



โครงการ

## การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ      กล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว  
Low-cost smartphone microscope from an unsaturated polyester resin lens

ชื่อนิสิต            นางสาวปิยพร ศักดิ์ภิรมย์

ภาควิชา             เคมี

ปีการศึกษา        2558

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

Low-cost smartphone microscope from an unsaturated polyester resin lens



โดย

นางสาวปิยพร ศักดิ์ภิรมย์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรื่อง ก่อตั้งจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนสมาร์ตโฟนราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

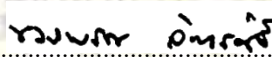
โดย นางสาวปิยพร ศักดิ์ภิรมย์

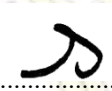
ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

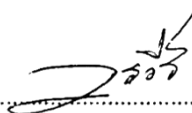
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

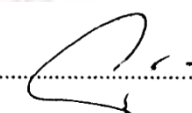
คณะกรรมการสอบโครงการ

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นวลพรรณ จันทศิริ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สนอง เอกสิทธิ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ โฮვნ)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย พาราสุข)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2559

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ  ดีมาก  ดี  พอใช้

ชื่อโครงการ                    กล้องจุลทรรศน์ราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

ชื่อนิติในโครงการ            นางสาวปิยพร ศักดิ์ภิรมย์                    เลขประจำตัว 5533114223

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา        รองศาสตราจารย์ ดร. สนอง เอกสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปเลนส์สำหรับติดตั้งกับสมาร์ตโฟนเพื่อเปลี่ยนสมาร์ตโฟนให้เป็นกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลกำลังขยายปานกลาง ในการขึ้นรูปเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ถูกนำมาหยดลงฐานที่มีการควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการคอนไฟน์เซสซิลด์รอป (Confined sessile droplet method) ที่สามารถขึ้นรูปเลนส์นูนแกมระนาบได้หลากหลายรัศมีความโค้ง จากการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานแปรผกผันกับกำลังขยายของเลนส์ โดยเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานสั้น วิธีการนี้สามารถขึ้นรูปเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงถึง 100 เท่า โดยให้ความบิดเบือนของภาพต่ำ เลนส์ที่ขึ้นรูปได้จากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวนี้สามารถเปลี่ยนสมาร์ตโฟนธรรมดาทั่วไปให้กลายเป็นกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนที่ใช้งานง่าย ราคาถูก สามารถพกพาไปได้ทุกที่

คำสำคัญ: สมาร์ตโฟน, กล้องจุลทรรศน์, พอลิเอสเตอร์เรซิน, เลนส์นูนแกมระนาบ

**Title** Low-cost smartphone microscope from an unsaturated polyester resin lens

**Student name** Miss Piyaporn Sakpirom ID 5533114223

**Advisor name** Associate Professor Dr. Sanong Ekgasit

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2015

### Abstract

In this work, we present a simple yet efficient approach for the fabrication of lens that are capable of transforming a smartphone into a mobile digital microscope. An unsaturated polyester resin was dropped on circular discs with different diameters (3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm and 7 mm) using a confined sessile droplet method, which causes the formation of plano-convex lens with different lens curvature. The results revealed the inverse variation between the diameter of circular discs and the lens magnification as the higher lens magnification is produced in the smaller discs. The 100X magnification lens can be achieved with the low image distortion on the center viewing area. All of the fabricated lenses can turn a simple smartphone into a handy, low cost smartphone microscope.

Keywords: Smartphone, Microscope, Polyester resin, Plano-convex lens

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ใช้สถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือ และทุนในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกด้านตำรา เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการนี้ เป็นผู้ให้คำแนะนำตั้งแต่การเริ่มค้นคว้าข้อมูล ออกแบบ การประดิษฐ์ การทดลอง รวมถึงการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ โฮვნ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรรณ จันทร์ศิริ ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นประธานและกรรมการสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำที่ก่อให้เกิดประโยชน์ในการปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาของผู้วิจัย รวมทั้งเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อบทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ค
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>	<b>7</b>
2.1 พอลิเอสเตอร์เรซิน	7
2.2 เกล็นส์	11
2.3 กล้องจุลทรรศน์	16
2.4 คุณสมบัติทั่วไปของสมาร์ทโฟน	20
2.5 การคำนวณ	22
<b>บทที่ 3 การทดลอง</b>	<b>24</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	24
3.2 สารเคมี	24
3.3 วิธีการทดลอง	25
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>29</b>
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>37</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	37
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>38</b>
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>40</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>46</b>

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของระบบปฏิบัติการบนสมาร์ตโฟน	20
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติเซนเซอร์กล้องในสมาร์ตโฟนแต่ละยี่ห้อ	21
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองหาอัตราส่วนระหว่างเนื้อเรซินกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสม	29
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดลองแสดงค่าต่างๆของเลนส์แต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	31
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม จำนวน 10 อัน	41
ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม จำนวน 10 อัน	41
ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม จำนวน 10 อัน	42
ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม จำนวน 10 อัน	42
ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มม จำนวน 10 อัน	43
ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มม จำนวน 10 อัน	43
ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม จำนวน 10 อัน	44
ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม จำนวน 10 อัน	44
ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มม จำนวน 10 อัน	45
ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มม จำนวน 10 อัน	45



## สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยแม่พิมพ์ (Replica molding droplets)	2
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนกระบวนการทำลิโทกราฟี (Lithography)	3
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยการใช้วิธี Hanging droplets	4
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างตัวอย่างพอลิเอสเตอร์ชนิดอิมมัตว	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทั่วไปของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมมัตว	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างสายโซ่พอลิเอสเตอร์เรซิน (ยังไม่เกิดปฏิกิริยา)	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิเอสเตอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ Flexible polyester resin	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ General purpose polyester	9
รูปที่ 2.7 เลนส์ Nimrud เลนส์ชิ้นแรกของโลก	11
รูปที่ 2.8 รูปชนิดของเลนส์ (a) Bi-convex lens (b) Plano-convex lens (c) Concavo-convex lens (d) Bi-concave lens (e) Plano-concave lens (f) Convexo-concave lens	12
รูปที่ 2.9 รูปเลนส์นูนสองด้าน (Bi-convex lens)	13
รูปที่ 2.10 รูปเลนส์นูนแฉกมนานา (Plano convex lens)	13
รูปที่ 2.11 รูปเลนส์นูนแฉกเว้า (Concavo-convex lens)	14
รูปที่ 2.12 รูปเลนส์เว้าสองด้าน (Bi-concave lens)	14
รูปที่ 2.13 รูปเลนส์เว้าแฉกมนานา (Plano-concave lens)	15
รูปที่ 2.14 รูปเลนส์เว้าแฉกนูน (Convexo-concave lens)	15
รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์ของ โรเบิร์ต ฮุก	16
รูปที่ 2.16 Stereo microscope	16
รูปที่ 2.17 Dark field microscope	17
รูปที่ 2.18 Fluorescence microscope	17
รูปที่ 2.19 Polarizing microscope	17
รูปที่ 2.20 Inverted microscope	18
รูปที่ 2.21 Scanning electron microscope	19
รูปที่ 2.22 Transmission electron microscope	19
รูปที่ 2.23 รูปชนิดของเลนส์แสดงรัศมีความโค้งของเลนส์แต่ละด้าน	22
รูปที่ 2.24 แสดงระยะที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นภาพชัดเจน	23
รูปที่ 3.1 เรซินใสจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์	25
รูปที่ 3.2 เครื่อง Raman Spectrometer	25
รูปที่ 3.3 เครื่อง Laser cutting machine	26
รูปที่ 3.4 เรซินใสที่ผสมในอัตราส่วน 20 กรัม : 0.12 กรัม	26
รูปที่ 3.5 ฐานอะคริลิกที่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3-7 มิลลิเมตร	27
รูปที่ 3.6 วิธีการหยดเรซินเลนส์	27
รูปที่ 3.7 พอลิเอสเตอร์เรซินเลนส์ที่รอเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	27

