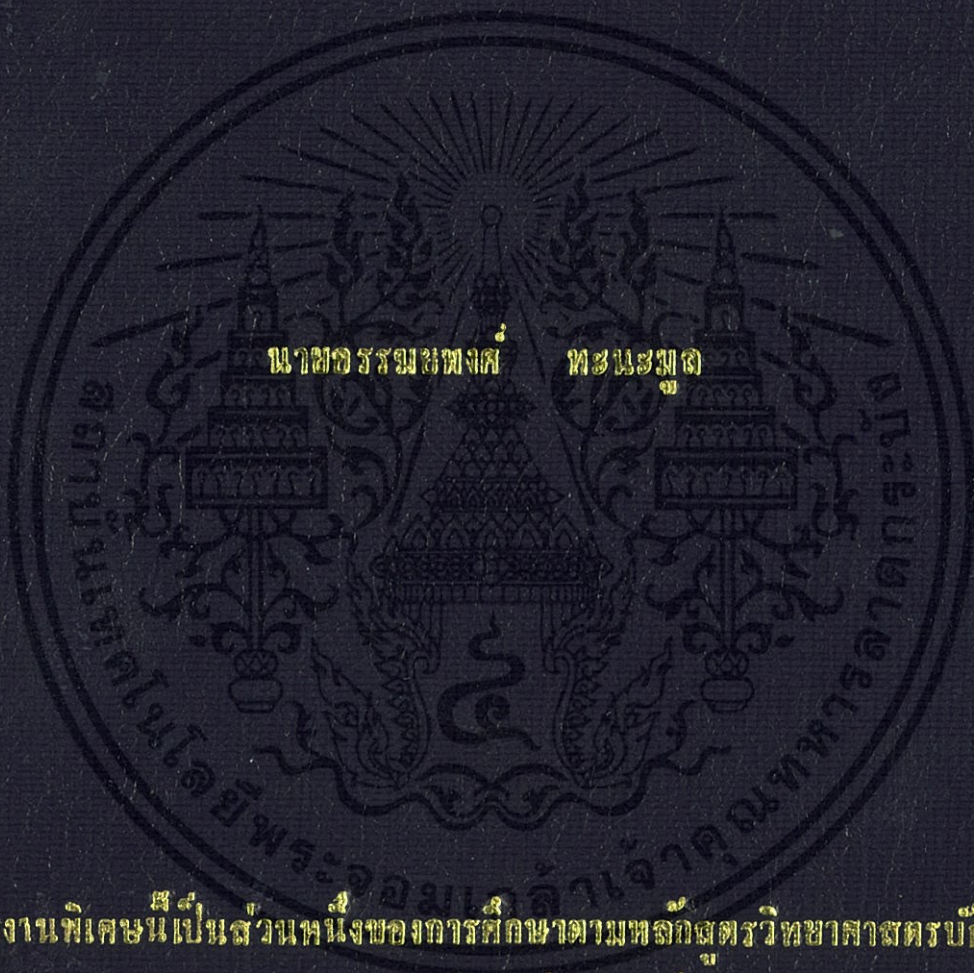


การพัฒนาไมโครเลนส์อาร์เรย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

DEVELOPMENT OF MICROLENS ARRAYS FOR ENHANCING  
PERFORMANCE OF SOLAR CELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การพัฒนาไมโครเลนส์อาร์เรย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์  
DEVELOPMENT OF MICROLENS ARRAYS FOR ENHANCING  
PERFORMANCE OF SOLAR CELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ คณะวิทยาศาสตร์ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ไว้ด้วย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

**DEVELOPMENT OF MICROLENS ARRAYS FOR ENHANCING  
PERFORMANCE OF SOLAR CELLS**



**Mr. Akayapong Thanamun**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2012**

หัวข้อโครงการพิเศษ      การพัฒนาไมโครเลนส์อาร์เรย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์  
Development of Microlens Arrays for Enhancing Performance of Solar Cells

ชื่อนักศึกษา      นายอรรถพงษ์ ทะนะมุล

ปริญญา      วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา      ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา      ผศ.ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ	ภัทรียา กิตติเดชาชาญ
ดร. อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ดร. เชรชญา รัตนพันธ์	
รศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะฯ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาไมโครเลนส์อาร์เรย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อนักศึกษา	นายอรรถพงษ์ ทะนะมุล
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ภัทริยา กิตติเดชาชาญ

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการพัฒนาไมโครเลนส์อาร์เรย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผ่นทองแดงถูกนำมาใช้เป็นแม่พิมพ์ต้นแบบโดยใช้เทคโนโลยีการกัดแผ่นปรินท์ โพลีเมทิลเมทาไคเลต (PMMA) เหลวถูกเคลือบลงบนแม่พิมพ์ด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงว่าเป็นรูปเลนส์ เทโคเมทิลไซโลเซน (PDMS) เหลวลงบนฟิล์มบาง PMMA ได้เป็นไมโครเลนส์อาร์เรย์ ในการศึกษานี้ได้ออกแบบและสร้างไมโครเลนส์อาร์เรย์ที่มีขนาดต่างๆ กันที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดระหว่าง 600-900 ไมโครเมตร พบว่าเมื่อนำไมโครเลนส์มาวางบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน แสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับในกรณีไม่มีไมโครเลนส์มาวางบนผิวหน้าเซลล์

คำสำคัญ : ไมโครเลนส์ โพลีเมทิลเมทาไคเลต ไคโคเมทิลไซโลเซน รีฟลิก้า โมลดิ้ง  
เซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	DEVELOPMENT OF MICROLENS ARRAYS FOR ENHANCING PERFORMANCE OF SOLAR CELLS
<b>Students</b>	Mr. Akayapong Thanamun
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Applied Physics
<b>Academic Year</b>	2012
<b>Advisor</b>	Assist.Prof.Dr. Pattareeya Kittidachachan

### ABSTRACT

This special project aimed to develop microlens arrays for enhancing the performance of solar cell . The copper sheet were used to construct master molds using the standard printed circuit technology. A thin liquid Polymethyl-methacrylate (PMMA) film was then coated on the master molds through spin coating in order to prepare polymer concave structure. The liquid Polydimethylsiloxane (PDMS) was then cast onto the PMMA film in order to form the convex microlens arrays. In the present study, microlens arrays with various size of microlens diameters range from 600-900  $\mu\text{m}$  were designed and fabricated. It was found that the dye-sensitized solar cells and silicon solar cells integrated with microlens arrays exhibited higher photocurrent comparing with that of bare cell.

**Keyword** : Microlens, PMMA, PDMS, Replica molding, DSSC, Solar cells

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์	4
2.2 เทคนิคการสร้างไมโครเลนส์	5
2.2.1 Microlenses fabricated with deep lithography with protons	5
2.3 การสร้างไมโครเลนส์	6
2.4 หลักการวัดทางพารามิเตอร์	7
2.4.1 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์ ความสูงของไมโครเลนส์ และความลึกของหลุมแม่พิมพ์	7
2.4.1.1 กล้องจุลทรรศน์ (Microscop) Digital Blue QX	7
2.4.2 ทารศ์มีความโค้งและระยะโฟกัสของไมโครเลนส์	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells)	8
2.5.1 ส่วนประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	8
2.5.1.1 ขั้วไฟฟ้า (electrode)	8
2.5.1.2 สารไวแสงชนิดสีย้อมอินทรีย์ (Organic-dye sensitizer)	9
2.5.1.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)	9
2.6 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	9
2.7 หลักการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ	10
2.7.1 การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า	10
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การสร้าง DSSC	13
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	13
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการพิมพ์สกรีน	13
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)	13
3.1.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	14
3.1.4.1 การเตรียมและการทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า	14
3.1.4.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) (ขั้วไฟฟ้า Working electrode)	15
3.1.4.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า (Counter electrode)	17
3.1.4.4 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบทางแสง	34
3.4.1 การวัดความยาวโฟกัสของ ไมโครเลนส์	34
3.4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.4.1.3 การวัดสเปกตรัมจากหลอดทั้งสแตน	38
3.4.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.4.1.5 ลักษณะกราฟเส้นสเปกตรัมจากหลอดทั้งสแตน	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้าง ไมโครเลนส์	40
4.1.1 แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นทองแดง	40
4.2 อัตราส่วนระหว่าง PMMA และ ไดคლოโรมีเทน ในการสร้างไมโครเลนส์	46
4.3 การสร้างไมโครเลนส์	46
4.3.1 การสร้างไมโครเลนส์ด้วยวิธี Replica Molding	46
4.3.1.1 สร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA	46
4.3.1.2 สร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS	46
4.4 การวัดทางพารามิเตอร์ของไมโครเลนส์	47
4.4.1 วัดความสูงของไมโครเลนส์และความลึกของหลุมแม่พิมพ์	47
4.5 การวัดสมบัติทางแสง	51
4.6 การวัดสมบัติทางไฟฟ้า	54
4.6.1 ไมโครเลนส์กับการประยุกต์ใช้กับ DSSC	54
4.6.1.1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ แสงขาว	54
4.6.2 ไมโครเลนส์ที่ประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6.2.1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือเลเซอร์สีเขียว	57
4.6.2.2 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ แสงขาว	60
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	3
3.1 คุณสมบัติของ PMMA	21
3.2 แสดงคุณสมบัติของ PDMS	22
3.3 แสดงคุณสมบัติของ DCM	22
3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์	25
4.1 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 nm	41
4.2 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 nm	42
4.3 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 nm	43
4.4 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 nm	44
4.5 แสดงผลการวัดระยะความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ	53
4.6 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร	54
4.7 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร	55
4.8 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร	56
4.9 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร	56
4.10 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร	57
4.11 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร	58
4.12 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร	59
4.13 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร	59
4.14 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร	60

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร	61
4.16 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร	61
4.17 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร	62
5.1. แสดงผลการวัดทางแสงของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ	66
5.2. แสดงผลการวัดทางไฟฟ้าของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของไมโครเลนส์บนผิวหน้าเซลล์	1
2.1 แสดงลักษณะไมโครเลนส์อาร์เรย์ (Microlens arrays)	5
2.2 แสดงกระบวนการของการพิมพ์ลิควิดด้วยโปรตอน (DLP)	6
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	8
2.4 แสดงกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	10
2.5 ลักษณะกราฟ I-V Curve	11
3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	12
3.2 กระจก ITO ที่มีขนาด 2×3 ซม.	14
3.3 บล็อกสกรีนและขนาดพื้นที่ในการสกรีน TiO <sub>2</sub> (วงกลมสีแดง)	15
3.4 เตาที่ใช้ในการเผากระจก	16
3.5 การย้อมกระจกที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม TiO <sub>2</sub> ในสีย้อม N719	17
3.6 กระจก TiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อม N719 (ขั้วไฟฟ้า working electrode)	17
3.7 บล็อกสกรีนและขนาดพื้นที่ในการสกรีน Pt (วงกลมสีแดง)	18
3.8 กระจกที่ทำการสกรีน Pt ที่ผ่านการเผาแล้ว (ขั้วไฟฟ้า Counter electrode)	18
3.9 เมื่อประกบขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้ DSSC	19
3.10 นำ DSSC มาเป่าลมร้อน	19
3.11 การฉีดสารอิเล็กโทรไลต์ผ่านรูที่ทำการเจาะไว้	20
3.12 แสดงภาพแผ่นทองแดง	21
3.13 ภาพแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์	24
3.14 ฟิล์มอาร์ตเวิร์คแบบ Negative ของแม่พิมพ์ไมโครเลนส์อาร์เรย์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ทางเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ 3.16 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ผ่านเครื่องรีด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 26

## สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ทำการตัดออกจากกระดาษแข็ง	26
3.18 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ผ่านการฉายแสง	27
3.19 แสดงภาพการนำแผ่นทองแดงมาล้างในน้ำยา Develop	27
3.20 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ติดสติ๊กเกอร์ก่อนการกัดด้วยน้ำยากัดแผ่นทองแดง	28
3.21 แสดงภาพน้ำยากัดที่ใส่ไว้ในภาชนะพร้อมกับแผ่นทองแดง	28
3.22 แสดงภาพการล้างแผ่น Dry film ออกจากแผ่นทองแดงด้วย Acetone	29
3.23 แสดงภาพของ (a) Sylgard 184 Silicone Elastomer Base (b) Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent	30
3.24 โครงสร้างของไมโครเลนส์	30
3.25 แสดงภาพ PMMA เคลือบอยู่บนแม่พิมพ์	31
3.26 แสดงภาพ PDMS ไมโครเลนส์	31
3.27 แสดงภาพการวัดทางไฟฟ้า (a) ไดอะแกรม (b) อุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า	32
3.28 แสดงภาพการวัดทางไฟฟ้า (a) ไดอะแกรม (b) อุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า	33
3.29 แสดงภาพระบบการวัดทางแสง	35
3.30 ภาพแท่นที่วางสายไฟเบอร์	36
3.31 แหล่งกำเนิดแสงของกล้องดิจิทัลไมโครสโคปและเครื่อง spectrophotometer	36
3.32 แสดงระบบการวัดทางแสงร่วมกับการทำงานของกล้องในการส่องดูสายไฟเบอร์เมื่อสัมผัสกับผิวหน้าเลนส์	36
3.33 แสดงภาพระยะสายไฟเบอร์ที่สัมผัสกับผิวหน้าเลนส์	37
3.34 แสดงภาพแสงที่ผ่านไมโครเลนส์	37
3.35 แสดงภาพการทดลองการวัดสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตน	38
3.36 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่อง spectrophotometer	38

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.37 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตน	39
4.1 แผนภาพแสดงการทำการทดลอง	40
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักและความลึกของแผ่นทองแดง	41
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักและความลึกของแผ่นทองแดง	42
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักและความลึกของแผ่นทองแดง	43
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักและความลึกของแผ่นทองแดง	44
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักและความลึกของแผ่นทองแดง ที่แม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน	45
4.7 แสดงภาพด้านบนของแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ทำจากแผ่นทองแดง	45
4.8 ภาพด้านบนของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 900 ไมโครเมตร ที่สร้างจาก PDMS จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX ขนาดกำลังขยาย 60 เท่า	46
4.9 ภาพด้านข้างของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX ขนาดกำลังขยาย 60 เท่า	47
4.10 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ $x_1$ และ $x_2$	51
4.11 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ $x_1$ และ $x_2$	52
4.12 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ $x_1$ และ $x_2$	52
4.13 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ $x_1$ และ $x_2$	53
4.14 ภาพในระยะที่หัวไฟเบอร์สัมผัสกับผิวหน้าไมโครเลนส์ (ลูกศรสีแดง) ที่ได้จากกล้องดิจิทัลไมโครสโคป	54
4.15 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC	55
4.16 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC	55
4.17 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC	56
4.18 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC	57

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	58
4.20 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	58
4.21 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	59
4.22 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	60
4.23 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	60
4.24 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	61
4.25 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	62
4.26 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

### คำย่อและสัญลักษณ์

1. rpm (รอบต่อนาที)

2. PMMA

3. PDMS

4. DCM

5. DPL (การพิมพ์ลิโธด้วยโปรตอน)

6. LCD

7. DSSC (เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง)

8. S.D. (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

9. MLAs (ไมโครเลนส์อาร์เรย์)

### ความหมาย

Revolution per minute

Polymethyl-methacrylate

Polydimethylsiloxane

Dichloromethane

Deep Lithography with Protons

Liquid Crystal Display

Dye-sensitized solar cells

Standard Deviation

MicroLens Arrays

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้พัฒนาไปเป็นอย่างมาก เนื่องจากในโลกยุคปัจจุบันประสบกับปัญหาทางการขาดแคลนทางด้านพลังงาน จึงเป็นสาเหตุให้มีการแสวงหาแหล่งพลังงานด้านอื่นมาทดแทนพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงถือว่าเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่งในการทดแทนพลังงานที่จะหมดลงไปในอนาคต เซลล์แสงอาทิตย์จึงมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่จำกัด และมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงส่งผลให้การเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานยังไม่ได้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง เซลล์แสงอาทิตย์โพลีเมอร์ ที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ แต่ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์เหล่านี้ก็ยังน้อยและไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้จริง ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงได้พยายามหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการหนึ่งคือการใช้เลนส์เพื่อช่วยรวมแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการเพิ่มปริมาณแสงที่ตกกระทบเซลล์จะส่งผลให้ปริมาณโฟตอนที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นด้วย

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไมโครเลนส์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิดคือ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSC) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยไมโครเลนส์ที่เตรียมไว้จะทำหน้าที่ในการช่วยรวมแสงให้ตกกระทบที่ผิวหน้าเซลล์ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของไมโครเลนส์บนผิวหน้าเซลล์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์
2. เพื่อศึกษากระบวนการที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสง
3. เพื่อศึกษากระบวนการในการจัดสร้างไมโครเลนส์ด้วยวัสดุโพลีเมอร์
4. เพื่อศึกษาการทำงานของไมโครเลนส์เมื่อประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและไมโครเลนส์อาร์เรย์ ด้วยวัสดุโพลีเมอร์
2. ศึกษาการสร้างแม่พิมพ์ของไมโครเลนส์อาร์เรย์ ด้วยวิธี Photolithography
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและแม่พิมพ์ไมโครเลนส์
4. ศึกษาการทำงานร่วมกันของไมโครเลนส์กับเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน
5. สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงาน

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงกับเลนส์

ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสง

ขั้นตอนที่ 3 จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์อาร์เรย์

ขั้นตอนที่ 4 ทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสง

ขั้นตอนที่ 5 ทดลองสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์และสร้างไมโครเลนส์

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสง

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบคุณสมบัติของไมโครเลนส์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 8 ทดลองไมโครเลนส์กับเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  
ซิลิกอน

ขั้นตอนที่ 9 จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา				
	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค
ขั้นตอนที่ 1					
ขั้นตอนที่ 2					
ขั้นตอนที่ 3					
ขั้นตอนที่ 4					
ขั้นตอนที่ 5					
ขั้นตอนที่ 6					
ขั้นตอนที่ 7					
ขั้นตอนที่ 8					
ขั้นตอนที่ 9					

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์
2. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการสร้างไมโครเลนส์ด้วยวัสดุโพลีเมอร์
3. สามารถนำไมโครเลนส์มาประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

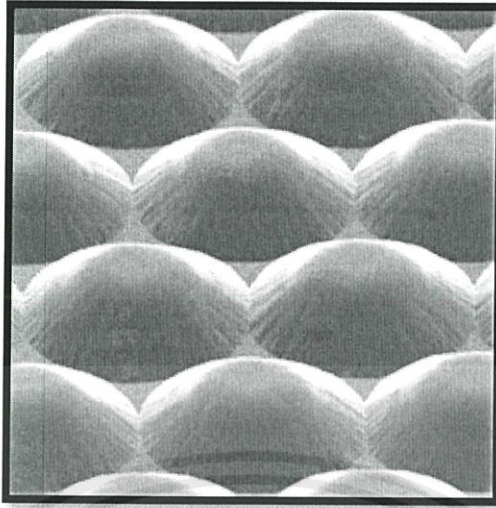
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์

ไมโครเลนส์คือเลนส์ขนาดเล็ก โดยทั่วไปไมโครเลนส์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหนึ่ง มิลลิเมตรและมีขนาดเล็กถึง 10 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) การที่เลนส์มีขนาดเล็กนั้นหมายถึงการออกแบบ ที่ง่ายส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแสงที่ได้รับแต่ในบางครั้งจะเกิดผลกระทบที่ไม่ต้องการด้วยเนื่องมาจาก การเลี้ยวเบนของแสงจากเลนส์ที่มีขนาดเล็ก โดยรูปแบบของไมโครเลนส์อาจจะมาจาก ส่วนประกอบส่วนเดียวกับกระบวนการพื้นผิวเดียวและพื้นผิวทรงกลมที่นูนที่ทำให้เกิดการหักเหของ แสง เพราะว่าไมโครเลนส์ที่มีขนาดเล็กมากนั้น วัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีความหนาแน่นกว่าเลนส์และ ด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปใช้ในการพิจารณาถึงการออกแบบของตัวเลนส์ โดยเลนส์ส่วนใหญ่ที่ใช้ เทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้านี้จะใช้กับเลนส์ที่มีพื้นผิวไม่นูนเป็นครึ่งวงกลมและนอกจากนี้ยังใช้ กับวัสดุทางแสงที่มีหลายชั้นซึ่งถือว่าประสบความสำเร็จในการออกแบบที่เป็นลักษณะเฉพาะอีก ด้วย[2] เลนส์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้งานในหลายด้านเช่น ใช้รวมแสงในระบบการสื่อสารด้วยสายใย แก้วนำแสง ใช้รวมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด ใช้รวมแสงให้กับเซนเซอร์วัดแสงเป็น ต้น หรือใช้รวมแสงให้กับจอแสดงผลคริสตัลเหลว (LCD: Liquid Crystal Display) ที่ใช้ในดิจิทัล โพรเจคเตอร์ แม้กระทั่งรวมแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต กระแสไฟฟ้าของเซลล์เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่านักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามที่จะคิดค้นและพัฒนาเทคนิคเพื่อผลิตไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์ให้มีขนาดและคุณสมบัติที่ต้องการ โดยเลนส์ที่ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกนั้นจะทำมาจากวัสดุแก้วเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาแนวโน้มของงานวิจัยในด้านนี้จะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาเลนส์ให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ดังนั้นวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีคาร์บอเนต (PC) และ โพลีเมทิลเมทาไครเลต (poly(methyl methacrylate): PMMA) จึง

เอกสาร... การค้า  
ไม่ว่าการ...  
เท่า...  
อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะไมโครเลนส์อาร์เรย์ (Microlens arrays)

## 2.2 เทคนิคการสร้างไมโครเลนส์

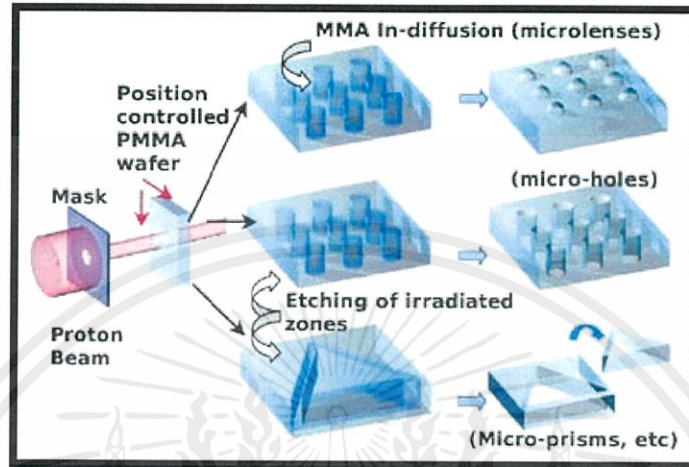
จากการศึกษารายงานนักวิจัยพบว่า เทคนิคการสร้างสำหรับไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์มีมากมายหลายอย่างที่ใช้กับวัสดุโพลีเมอร์ ซึ่งรวมไปถึงเทคนิคโฟโตรีซิสทรีโฟลว (photo reflow) เทคนิคเลเซอร์บีมแชปปีง (laser beam shaping) เทคนิคการเขียนลายลึกด้วยโปรตอน (deep lithography with proton) กระบวนการลิทอกราฟี (LIGA) เทคนิคไมโครเจทปริ้นติง (microjet printing) เทคนิคเลเซอร์แอบราชัน (laser abration) เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) เทคนิครีพลิคาโมลด์ดิ้งและเทคนิคการยิงเลเซอร์โดยตรงลงบนชิ้นงาน (direct laser) วิธีดังกล่าวข้างต้นบางวิธีการ เป็นวิธีการที่มีต้นทุนในการสร้างต่ำและยังเป็นวิธีการสร้างที่อาศัยพื้นฐานจากวิธีการสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว บางวิธีการอาจต้องใช้เครื่องมือในการประมวลผลข้อมูลหรือวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติพิเศษในการสร้าง

### 2.2.1 Microlenses fabricated with deep lithography with protons

การสร้างไมโครเลนส์ด้วยวิธีการพิมพ์ลึกด้วยโปรตอน

แนวคิดของกระบวนการ DLP (deep lithography with protons) อยู่บนพื้นฐานความจริงที่ว่าโปรตอนจะแบ่งโซ่โมเลกุลของวัสดุโพลีเมอร์ PMMA ที่มีมวลโมเลกุลมาก เนื่องจากมวลโมเลกุลของวัสดุที่มีอยู่ในโซนการฉายรังสีจะลดลงและอนุภาคอิสระจะถูกสร้างขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุมีความแตกต่างกันจากกลุ่ม และโดเมนที่ถูกฉายรังสีสามารถบวมขึ้นโดยใช้ไอ

โมนอเมอร์ เป็นเพราะมวลโมเลกุลต่ำของ PMMA ความเร็วในการแพร่กระจายของโมเลกุลขนาดเล็กในบริเวณที่ถูกฉายรังสีจะมากกว่าวัสดุที่อยู่ในกลุ่มที่ไม่ได้ฉายรังสี กระบวนการการแพร่กระจายนี้ทำให้เกิดการขยายตัวของปริมาณที่ถูกฉายรังสี เป็นผลให้เกิดเป็นทรงครึ่งวงกลม



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการของ DLP

### 2.3 การสร้างไมโครเลนส์

ในปัจจุบันนี้ ความสนใจในเรื่องของคุณสมบัติทางแสงของวัสดุในการสร้างไมโครเลนส์ที่มีคุณสมบัติโปร่งแสงคล้ายกับกระจกหรือแก้ว ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้ ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุโพลีเมอร์ทำให้วัสดุโพลีเมอร์ดึงดูดความสนใจของนักวิจัยได้มากเป็นพิเศษ เนื่องจากควบคุมคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางความร้อนได้รวมถึงลดขั้นตอนหรือกระบวนการในการสร้างที่มีความซับซ้อนได้

ในขั้นตอนแรกของการสร้างจะมีการเลือกวัสดุในการทำเลนส์ซึ่งได้แก่ แก้ว พลาสติก หรือวัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานและสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกวัสดุคือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาสร้างเลนส์ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางความร้อน หรือคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุที่เลือกนำมาใช้สร้างเลนส์ ปัจจุบันวัสดุที่นิยมนำมาสร้างไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์แทนแก้วคือวัสดุโพลีเมอร์หรือพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อสภาพ

เอกสารนี้มีความซึ่ดึกว่าแก้ว มีคุณสมบัติทางแสงดีใช้สารเคมีในกระบวนการสร้างลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่กว้างขึ้น

วัสดุโพลีเมอร์ที่จะใช้ในโครงการงานพิเศษนี้คือ โพลีไดเมททิลไซโลเซน (Polymethylsiloxane: PDMS) และ โพลีเมททิลเมทาอะครีเลต (Polymethyl-methacrylate: PMMA) ซึ่งเป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างเลนส์มากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบและมีคุณสมบัติที่หลากหลายทางแสงซึ่งเหมาะสมต่อการสร้างเลนส์หรือมีการนำมาใช้ในการสลักโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในโครงการงานพิเศษนี้จะสร้างไมโครเลนส์ด้วยเทคนิครีพลิคาโมลดิ้ง (Replica-molding)

## 2.4 หลักการวัดทางพารามิเตอร์

### 2.4.1 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์ ความสูงของไมโครเลนส์ และความลึกของหลุมแม่พิมพ์

#### 2.4.1.1 กล้องจุลทรรศน์ (Microscop) Digital Blue QX

ถ่ายภาพตัดขวางของแม่พิมพ์และไมโครเลนส์ และนำมาเทียบสเกลด้วยโปรแกรม

Adobe Illustrator

#### 2.4.2 หาร์มึความโค้งและระยะโฟกัสของไมโครเลนส์

สมมติว่า พื้นผิวของไมโครเลนส์สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับรูปทรงกลม รหึความโค้ง ( $R_c$ ) ของไมโครเลนส์ในไมโครเลนส์อาร์เรย์สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$R_c = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $H$  และ  $D$  คือความสูงในหน่วย mm และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในหน่วย  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

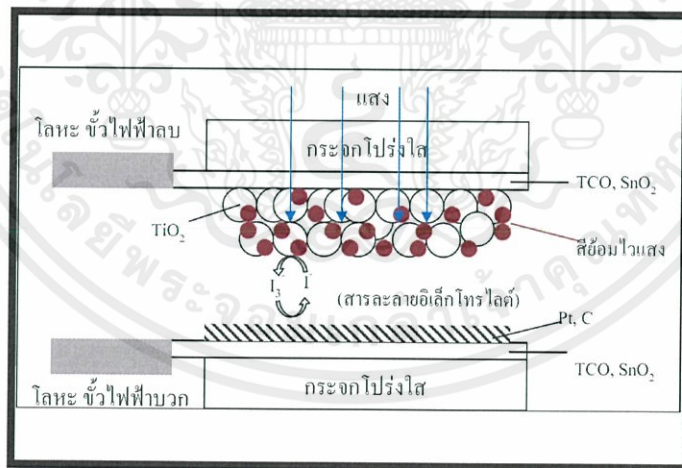
ดังนั้นระยะ โฟกัส ( $f$ ) ของไมโครเลนส์อาร์เรย์สามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{R_c}{n-1} \quad (2.2)$$

เอกสารเมื่อ  $n$  คือค่าดัชนีหักเหแสงของไมโครเลนส์อาร์เรย์ที่ขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เป็นรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ และมีหลักการการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช สีย้อมจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสงจากธรรมชาติ (Natural Dye Sensitized Solar Cell) หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงมีหลักการดังนี้ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ เม็ดสีที่อยู่ภายในจะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงแล้วอิเล็กตรอนของเม็ดสีเองจะมีระดับพลังงานที่สูงขึ้น และสามารถเคลื่อนที่เข้าไปสู่แถบการนำของผลึกสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้าง ที่มีขนาดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง(กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง) และไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกและจะเคลื่อนที่มายังขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่งซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะแพลทินัม (Pt) หรือสารจำพวกคาร์บอน (C) เคลือบอยู่ แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (Redox) ท้ายที่สุดอิเล็กตรอนจะไหลกลับมายังเม็ดสีที่อยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเดิม โดยกระบวนการอย่างนี้จะเกิดซ้ำไปเรื่อยๆ トラบใดที่ยังมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาสีย้อมทางธรรมชาติหลากหลายชนิดเพื่อเป็นการทดแทนวัสดุที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งมีราคาแพง มีการผลิตที่ซับซ้อน ซึ่งถือได้ว่าเป็นการพัฒนาในรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์อีกรูปแบบหนึ่ง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

### 2.5.1 ส่วนประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกที่ 2.5.1.1 ขั้วไฟฟ้า (electrode) มี 2 ขั้วด้วยกัน ขั้วหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงหรือใช้ขั้วแคโทด (cathode) โดยทั่วไปทำจากกระจกหรือพลาสติกเคลือบด้วยอินเดียมไทเทเนียมออกไซด์

(Indium Titanium Oxide (ITO)) ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะที่ทำเป็นฟิล์มบาง (Thin Film) สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งชั้นนี้จะเคลือบด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับเคลือบสีย้อมไวแสง สำหรับอีกชั้นหนึ่งเป็นขั้วแอโนด (anode) ทำจากกระจกหรือพลาสติกเคลือบด้วยแพลทินัมฟิล์มบาง

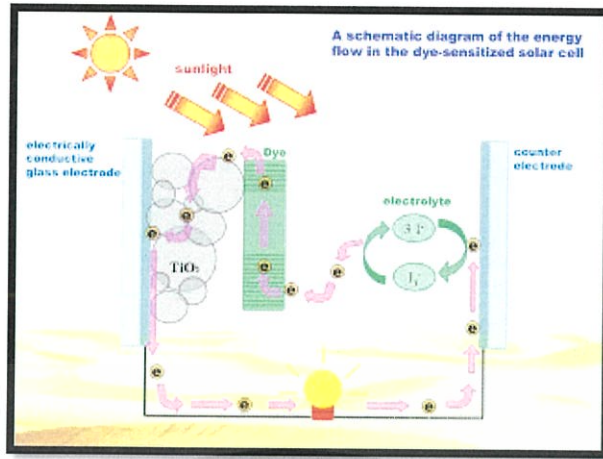
**2.5.1.2 สารไวแสงชนิดสีย้อมอินทรีย์ (Organic-dye sensitizer)** ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็นและใกล้อินฟราเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงโฟตอนที่ตกกระทบ มีคุณสมบัติของสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสถานะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

