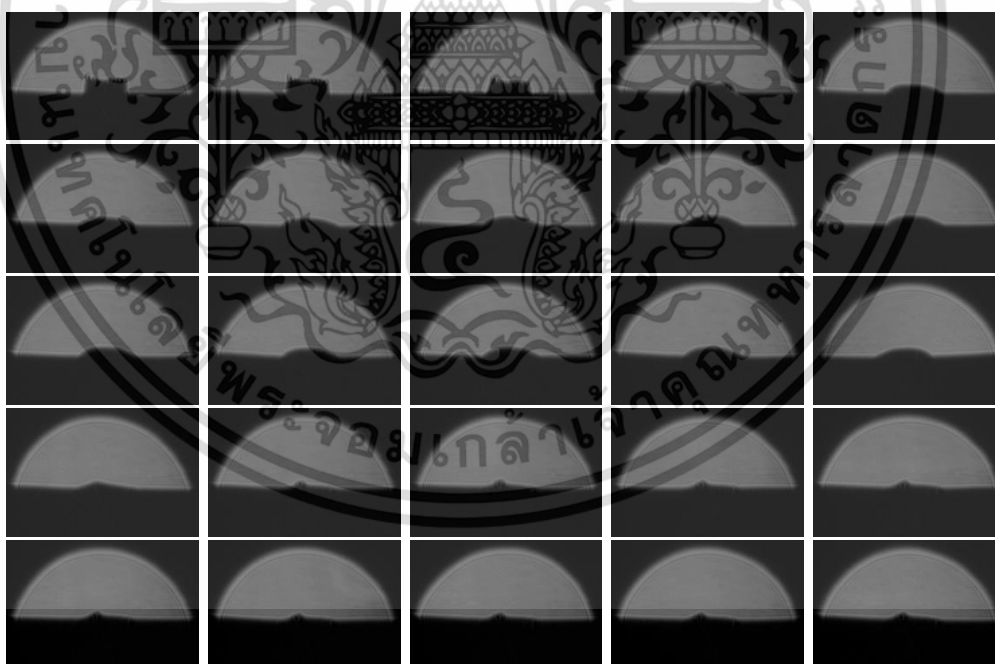


รูปที่ ก.56 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.05% Fullerene ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

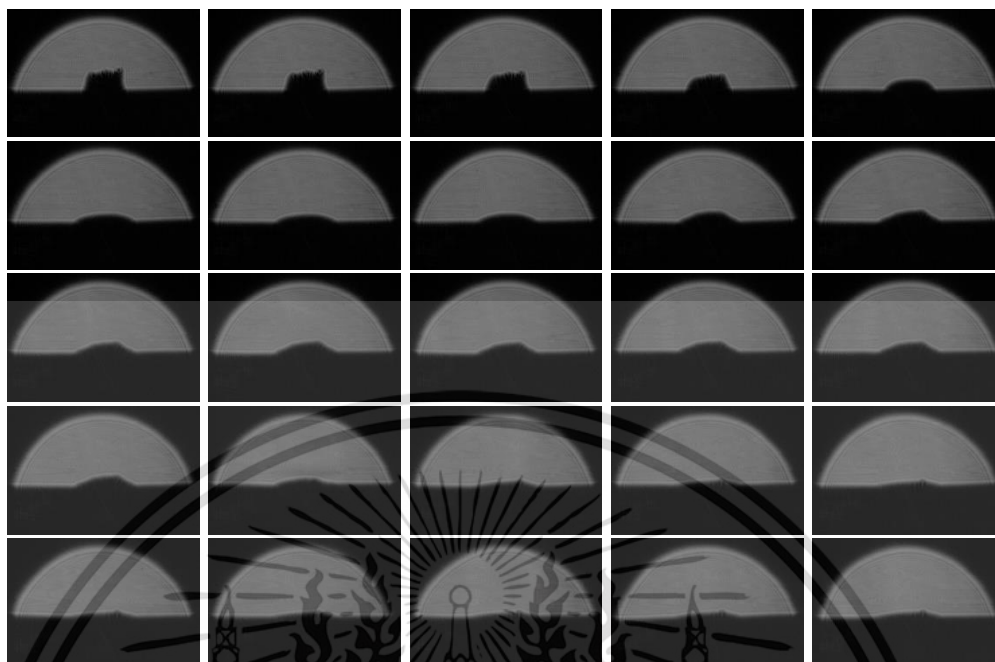


รูปที่ ก.57 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.05% Fullerene ครั้งที่ 3

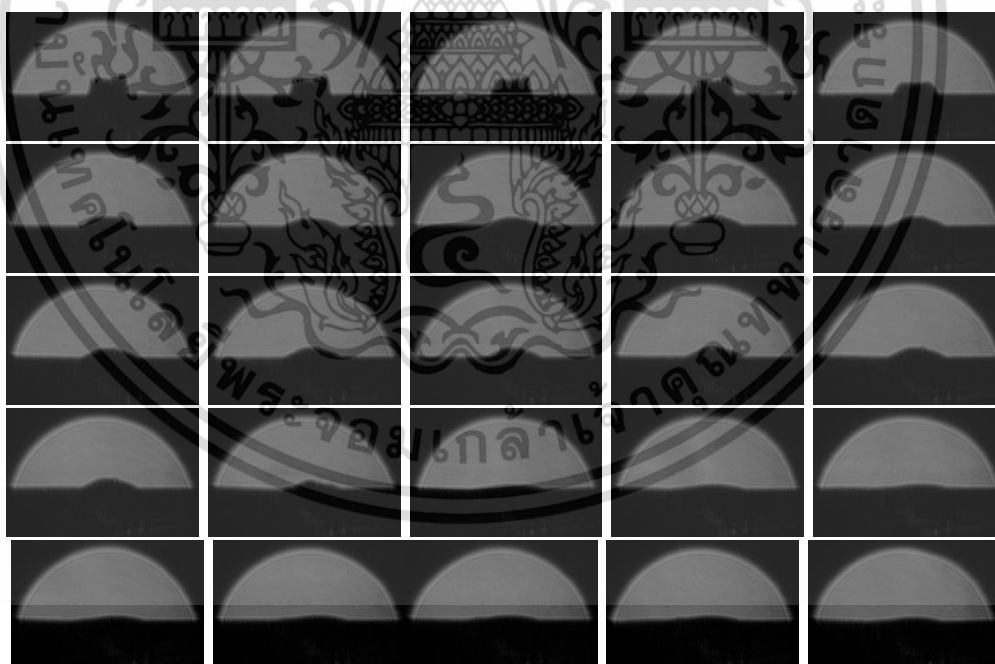


รูปที่ ก.58 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

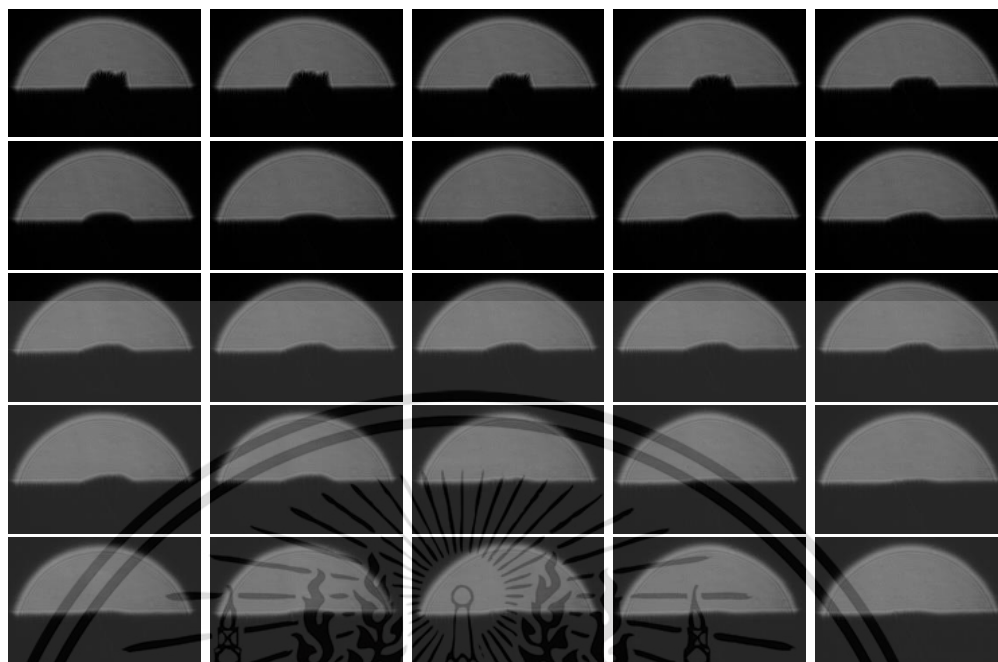


รูปที่ ก.59 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 2

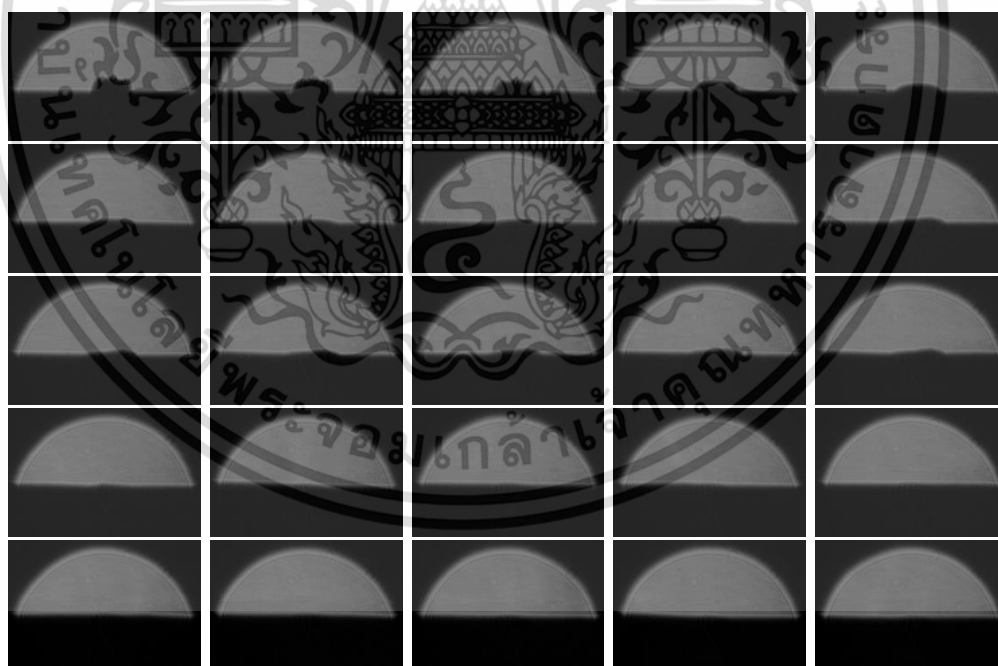


รูปที่ ก.60 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

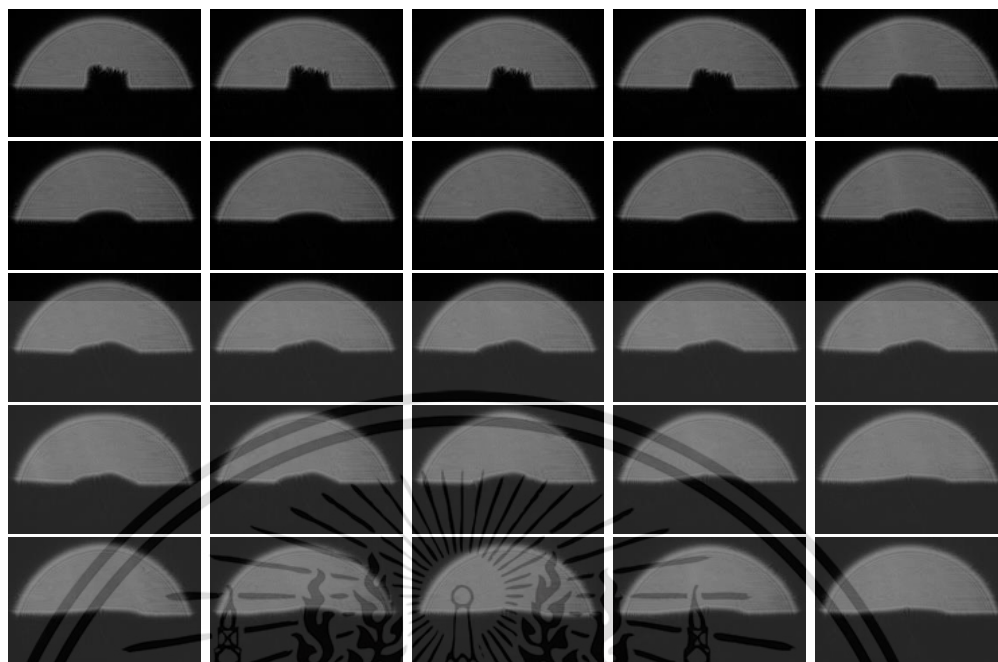


รูปที่ ก.61 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.08% Fullerene ครั้งที่ 1

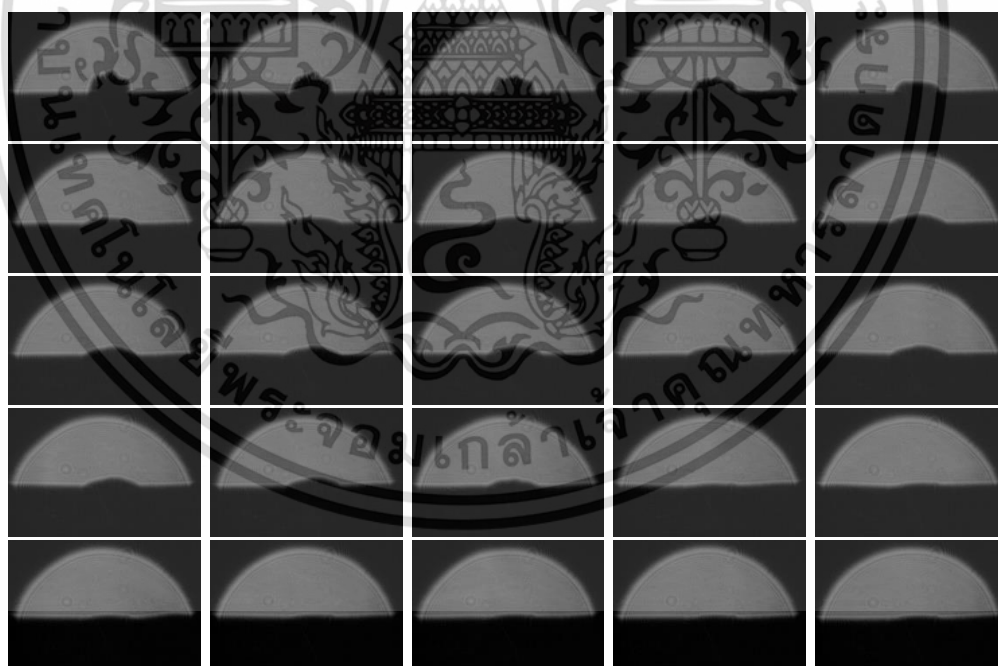


รูปที่ ก.62 ภาพแสดงไฮโลแกรมของ 0.08% Fullerene ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

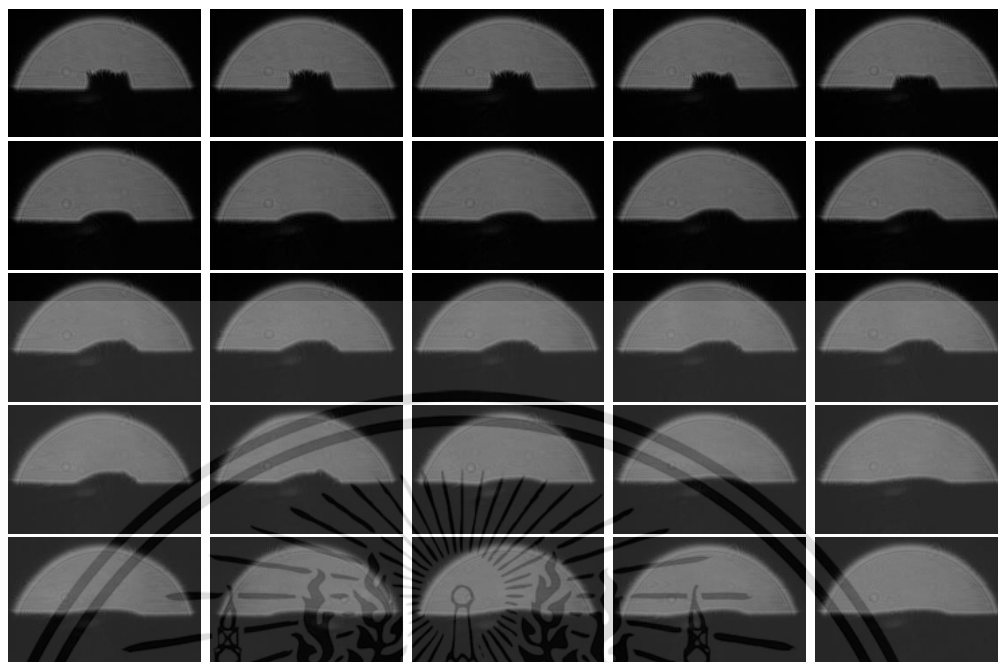


รูปที่ ก.63 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.08% Fullerene ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.64 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.65 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 2

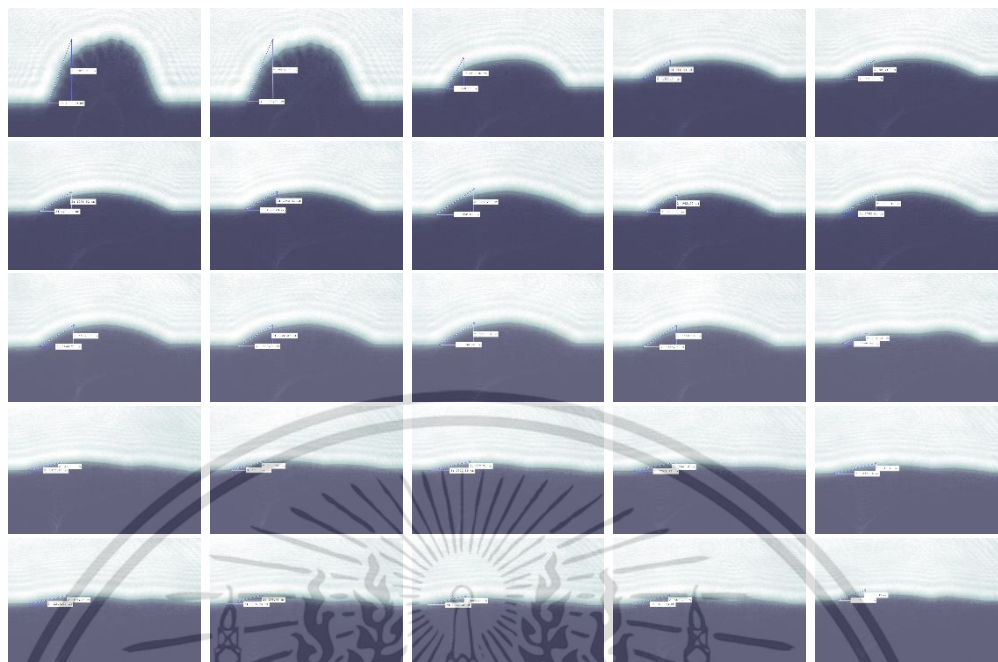


รูปที่ ก.66 ภาพแสดงโฮโลแกรมของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 3

