



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างไมโครเลนส์

Fabrication of Micro Lenses

นางสาวภทริยา กิตติเตชาชาญ

นายบัณฑิต ดำรงค์ดี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างไมโครเลนส์  
Fabrication of Micro Lenses

นางสาวภทธีรียา กิตติเดชาชาญ  
นายบดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

EResearch

เอกสารนี้เป็นเลขหมู่.....131135.....ซึ่งมอบให้แก่นักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด เลขทะเบียน.....  
วันที่,เดือน,ปี 2. 11ค. 2557. b.00128228  
i.....

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างไมโครเลนส์.....  
 แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....  
 ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 200,000 บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555/  
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย  
 หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา กิตติเดชาชาญ  
 สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ผู้ร่วมโครงการวิจัย ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์  
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาไมโครเลนส์จากวัสดุ PDMS (โพลีไดเมทิลไซโลเซน) โดยอาศัยกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ไมโครเลนส์อาร์เรย์ถูกจัดเตรียมจากวัสดุ 2 ชนิดคือแผ่นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์และแผ่นทองแดงชั้นฟิล์มโพลีเมอร์ที่มีผิวโค้งได้ถูกเคลือบบนแม่พิมพ์ต้นแบบโดยอาศัยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง สารละลาย PDMS ถูกใช้สำหรับขึ้นรูปไมโครเลนส์อาร์เรย์ ในงานวิจัยนี้ได้จัดเตรียมไมโครเลนส์อาร์เรย์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 514, 771 และ 942 ไมโครเมตร เลนส์ที่จัดเตรียมได้ถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่ารัศมีความโค้ง ค่า SAG และลักษณะของพื้นผิว ระบบวัดทางแสงสำหรับพิจารณาหาระยะโฟกัสของเลนส์ได้ถูกจัดเตรียมขึ้น ความสามารถในการรวมแสงโดยใช้ไมโครเลนส์อาร์เรย์ได้ถูกนำเสนอ

คำสำคัญ : ไมโครเลนส์, ไมโครเลนส์อาร์เรย์, กระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์, โพลีไดเมทิลไซโลเซน

**Research Title:** Fabrication of Micro Lenses

**Researchers:** 1. Asst. Prof. Pattareeya Kittidachachan

Faculty: Science Department: Physics

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2. Mr. Badin Damrongsak

Faculty: Science Department: Physics

Silpakorn University

### ABSTRACT

This research focuses on the development of PDMS (polydimethylsiloxane) microlens arrays (MLAs) based on the replica molding process. Two types of microlens arrays master molds were fabricated from printed circuit board and copper sheet. A spin coating technique was used to prepare concave polymeric layer on the fabricated master molds. A liquid PDMS mixture was cast onto the polymeric film to form the microlens arrays. In the present study, the PDMS microlens arrays with diameters of 514, 771, and 942  $\mu\text{m}$  were fabricated. The prepared samples were characterized for their radius of curvatures, SAGs and surface profiles. The optical measurement system was also set up to determine the focal lengths. The capability of collecting light using fabricated microlens arrays was also demonstrated.

**Keywords :** Microlens, Microlens arrays, Replica molding process, Polydimethylsiloxane

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ เถาถัดดา อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของอุปกรณ์แสงสำหรับการพัฒนาระบบทดสอบ ตลอดจนให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับการพัฒนาระบบวัดทางแสง และขอขอบคุณอาจารย์ ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการจัดหาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการจัดเตรียมระบบวัด และท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความช่วยเหลือและช่วยประสานงานในการใช้เครื่อง Profilometer สำหรับวัดความเรียบของพื้นผิวของไมโครเลนส์

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้ ประเภทงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา กิตติเดชาชาญ  
ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 ไมโครเลนส์และไมโครเลนส์อาร์เรย์.....	3
2.2 สมบัติพื้นฐานของเลนส์.....	5
2.3 วัสดุที่นิยมใช้สำหรับผลิตไมโครเลนส์.....	5
2.4 เทคนิคการสร้างไมโครเลนส์.....	7
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>9</b>
3.1 การจัดเตรียมแม่พิมพ์.....	9
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างเลนส์.....	9
3.1.2 การจัดสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์จากแผ่น PCB.....	11
3.1.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating).....	15
3.1.4 การจัดสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์จากแผ่นทองแดง.....	15
3.2 การขึ้นรูปไมโครเลนส์อาร์เรย์.....	16
3.2.1 วัสดุสำหรับสร้างไมโครเลนส์.....	16
3.2.2 ทำการสร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA.....	18
3.2.3 ทำการสร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	20
4.1 ไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ PCB.....	20
4.2 ไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ทองแดง.....	23
4.3 การวัดสมบัติต่างๆของไมโครเลนส์.....	30
4.3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์.....	30
4.3.2 ความสูงจากฐานถึงสันเลนส์หรือค่า SAG ของเลนส์.....	30
4.3.3 รัศมีความโค้ง.....	32
4.3.4 ระยะโฟกัสของเลนส์.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	35
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก.....	38
ภาคผนวก ก.....	38
ประวัตินักวิจัย.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของซิลิกอน.....	6
2.2 สมบัติของแก้ว Fused silica หรือแก้วควอทซ์.....	6
3.1 คุณสมบัติของ PMMA.....	17
3.2 คุณสมบัติของ PDMS.....	17
3.3 คุณสมบัติของ DCM.....	17
4.1 ผลการชุบนิกเกิลบนแผ่น PCB.....	22
4.2 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความสูงของแผ่นทองแดงที่ระยะเวลาต่างๆ.....	23
5.1 ผลการจัดเตรียมเลนส์จากแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ 3 ขนาด.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้ไมโครเลนส์กับสิ่งประดิษฐ์/อุปกรณ์ต่างๆ.....	4
2.2 ไมโครเลนส์ชนิดต่างๆ (ก) เลนส์โค้งปกติ (Circular lens)	
(ข) เลนส์โค้งแบน (Aspherical lens) และ (ค) กรีนเลนส์ (GRIN lens).....	4
2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครเลนส์ .....	5
2.4 การสร้างไมโครเลนส์โดยอาศัยวิธี Spin casting และ Replica Molding.....	8
3.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น (a) แม่พิมพ์ PCB (b) แม่พิมพ์ทองแดง.....	9
3.2 ภาพแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator.....	10
3.3 (a) แสดงภาพของแผ่น PCB ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์	
(b) แสดงภาพของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์.....	11
3.4 ติด Negative Dry Film ลงบนแผ่น PCB.....	11
3.5 นำแผ่น PCB เข้าเครื่องรีด.....	11
3.6 แผ่น PCB หลังจากนำเข้าเครื่องรีดแล้ว.....	11
3.7 แผ่น PCB ที่มี Dry Film เคลือบที่ตัดขอบออกแล้ว.....	13
3.8 นำแผ่น PCB มาล้างในน้ำยา Developer.....	13
3.9 นำแผ่น PCB ลงไปแช่ในน้ำยากัด.....	14
3.10 นำแผ่น PCB ที่ต้องการลอก Dry Film ออก แช่ลงในภาชนะที่ใส่ Acetone.....	14
3.11 แสดงระบบการชุบนิกเกิล.....	15
3.12 แสดงภาพของแผ่นทองแดงที่ทำการขึ้นรูป.....	16
3.13 แม่พิมพ์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม PMMA.....	18
3.14 แม่พิมพ์ที่ถูกเคลือบด้วยชั้น PDMS.....	18
3.15 แสดงภาพของ (a) Sylgard 184 Silicone Elastomer Base	
(b) Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent.....	19
3.16 (a) ภาพ PDMS ที่อยู่ในตู้สุญญากาศเพื่อนำฟองอากาศออก	
(b) ภาพแม่พิมพ์ที่มีชั้น PDMS.....	19
4.1 แม่พิมพ์ PCB ที่จัดเตรียมได้.....	20
4.2 เลนส์ที่เตรียมได้จากแม่พิมพ์ PCB (a) จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5	
(b) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	21

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นทองแดงและเวลาที่ใช้ในการกัดแผ่นทองแดง.....	22
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดกับความหนาของแผ่นทองแดง.....	24
4.5 กราฟแม่พิมพ์จากแผ่นทองแดงที่สร้างจากฟิล์มต้นแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 500 ไมครอน (a) ภาพถ่ายจากด้านผิวหน้า (b) ภาพถ่ายจากด้านข้าง.....	24
4.6 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 500 ไมครอน.....	26
4.7 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 700 ไมครอน.....	27
4.8 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 900 ไมครอน.....	28
4.9 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 500 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 60 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า.....	29
4.10 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 700 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า.....	29
4.11 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 900 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 40 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า.....	29
4.12 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 ไมโครเมตร.....	30
4.13 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร.....	31
4.14 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร.....	31
4.15 การจัดอุปกรณ์เพื่อวัดหาระยะโฟกัสของเลนส์ (a) ไตอะแกรม (b) ระบบจริง.....	33
4.16 สเปกตรัมแสงที่วัดได้จากระบบที่มีไมโครเลนส์และไม่มีไมโครเลนส์.....	34

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทและมีความสำคัญในหลายๆสาขาวิชา อาทิ เคมี เทคโนโลยีชีวภาพ วิศวกรรม และฟิสิกส์ สาขาหนึ่งที่นาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทไม่น้อยไปกว่าสาขาอื่นๆเลยได้แก่ การพัฒนาอุปกรณ์ทางแสง อาทิ เซนเซอร์รับแสง เลเซอร์ไดโอด ซึ่งเทคโนโลยีอุปกรณ์แสงดังกล่าวจะพบได้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านทั่วไป อาทิ เครื่องเล่นดีวีดี โทรศัพท์มือถือ และ กล้องถ่ายรูป นอกจากนี้ เรายังพบอุปกรณ์แสงในเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นต้น

ในขณะที่มีการวิจัยพัฒนาเซนเซอร์รับแสงและเลเซอร์ไดโอดให้มีขนาดเล็กมากๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์และลดต้นทุนในการผลิต อุปกรณ์ทางแสงอีกชิ้นหนึ่งที่มีความจำเป็นและขาดไม่ได้ ได้แก่ เลนส์ ซึ่งทำหน้าที่ในการรวมแสง และ กระจายแสง จากการทบทวนเอกสารพบว่า เทคโนโลยีการผลิตเลนส์จากชิ้นแก้วด้วยวิธีต่างๆไปมีข้อจำกัดอยู่ โดย numerical aperture (NA) ของเลนส์ประเภทนี้จะมีขนาดเล็ก ประมาณ 0.05 (ซึ่งค่า NA ของเลนส์บ่งบอกถึงคุณสมบัติในการรวมแสง ยิ่งค่า NA มาก ก็จะสามารถรวมแสงได้ดี) ดังนั้นเมื่อมีการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงในมีขนาดเล็กลง ก็จำเป็นต้องมีเลนส์หรืออุปกรณ์รวมแสงที่มีคุณสมบัติของการรวมแสงที่ดีขึ้น จากการสืบค้นข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยพบว่าเทคโนโลยีไมโครเลนส์ซึ่งผลิตจากวัสดุโพลิเมอร์และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จะช่วยเพิ่มค่า NA ของเลนส์ได้ โดย state-of-the-art ของไมโครเลนส์มีค่า NA อยู่ที่ 0.24 หรือประมาณเกือบเท่าเท่าของเลนส์ที่ผลิตจากแก้ว

จากที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของเทคโนโลยีด้านนี้ จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการสร้างไมโครเลนส์ขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์แสงที่มีขนาดเล็กต่อไปในอนาคต เป้าหมายของโครงการวิจัยคือสามารถได้มาซึ่งเทคนิคในการจัดสร้างไมโครเลนส์ให้มีขนาดและมีคุณสมบัติการรวมแสงตามต้องการได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการในการจัดสร้างไมโครเลนส์
2. เพื่อจัดเตรียมไมโครเลนส์ที่มีขนาดต่างๆ
3. เพื่อทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครเลนส์ที่จัดเตรียมขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จัดเตรียมไมโครเลนส์ที่มีขนาดต่างๆ
2. ทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครเลนส์ที่จัดเตรียมขึ้น ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์ ระยะโฟกัส ระยะห่างระหว่างเลนส์ ความหนาของเลนส์ และค่า N.A. (Numerical aperture)

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและสั่งซื้อวัสดุที่จำเป็นต่อการจัดเตรียมไมโครเลนส์ เช่น สารเคมี ซิลิกอนเวเฟอร์ และแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ขั้นตอนที่ 2 ทดลองจัดเตรียมแม่พิมพ์เพื่อใช้สร้างไมโครเลนส์จากซิลิกอนเวเฟอร์และแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ขั้นตอนที่ 3 พัฒนาระบวนการในการจัดเตรียมไมโครเลนส์โดยอาศัยหลักการ Spin casting และ Replica Molding โดยศึกษาผลของความหนืดของสาร ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยง ที่มีต่อฟิล์มที่จัดเตรียมได้

ขั้นตอนที่ 4 จัดเตรียมไมโครเลนส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันอย่างน้อย 3 ค่า

ขั้นตอนที่ 5 จัดเตรียมระบบสำหรับวัดสมบัติของไมโครเลนส์ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ ความยาวโฟกัส ค่า Sag และรัศมีความโค้งของเลนส์