รูปที่ 3.8 การถ่ายภาพตัวอย่างด้วยเลนส์พอลิเอสเทอร์เรซิน	28
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเอกลักษณ์ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์	30
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวแบบยืดหยุ่น (Flexible polyester resin)	30
รูปที่ 4.3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเลนส์ผ่านศูนย์กลางเลนส์ ตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรกับระยะโฟกัสของเลนส์	32
รูปที่ 4.4 รูปถ่ายธนบัตร 100,000 เวียดนามแดงของประเทศเวียดนาม	34
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (A) A, ตำแหน่ง (B) B และตำแหน่ง (C) C ด้วยกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss รุ่น Axio scope)	34
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (A) ด้วยเลนส์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม	34
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (B) ด้วยเลนส์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม	34
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (C) ด้วยเลนส์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม	34
รูปที่ ก.1 แสดงสเปกตรัมของอะคริลิก คือ Polymethylmethacrylate ที่ใช้เป็นฐานเลนส์	40

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจ

กล้องจุลทรรศน์ คือ อุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสามารถในการดูภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่าตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ เลนส์ที่มีกำลังขยายสูง ในปัจจุบันมีการคิดค้น และ พัฒนากล้องจุลทรรศน์หลากหลายประเภทตามการใช้งาน อาทิ งานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ [1] ทาง การแพทย์ [2] ทางการเกษตร [3] หรือแม้กระทั่งในทางการศึกษา [4] สำหรับนักเรียน เนื่องจากข้อจำกัดของ กล้องจุลทรรศน์ในแง่ของราคาที่สูง การเคลื่อนย้ายที่ไม่สะดวก อุปกรณ์มีความซับซ้อนทำให้เกิดปัญหาว่าการ ใช้งานกล้องจุลทรรศน์จำกัดเฉพาะบุคคลที่มีประสบการณ์ใช้งาน และเกิดความยุ่งยากในการเข้าถึงอุปกรณ์ จึง ทำให้ปัจจุบันมีกลุ่มผู้วิจัยหลากหลายคณะทำการพัฒนา และแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการนำสมาร์ตโฟน เปลี่ยนเป็นกล้องจุลทรรศน์เพราะเทคโนโลยี และประสิทธิภาพของสมาร์ตโฟนที่สูงเนื่องจากปัจจุบันมีการ แข่งขันกันมากขึ้น ทั้งในแง่ของราคาที่ถูกลง การพัฒนาฟังก์ชันของกล้องที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น สามารถ ถ่ายภาพที่มีความละเอียดสูง ถ่ายภาพได้แม้จะมีแสงน้อย หรือแม้กระทั่งมีความรวดเร็วในการส่งข้อมูล เมื่อ ทำการค้นคว้าพบว่า มีหลายงานวิจัยที่นำสมาร์ตโฟนเปลี่ยนเป็นกล้องจุลทรรศน์ จากที่กล่าวไว้ในข้างต้นว่า ส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์คือ เลนส์ที่มีกำลังขยายสูง โดยตัวอย่างงานวิจัยของการพัฒนากล้อง จุลทรรศน์จากสมาร์ตโฟนมีการใช้เลนส์ที่ผลิตจากแก้วแล้วประยุกต์ใช้ในงานอย่างหลากหลาย แต่จากการ สืบค้นยังพบว่าม้งานวิจัยที่ทำการพัฒนาเลนส์จากพอลิไดเมทิลไซโลเซน [5] (polydimethylsiloxane) แทน แก้วได้ทำให้ได้เลนส์ที่ราคาถูกกว่าเลนส์แก้ว แต่ด้วยข้อจำกัดในการซื้อขายที่ไม่แพร่หลาย และปริมาณขั้นต่ำที่ สามารถซื้อได้นั้นมีราคาต้นทุนที่สูง

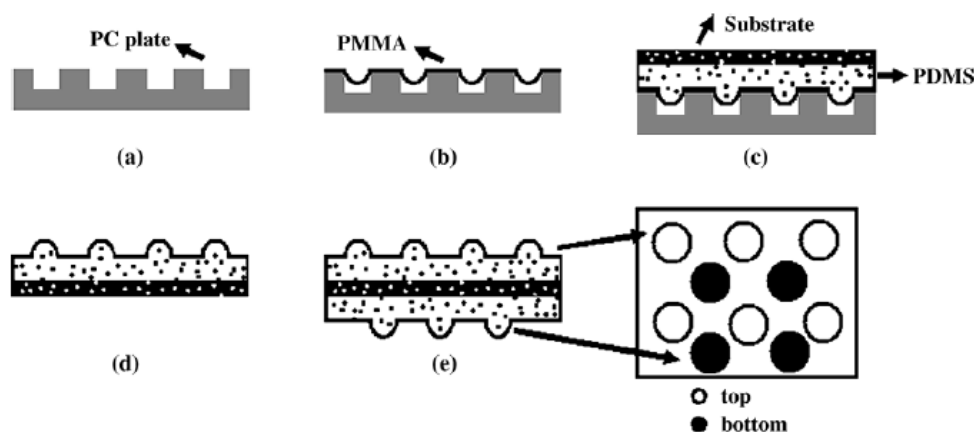
ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคผลิตเลนส์ โดยมีการขึ้นรูปด้วยวิธี Confined sessile droplets สามารถลดปัญหาการขึ้นรูปเลนส์ที่ซับซ้อน เช่น การควบคุมอุณหภูมิที่อาจส่งผลให้เกิด ฟองอากาศที่รบกวนประสิทธิภาพการทำงานของเลนส์ โดยผู้วิจัยเลือกใช้ พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) เพราะมีจำหน่ายที่แพร่หลาย ราคาที่ถูกมากเมื่อเทียบกับพอลิไดเมทิลไซโล เซน [6] ถือได้ว่าเป็นงานวิจัยชิ้นแรกๆที่ทำการผลิตเลนส์ราคาถูกทั้งในเรื่องของกระบวนการผลิต และวัสดุที่ใช้ แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา และที่สำคัญงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปเผยแพร่ และเป็นประโยชน์ให้กับสังคม ได้ ผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้าถึงความโค้งของเลนส์ที่ผลิตได้เทียบกับฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์ที่กำหนด หา ระยะโฟกัส และหา กำลังขยายของเลนส์ที่ผลิต จากนั้นนำเลนส์ที่ผลิตได้มาประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบกล้อง จุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูก มีการทดลองถ่ายภาพที่ได้จากกล้องต้นแบบจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนเพื่อทดสอบ ประสิทธิภาพของเลนส์ที่ผลิตได้ในแต่ละขนาดฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์

## 1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกจากศักยภาพของสมาร์ตโฟนที่สามารถพัฒนาเป็นกล้องจุลทรรศน์ได้แล้ว สิ่งสำคัญของส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์ คือ เลนส์ที่มีกำลังขยายสูง จากการสืบค้นพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาวิธีการผลิตเลนส์แบบต่าง ๆ อาทิเช่น