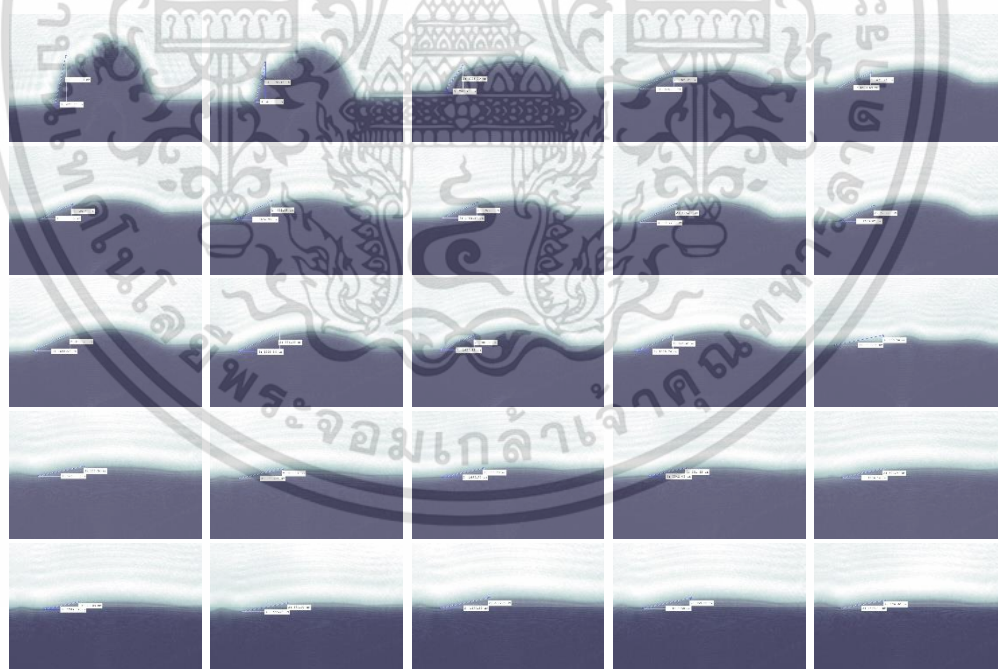
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

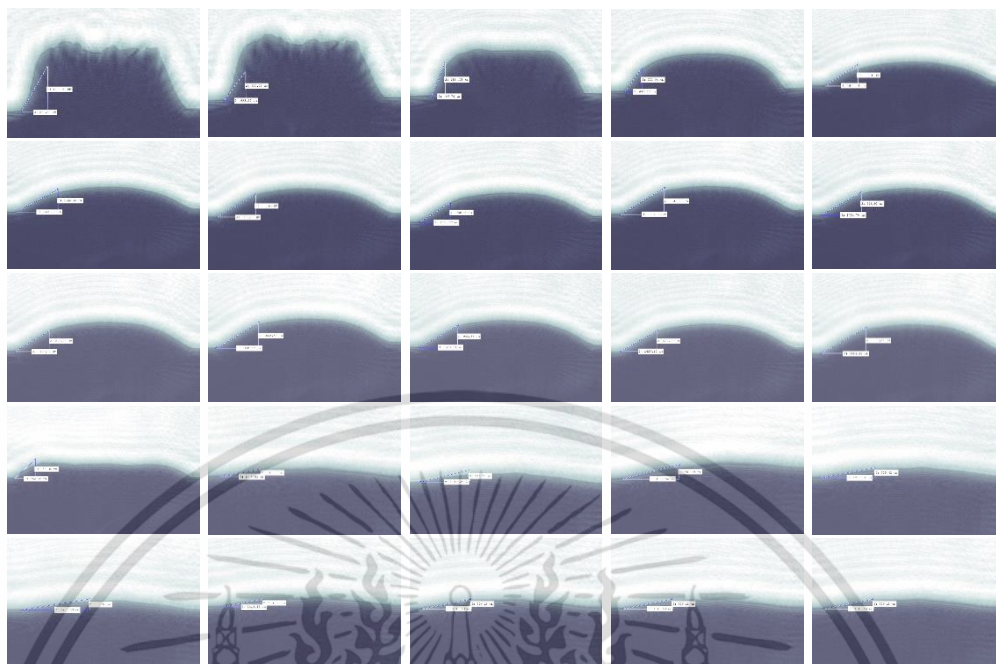


รูปที่ ข.1 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 1

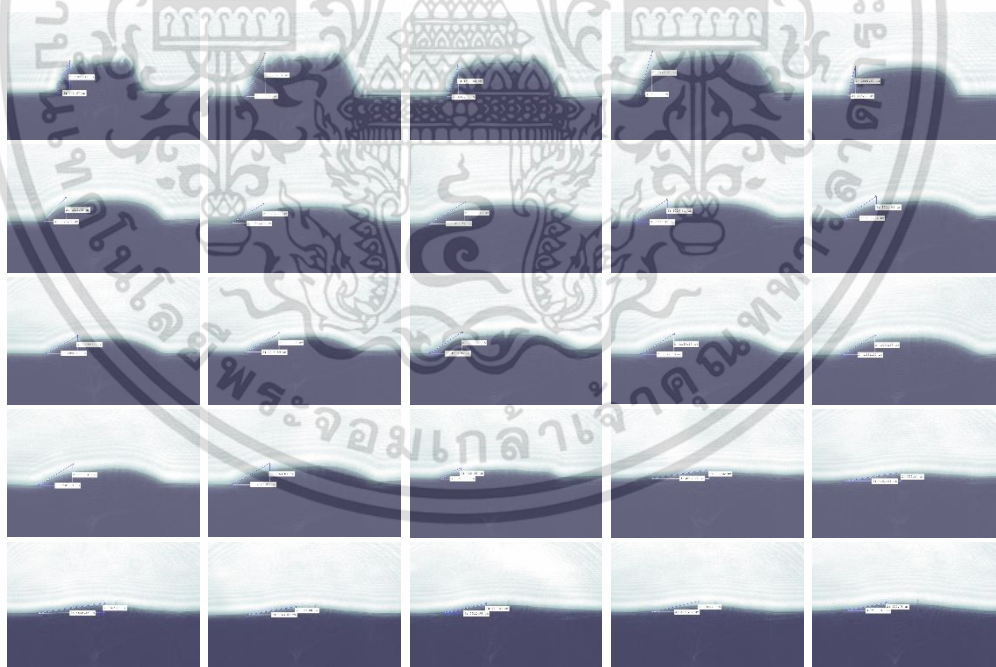


รูปที่ ข.2 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

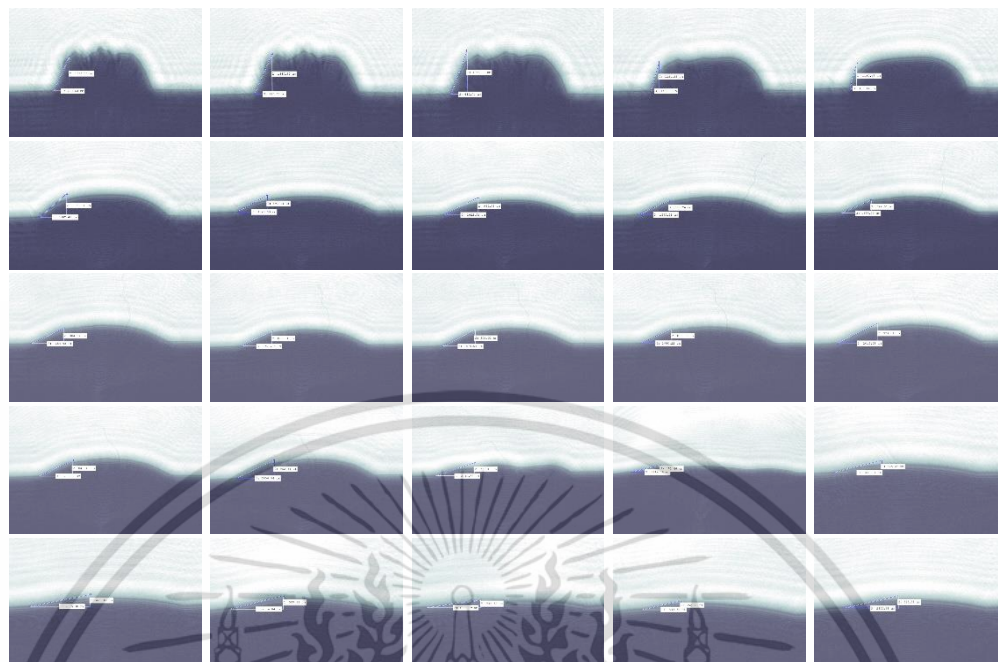


รูปที่ ข.3 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 100% Solder Paste ครั้งที่ 3

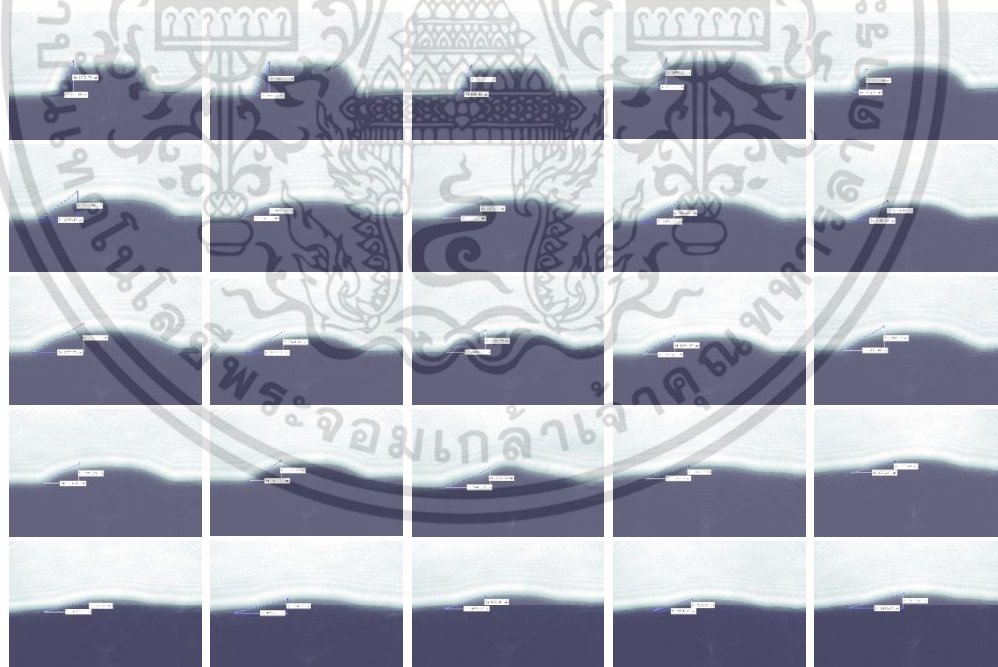


รูปที่ ข.4 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.01% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

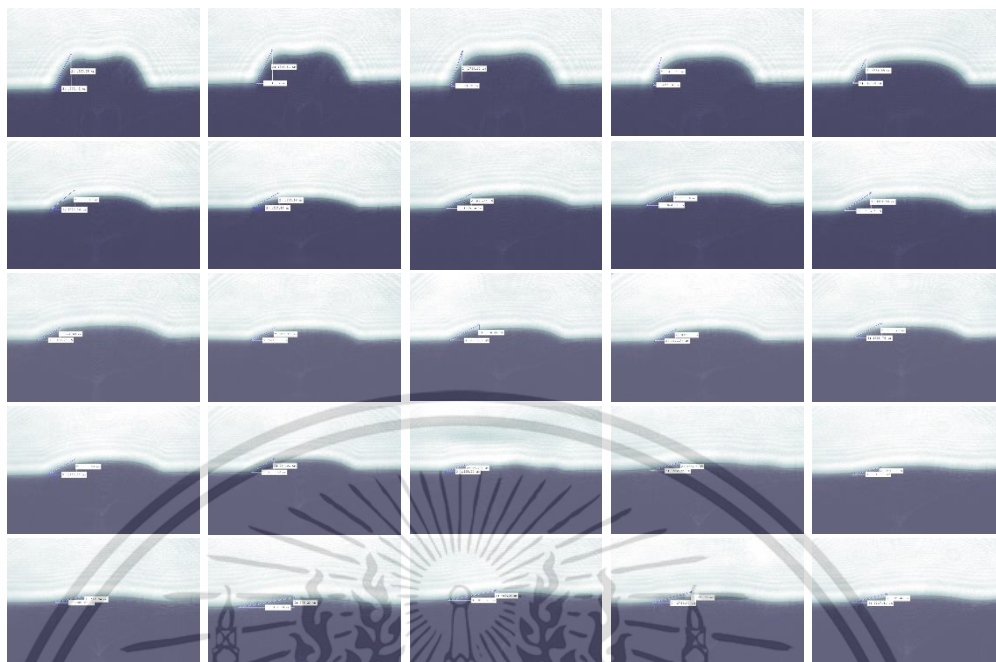


รูปที่ ข.5 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.01% Graphite ครั้งที่ 2

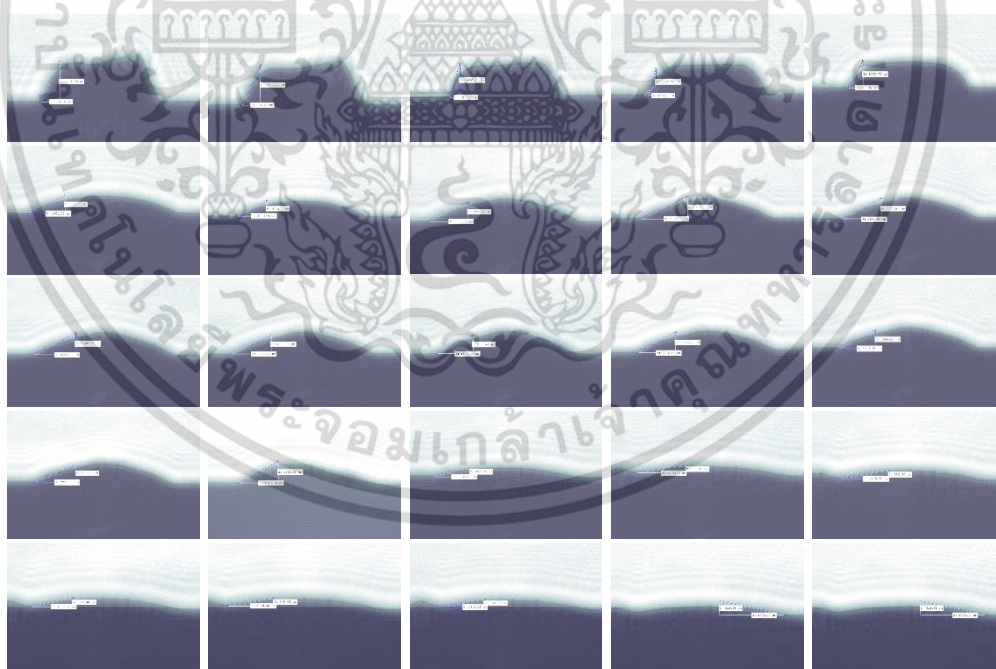


รูปที่ ข.6 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.02% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

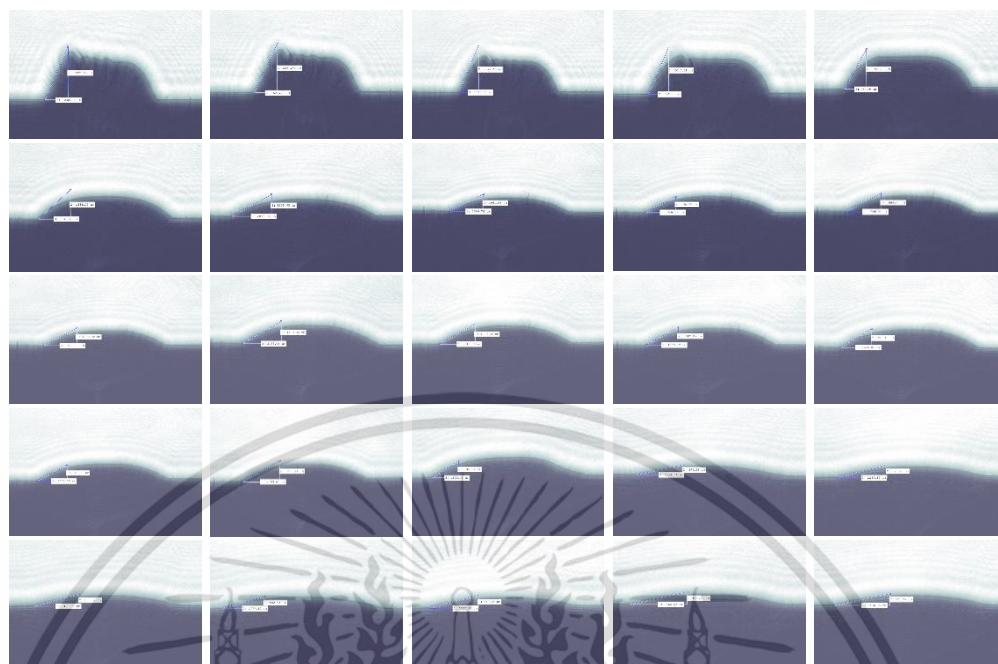


รูปที่ ข.7 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.04% Graphite ครั้งที่ 1