ขั้นตอนที่ 6 วัดและศึกษาสมบัติของไมโครเลนส์ที่จัดเตรียมได้

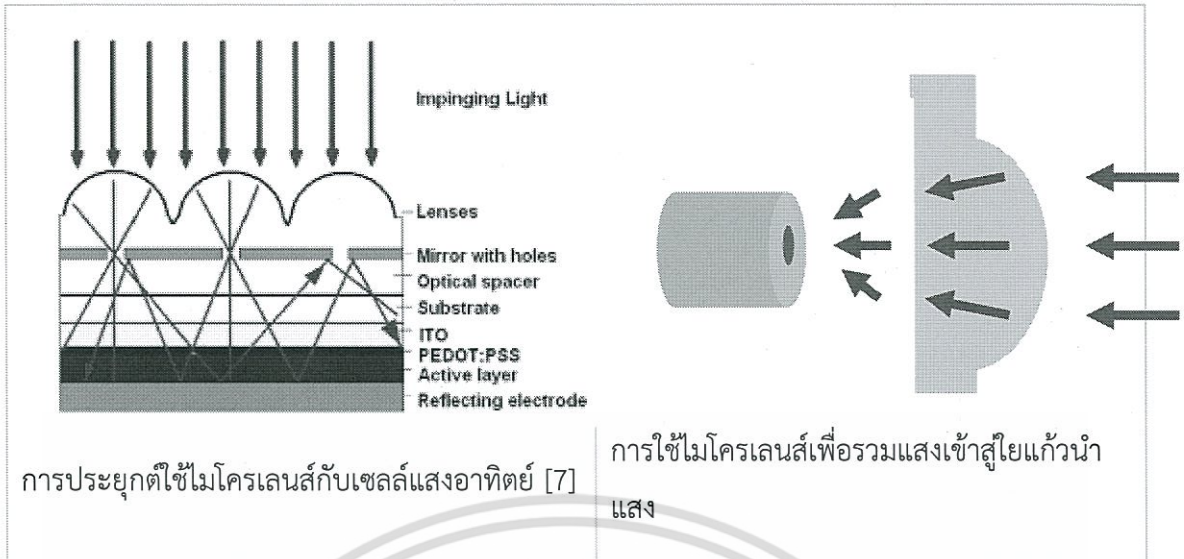
ขั้นตอนที่ 7 จัดเตรียมรายงานสรุปผลการดำเนินการ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ผู้วิจัยได้ศึกษาและเรียนรู้กระบวนการจัดสร้างไมโครเลนส์
2. เพิ่มพูนทักษะการวิจัยทางด้านแสง
3. ผลงานวิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์แสงที่มีขนาดเล็กต่อไปในอนาคต

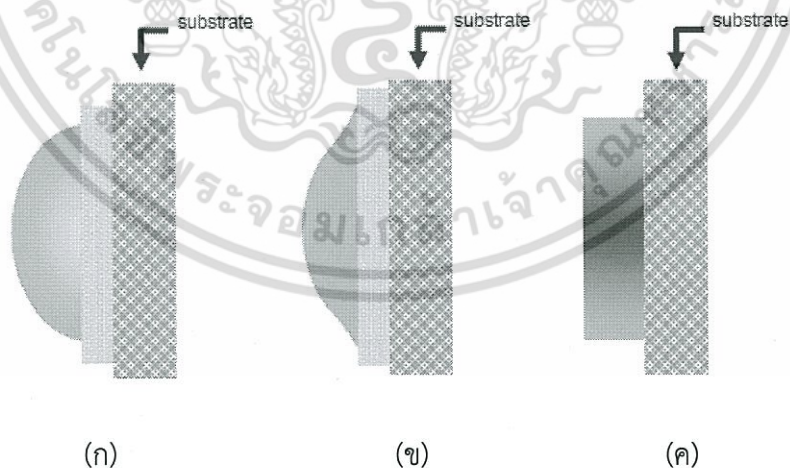
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้ไมโครเลนส์กับสิ่งประดิษฐ์/อุปกรณ์ต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของไมโครเลนส์จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2(ก) เลนส์ชนิดนี้จะมีผิวหน้าด้านหนึ่งเรียบและผิวหน้าอีกด้านจะมีลักษณะโค้งนูนเพื่อให้แสงเกิดการหักเห เนื่องจากเลนส์มีขนาดเล็กจึงต้องสร้างหรือประกอบบนฐานรอง (substrate) ที่มีความหนากว่าเลนส์ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถจับยึดเลนส์ได้ นอกจากโครงสร้างที่กล่าวมาแล้ว ไมโครเลนส์ยังสามารถถูกออกแบบให้มีลักษณะอื่นๆอีก เช่น มีพื้นผิวโค้งแบนดังรูป 2.2(ข) หรือถูกออกแบบให้มีผิวเรียบทั้งสองด้านแต่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อวัสดุ (รูป 2.2(ค)) เลนส์ที่มีโครงสร้างนี้จะถูกเรียกว่ากรีนเลนส์ (GRIN lens: gradient index lens)



รูปที่ 2.2 ไมโครเลนส์ชนิดต่างๆ (ก) เลนส์โค้งปกติ (Circular lens)

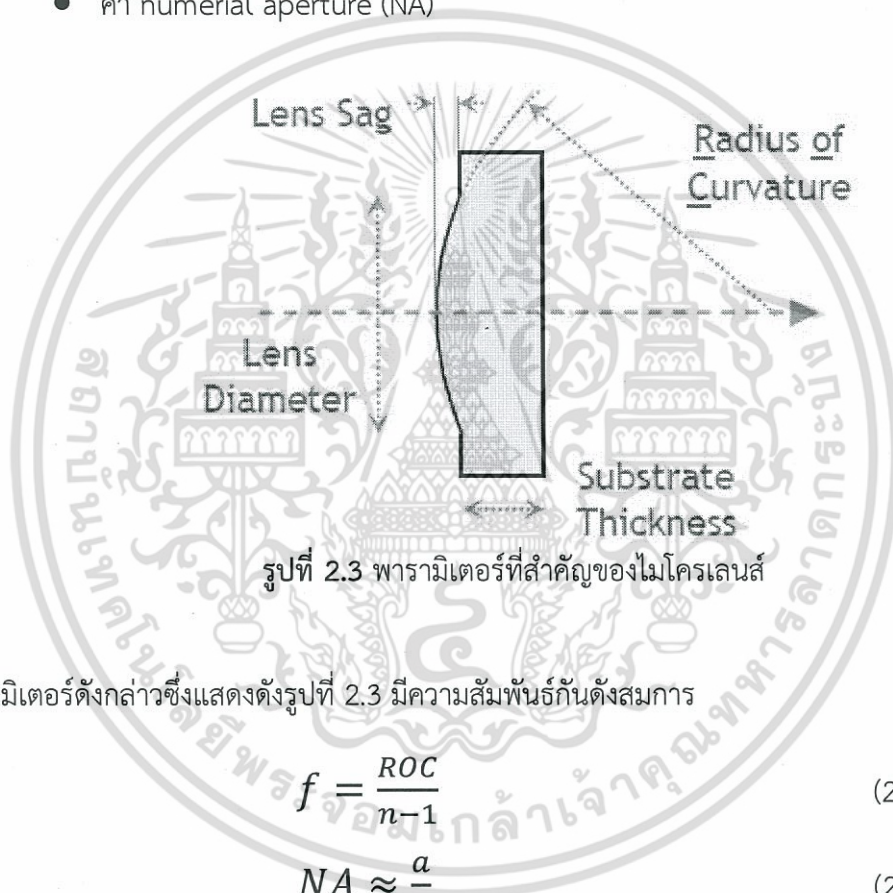
(ข) เลนส์โค้งแบน (Aspherical lens) และ (ค) กรีนเลนส์ (GRIN lens)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สมบัติพื้นฐานของเลนส์

ความสามารถในการรวมแสงของเลนส์จะขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ ( $D = 2a$ )
- ความยาวโฟกัส ( $f$ )
- Sag หรือความสูงจากฐานถึงสันเลนส์ ( $h$ )
- ค่าดัชนีหักเหของแสงในวัสดุที่ใช้สร้างเลนส์ ( $n$ )
- รัศมีความโค้งของเลนส์ (ROC)
- ค่า numerical aperture (NA)



รูปที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครเลนส์

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$f = \frac{ROC}{n-1} \quad (2.1)$$

$$NA \approx \frac{a}{f} \quad (2.2)$$

$$ROC = \frac{h^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2h} \quad (2.3)$$

## 2.3 วัสดุที่นิยมใช้สำหรับผลิตไมโครเลนส์

วัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตไมโครเลนส์มีอยู่หลายชนิด เช่น ซิลิกอน และแก้วควอทซ์ ซึ่งความแตกต่างของสมบัติของวัสดุจะทำให้ได้มาซึ่งเลนส์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดง

ข้อมูลสมบัติของวัสดุทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของซิลิกอน

Refractive index (20 °C)										
Wavelength	1	1.31	1.55	1.71	2.15	3.5	4	6	18.5	11
( $\mu\text{m}$ )	3.570	3.503	3.478	3.466	3.448	3.428	3.426	3.420	3.418	3.412

Other Properties					
Linear Thermal Expansion Coefficient ( $10^{-6}/\text{K}$ )	2.55-4.15	Dielectric Constant at 10 GHz	13	Elastic Modulus (GPa)	131
Heat Conductivity (W/(m-K))	163.3	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.33	Shear Modulus (GPa)	80
Transmission Range for Wafer 0.5 mm thickness (nm)	1.2-15 $\mu\text{m}$	Poisson's Ratio	0.266	Bulk Modulus (GPa)	102

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก้ว Fused silica หรือแก้วควอทซ์

Refractive index (20 °C)													
Wavelength	193	248	365	486	587	633	852	1.06	1.31	1.53	1.97	2.32	3.37
	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
	1.5608	1.5085	1.4745	1.4631	1.4584	1.4570	1.4524	1.4497	1.4469	1.4443	1.4385	1.433	1.410

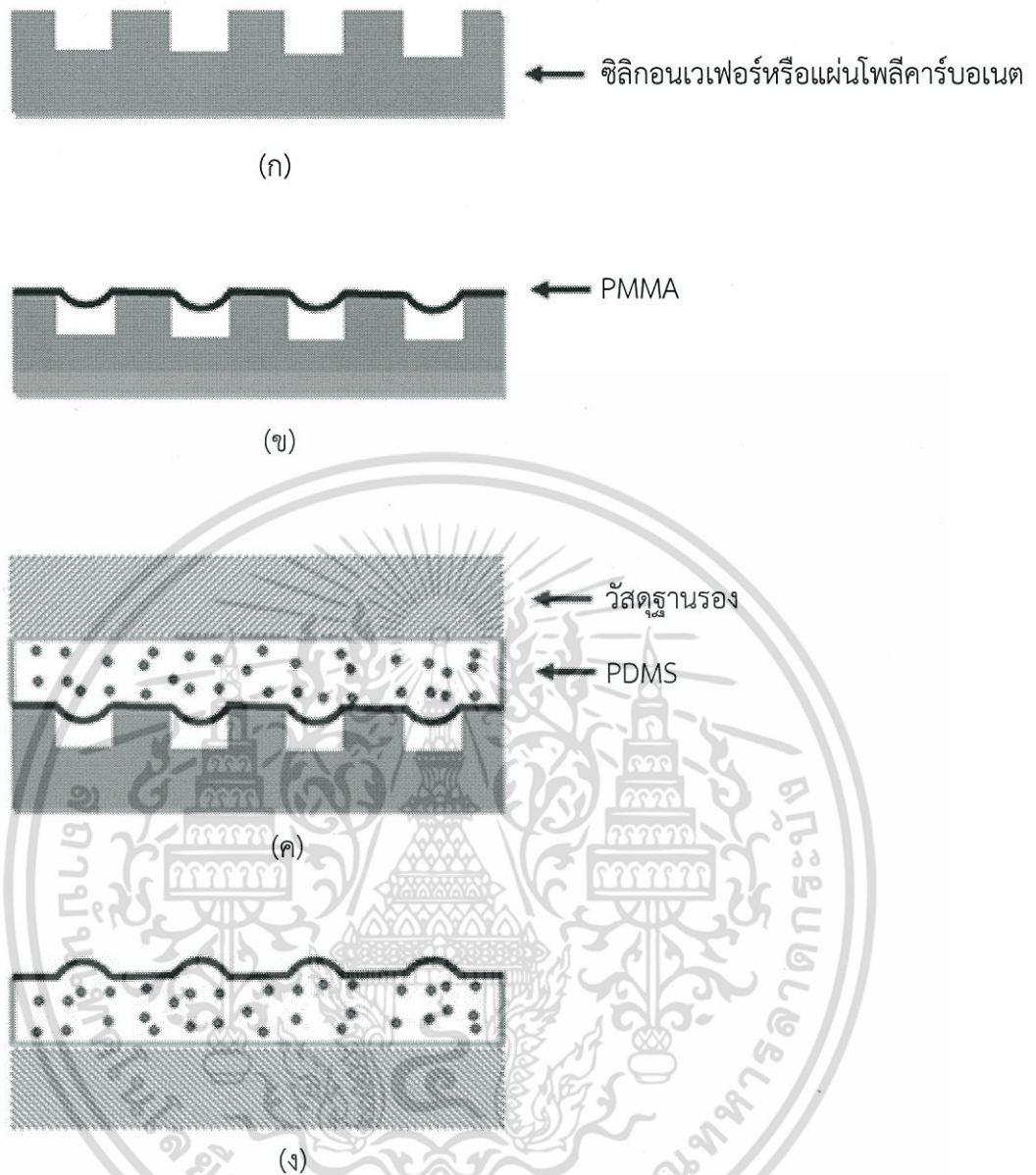
Other Properties					
Linear Thermal Expansion Coefficient ( $10^{-6}/\text{K}$ )	0.5	Abbe	67.87	Elastic Modulus (GPa)	72
Heat Conductivity (W/(m-K))	1.31	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.2	Shear Modulus (GPa)	31.2
Electrical Resistivity (20 °C) ( $10^{18} \Omega\cdot\text{cm}$ )	1.15	Poisson's Ratio	0.17	Dielectric constant	3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เทคนิคการสร้างไมโครเลนส์