### Replica molding droplets

ในปี 2006 มีงานวิจัยในหัวข้อ “Fabrication of PDMS (polydimethylsiloxane) microlens and diffuser using replica molding” [7] นำเสนอวิธีผลิตเลนส์ขนาดไมโคร (microlens) จากพอลิไดเมทิลซิลิโกลเซนด้วยกระบวนการแม่พิมพ์แบบจำลอง โดยนำของเหลวของพอลิไดเมทิลซิลิโกลเซนเทลงแม่พิมพ์เลนส์เว้าขนาดไมโคร (concave microlens mold) Shih และคณะพบว่า การทำแม่พิมพ์เลนส์เว้าขนาดไมโครเกิดจากกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin-coating processes) ที่ยัดฟิล์มพีเอ็มเอ็มเอ (polymethyl methacrylate) ชนิดเหลวบน micro-drilled hold สามารถทำให้เกิดความโค้งที่เป็นลักษณะเฉพาะได้ดังแสดงขั้นตอนการเตรียมในรูปที่ 1.1 จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตเลนส์ขนาดไมโครจากพอลิไดเมทิลซิลิโกลเซนได้ โดยไม่ต้องพึ่งวิธีโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) ที่มีต้นทุนการผลิตที่สูง แต่การผลิตเลนส์ด้วยกระบวนการแม่พิมพ์แบบจำลองมีข้อจำกัดเรื่องสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิที่ต้องควบคุมให้เหมาะสม

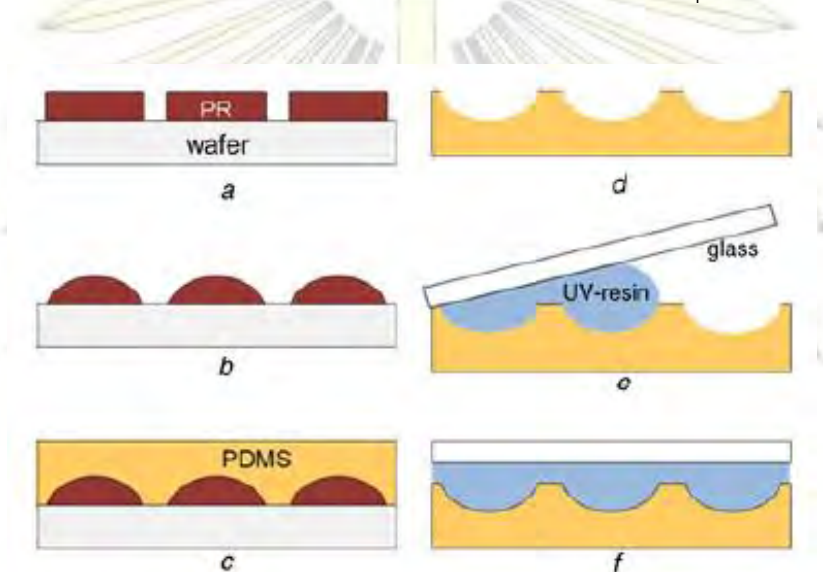


รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยแม่พิมพ์ (replica molding droplets) [7]

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Lithography

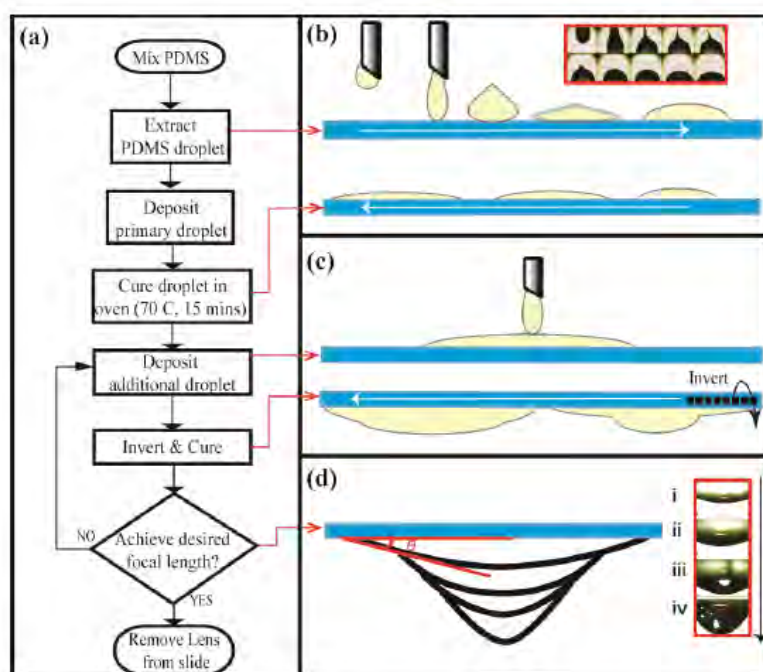
ในปี 2011 มีงานวิจัยจากหัวข้อ “Design and fabrication of long-focal-length microlens arrays for Shack-Hartmann wavefront sensors” [8] นำเสนอวิธีขึ้นรูปเลนส์ขนาดไมโครด้วยวิธีการ Thermal reflow ของ Lin และคณะกล่าวว่ากระบวนการ Thermal reflow ต้องใช้ความร้อน และลิโทกราฟี (lithography) ในการขึ้นรูปเลนส์ดังที่แสดงขั้นตอนในรูปที่ 1.2 งานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มค่าระยะโฟกัสโดยเคลือบชั้นของสารโปร่งใสบนเลนส์ขนาดไมโคร และทดสอบประสิทธิภาพของสารเคมีที่เคลือบบนเลนส์พบว่าสามารถเพิ่มค่าระยะโฟกัสของเลนส์ที่ผลิตได้จริงเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าของกลุ่มคณะวิจัยกลุ่มนี้



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนกระบวนการทำลิโทกราฟี (lithography) [8]

## Hanging droplets

ในปี 2014 มีผลงานวิจัยของ W.M. Lee และคณะได้ทำการรายงานผลการทดลองผลิตเลนส์กำลังขยายสูงโดยใช้วิธี hanging droplets จากหัวข้อ “Fabricating low cost and high performance elastomer lenses using hanging droplets” [9] พบว่ามีวิธีที่ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปเลนส์ได้โดยไม่ต้องพึ่งแม่พิมพ์ หรือเครื่องกลที่ซับซ้อน เรียกว่า hanging droplets คือ การหยดของเหลวของพอลิไดเมทิลซิลิโคนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันอย่างสมบูรณ์บนฐานพอลิไดเมทิลซิลิโคนที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว จากนั้นคว่ำฐานของพอลิเมอร์ลงปล่อยให้แรงโน้มถ่วงช่วยดึงให้พอลิเมอร์ขึ้นรูปเลนส์ ข้อดีของวิธีการในงานวิจัยนี้ คือ ถ้าเพิ่มชั้นของ hanging droplets มากเท่าใดก็ยิ่งส่งผลให้ความโค้งของเลนส์ที่ได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันส่งผลให้ระยะโฟกัสลดลงถึงประมาณ 2 มิลลิเมตร ทำให้ได้เลนส์ที่มีกำลังขยายถึง 160 เท่า การผลิตเลนส์ด้วยเทคนิค hanging droplets ต้องการพื้นผิวที่เรียบ และตู้อบที่มีอุณหภูมิถึง 200C นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดเข้ม ระยะเวลาในการขึ้นรูปเลนส์ที่ยู่งยาก และใช้เวลานาน เมื่อนำเลนส์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟน สามารถเปลี่ยนเป็นกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูกได้จริง