**2.5.1.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)** ทำหน้าที่ขจัดเซย์อิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายไม่ดูดกลืนแสงในช่วง วิสิเบิล และมีอายุการใช้งานยาวนาน

## 2.6 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

เมื่อแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ เม็ดสีที่อยู่ภายในจะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงแล้วอิเล็กตรอนของเม็ดสีเองจะมีระดับพลังงานที่สูงขึ้น และสามารถเคลื่อนที่เข้าไปสู่แถบการนำของผลึกสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้าง ที่มีขนาดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง(กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง) และไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกและจะเคลื่อนที่มายังขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่งซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะแพลทินัม (Pt) หรือสารจำพวกคาร์บอน (C) เคลือบอยู่ แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (Redox) ทำที่ขั้วอิเล็กตรอนจะไหลกลับมายังเม็ดสีที่อยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเดิม โดยกระบวนการอย่างนี้จะเกิดซ้ำไปเรื่อยๆ ทั่วบริเวณที่ยังมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

## 2.7 หลักการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

### 2.7.1 การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

มาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) โดยคิดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ นิยามจาก กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก ( $P_{max}$ ) ต่อกำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{in}$ ) คูณด้วย 100 เปอร์เซ็นต์

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

หรือ

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.4)$$

เมื่อ  $I_{max}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

$V_{max}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

และค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor: F.F) เป็นค่าบอกถึงคุณภาพของรอยต่อ (ความต้านทาน) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การรั่วไหลของกระแสที่รอยต่อ เป็นต้น ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.5)$$

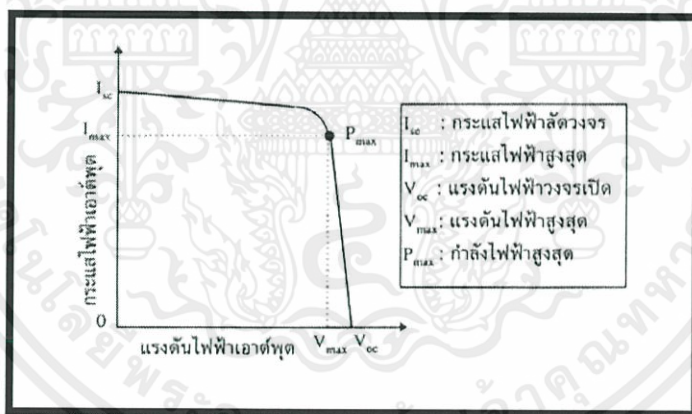
เมื่อ  $I_{sc}$  คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

$V_{oc}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติคือเซลล์ที่ไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะมีประสิทธิภาพของเซลล์เป็น 100% กล่าวคือกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เซลล์ หรือเซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน



รูปที่ 2.5 ลักษณะกราฟ I-V Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ ผู้ทำวิจัยได้จัดทำแผนภาพในหัวข้อ

3.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSC)

3.2 การสร้างไมโครเลนส์

3.3 การทดสอบทางไฟฟ้า

3.4 การทดสอบทางแสง

ดังแผนภาพต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การสร้าง DSSC

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

1. กระจกนำไฟฟ้า (Indium Tin Oxide, ITO) เป็นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นของ Indium Tin Oxide ไว้ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้กระจกมีสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้
2. ที่ตัดกระจก (Glass Cutter)
3. เครื่องชั่งสาร (Weight Scale) Ohaus รุ่น PA214
4. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) รุ่น CMT-50H
5. เครื่องเป่าลมร้อน (Hotair) BLACK&DECKER รุ่น KX2000K 2000W
6. สว่าน BLACK&DECKER รุ่น KR504RE 500W
7. เตาเผาสาร (Muffle Furnaces)

#### 3.1.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการพิมพ์สกรีน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการพิมพ์สกรีนจะประกอบไปด้วย

1. แท่นพิมพ์สกรีน (screen printing table) มีหัวจับกรอบสกรีนเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกันสามารถปรับความสูงต่ำได้ตามความหนาของชั้นงานที่พิมพ์ มีตุ้มน้ำหนักถ่วงกรอบสกรีนเพื่อความสะดวกในการพิมพ์ และที่ฐานของแท่นสกรีนสามารถปรับตำแหน่งทิศทางแนวแกน X และแกน Y เพื่อให้ชั้นงานที่พิมพ์ตรงกับตำแหน่งของแม่พิมพ์
2. บล็อกพิมพ์สกรีน (screen printing block) เป็นส่วนประกอบของแม่พิมพ์สกรีนที่ได้ออกแบบลวดลายเอาไว้ มีหน้าที่ให้หมึกผ่านไปยังวัสดุที่ต้องการพิมพ์
3. ขางปาด (squeegee) หมายถึงอุปกรณ์ผิวเรียบที่จะพาหมึกพิมพ์ในแม่พิมพ์สกรีนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยที่หมึกจะได้รับแรงกดจากขางปาดให้ผ่านผ้าสกรีนไปยังวัสดุที่พิมพ์

หลังจากนั้นนำบล็อกพิมพ์มาติดตั้งกับแท่นพิมพ์สกรีน นอกจากนี้ยังมีวัสดุอื่นร่วมด้วยคือหมึกพิมพ์สกรีน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และแพลทินัมที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับหมึกพิมพ์สกรีน คือมีความหนืดที่เหมาะสมเพื่อใช้ร่วมกับเทคนิคการพิมพ์สกรีนได้เป็นอย่างดี

#### 3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)

ในงานวิจัยนี้ได้ผสมสารตั้งต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้เป็นตัวกักปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นจะประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกประการ

1. การเตรียมสารอิเล็กโทรไลต์ปริมาณ 2 มิลลิลิตรในอะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile) มีสารเคมีเป็นส่วนประกอบคือ

- เกลือ PMIMI ความเข้มข้น 0.006 M (มวลโมเลกุล 252 g/mol)
- TBP (4-Ter butylpyridine) ความเข้มข้น 0.4 M ความหนาแน่น 0.923
- LiI ความเข้มข้น 0.1 M (มวลโมเลกุล 133.84 g/mol)
- $I_2$  ความเข้มข้น 0.05 M (มวลโมเลกุล 253.81 g/mol)

2. การเตรียมการขังสาร ดังต่อไปนี้

1. เกลือ PMIMI จำนวน 0.3025 กรัม
2. TBP จำนวน 0.117 มิลลิลิตร
3. LiI จำนวน 0.0265 กรัม
4.  $I_2$  จำนวน 0.025 กรัม

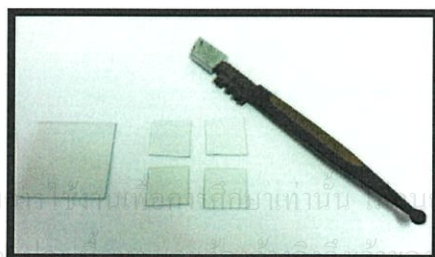
เมื่อผสมสารเคมีเข้ากับอะซิโตไนไตรล์แล้ว นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกส์เป็นเวลา 5 นาที ก็จะได้สารอิเล็กโทรไลต์ที่ต้องการ

### 3.1.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีหลักการทำงาน โดยอาศัยกลไกทางปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีโครงสร้างประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง (ITO glass), ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ), สีย้อมไวแสงชนิด N719 (Sensitizer ruthenium N719), แพลทินัม (Pt), แผ่นพาราฟิล์ม (Parafilm), สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)

#### 3.1.4.1 การเตรียมและการทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า

1. ทำการวัดขนาดกระจกไฟฟ้า (ITO) ให้มีขนาด  $2 \times 3$  ซม. จากนั้นตัดกระจกโดยการใช้นิ้วที่ตัดกระจกกรีดกระจกตามขนาดที่วัดไว้ แล้วใช้มีดหักกระจกก็จะได้กระจกนำไฟฟ้าตามขนาดที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 กระจก ITO ที่มีขนาด  $2 \times 3$  ซม.

2. กระจกนำไฟฟ้ามาทำการเจาะรูเพื่อใช้สำหรับการฉีดยาละลายอิเล็กโทรไลต์ลงไปในเซลล์ (กระจกนำไฟฟ้าสำหรับเตรียม counter - electrode) โดยใช้สว่านเจาะกระจก ซึ่งกระจกนี้จะถูกวางอยู่ในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ซึ่งมีน้ำอยู่ (คือใช้สว่านเจาะกระจกในน้ำ) เพื่อป้องกันกระจกแตกระหว่างทำการเจาะกระจก

3. จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าที่ตัดได้ขนาดและเจาะรูแล้วไปล้างทำความสะอาดโดยล้างด้วยน้ำล้างจานและใช้ฟองน้ำถูพื้นผิวกระจกเบาๆ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง

4. จากนั้นนำกระจกไฟฟ้าใส่ลงในบีกเกอร์แล้วเติมเอทานอลจนท่วมกระจกนำไฟฟ้าแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 20 นาที

5. นำกระจกนำไฟฟ้าออกจากบีกเกอร์แล้วทำความสะอาดโดยใช้สำลีที่ชุบด้วยเอทานอลแล้วเช็ดพื้นผิวกระจกเบาๆ แล้วทิ้งกระจกให้แห้งหรือใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าจนกระจกนำไฟฟ้าแห้ง

### 3.1.4.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) (ขั้วไฟฟ้า Working electrode)

1. นำกระจกไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการตัดให้ได้ขนาดและทำความสะอาดแล้วนำไปเคลือบฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  โดยใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีน (Screen Printing Technique) ซึ่งพื้นที่ในการพิมพ์สกรีนมีขนาด  $0.3 \times 1.2$  ซม.



รูปที่ 3.3 บล็อกสกรีนและขนาดพื้นที่ในการสกรีน  $\text{TiO}_2$  (วงกลมสีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. จากนั้นใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าให้ความร้อนเพื่อทำให้ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ที่สกรีนลงบนกระจกนั้นแห้ง แล้วทำการสกรีน  $\text{TiO}_2$  โดยทำตามขั้นตอนในข้อ 1 และข้อ 2 ซ้ำอีก 2 ครั้ง (คือ

สกรีน  $\text{TiO}_2$  ทั้งหมด 3 ครั้ง)

3. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการสกรีน  $\text{TiO}_2$  แล้ว นำมาเผา โดยปรับอุณหภูมิในการเผาดังต่อไปนี้

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 20 นาที (จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที)
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 10 นาที (จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที)
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 10 นาที (จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที)
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 10 นาที (จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที)
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 10 นาที (จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที)
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ทำการจดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที จนกว่าอุณหภูมิของเตาเผาจะเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสอย่างแท้จริง แล้วทำการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิให้ลดลงเหลือ 50 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็น 24 ชั่วโมง เพื่อรอให้กระจกไฟฟ้าเย็นตัวลง



รูปที่ 3.4 เตาที่ใช้ในการเผากระจก

4. นำกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการเผาแล้วมาเชื่อมด้วยสีย้อม N719 โดยนำกระแสไปจุ่มหรือแช่ในสีย้อมแล้วทำการต้มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 การเชื่อมกระแสที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ในสีย้อม N719

5. จากนั้นทำความสะอาดและเช็ดส่วนของสีย้อมที่เกินออกมาจากพื้นผิวของฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  โดยใช้สำลีหรือคัตเตอร์กับด้วยเอทานอลแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

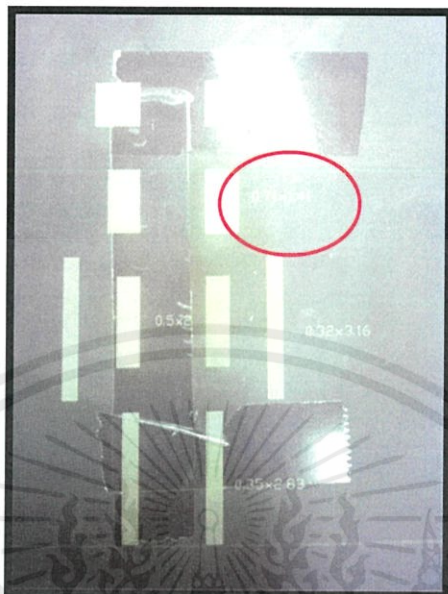


รูปที่ 3.6 กระแส  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการเชื่อมด้วยสีย้อม N719 (ขั้วไฟฟ้า working electrode)

### 3.1.4.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า Counter electrode

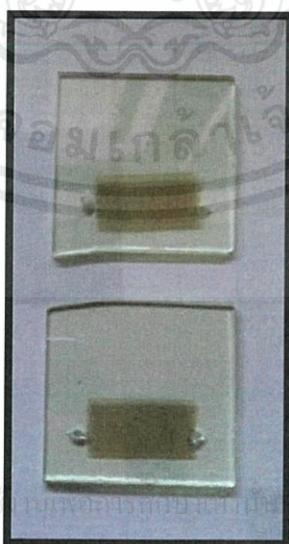
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้ในงานการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ อุณหภูมิในการเผาเช่นเดียวกับการเตรียมขั้วไฟฟ้า working electrode โดยการเตรียมขั้วไฟฟ้า Counter electrode มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกระจกไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการตัดให้ได้ขนาดและทำความสะอาด แล้วนำไปเคลือบฟิล์ม (Pt) โดยพื้นที่ในการพิมพ์สกรีนมีขนาด  $0.71 \times 0.41$  ซม.



รูปที่ 3.7 บล็อกสกรีนและขนาดพื้นที่ในการสกรีน Pt (วงกลมสีแดง)

2. จากนั้นใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าให้ความร้อนเพื่อทำให้ฟิล์ม Pt ที่สกรีนลงบนกระจกจนแห้ง แล้วทำการสกรีนซ้ำอีก 1 ครั้ง (คือสกรีน Pt ทั้งหมด 2 ครั้ง)
3. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการสกรีน Pt แล้วนำมาเผา โดยปรับอุณหภูมิในการเผา เหมือนกันกับการเตรียมขั้วไฟฟ้า Working electrode



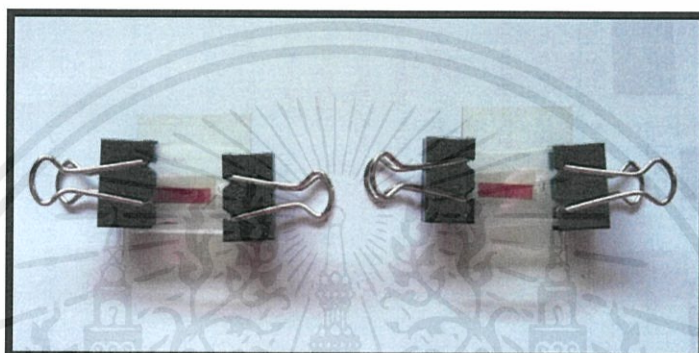
รูปที่ 3.8 กระจกที่ทำการสกรีน Pt ที่ผ่านการเผาแล้ว (ขั้วไฟฟ้า Counter electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่ระบุไว้และไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.4 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

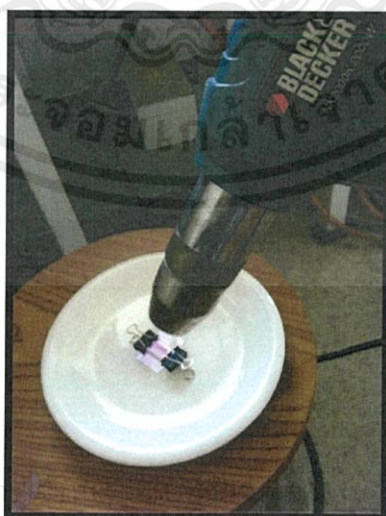
การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงมีขั้นตอนดังนี้

1. นำกระจกนำไฟฟ้าขั้ว Working electrode มาประกบกับขั้วไฟฟ้า Counter electrode โดยมีแผ่นซิลด์ (พาราฟิล์ม) คั่นกลางระหว่างกระจกทั้งสอง (ตัดแผ่นพาราฟิล์มให้เป็นช่องว่างตรงกลางสำหรับใช้เป็นพื้นที่ในการกักเก็บอิเล็กโตรไลต์) ใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบกระจกทั้งสองแผ่นไว้



รูปที่ 3.9 เมื่อประกบขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้ DSSC

2. นำคลิปหนีบกระดาษมาหนีบไว้ที่ด้านข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองด้าน แล้วใช้เครื่องเป่าลมร้อน เป่าให้ตัวพาราฟิล์มยึดให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองติดกัน ทิ้งไว้สักครู่ให้เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงหายร้อนจากการเป่า



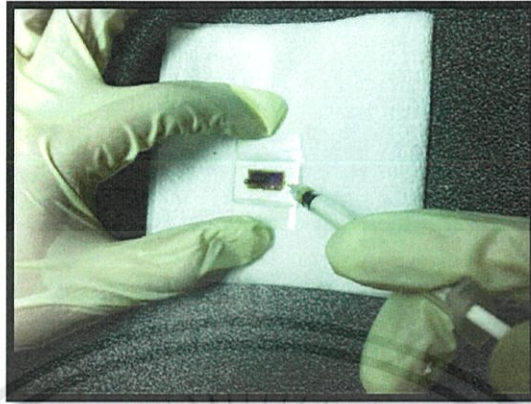
รูปที่ 3.10 นำ DSSC มาเป่าลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ

ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นนำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฉีดผ่านรูที่ได้ทำการเจาะไว้ แล้วนำสก็อตเทปปิดทันที (เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะระเหยออกไป)



รูปที่ 3.11 การฉีดสารอิเล็กโทรไลต์ผ่านรูที่ทำการเจาะไว้

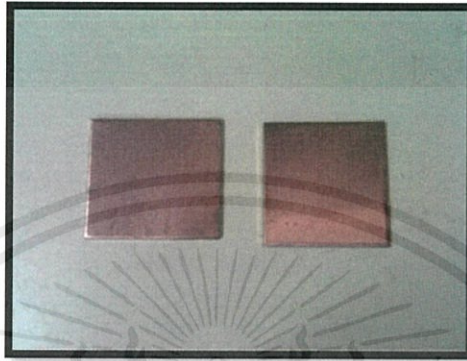
4. นำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงเมื่อประยุกต์ใช้กับไมโครเลนส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การสร้างไมโครเลนส์

#### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์

วัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปไมโครเลนส์อาร์เรย์ในโรงงานพิเศษนี้ คือแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 แสดงภาพแผ่นทองแดง

#### 3.2.2 วัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

##### 3.2.2.1 PMMA (Polymethyl-methacrylate)

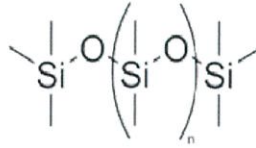


ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ PMMA

	คุณสมบัติ
สูตรทางเคมี	$(C_5O_2H_8)_n$
มวลโมเลกุล	varies
ความหนาแน่น	1.18 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	160 °C (320 °F)
ดัชนีหักเห	1.4914 ที่ความยาวคลื่น 587.6 nm.

คุณสมบัติของ PMMA คือ โส ไมมีสี สามารถให้แสงส่องผ่านได้ถึง 92% และมีความแข็งแรง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้ PMMA เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนของหน้าเลนส์

### 3.2.2.2 PDMS (Polydimethylsiloxane)

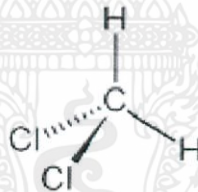


ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของ PDMS

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$(\text{C}_2\text{H}_4\text{OSi})_n$
ความหนาแน่น	$965 \text{ kgm}^{-3}$
จุดหลอมเหลว	$-49.9\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$
ดัชนีหักเห	1.4

คุณสมบัติของ PDMS คือ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองทางแสงดีมาก และมีความยืดหยุ่นสูงจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ทำเลนส์

### 3.2.2.3 DCM (Dichloromethane)



ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของ DCM

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$
ความหนาแน่น	$1.3266 \text{ g/cm}^3$ , liquid
จุดหลอมเหลว	$-96.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (175.7 K)
จุดเดือด	$40 \text{ }^\circ\text{C}$ (312.8 K)

ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) หรือเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) คือ สารประกอบชนิดหนึ่ง มีสูตรเป็น  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  เป็นของเหลวไม่มีสี มักใช้เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากเป็นของเหลวที่ระเหยง่ายและไม่ติดไฟ อย่างไรก็ตาม สารประกอบคลอโรคาร์บอนที่มีอันตรายน้อยที่สุดชนิดหนึ่ง

### 3.2.3 วัสดุอุปกรณ์

#### 3.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์

1. แผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร
2. เครื่องรีด
3. แผ่น Dry film
4. แผ่นฟิล์มอาร์ทเวอร์ค
5. ไฟ Black light
6. น้ำยา Develop

#### 3.2.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

1. โพลีเมอร์
  - a. PMMA (Polymethylmethacrylate)
  - b. PDMS (Polydimethylsiloxane)
2. ไคลอโรโรมีเทน (Dichloromethane)
3. อะซิโตน (Acetone)
4. เอทานอล (Ethanol)
5. ขวดแก้ว
6. ปีกเกอร์
7. แท่งแก้วดูดสาร (สลิงค์)
8. ช้อนตักสาร
9. เครื่องชั่ง
10. เครื่องอัลตราโซนิก

### 3.2.4 ตรวจสอบวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

#### 3.2.4.1 PMMA

เนื่องจาก PMMA จะเป็นตัวที่อยู่ติดกับแม่พิมพ์อีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส จึงต้องมีการทดสอบสารละลายที่จะนำมาใช้กับ PMMA จากการทดสอบกับแผ่นอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส พบว่า สารเคมีที่จะนำมาเป็นสารละลายได้นั้น คือ เอทานอล อะซิโตน และ ไคลอโรโรมีเทน

#### 3.2.4.2 การสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์

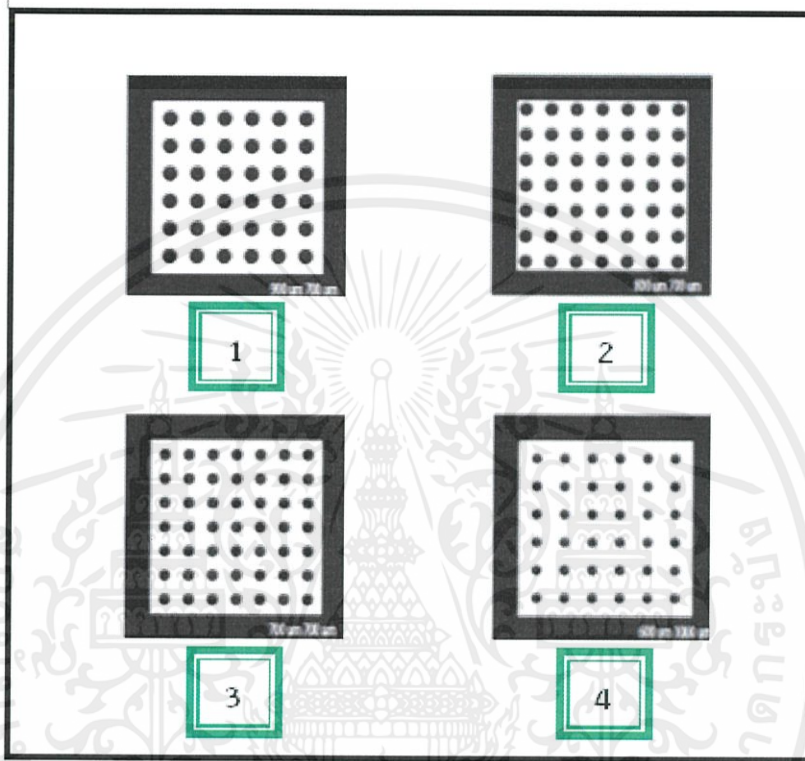
สำหรับแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ได้มาจากการสร้างด้วยวัสดุจากแผ่นทองแดงมีดังต่อไปนี้

#### 3.2.4.3 ทำแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ด้วยวิธี Negative Dry Film Photoresist

ในการใช้แผ่นทองแดง ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์อาร์เรย์ ได้ใช้วิธีการทำ

แผ่นทองแดงต้นแบบด้วย Negative Dry Film Photoresist โดยใช้เทคนิค photolithography ซึ่งมีวิธีการดำเนินการ ดังนี้


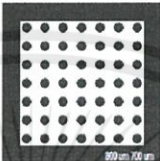
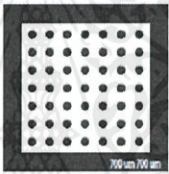
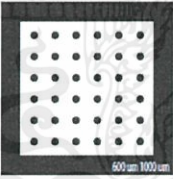
1. ออกแบบแม่พิมพ์ที่ต้องการด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator ดังรูปที่ 3.3 และนำไปทำเป็นฟิล์มอาร์ตเวิร์ค แบบ Negative ได้ดังรูปที่ 3.4

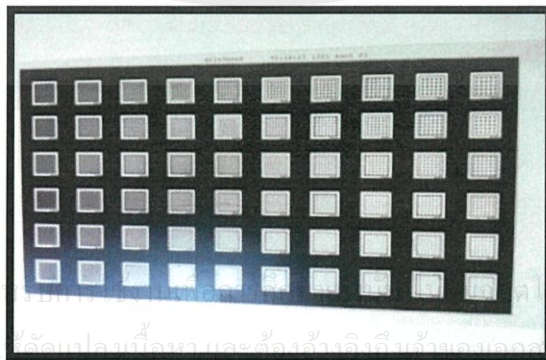


รูปที่ 3.13 ภาพแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

หมายเลข	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	ระยะห่าง(Pitch)
1	 900 $\mu\text{m}$	700 $\mu\text{m}$
2	 800 $\mu\text{m}$	700 $\mu\text{m}$
3	 700 $\mu\text{m}$	700 $\mu\text{m}$
4	 600 $\mu\text{m}$	1000 $\mu\text{m}$



รูปที่ 3.14 ฟลิ์มอาร์ตเวิร์คแบบ Negative ของแม่พิมพ์ไมโครเลนส์อาร์เรย์

1. นำ Negative Dry Film มาติดบนแผ่นทองแดง โดยข้างล่างรองด้วยกระดาษแข็ง เพื่อให้สามารถดึงออกจากเครื่องรีดได้ง่าย ดังรูปที่ 3.15

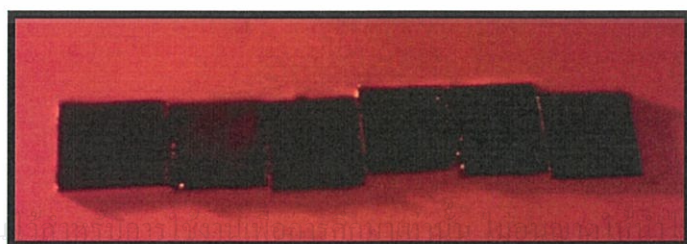


รูปที่ 3.15 แสดงภาพ Negative dye ที่ติดลงบนแผ่นทองแดง

นำแผ่นทองแดง ที่ติดฟิล์มแล้วเข้าเครื่องรีดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วรอบทั้งหมด 2 รอบ รอบแรกใช้เวลาเท่ากับ 3 รอบที่สอง ใช้เวลาเท่ากับ 2 ซึ่งเป็นเวลาของเครื่องรีด ดังรูปที่ เมื่อเสร็จแล้วจะเป็นดังรูปที่ 3.16 และนำมาตัดขอบออกเพื่อความสวยงาม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.16 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ผ่านเครื่องรีด



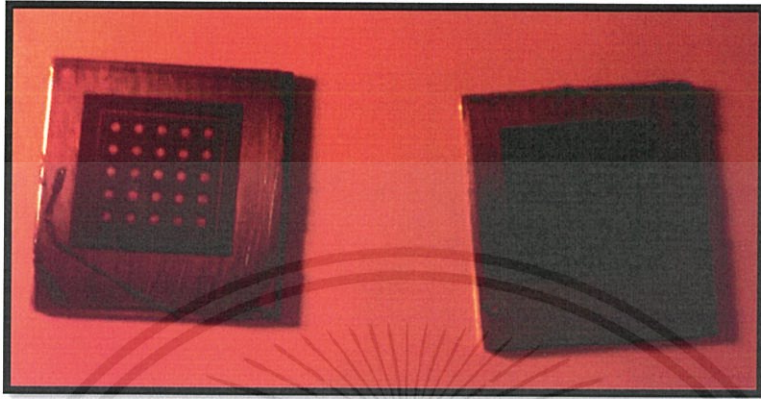
รูปที่ 3.17 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ทำการตัดออกจากกระดาษแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

.ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อได้แผ่นทองแดงที่เคลือบ Dry Film เรียบร้อยและพร้อมจะขึ้นลายแล้วนำแผ่นฟิล์มอาร์เวิร์คแบบ Negative มาวางทาบบนแผ่นทองแดง และนำเข้าเครื่องฉายแสง ซึ่งภายในเป็นหลอด UV ใช้เวลา 150 วินาที ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ผ่านการฉายแสง

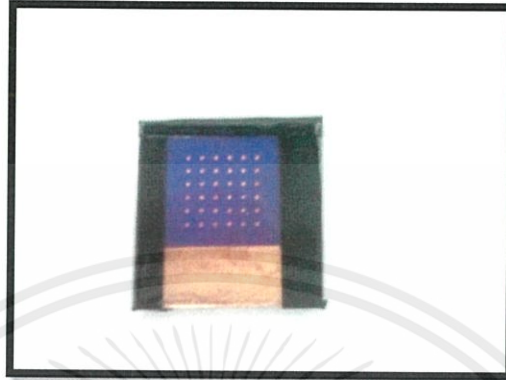
3. นำแผ่นทองแดงที่ฉายแสงแล้วมาลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บน Dry Film อีกชั้นหนึ่งออก แล้วนำมาล้างในน้ำยา Developer ที่เป็นส่วนผสมของ โซเดียมคาร์บอเนต 10 กรัม ผสมกับ น้ำสะอาด 1 ลิตร ใช้ฟองน้ำลูบไปมาทั่วๆแผ่นเพียงเบาๆ จนกระทั่งเส้นของลายอาร์ทเวิร์คเด่นชัดขึ้น ไม่มีส่วนของ Dry Film ตกค้างอยู่ ดังรูปที่ 3.19 จากนั้นนำมาล้างน้ำให้สะอาด และรอให้แห้ง



รูปที่ 3.19 แสดงภาพการนำแผ่นทองแดงมาล้างในน้ำยา Develop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ก่อนการเตรียมกัณฑ์แผ่นทองแดง ต้องทำการติดสติ๊กเกอร์สีดำให้ทั่วบริเวณแผ่นทองแดง ยกเว้นส่วนที่จำเอาไว้ทำการวัดว่า ในขณะที่การกัณฑ์แผ่นทองแดงนั้น น้ำยากัณฑ์ได้กัณฑ์ไปลึกเท่าใด ดังรูปที่ 3.20



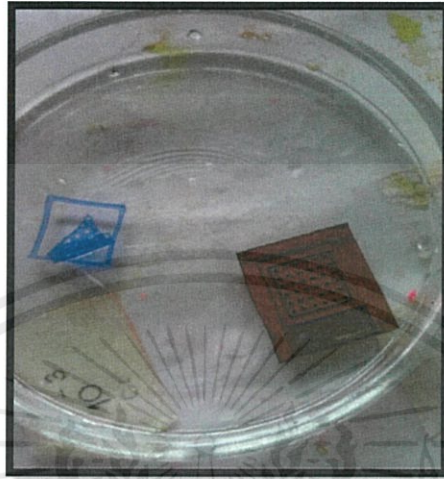
รูปที่ 3.20 แสดงภาพแผ่นทองแดงที่ติดสติ๊กเกอร์ก่อนการกัณฑ์ด้วยน้ำยากัณฑ์แผ่นทองแดง

5. เตรียมน้ำยากัณฑ์แผ่นทองแดงใส่ลงในภาชนะ จากนั้นใส่แผ่นทองแดง ลงไปแช่ในน้ำยากัณฑ์ไปมา (เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาของน้ำยากัณฑ์ให้กัณฑ์แผ่นทองแดงให้เร็วขึ้น) ดังรูปที่ 3.21 พร้อมทั้งตรวจสอบกระทั่งทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการถูกกัดออกจนหมด จะได้ลายเส้นตามต้องการ แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด การกัณฑ์แผ่นทองแดงจะทำการจับเวลาทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมทั้งวัดความลึกของหลุมตามเวลาที่กำหนด อีกทั้งเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์ดังนี้ 900, 800, 700, 600 nm ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.21 แสดงภาพน้ำยากัณฑ์ที่ใส่ไว้ในภาชนะพร้อมกับแผ่นทองแดง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำแผ่นทองแดงที่ต้องการลอก Dry Film ออก แช่ลงในภาชนะที่ใส่ Acetone ทิ้งไว้สักครู่ แผ่น Dry Film จะอ่อนตัวและละลายออก ดังรูปที่ 3.22 จากนั้นจึงนำไปทำความสะอาด จะได้แม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ทำจากแผ่นทองแดง ที่พร้อมใช้งาน