การสร้างไมโครเลนส์จะสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การกัดเซาะด้วยไอออนที่ เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Ion Etching-RIE) [1] การอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) [2] การใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) [3] และ Spin casting [8] เป็นต้น สำหรับ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในสร้างไมโครเลนส์จากวัสดุโพลีเมอร์โดยอาศัยวิธี Spin casting และ Replica Molding วิธีนี้จัดว่าเป็นวิธีที่มีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ และ จากการสืบค้นข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีไมโครเลนส์ซึ่งผลิตจากวัสดุโพลีเมอร์จะมี น้ำหนักที่เบากว่าเลนส์ที่ผลิตจากเลนส์ที่ผลิตจากแก้วหรือซิลิกอน และถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเลนส์มีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จะช่วยเพิ่มค่า NA ของเลนส์ได้ โดย state-of-the-art ของไมโครเลนส์ที่ผลิตจากวัสดุโพลีเมอร์นี้จะมีค่า NA อยู่ที่ 0.24 หรือประมาณเกือบห้าเท่าของเลนส์ที่ผลิต จากแก้ว

การจัดสร้างไมโครเลนส์โดยวิธีการ Spin casting และ Replica Molding จะต้องมีวัสดุ แม่พิมพ์ซึ่งถูกกัดผิวให้มีลักษณะตามต้องการ ทั้งนี้ขึ้นกับรูปทรงของเลนส์ที่จะจัดสร้าง (รูปที่ 2.4(ก)) ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นแม่พิมพ์นี้อาจจะเป็นซิลิกอนเวเฟอร์หรือแผ่นโพลีคาร์บอนเนต [9-10] แม่พิมพ์ที่ จัดเตรียมจะถูกเคลือบด้วยฟิล์มของวัสดุโพลีเมอร์ PMMA (Polymethylmethacrylate) โดย อาศัยวิธีการ spin-coating (รูปที่ 2.4(ข)) หลังจากนั้นจะใช้วัสดุโพลีเมอร์ PDMS (Polydimethylsiloxane) ในการเคลือบทับบนชั้นของ PMMA และปิดทับบริเวณผิวหน้าชั้น PDMS ด้วยฐานรอง (substrate) เช่นแผ่นกระจกหรือพลาสติก (รูปที่ 2.4(ค)) หลังจากนั้นไปผ่าน กระบวนการอบด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม ชั้น PDMS จะสามารถถูกลอกออกจากชั้น PMMA ทำให้ได้ อาร์เรย์ของไมโครเลนส์ดังรูปที่ 2.4(ง)



รูปที่ 2.4 การสร้างไมโครเลนส์โดยอาศัยวิธี Spin casting และ Replica Molding

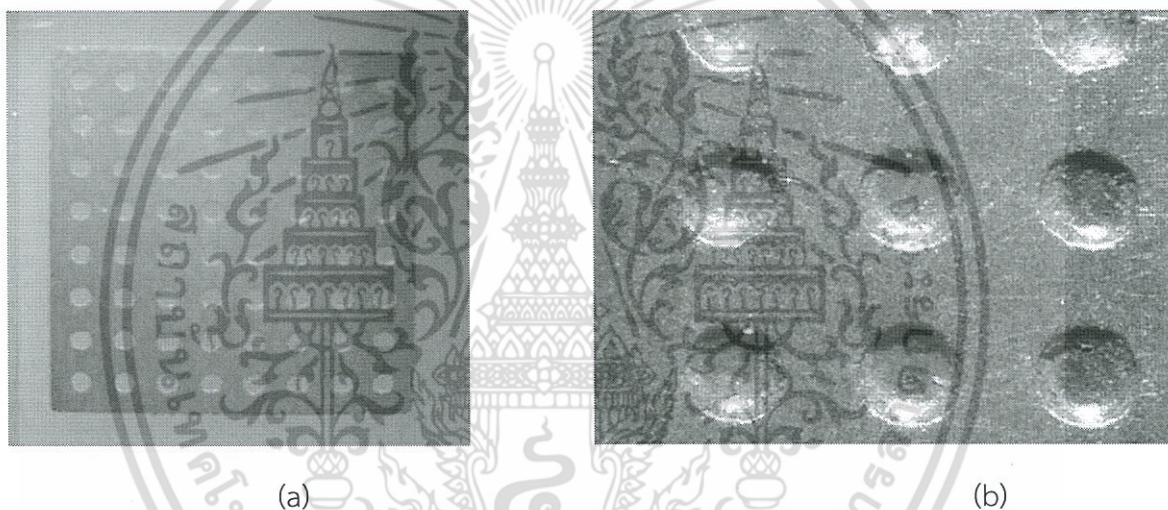
- (ก) วัสดุแม่พิมพ์
- (ข) วัสดุแม่พิมพ์เคลือบด้วยฟิล์มของวัสดุโพลีเมอร์ PMMA
- (ค) เคลือบทับบนชั้น PMMA ด้วยวัสดุ PDMS และปิดทับผิวหน้าด้วยฐานรอง
- (ง) ชั้น PDMS และฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ศึกษาและทดลองจัดเตรียมไมโครเลนส์ รวมถึงศึกษาและวัดสมบัติของเลนส์ที่จัดเตรียมขึ้น โดยไมโครเลนส์ที่จัดเตรียมได้จากงานวิจัยนี้สร้างจากแม่พิมพ์ 2 ชนิดคือ แม่พิมพ์ที่ทำลวดลายบนแผ่น PCB (รูปที่ 3.1a) และแม่พิมพ์ที่ทำลวดลายบนแผ่นทองแดง (รูปที่ 3.1b) โดยแม่พิมพ์ทั้งสองชนิดถูกจัดเตรียมด้วยกระบวนการ photolithography และนำมาสร้างไมโครเลนส์ด้วยวิธี Replica Molding สำหรับลวดลายและขนาดของเลนส์ที่ออกแบบบนแม่พิมพ์จะมีรูปทรงเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100-900 ไมครอน

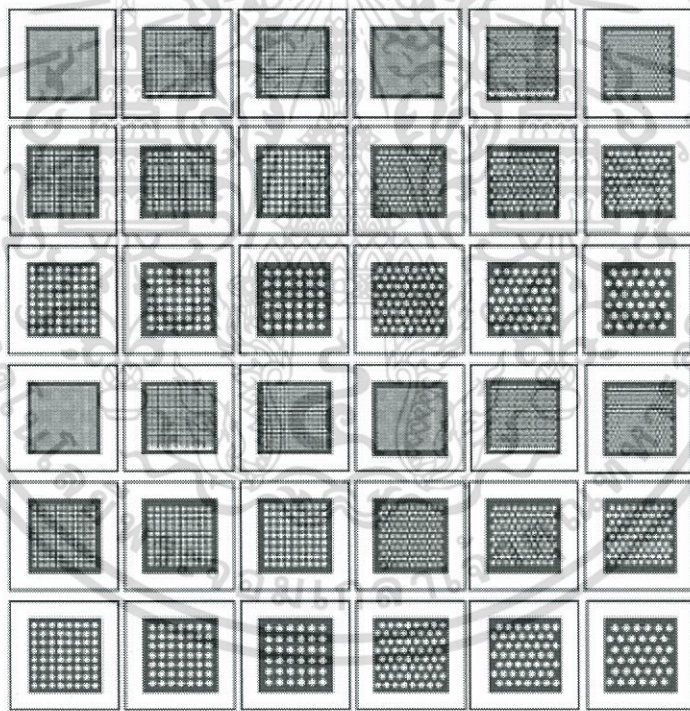
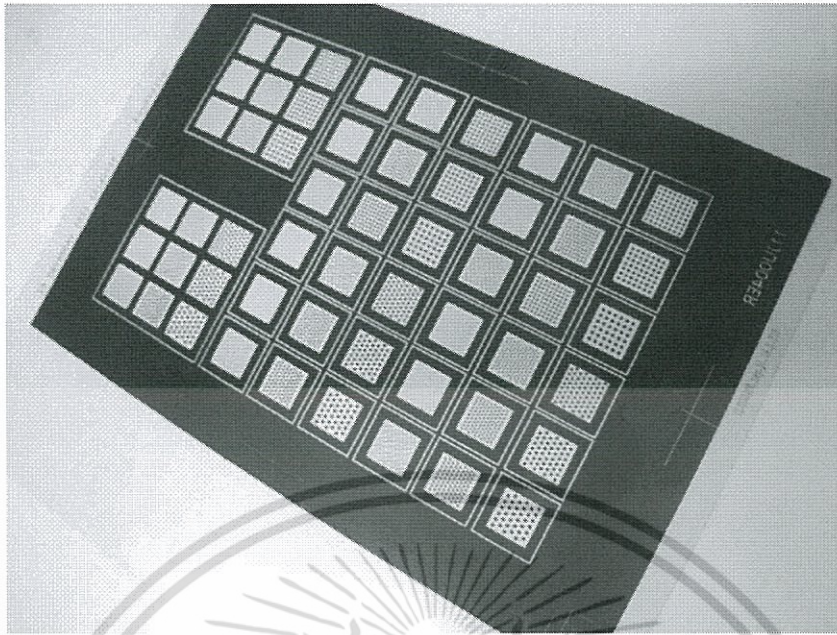


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น (a) แม่พิมพ์ PCB (b) แม่พิมพ์ทองแดง

#### 3.1 การจัดเตรียมแม่พิมพ์

##### 3.1.1 การออกแบบโครงสร้างเลนส์

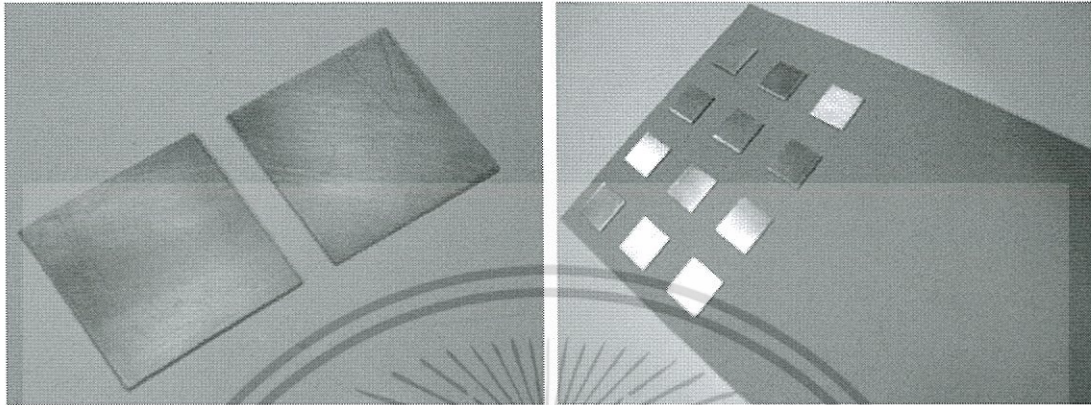
ไมโครเลนส์ได้ถูกออกแบบให้มีรูปทรงเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆตั้งแต่ 100-900 ไมครอน โดยอาศัยโปรแกรม Adobe Illustrator ไฟล์ต้นแบบจะถูกพิมพ์เป็นฟิล์มอาร์ทเวิร์คแบบ Positive และ Negative ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพแม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปไมโครเลนส์อาเรย์ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือแผ่น PCB (Printed Circuit Board) หรือแผ่นปรีนชนิดอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส (epoxy fiberglass) และแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.3)

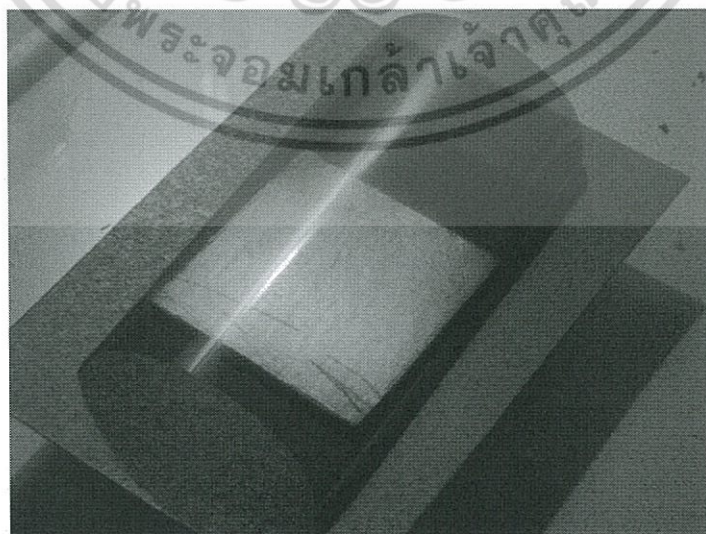


รูปที่ 3.3 (a) แสดงภาพของแผ่น PCB ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์  
(b) แสดงภาพของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์

### 3.1.2 การจัดสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์จากแผ่น PCB

แม่พิมพ์ไมโครเลนส์อาเรย์ถูกจัดเตรียมขึ้นโดยอาศัยเทคนิค Photolithography ซึ่งมีขั้นตอนในการจัดเตรียมดังนี้

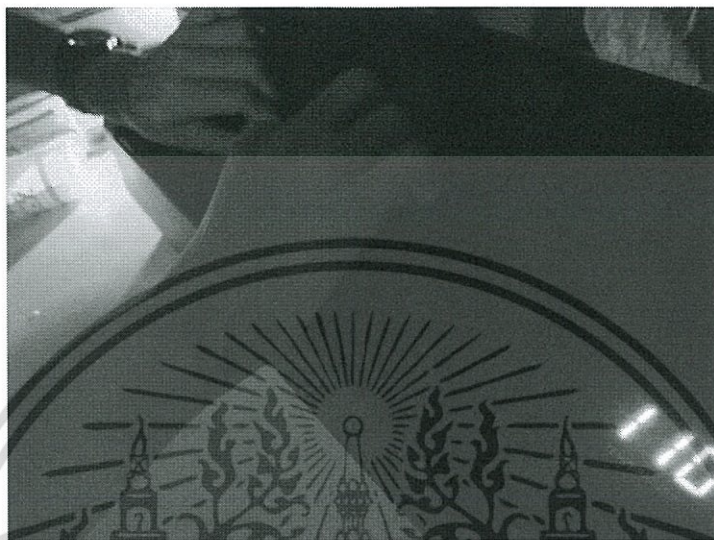
1. นำ Negative Dry Film มาติดบนแผ่น PCB โดยข้างล่างรองด้วยกระดาษแข็ง เพื่อให้สามารถดึงออกจากเครื่องรีดได้ง่าย ดังรูปที่ 3.4