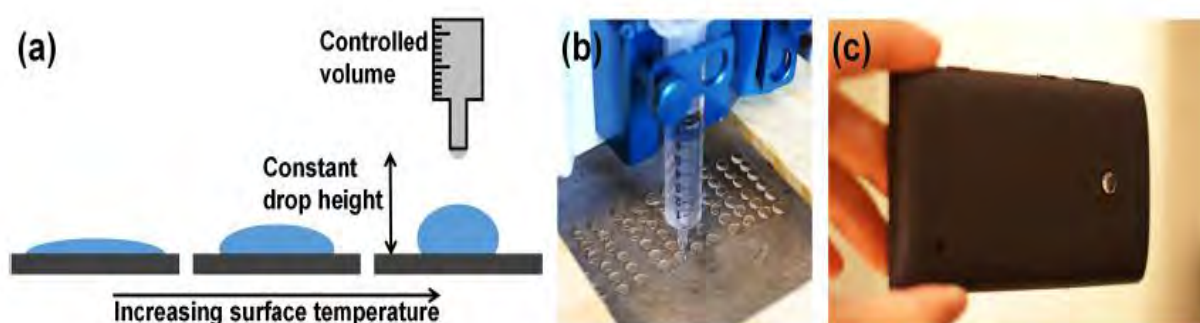


รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยการใช้วิธี Hanging droplets [9]

## Inkjet printing droplets

ในปี 2015 มีงานวิจัยที่เสนอวิธีผลิตเลนส์ที่ต่างออกจากวิธีก่อนหน้านี้ที่ใช้แม่พิมพ์ หรือกระบวนการลิโทกราฟีโดยการใช้ เครื่องพิมพ์สามมิติ จากหัวข้อวิจัย “Fabricating optical lenses by inkjet printing and heat-assisted in situ curing of polydimethylsiloxane for smartphone microscopy” [10] ของ Sung และคณะพบว่าการใช้กระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติโดยนำของเหลวของพอลิไดเมทิลซิลโอเซนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์หยดลงบนพื้นผิวเรียบที่ให้ความร้อนสามารถขึ้นรูปเลนส์ได้จริง กลุ่มผู้วิจัยทำการควบคุมปริมาตรของพอลิไดเมทิลซิลโอเซน และอุณหภูมิของพื้นผิวให้เหมาะสม พบว่าเลนส์ที่ได้มีระยะโฟกัสถึง 5.6 mm มีกำลังขยาย 120 เท่า และให้ความคมชัดภาพถึง 1  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้คุณสมบัติเฉพาะตัวของพอลิไดเมทิลซิลโอเซนสามารถติดกับหน้าเลนส์กล้องสมาร์ทโฟนได้โดยตรงอย่างง่ายดาย ทำให้พัฒนาเป็นกล้องจุลทรรศน์ราคาถูกจากสมาร์ทโฟนได้จริง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปเลนส์ที่จำกัดเฉพาะเครื่องพิมพ์สามมิติ ในบางประเทศมีการออกกฎหมายไม่ให้มีการซื้อขายอุปกรณ์ชิ้นนี้ และการขึ้นรูปเลนส์ด้วยวิธีนี้นั้นยังมีข้อจำกัดเฉพาะที่ใช้ได้กับเลนส์ที่ผลิตมาจากพอลิไดเมทิลซิลโอเซน และต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการผลิต และขึ้นรูปเลนส์ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีข้อจำกัดในเรื่องราคาต้นทุนของอุปกรณ์ที่สูง อุปกรณ์บางชนิดไม่สามารถซื้อขายได้ทั่วไป กระบวนการผลิตมีความซับซ้อนเช่น การควบคุมอุณหภูมิ และมีกำลังการผลิตที่มีปริมาณน้อย ทางห้องแล็บวิจัยจึงได้ค้นพบว่าวิธี confined sessile droplet ในงานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปเลนส์ด้วยวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถผลิตในปริมาณที่มาก คือ มีฐานเลนส์ที่ใช้ในการจำกัดขอบเขตการแพร่กระจายของพอลิเมอร์ทำให้ได้รูปทรงครึ่งวงกลม (spherical cap) ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ และสามารถผลิตเลนส์ที่มีกำลังขยายที่หลากหลายได้โดยกำหนดจากขนาดของฐานเลนส์ที่ต้องการ กระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ และมีแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเลนส์ ในด้านพอลิเมอร์ที่ใช้ขึ้นรูปเลนส์ คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่ม (unsaturated polyester resin) สามารถหาซื้อได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิไดเมทิลซิลโอเซน (polydimethylsiloxane) และมีราคาซื้อต่อหน่วยที่ถูกมาก (300 กรัม/ 85 บาท)



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปเลนส์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ [10]

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ผลิตเลนส์จากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมมิดด้วยวิธี Confined sessile droplets
2. พัฒนากล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนด้วยเลนส์จากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมมิด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เลนส์ราคาถูกจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมมิด
2. ได้กล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมมิด



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

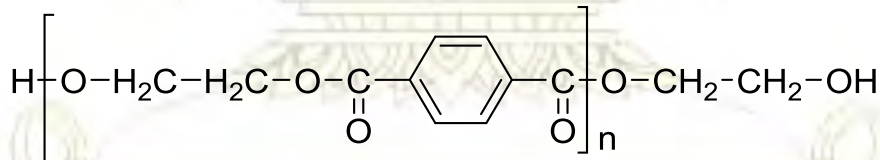
### ทฤษฎี

#### 2.1 พอลิเอสเทอร์เรซิน

พอลิเอสเทอร์เรซิน [11] ส่วนใหญ่จะมีลักษณะทางกายภาพคือ เป็นของเหลวใส หนืด และมีกลิ่นเหม็นจากการที่มีมอนอเมอร์ที่ส่วนใหญ่เป็นสไตรีน (styrene) ถ้าหากเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสไตรีนไป 30-50 เปอร์เซ็นต์จะช่วยให้ความหนืดลดลง และเป็นตัวเชื่อมการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (cross-linking reaction) เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง เมื่อมีการใช้งานของพอลิเอสเทอร์เรซินในงานขนาดใหญ่ มีข้อแนะนำให้สวมหน้ากากกันควัน และถุงมือ เรซินสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความดัน พอลิเอสเทอร์เรซินสามารถใช้งานได้เหมือนพอลิยูรีเทนพอน หรือวัสดุเชื่อมชนิดอื่นที่สามารถใช้เป็นส่วนผสมของไฟเบอร์กลาส คาร์บอนไฟเบอร์ และเคพลา ข้อดีของพอลิเอสเทอร์เรซิน คือ ยิงปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization reaction) เกิดสมบูรณ์จะทำให้เนื้อของเรซินแข็งขึ้น และแข็งแรงกว่าเรซินชนิดแบบอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin)

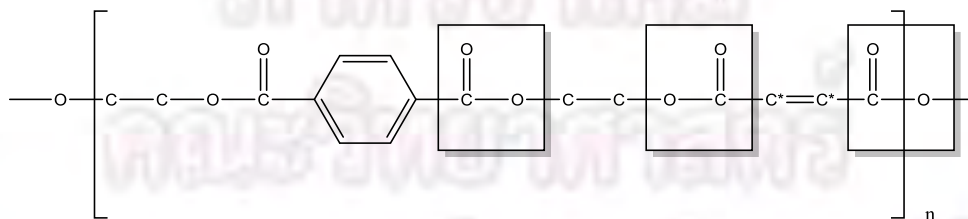
ในทางอุตสาหกรรมได้ทำการแบ่งประเภทพอลิเอสเทอร์เรซินออกเป็น 2 ประเภทตามโครงสร้างทางเคมี คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดอิมิตัว และพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดอิมิตัว เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate) เพราะโครงสร้างทางเคมีไม่มีพันธะคู่