รูปที่ 3.22 แสดงภาพการล้างแผ่น Dry film ออกจากแผ่นทองแดงด้วย Acetone

### 3.2.5 การเตรียมไมโครเลนส์จะใช้สารโพลิเมอร์ 2 ชนิด

#### 3.2.5.1 PMMA

1. ในการเตรียม PMMA จะใช้ PMMA กับไดคลอโรมีเทน
2. นำ PMMA จำนวน 0.553 กรัม ผสมกับไดคลอโรมีเทนปริมาณ 1.5 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วขนาดเล็ก
3. นำส่วนผสมในข้อ 3 ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 50 นาที โดยการใส่น้ำลงบีกเกอร์ก่อนแล้วจึงใส่ขวดแก้วขนาดเล็กลงไป เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน

#### 3.2.5.2 PDMS

ส่วนผสมของ PDMS มีดังนี้

1. Sylgard 184 Silicone Elastomer Base
2. Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent

ขั้นตอนการผสม PDMS นำ Sylgard 184 Silicone Elastomer Base และ

Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent ด้วยอัตราส่วน 2 : 0.2 ผสมให้เข้ากันและ

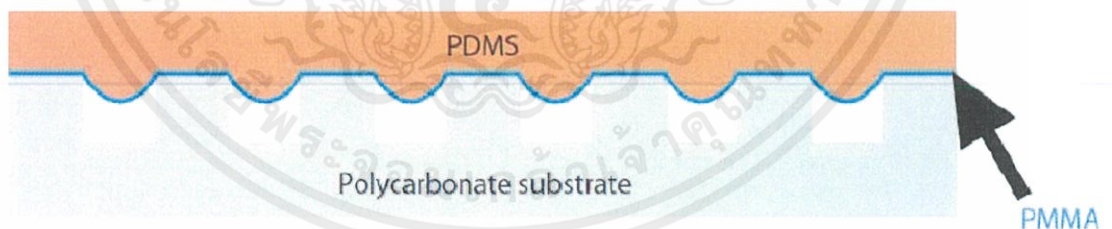
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แสดงภาพของ (a) Sylgard 184 Silicone Elastomer Base  
(b) Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent

### 3.2.6 การสร้างไมโครเลนส์

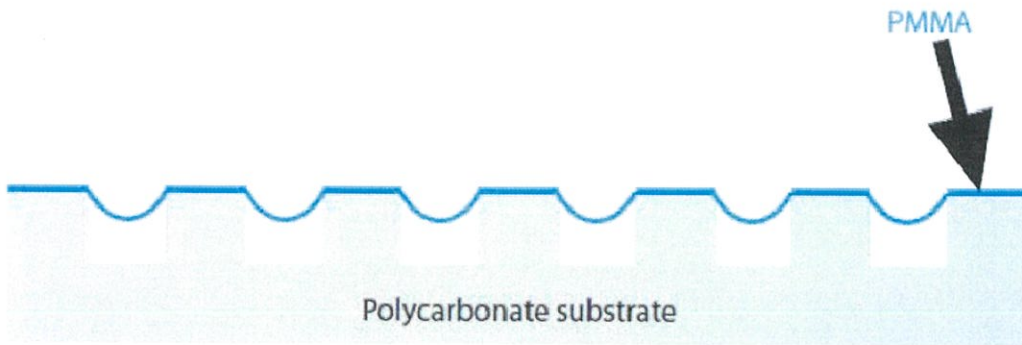
เนื่องจากไมโครเลนส์ที่ทำการสร้าง มีสารพอลิเมอร์หลายตัว และต้องมีการสัมผัสกัน จึงต้องมีการทดสอบสารพอลิเมอร์แต่ละตัวว่าจะมีผลต่อสารพอลิเมอร์ตัวอื่นๆหรือไม่ ซึ่งไมโครเลนส์ที่ทำการสร้าง มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 โครงสร้างของไมโครเลนส์

#### 3.2.6.1 ทำการสร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA

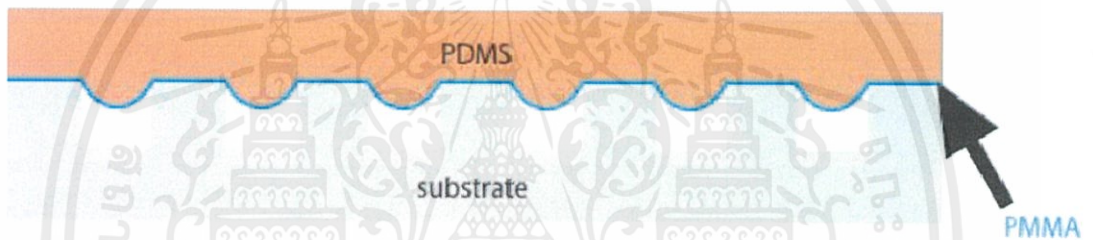
1. เตรียมสารละลาย โดยใช้ PMMA 0.533 กรัม และ ไดคลอโรมีเทน 1.5 มิลลิลิตร
2. นำสารที่เตรียมไว้ไปทำการละลายโดยใช้เครื่อง อัลตราโซนิก เป็นเวลา 50 นาที
3. นำแม่พิมพ์ไปวางบนเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนหัวยิง
4. นำสารที่เตรียมได้เทลงบนแม่พิมพ์ แล้วทำการหมุนด้วยความเร็ว 3300 rpm



รูปที่ 3.25 แสดงภาพ PMMA เคลือบอยู่บนแม่พิมพ์

### 3.2.6.2 ทำการสร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS

นำ PDMS ที่เตรียมไว้มาเทลงบนแม่พิมพ์ที่มี PMMA เคลือบอยู่



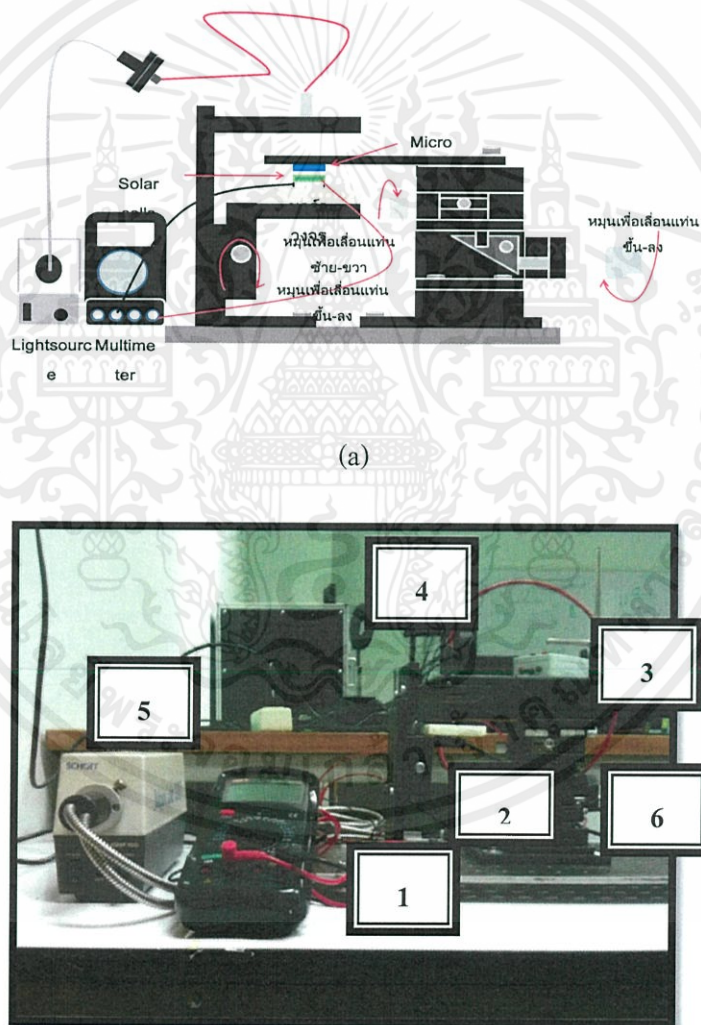
รูปที่ 3.26 แสดงภาพ PDMS ไมโครเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบทางไฟฟ้า

#### 3.3.1 การวัดทางไฟฟ้า

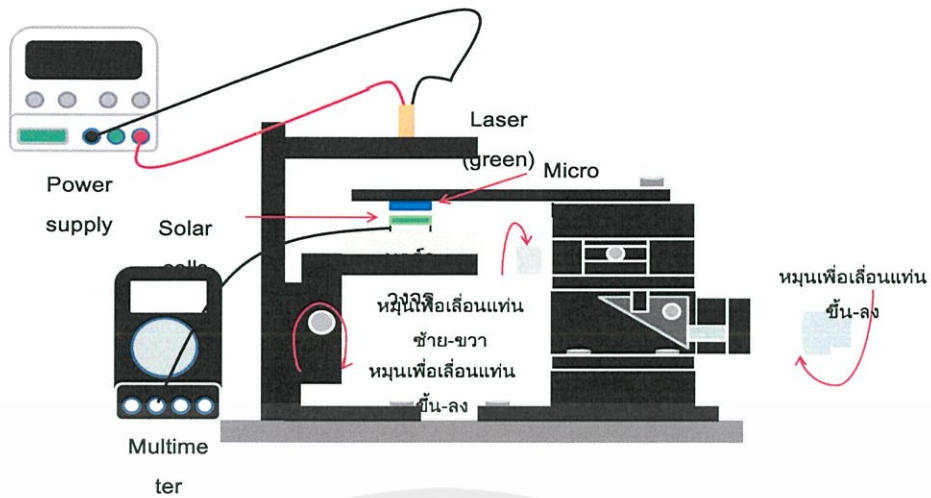
ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับ ไมโครเลนส์ทางไฟฟ้านั้น จะทำการวัดโดยใช้แสงอาทิตย์จำลองจากเครื่อง MEGA LIGHT 50 ส่องผ่านไปยังตัวเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงโดยมีไมโครเลนส์วางบนเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยต่อมัลติมิเตอร์เข้ากับขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการทดลองกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน แล้วเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงขาวและเลเซอร์สีเขียว ทำการวัดกระแสที่เกิดขึ้นใน 2 กรณีคือ มีเลนส์และไม่มีเลนส์ ดังรูปที่ 3.27



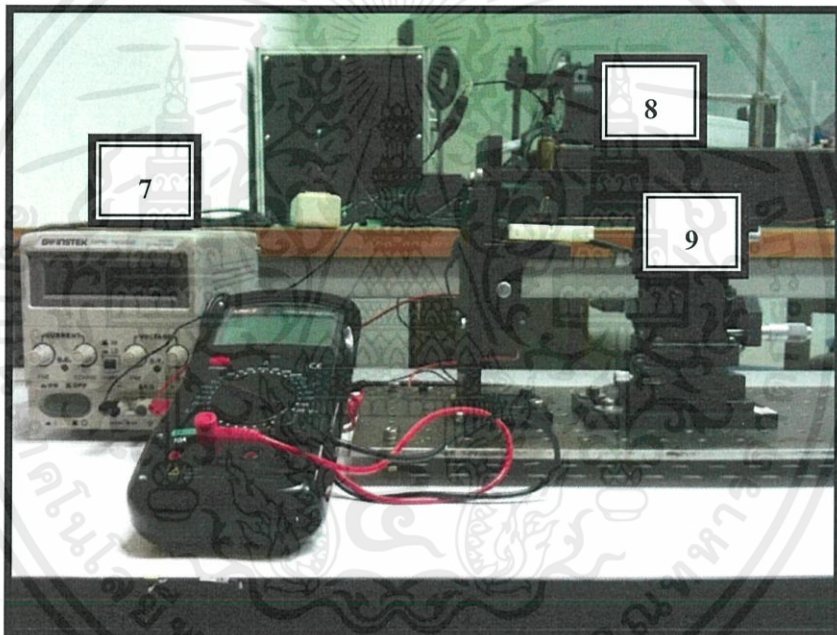
(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 3.27 แสดงภาพการวัดทางไฟฟ้า (a) ไดอะแกรม (b) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดแสงแบบแสงขาว



(a)



(b)

รูปที่ 3.28 แสดงภาพการวัดทางไฟฟ้า (a) ไดอะแกรม (b) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์สีเขียว

### 3.3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 1. มัลติมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2. แท่นวางเซลล์แสงอาทิตย์ (เลื่อนขึ้น-ลง)

#### 3. แท่นวางไมโครเลนส์ (เลื่อนซ้าย-ขวา)

4. สายไฟเบอร์ขนาด  $50\phi \mu\text{m}$
5. แหล่งกำเนิดแสงหลอดทังสเตน (Light source)
6. ฐานวางแท่นไมโครเลนส์
7. แหล่งจ่ายไฟ
8. เลเซอร์ (สีเขียว)
9. บอร์ดวงจรไฟฟ้า
10. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน
11. DSSC

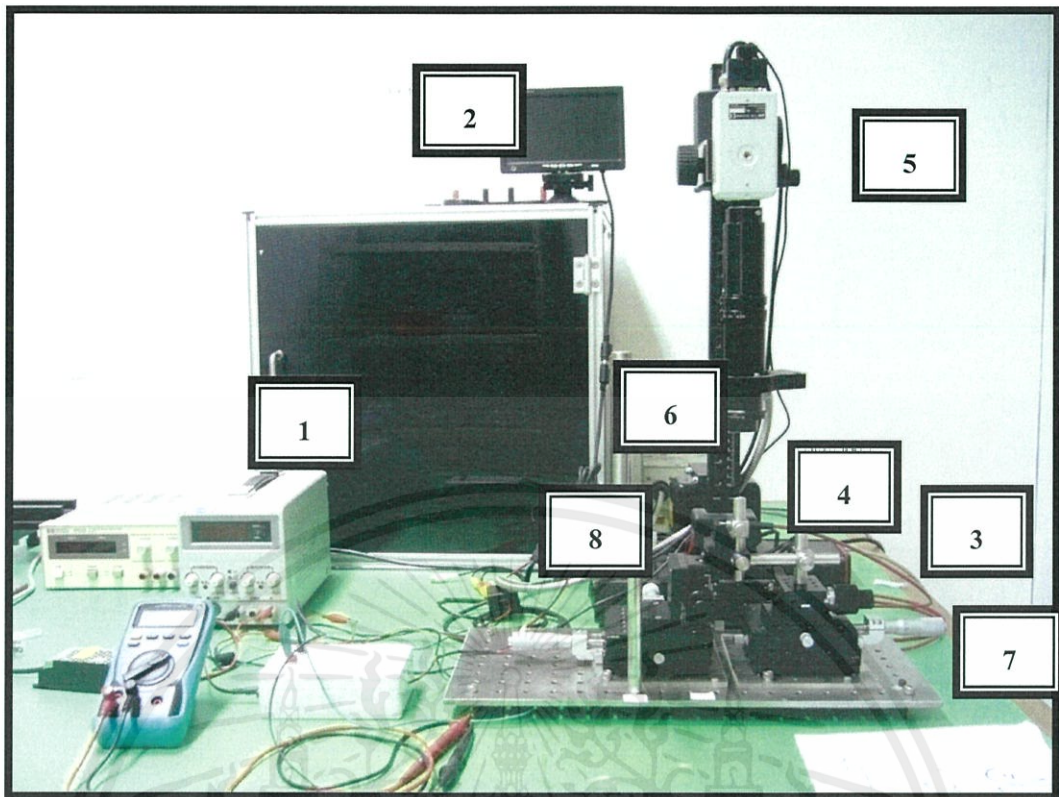
โดยในการวัดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ไมโครเลนส์ในการช่วยร่วมแสงนั้น จะทำการวาง DSSC บนฐานที่ใช้ในการเลื่อนขึ้น-ลง ดังรูปที่ 3.27 (b) แล้วทำการวางไมโครเลนส์บนแท่นอะคริลิกเช่นเดียวกันแต่ยึดติดกับแท่นเลื่อนซ้าย-ขวา เมื่อนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสงขาว ส่องลงบนไมโครเลนส์ผ่านลงไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการปรับเลื่อนขึ้น-ลงของ DSSC และพร้อมทั้งปรับเลื่อนไมโครเลนส์ไปทางซ้าย-ขวา แล้วสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ จากนั้นก็เปลี่ยนเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ DSSC พร้อมทั้งเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์สีเขียว แล้วสังเกตกระแสไฟฟ้าที่มัลติมิเตอร์

### 3.4 การทดสอบทางแสง

#### 3.4.1 การวัดความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์

ในการวัดความยาวโฟกัส (Focal length) ของไมโครเลนส์แต่ละอันที่ทำมานั้น จะมีความยาวโฟกัสที่แตกต่างกันออกไป จึงต้องทำการวัดความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์ว่ามีอยู่ที่ตำแหน่งใด เพื่อให้ทราบว่าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์สีเขียวแล้วจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้นั้นเอง ในการวัดความยาวโฟกัสจะสร้างระบบการวัดดังรูป 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

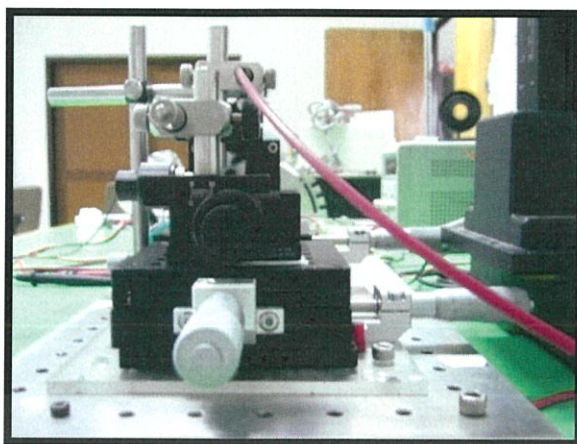


รูปที่ 3.29 แสดงภาพระบบการวัดทางแสง

#### 3.4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟ
2. หน้าจอมอนิเตอร์
3. Spectrophotometer (Avantes รุ่น 2048)
4. แท่นวางไมโครเลนส์
5. กล้องดิจิทัลไมโครสโคป (IAI รุ่น CV-S3200 )
6. แหล่งกำเนิดแสงหลอดทั้งสแตน
7. สายไฟเบอร์ 2 เส้น
8. เลเซอร์ (สีแดง) (ความยาวคลื่น 600-724 nm)

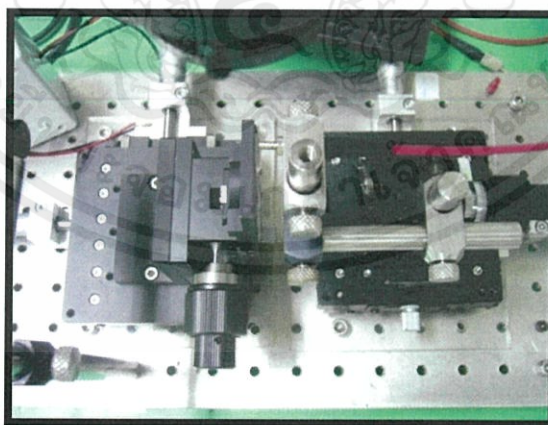
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 ภาพแทนที่วางสายไฟเบอร์



รูปที่ 3.31 แหล่งกำเนิดแสงของกล้องดิจิทัล ไมโครสโคปและเครื่อง spectrophotometer



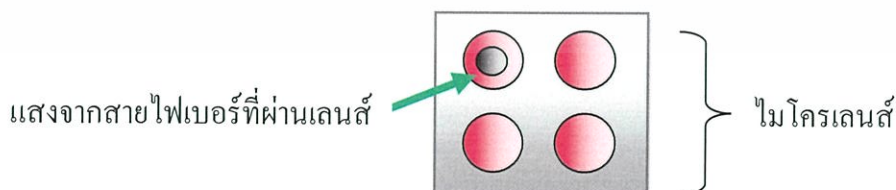
รูปที่ 3.32 แสดงระบบการวัดทางแสงร่วมกับการทำงานของกล้องในการส่องดูสายไฟเบอร์เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 สัมผัสกับผิวหนังเลนส์  
 ไม่ว่าจะฉีดยาทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คนแปลกหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แสดงภาพระยะสายไฟเบอร์ที่สัมผัสกับผิวหน้าเลนส์

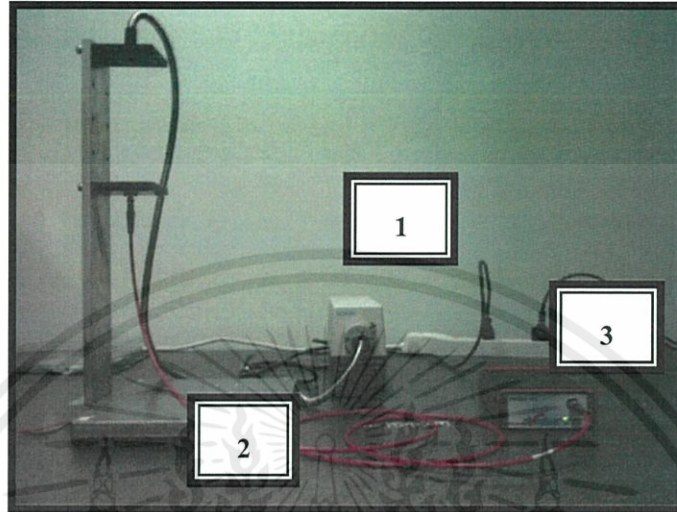
โดยในการวัดทางแสงนั้น จะนำเลนส์มายึดติดกับแท่นพร้อมทั้งนำสายไฟเบอร์สอดผ่านรูที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 3.32 ทำการวัด Dark จากเครื่อง Spectrophotometer โคนการปิดจุก แล้วทำการบันทึกข้อมูล ปรับแสงที่ออกจากสายไฟเบอร์ให้ตรงกับไมโครเลนส์ ดังรูปที่ 3.34 ให้แสงที่ผ่านจากสายไฟเบอร์ให้อยู่ตรงกลางเลนส์ จากนั้นก็ปรับความยาวโฟกัสโดยให้สายไฟเบอร์สัมผัสผิวหน้าของไมโครเลนส์พอดี ดังรูปที่ 3.33 พร้อมทั้งวัดความยาวโฟกัสที่ระยะนี้ก่อน ( $x_1$ ) แล้วทำการเลื่อนสายไฟเบอร์ออกจากไมโครเลนส์ เพื่อหาความยาวโฟกัสในระยะ  $x_2$  โดยสังเกตเส้นสเปกตรัมจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง Spectrophotometer สังเกตในขณะที่เส้นสเปกตรัมสูงสุดจะตกกลับลงมานั้นก็คือค่าระยะความยาวโฟกัส  $x_2$  นำค่าที่ได้จาก  $x_1$  และ  $x_2$  มาหาค่าความยาวโฟกัสของเลนส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 3.34 แสดงภาพแสงที่ผ่านไมโครเลนส์ สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.3 การวัดสเปกตรัมจากหลอดทั้งสแตน

เป็นการวัดสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตน โดยการนำหลอดทั้งสแตนมาทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง spectrophotometer ดังรูป



รูปที่ 3.35 แสดงภาพการทดลองการวัดสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตน



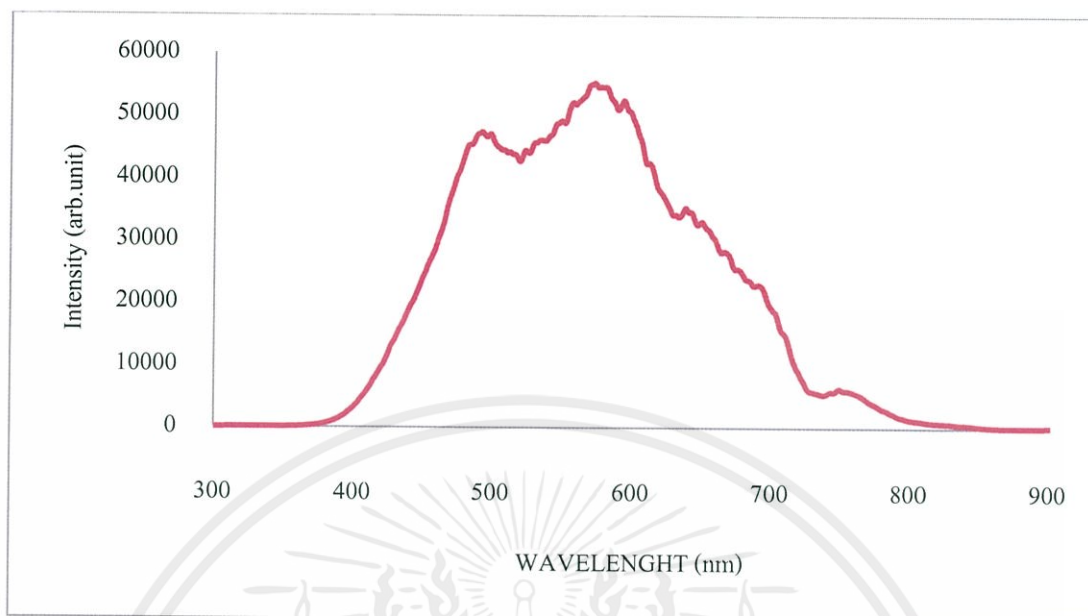
รูปที่ 3.36 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่อง spectrophotometer

### 3.4.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งกำเนิดแสงหลอดทั้งสแตน
2. สายไฟเบอร์ขนาด  $200\phi \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ 3. Spectrophotometer (Avantes รุ่น 2048) 4. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่อง Spectrophotometer

### 3.4.1.5 ลักษณะกราฟเส้นสเปกตรัมจากหลอดทั้งสแตน



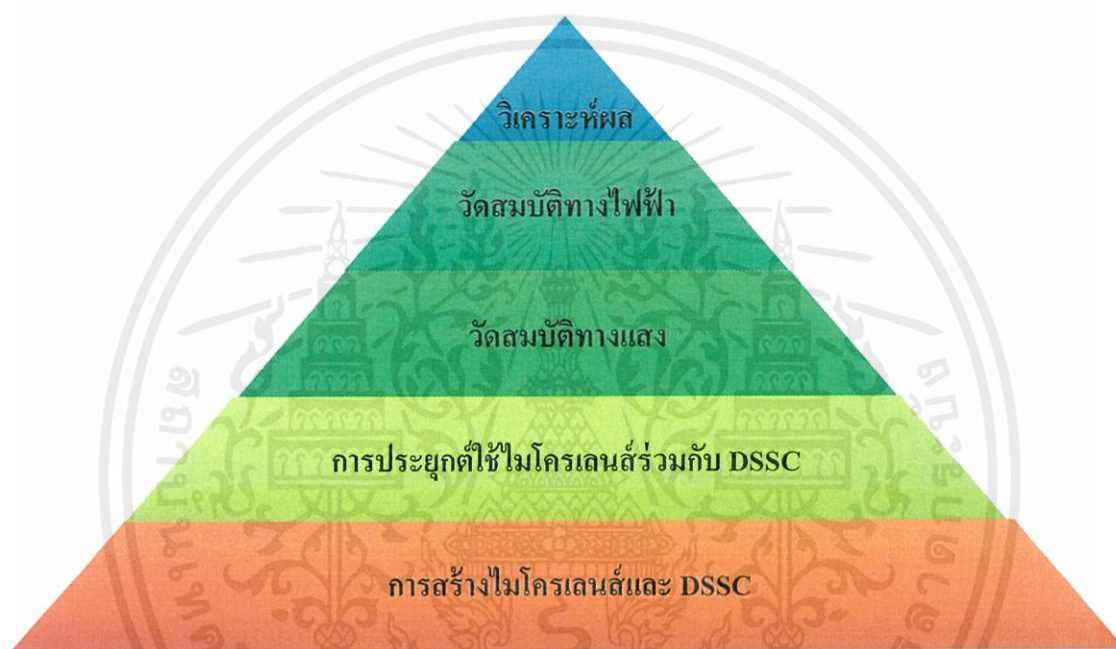
รูปที่ 3.37 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของหลอดทั้งสแตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการสร้างไมโครเลนส์ด้วยวัสดุโพลิเมอร์ และนำไมโครเลนส์ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง พร้อมทั้งวัดสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า ดังแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการทำการทดลอง

#### 4.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

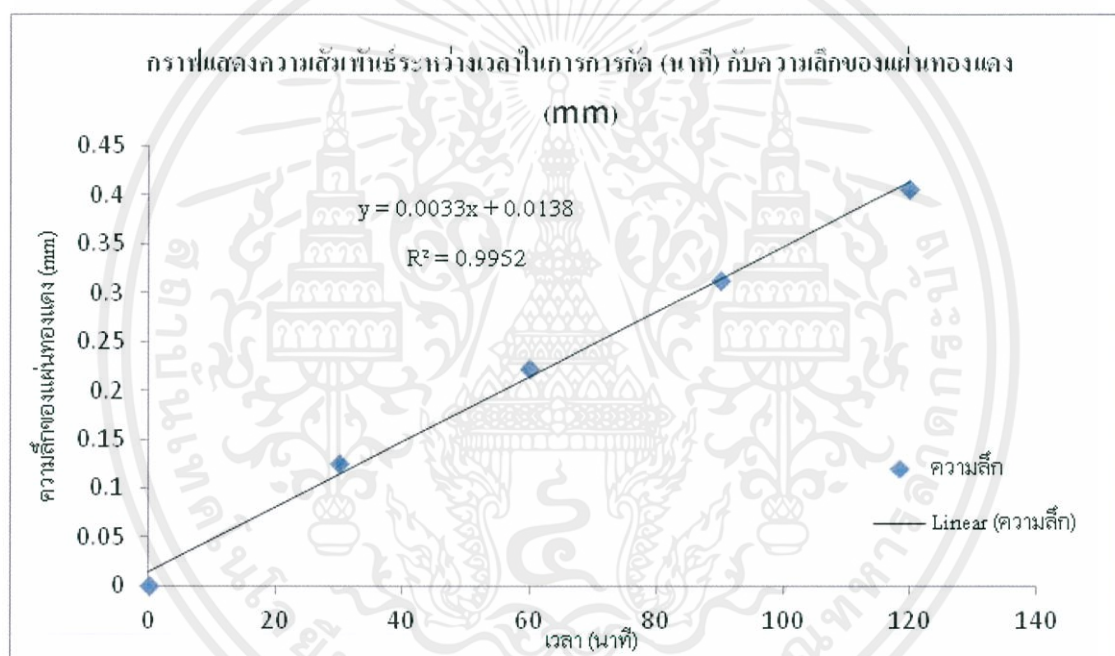
##### 4.1.1 แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นทองแดง

นำแผ่นทองแดงมาทำการกัดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการวัดความลึกของหลุมทุกๆ 30 นาที โดยที่การกัดที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 900 800 700 และ 600 nm ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 nm

เวลา (นาที)	ความหนาแผ่นทองแดง (mm)			เฉลี่ย (mm)	ความลึกหลังการกัด (mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.09	1.09	1.08	1.086	0.000
30	0.96	0.96	0.96	0.960	0.126
60	0.86	0.87	0.86	0.863	0.223
90	0.76	0.78	0.78	0.773	0.313
120	0.68	0.68	0.68	0.680	0.406