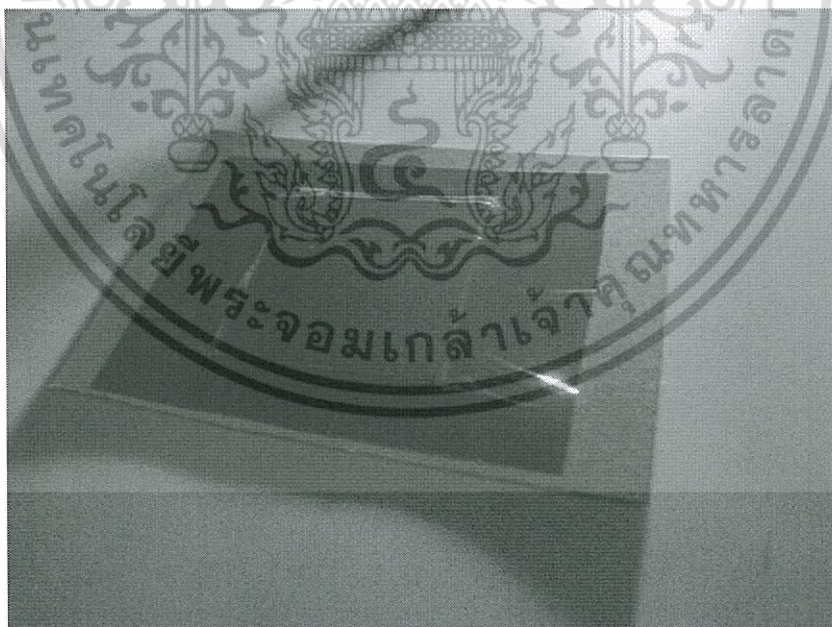
รูปที่ 3.4 ติด Negative Dry Film ลงบนแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีเชิงงานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำแผ่น PCB ที่ติดฟิล์มแล้วเข้าเครื่องรีดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.5  
แผ่น PCB ที่ผ่านกระบวนการรีดด้วยความร้อนจะมีลักษณะดังรูป 3.6
3. นำมาตัดฟิล์มที่เกินจากขอบ PCB ออกเพื่อความสวยงาม จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.7

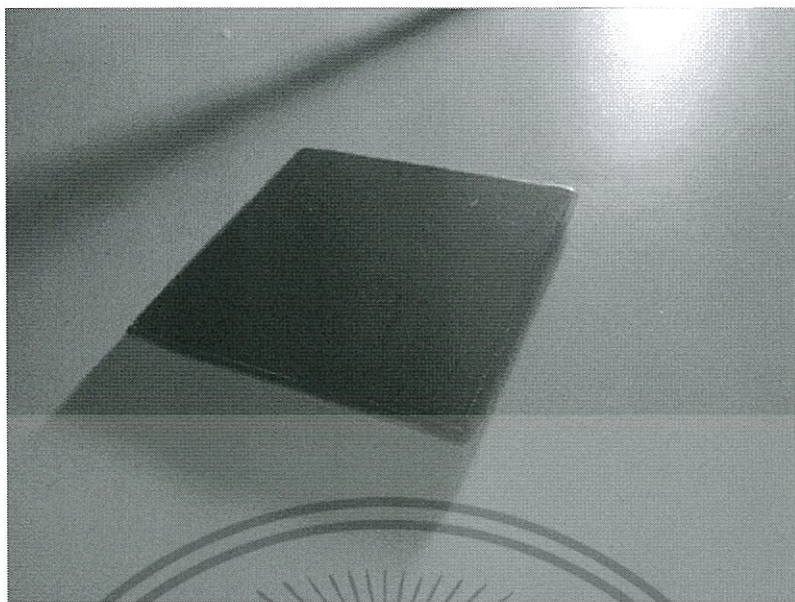


รูปที่ 3.5 นำแผ่น PCB เข้าเครื่องรีด



รูปที่ 3.6 แผ่น PCB หลังจากนำเข้าเครื่องรีดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผ่น PCB ที่มี Dry Film เคลือบที่ตัดขอบออกแล้ว

4. นำแผ่นฟิล์มอาร์ทเวิร์คแบบ Negative มาวางทาบบนแผ่น PCB ที่ถูกเคลือบ Dry Film จากนั้นนำไปฉายแสง UV ระยะเวลา 150 วินาที
5. นำแผ่น PCB ที่ฉายแสงแล้วมาลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บน Dry Film อีกชั้นหนึ่ง ออก แล้วนำมาล้างในน้ำยา Developer ที่เป็นส่วนผสมของ โซเดียมคาร์บอเนต 10 กรัม ผสมกับ น้ำสะอาด 1 ลิตร ใช้ฟองน้ำลูบไปมาทั่วแผ่นเพียงเบาๆ จนกระทั่ง เห็นลวดลายบนแผ่น PCB และไม่มี Dry Film ตกค้างอยู่ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 นำแผ่น PCB มาล้างในน้ำยา Developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เตรียมน้ำยากัด PCB ใส่ลงในภาชนะ จากนั้นใส่แผ่น PCB ลงไปแช่ในน้ำยาไปมา ดังรูปที่ 3.9 จนกระทั่งทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการถูกกัดออกจนหมด จากนั้นนำแผ่นไปล้างด้วยน้ำสะอาด



รูปที่ 3.9 นำแผ่น PCB ลงไปแช่ในน้ำยากัด

7. นำแผ่น PCB ที่ต้องการลอก Dry Film ออก แช่ลงในภาชนะที่ใส่ Acetone ที่ทิ้งไว้ สักครู่ แผ่น Dry Film จะอ่อนตัวและละลายออก ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นจึงนำไปทำความสะอาด จะได้แม่พิมพ์ไมโครเลนส์ที่ทำจากแผ่น PCB ที่พร้อมใช้งาน

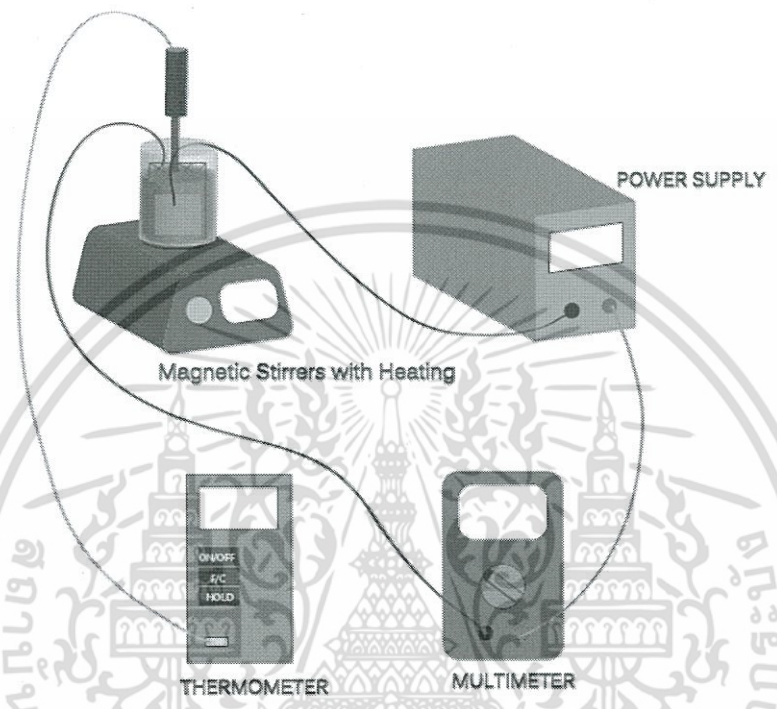


รูปที่ 3.10 นำแผ่น PCB ที่ต้องการลอก Dry Film ออก แช่ลงในภาชนะที่ใส่ Acetone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

เนื่องจากความลึกของหลุมของแม่พิมพ์ PCB ถูกจำกัดด้วยความหนาของทองแดง ดังนั้นเพื่อเพิ่มขนาดความลึกของหลุม ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและทดลองชุบนิเกิลเพื่อเพิ่มความลึกให้กับแม่พิมพ์ที่จัดเตรียมได้โดยอาศัยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 แสดงระบบการชุบนิเกิล

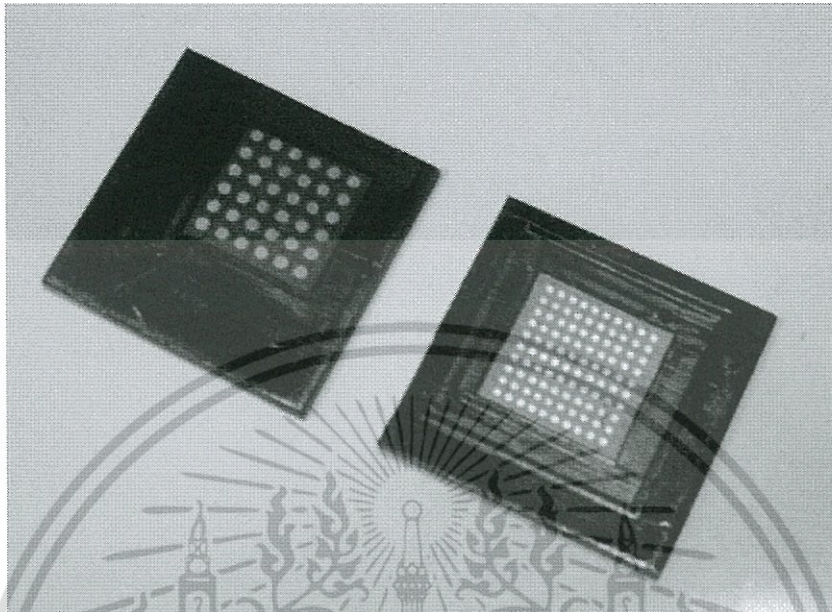
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือการเคลือบโลหะชนิดหนึ่งลงบนโลหะอีกชนิดหนึ่งซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยการเปลี่ยนสารละลายของสารที่ต้องการใช้ชุบให้อยู่ในรูปของไอออนบวก ซึ่งจะไปจับตัวเป็นชั้นบางๆ บนวัสดุโลหะที่ต้องการชุบ โดยกระบวนการชุบโลหะจะใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปที่แคโทด ทำให้ไอออนของโลหะในสารละลายจะรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นอะตอมของโลหะเกาะอยู่ที่แคโทดนั้น ขณะเดียวกันอะตอมของโลหะที่เป็นแอโนดจะเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นไอออนละลายลงในสารละลาย เพื่อชดเชยไอออนที่เสียไป ในการชุบโลหะไฟฟ้าจึงพบว่าโลหะที่เป็นแอโนดจะกร่อนไปและที่แคโทดจะมีโลหะมาเกาะเพิ่มขึ้น

### 3.1.4 การจัดสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์จากแผ่นทองแดง

ในการสร้างแม่พิมพ์ไมโครเลนส์โดยใช้แผ่นทองแดงจะใช้วิธีเดียวกับการสร้างโดยใช้แผ่น PCB แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่การใช้แผ่นทองแดงจะต้องมีการควบคุมแผ่นทองแดงไม่ให้โดนน้ำยากัดกัดทั้ง 2 ด้าน เนื่องจากจะต้องทำการวัดความลึกของหลุมหลังจากทำการกัดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำแผ่นทองแดงไปทำความสะอาด และนำมาสร้างลายด้วยเทคนิค Photolithography โดยใช้ Negative Dry Film Photoresist ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงภาพของแผ่นทองแดงที่ทำการขึ้นรูป

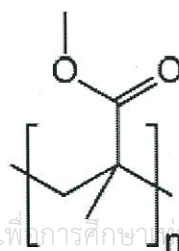
2. นำแผ่นทองแดงที่ขึ้นลายแล้ว 4 แผ่น มาทำการกัดและจับเวลา เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะได้ความลึกของหลุมตามต้องการ โดยนำแผ่นทองแดงมาวัดทุกๆ 30 นาที และแผ่นทองแดงที่ใช้มีขนาดหลุม 400, 600, 700 และ 900 ไมโครเมตร

### 3.2 การขึ้นรูปไมโครเลนส์อาร์เรย์

#### 3.2.1 วัสดุสำหรับสร้างไมโครเลนส์

ไมโครเลนส์ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นจากวัสดุ PMMA (Polymethyl-methacrylate) และ PDMS (Polydimethylsiloxane) โดยวิธีการ Spin casting และ Replica Molding ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 วัสดุทั้งสองมีสมบัติดังนี้

##### 3.2.1.1 PMMA (Polymethyl-methacrylate)

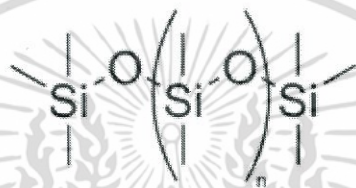


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ PMMA

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$(C_5O_2H_8)_n$
มวลโมเลกุล	varies
ความหนาแน่น	$1.18 \text{ g/cm}^3$
จุดหลอมเหลว	$160 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $320 \text{ }^\circ\text{F}$ )
ดัชนีหักเห	1.4914 ที่ความยาวคลื่น 587.6 nm.