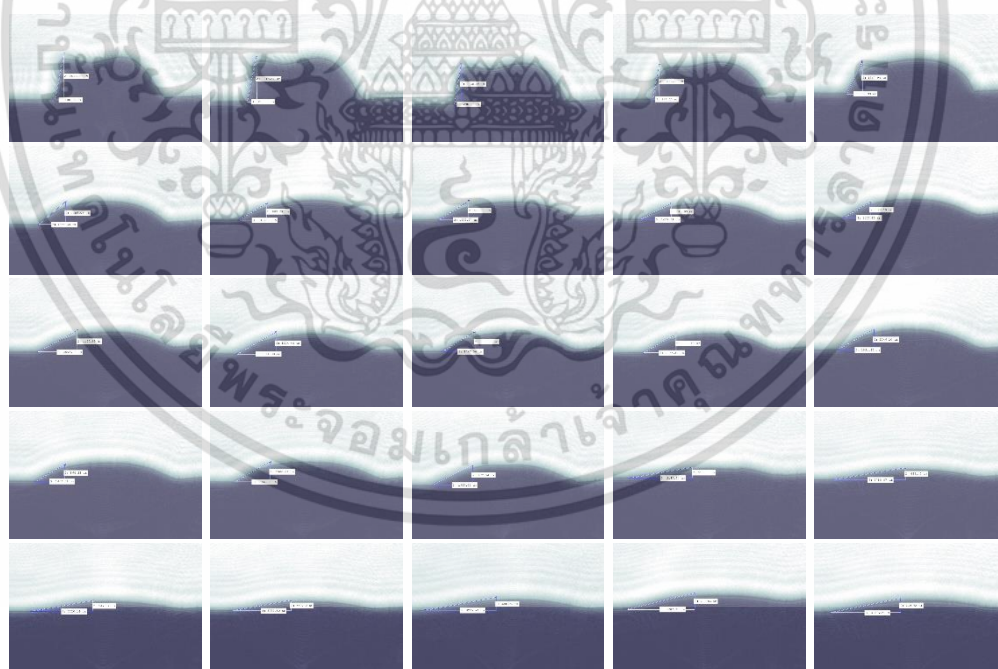


รูปที่ ข.8 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.04% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

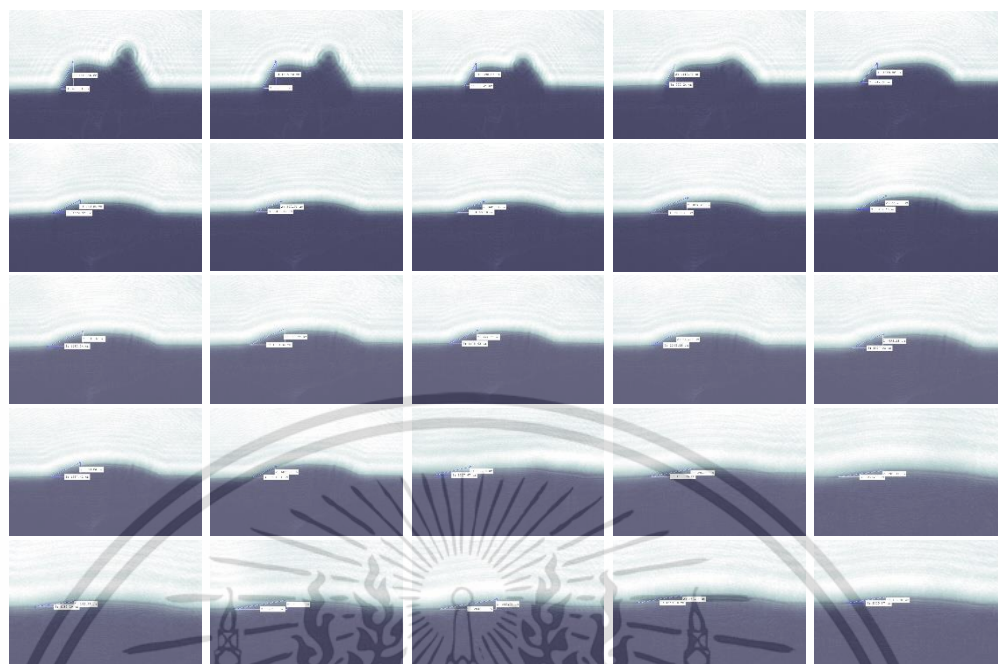


รูปที่ ข.9 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพันธ์ของ 0.05% Graphite ครั้งที่ 1

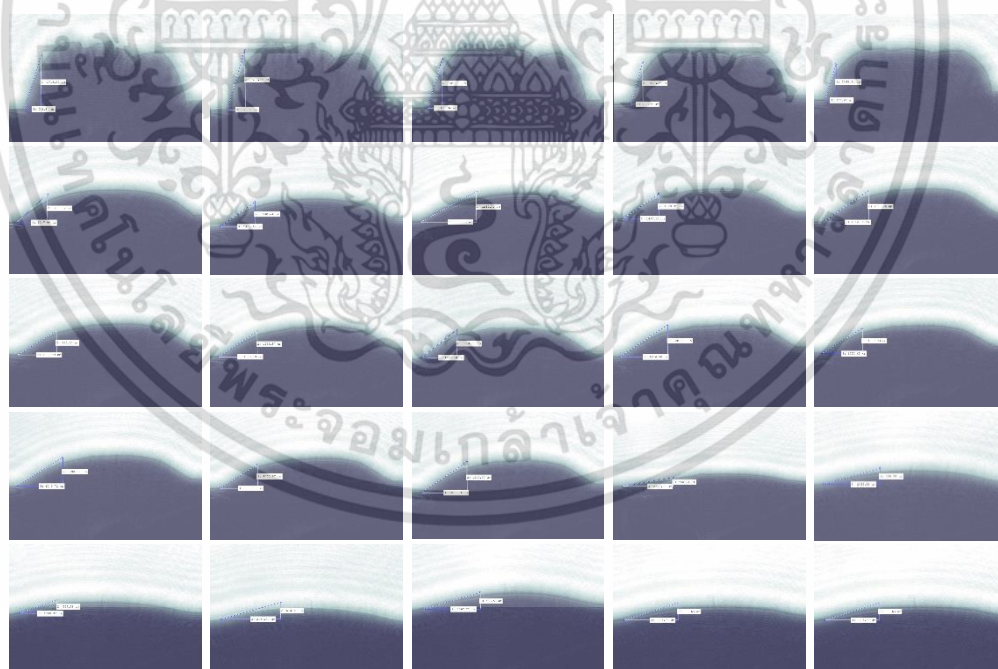


รูปที่ ข.10 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพันธ์ของ 0.05% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

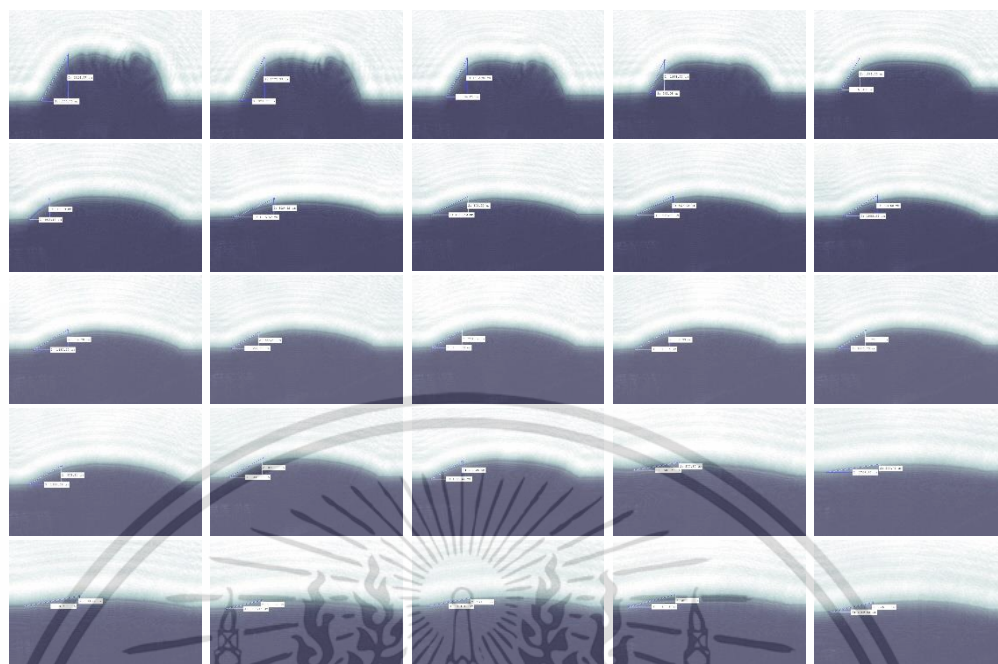


รูปที่ ข.11 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 1

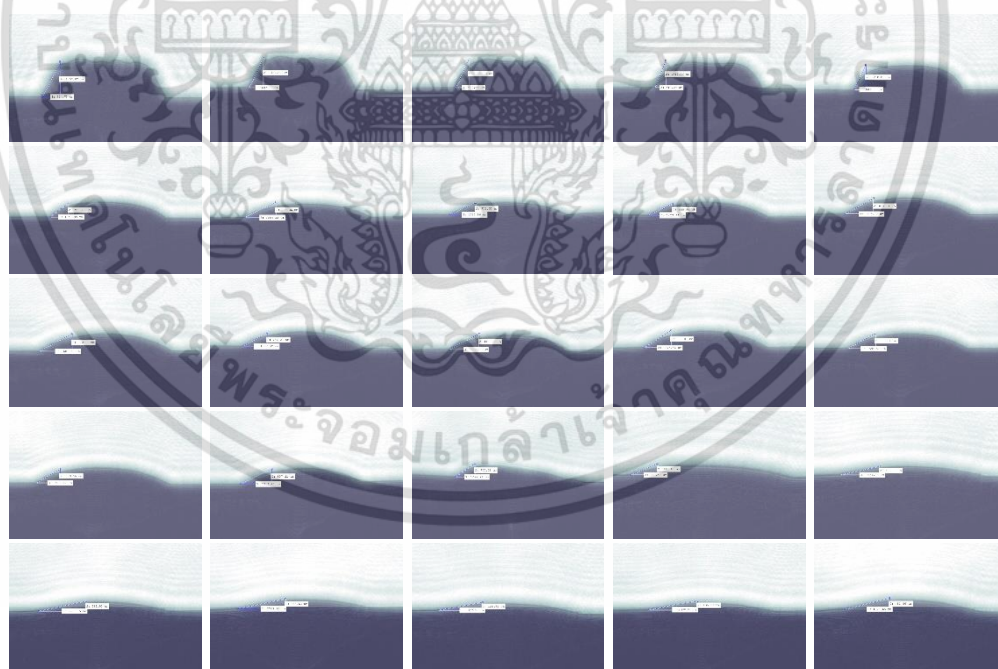


รูปที่ ข.12 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

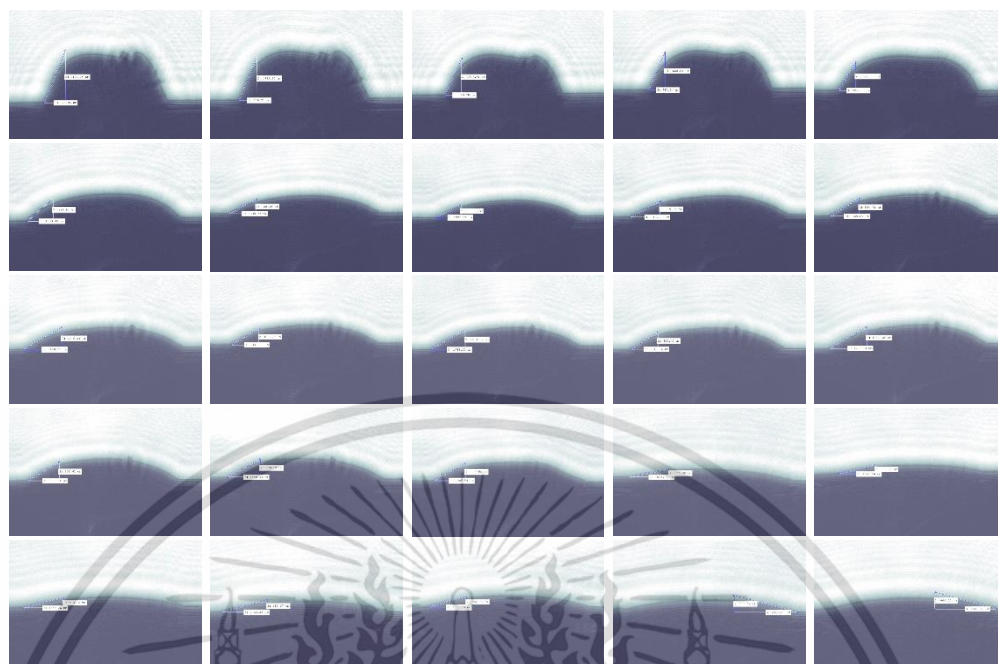


รูปที่ ข.13 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.06% Graphite ครั้งที่ 3

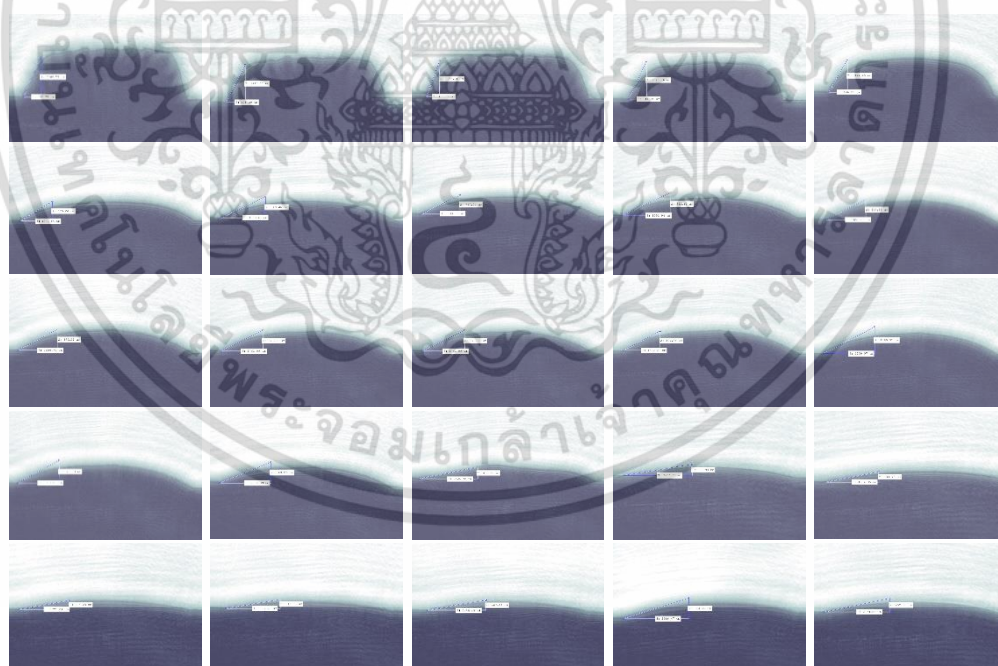


รูปที่ ข.14 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

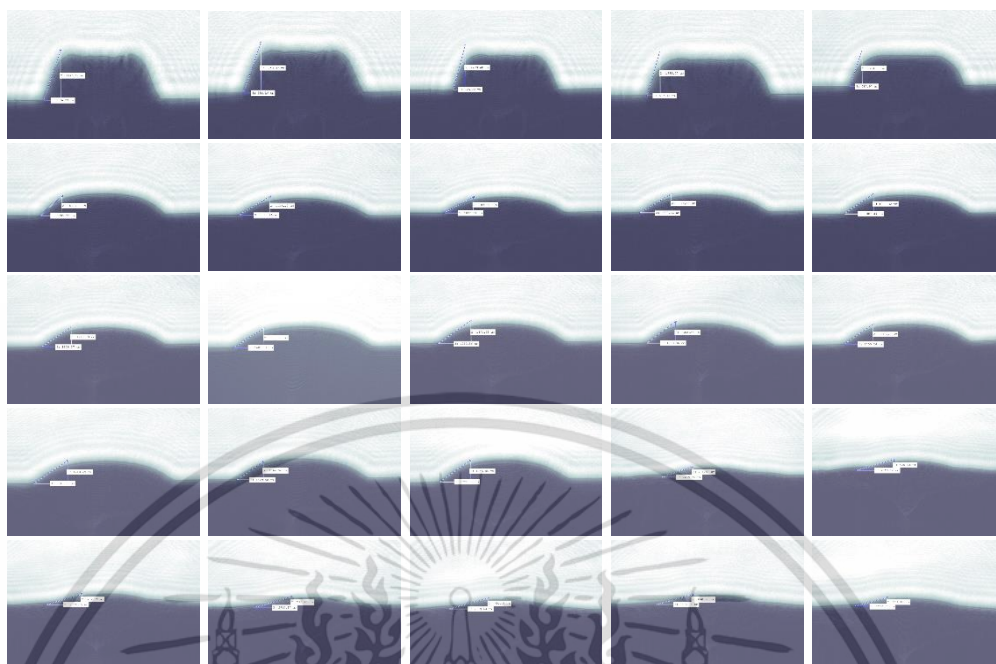


รูปที่ ข.15 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 2

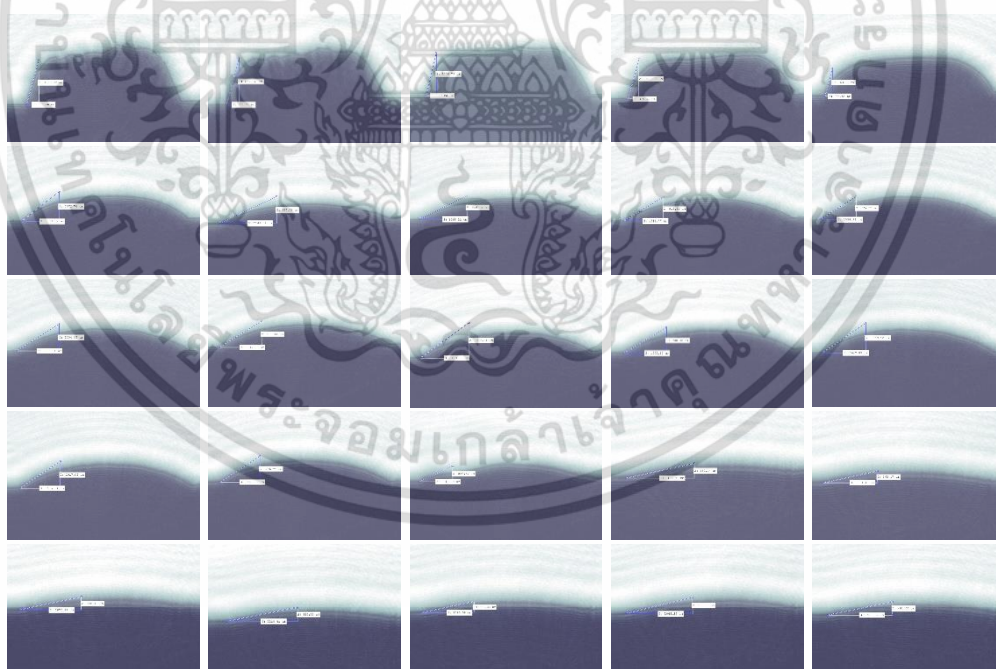


รูปที่ ข.16 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.08% Graphite ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