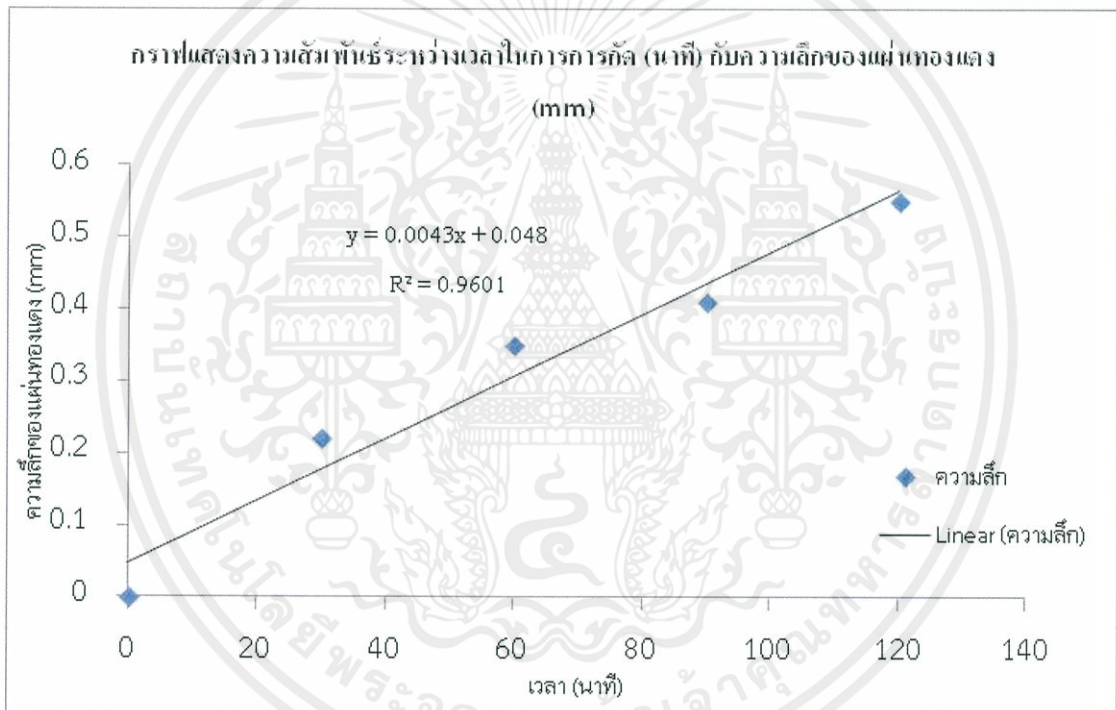


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดและความลึกของแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 nm

เวลา (นาที)	ความหนาแผ่นทองแดง (mm)			เฉลี่ย (mm)	ความลึกหลังการกัด (mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.08	1.08	1.08	1.080	0.000
30	0.86	0.86	0.86	0.860	0.220
60	0.73	0.73	0.73	0.730	0.350
90	0.67	0.67	0.67	0.670	0.410
120	0.53	0.53	0.53	0.530	0.550

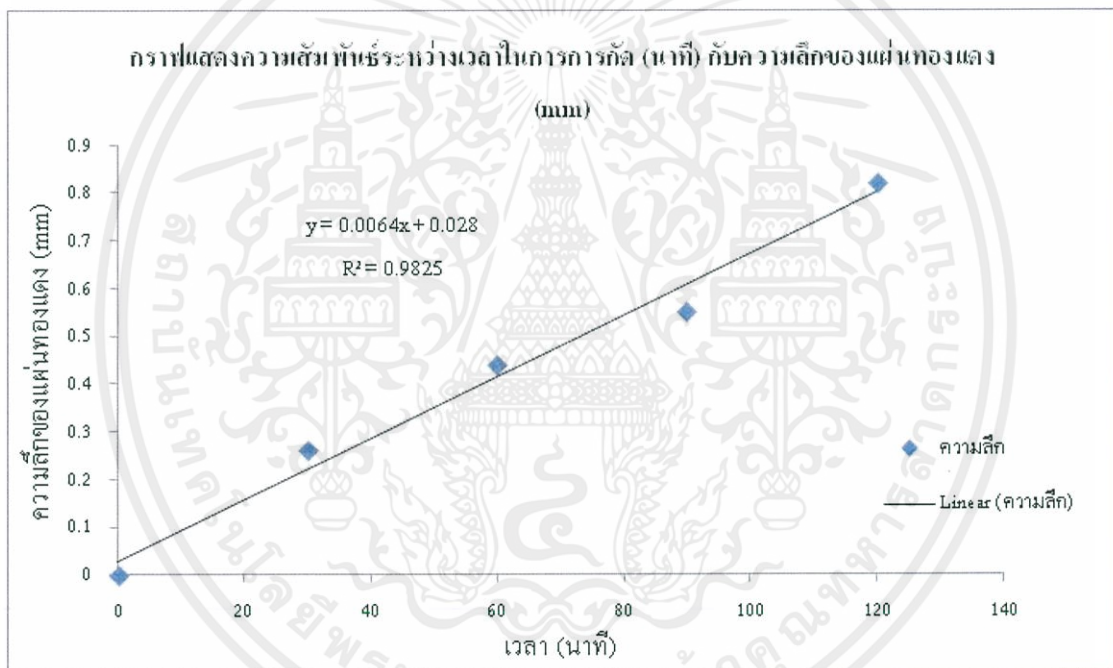


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดและความลึกของแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 nm

เวลา (นาที)	ความหนาแผ่นทองแดง (mm)			เฉลี่ย (mm)	ความลึกหลังการกัด (mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.08	1.08	1.08	1.080	0.000
30	0.82	0.82	0.82	0.820	0.260
60	0.64	0.64	0.64	0.640	0.440
90	0.53	0.53	0.53	0.530	0.550
120	0.26	0.26	0.26	0.260	0.820

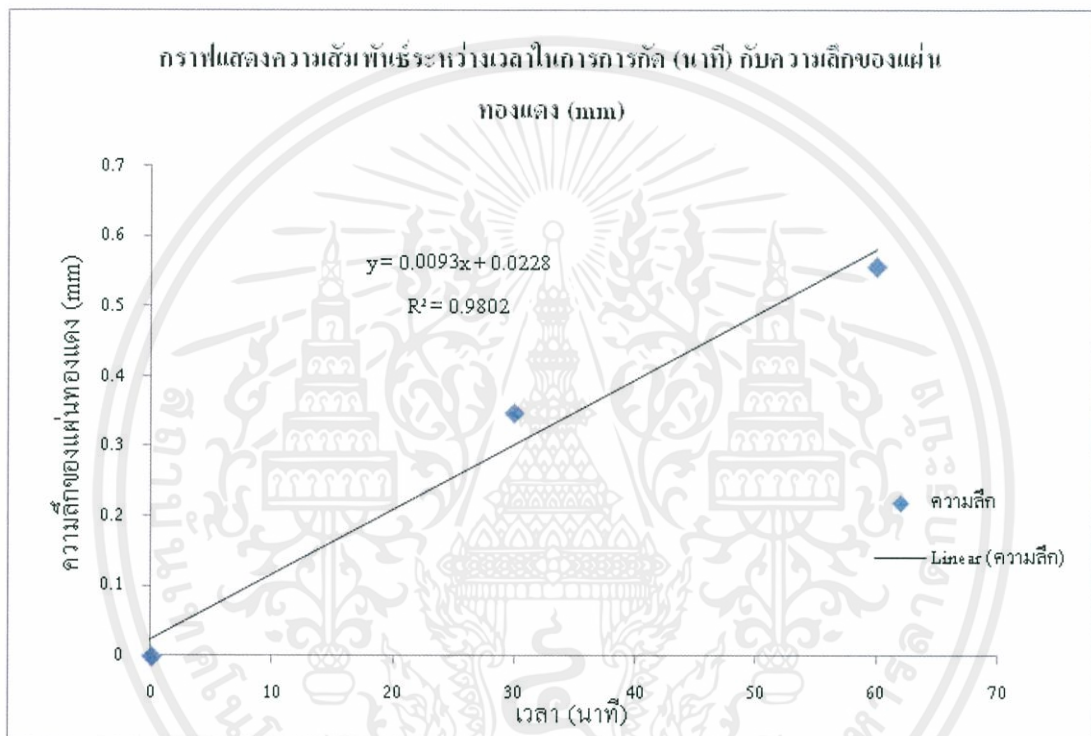


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดและความลึกของแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความลึกของหลุมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 nm

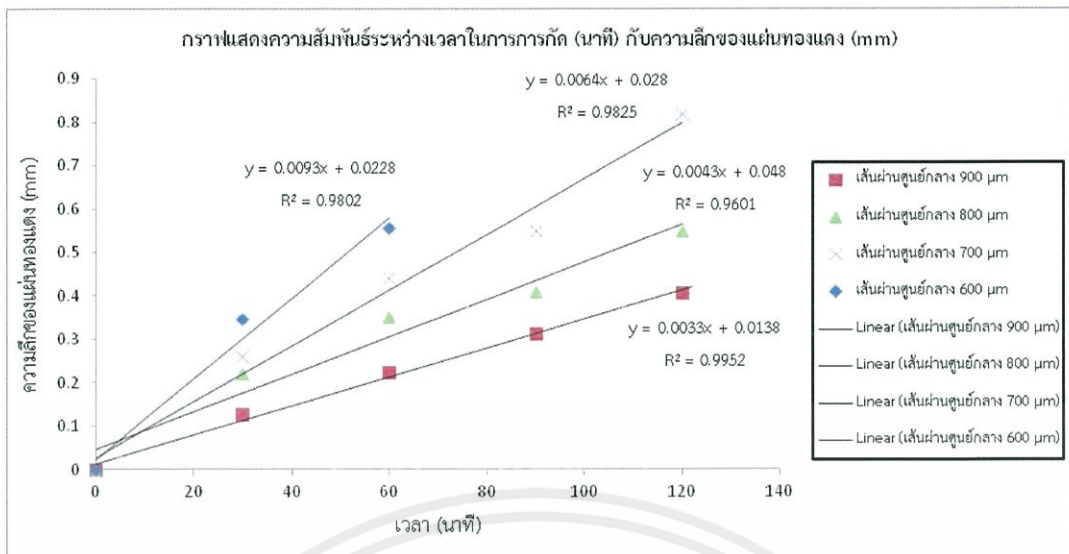
เวลา (นาที)	ความสูงแผ่นทองแดง (mm)			เฉลี่ย (mm)	ความลึกหลังการกัด (mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.08	1.08	1.08	1.080	0.000
30	0.73	0.74	0.73	0.733	0.347
60	0.53	0.52	0.52	0.523	0.557



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดและความลึกของแผ่นทองแดง

จากการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปความสูงของแผ่นทองแดงจะยิ่งลดลงเนื่องจากถูกกัดด้วยน้ำยากัดแผ่น แต่จากกราฟจะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดกับความสูงของทองแดงที่ลดลงนั้นมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี เนื่องจากน้ำยาที่ใช้กัดนั้นจะมีความเสื่อมลงตลอดการใช้งาน กล่าวคือ ในช่วงแรกของการกัดน้ำยาจะมีความมีประสิทธิภาพดีกว่าในช่วงหลัง เพราะน้ำยานั้นเสื่อมประสิทธิภาพลง

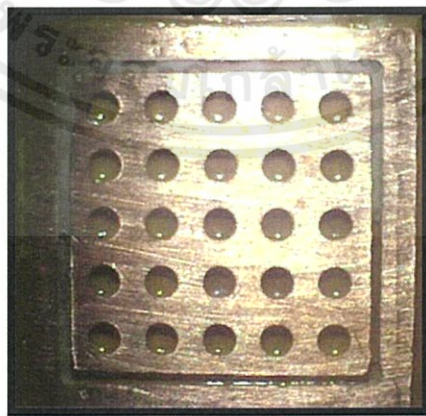
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดและความลึกของแผ่นทองแดงที่แม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปความลึกของหลุมก็จะลึกมากขึ้น โดยสังเกตจากกราฟจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ค่า  $R^2$  ของแต่ละเส้นกราฟนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 นั้นหมายความว่า ค่า  $R^2$  ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณใน โปรแกรม excel ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

ผลของแม่พิมพ์ที่ได้จากการใช้แผ่นทองแดงนำมาขึ้นลายด้วยวิธี Negative Dry Film Photoresist แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งทำการกัดด้วยน้ำยากัดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์ 900 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉีกเอาทั้งสิ้น หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีใครนำออกไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงภาพด้านบนของแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ทำจากแผ่นทองแดง

## 4.2 อัตราส่วนระหว่าง PMMA และ ไคโคลโรมีเทนที่ใช้ในการสร้างไมโครเลนส์

ในการสร้างไมโครเลนส์จะต้องมีการใช้ PMMA ทำเป็นหน้าเลนส์เพื่อลดการสะท้อนและการหักเหของแสง การสร้าง PMMA บนแม่พิมพ์ใช้วิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating) คุณสมบัติของ PMMA ที่จะนำมาสปินจึงต้องมีความหนืดมากพอ เพื่อที่เมื่อสปินแล้ว PMMA จะโค้งเป็นรูปเลนส์ อัตราส่วนที่ใช้ของ PMMA และ DCM คือ PMMA 0.55 g : DCM 1.5 ml.

## 4.3 การสร้างไมโครเลนส์

ในการสร้างไมโครเลนส์จะใช้แม่พิมพ์ที่ทำด้วยแผ่นทองแดง โดยใช้วิธี Replica Molding

### 4.3.1 การสร้างไมโครเลนส์ด้วยวิธี Replica Molding โดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นทองแดง

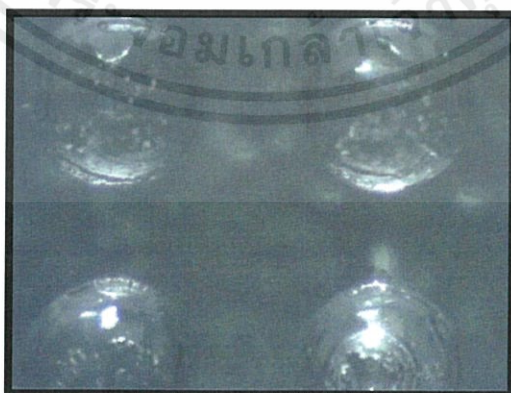
สำหรับไมโครเลนส์ที่ทำจากแม่พิมพ์แผ่นทองแดง มี 4 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 700 800 และ 900 ไมโครเมตร

#### 4.3.1.1 สร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA

สำหรับการสร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA โดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นทองแดงนั้น ความเข้มข้นของ PMMA คือ อัตราส่วน PMMA : DCM = 0.55: 1.5 ml และนำไปทำการเคลือบแม่พิมพ์ด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

#### 4.3.1.2 สร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS

เมื่อทำการสร้างหน้าเลนส์ด้วย PMMA เพื่อลดการหักเหและการสะท้อนของแสงแล้ว จะทำการสร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS เพื่อประกอบขึ้นเป็นไมโครเลนส์ขึ้นมา โดยจะแบ่งผลการทดลองตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ ซึ่งมีทั้งหมด 4 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 700 800 และ 900 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด และต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารขอขานที่ทำการนำไปใช้  
รูปที่ 4.8 ภาพด้านบนของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 900 ไมโครเมตร ที่สร้างจาก PDMS

จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX ขนาดกำลังขยายเท่า 60 เท่า

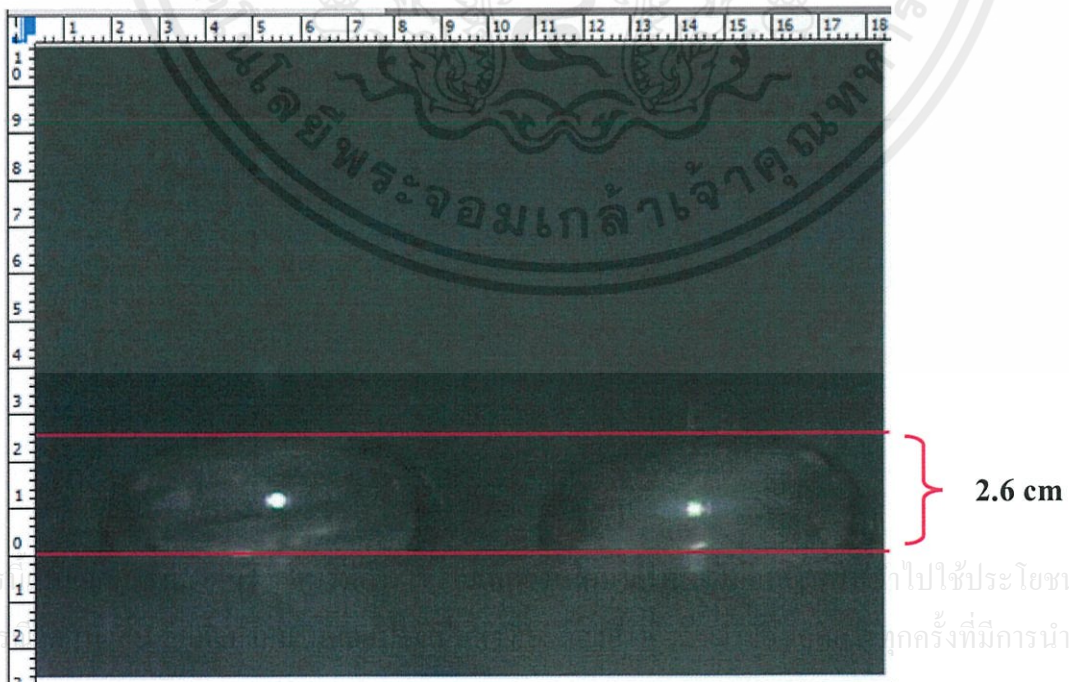


รูปที่ 4.9 ภาพด้านข้างของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX ขนาดกำลังขยาย 60 เท่า

#### 4.4 การวัดทางพารามิเตอร์ของไมโครเลนส์

4.4.1 วัดความสูงของไมโครเลนส์และความลึกของหลุมแม่พิมพ์ การวัดความสูงของไมโครเลนส์และความลึกของหลุมแม่พิมพ์สามารถหาได้จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 โดยนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์มาเทียบสเกลด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator และนำมาเทียบบัญญัติไตรยางศ์ดังนี้

1. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 nm



เอกสาร  
ไม่ว่า

ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเทียบสเกลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้กำลังขยาย 60 เท่า ได้สเกลเท่ากับ 2.6 cm ถ้ากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ  $\frac{2.6 \text{ cm}}{60} = 433 \mu\text{m}$  เพราะฉะนั้นความสูงของไมโครเลนส์ขนาด 900 ไมโครเมตร คือ 433 ไมโครเมตร

รัศมีความโค้งของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_c = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} = \frac{433^2 \mu\text{m} + \left(\frac{900 \mu\text{m}}{2}\right)^2}{2(433)} = 450.33 \mu\text{m}$$

ความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = \frac{R_c}{n - 1} = \frac{450.33 \mu\text{m}}{1.4 - 1} = 1.12 \text{ mm}$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของ PDMS มีค่าเท่ากับ 1.4 [1]

2. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 nm



การเทียบสเกลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้กำลังขยาย 60 เท่า ได้สเกลเท่ากับ 2.4 cm ถ้ากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ  $\frac{2.4 \text{ cm}}{60} = 400 \mu\text{m}$  เพราะฉะนั้นความสูงของไมโครเลนส์ขนาด 800 ไมโครเมตร คือ 400 ไมโครเมตร

รัศมีความโค้งของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_c = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} = \frac{400^2 \mu\text{m} + \left(\frac{800 \mu\text{m}}{2}\right)^2}{2(400)} = 400 \mu\text{m}$$

ความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = \frac{R_c}{n-1} = \frac{400 \mu\text{m}}{1.4-1} = 1 \text{ mm}$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของ PDMS มีค่าเท่ากับ 1.4

3. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 nm



การเทียบสเกลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้กำลังขยาย 60 เท่า ได้สเกลเท่ากับ 3.3 cm ถ้า

กำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ  $\frac{3.3 \text{ cm}}{60} = 550 \mu\text{m}$  เพราะฉะนั้น

ความสูงของไมโครเลนส์ขนาด 700 ไมโครเมตร คือ 500 ไมโครเมตร

รัศมีความโค้งของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_c = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} = \frac{550^2 \mu\text{m} + \left(\frac{700 \mu\text{m}}{2}\right)^2}{2(550)} = 386.3 \mu\text{m}$$

ความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{R_c}{n - 1} = \frac{386.3 \mu\text{m}}{1.4 - 1} = 0.965 \text{ mm}$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของ PDMS มีค่าเท่ากับ 1.4

4. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 nm



การเทียบสเกลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้กำลังขยาย 60 เท่า ได้สเกลเท่ากับ 2.2 cm ถ้ากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ  $\frac{2.2 \text{ cm}}{60} = 366 \mu\text{m}$  เพราะฉะนั้นความสูงของไมโครเลนส์ขนาด 600 ไมโครเมตร คือ 366 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีความโค้งของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_c = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} = \frac{366^2 \mu\text{m} + \left(\frac{600 \mu\text{m}}{2}\right)^2}{2(366)} = 305.95 \mu\text{m}$$

ความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์สามารถคำนวณได้จากสมการ

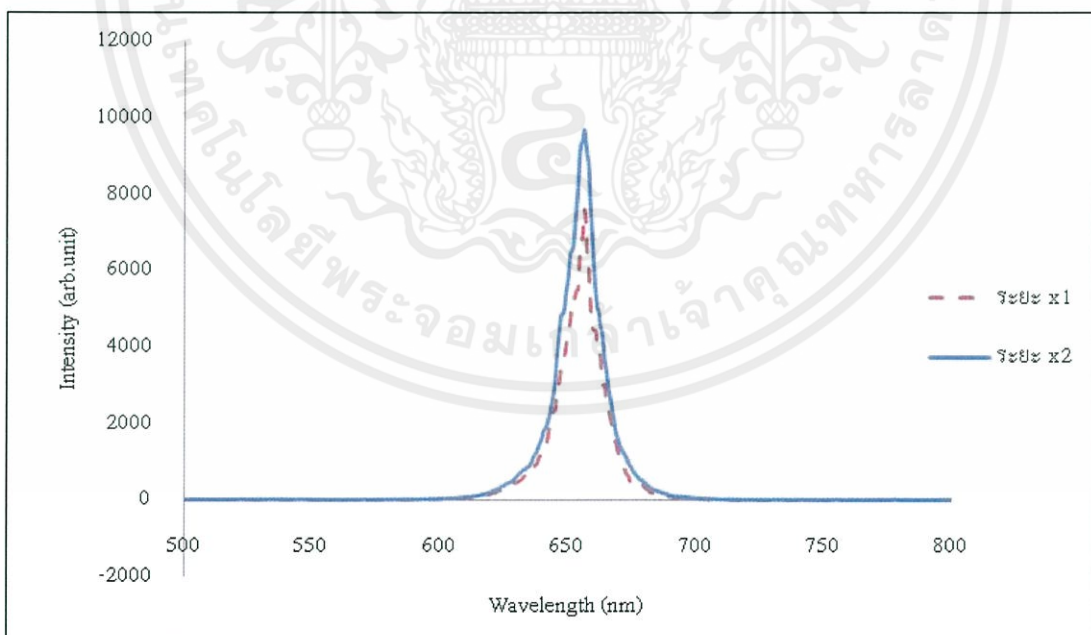
$$f = \frac{R_c}{n - 1} = \frac{305.95 \mu\text{m}}{1.4 - 1} = 0.764 \text{ mm}$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของ PDMS มีค่าเท่ากับ 1.4

#### 4.5 การวัดสมบัติทางแสง

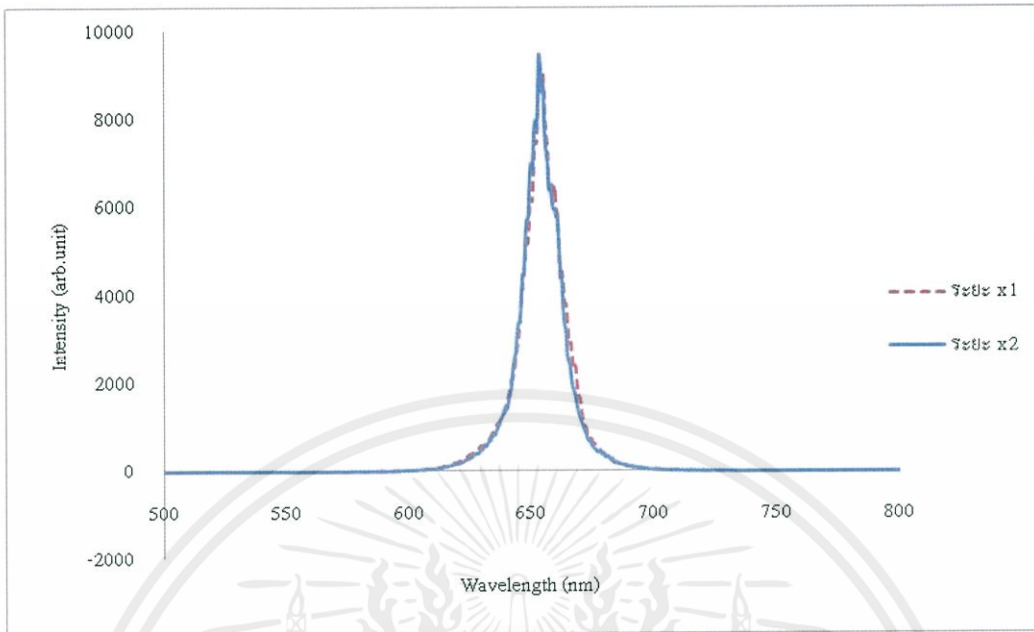
การวัดสมบัติทางแสงผู้วิจัยได้จัดทำระบบการวัดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4 จะทำการวัดความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 700 800 และ 900 ไมโครเมตร ตามลำดับที่ได้จากการทดลองเป็นดังนี้

##### 1. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 900 ไมโครเมตร



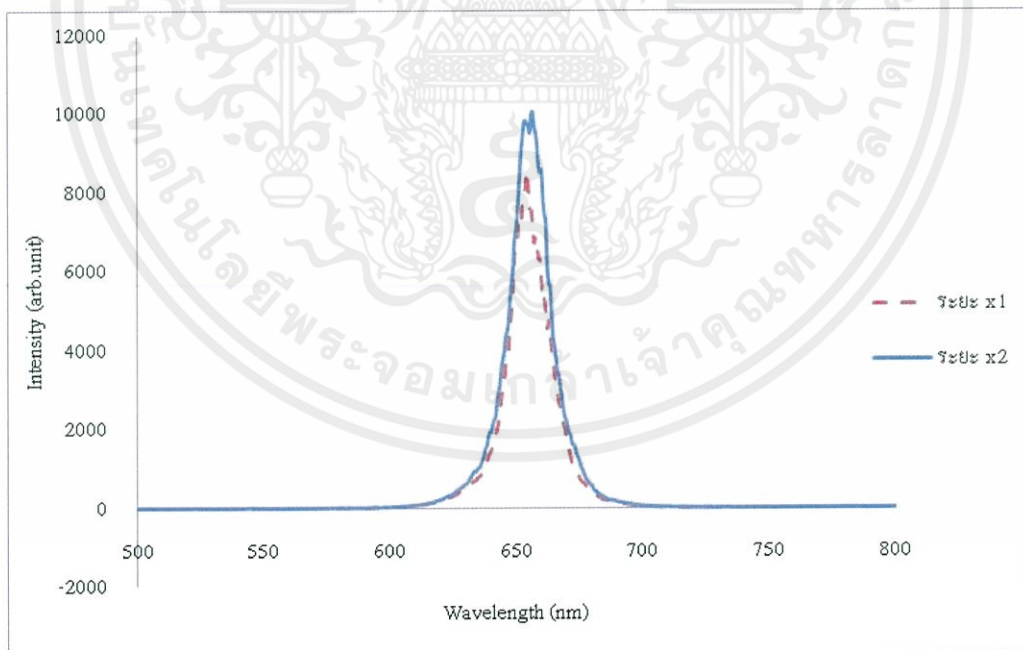
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ  $x_1$  และ  $x_2$

## 2. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 800 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ  $x_1$  และ  $x_2$

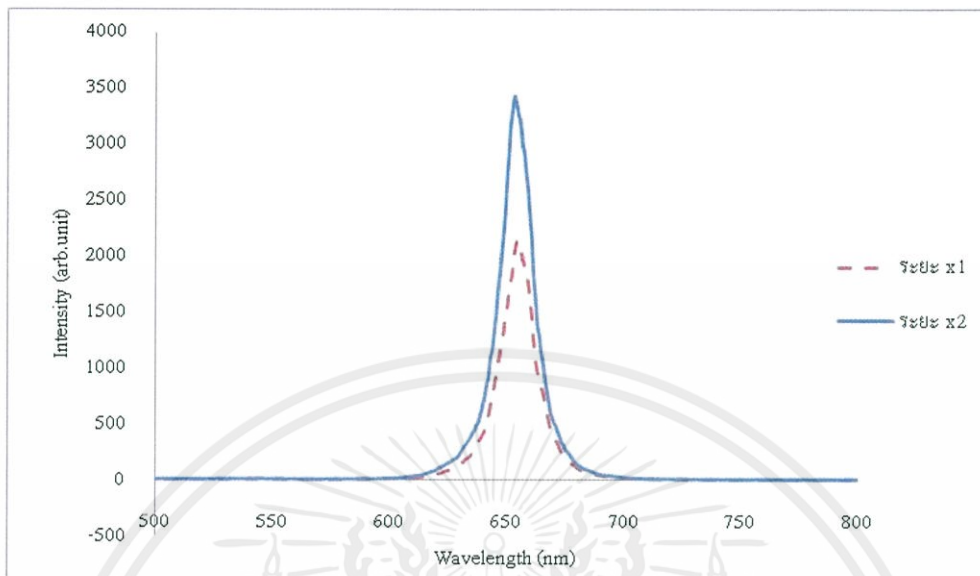
## 3. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 700 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ  $x_1$  และ  $x_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 600 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของเลเซอร์ที่ระยะ  $x_1$  และ  $x_2$

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเลื่อนสายไฟเบอร์ออกจากไมโครเลนส์จะสังเกตเห็นสเปกตรัมที่สูงสุดก่อนที่จะตกกลับมา นั่นแสดงให้เห็นว่าตรงตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นค่าของระยะ  $x_2$  ส่วนที่ระยะ  $x_1$  คือตำแหน่งที่สายไฟเบอร์สัมผัสกับผิวหน้าของไมโครเลนส์ดังรูปที่ 4.14 เมื่อนำค่าระยะ  $x_2$  ลบกับค่าระยะ  $x_1$  ก็จะได้ค่าความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์ ทำการทดลองลักษณะดังกล่าวกับไมโครเลนส์ทั้งหมด 4 ขนาด ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์ขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดระยะความยาวโฟกัสของ ไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ไมโครเลนส์ ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ $x_1$ (mm)	ระยะ $x_2$ (mm)	$f_{\text{exp}}$ (mm)	* $f_{\text{theory}}$ (mm)	$\Delta f$ %
900	10.65	11.75	1.10	1.12	1.78
800	8.50	9.44	0.94	1.00	6.00
700	8.34	9.36	1.02	0.96	6.25
600	9.04	9.85	0.81	0.76	6.57

\* ค่าความยาวโฟกัสในทางทฤษฎี ( $f_{\text{theory}}$ ) มาจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.4

ความยาวโฟกัสจากการทดลอง  $f_{\text{exp}} = x_2 - x_1$



รูปที่ 4.14 ภาพในระยะที่หัวไฟเบอร์สัมผัสกับผิวหน้าไมโครเลนส์ (ลูกศรสีแดง) ที่ได้จากกล้องดิจิทัลไมโครสโคป

#### 4.6 การวัดสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดทางไฟฟ้านั้นจะนำไมโครเลนส์ที่สร้างขึ้นในแต่ละแบบมาประยุกต์ใช้กับ DSSC และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน เพื่อทดสอบว่าเมื่อนำไมโครเลนส์มาประยุกต์ใช้โดยการเคลื่อนเลนส์เข้าและออกจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มหรือลดมากน้อยเพียงใด ในการวัดทางไฟฟ้าจะทดสอบกับแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ แสงขาวและเลเซอร์สีเขียว

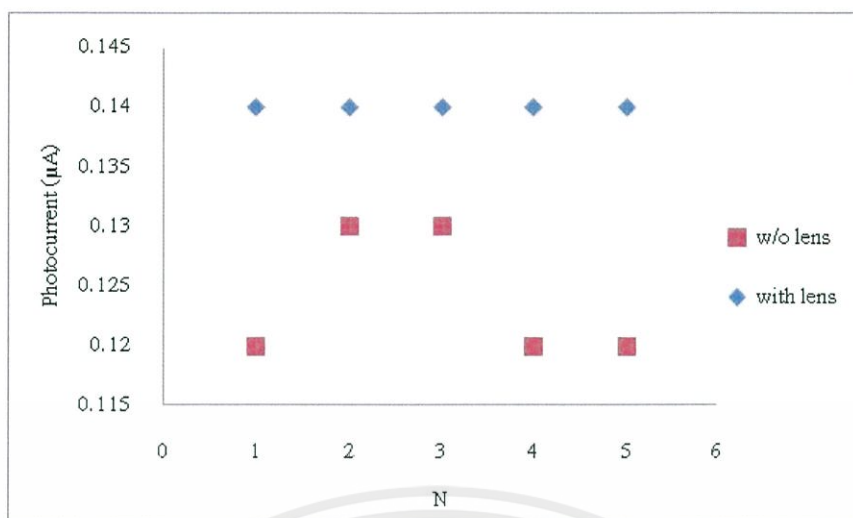
##### 4.6.1 ไมโครเลนส์กับการประยุกต์ใช้กับ DSSC