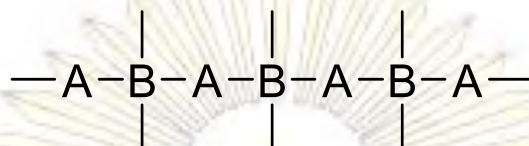
รูปที่ 2.1 โครงสร้างตัวอย่างพอลิเอสเทอร์ชนิดอิมิตัว

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวมีโครงสร้างทางเคมีทั่วไป ดังรูปที่ 2.2 โดยในตำแหน่งของหมู่เอสเทอร์จะระบุอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม แสดงพันธะ CO-O-C ส่วนที่ตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (the reactive sites) เชื่อมขวางแสดงในรูป  $\text{C}^*=\text{C}^*$



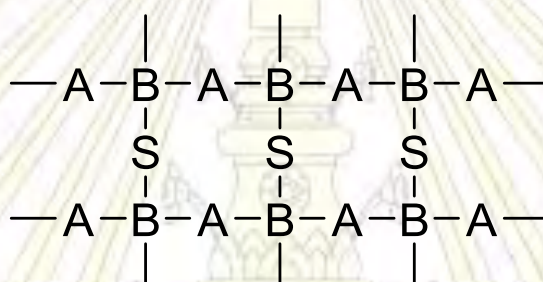
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทั่วไปของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว

ดังนั้นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถแสดงรูปโครงสร้างในลักษณะ ดังรูป 2.3 คือพอลิเมอร์ที่มีหมู่ของเอสเทอร์แทนด้วย A โดยที่ B แทนตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยา (the reactive sites) ในโมเลกุล



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสายโซ่พอลิเอสเทอร์เรซิน (ยังไม่เกิดปฏิกิริยา)

เมื่อเติม สไตรีน (Styrene) แทน S เป็นสารเชื่อมขวางให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยา (B) ของสายโมเลกุลกลายเป็นสายพอลิเมอร์ที่ยาวขึ้น และมีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิเอสเทอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์

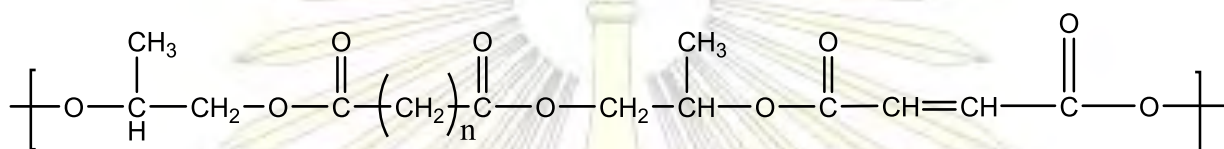
### 2.1.1 ประเภทของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว

โดยพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว [12] มีการจำหน่ายอย่างแพร่หลายตั้งแต่ ค.ศ. 1930 จัดเป็นพลาสติกชนิด Thermosetting ที่เมื่อขึ้นรูปแล้วไม่สามารถหลอมกลับมาใช้ใหม่ได้อีก พอลิเอสเทอร์เรซินเกิดจากปฏิกิริยา condensation polymerization จาก maleic anhydride, isophthalic acid และ propylene glycol ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยมีเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKP) เป็นตัวริเริ่ม ชนิดของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวจะแบ่งตามคุณสมบัติพื้นฐานสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. Flexible polyester resin
2. Chemical resistant polyester resin
3. Specialty polyester resin
4. General purpose polyester resin
5. Resilient polyester resin
6. Electrical resistant polyester resin
7. Fire resistant polyester resin

### 2.1.1.1 Flexible polyester resin

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยา condensation polymerization จาก maleic anhydride, isophthalic acid และ propylene glycol ในอัตราส่วนที่ต่างกันอย่างมีเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKP) เป็นตัวริเริ่ม พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีความยืดหยุ่นส่วนมากใช้งานจำพวกเคลือบงานศิลปะ เคลือบเฟอร์นิเจอร์ และกรอบรูปวิทยาศาสตร์ เพราะมีราคาที่ถูก ปลอดภัยกว่าเรซินชนิดอื่นๆ และสามารถหาซื้อได้ตามร้านค้าทั่วไป



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ Flexible polyester resin

### 2.1.1.2 Chemical resistant polyester resin

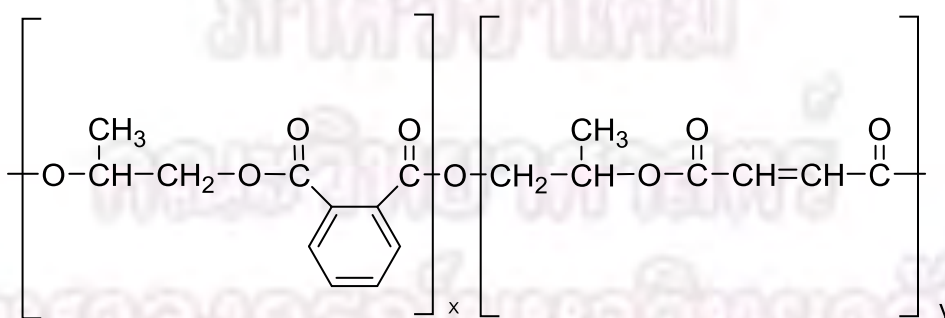
พอลิเอสเทอร์เรซินมีปัญหาต่อการเสื่อมสลายโดยด่าง (Alkali hydrolysis) จึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยมีการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินที่ใช้ไกลคอล (Glycols) ที่เข้มข้นขึ้นเพื่อลดความเข้มข้นของพันธะเอสเทอร์ ดังนั้นพอลิเอสเทอร์เรซินนี้จึงมีไกลคอลถึง 2 ตัวต่อ 1 สายโซ่พอลิเมอร์ และมีจำนวนของพันธะเอสเทอร์น้อยกว่าพอลิเอสเทอร์เรซินทั่วไป ส่วนมากใช้เป็นส่นประกอบในอุปกรณ์ทางเคมี อาทิ ตู้ควัน ท่อทำปฏิกิริยา ถังเก็บเคมี และปิเปต

### 2.1.1.3 Speciality polyester resin

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้สำหรับใช้งานเฉพาะสามารถเตรียมได้จากการใช้มอนอเมอร์ในปฏิกิริยาแตกต่างกันในช่วงเวลาการเกิดเชื่อมโยงของโมเลกุล (Cross-linkage) อาทิ เรซินที่สามารถทนความร้อนได้เตรียมจากการใช้ Triallyl cyanurate (I) แทน Styrene

### 2.1.1.4 General purpose polyester

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง phthalic anhydride (PA), maleic anhydride (MA) และ propylene glycol (PG) ที่มีอัตราส่วน phthalic anhydride : maleic anhydride คือ 2 : 1 ถึง 1 : 2 เรซินชนิดนี้ใช้เป็นส่นประกอบของภาดาอาหาร เรือ สระว่ายน้ำ และห้องอาบน้ำ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ General purpose polyester

### 2.1.1.5 Resilient polyester resin

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้ผสมกันระหว่าง General purpose polyester และ Flexible polyester ปฏิกริยาขั้นแรกเริ่มจาก isophthalic acid กับ glycol ได้พอลิเอสเทอร์เรซินที่มีจำนวนกรดที่น้อย เติม maleic anhydride เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification reaction) ทำให้ได้สายโซ่ของพอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ไม่อิ่มตัวอยู่ส่วนท้ายหรือระหว่างโมเลกุล ทำให้พอลิเอสเทอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงมาก