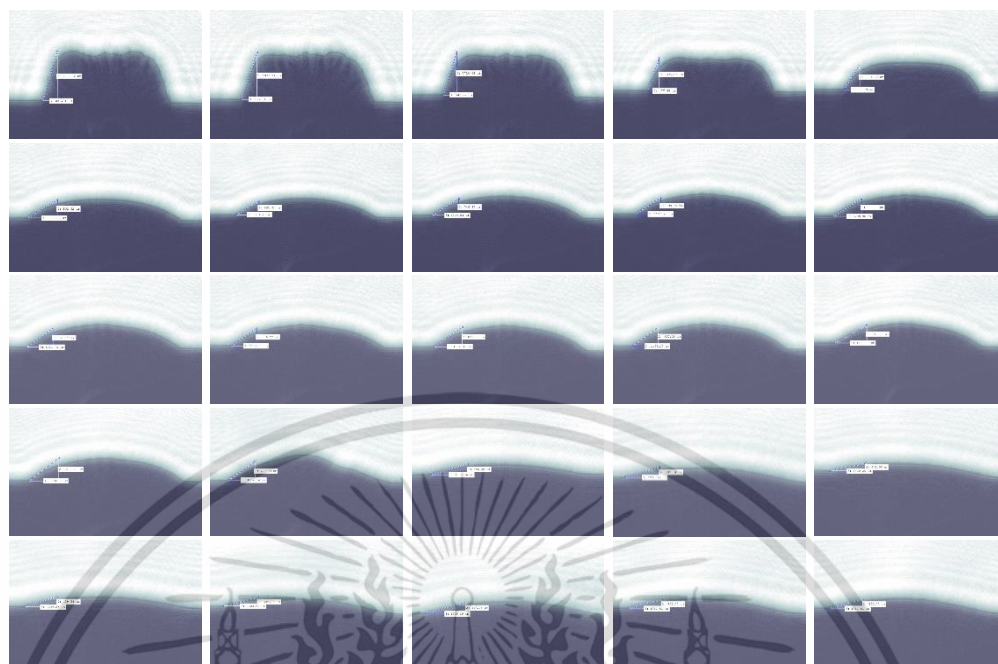


รูปที่ ข.17 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 1

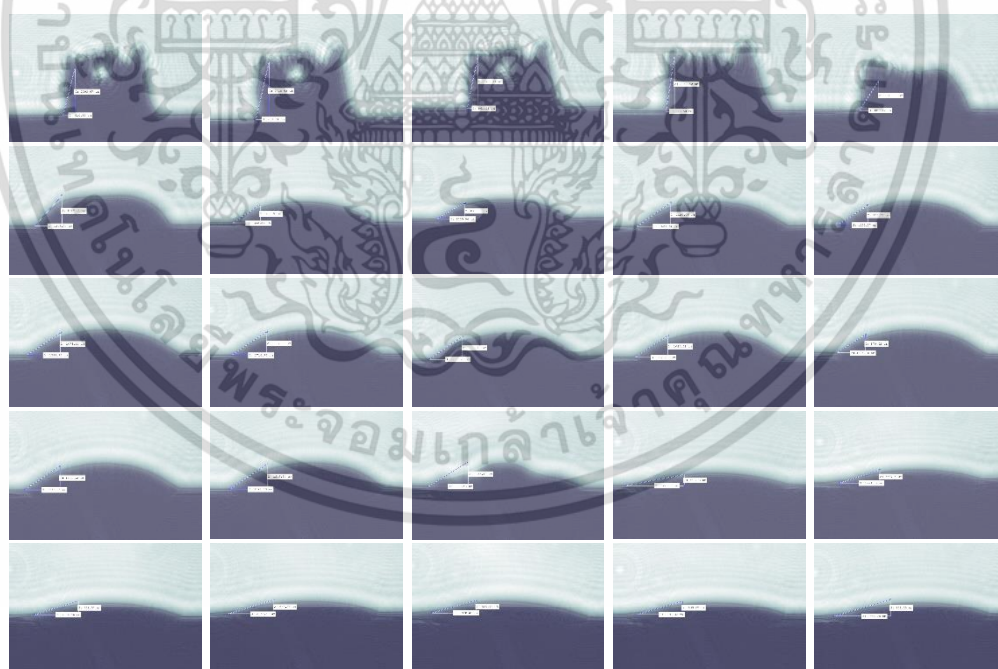


รูปที่ ข.18 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

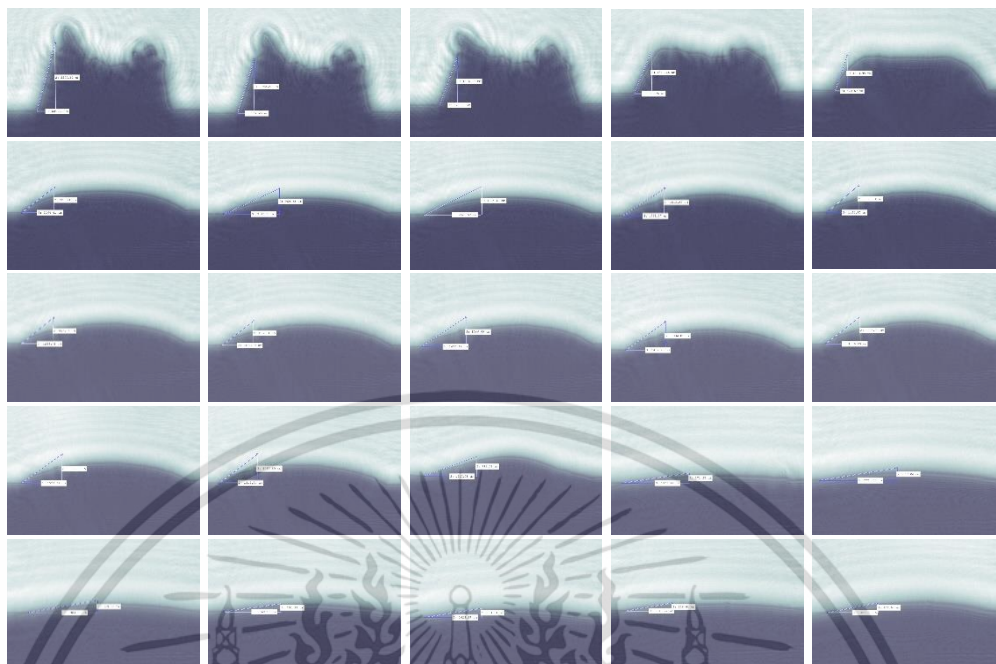


รูปที่ ข.19 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.10% Graphite ครั้งที่ 3

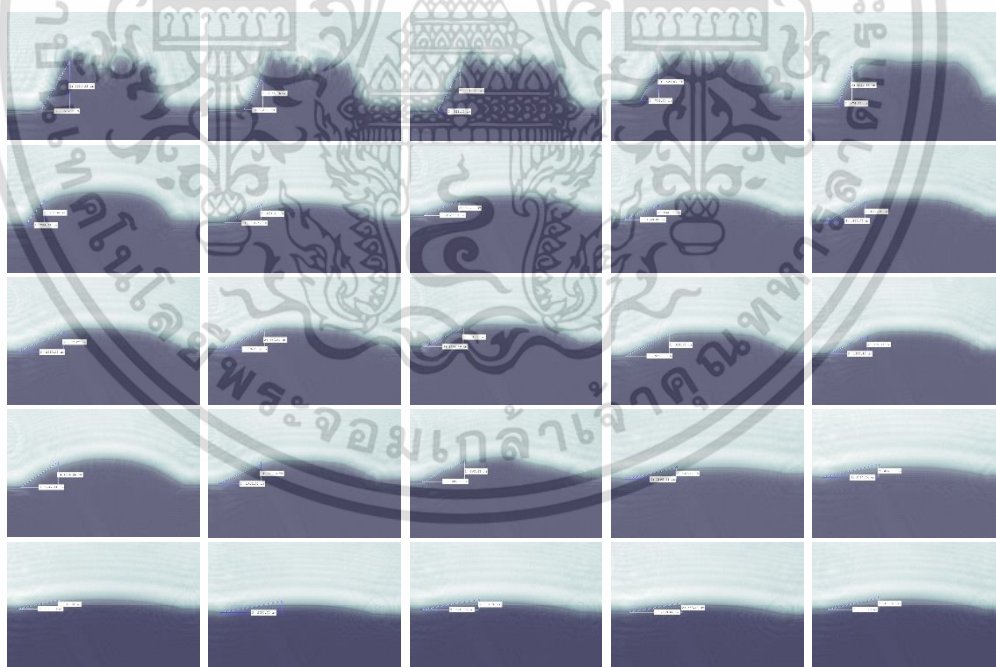


รูปที่ ข.20 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพัทธ์ของ 0.01% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

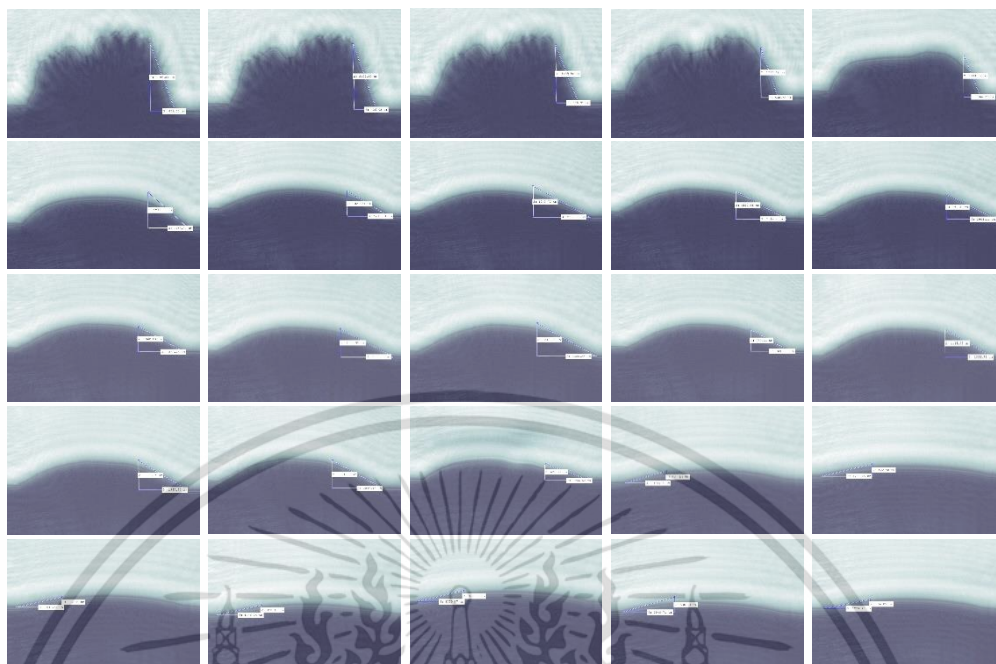


รูปที่ ข.21 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมสัมพันธ์ของ 0.01% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

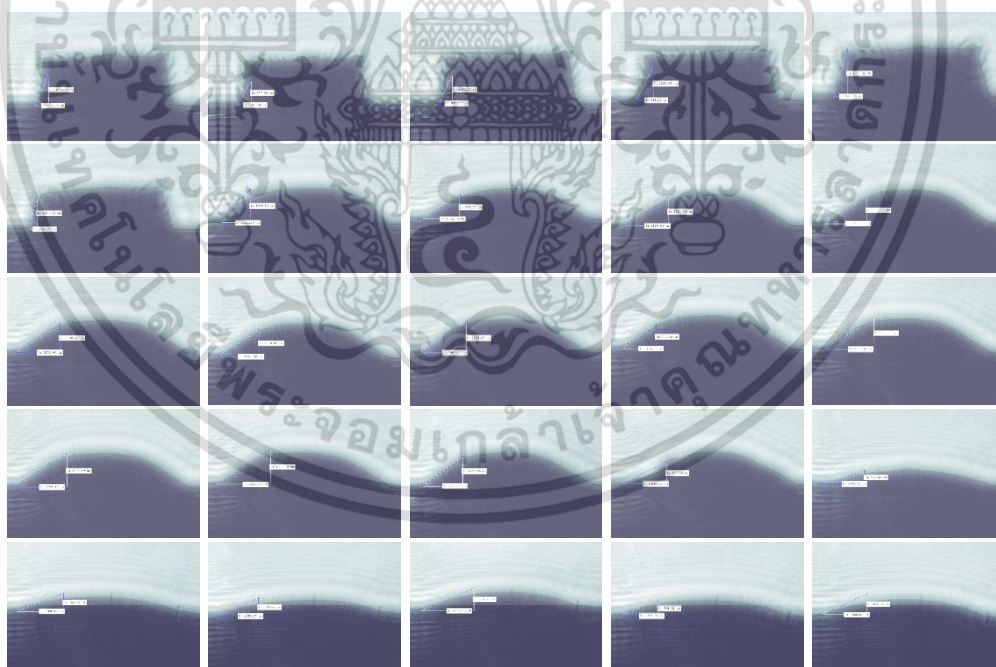


รูปที่ ข.22 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมสัมพันธ์ของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

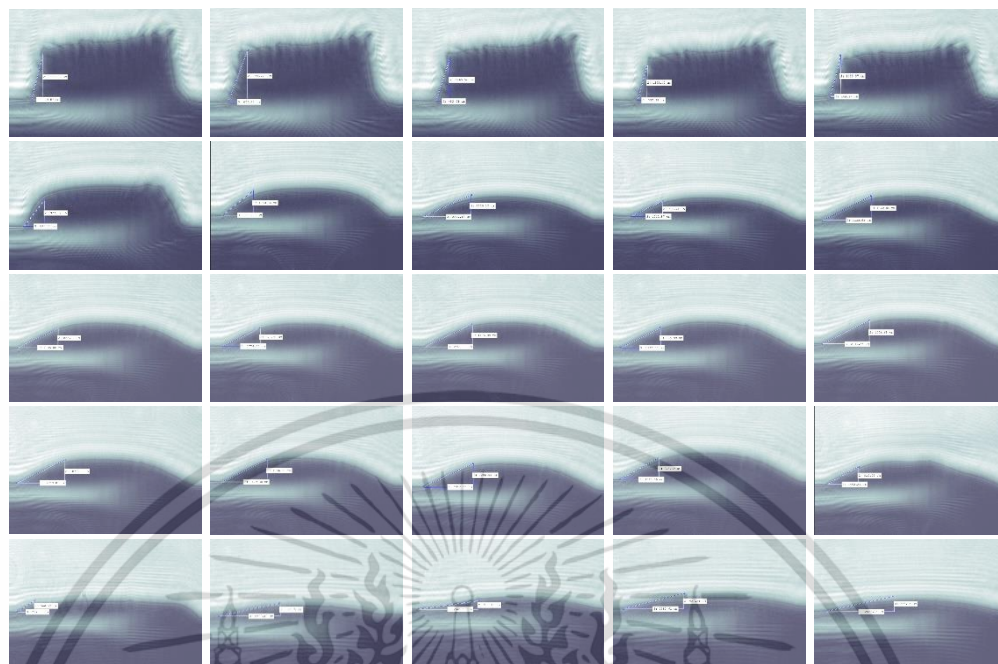


รูปที่ ข.23 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมสัมพันธ์ของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

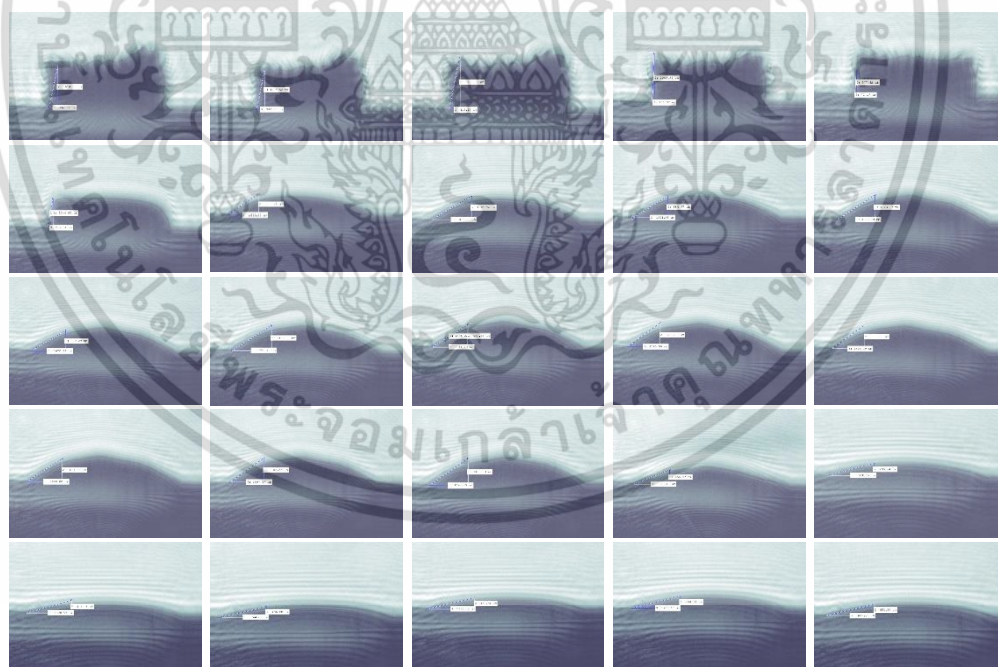


รูปที่ ข.24 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมสัมพันธ์ของ 0.02% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

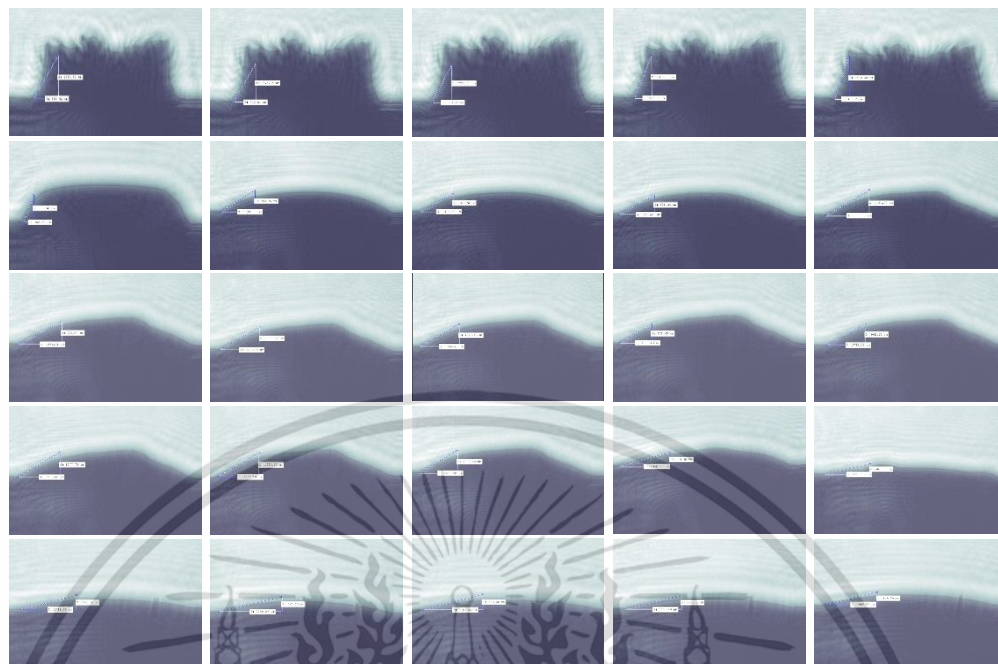


รูปที่ ข.25 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.26 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