##### 4.6.1.1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ แสงขาว

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.124	0.005
with lens	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

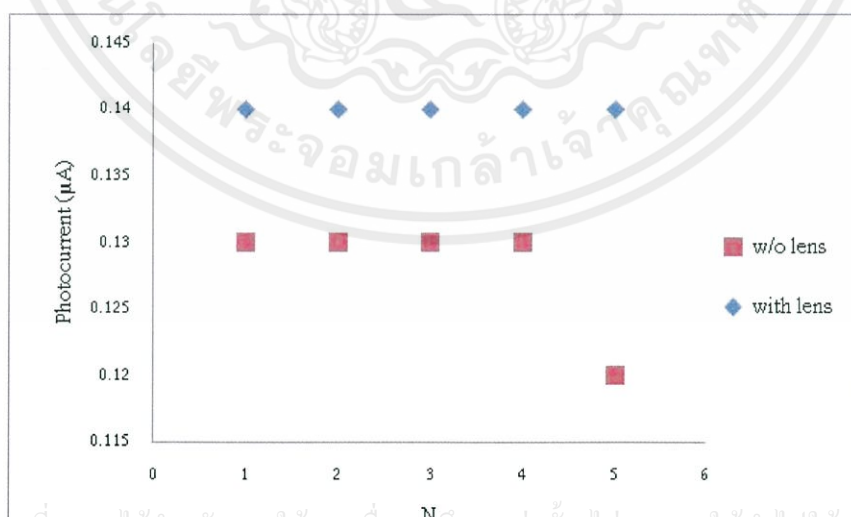


\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส (µA)					เฉลี่ย (µA)	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.128	0.004
with lens	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

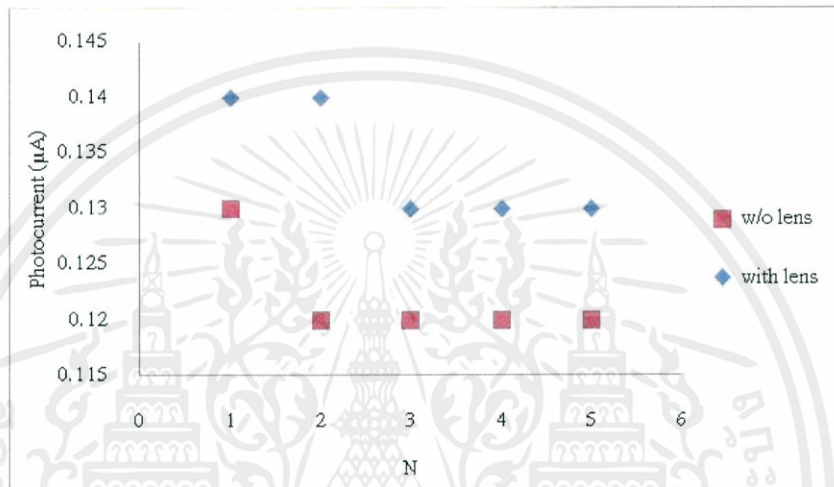
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลนี้เพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.122	0.004
with lens	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.134	0.005



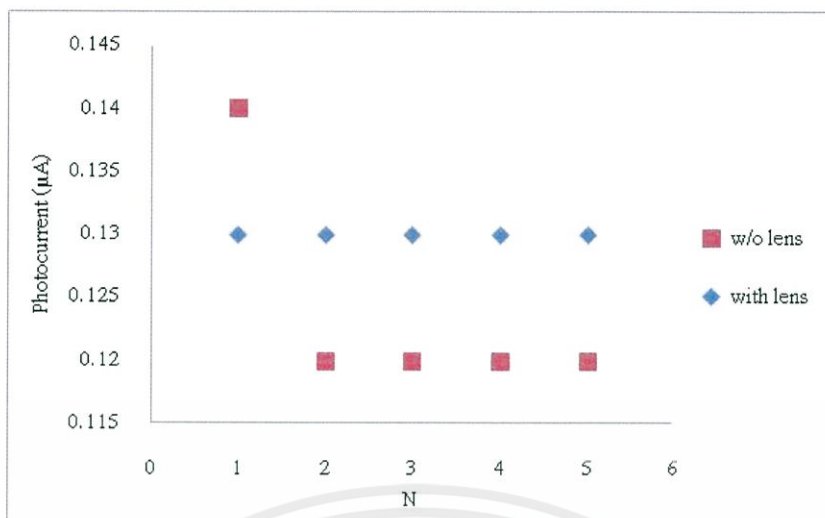
\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12	0.124	0.008
with lens	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.130	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของ DSSC

จากข้อมูลผลการทดลองและกราฟดังกล่าว พบว่าในการนำไมโครเลนส์มาประยุกต์ใช้กับ DSSC โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ 2 ชนิดนั้น การใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์สีเขียวจะมีค่ากระแสไม่คงที่ เนื่องจากเมื่อเริ่มเปิดเลเซอร์ตัวเซลล์จะเริ่มทำงานทันทีและเนื่องจากการปิดพื้นที่ของตัวเซลล์ที่อาจจะไม่ครอบคลุมพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบตัวเซลล์จึงทำให้กระแสไม่คงที่ อีกทั้งยังพบว่าการใช้ไมโครเลนส์มาปิดบนตัวเซลล์จะช่วยทำให้กระแสเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ส่วนเมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงขาวกระแสที่วัดได้ก็ยังคงไม่คงที่ในบางครั้งที่ทำการวัด ซึ่งอาจจะมีมาจากเหตุผลดังกล่าวเช่นเดียวกับแสงจากเลเซอร์

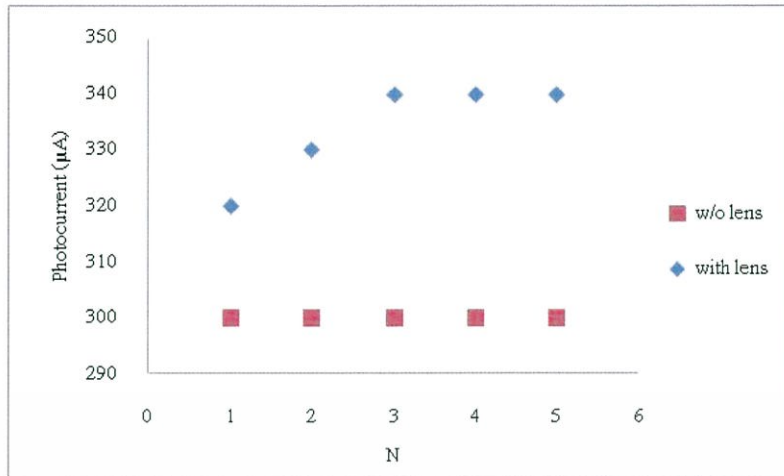
#### 4.6.2 ไมโครเลนส์ที่ประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

##### 4.6.2.1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือเลเซอร์สีเขียว

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส (µA)					เฉลี่ย (µA)	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	300	300	300	300	300	300	0
with lens	320	330	340	340	340	334	8.944

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

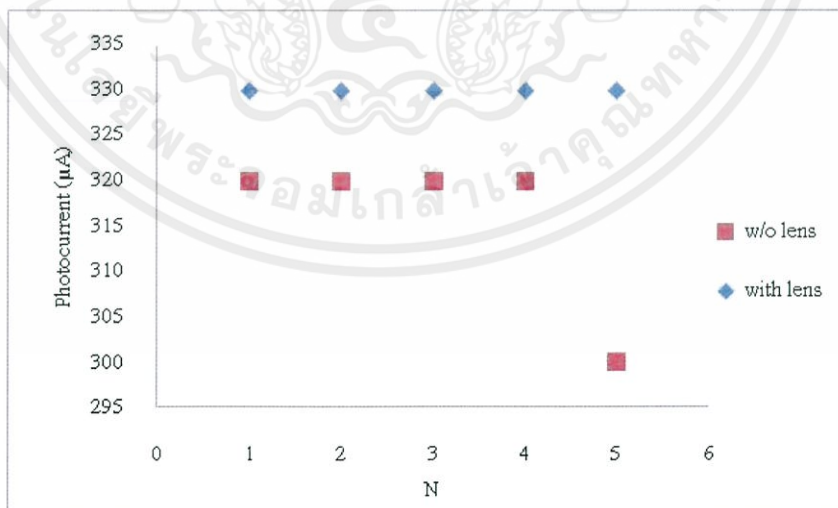


\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวัดค่ากระแสของโมโนโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส (µA)					เฉลี่ย (µA)	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	320	320	320	320	300	316	8.944
with lens	330	330	330	330	330	330	0



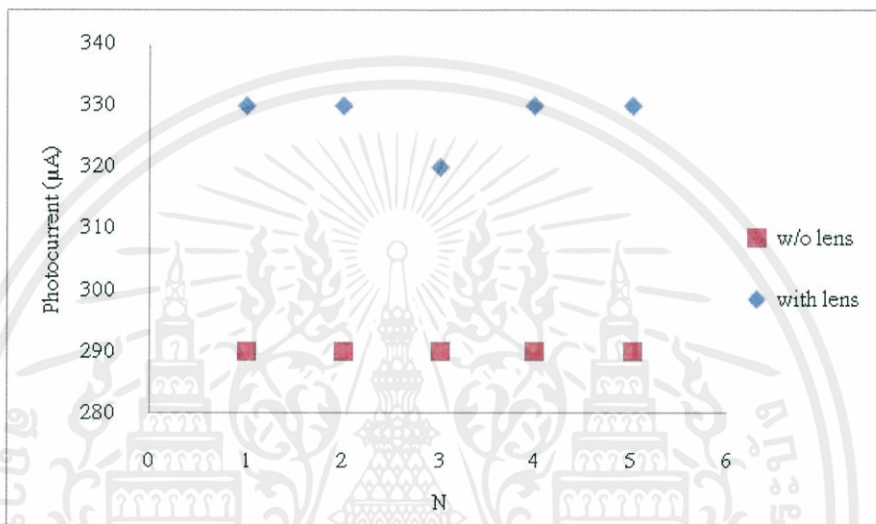
\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	290	290	290	290	290	290	0
with lens	330	330	320	330	330	328	4.472



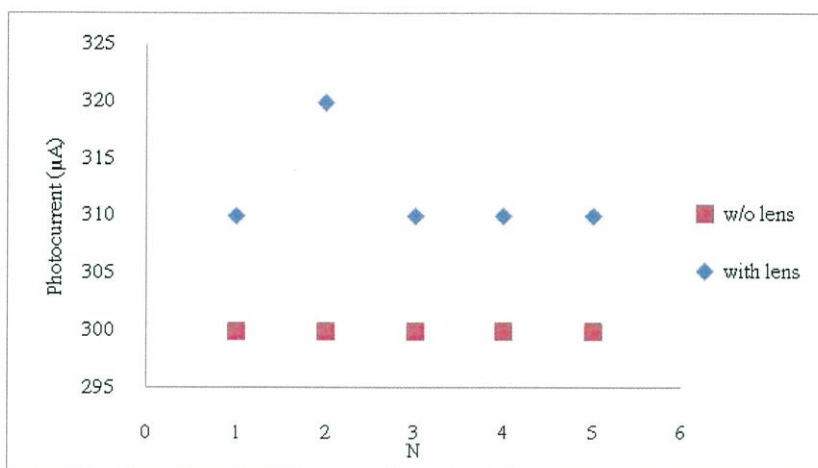
\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	300	300	300	300	300	300	0
with lens	310	320	310	310	310	312	4.472

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



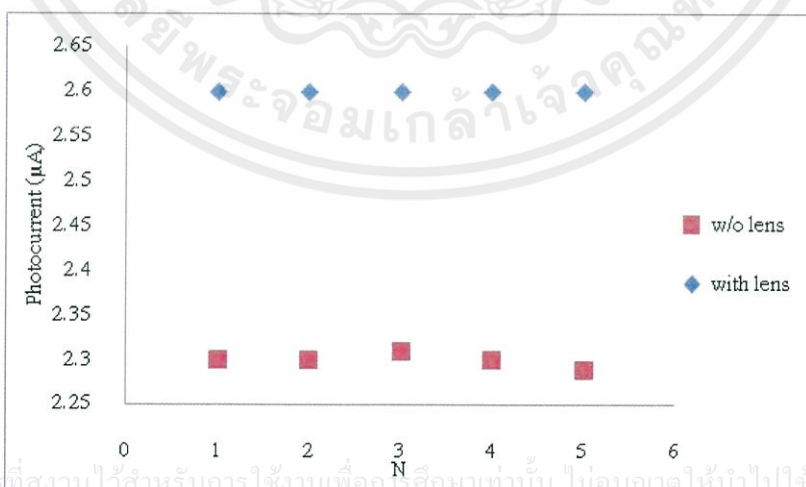
\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

#### 4.6.2.2 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ แสงขาว

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส (µA)					เฉลี่ย (µA)	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	2.30	2.30	2.31	2.30	2.29	2.30	0.007
with lens	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	0



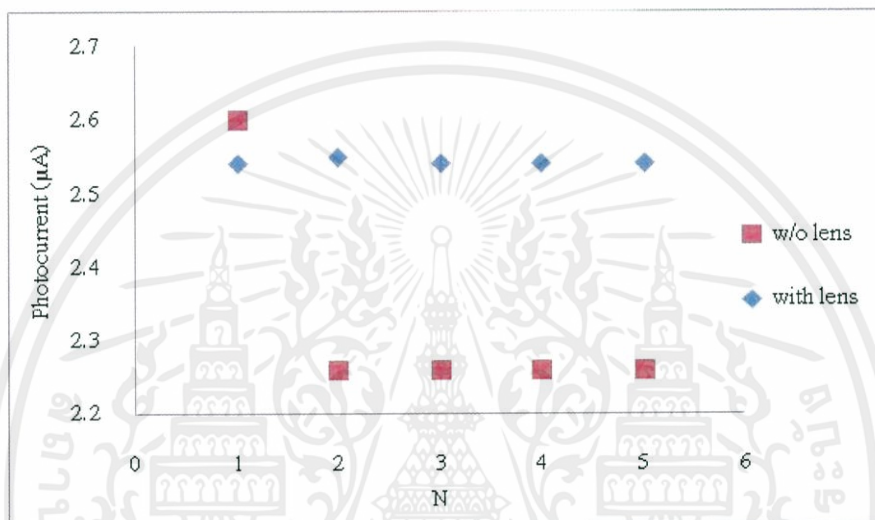
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	2.60	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	0.152
with lens	2.54	2.55	2.54	2.54	2.54	2.54	0.004



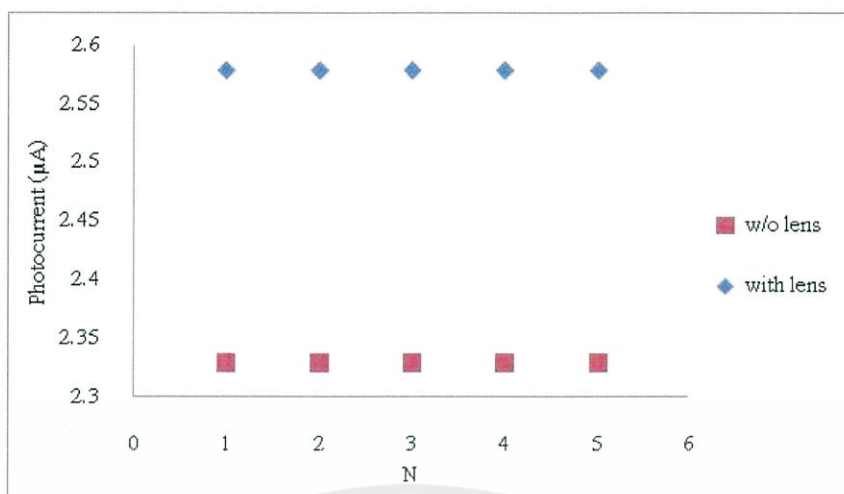
\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส ( $\mu\text{A}$ )					เฉลี่ย ( $\mu\text{A}$ )	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	0
with lens	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

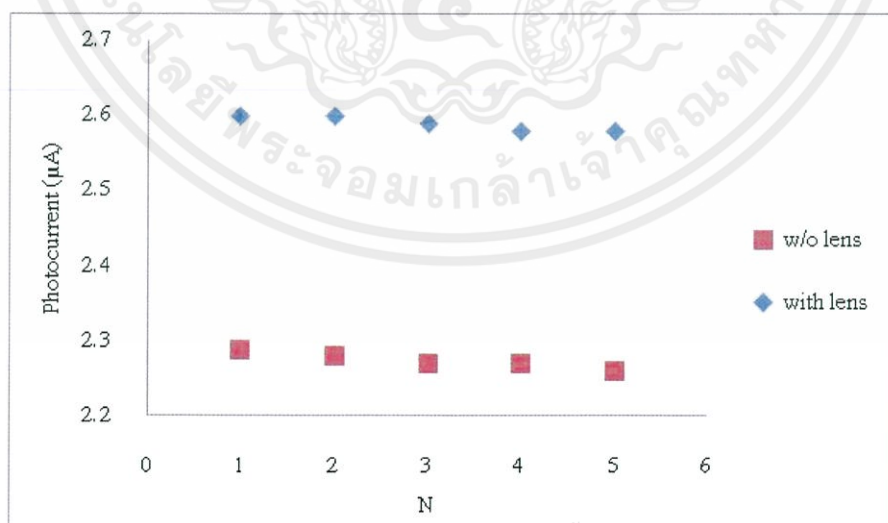


\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการวัดค่ากระแสของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร

condition/ ครั้งที่	กระแส (µA)					เฉลี่ย (µA)	S.D.
	1	2	3	4	5		
w/o lens	2.29	2.28	2.27	2.27	2.26	2.274	0.011
with lens	2.60	2.60	2.59	2.58	2.58	2.59	0.010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

\* N คือ ลำดับในการวัดซ้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยี่สิบห้า มิถุนายน ๒๕๖๕ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

จากข้อมูลผลการทดลองและกราฟดังกล่าว พบว่าเมื่อนำไมโครเลนส์มาประยุกต์ใช้กับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ 2 ชนิดนั้น เมื่อใช้แสงเลเซอร์ ค่ากระแสที่ได้จะมีค่าคงที่ โดยเมื่อไม่มีเลนส์ที่ช่วยในการรวมแสงกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตอนไม่มีเลนส์ นั้นแสดงว่าเลนส์ทำหน้าที่ในการช่วยรวมแสงให้ส่องกระทบกับตัวเซลล์มากขึ้น จึงทำให้เซลล์ผลิตกระแสได้มากขึ้น เช่นเดียวกับการใช้แสงขาวกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อมีเลนส์มาวางบน ตัวเซลล์ อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนมีความเสถียรหรือมีประสิทธิภาพดีกว่า DSSC จึงทำให้กระแสที่ได้มีค่าคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการพัฒนาไมโครเลนส์เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิดคือ DSSC และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ในการสร้างไมโครเลนส์จะทำการสร้างแม่พิมพ์จากแผ่นทองแดงด้วยวิธี replica molding โดยแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 700 800 และ 900 ไมโครเมตร ตามลำดับ เลนส์ที่ถูกจัดเตรียมขึ้นจะนำไปวัดหาความยาวโฟกัสด้วยระบบวัดทางแสงที่จัดเตรียมขึ้นและเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้ทางทฤษฎีซึ่งผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ผลดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความยาวโฟกัสของไมโครเลนส์ที่วัดได้จากการทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนความยาวโฟกัสเท่ากับ 1.78% 6.00% 6.25% และ 6.57% ตามลำดับ

ในส่วนของการประยุกต์ใช้ไมโครเลนส์ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ DSSC ได้ทดลองการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สี่ขั้วอมไวแสงโดยใช้สี่ขั้วอม N719 ซึ่งเป็นสี่ขั้วอมที่ช่วยในการดูดกลืนแสง และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ไมโครเลนส์ พบว่า ค่า  $I_{sc}$  เท่ากับ  $0.124 \mu A$  เมื่อนำไมโครเลนส์มาประยุกต์ใช้กับ DSSC พบว่า ค่ากระแสที่วัดได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีเลนส์ แสดงให้เห็นว่าไมโครเลนส์ทำหน้าที่ในการช่วยรวมแสงให้ตกกระทบลงบนตัวเซลล์มากขึ้นจึงทำให้มีกระแสเพิ่มขึ้นจากเดิม อย่างไรก็ตาม จากการทดลองสังเกตได้ว่า ค่ากระแสที่ได้ยังไม่นิ่ง แสดงถึงเสถียรภาพของ DSSC ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสงขาวและเลเซอร์สีเขียว พบว่าค่ากระแสที่ได้ทั้ง 2 กรณี ค่ากระแสในขณะที่ไม่เลนส์จะน้อยกว่าตอนที่มิเลนส์ นั้นแสดงว่า เลนส์ทำหน้าที่ในการรวมแสงให้ตกกระทบลงบนตัวเซลล์ จึงทำให้กระแสเพิ่มมากขึ้น และยังแสดงถึงไมโครเลนส์เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเซลล์ อีกทั้งยังเป็นการยืนยันได้ว่าไมโครเลนส์ที่นำมาใช้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

ดังนั้นในการทดลองยังพบปัญหาในการวัดค่ากระแสของ DSSC ซึ่งค่ากระแสในบางช่วงยังไม่คงที่ อีกทั้งเมื่อนำมาใช้กับเลเซอร์สีเขียว ค่ากระแสมีค่าไม่คงที่เช่นเดียวกัน ซึ่งในการจะประยุกต์ใช้กับ DSSC ยังคงต้องพัฒนาขั้นตอนในการสร้างตัวเซลล์ และควบคุมพื้นที่ในการจะให้แสงส่องมาตกกระทบที่ตัวเซลล์ เนื่องจากถ้าแสงส่องลงมาไม่ตรงบริเวณพื้นที่เซลล์ที่กำหนดไว้ ค่ากระแสที่วัดได้อาจจะคลาดเคลื่อนไป อีกทั้งในการพัฒนาเซลล์อาจจะต้องทำพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่

กว่านี้ เพื่อให้แสงส่องกระทบตัวเซลล์ได้ทั่วบริเวณเซลล์ ซึ่งจะทำให้การวัดค่ากระแสที่วัดได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC จะต้องทำการควบคุมพื้นที่ที่แสงส่องมากระทบกับบริเวณพื้นที่เซลล์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสที่คงที่แน่นอน
2. ในการสร้างไมโครเลนส์โดยใช้ PDMS นั้น ในขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์จะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ
3. การวัดค่ากระแสของ DSSC กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง ค่ากระแสที่วัดได้ค่าจะไม่คงที่ เนื่องจาก DSSC จะต้องควบคุมการทำเซลล์ให้มีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น
4. การออกแบบระบบการวัดสมบัติทางไฟฟ้าและแสง ต้องให้อุปกรณ์ที่ใช้มีความมั่นคง ไม่เลื่อนขณะทำการทดลอง เนื่องจากอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าที่ทำการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1. แสดงผลการวัดทางแสงของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ

การวัดทางแสง					
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไมโครเลนส์ ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ $x_1$ (mm)	ระยะ $x_2$ (mm)	$f_{\text{exp}}$ (mm)	$*f_{\text{theory}}$ (mm)	$\Delta f$ %
900	10.65	11.75	1.10	1.12	1.78
800	8.50	9.44	0.94	1.00	6.00
700	8.34	9.36	1.02	0.96	6.25
600	9.04	9.85	0.81	0.76	6.57

\* ค่าความยาวโฟกัสในทางทฤษฎี ( $f_{\text{theory}}$ ) มาจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.4

ความยาวโฟกัสจากการทดลอง  $f_{\text{exp}} = x_2 - x_1$

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดทางไฟฟ้าของไมโครเลนส์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ

การวัดทางไฟฟ้า					
ชนิดของเซลล์	แหล่งกำเนิดแสง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ไมโครเลนส์ (μm)	กระแสลัดวงจร : $I_{sc}$ (μA)		$\Delta I_{sc}$ %
			W/O lens	With lens	
DSSC	แสงขาว	900	0.124	0.140	12.90
		800	0.128	0.140	9.37
		700	0.122	0.134	9.83
		600	0.124	0.130	4.83
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ซิลิกอน	เลเซอร์ (สีเขียว)	900	300	334	11.33
		800	316	330	4.43
		700	290	328	13.10
		600	300	312	4.00
	แสงขาว	900	2.30	2.60	13.04
		800	2.26	2.54	12.38
		700	2.33	2.58	10.72
		600	2.274	2.59	13.89

## เอกสารอ้างอิง

- [1]Teng-Kai Shin, Chia-Fu Chen, Jeng-Rong Ho,Fang-Tzu Chuang. 2006. Fabrication of PDMS (polydimethylsiloxane) microlens and diffuser using replica molding. *Microelectronic Engineering*. 83 : 2499-2503.
- [2]Wikipedia . 2012. Microlens. ( cited 13 Sep 2012). Available from: URL : <http://en.wikipedia.org/wiki/Microlens>.



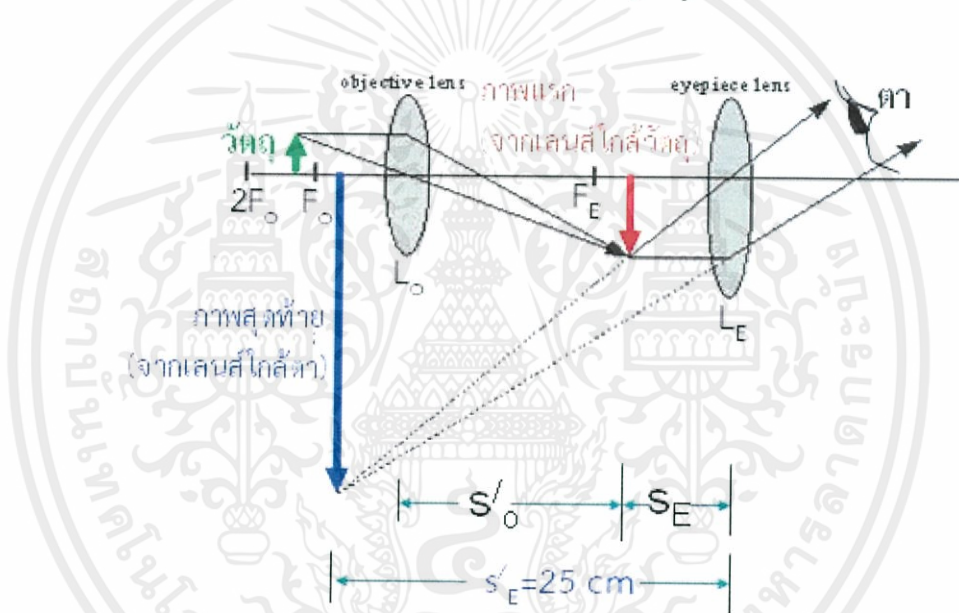
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### กล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์ (Computer microscope)

#### หลักการทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้เรามองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ประกอบด้วยเลนส์นูนความยาวโฟกัสสั้น ๆ 2 อัน โดยเลนส์อันหนึ่งอยู่ใกล้วัตถุเรียกว่าเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) และเลนส์อันหนึ่งอยู่ใกล้ตาเรียกว่าเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece Lens) โดยความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตา ( $f_0 < f_e$ )



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์

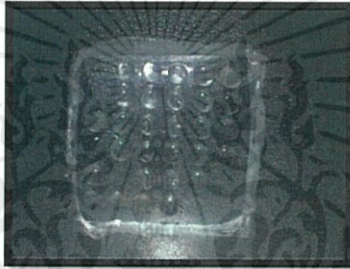
วางวัตถุไว้ในระหว่าง  $f_0 < s < 2f_0$  ของเลนส์ใกล้วัตถุ จะได้ภาพจริงขนาดขยายอยู่หน้าเลนส์ใกล้ตาโดยจะเป็นวัตถุเสมือนของเลนส์ใกล้ตา โดยวัตถุเสมือนนี้ จะต้องอยู่ระหว่างความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุกับเลนส์ ( $s < f_e$ ) เกิดภาพเสมือนขนาดขยายที่ระยะที่เห็นชัดปกติของตา คือประมาณ 25 เซนติเมตร โดยในทาง ปฏิบัติวิธีทำให้เห็นภาพชัดเรียกว่าการโฟกัสภาพทำได้โดยเลื่อนเลนส์ใกล้ตาเพื่อปรับระยะวัตถุให้เหมาะสมที่จะเกิดภาพที่ระยะเห็นได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Digital Blue QX5 Computer Microscope

กล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถต่อใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยใช้สาย USB อาศัยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป แต่มีกำลังขยายในการตรวจวัดวัตถุขนาด 10X 60X และ 200X ตามลำดับ ซึ่งสามารถตรวจวัดวัตถุขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมโครได้

กล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์ นอกจากมีกำลังขยายในการส่องวัตถุแล้วยังให้ความละเอียดของภาพสูงถึง 640 X 480 ลักษณะของกล้องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องมายังวัตถุ ส่องทิศทางคือ แหล่งกำเนิดแสงเหนือวัตถุและแหล่งกำเนิดใต้วัตถุซึ่งจะได้ภาพแตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์กำลังขยาย 10X



รูปที่ 3 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์กำลังขยาย 60X

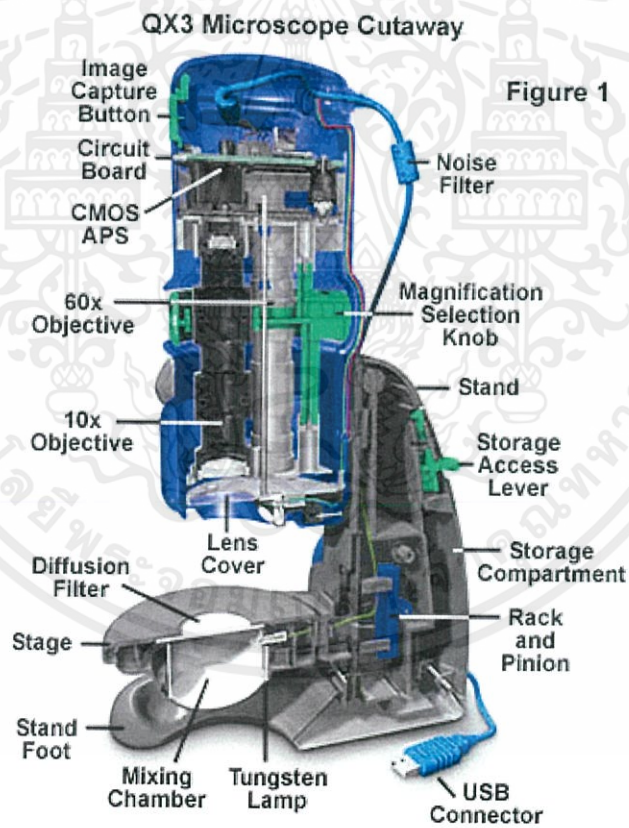


รูปที่ 4 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์กำลังขยาย 200X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์ Digital Blue QX5



รูปที่ 6 แสดงภาพส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์คอมพิวเตอร์ Digital Blue QX5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

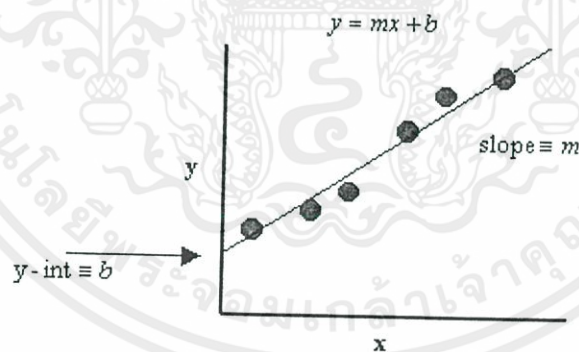
## Linear Regression and Excel

(See our Tutorial Page for more information about linear regression methods. You may also wish to take a look at how we analyzed actual experimental data using linear regression techniques.