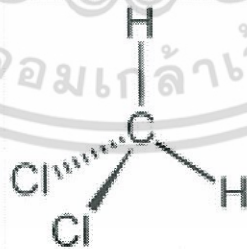
3.2.1.2 PDMS (Polydimethylsiloxane)



ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของ PDMS

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$(C_2H_6OSi)_n$
ความหนาแน่น	$965 \text{ kg m}^{-3}$
จุดหลอมเหลว	$-49.9 - 40^\circ\text{C}$
ดัชนีหักเห	1.4

3.2.1.3 DCM (Dichloromethane)



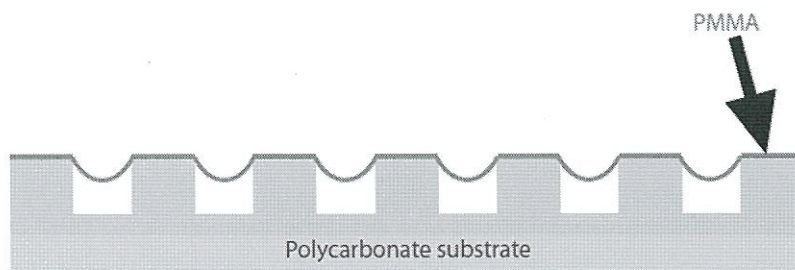
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของ DCM

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$CH_2Cl_2$
ความหนาแน่น	$1.3266 \text{ g/cm}^3$ , liquid
จุดหลอมเหลว	$-96.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $175.7 \text{ K}$ )
จุดเดือด	$40 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $312.8 \text{ K}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ทำการสร้างผิวหน้าของไมโครเลนส์ด้วย PMMA

เพื่อจัดเตรียมแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.13 ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมสารละลาย PMMA เพื่อนำไปเคลือบบนวัสดุแม่พิมพ์โดยมีขั้นตอนดังนี้



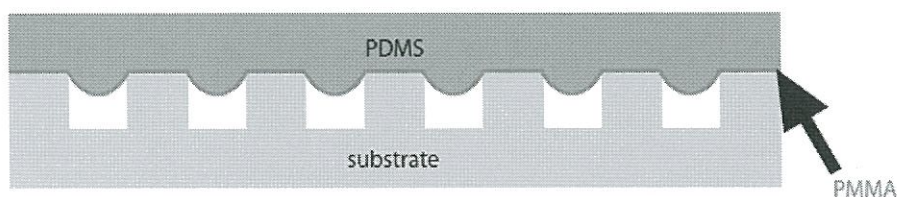
รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม PMMA

1. เตรียมสารละลาย PMMA โดยผสม PMMA 0.55 กรัมกับไดคลอโรมีเทน 1.5 มิลลิลิตร
2. นำสารที่เตรียมไว้ไปทำการละลายโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก ระยะเวลา 50 นาที
3. นำแม่พิมพ์ไปวางบนเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง เทสารละลาย PMMA ลงบนแม่พิมพ์ และทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3300 rpm

### 3.2.3 ทำการสร้างตัวเลนส์ด้วย PDMS

เพื่อจัดเตรียมเลนส์จากวัสดุ PDMS ดังรูปที่ 3.14 ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมสาร PDMS เพื่อนำไปเคลือบบนวัสดุแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ดังรูปที่ 3.13 โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารดังนี้

1. นำ Sylgard 184 Silicone Elastomer Base และ Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent ด้วยอัตราส่วน 2.0 : 0.2 ผสมให้เข้ากันและนำเข้าเครื่องดูดอากาศกระทั่งไม่มีฟองอากาศ
2. นำสาร PDMS ที่เตรียมไปเทบนแม่พิมพ์ที่มีชั้นฟิล์ม PMMA เคลือบอยู่
3. รอให้ PDMS แข็งตัวและทำการลอกเลนส์ออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.14 แม่พิมพ์ที่ถูกเคลือบด้วยชั้น PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 3.15 แสดงภาพของ (a) Sylgard 184 Silicone Elastomer Base  
(b) Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent



(a)



(b)

รูปที่ 3.16 (a) ภาพ PDMS ที่อยู่ในตู้สุญญากาศเพื่อนำฟองอากาศออก  
(b) ภาพแม่พิมพ์ที่มีชั้น PDMS

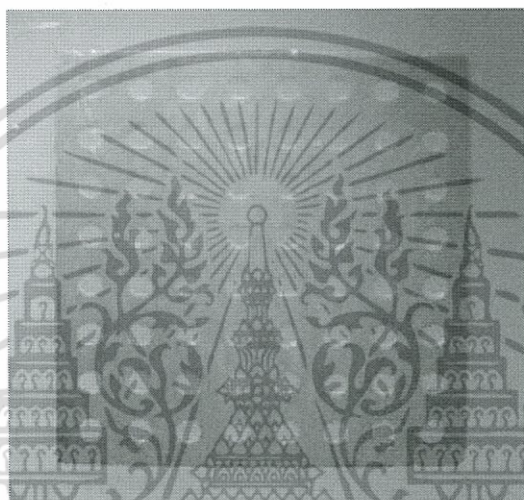
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

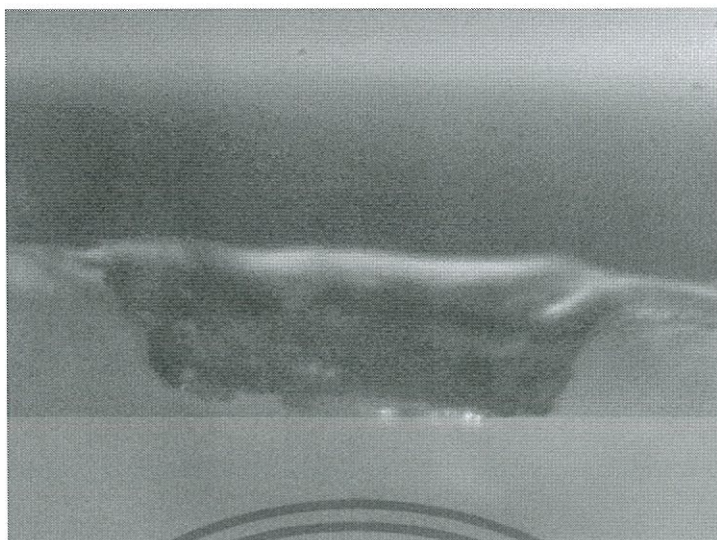
#### 4.1 ไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ PCB

ผลการจัดเตรียมแม่พิมพ์จากแผ่น PCB โดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อ 3.1 จะได้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 500-900 ไมครอน และความลึกของหลุมมีขนาดเท่ากับ 25 ไมครอน ซึ่งถูกจำกัดจากความหนาของทองแดงที่เคลือบบนแผ่นอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส



รูปที่ 4.1 แม่พิมพ์ PCB ที่จัดเตรียมได้

เมื่อทดลองนำแม่พิมพ์มาทดลองจัดเตรียมเลนส์โดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อ 3.2 โดยการเคลือบฟิล์ม PMMA บนแผ่นแม่พิมพ์ โดยใช้สารละลาย PMMA ที่เตรียมโดยการละลาย PMMA ใน DCM ด้วยอัตราส่วน PMMA 0.5 กรัม ต่อ DCM 1.5 มิลลิลิตร และนำไปเคลือบบนแม่พิมพ์ด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง จากนั้นจึงเทสาร PDMS ทับลงไปและทิ้งไว้ 1 วันเพื่อให้สารแข็งตัวก่อนที่จะทำการลอกออกจากแม่พิมพ์ พบว่าเลนส์ผิวหน้าของเลนส์ที่จัดเตรียมได้ไม่เป็นผิวโค้งและมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 ทั้งนี้เนื่องจากชั้น PMMA และ PDMS ไม่ได้แขวนตัวอยู่บนหลุมดังรูปที่ 3.12 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากสารที่เตรียมมีความหนืดน้อยและหลุมของแม่พิมพ์ตื้นมากจนสารละลายถูกเคลือบติดบริเวณก้นหลุมแทนที่จะไปแขวนตัวอยู่บนหลุม



(a)



(b)

รูปที่ 4.2 เลนส์ที่เตรียมได้จากแม่พิมพ์ PCB (a) จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5

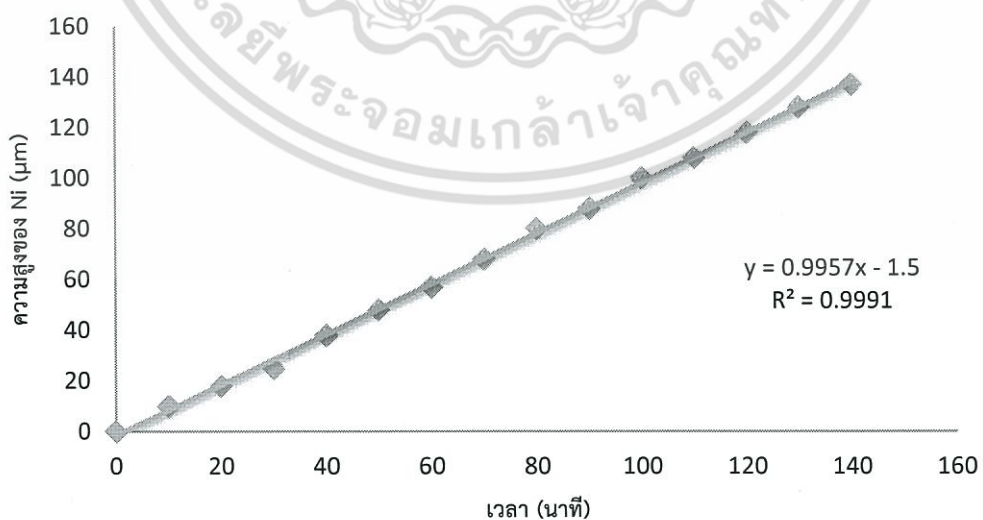
(b) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ดังนั้นเพื่อเพิ่มความลึกของหลุมผู้วิจัยจึงได้ทดลองชุบแม่พิมพ์ด้วยนิกเกิลโดยกระบวนการที่อธิบายในหัวข้อ 3.1.3 โดยผลการชุบแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการชุบนิเกิลบนแผ่น PCB

เวลา (นาที)	ความสูง Ni + PCB (mm)			Average	ความสูงของ แผ่น PCB (mm)	ความสูง ของ Ni (mm)	ความสูง ของ Ni ( $\mu\text{m}$ )
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	1.525	1.525	1.525	1.525	1.525	0.000	0.0
10	1.535	1.535	1.535	1.535	1.525	0.010	10.0
20	1.545	1.540	1.545	1.543	1.525	0.018	18.0
30	1.550	1.550	1.550	1.550	1.525	0.025	25.0
40	1.565	1.560	1.565	1.563	1.525	0.038	38.0
50	1.575	1.575	1.570	1.573	1.525	0.048	48.0
60	1.585	1.580	1.580	1.582	1.525	0.057	57.0
70	1.590	1.595	1.595	1.593	1.525	0.068	68.0
80	1.605	1.605	1.605	1.605	1.525	0.080	80.0
90	1.615	1.615	1.610	1.613	1.525	0.088	88.0
100	1.625	1.625	1.625	1.625	1.525	0.100	100.0
110	1.630	1.635	1.635	1.633	1.525	0.108	108.0
120	1.645	1.640	1.645	1.643	1.525	0.118	118.0
130	1.650	1.655	1.655	1.653	1.525	0.128	128.0
140	1.660	1.660	1.665	1.662	1.525	0.137	137.0



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นทองแดงและเวลาที่ใช้ในการกัดแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการชุบและความหนาของนิกเกิลที่เคลือบบนวัสดุทองแดง ดังรูปที่ 4.3 พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามจากการสังเกตโครงสร้างของหลุมที่ผ่านกระบวนการชุบนิกเกิลพบว่าจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมลดลงและมีลักษณะขรุขระบริเวณขอบของหลุม ทั้งนี้มีสาเหตุจากการที่นิกเกิลมาเกาะตัวในบริเวณขอบด้านข้างภายในหลุมและมีการเกาะตัวไม่สม่ำเสมอ

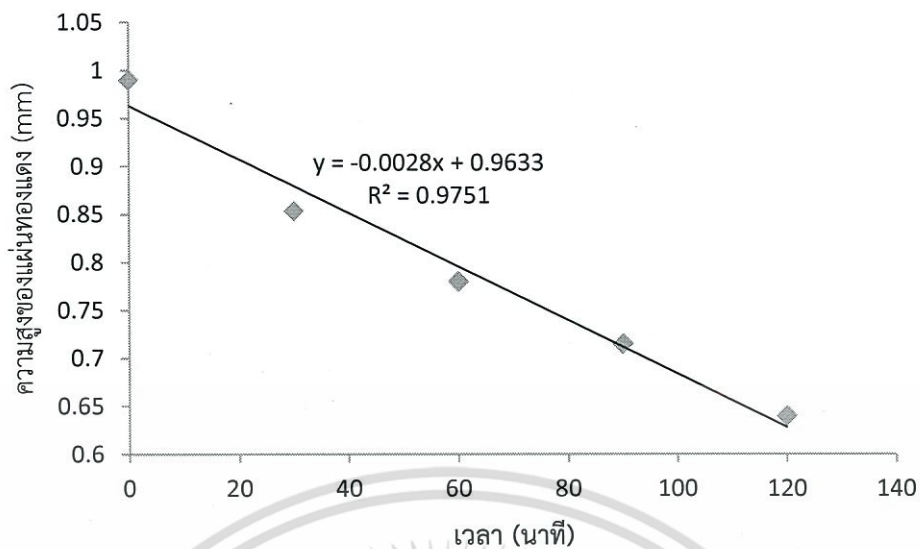
#### 4.2 ไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ทองแดง

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของขนาดหลุมที่เตรียมจากแผ่น PCB รวมถึงลดกระบวนการชุบโลหะเพื่อเพิ่มความลึกของหลุม ผู้วิจัยจึงทดลองเปลี่ยนวัสดุที่ใช้จากการทำแม่พิมพ์จากแผ่น PCB เป็นแผ่นทองแดง โดยแผ่นทองแดงที่หาซื้อจากท้องตลาดเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้มีความหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และวิธีการสร้างไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ทองแดงจะใช้วิธีเดียวกับไมโครเลนส์จากแม่พิมพ์ PCB ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมแม่พิมพ์จากกระบวนการในหัวข้อ 3.1 โดยทดลองวัดความหนาของแผ่นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความลึกของหลุมทุกๆ 30 นาที จะได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการกัดแผ่นทองแดงและวัดความสูงของแผ่นทองแดงที่ระยะเวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	ความหนาของแผ่นทองแดง (mm)			เฉลี่ย (mm)	ความลึกหลังจาก กัด (mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.97	1	1	0.990	0.000
30	0.85	0.855	0.855	0.853	0.137
60	0.78	0.78	0.78	0.780	0.210
90	0.715	0.715	0.715	0.715	0.275
120	0.64	0.64	0.64	0.640	0.350