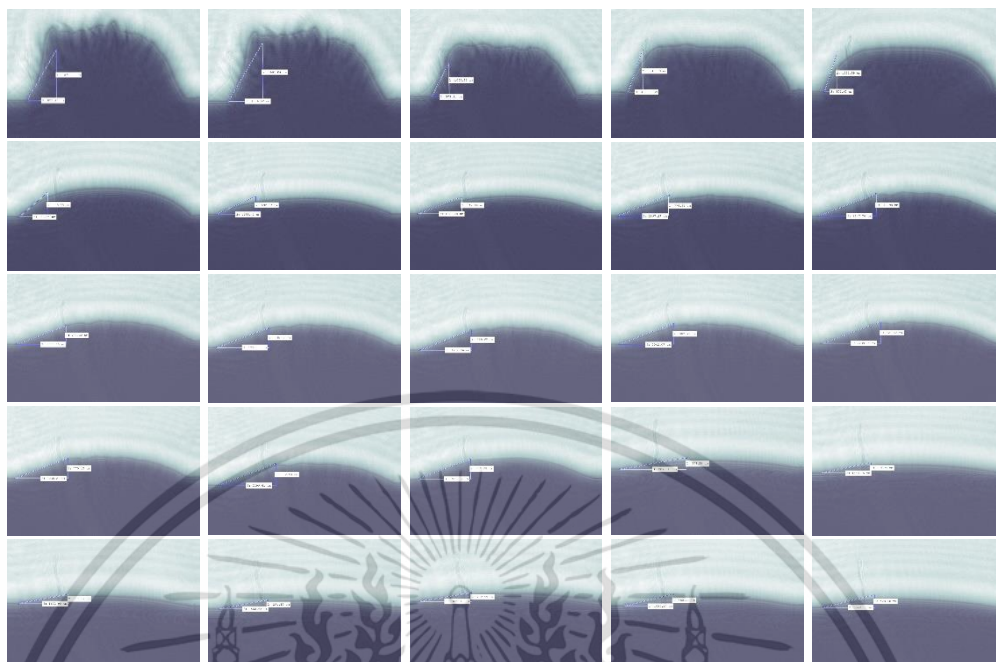


รูปที่ ข.27 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.04% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

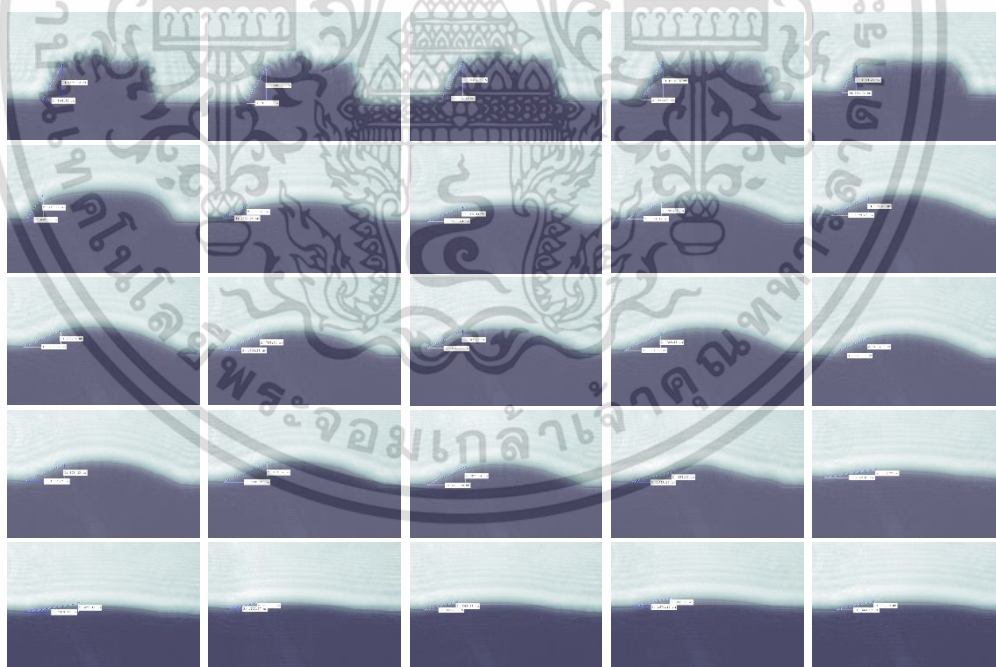


รูปที่ ข.28 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

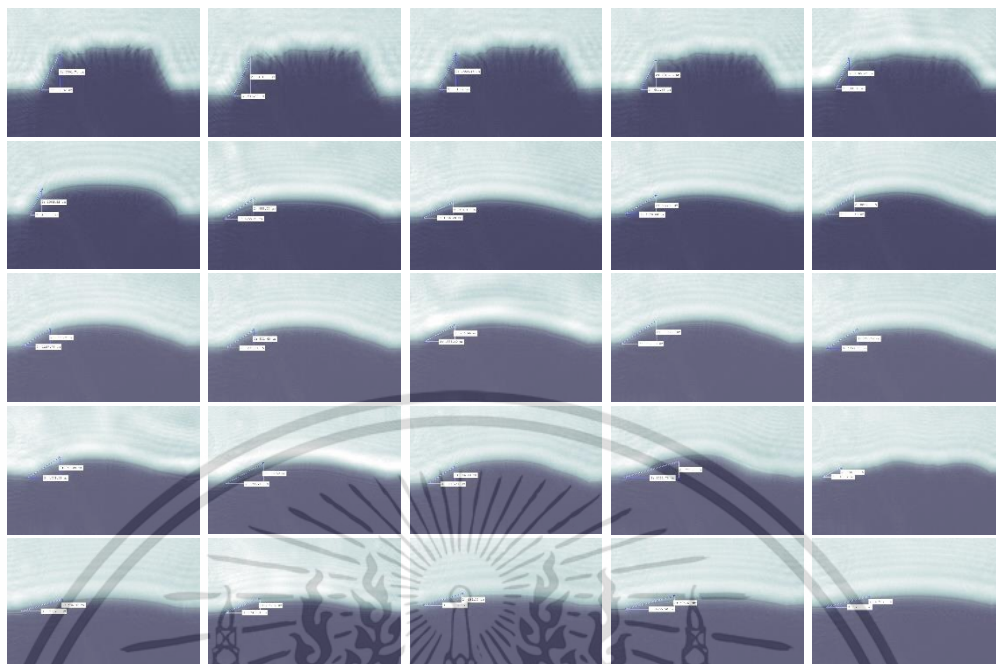


รูปที่ ข.29 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

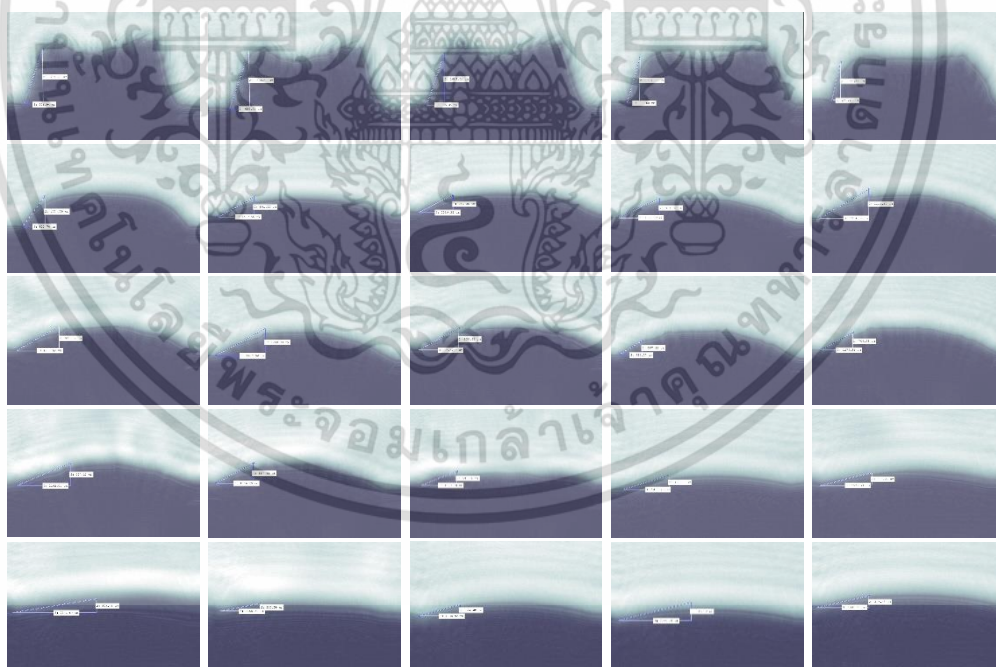


รูปที่ ข.30 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.05% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

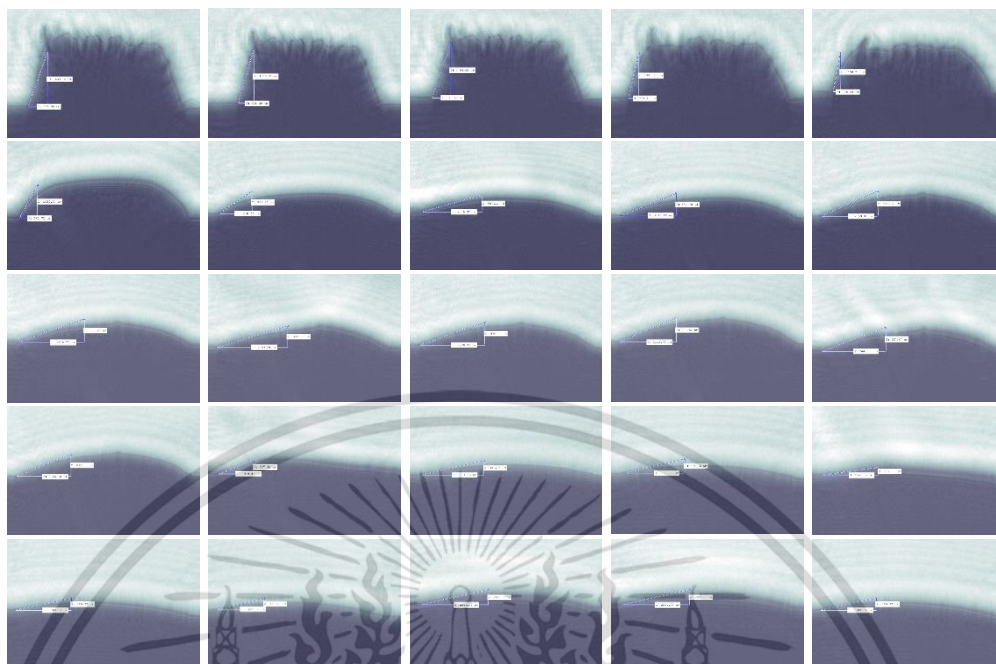


รูปที่ ข.31 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

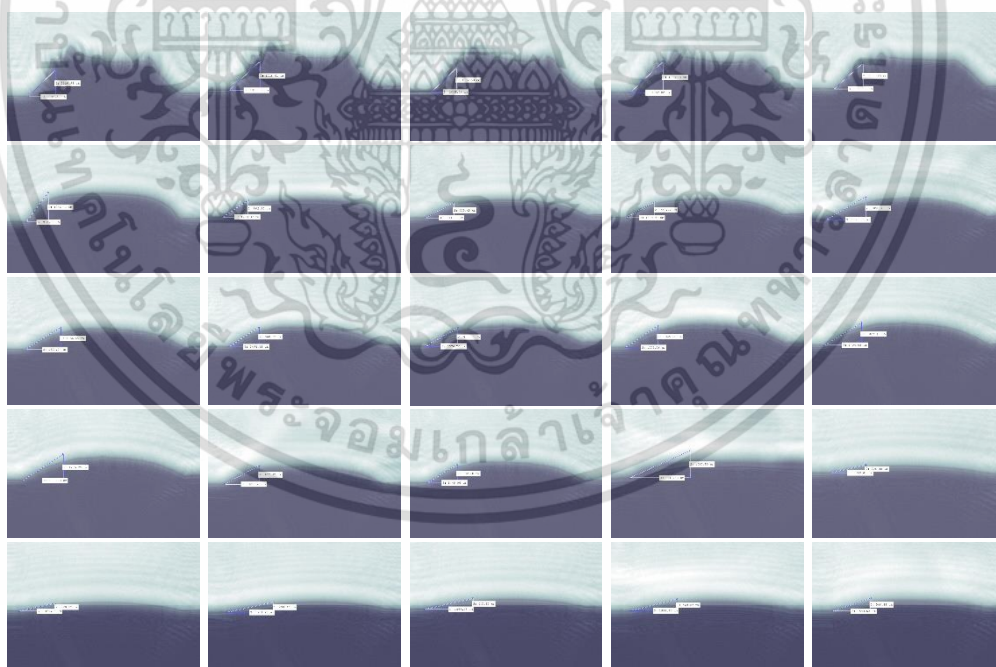


รูปที่ ข.32 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามัมส์ผิดพลาดของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

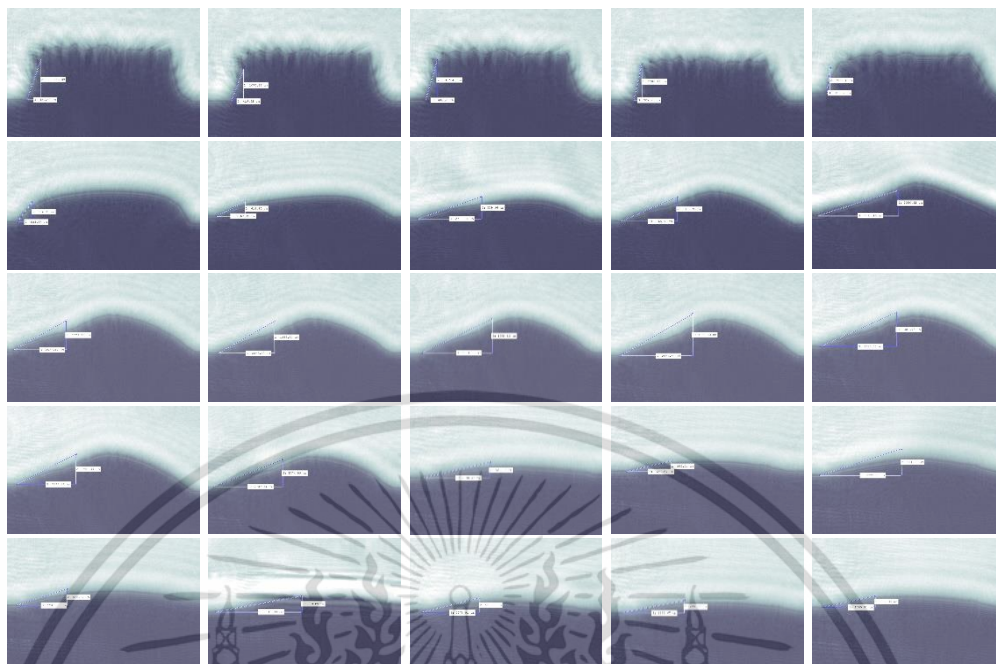


รูปที่ ข.33 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.06% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

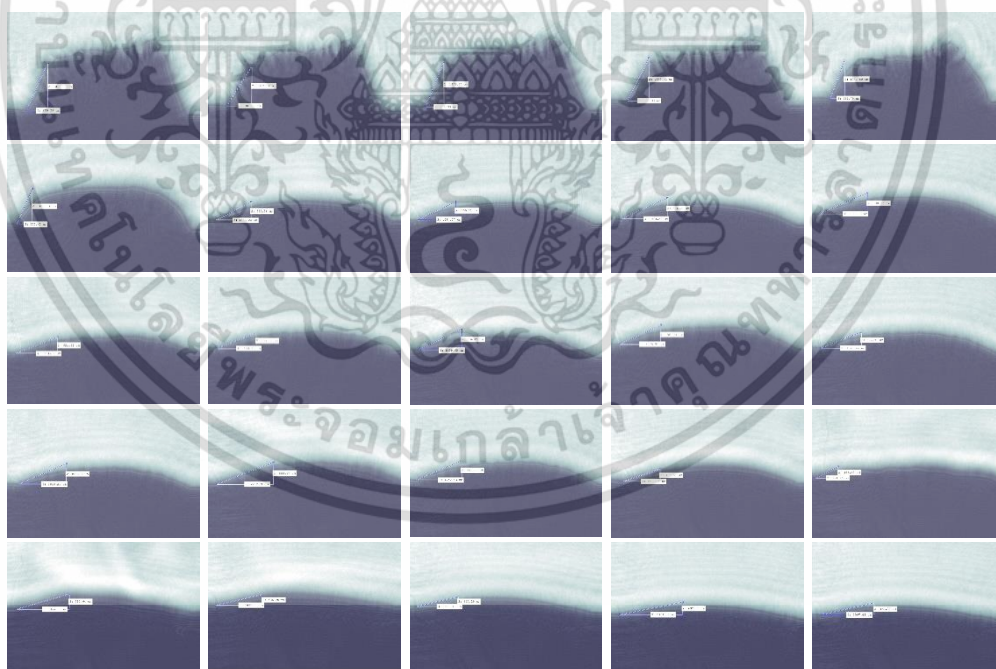


รูปที่ ข.34 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.08% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