Sample data

x	y
1.0	2.6
2.3	2.8
3.1	3.1
4.8	4.7
5.6	5.1
6.3	5.3

Say we have a set of data,  $(x_i, y_i)$ , shown at the left. If we have reason to believe that there exists a **linear relationship** between the variables  $x$  and  $y$ , we can plot the data and draw a "best-fit" *straight line* through the data. Of course, this relationship is governed by the familiar equation  $y = mx + b$ . We can then find the **slope,  $m$** , and **y-intercept,  $b$** , for the data, which are shown in the figure below.



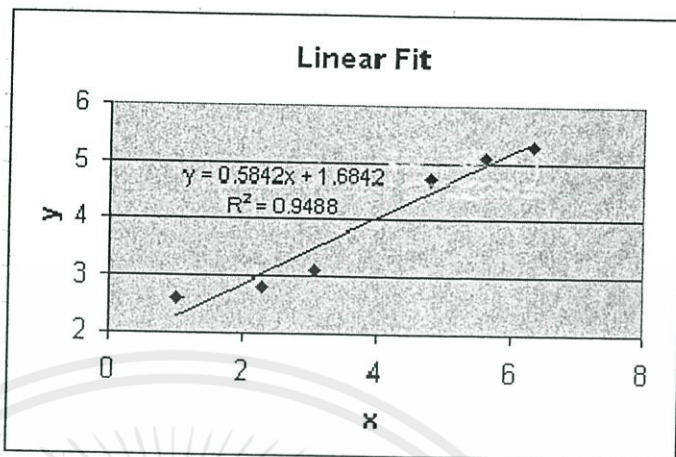
Let's enter the above data into an Excel spreadsheet, plot the data, create a trendline and display its slope, y-intercept and R-squared value. Recall that the R-squared value is the square of the correlation coefficient. (Most statistical texts show the correlation coefficient as " $r$ ", but Excel shows the coefficient as " $R$ ". Whether you write it as  $r$  or  $R$ , the correlation coefficient gives us a measure of the reliability of the linear relationship between

the  $x$  and  $y$  values. (Values close to 1 indicate excellent linear reliability.))

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Enter your data as we did in columns B and C. The reason for this is strictly cosmetic as you will soon see.

	A	B	C
1			
2		x	y
3		1.0	2.6
4		2.3	2.8
5		3.1	3.1
6		4.8	4.7
7		5.6	5.1
8		6.3	5.3



### Linear regression equations.

If we expect a set of data to have a linear correlation, **it is not necessary for us to plot the data** in order to determine the constants  $m$  (slope) and  $b$  (y-intercept) of the equation  $y = mx + b$ . Instead, we can apply a statistical treatment known as **linear regression** to the data and determine these constants.

Given a set of data  $(x_i, y_i)$  with  $n$  data points, the slope, y-intercept and correlation coefficient,  $r$ , can be determined using the following:

$$m = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}$$

$$r = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum (x^2) - (\sum x)^2][n \sum (y^2) - (\sum y)^2]}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (Note that the limits of the summation, which are  $i$  to  $n$ , and the summation indices  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 on  $x$  and  $y$  have been omitted.)

Implicitly applying regression to the sample data.

It may appear that the above equations are quite complicated, however upon inspection, we see that their components are nothing more than simple algebraic manipulations of the raw data. We can expand our spread sheet to include these components.

1. First, add three columns that will be used to determine the quantities  $\bar{xy}$ ,  $\bar{x^2}$  and  $\bar{y^2}$ , for each data point.
2. Next, use Excel to evaluate the following:  $Sx$ ,  $Sy$ ,  $S(xy)$ ,  $S(x^2)$ ,  $S(y^2)$ ,  $(Sx)^2$ ,  $(Sy)^2$ . Recall that the symbol, S, means "summation". Additionally, the term  $xy$  is the product of  $x$  and  $y$ , that is:  $x * y$ . Also, the term  $S(x^2)$  is very different than the term  $(Sx)^2$ . Be careful with your order of operations!
3. Now use Excel to count the number of data points,  $n$ . (To do this, use the Excel COUNT() function. The syntax for COUNT() in this example is: =COUNT(B3:B8) and is shown in the formula bar in the screen shot below.
4. Finally, use the above components and the linear regression equations given in the previous section to calculate the **slope (m)**, **y-intercept (b)** and **correlation coefficient (r)** of the data. If you are careful, your spread sheet should look like ours. Note that our equations for the slope, y-intercept and correlation coefficient are highlighted in yellow.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A11		=COUNT(B3:B8)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		x	y	xy	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>				
3		1.0	2.6	2.6	1.0	6.8				
4		2.3	2.8	6.44	5.3	7.8				
5		3.1	3.1	9.61	9.6	9.6				
6		4.8	4.7	22.56	23.0	22.09				
7		5.6	5.1	28.56	31.4	26.0				
8		6.3	5.3	33.39	39.7	28.1				
9										
10	n	Σ x	Σ y	Σ (xy)	Σ (x <sup>2</sup> )	Σ (y <sup>2</sup> )				
11	6	23.1	23.6	103.16	110.0	100.4				
12										
13		(Σ x) <sup>2</sup>	(Σ y) <sup>2</sup>							
14		533.61	556.96							
15										
16	slope, m =	0.5842		=(A11*D11-B11*C11)/(A11*E11-B14)						
17	y-int, b =	1.6842		=(C11-C16*B11)/A11						
18	r =	0.9741		=(A11*D11-B11*C11)/SQRT((A11*E11-B14)*(A11*F11-C14))						

### Linear regression with built-in functions.

It is plain to see that the slope and y-intercept values that were calculated using linear regression techniques are identical to the values of the more familiar trendline from the graph in the first section; namely  $m = 0.5842$  and  $b = 1.6842$ . In addition, Excel can be used to display the R-squared value. Again,  $R^2 = r^2$ . From the graph, we see that  $R^2 = 0.9488$ . From our linear regression analysis, we find that  $r = 0.9741$ , therefore  $r^2 = 0.9488$ , which agrees with the graph.

You should now see that the Excel graphing routine uses linear regression to calculate the slope, y-intercept and correlation coefficient.

Excel has three built-in functions that allow for a third method for determining the slope, y-intercept, correlation coefficient, and R-squared values of a set of data. The functions are SLOPE(), INTERCEPT(), CORREL() and RSQ(), and are also covered in the statistics section of this tutorial.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The syntax for each are as follows:

- Slope, m: **=SLOPE(known\_y's, known\_x's)**
- y-intercept, b: **=INTERCEPT(known\_y's, known\_x's)**
- Correlation Coefficient, r: **=CORREL(known\_y's, known\_x's)**
- R-squared,  $r^2$ : **=RSQ(known\_y's, known\_x's)**

Here is how we would analyze our data using these built-in Excel functions. Again, the equations for each calculation are highlighted in yellow.

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>x</b>	<b>y</b>		Slope, m, =	0.5842
3		1.0	2.6			=SLOPE(C3:C8,B3:B8)
4		2.3	2.8			
5		3.1	3.1		y-intercept, b, =	1.6842
6		4.8	4.7			=INTERCEPT(C3:C8,B3:B8)
7		5.6	5.1			
8		6.3	5.3		Correlation, r, =	0.9741
9						=CORREL(C3:C8,B3:B8)

So, to reiterate, we can determine the slope, y-intercept and correlation coefficient of any set of data using three Excel methods:

1. Plot the data and add a trendline
2. Implicitly use linear regression techniques
3. Use Excel's built in functions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

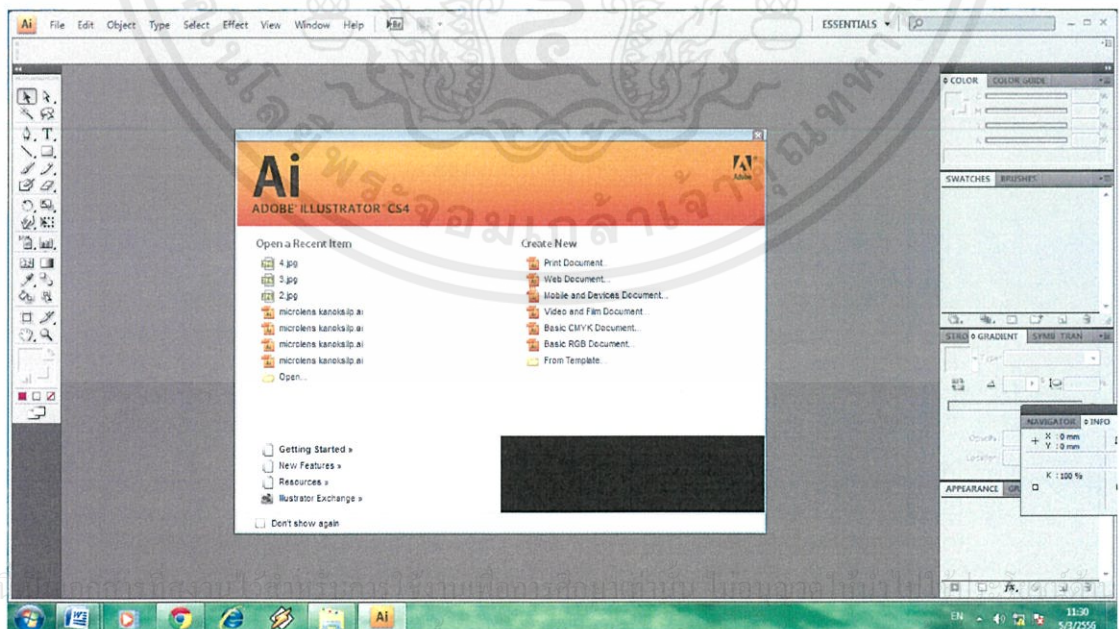
## ภาคผนวก ข.

### วิธีการใช้โปรแกรม Adobe Illustrator

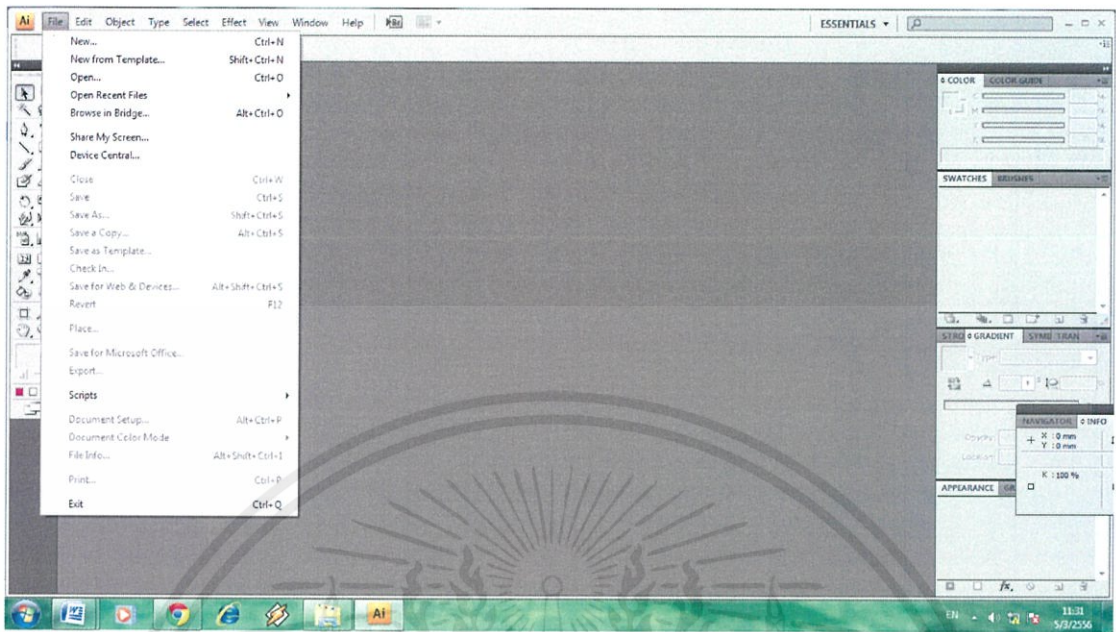
#### 1. เปิดโปรแกรม Adobe Illustrator



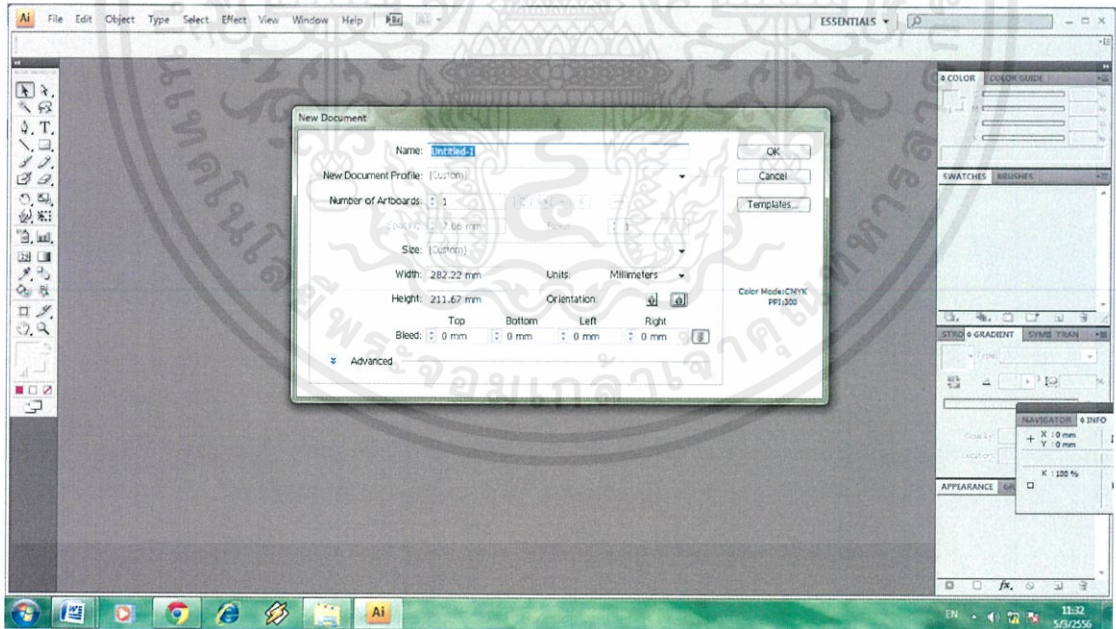
#### 2. จะเห็นภาพของหน้าจอโปรแกรม Adobe Illustrator



3. ให้ทำการคลิกเครื่องหมายกากบาท เพื่อเปิดไฟล์ใหม่ โดยคลิกที่ file > new

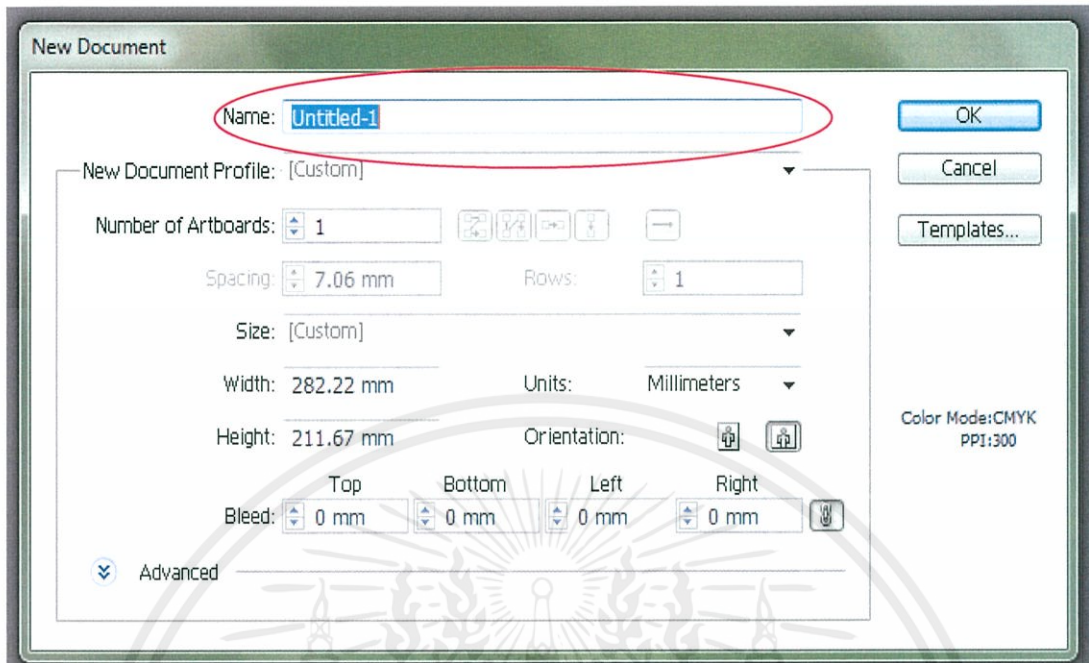


4. จะปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมา ดังรูป

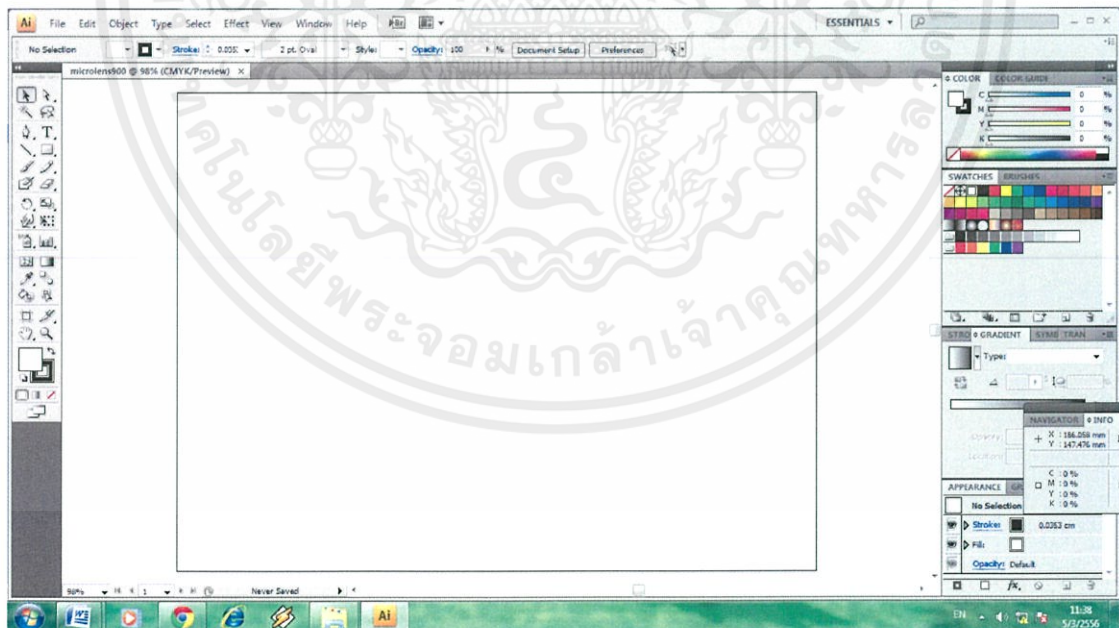


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉิวใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการตั้งชื่อไฟล์ที่ต้องการเก็บงาน รวมทั้งกำหนดขนาดและสเกลของหน้ากระดาษ

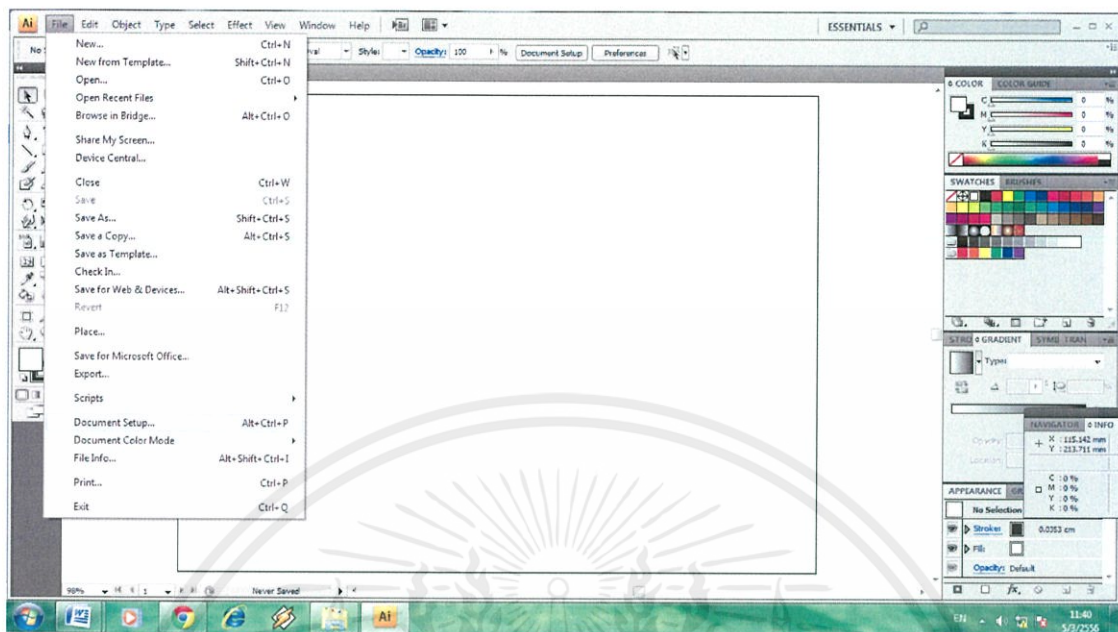


6. เมื่อทำการตั้งชื่อไฟล์แล้ว จะปรากฏหน้าจอดังรูป

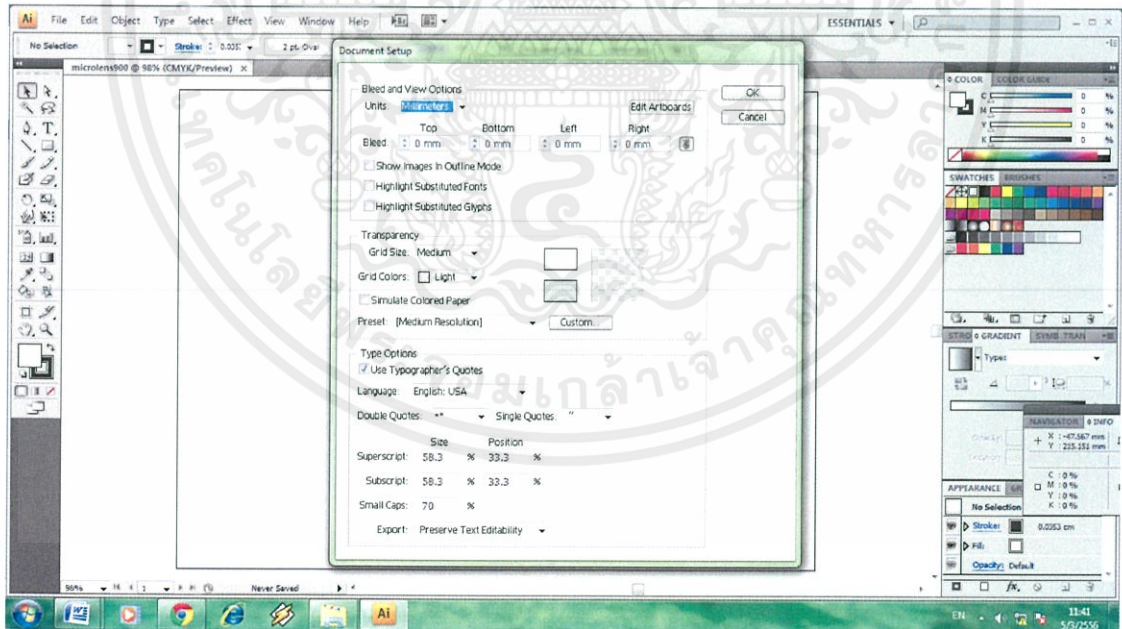


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. จากนั้นคลิกที่คำว่า File > Document setup

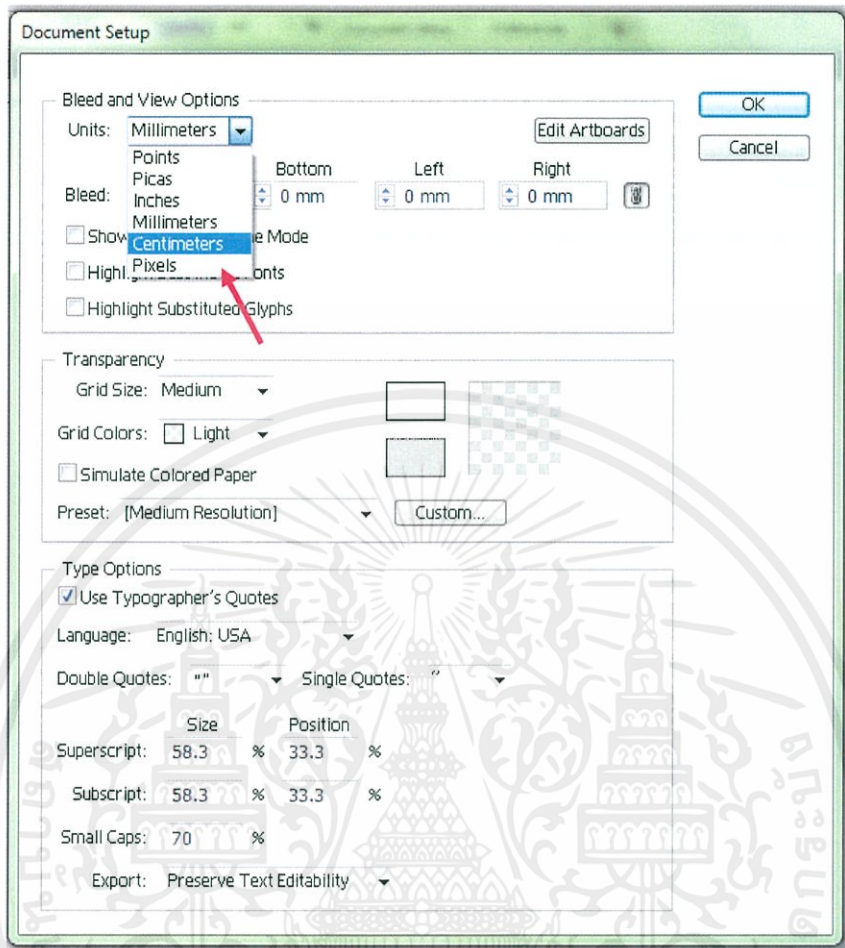


## 8. จะปรากฏหน้าจอให้เรากรอกค่าต่างๆ

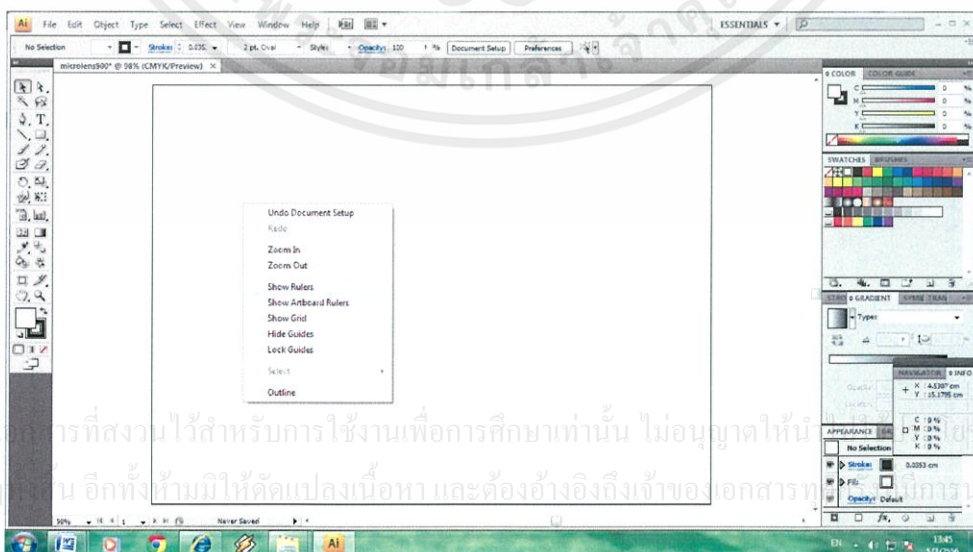


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. คลิกที่คำว่า Unit > centimeters > OK (ตามลูกศรสีแดง) ดังภาพ