### 2.1.1.6 Electrical resistant polyester resins

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เตรียมจากกรดไดเบสิก เช่น isophthalic acid, maleic anhydride, neopentyl glycol หรือ tetrabromo bisphenol ส่วนมากจะใช้เรซินชนิดนี้เป็นส่วนประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แผ่นวงจรพิมพ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า

### 2.1.1.7 Fire resistant polyester resin

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เตรียมจากกรดไดเบสิก เช่น isophthalic acid, maleic anhydride, neopentyl glycol หรือ tetrabromo bisphenol ใช้แทน phthalic anhydride หรือ propylene glycol พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดนี้ผสมสารที่ชะลอการเกิดเปลวไฟส่วนมากใช้เป็นส่วนประกอบในเรือ อากาศ ตู้วัน และเครื่องใช้ไฟฟ้า

## 2.1.2 องค์ประกอบต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของเรซิน

1. อุณหภูมิ : อุณหภูมิสูงเรซินจะแข็งตัวได้เร็วขึ้น อุณหภูมิต่ำเรซินจะแข็งตัวช้าลงมีผลต่อเนื้องานหล่อ อัตราการแตกร้าผิวเรซิน และมีผลต่ออายุการเก็บของเรซิน
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา : การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นการแข็งตัวก็จะเร็วขึ้น และการหดตัวเพิ่มมากขึ้นเรซินจะมีเนื้อนิ่มขึ้นเพราะในตัวเร่งปฏิกิริยามีสารนิ่มเป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน และหากผสมตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยการแข็งตัวจะช้าลง ส่งผลต่อการหดตัวน้อยลง
3. ความชื้นและน้ำ : มีผลต่อเวลาในการแข็งตัวที่ช้ามากขึ้น และมีผลต่อเนื้องานให้เนื้องานชุ่มน้ำมีฟองอากาศมากกว่าปกติ
4. ปริมาณออกซิเจน : ออกซิเจนเป็นตัวป้องกันการแข็งตัวของเรซิน ปริมาณออกซิเจนสูงมาก ๆ เช่นกวนเรซินนานขึ้นจะทำให้การแข็งตัวจะช้าลง และยังใช้เป็นเทคนิคในการยืดอายุการเก็บเรซินได้

## 2.2 เลนส์

คำว่า “ เลนส์ (Lens)” [13] เป็นรากศัพท์มาจากภาษาละติน (Lentil) คำว่า Lentil แปลว่า เลนส์ว่าสองด้าน ดังนั้นรูปเอกพจน์จึงเรียกว่า เลนส์ (Lens) จุดกำเนิดเลนส์ที่มีอายุเก่าแก่ที่สุดของโลก คือ เลนส์ Nimrud เริ่มมีตั้งแต่สมัย 2700 ปีก่อนคริสต์ศักราช คาดว่าน่าจะใช้เป็นแว่นขยาย หรือแว่นสำหรับรวมแสงเพื่อจุดไฟ จากนั้นเลนส์มีวิวัฒนาการขึ้นมาเรื่อยๆ จนสามารถพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์ เช่น กล้องจุลทรรศน์ที่ประมาณคริสต์ศักราช 1595 และกล้องโทรทรรศน์ในคริสต์ศักราช 1608 จากความสำเร็จในการประดิษฐ์ทั้งกล้องจุลทรรศน์ และกล้องโทรทรรศน์ทำให้มีความพยายามที่จะพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพของเลนส์เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ เช่น ความคลาด (distortion) ความสมดุลของสี (color balance) ความเปรียบต่างของเลนส์ (contrast) และการแยกละเอียด (resolution) เป็นต้น

ส่วนสำคัญของเลนส์ (The principal parts of a lens) ประกอบด้วย [14]

1. จุดศูนย์กลางความโค้ง มี 2 จุด อยู่ด้านหน้า และด้านหลังเลนส์
2. แกนमुखสำคัญของเลนส์ คือ เส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งทั้งสอง
3. จุดโฟกัส คือ จุดตัดรวมของรังสีหักเหทุกรังสีที่เกิดจากรังสีตกกระทบหักเหผ่านเลนส์
4. ทางยาวโฟกัส คือ ระยะจากจุดโฟกัสถึงจุดกึ่งกลางเลนส์
5. รัศมีความโค้ง คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางความโค้งถึงผิวโค้งของเลนส์

ในปัจจุบันพบว่าเลนส์มีหลากหลายประเภทแบ่งตามความสามารถในการรวมแสงและการกระจายแสงดังต่อไปนี้

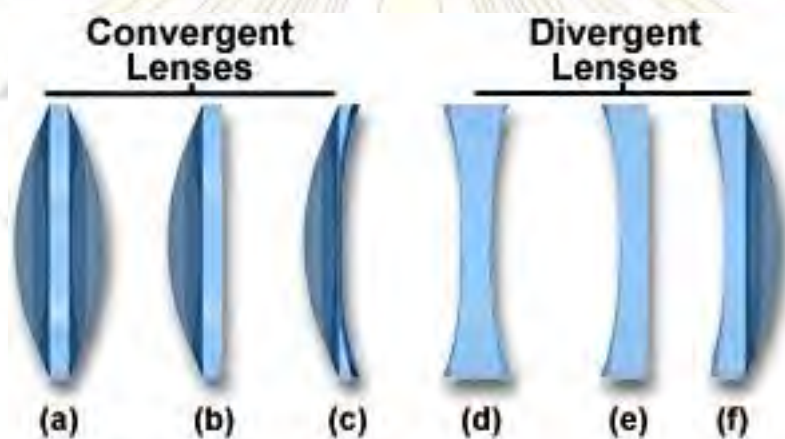


รูปที่ 2.7 เลนส์ Nimrud เลนส์ชิ้นแรกของโลก [13]

## 2.2.1 ชนิดของเลนส์

ถ้าหากแบ่งเลนส์ [15] จากเกณฑ์ในความสามารถจากการรวมแสง (Converge) และการกระจายแสง (Diverge) จะได้ว่า

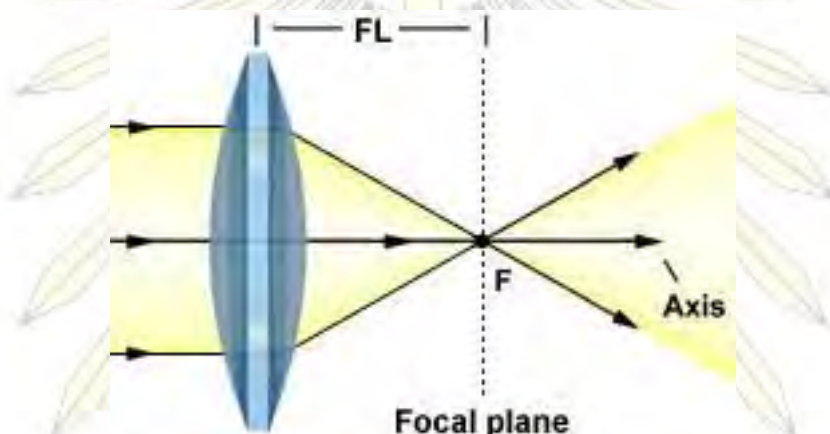
1. เลนส์นูนสองด้าน (Bi-convex lens)
2. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano-convex lens)
3. เลนส์นูนแกมเว้า (Concavo-convex lens)
4. เลนส์เว้าสองด้าน (Bi-concave lens)
5. เลนส์เว้าแกมระนาบ (Plano-concave lens)
6. เลนส์เว้าแกมนูน (Convexo-concave lens)