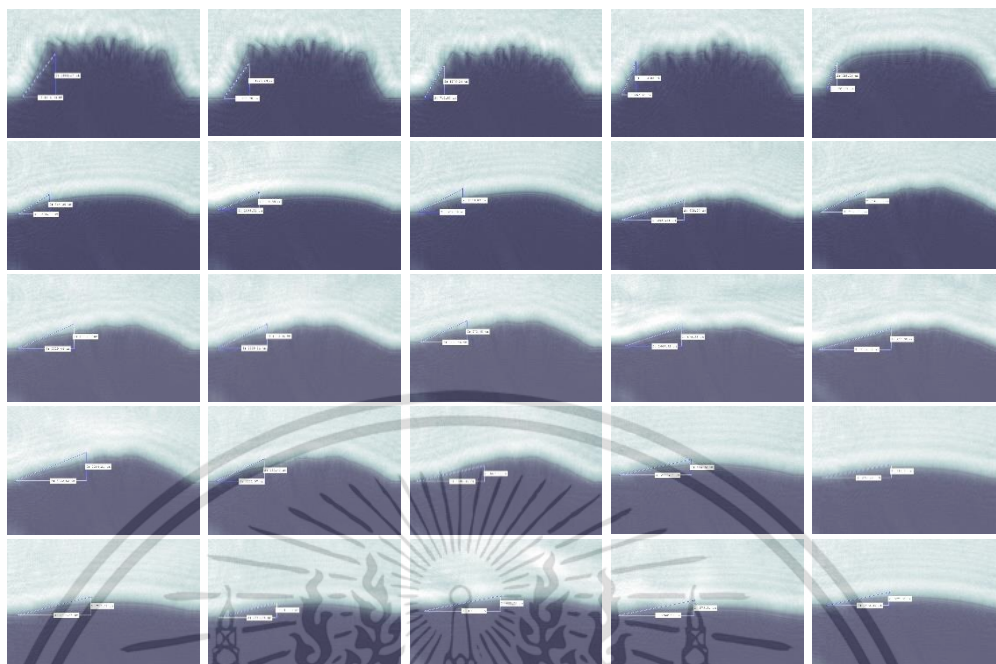


รูปที่ ข.35 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.08% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

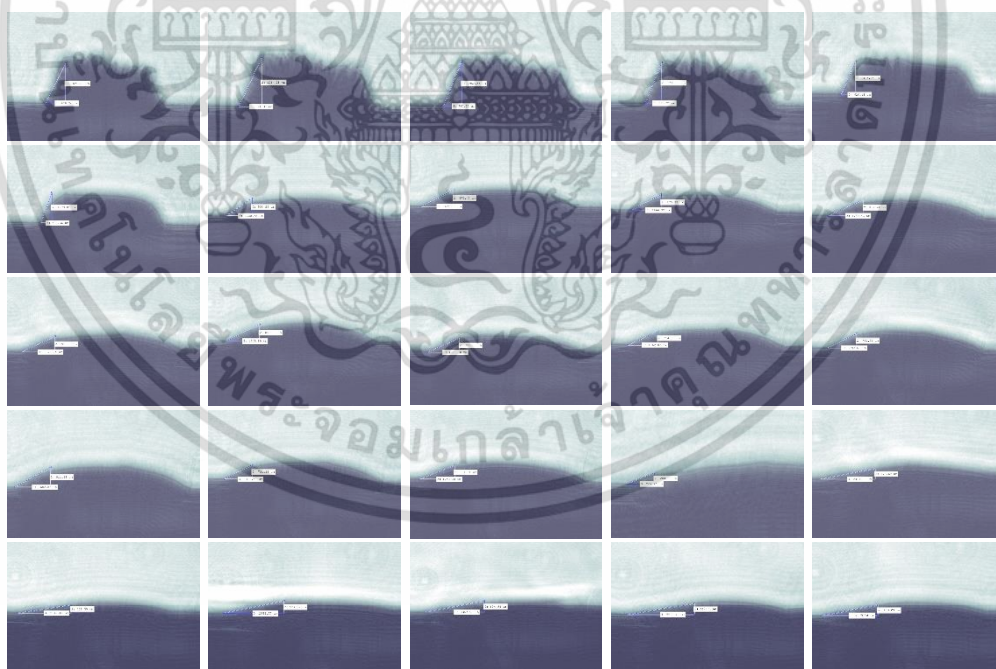


รูปที่ ข.36 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

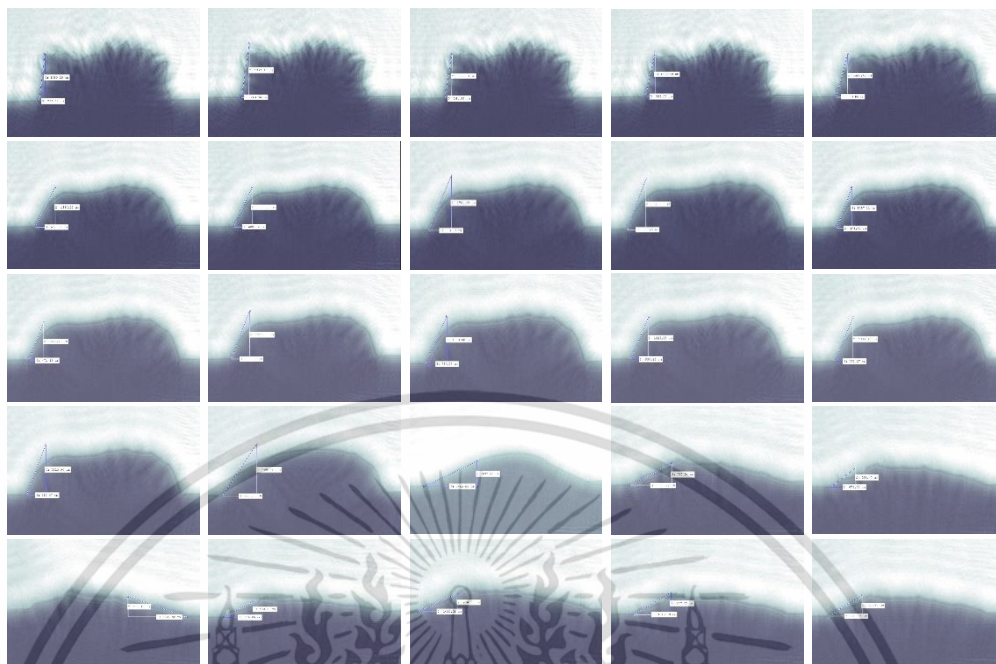


รูปที่ ข.37 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 2

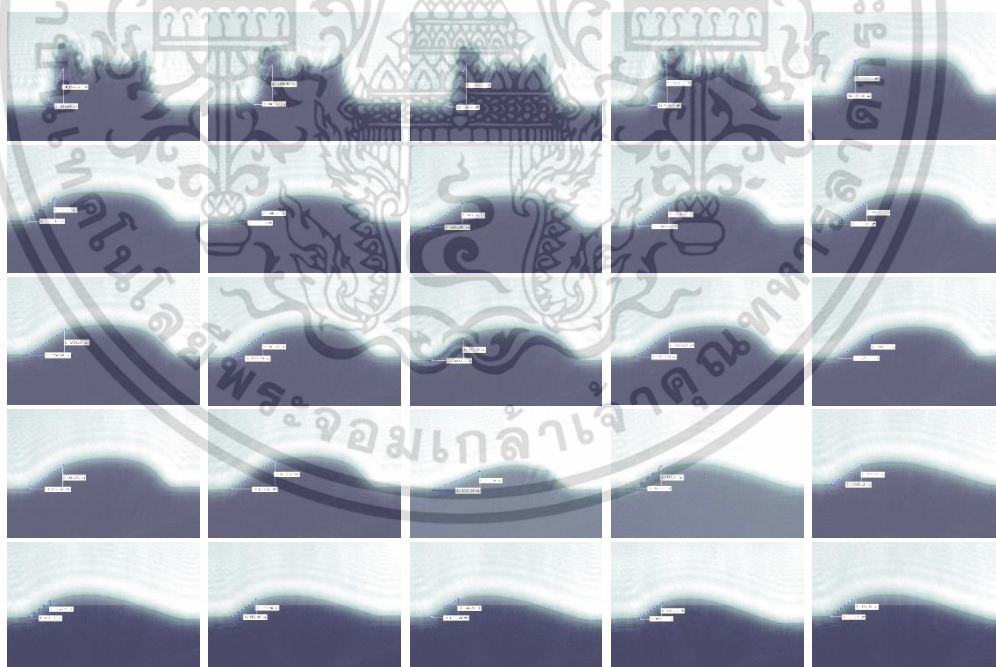


รูปที่ ข.38 ภาพแสดงการสร้างภาพและค่ามุมสัมพันธ์ของ 0.10% Graphene quantum dots ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

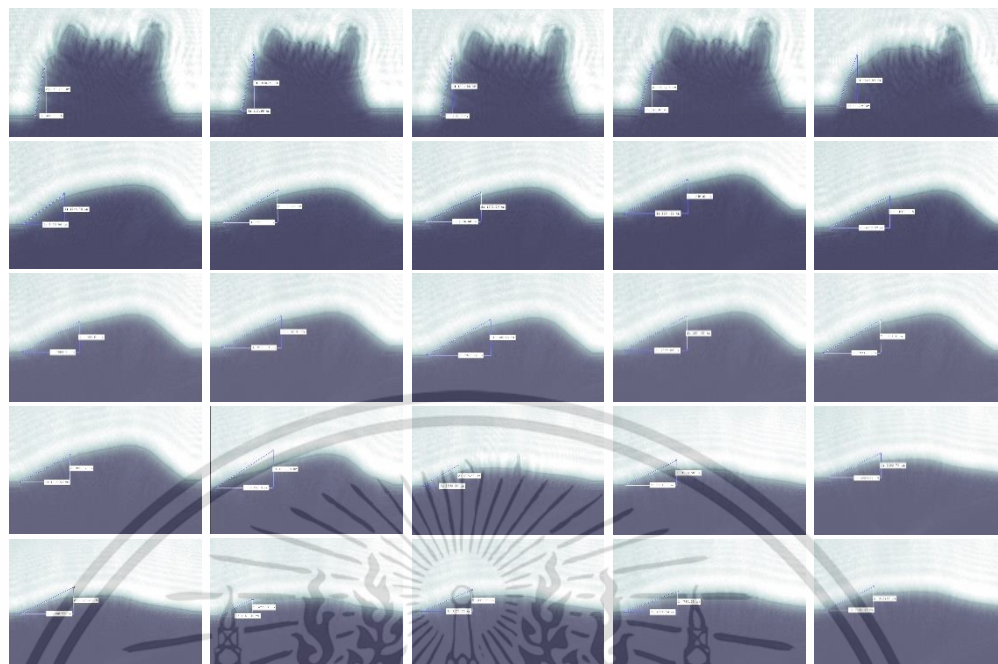


รูปที่ ข.39 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 1

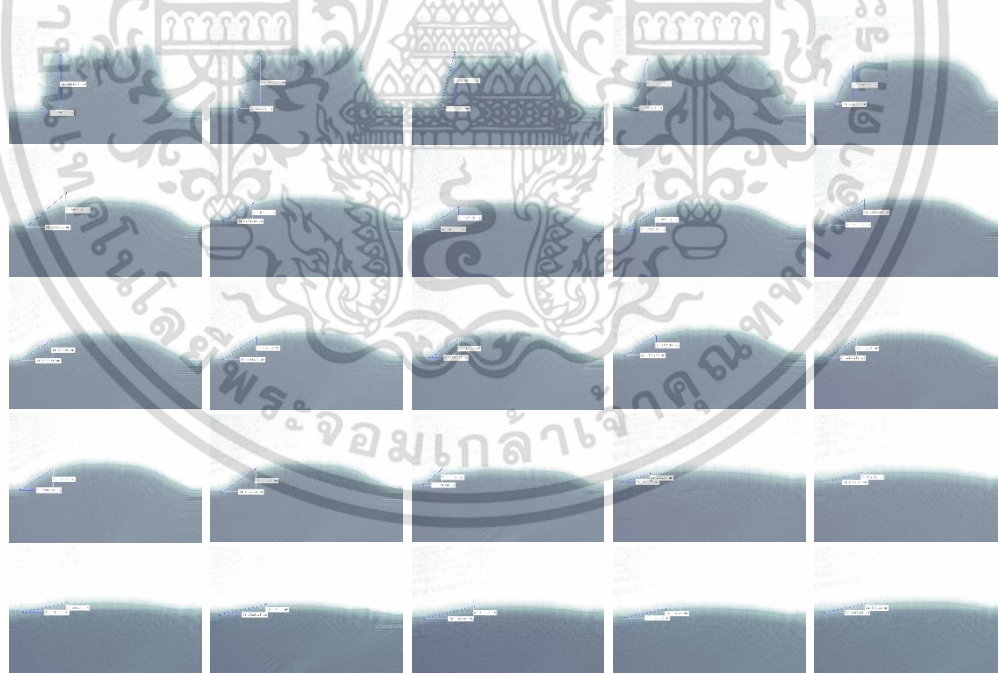


รูปที่ ข.40 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

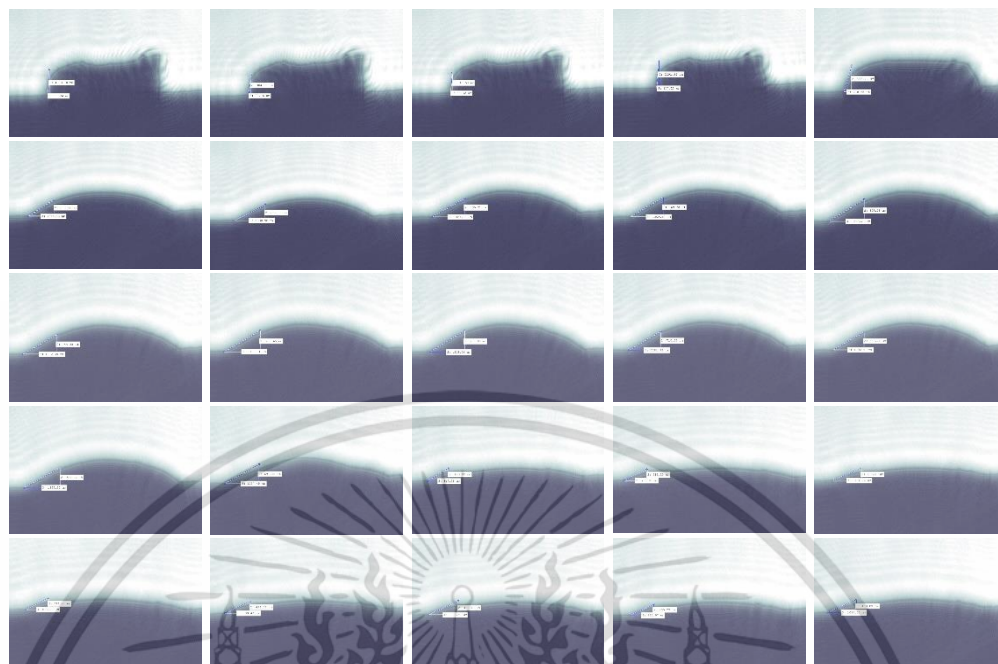


รูปที่ ข.41 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.01% Fullerene ครั้งที่ 3



รูปที่ ข.42 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

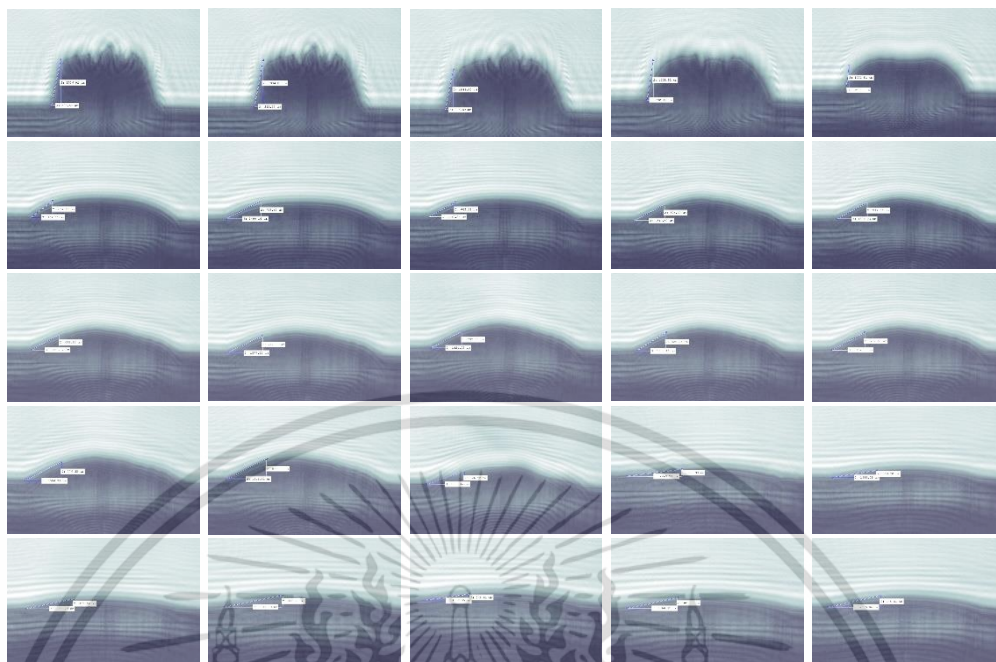


รูปที่ ข.43 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 2

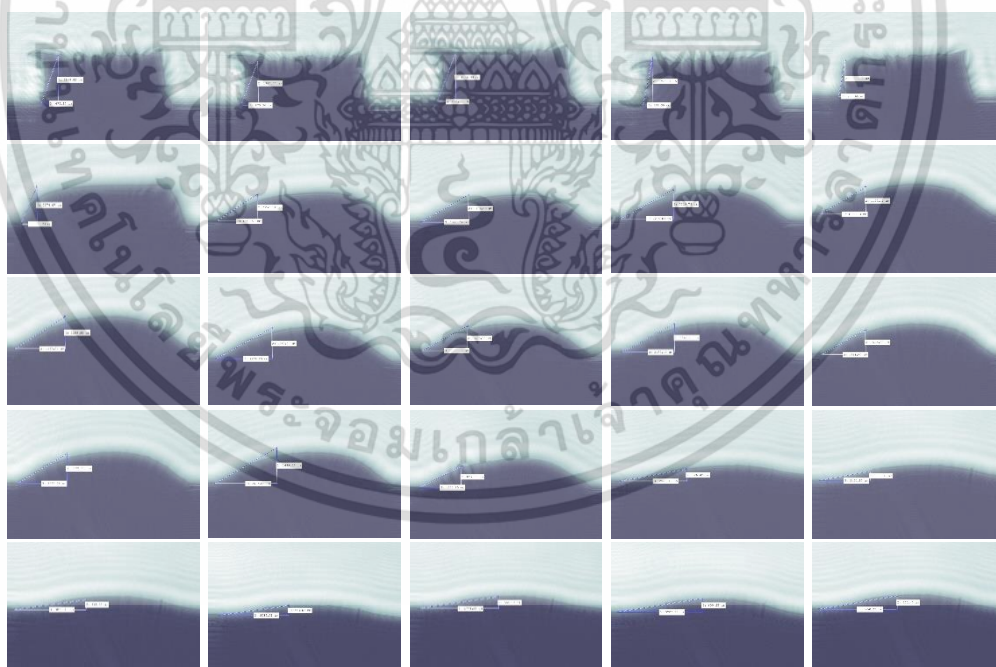


รูปที่ ข.44 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.02% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