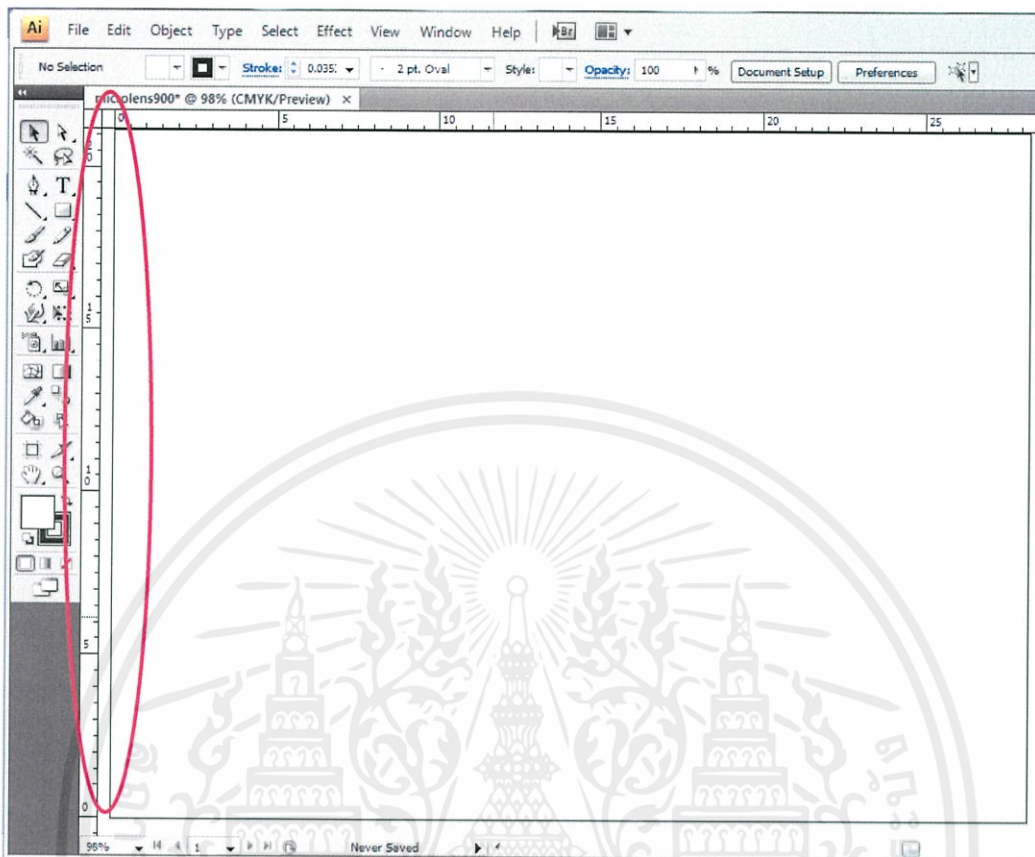


10. คลิกขวาในหน้ากระดาษ จะปรากฏแถบเมนู ดังภาพ

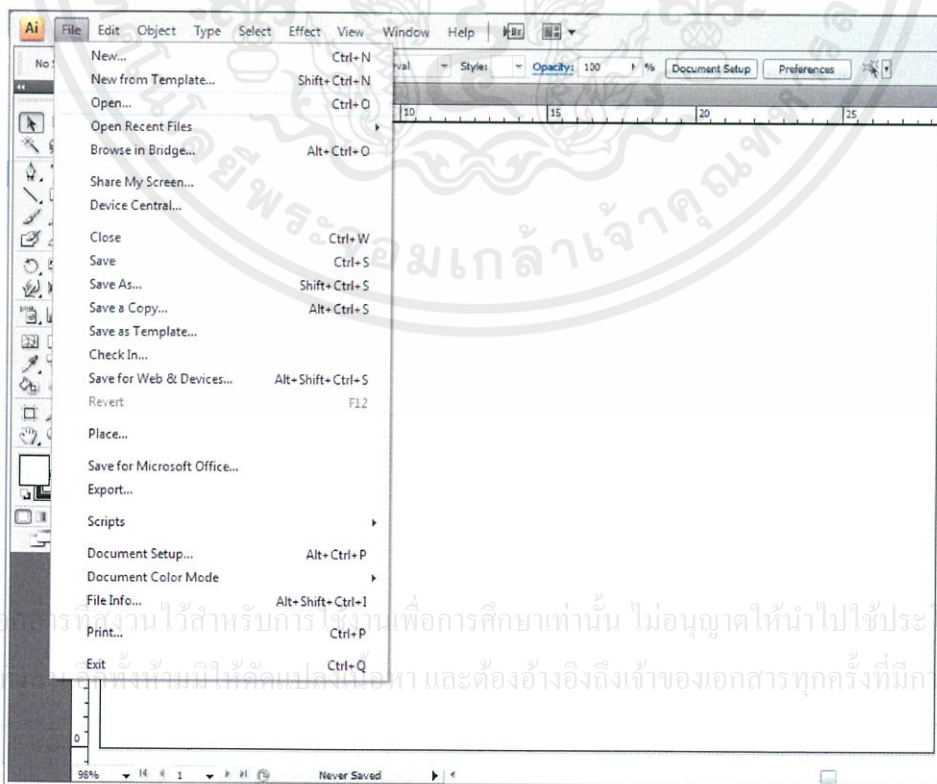


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ใช้

11.คลิก Show Rulers จะปรากฏสเกลในหน่วยเซนติเมตร (ในวงกลมสีแดง) ดังภาพ

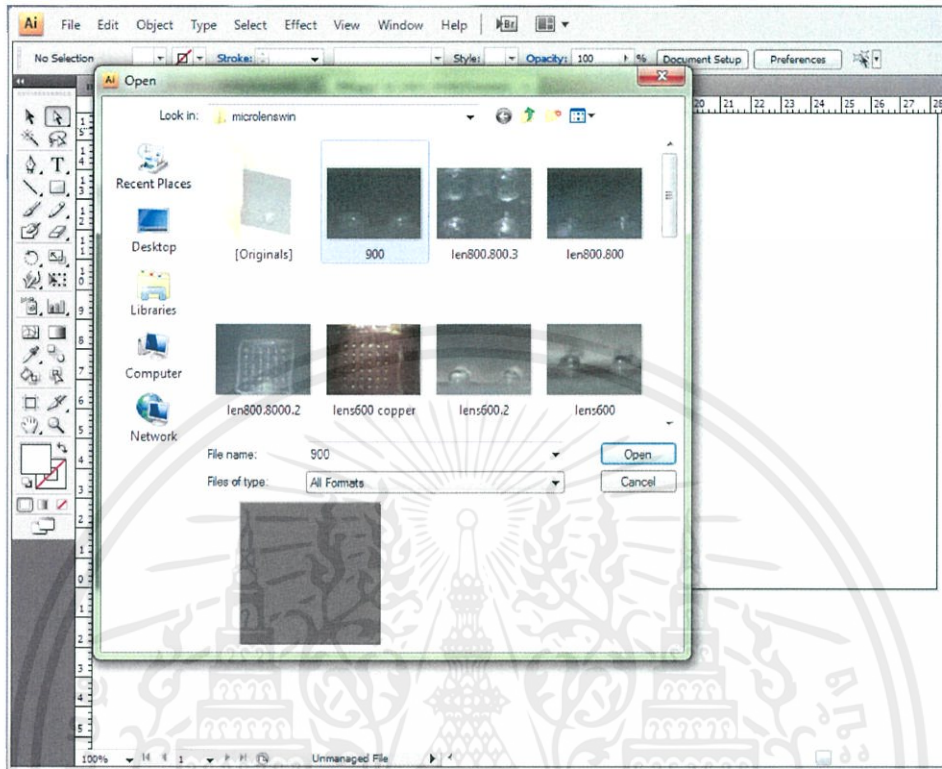


12.คลิก File > Open

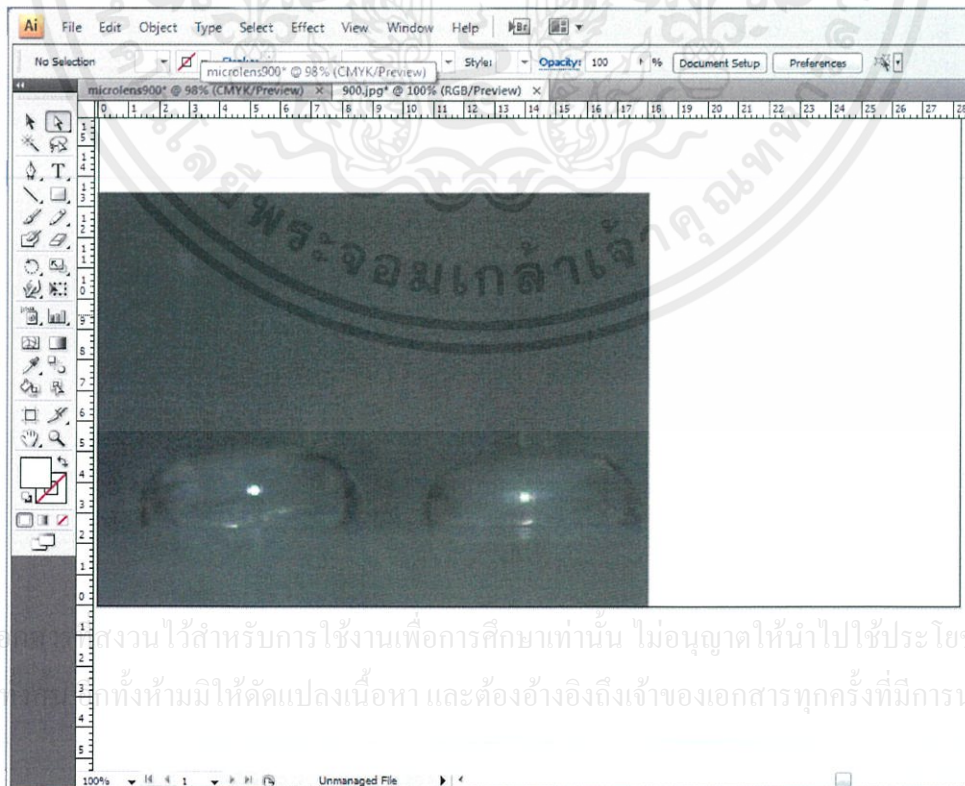


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านมีข้อสงสัยประการใดๆ กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกรูปที่จะนำมาวางในหน้ากระดาษ เลือกไฟล์ที่ต้องการทำการเก็บรูปไว้  
คลิก Open



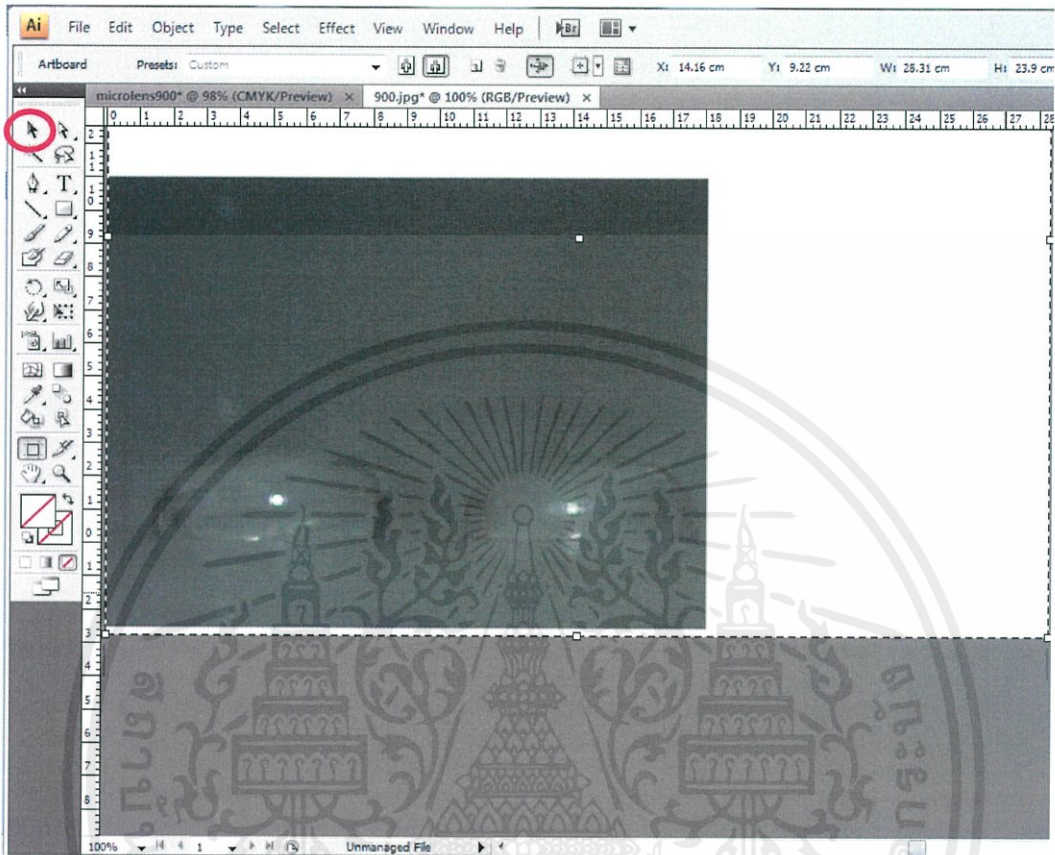
14. นำรูปมาชิดกับขอบกระดาษ เพื่อกำหนดความสูงของไมโครเลนส์ ดังภาพ



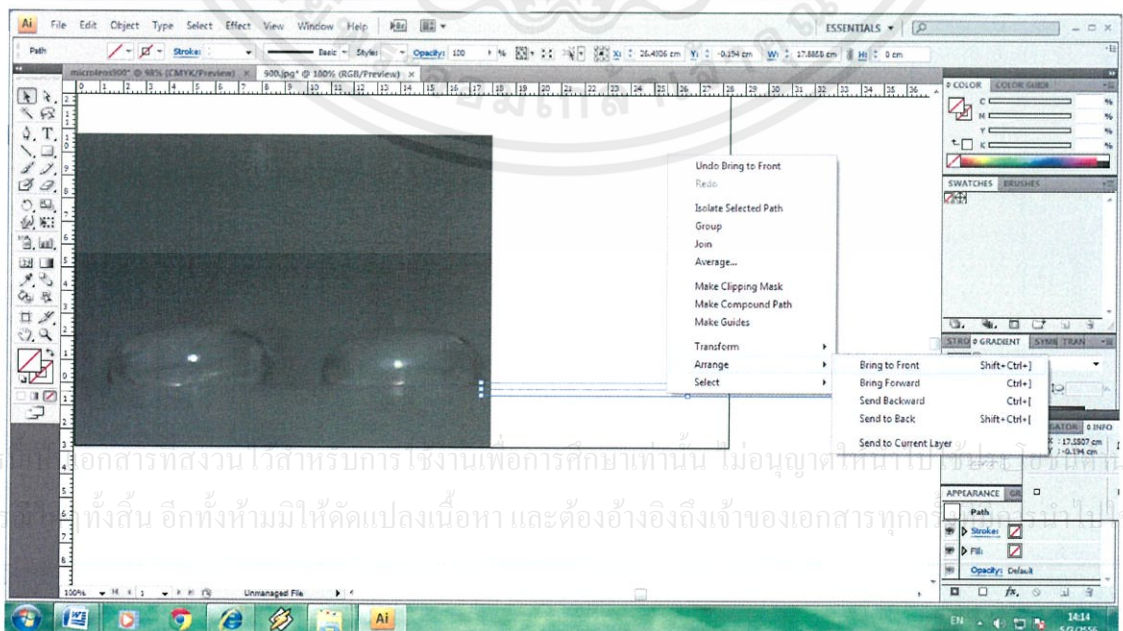
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. คลิก File > Document Setup > Edit Artboard แล้วทำการขยายหน้ากระดาษ แล้วจึงคลิก

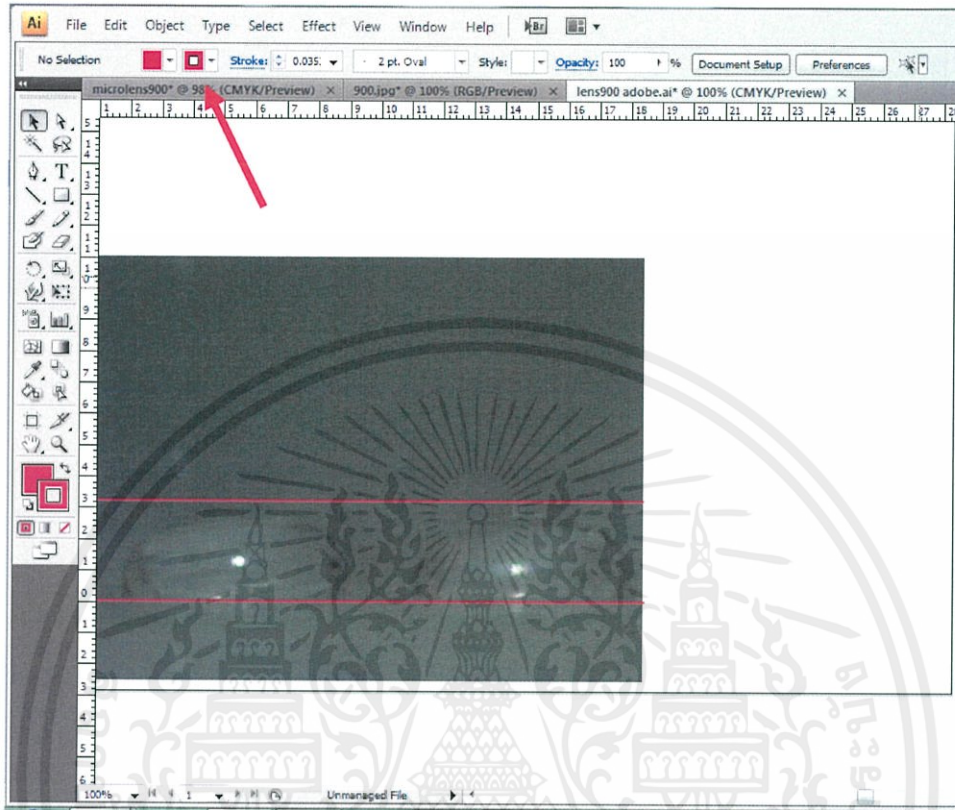
Selection tool (วงกลมสีแดง) ดังรูป



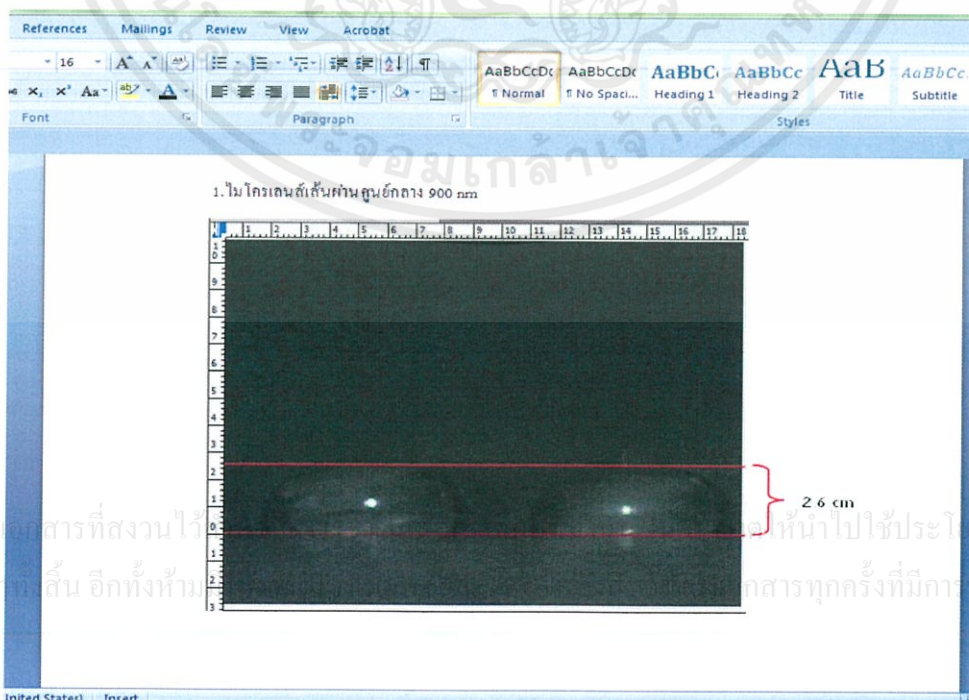
16. คลิก Line Segment Tool แล้วทำการคลิกขวาที่เส้น เลือก Arrange > Bring to Front



17. เลือกสีของเส้นโดยคลิกที่ตามลูกศรสีแดง แล้วเลือกที่ที่ต้องการ นำเส้นมาวางในตำแหน่งสเกล  
ที่เลขศูนย์ และนำอีกเส้นมาวางตำแหน่งความสูงของเลนส์ ดังภาพ



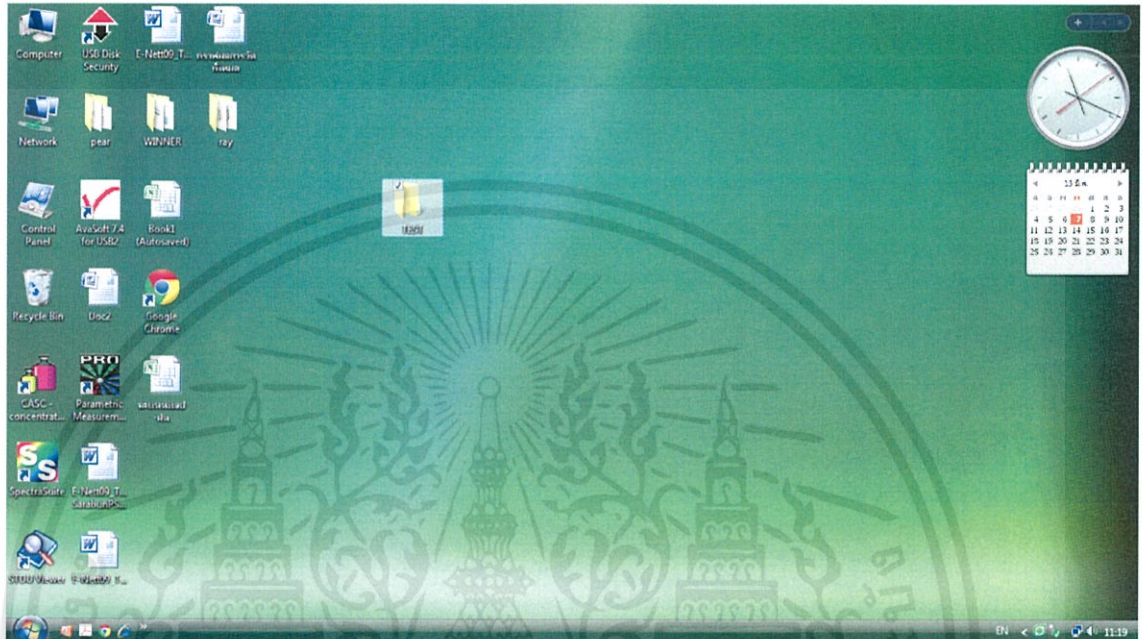
18. กด Print Screen แล้วนำมาใส่ใน Microsoft word พร้อมทั้งกำหนดสเกลความสูงของไมโคร  
เลนส์ ดังภาพ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความยาวโฟกัสต่อไป



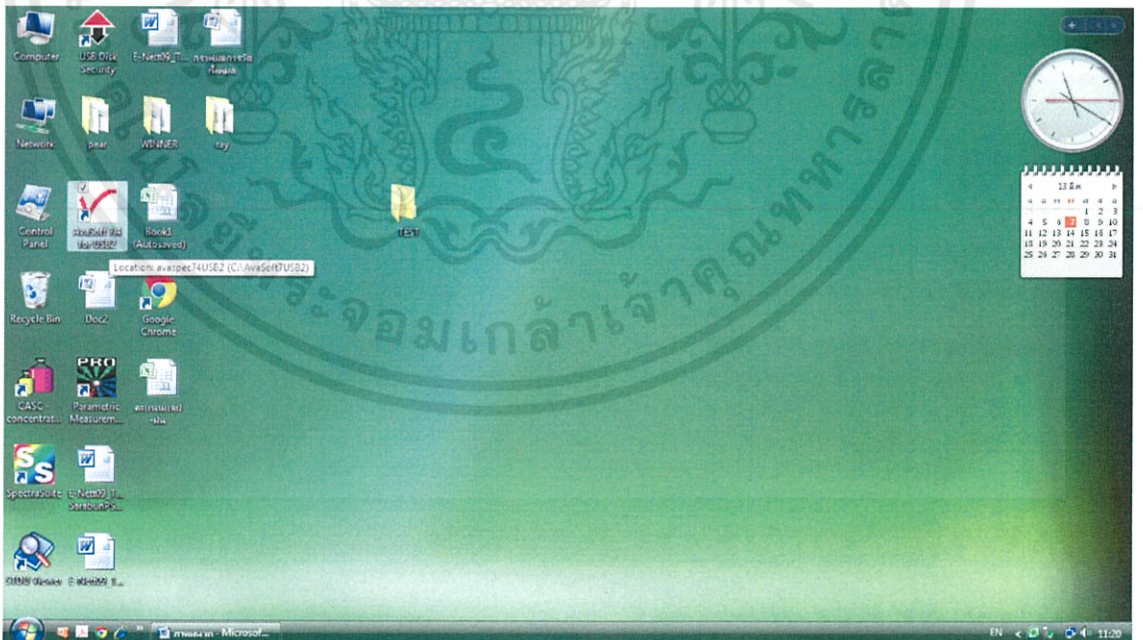
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้าม  
นำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
หรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วิธีการใช้โปรแกรม Avasoft

## 1. ตั้งไฟล์สำหรับ save ข้อมูล

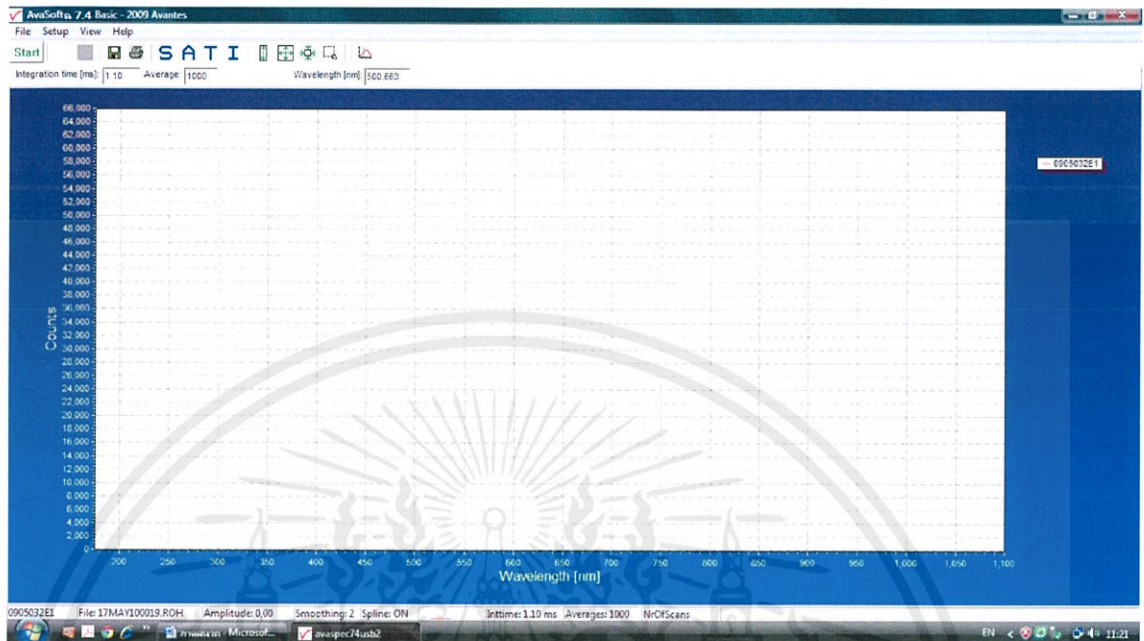


## 2. เปิดโปรแกรม Avasoft

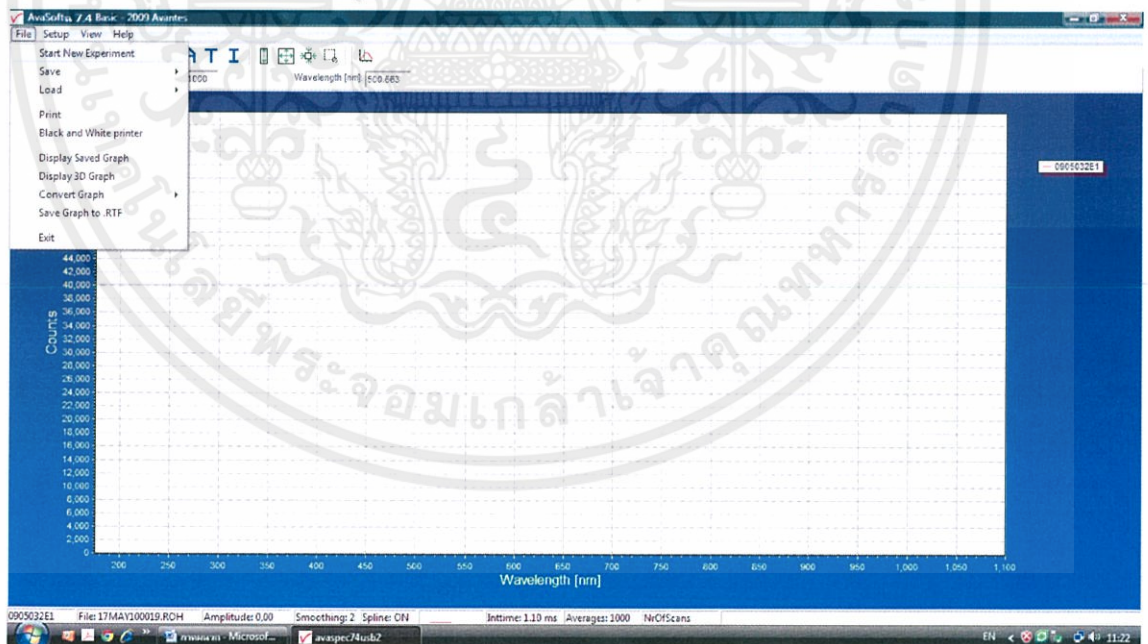


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. หน้าจอโปรแกรม Avasoft

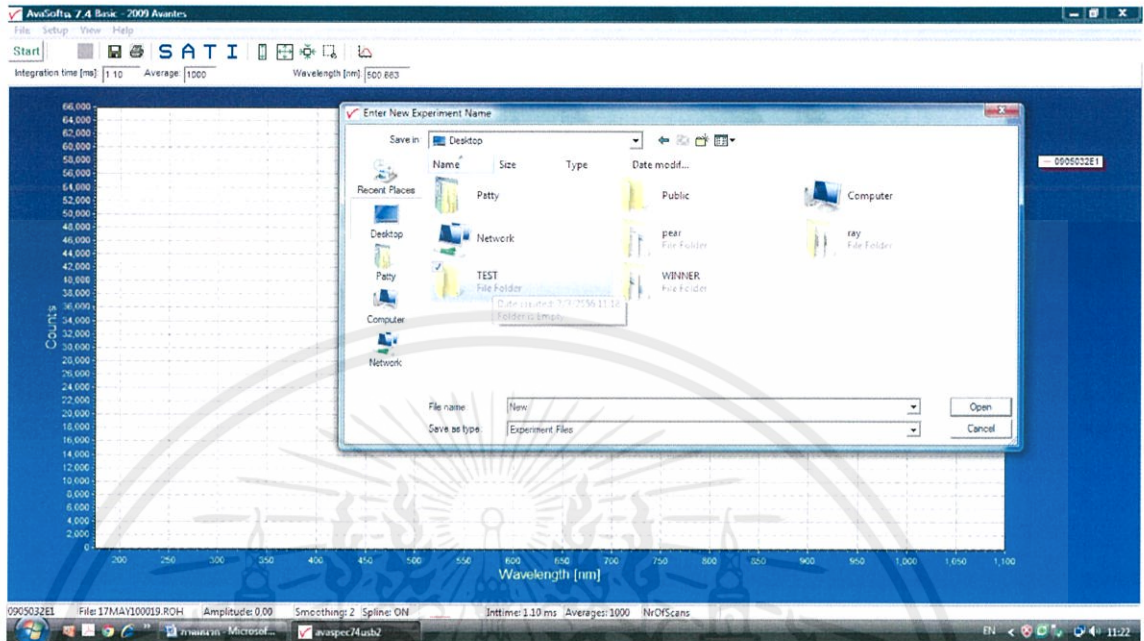


### 4. คลิกที่ file เลือก Start New Experiment เพื่อทำการตั้งชื่อไฟล์งาน

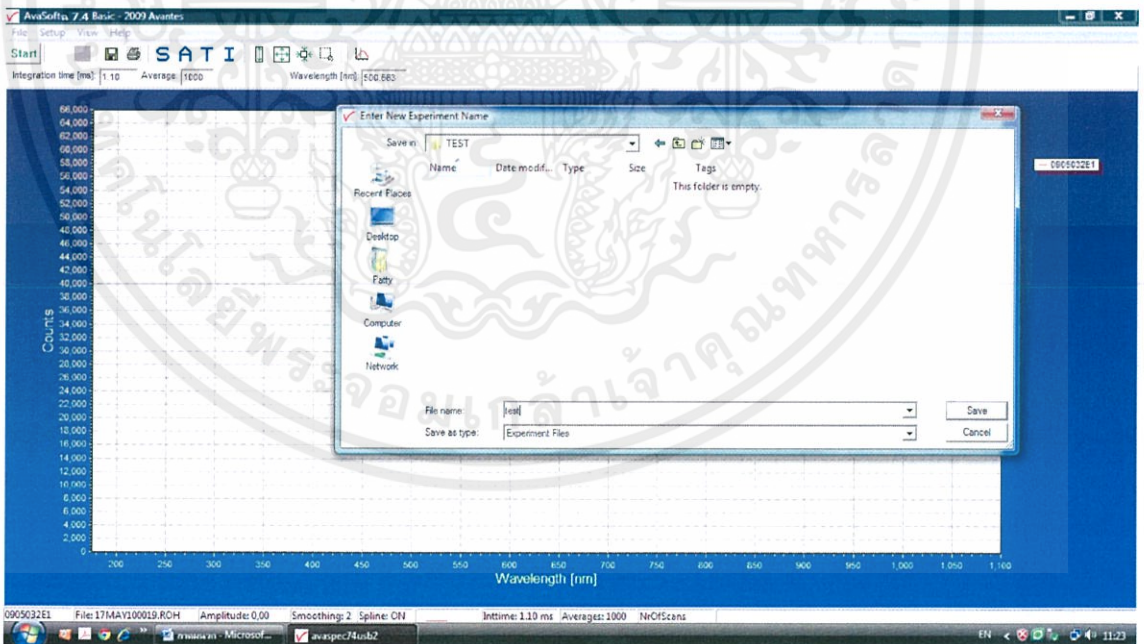


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. เลือก Folder ที่เราต้องการกด save เพื่อทำการบันทึก