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์จะให้ผลดังรูปที่ 4.4 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าความหนาของแผ่นมีขนาดลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการกัดแผ่นทองแดงเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความลึกของหลุมมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการกัดแผ่นเพิ่มขึ้น โดยขนาดความหนาของทองแดงจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับเวลา



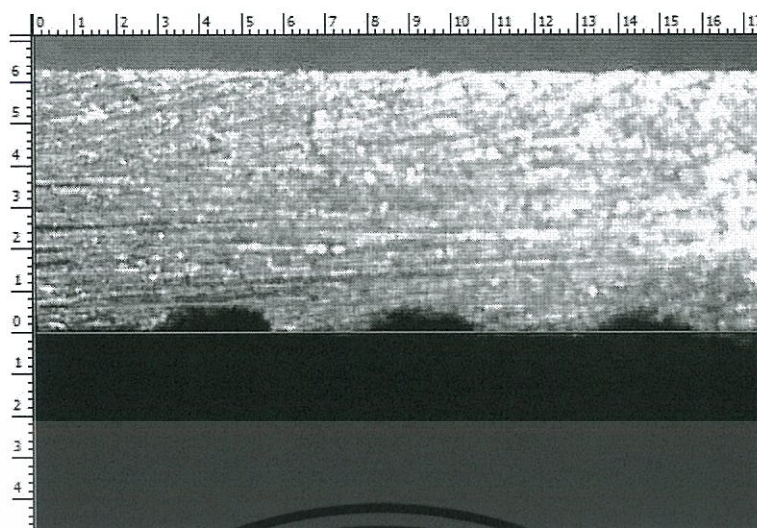
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดกับความหนาของแผ่นทองแดง

ตัวอย่างของแม่พิมพ์ที่สร้างจากแผ่นทองแดงที่สร้างจากฟิล์มต้นแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 500 ไมครอน หลังจากผ่านกระบวนการกัดด้วยน้ำยากัดทองแดงเป็นเวลานาน 60 นาทีที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.5



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

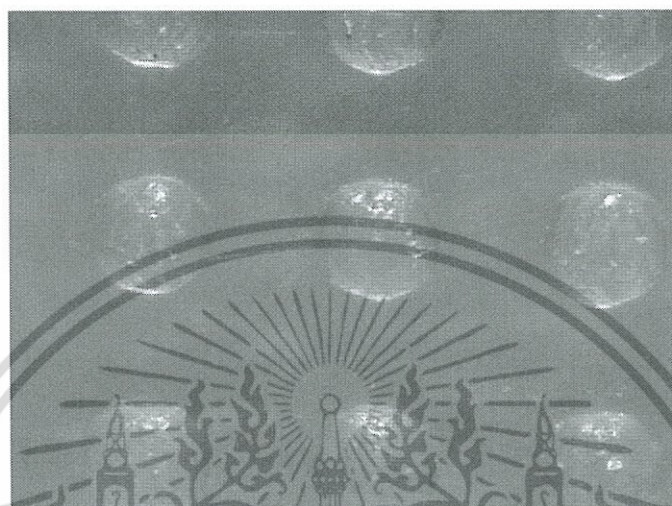


(b)

รูปที่ 4.5 แม่พิมพ์จากแผ่นทองแดงที่สร้างจากฟิล์มต้นแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 500 ไมครอน (a) ภาพถ่ายจากด้านผิวหน้า (b) ภาพถ่ายจากด้านข้าง

สำหรับการสร้างเลนส์จากแม่พิมพ์ทองแดงจะเตรียมโดยการเคลือบฟิล์ม PMMA บนแผ่นแม่พิมพ์ ก่อนที่จะเทสาร PDMS ตามเพื่อขึ้นรูปเลนส์ สารละลาย PMMA ที่ใช้ในการเคลือบผิวหน้าแม่พิมพ์จะเตรียมโดยการละลาย PMMA ใน DCM ด้วยอัตราส่วน PMMA 0.5 กรัม ต่อ DCM 1.5 มิลลิลิตร และนำไปเคลือบบนแม่พิมพ์ด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง สำหรับสาร PDMS จะถูกเท ทับลงไปและทิ้งไว้ 1 วันเพื่อให้สารแข็งตัวก่อน และจึงทำการลอกออกจากแม่พิมพ์ สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดเตรียมไมโครเลนส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 500, 700 และ 900 ไมครอน ตามลำดับ

รูปที่ 4.6-4.8 คือภาพถ่ายด้านบนและด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 ที่เตรียมจากแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500, 700 และ 900 ไมครอน ที่มีความลึกของ หลุมแม่พิมพ์มีขนาดเท่ากับ 250, 181 และ 250 ไมครอน ตามลำดับ และรูปที่ 4.9 คือภาพถ่ายของ เลนส์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



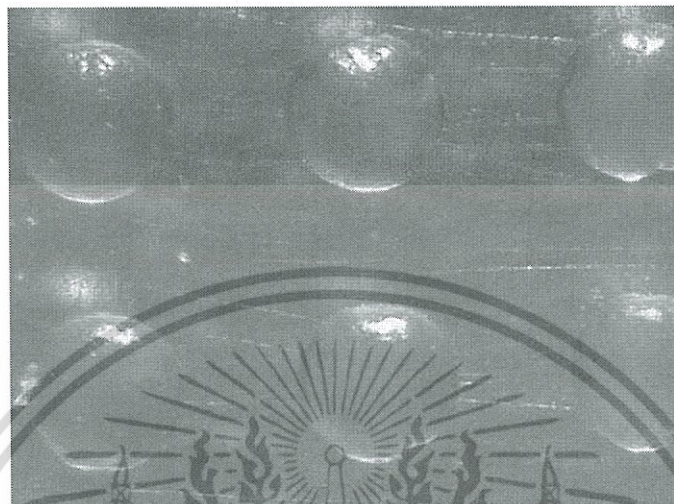
(a)



(b)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 500 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



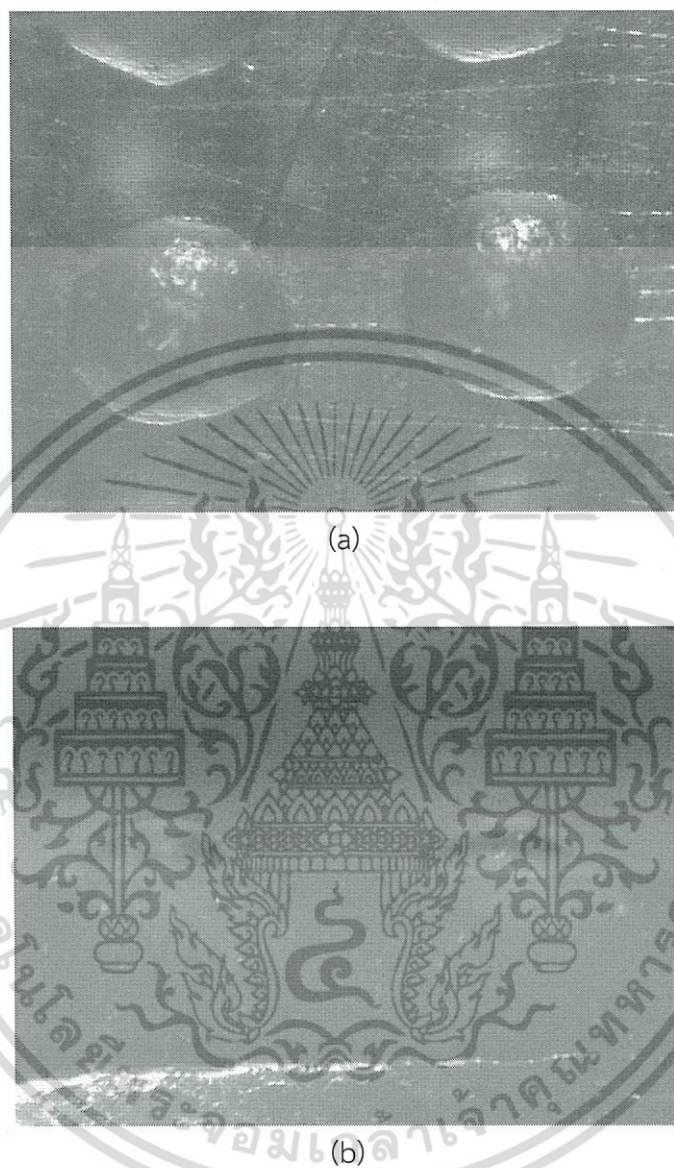
(a)



(b)

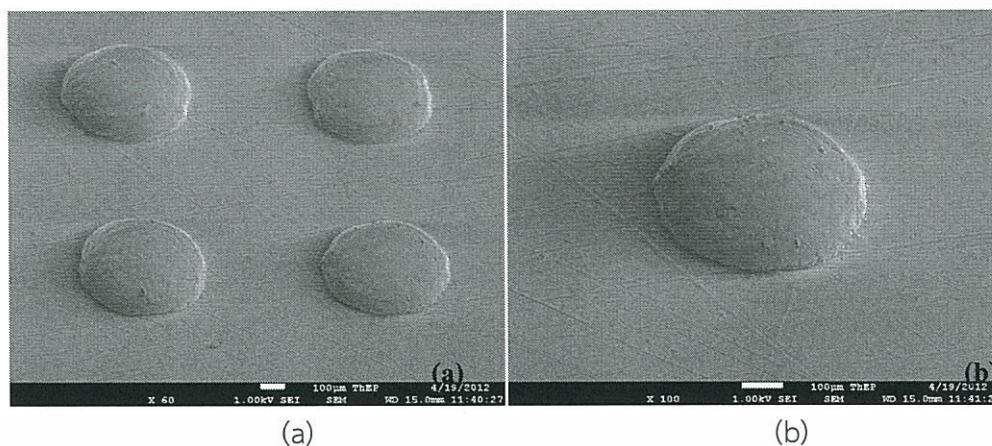
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 700 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย (a) ด้านบนและ (b) ด้านข้างของเลนส์จากกล้องจุลทรรศน์ Digital Blue QX5 เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 900 ไมครอน

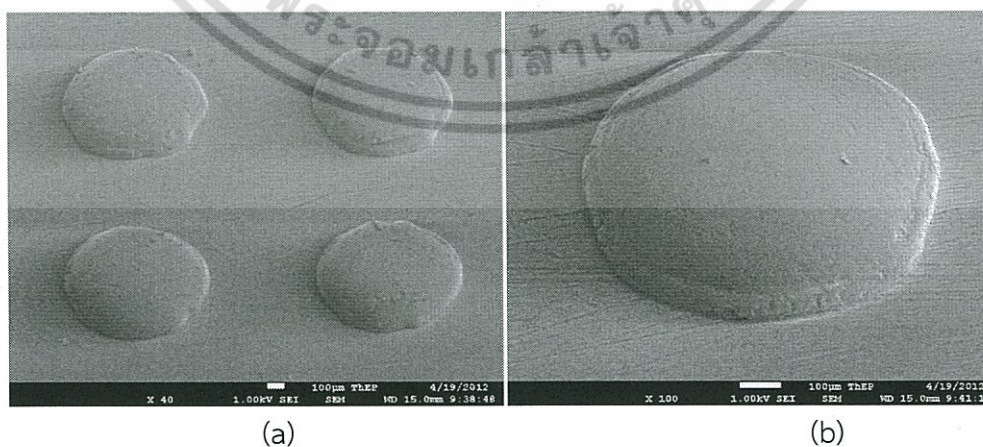
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 500 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 60 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 700 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มต้นแบบขนาด 900 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) กำลังขยาย 40 เท่า (b) กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายพบว่าเลนส์ที่เตรียมได้มีลักษณะผิวหน้าเป็นผิวโค้งทรงกลม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกต บริเวณขอบของเลนส์จะเห็นว่ารูปทรงยังไม่เป็นทรงกลมสม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากรูปทรงของ แม่พิมพ์ต้นแบบที่ผ่านกระบวนการกัดผิวหน้ายังไม่เรียบมากพอ ซึ่งถ้าพัฒนาเงื่อนไขในการจัดเตรียม แม่พิมพ์ให้เหมาะสม ก็จะทำให้เลนส์ที่เตรียมได้มีรูปทรงที่ตามต้องการได้

#### 4.3 การวัดสมบัติต่างๆของไมโครเลนส์

สมบัติที่สำคัญของเลนส์ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงจากฐานถึงสัน เลนส์หรือ SAG รัศมีความโค้งและระยะโฟกัสของเลนส์

##### 4.3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์

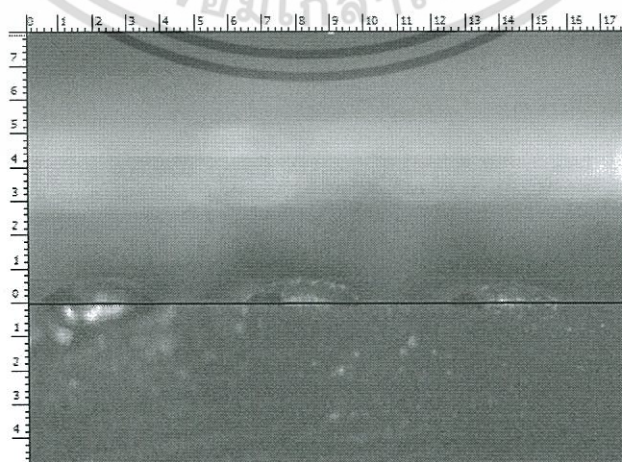
การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์จะอาศัยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ Olympus SZ11 ซึ่งมีสเกลติดตั้งภายในกล้อง การอ่านสเกลที่ปรากฏและการทราบกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา และ เลนส์ใกล้วัตถุจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์

จากผลการวัดพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ที่เตรียมจากฟิล์มแม่พิมพ์ขนาด 500, 700 และ 900 ไมครอน มีค่าเท่ากับ 514, 771 และ 942 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนพบว่ามีค่าเท่ากับ 2.8 %, 10.14 % และ 4.6 % ตามลำดับ

##### 4.3.2 ความสูงจากฐานถึงสันเลนส์หรือค่า SAG ของเลนส์

ความสูงของเลนส์จะถูกพิจารณาจากภาพถ่ายตัดขวาง และนำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Adobe Illustrator โดยอาศัยการคำนวณ

- ไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 ไมโครเมตร

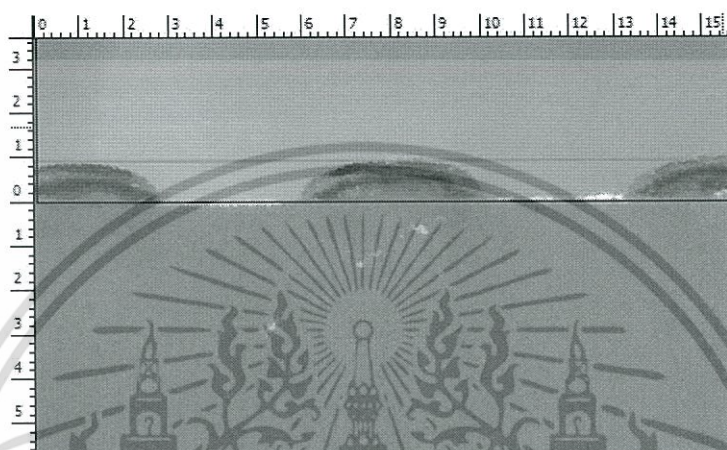


รูปที่ 4.12 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นาเบไซบระโฮชนดานการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

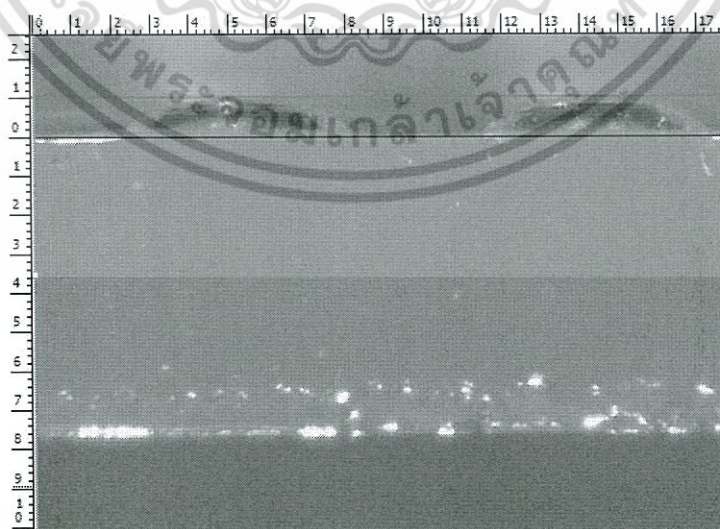
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้กำลังขยาย 60 เท่าดังรูปที่ 4.12 สามารถอ่านค่าความสูงของเลนส์จากสเกลได้เท่ากับ 0.7 cm ดังนั้นถ้าพิจารณากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ 116.6 ไมครอน (คำนวณจาก  $\frac{0.7 \text{ cm}}{60} = 116.6 \mu\text{m}$ )

- ไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 ไมโครเมตร

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้กำลังขยาย 60 เท่าดังรูปที่ 4.13 สามารถอ่านค่าความสูงของเลนส์จากสเกลได้เท่ากับ 0.9 cm ดังนั้นถ้าพิจารณากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ 150 ไมครอน ( $\frac{0.9 \text{ cm}}{60} = 150 \mu\text{m}$ )



รูปที่ 4.14 การเทียบสเกลของของไมโครเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้กำลังขยาย 60 เท่าดังรูปที่ 4.14 สามารถอ่านค่าความสูงของเลนส์จากสเกลได้เท่ากับ 1.0 cm ดังนั้นถ้าพิจารณากำลังขยาย 1 เท่า จะได้ความสูงของไมโครเลนส์ประมาณ 166 ไมครอน ( $\frac{1.0 \text{ cm}}{60} = 166 \mu\text{m}$ )

#### 4.3.3 รัศมีความโค้ง

สำหรับการพิจารณารัศมีความโค้งของเลนส์ (ROC) ที่จัดเตรียมได้จะอาศัยการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.3

$$ROC = \frac{h^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2h}$$

เนื่องจากความสูงของเลนส์ (h) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) คือตัวแปรที่ทราบค่าแล้วจากการผลการวัดในหัวข้อก่อนหน้านี้ดังนั้นเมื่อแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ในสมการ จะสามารถหาค่า ROC ได้จากการคำนวณพบว่าค่า Rc ของเลนส์ที่เตรียมได้มีขนาดดังนี้

- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 514 ไมครอน มีค่า ROC เท่ากับ 326 ไมครอน
- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 771 ไมครอน มีค่า ROC เท่ากับ 483.3 ไมครอน
- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 942 ไมครอน มีค่า ROC เท่ากับ 692.9 ไมครอน

#### 4.3.4 ระยะโฟกัสของเลนส์

สำหรับการพิจารณาระยะโฟกัสของเลนส์จะกระทำใน 2 วิธี โดยวิธีการแรกจะอาศัยการคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 2.1

$$f = \frac{ROC}{n - 1}$$

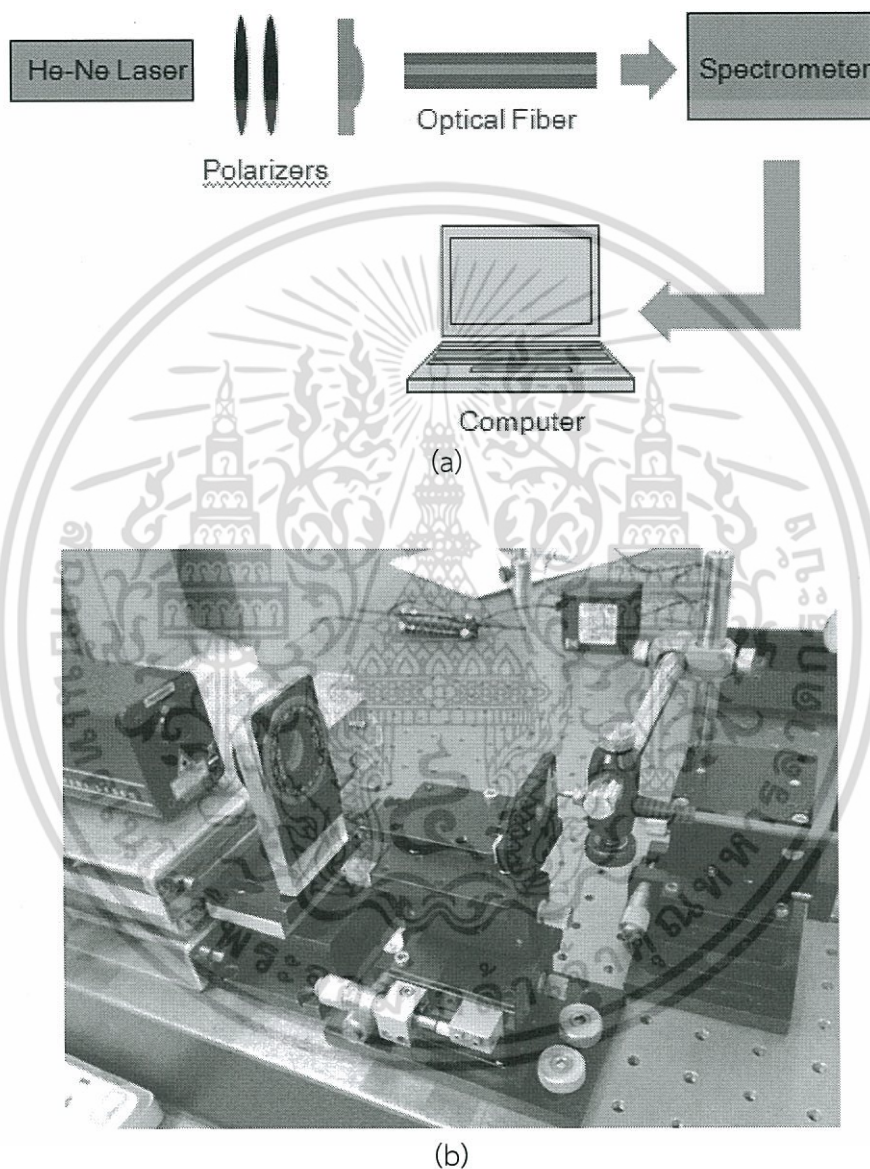
โดย ROC คือรัศมีความโค้งและ n คือค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุ PDMS มีค่าประมาณ 1.4 จากการแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปพบว่าระยะโฟกัสของเลนส์ (f) มีค่าดังนี้

- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 514 ไมครอน มีค่า f เท่ากับ 815 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 771 ไมครอน มีค่า  $f$  เท่ากับ 1.21 มิลลิเมตร
- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 942 ไมครอน มีค่า  $f$  เท่ากับ 1.73 มิลลิเมตร

สำหรับการหาระยะโพกัสอีกวิธีจะทำโดยการจัดเตรียมระบบวัดดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การจัดอุปกรณ์เพื่อวัดหาระยะโพกัสของเลนส์ (a) ไดอะแกรม (b) ระบบจริง

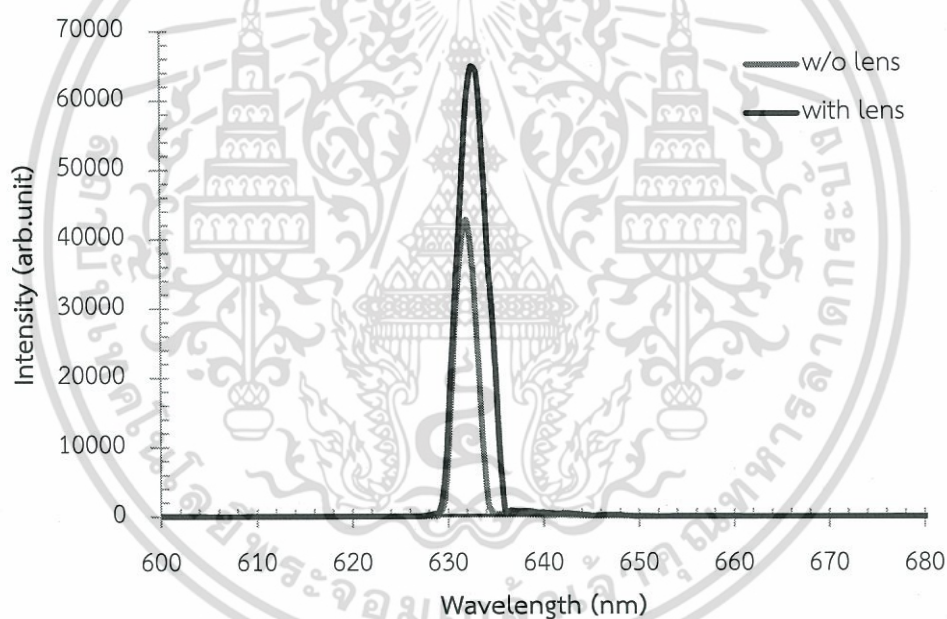
การหาระยะโพกัสจะกระทำโดยการปรับเลื่อนสายใยแก้วนำแสงห่างออกจากจุดยอดของเลนส์และสังเกตดูพีคของสเปกตรัมแสงว่ามีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใด ซึ่งผลต่างของระยะทางที่ตั้งต้นและระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายที่ให้ค่าพีคสูงสุดจะเป็นระยะโฟกัสของเลนส์ จากผลการวัดพบว่าระยะโฟกัสของเลนส์ขนาดต่างๆมีค่าดังนี้

- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 514 ไมครอน มีค่า  $f$  เท่ากับ 815 ไมครอน
- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 771 ไมครอน มีค่า  $f$  เท่ากับ 1.21 มิลลิเมตร
- เลนส์เส้นผ่านศูนย์กลาง 942 ไมครอน มีค่า  $f$  เท่ากับ 1.68 มิลลิเมตร

นอกจากนี้จากผลของสเปกตรัมที่วัดได้ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าระบบวัดแสงที่มีเลนส์ติดตั้งอยู่จะให้ค่าความเข้มแสงสูงกว่าระบบวัดที่ไม่มีเลนส์อีกด้วย ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าเลนส์ที่จัดเตรียมขึ้นมาสามารถใช้รวมแสงให้กับระบบรับแสงได้จริง



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมแสงที่วัดได้จากระบบที่มีไมโครเลนส์และไม่มีไมโครเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษา การสร้างและทดสอบสมบัติต่างๆของไมโครเลนส์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่จัดสร้างจากวัสดุ 2 ชนิด คือ แผ่น PCB และแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร จากผลการดำเนินงานพบว่าแม่พิมพ์ที่สร้างแผ่น PCB ไม่เหมาะสมในการนำมาจัดสร้างเลนส์เนื่องจากชั้น PMMA และ PDMS ไม่ได้แขวนตัวอยู่บนหลุมทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากความลึกของหลุมของแม่พิมพ์ถูกจำกัดด้วยความหนาของชั้นทองแดงและหลุมที่เตรียมมีความลึกไม่เพียงพอจึงทำให้สารละลายถูกเคลือบติดบริเวณก้นหลุมแทนที่จะไปแขวนตัวอยู่บนหลุม สำหรับแม่พิมพ์ที่สร้างจากแผ่นทองแดงจะสามารถนำมาใช้ในการจัดสร้างเลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆกันได้โดยให้ผิวหน้าเลนส์ที่มีผิวโค้ง