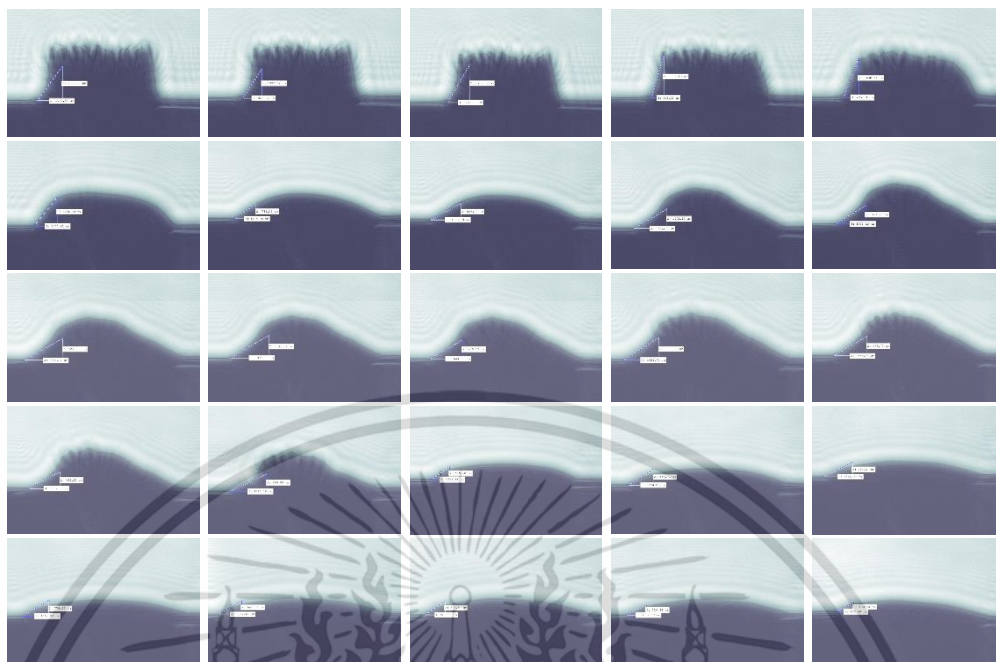


รูปที่ ข.45 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพันธ์ของ 0.04% Fullerene ครั้งที่ 2

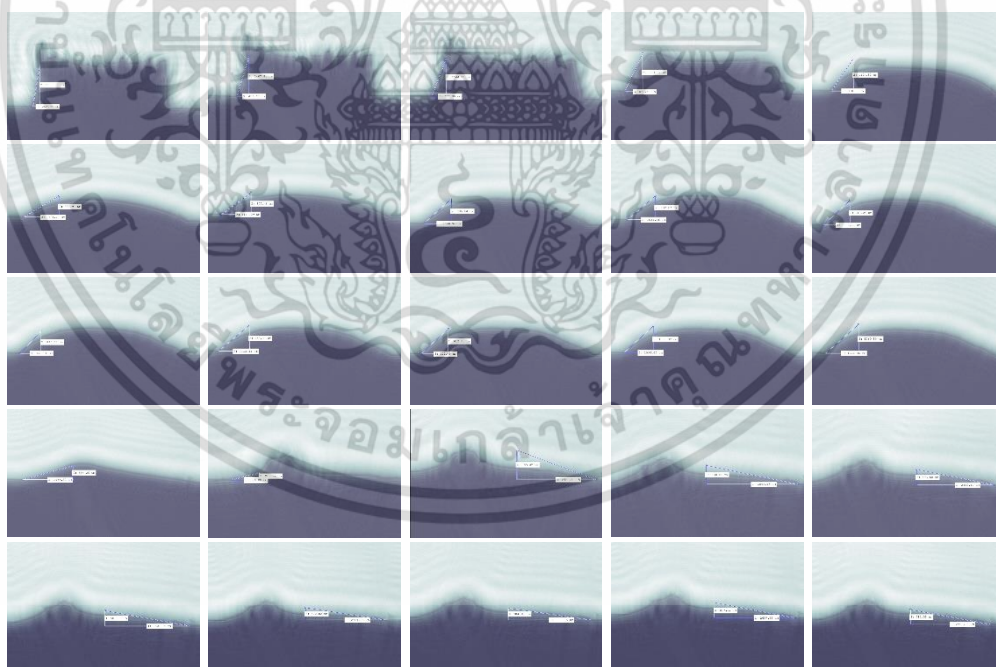


รูปที่ ข.46 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพันธ์ของ 0.04% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

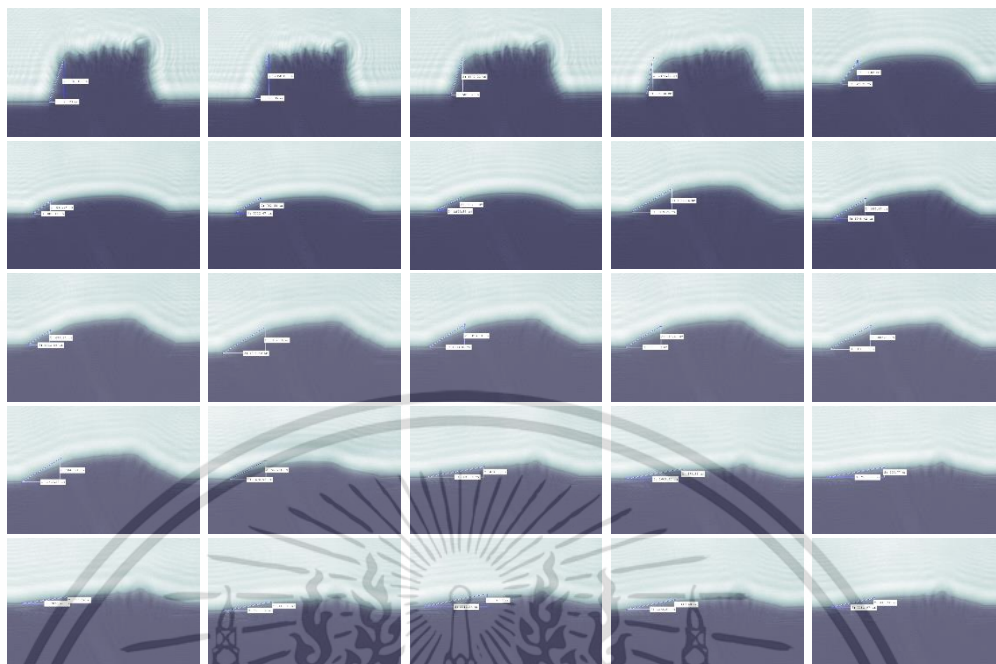


รูปที่ ข.47 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.05% Fullerene ครั้งที่ 3

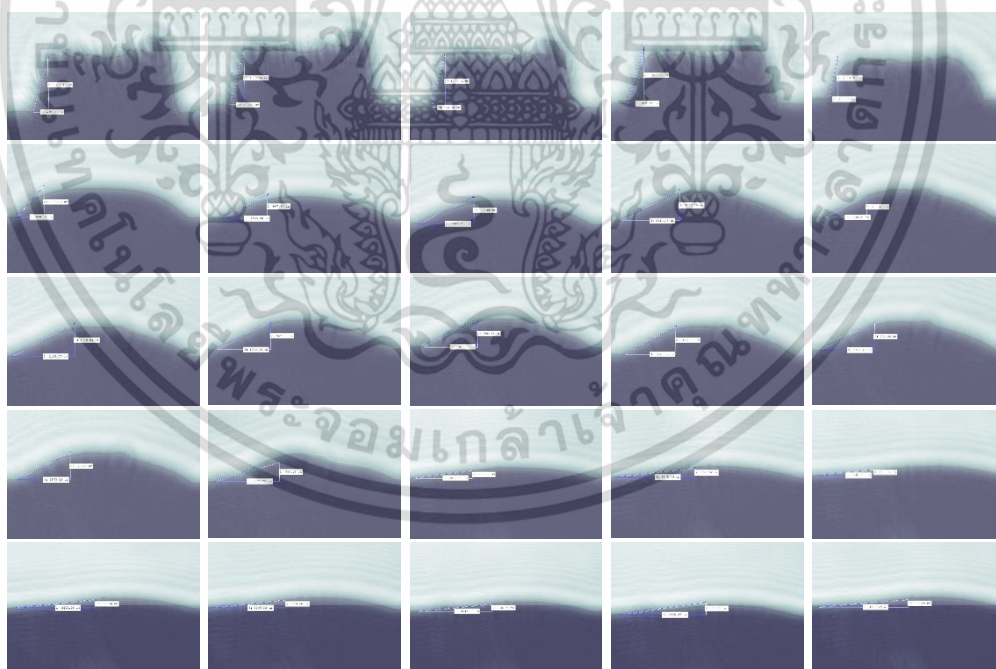


รูปที่ ข.58 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

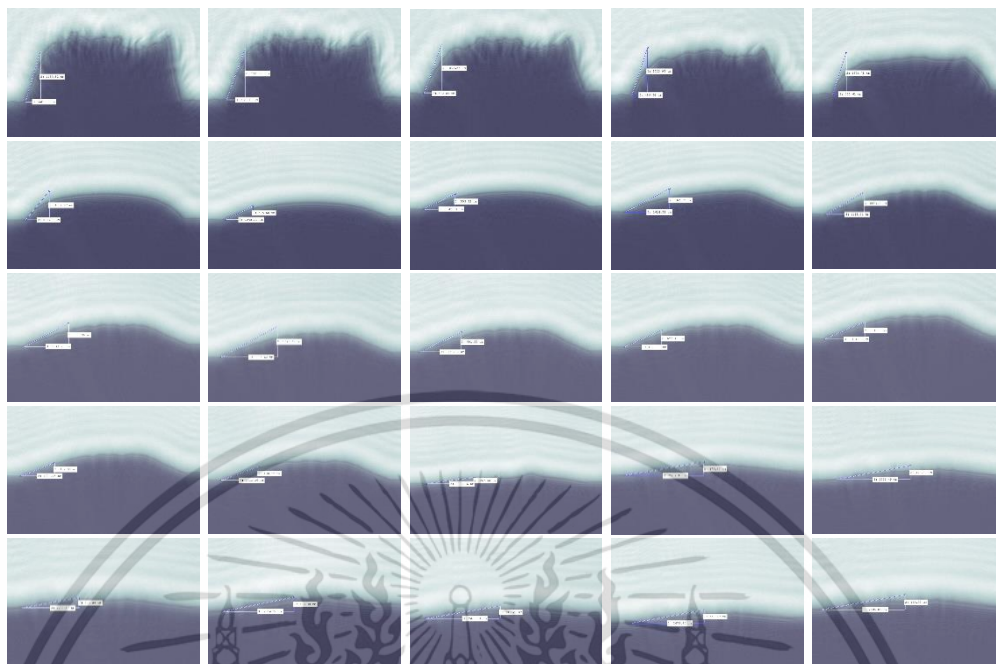


รูปที่ ข.49 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 2

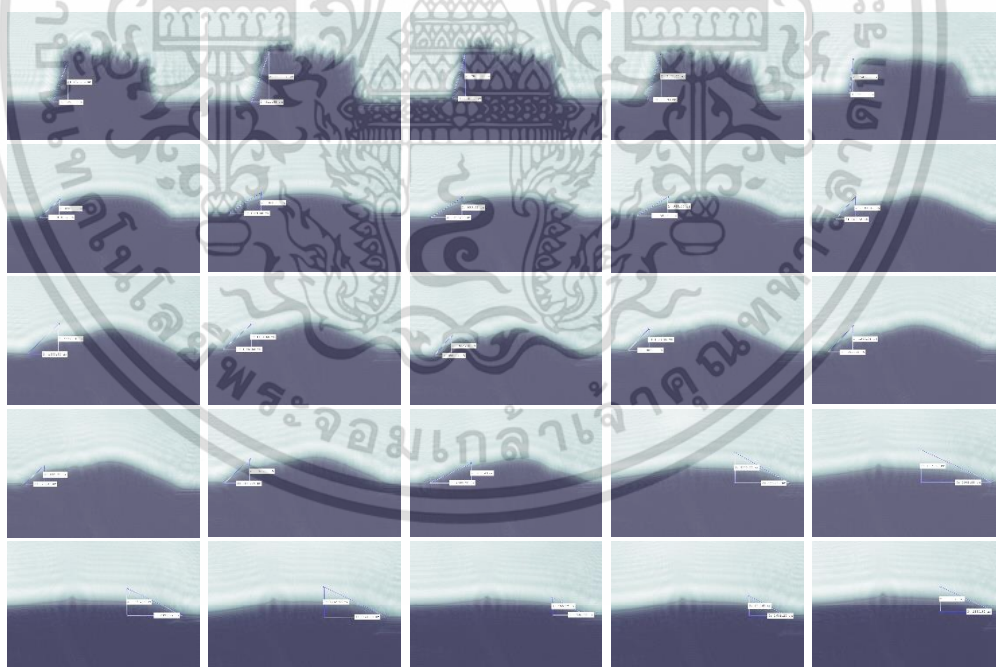


รูปที่ ข.50 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.06% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

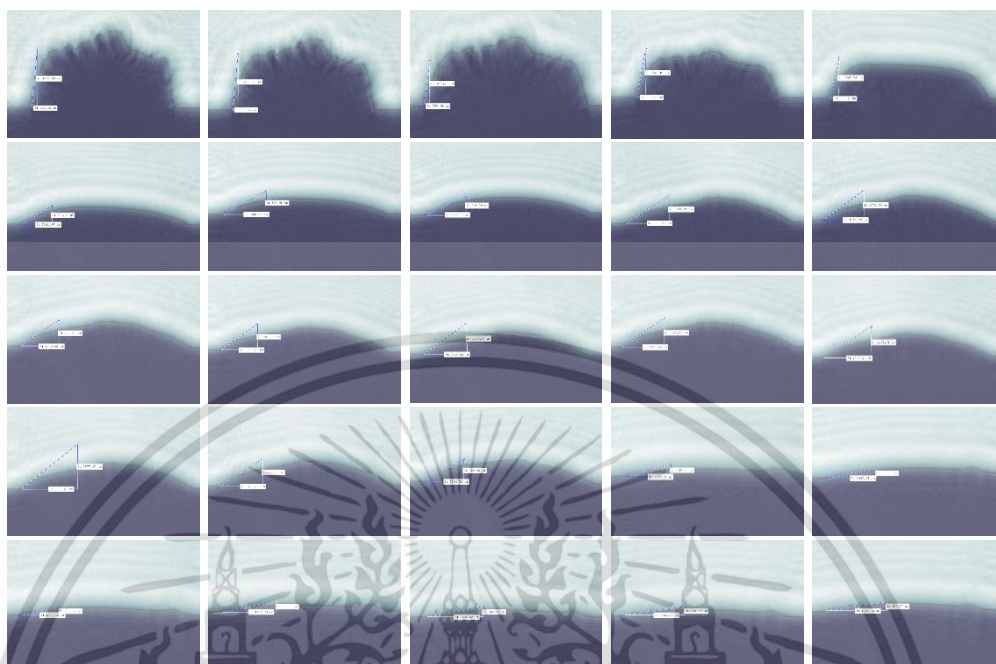


รูปที่ ข.51 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.08% Fullerene ครั้งที่ 1

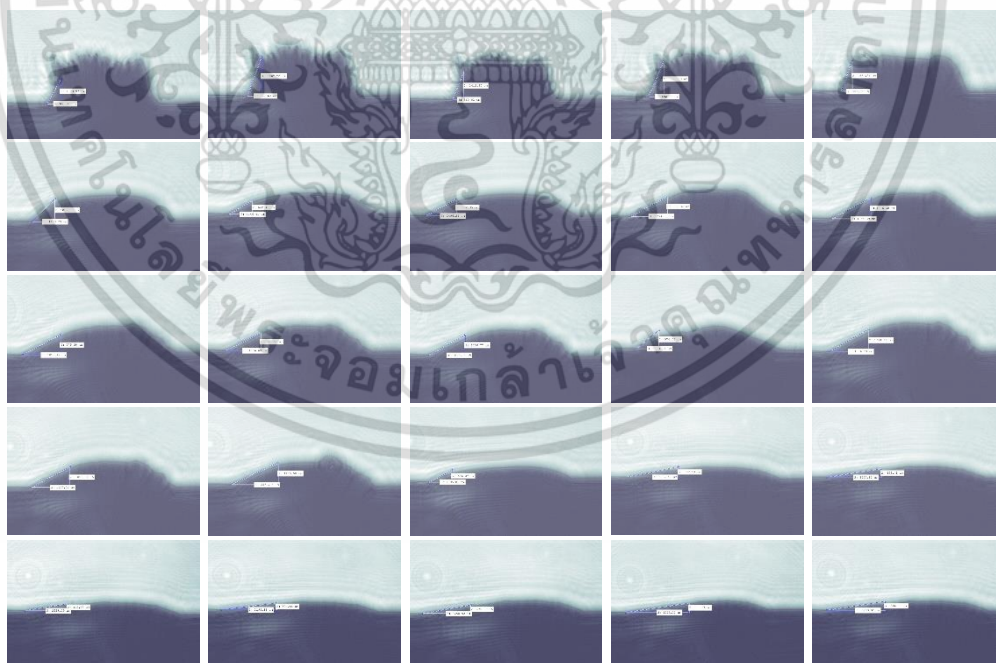


รูปที่ ข.52 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมพัทธ์ของ 0.08% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