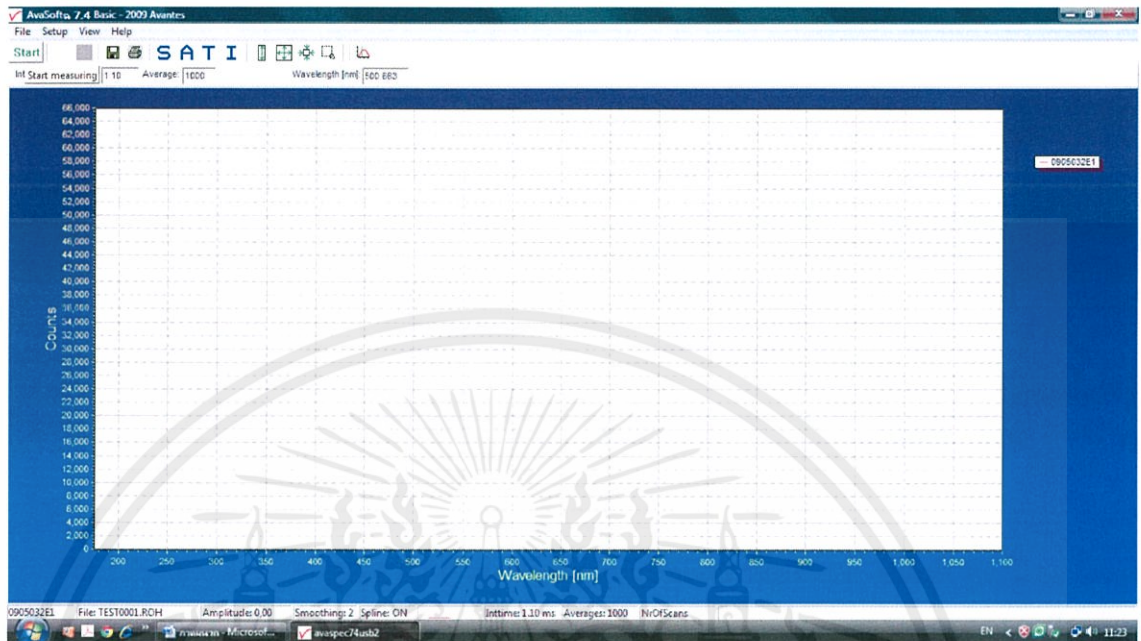


## 6. ใส่ชื่อไฟล์งานที่เราต้องการกด save เพื่อทำการบันทึก

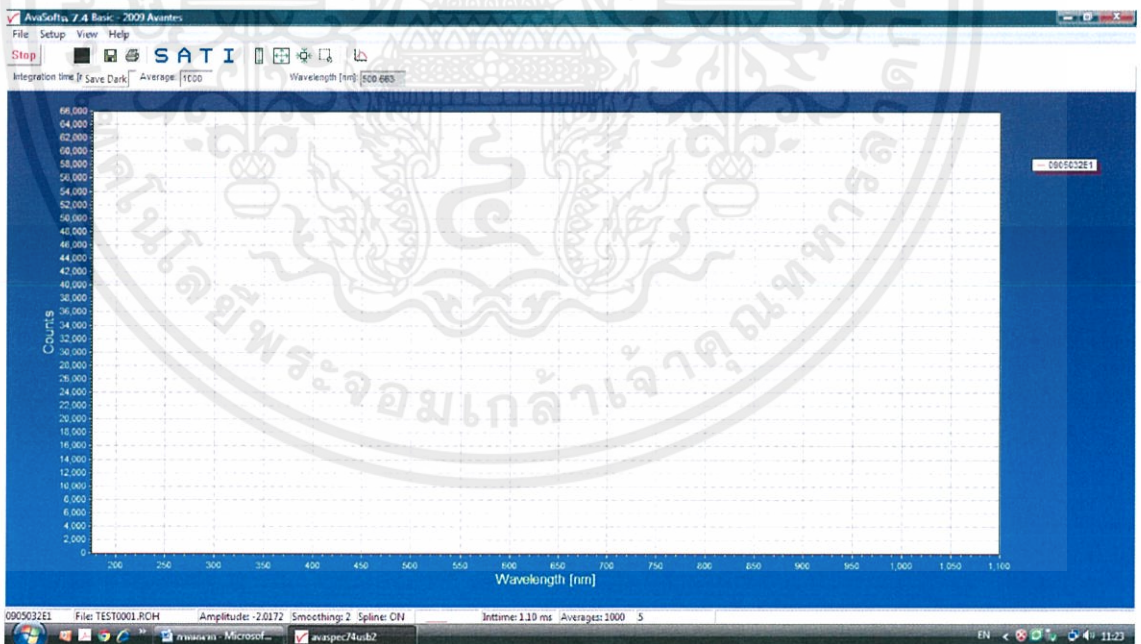


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. คลิก Start measuring เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง Spectrometer

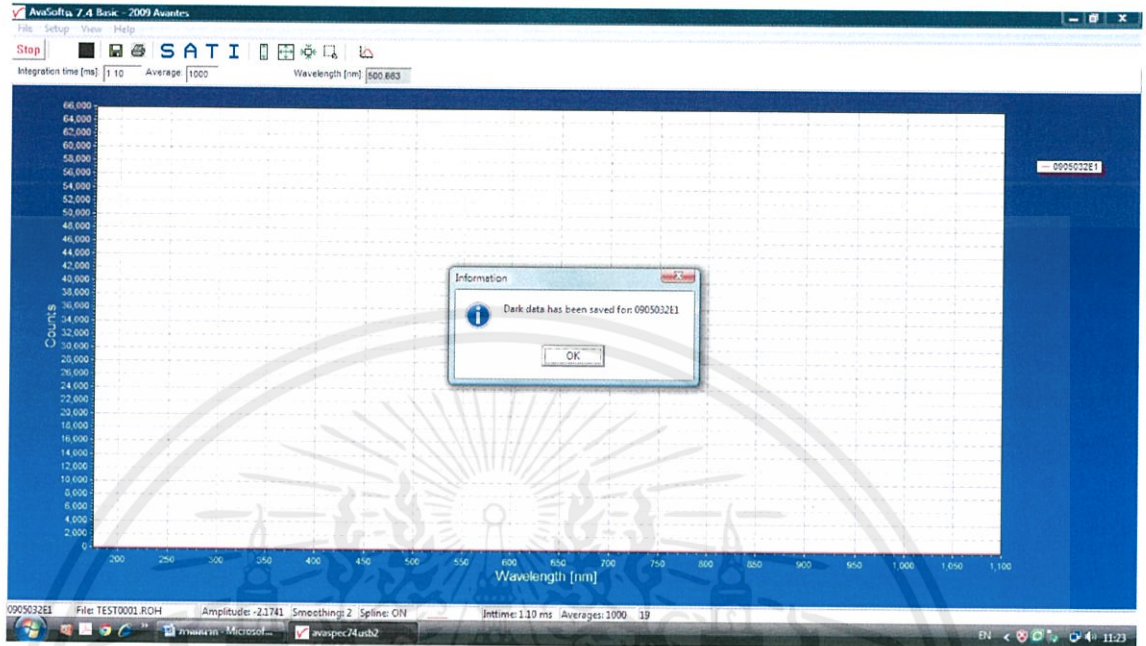


## 8. คลิกที่ไอคอน Save Dark เพื่อทำการวัดค่า Dark

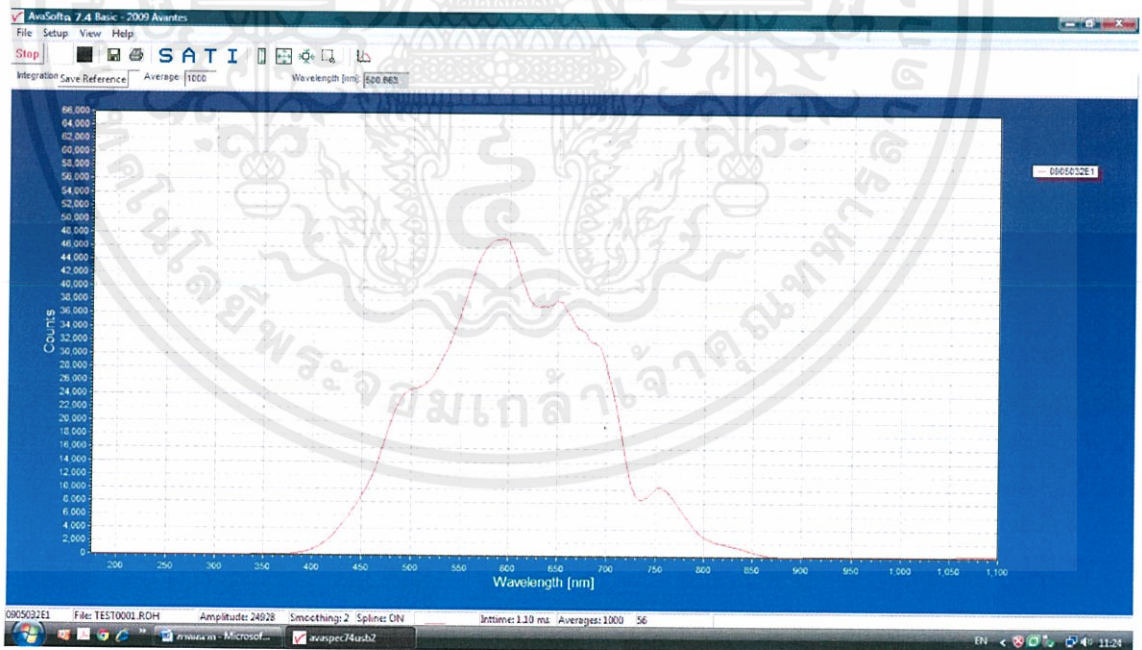


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9. คลิก OK เพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัด Dark

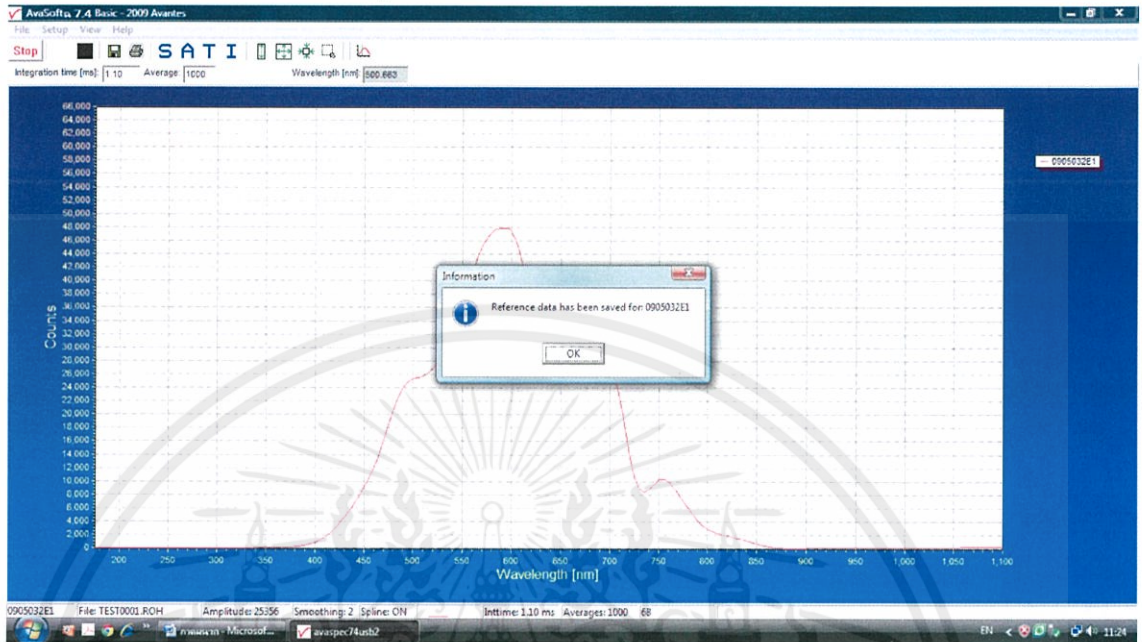


### 10. คลิกที่ไอคอน Save Reference เพื่อทำการวัดค่า Reference

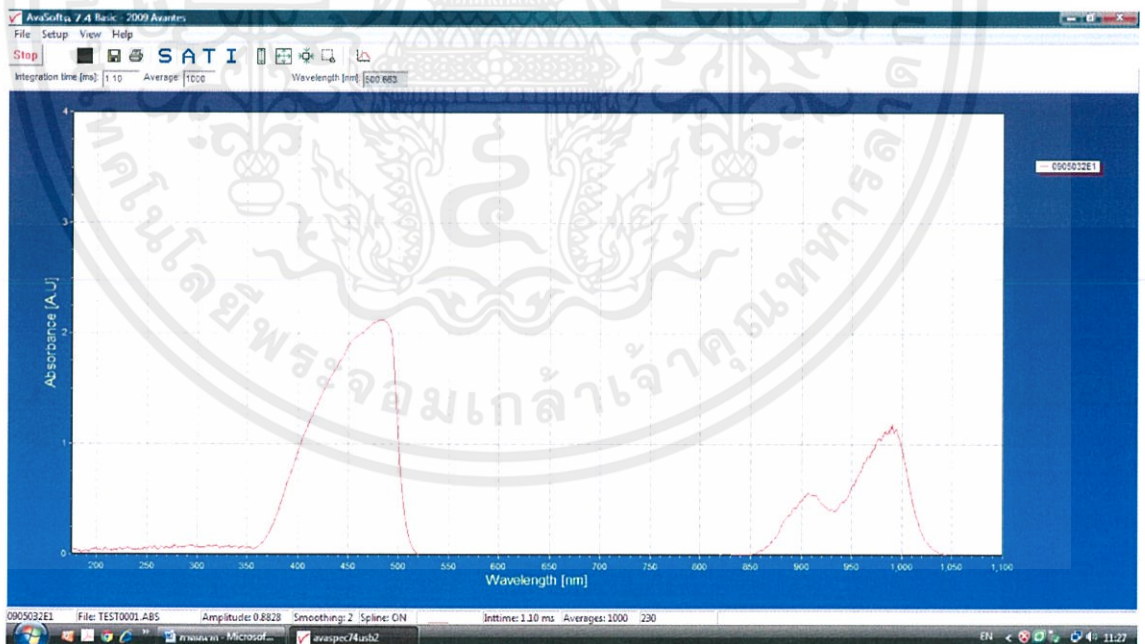


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. คลิก OK เพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัด Reference

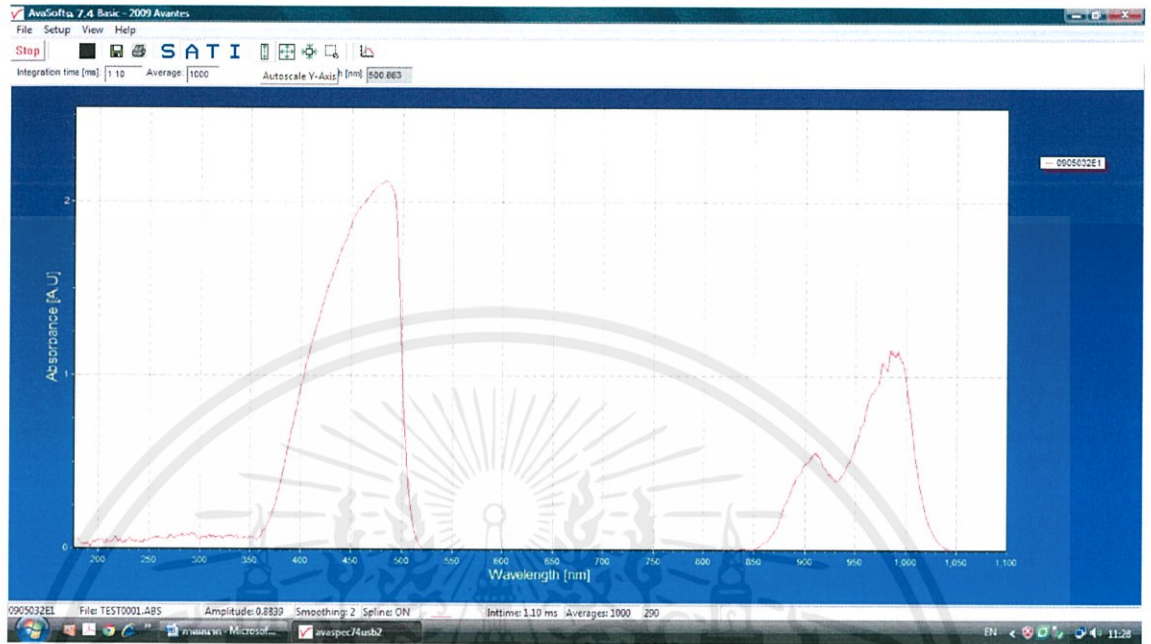


## 12. คลิกไอคอน Absorbance Mode

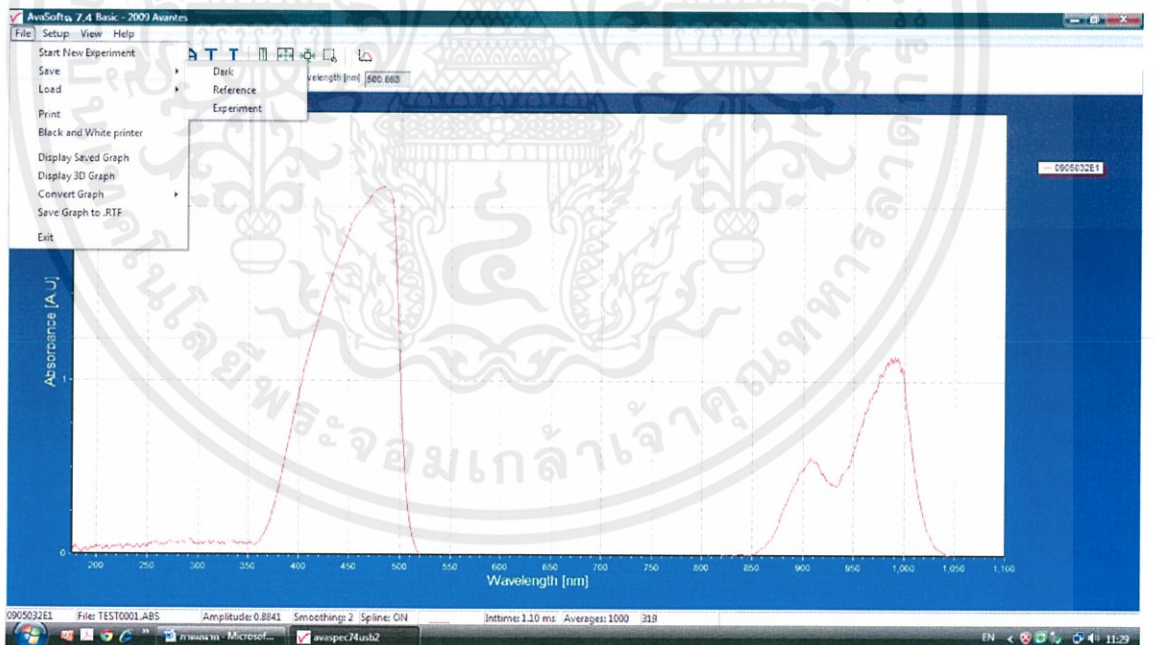


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 13. คลิกไอคอน Autoscale Y-Axis

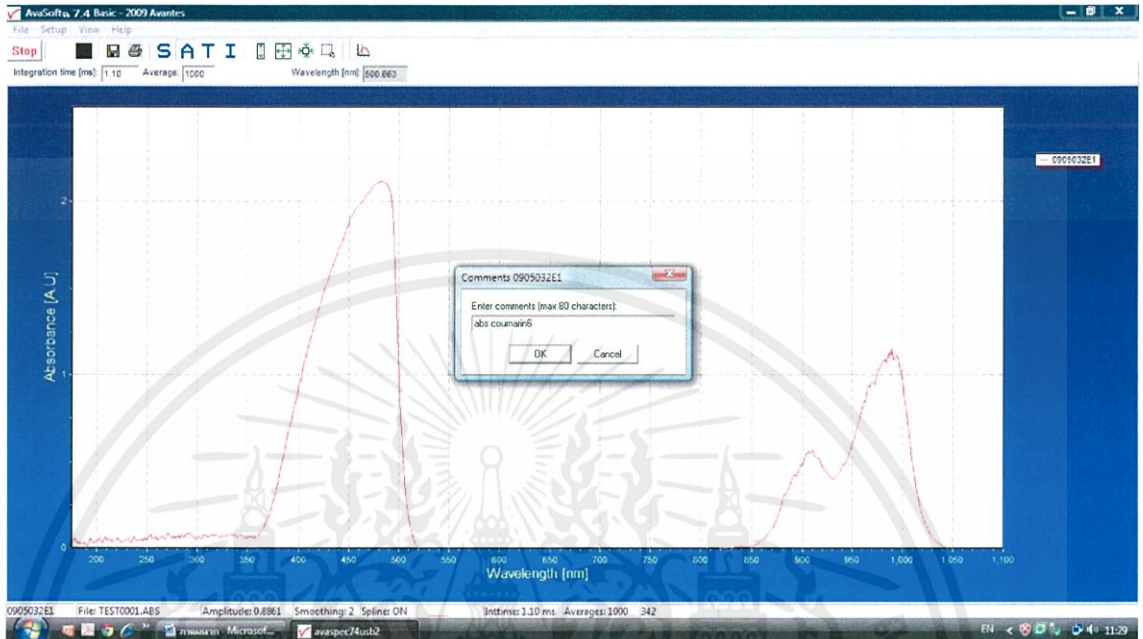


### 14. คลิกที่ File > Save > Experiment

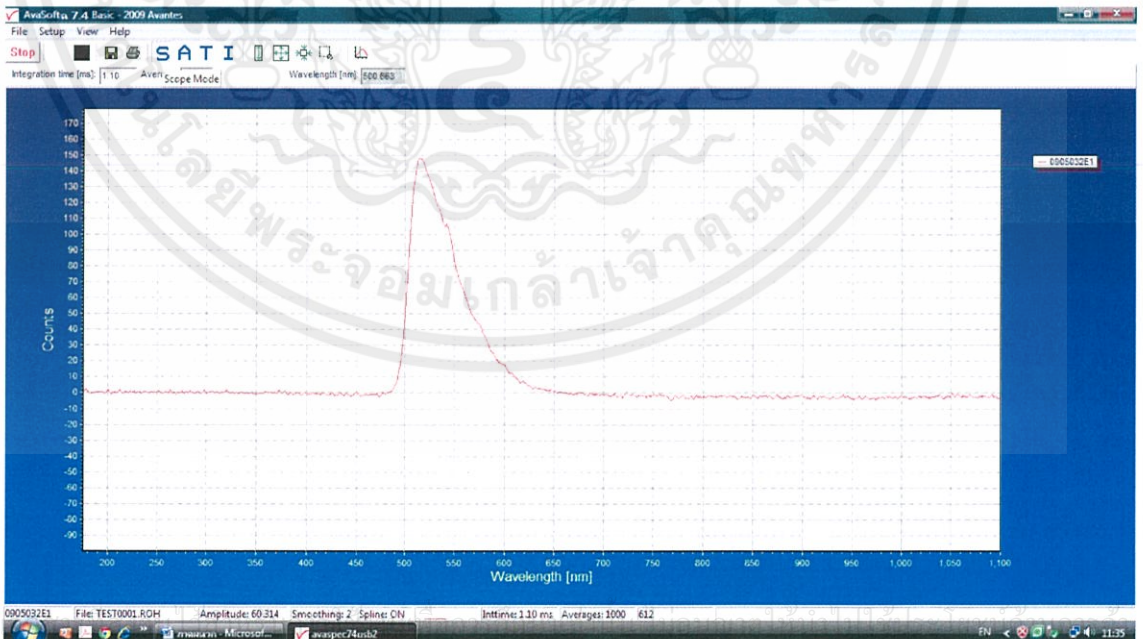


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ใส่ชื่อสารหรือความเข้มข้นของสารที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นคลิก OK เพื่อบันทึกข้อมูลการวัดค่าการดูดกลืนแสง



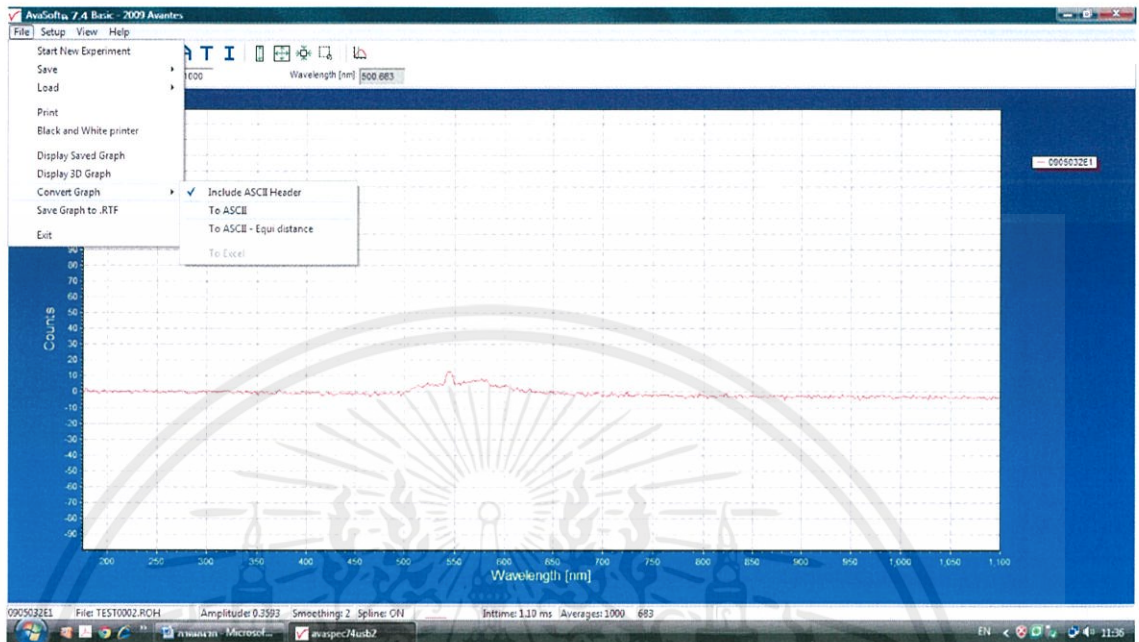
16. คลิกไอคอน Scope Mode แล้วทำการบันทึกข้อมูลการวัดค่าการเปล่งแสงตามขั้นตอนดังข้อที่ 12-14 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็น

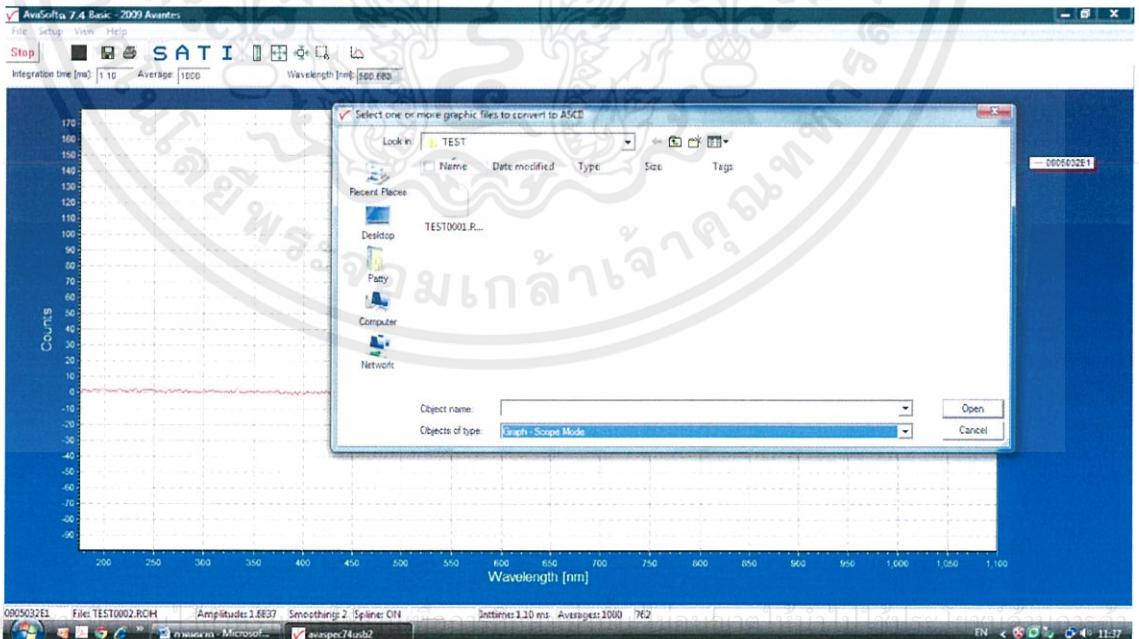
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. คลิกที่ File เลือก Convert Graph เพื่อทำการแปลงไฟล์ให้เป็นหน่วย ASCII



18. คลิกเลือกไฟล์ที่เราต้องการแปลงหน่วยเป็น ASCII จากนั้นเลือกชนิด Mode ของ Graph ที่ Object of type หลังจากนั้นคลิกปุ่ม Open เพื่อเปิดใช้งานไฟล์นั้น

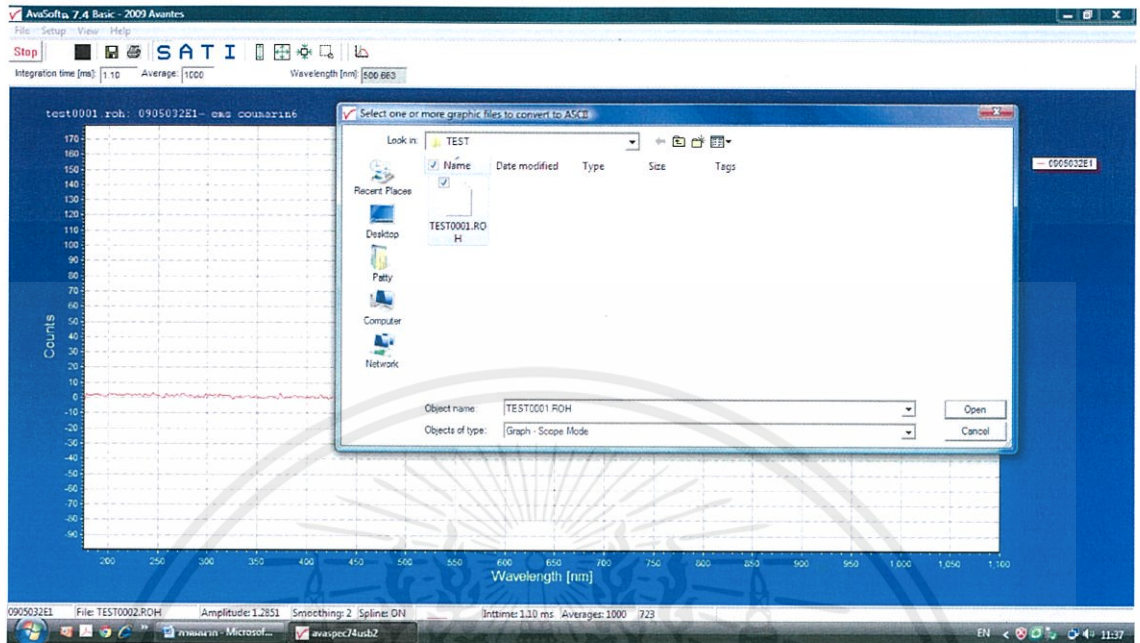
(Graph-Absorbance Mode สำหรับการดูดกลืนแสง)



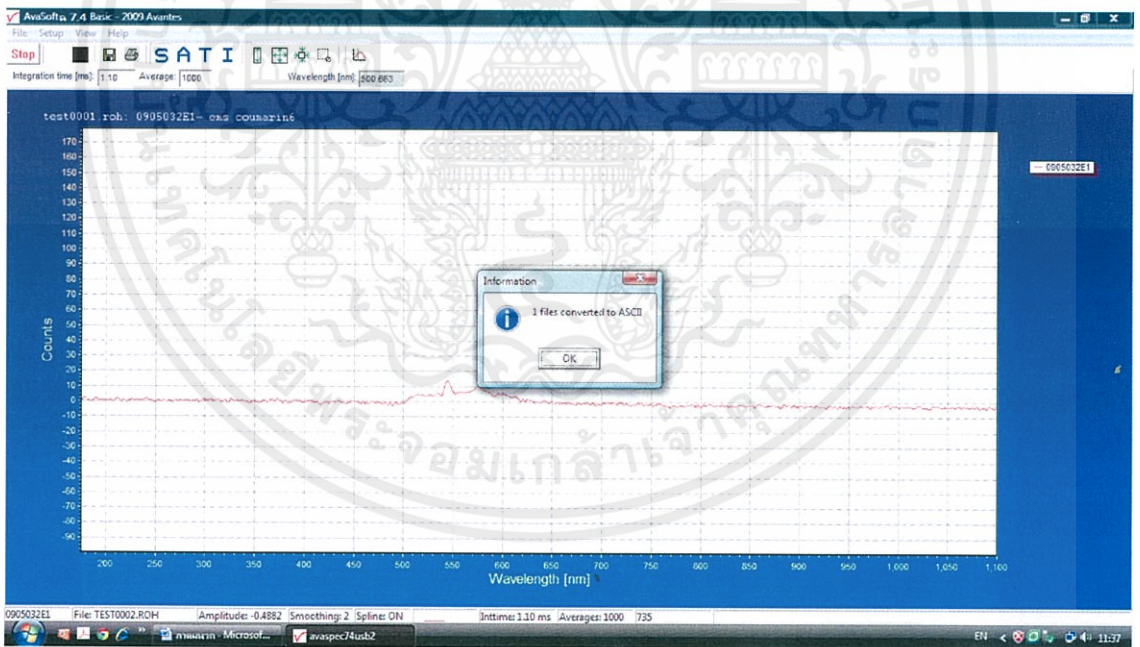
เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Graph-Scope Mode สำหรับการดูคลื่นแสง)



19. หลังจากนั้นหน้าจอ ก็จะแสดงไฟล์ที่ได้รับการแปลงมาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้