รูปที่ 2.8 รูปชนิดของเลนส์ (a) Bi-convex lens (b) Plano-convex lens (c) Concavo-convex lens (d) Bi-concave lens (e) Plano-concave lens (f) Convexo-concave lens [15]

### 1. เลนส์นูนสองด้าน (Bi-convex lens)

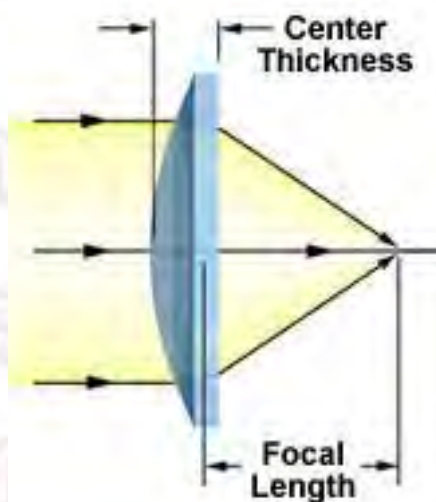
เลนส์นูนสองด้าน คือ เลนส์กำลังขยายพื้นฐานสามารถรวมแสงให้ตกที่จุดโฟกัสของเลนส์ ระยะโฟกัสขึ้นอยู่กับมุมส่วนโค้งของหน้าเลนส์ แล้วพบว่ามุมส่วนโค้งของเลนส์กว้างขึ้นทำให้แสงสามารถหักเหเข้าเลนส์ได้มากจะทำให้ระยะโฟกัสสั้นลง เลนส์นูนสองด้านสามารถลดปัญหาความคลาดทรงกลม (spherical aberration) จากการที่ความโค้งของชั้นหน้าเลนส์ทำให้แสงตกกระทบหน้าเลนส์ที่มุมองศาต่างกัน ทำให้จุดโฟกัสหลังเลนส์มีระยะไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความคมชัดของภาพที่ได้ลดลง



รูปที่ 2.9 รูปเลนส์นูนสองด้าน (Bi-convex lens) [15]

### 2. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano-convex lens)

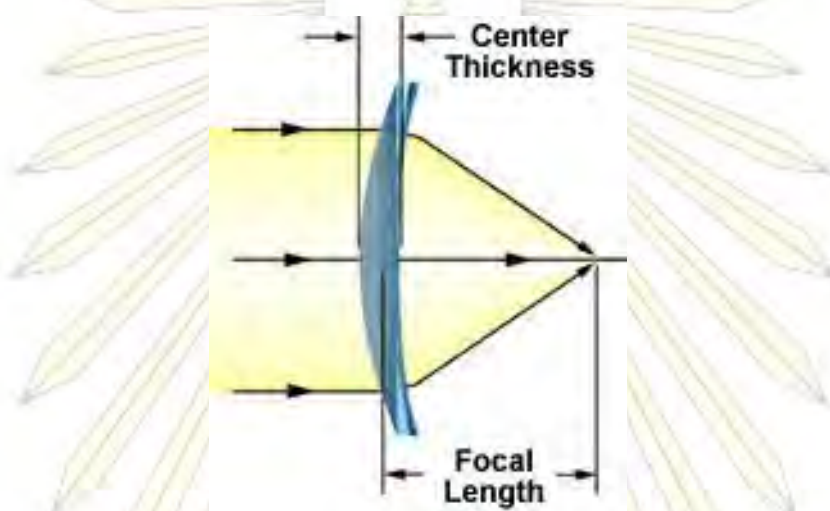
เลนส์นูนแกมระนาบ คือ เลนส์ที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลางด้านหนึ่ง และอีกด้านมีลักษณะราบเป็นระนาบ ทำหน้าที่รวมแสงทำให้ได้ภาพจริงที่ต้องมีฉากมารับ เลนส์นูนแกมระนาบสามารถลดปัญหาความคลาดทรงกลม (spherical aberration) จากการที่ความโค้งของชั้นหน้าเลนส์ทำให้แสงตกกระทบหน้าเลนส์ที่มุมองศาต่างกัน ทำให้จุดโฟกัสหลังเลนส์มีระยะไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความคมชัดของภาพที่ได้ลดลง เลนส์นูนแกมระนาบจะใช้ในการรวมรังสีของแสงให้ตกที่ระยะโฟกัสในอุปกรณ์จำพวกกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 2.10 รูปเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) [15]

### 3. เลนส์นูนแกมเว้า (Concavo-convex lens)

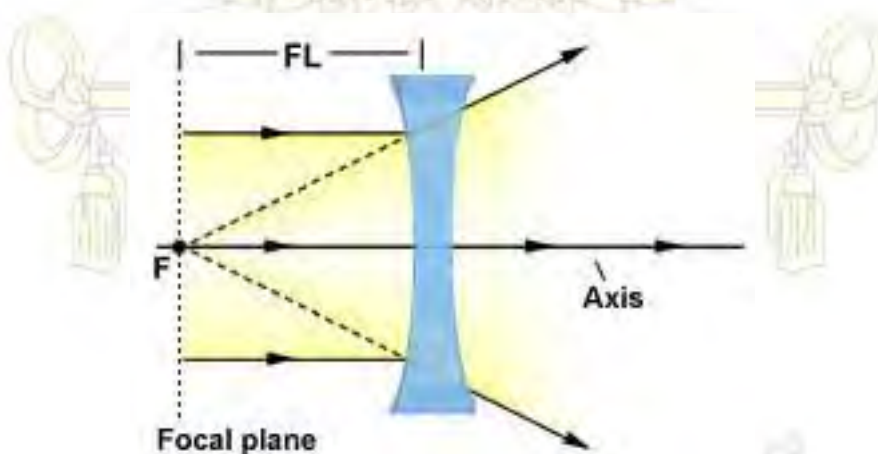
เลนส์นูนแกมเว้าเป็นเลนส์ที่สามารถรวมแสง มีรูปร่างไม่สมมาตร ด้านหนึ่งมีลักษณะนูนแบบครึ่งวงกลม มีรัศมีความโค้งมากกว่าอีกด้านของเลนส์ที่มีลักษณะค่อนข้างเว้า จึงทำให้ได้ภาพจริงของวัตถุเลนส์ชนิดนี้ ส่วนมากใช้งานร่วมกับเลนส์ชนิดอื่นในอุปกรณ์เชิงแสง เช่น กล้องจุลทรรศน์ สามารถเพิ่ม หรือลดระยะโฟกัสได้ เช่น ถ้านำเลนส์นูนแกมเว้าวางหลังเลนส์นูนแกมระนาบสามารถลดระยะโฟกัสได้โดยไม่เกิดการลดประสิทธิภาพของระบบเชิงแสง เช่น กล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 2.11 รูปเลนส์นูนแกมเว้า (Concavo-convex lens) [15]

### 4. เลนส์เว้าสองด้าน (Bi-concave lens)

เลนส์เว้าสองด้าน เป็นเลนส์ที่มีความสามารถในการกระจายแสง หรือสะท้อนลำแสงขนานที่ผ่านเข้าเลนส์ ส่วนใหญ่เลนส์ชนิดนี้จะใช้งานร่วมกับเลนส์ชนิดอื่นเพื่อลดระยะโฟกัสในอุปกรณ์เชิงแสง เช่น กล้องจุลทรรศน์