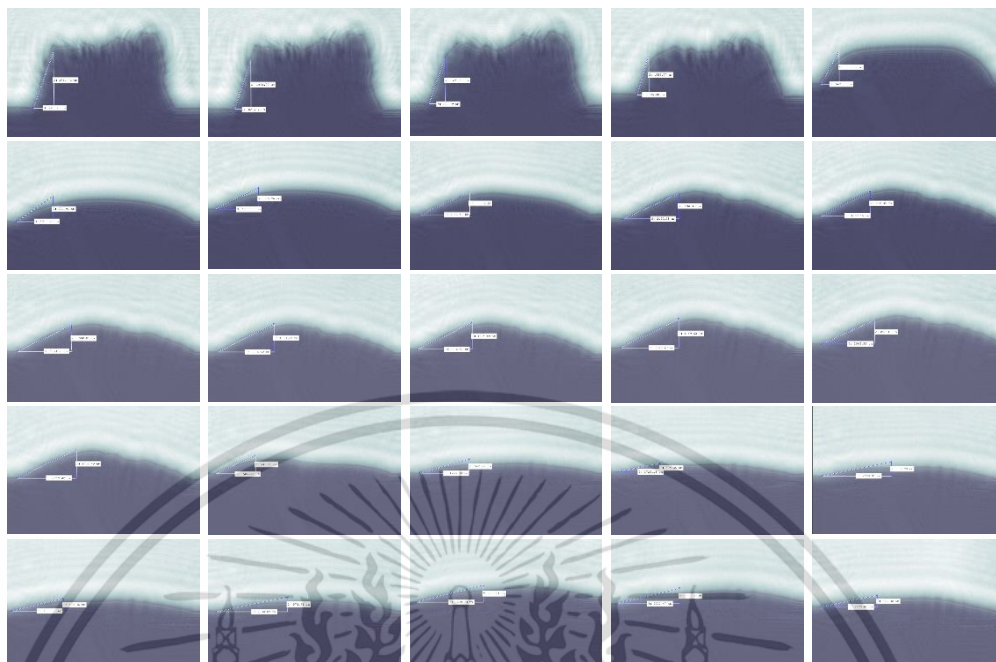


รูปที่ ข.53 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.54 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.55 ภาพแสดงการสร้างภาพและการวัดมุมสัมผัสของ 0.10% Fullerene ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contact Angle Measurement of Melting SnAgCu Solder Paste Mix with Carbon Allotropes Using In-Line Digital Holography Technique

Wikatsama Mamart^{1,a}, Nuttakrit Somdock^{1,b}, Chantira Boonsri^{2,c},
 Suwan Plaipichit^{3,d}, Prathan Buranasiri^{1,e*} and Kannachai Kanlayasiri^{4,f}

¹Physics Department, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

²Center for Optics and Photonics, National Astronomical Research Institute of Thailand (NARIT), 260 Moo 4, T. Donkaew, A. Maerim, Chiangmai, 50180, Thailand

³Physics Department, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand 10110

⁴Industrial Engineering Department, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

^amay_maywikatsama@hotmail.com, ^bmr.nuttakrit@gmail.com, ^cchantira@narit.or.th,
^dsuwanp@g.swu.ac.th, ^eprathan.bu@kmitl.ac.th, ^fkannachai.ka@kmitl.ac.th,

Keywords: solder paste, carbon allotropes, graphene, graphene quantum dots and fullerene, in-line digital holography, contact angle

Abstract. In this research we investigated the contact angle of commercial SnAgCu solder paste mixing with some carbon allotropes such as graphite, graphene quantum dots, and fullerene of varying concentrations with melting temperature, wettability, interfacial microstructure. The wettability was assessed in terms of the contact angle. The in-line digital holography was used for determining the contact angle and morphological of samples at each temperature which the samples have been heating from room temperature until the melting temperature. In the experiment, only one beam was used as the object and reference beams which recorded by a CMOS camera. The recorded image was reconstructed by the angular spectrum digital holography numerical programing. Using the reconstructed images of our results, the shape and contact angle of solder pastes can be investigated.

Introduction

An important concern of modern electronics devices is related to the connecting or jointing of devices. The surface mount technology (SMT) has been developed for improving the interconnection between the devices on printed circuit boards (PCB). The melting and forming of solder pastes have been realized at joint between two metal surfaces. Among Pb-free solders, the SnAgCu solder alloy is extensively used due to good advantages such as low melting point, high solderability, and composite approaches [1].

The solder paste wetting property is a parameter that generate smooth shape, unbroken, uniform, good joint on the substrate. The combination of the method of process attributes such as melting point, solderability, electrical, and good mechanical properties has been studied. To improve the quality of the solder, the hypothesis by adding minor elements has been interested. In addition, the solder spreading, which could be investigated using contact angle over a substrate is a complex problem, involving several physical and chemical processes. Because of their excellent properties for example extraordinary electrical, thermal, physical properties, and zero-overlap semimetal (with both holes and electrons as charge carriers) with very high electrical conductivity graphene has been used for improving the electronic property [2]. So, the carbon nanomaterial doping on the microstructure are interested to explore on solder joint studied.

Digital holography (DH) imaging technique, recently, has become a significant instrument for demonstrative and classification in the different scientific and technology [3]. The DH advantage is direct access to the interference and diffraction effects. Moreover, the attractive feature of DH is the flexibly focus, three-dimension imaging and display. DH is utilized in optical

deformation, strain analysis, shape measurement and so on. The quality investigation of solder pastes properties using DH [20] also has been one of the effective methods to investigate the physical, thermal and mechanical properties of solder paste [4]. In this work, the contact angles of the melting SnAgCu solder paste with various compositions of concentration by weight of graphite, graphene QD, and fullerene mixing SnAgCu solder paste have been determined using the reconstructed images of in-line DH.

Theory

1. Soldering preparation

The investigated samples solder pastes modified with the concentration by weight of carbon allotropes were prepared used equation below

$$WT\% = \frac{\text{carbon allotropes weight}}{\text{carbon allotropes material weight} + \text{solder paste weight}} \times 100\% \quad (1)$$

After the sample is mixed well together, the sample was chilled in the fridge to set after mixing. They were pressed into the block with a dimension of 5 mm diameter and 1.24 mm height and put on the copper plate of 2 mm thick and 30 mm x 30 mm in dimension. Then the samples were put on the hot plate in the setup.

2. Contact angle

The measurement of the contact angle form by a droplet of liquid place on a horizontal surface as shown in Fig.1. Young equation and the angle θ formed by the solid surface and the tangent of the droplet is contact angle. The contact angle of solder paste DH images were calculated using the principles of Euclidian geometry.

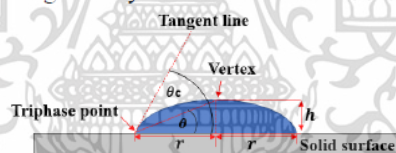


Figure 1. Contact angle measurement using Euclidian geometry.

First, constructing the tangent by drawing a line orthogonal to the sample image radius that intersects the point of contact with the horizontal surface, is created the triphase point. The second step called the half-angle method is performed by a line drawn from the triphase point to the apex of the sample image. Then the contact angle is determined by the equation given below.

$$\tan\theta = \frac{h}{r}$$

$$\tan\theta_c = 2 \arctan\left(\frac{h}{r}\right) \quad (2)$$

3. In-Line Digital Holography

In this research, in-line DH was used to get the images of contract angles of mixed solder paste. Fig. 2(a). illustrates Gabor's in-line holography principle in which the coherent light, upon impacting a highly transmissive object, is directly transmitted (reference light) or scattered (object light). The coherent light was transformed into a uniform plane wave by a lens before transmission through the transmissive object. An interference pattern is generated as a result of interaction between the reference and object lights and subsequently recorded on a digital camera.

4. Reconstruction Method

As shown in Fig. 2(b), assuming that the light propagates along the z-axis to the hologram plane, $h(x,y)$ represents two-dimensional (2-D) diffraction of optical fields based on the Huygens-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fresnel principle. The diffraction of light through the optical filter in the rectangular coordinates can be described as the optical diffraction by Eq. 3.

$$h(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint O(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\mathbf{r})}{r^2} d\xi d\eta, \quad \lim_{\delta x \rightarrow 0} \quad (3)$$

where $O(\xi, \eta)$ represents 2-D optical field at the object plane, r is the distance from any point on the object plane to the image plane (x, y) and r can be written as $r = [z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}$, z is the propagation distance of the optical field, and k is the wavenumber of light. Eq. 3 can be rewritten as Eq. 4. By using the convolution method, the hologram function can be rewritten as Eq. 6

$$h(x, y) = F^{-1}\{[O(\xi, \eta)] \times F[g(\xi, \eta, x, y)]\}, \quad (4)$$

where the impulse response is given by

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{z \exp(jk\mathbf{r})}{j\lambda r^2}, \quad (5)$$

By utilizing the inverse Fourier transform of the filtered Huygens-Fresnel, the optical field at the image plane can be reconstructed as

$$R(\xi', \eta') = F^{-1}\{F[h(x, y)] \times F[g(\xi, \eta, x, y)]\}, \quad (6)$$

where F^{-1} is an inverse Fourier transform function and F is Fourier transform function.

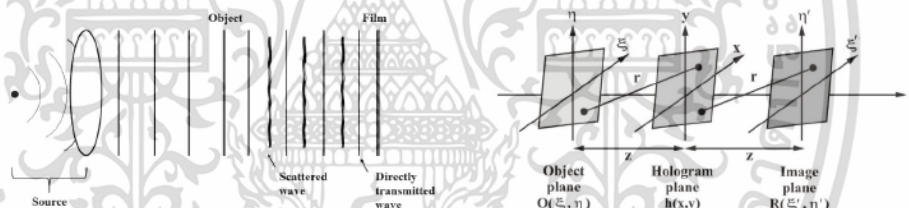


Figure 2. (a) Gabor's in-line holography principle (b) Coordinate system for the numerical reconstruction of images

Experimental Methods

The experimental DH in-line setup to for recording solder paste images using CMOS camera is shown in Fig. 3. The light beam collimated to 25 mm diameter from a laser diode with wavelength 635 nm was propagated through all of the sample. The distance between the collimator to the sample and the sample to the detector were 300 mm.

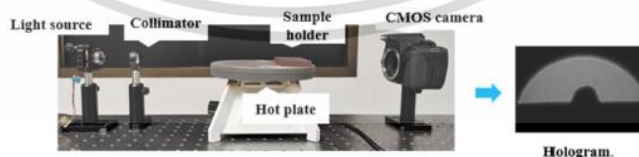


Figure 3. The In-line Digital Holography setup.

The solder pastes specimens consisted of pure solder paste and the addition of graphite, graphene quantum dots, and fullerene of varying concentrations 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 and 0.1 wt.% of solder paste. The images were recorded at room temperature, 50°C, 60°C, 70 °C, 80°C until the sample starting to melt around 230°C. The images were recorded every 10°C changed and then every 5 seconds after the melting point. All experiments were carried out triplicate and the result averaged.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Results and Discussion

In this section the experimental results of SnAgCu solder paste mixing with graphite, graphene quantum dots and fullerene of varying concentrations 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 and 0.1 wt.% of solder paste were discussed. All experiments were carried out in triplicate on an alternate-day basis, and results were averaged.

1. The influence of the added carbon allotrope with the properties of the solder paste

The samples were recorded during heating with hot plate. The temperature of the solder ball was measured. The average melting point temperature were found approximately 200 °C for 100% solder paste, 210 °C for the addition of graphite and fullerene of varying concentrations 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 and 0.1 wt.% of solder paste and 220 °C for the addition of graphene quantum dots of the same varying concentrations. Fig. 4. shows the melting images of the sample of a pure solder paste specimen, the addition of graphite 0.01 % and 0.02 wt.% of solder paste, and the addition of graphene quantum dots and fullerene 0.02 wt.% of solder paste.

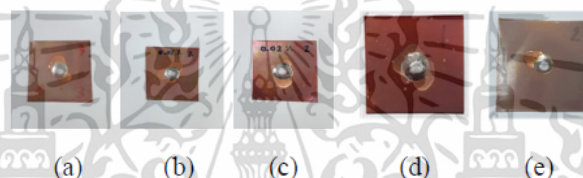


Figure 4. The melting image of some samples solder paste SnAgCu (a) 100%, (b) 0.01% wt graphite (c) 0.02 % wt graphite, (d) 0.02% wt graphene quantum dots, and (e) 0.02% wt fullerene.

2. Recorded and Reconstructed images

Fig. 5. shows the recorded holograms with the time space of 5 s and 10 s afterword and reconstructed images of the solder paste mix with graphite. We found that the solder paste started to change the shape and melting at 80°C and 200°C respectively.

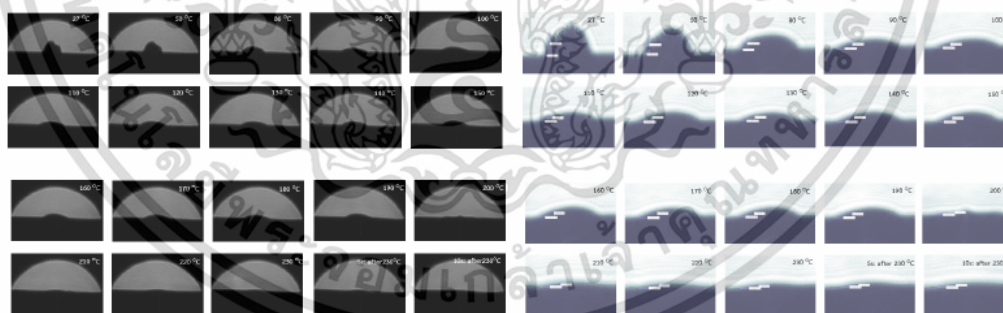


Figure 5. The melting pure SnAgCu solder paste recorded holograms on the left and its reconstructed images of on the right with increasing temperature.

We recorded the images of melting sample using in-line DH setup with a CMOS camera. The recorded images were reconstructed by using the program from Physics Department, Michigan Technological University [5] as shown in Fig. 5. The contact angles of the melting samples can be determined from their reconstructed images. Fig. 6 shows the comparison of the contact angles values of solder paste with the addition of graphite (a), graphene QD (b) and fullerene (c). The contact angles of the solder melt with graphite were also performed using the standard optical contact angle measurement and contour analysis systems of Scientific Instrument Center of School of Science, KMITL. We found that the results were almost the same as our technique as shown in Table 1. The percentage differences from Table 1 are equal to 2.91, 2.94, 15.66, 2.36, 12.58, 2.76 and 0.68 % respectively. It has been seen that the method for measurement contact angel by using

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DH was comparable with the standard instrument. The contact angle of graphene QD and fullerene of varying concentrations 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 and 0.1 wt.% of solder paste have been determined. The plot of the results was shown in Fig. 6 (b) and (c) respectively.

Summary

In this research, the contact angles of SnAgCu solder pastes mix with graphite, graphene QD and fullerene during melt were investigated using reconstructed images from in-line DH technique. The contact angles were found larger than that of pure SnAgCu solder pastes. The optimized contact angles of carbon allotrope mixed solder pastes need to be continually investigated since the advantage of the carbon allotrope would be improve the electronic interconnect properties as well.

Disclosures. This article was funded by School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) (Grant no. 2561-01-05-62). The authors declare no conflicts of interest.

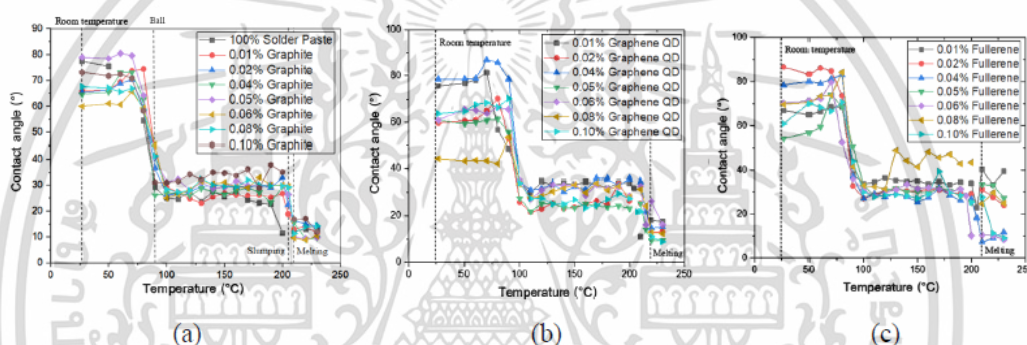


Figure 6 The contact angle plots of melting samples with temperature using reconstructed images, (a) Graphite, (b) Graphene QD and (c) Fullerene.

Table 1 Contact angle values of solder paste without modified compound and with modified Graphite, quantum dots and fullerene at the different %wt. of solder paste.

The different %wt.	Contact angle of Graphite (°)		Contact angle of Graphene QD (°)	Contact angle of Fullerene (°)
	Reconstructed image	Optical contact angle measuring and contour analysis systems	Reconstructed image	Reconstructed image
Solder Paste	10.0	10.3	10.0	10.0
0.01%	13.2	13.6	13.8	35.2
0.02%	14.0	16.6	11.4	22.6
0.04%	12.4	12.7	11.5	10.3
0.05%	11.6	14.3	10.7	27.0
0.06%	13.2	15.1	11.7	8.7
0.08%	14.9	14.5	7.9	19.7
0.10%	14.7	14.8	10.0	8.5

References

- [1] D. Soares, H. Leita o, C.S. Lau, J.C. Teixeira, L. Ribas, R. Alves, S. Teixeira, M.F. Cerqueira, and F. Macedo, Effect of the Soldering Atmosphere on the Wettability Between Sn4.0Ag0.5Cu (in wt.%) Lead-Free Solder Paste and Various Substrates, *JMEPEG* 27 (2018) 5011-5017.
- [2] J. H. Warner, F. Schaffel, M. Rummeli, and A. Bachmatiuk, *Graphene: Fundamentals and Emergent Applications*, first ed., Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [3] Myung K. Kim, *Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications*, Springer, New York 2011.
- [4] T. Thong-On, T. Prakobsang, W. Pethsanthad, P. Buranasiri, and K. Yoshimori, The investigation of thermal effect on dynamical shape changing of solder paste by using double-view digital holography, *Proc. SPIE* 9659 (2015)
- [5] J. P. Fugal, T. J. Schulz, and R. A. Shaw, Practical methods for automated reconstruction and characterization of particles in digital in-line holograms. *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009) 075501.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววิรัชมา มามาตย์
วัน/เดือน/ปีเกิด	16 ธันวาคม 2538
ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน	65 หมู่ 2 ตำบลคลองเขม่า อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่ 81130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546 – 2552 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนสังข์ทองวิทยา พ.ศ. 2552 – 2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนอำมาตย์พานิชนุกูล พ.ศ. 2558 – 2562 ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2563 – 2565 ระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. Wikatsama, M., Somdock, N., Boonsri, C., Plaipichit, S., Buranasiri, P. and Kanlayasiri, K. Properties and Relevance of Solder paste with modified Carbon Allotropes. 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat 2020), on December 1-4, 2020. 2. Wikatsama, M., Somdock, N., Boonsri, C., Plaipichit, S., Buranasiri, P. and Kanlayasiri, K. Contact Angle Measurement of Melting SnAgCu Solder Paste Mix with Carbon Allotropes using In-Line Digital Holography. 10th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials (ICAMEM 2021), on May 29-30, 2021.
ผลงานตีพิมพ์	Wikatsama, M., Somdock, N., Boonsri, C., Plaipichit, S., Buranasiri, P. and Kanlayasiri, K. Contact Angle Measurement of Melting SnAgCu Solder Paste Mix with Carbon Allotropes Using In-Line Digital Holography Technique. In Key Engineering Materials (Vol. 904, pp. 369–374). Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.904.369