จากผลการจัดเตรียมเลนส์จากแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ 3 ขนาดคือ 500, 700 และ 900 ไมครอนและทดสอบสมบัติต่างๆของเลนส์จะให้ผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการจัดเตรียมเลนส์จากแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ 3 ขนาด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ที่ออกแบบ ( $\mu\text{m}$ )	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ที่เตรียมได้ ( $\mu\text{m}$ )	SAG ( $\mu\text{m}$ )	ROC ( $\mu\text{m}$ )	ระยะโฟกัส		
				คำนวณ (mm)	ทดลอง (mm)	คลาดเคลื่อน (%)
500	514	116.6	326	0.815	0.778	4.54
700	771	150	483.3	1.21	1.15	4.96
900	942	166	692.9	1.73	1.68	2.89

หมายเหตุ: SAG คือความสูงจากฐานถึงสันเลนส์

ROC คือรัศมีความโค้ง

จากการทดลองนำเลนส์มาติดตั้งกับระบบวัดแสง พบว่าสเปกตรัมแสงที่วัดได้จากระบบวัดที่ไม่มีไมโครเลนส์ติดตั้งอยู่จะให้ค่าความเข้มแสงสูงกว่าระบบวัดที่ไม่มีไมโครเลนส์เลนส์อีกด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเลนส์ที่จัดเตรียมขึ้นมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อรวมแสงและเพิ่มความเข้มให้กับระบบรับแสงได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการดำเนินงานจนถึงปัจจุบันพบว่าเลนส์ที่จัดเตรียมได้ยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 500 ไมครอน การจัดเตรียมเลนส์ที่มีขนาดเล็กยังไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคที่ใช้ในการจัดเตรียมแม่พิมพ์ กล่าวคือในกระบวนการจัดเตรียมแม่พิมพ์ทองแดงจะต้องผ่านกระบวนการกัดแผ่นทองแดงโดยอาศัยกลไกทางเคมีซึ่งควบคุมกลไกการกัดได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในการจัดเตรียมแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 500 ไมครอน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาเทคนิคในการจัดเตรียม รวมถึงศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อจัดเตรียมแม่พิมพ์ให้มีขนาดเล็กตามต้องการ

2. การวัดค่า SAG และรัศมีความโค้งของเลนส์ยังต้องอาศัยการคำนวณจากภาพถ่ายตัดขวาง ซึ่งอาจจะให้ผลที่คลาดเคลื่อน เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำขึ้นอาจจะต้องทดลองวัดโดยอาศัยเครื่องมืออื่นๆ เช่น เครื่อง profilometer ซึ่งผลการวัดที่ได้นอกจะบอกถึงค่า SAG และรัศมีความโค้งของเลนส์แล้วยังสามารถบอกถึงความเรียบของพื้นผิวของเลนส์ที่เตรียมได้อีกด้วย



## เอกสารอ้างอิง

- [1] M.B. Stern, and T.R. Jay, “Dry etching for coherent refractive microlens arrays”, *Optical Engin.* 33, 3547 (1994).
- [2] M.T. Gale, “Replication techniques for diffractive optical elements”, *Microelectronic Engineering* 34, 321 (1997).
- [3] B.-K. Lee, D. S. Kim, T. H. Kwon, “Replication of microlens arrays by injection molding”, *Microsystem Technologies*, 10 531–535 (2004).
- [4] [http://www.evgroup.com/en/solutions/photovoltaics/micro\\_optics/](http://www.evgroup.com/en/solutions/photovoltaics/micro_optics/) (18 March 2011).
- [5] <http://www.jiscdigitalmedia.ac.uk> (18 March 2011).
- [6] <http://www.crsLtd.com/research-topics/hbm/discussion.html> (18 March 2011).
- [7] K. Tvingstedt, S. Dal Zilio, O. Inganäs, M. Tormen, Trapping light with micro lenses in thin film organic photovoltaic cells, *Optics Express*, 21608-21615 (2008).
- [8] C. Chang, S. Yang, L. Huang and T. Jeng, “A novel method for rapid fabrication of microlens arrays using micro-transfer molding with soft mold” *J. Micromech. Microeng.* 16, 999 (2006).
- [9] T. Shih, C. Chen, J. Ho, F. Chuang, “Fabrication of PDMS (polydimethylsiloxane) microlens and diffuser using replica molding”, *Microelectronic Engineering* 83, 2499-2503 (2006).
- [10] G.A. Cirino, A.C. Arruda, R.D. Mansano, P. Verdonck, L.G. Neto, “Fabrication of PMMA microlenses using a micromachined silicon mould”, [http://www.lsi.usp.br/~giuseppe/SBmicro2002\\_rev.pdf](http://www.lsi.usp.br/~giuseppe/SBmicro2002_rev.pdf) (18 March 2011)
- [11] “Microlenses Arrays. Singlets”, *LINOS-Catalog*, pp.36-41, USA, 01\_036\_041\_e05.pdf, 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การสร้างไมโครเลนส์



ภัทริยา กิตติเดชาชาญ<sup>1</sup> เกศรินทร์ คงนวล<sup>1</sup> จุฑารัตน์ เครือน้ำคำ<sup>1</sup> ธัญรัช ชัชวาลย์<sup>1</sup> และ บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Email: [kkpattar@kmitl.ac.th](mailto:kkpattar@kmitl.ac.th)

ไมโครเลนส์ (Microlens) หรือเลนส์จิวคือเลนส์ขนาดเล็กมากและมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหนึ่งมิลลิเมตร เลนส์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้งานในหลายด้านเช่น ใช้รวมแสงในระบบการสื่อสารด้วยสายใยแก้วนำแสง ใช้รวมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด ใช้รวมแสงให้กับเซนเซอร์วัดแสง ใช้รวมแสงให้กับจอแสดงผลคริสตัลเหลว (LCD : Liquid Crystal Display) ที่ใช้ในดิจิตอลโปรเจคเตอร์ หรือแม้กระทั่งรวมแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เป็นต้น [1-3]

## การทดลอง

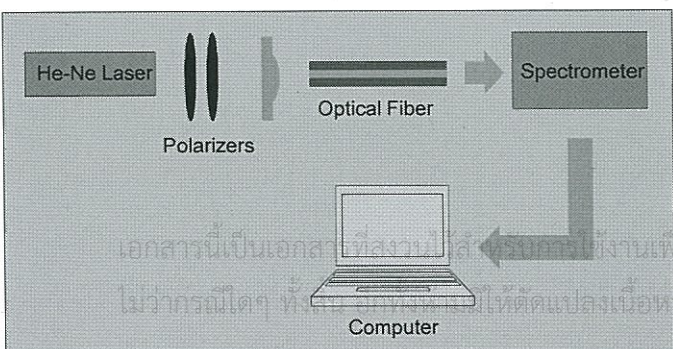
เลนส์ที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยทำจากวัสดุโพลิเมอร์และจัดเตรียมโดยอาศัยเทคนิคการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ (Replica Molding) วัสดุที่ใช้เป็นต้นแบบของเลนส์คือแผ่นวงจรพิมพ์หรือพีซีบี (Print circuit board, PCB) และแผ่นทองแดง แม่พิมพ์ถูกออกแบบให้เลนส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100-900 ไมครอน และถูกสร้างลวดลายโดยอาศัยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

สมบัติที่สำคัญของเลนส์ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ความสูงของผิวเลนส์หรือค่า SAG (s) ถูกวัดโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ค่ารัศมีความโค้ง (R) และความยาวโฟกัส (f) ถูกคำนวณโดยอาศัยสมการ

$$R = \frac{s}{2} + \frac{D^2}{8 \cdot s} \dots\dots\dots(1)$$

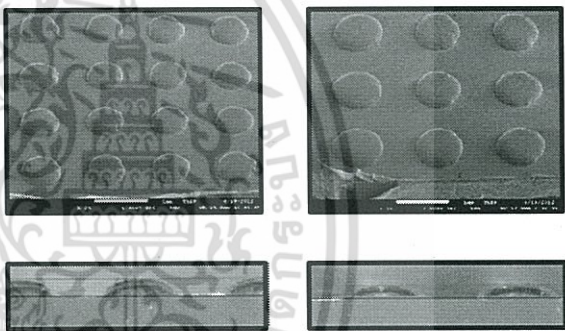
$$f = \frac{R}{n-1} \dots\dots\dots(2)$$

สำหรับการทดลองเพื่อวัดค่าความยาวโฟกัสของเลนส์และการทดสอบสมบัติในการรวมแสงของเลนส์จะอาศัยระบบในรูปที่ 1



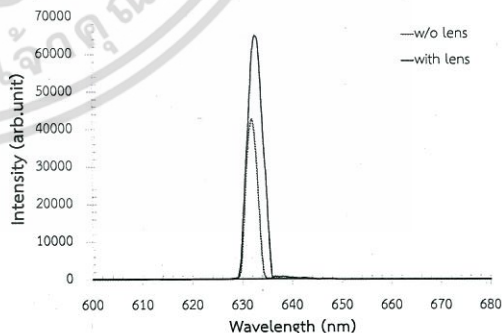
รูปที่ 1 การจัดระบบเพื่อศึกษาสมบัติในการรวมแสงของเลนส์

## ผลการทดลอง



เส้นผ่านศูนย์กลาง 700  $\mu\text{m}$                       เส้นผ่านศูนย์กลาง 900  $\mu\text{m}$

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของเลนส์จิวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 700 และ 900 ไมครอนจากกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมแสงที่วัดได้จากสเปกโตรมิเตอร์เมื่อฉายแสงเลเซอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่น 632.8 nm ผ่านเลนส์และไม่ผ่านเลนส์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M.B. Stern, and T.R. Jay, Optical Engin. 33, 3547 (1994).
- [2] M.T. Gale, Microelectronic Engineering 34, 321 (1997).
- [3] B.K. Lee, D. S. Kim, T. H. Kwon, Microsystem Technologies, 10 531-535 (2004).

กิตติกรรมประกาศ  
งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทางคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2555

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร. ภัทริยา กิตติเดชาชาญ  
ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2540
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
PhD	Engineering Materials	University of Southampton	2550

### สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- ⇒ Fluorescence Spectroscopy
- ⇒ Fabrications and characterizations of silicon solar cells

### รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
-	-	-

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2539- 2540	ทุนพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลน	ทบวงมหาวิทยาลัย (ปัจจุบันคือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา)
2545- 2549	ทุนพัฒนาอาจารย์	ทบวงมหาวิทยาลัย (ปัจจุบันคือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเสนอผลงานวิชาการ

วิทยาพร สุญพานิช, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ, อุดม อัครวาทิรมย์ การศึกษาผลการใช้ฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์, Proceeding of the 7<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand, 557-561, 3-5 พฤษภาคม 2554.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, and P. Kittidachachan, Development of luminescence multilayer films for photovoltaic application, Thai Journal of Physics, Series 7, 2011.

P. Kittidachachan, B. Damrongsak, Low cost spectral response measurement system using high power LEDs, Thai Journal of Physics, Series 6, 2010.

วิทยาพร สุญพานิช, สุกฤต สมุทระกพงษ์, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ การศึกษาการรวมแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553

P. Kittidachachan and W. Thowladda. Use of organic dyes to modify solar spectrum, Proceeding of the 6<sup>th</sup> International conference on advanced materials, 138-143, 2009.

P. Kittidachachan, T. Markvart, D.M. Bagnall, R. Greef, and G.J. Ensell. A detailed study of pn junction solar cells by means of collection efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2007; 91: 160-166.

P. Kittidachachan, L. Danos, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Photon collection efficiency of fluorescent solar collectors. *CHIMIA* 2007; 61: 780-786.

P. Kittidachachan, T. Markvart, G.J. Ensell, R. Greef, and D.M. Bagnall. An analysis of a 'dead layer' in the emitter of n<sup>+</sup>/p/p<sup>+</sup> solar cells. In Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 1103-1106, Orlando, Florida, USA, 2005.

T. Markvart, L. Danos, P. Kittidachachan, and R. Greef. Detailed balance efficiency of ideal single-stage fluorescent collectors. In 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pages 171-174, Barcelona, Spain, 2005.

P. Kittidachachan, L. Danos, R. Greef, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Characterisation of fluorescent collectors in terms of spectral photon collection efficiency. In 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 2007.

P. Kittidachachan, N. Sangkeaw, A. Wichianchai. Barrier Height of Metal-Semiconductor Contacts Measurement System. In 27<sup>th</sup> Congress on Sciences and Technology of Thailand, Prince of Songkla University, 16-18 October 2001.

### ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

P.Kittidachachan, T. Markvart and L. Danos, Solar Cell Assembly, *International PCT Patent*, Patent number WO2011/042708, April 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร. นนทิพัทธ์ คำรงค์ดี

ตำแหน่งปัจจุบัน -

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2540
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
PhD	Electronics and Computer Science	University of Southampton	2551

## สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

## Microfabrication Expertise and Hand-on Experience

- ⇒ Optical mask design
- ⇒ Contact photolithography
- ⇒ Wet etching
- ⇒ E-beam and thermal evaporation
- ⇒ DC/RF sputtering
- ⇒ Wafer bonding
- ⇒ Deep reactive ion etching (DRIE)
- ⇒ Dry etching
- ⇒ Plasma enhanced oxide deposition
- ⇒ Wafer dicing and wire bonding
- ⇒ Wafer probing and testing
- ⇒ Metrology tools (step profilometer, optical interferometer, laser doppler vibrometer, four-point probe, SEM and optical microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Computer Expertise

⇒ Matlab/Simulink (system level simulation)

⇒ Ansys, CoventorWare (Finite element simulation)

### รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
-	-	-

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2546- 2550	ทุนรัฐบาล	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้