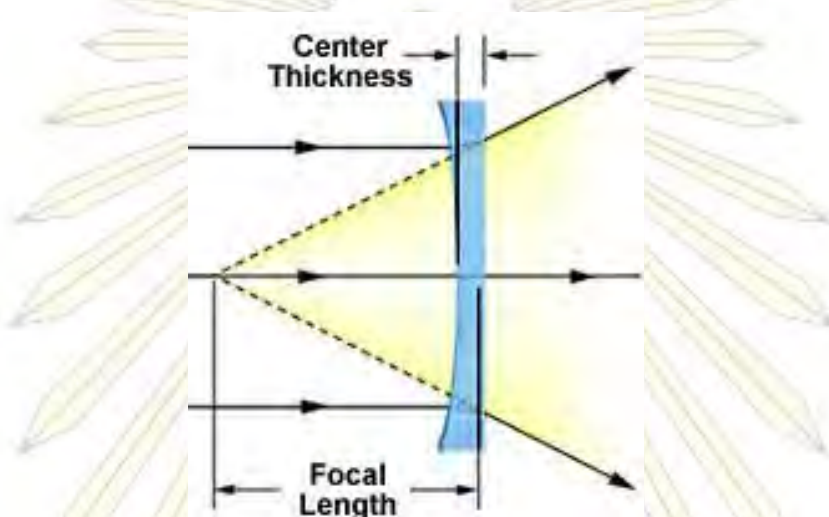


รูปที่ 2.12 รูปเลนส์เว้าสองด้าน (Bi-concave lens) [15]



### 5. เลนส์เว้าแฉก (Plano-concave lens)

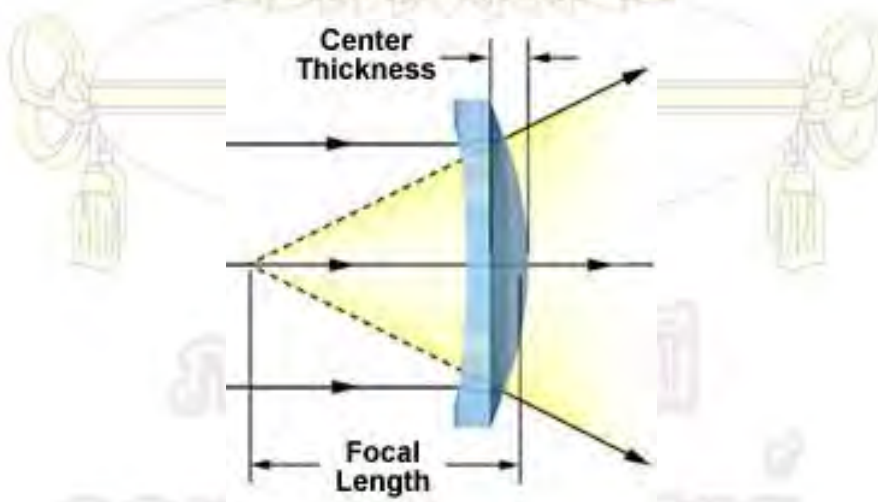
เลนส์เว้าแฉก มีความสามารถในการกระจายแสง จึงทำให้มีจุดโฟกัสเป็นเครื่องหมายลบเมื่อรังสีของแสงรวมกันที่พื้นผิวความโค้งของเลนส์จะเกิดการกระจายของรังสีที่อีกด้านของเลนส์ รังสีที่ออกจากเลนส์ทำให้เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุจริง ส่วนใหญ่เลนส์เว้าแฉกจะใช้เพื่อเพิ่มเส้นของรังสีแสงหรือเพิ่มระยะโฟกัสในอุปกรณ์เชิงแสง เช่น กล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 2.13 รูปเลนส์เว้าแฉก (Plano-concave lens) [15]

### 6. เลนส์เว้านูน (Convexo-concave lens)

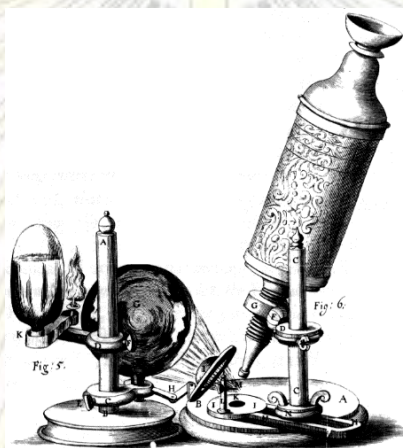
เลนส์เว้านูน มีความสามารถในการกระจายแสง ลักษณะเลนส์มีพื้นผิวความโค้งด้านเว้ามีรัศมีความโค้งน้อยกว่าพื้นผิวด้านนูน เลนส์ชนิดนี้ถ้าใช้ร่วมกับเลนส์ชนิดอื่น สามารถลดปัญหาความคลาดทรงกลมและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความคมชัดของภาพได้



รูปที่ 2.14 รูปเลนส์เว้านูน (Convexo-concave lens) [15]

## 2.3 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นอุปกรณ์สำหรับดูภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่ามองเห็นได้ด้วยตาเปล่า กล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ประกอบด้วยเลนส์ และลำกล้องที่สมบูรณ์เครื่องแรกของโลกประดิษฐ์โดย โรเบิร์ต ฮุก [16] และมีการพัฒนากล้องจุลทรรศน์มาถึงปัจจุบัน โดยถือหลักการทั่วไปที่กล่าวว่าคนที่มีสายตาดปกติจะสามารถมองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กที่สุดได้เพียงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ส่วนวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่านั้นสายตาคคนเราจะไม่สามารถมองเห็นได้ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้คิดประดิษฐ์เครื่องมือที่ช่วยให้สามารถมองเห็นวัตถุที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์มีการพัฒนาตามประเภทการใช้งานดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์ของ โรเบิร์ต ฮุก [16]

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพ 2 ชุดด้วยกัน คือ เลนส์ใกล้วัตถุ และเลนส์ใกล้ตา หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ คือ แสงไฟจากหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงจะถูกรวบรวมแสงโดย Condenser lens ไปตกที่วัตถุที่วางบนแท่นวางวัตถุ (Specimen stage) จากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จะทำหน้าที่ขยายภาพให้ใหญ่ขึ้น และเลนส์ใกล้วัตถุเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้น ดังนั้นวัตถุที่จะศึกษาจะต้องอยู่ห่างจากเลนส์ใกล้วัตถุมากกว่าความยาวโฟกัสเล็กน้อย เลนส์ใกล้วัตถุจะสร้างภาพแรกขึ้นมาเป็นภาพจริงหัวกลับขนาดใหญ่กว่าวัตถุ โดยที่ตำแหน่งของภาพจะไปตกใกล้เลนส์ใกล้ตา (Ocular lens หรือ Eyepiece) นอกจากนี้ Optical microscopes แบ่งออกเป็นแต่ละชนิดของการใช้งาน อาทิ

2.3.1.1 Stereo Microscope [17] ใช้สองคู่อุปกรณ์ที่มีชีวิตที่ไม่เล็กมาก เช่น แมลง โดยจะแสดงภาพเป็นภาพ 3 มิติ และได้ภาพที่ชัดลึก สามารถส่องตัวอย่างที่เป็นทั้งวัตถุโปร่งแสงและทึบแสง



รูปที่ 2.16 Stereo Microscope [17]

2.3.1.2 Dark Field Microscope [18] ใช้การกระเจิงของแสงเพื่อสร้างภาพของวัตถุที่ใสไม่มีสี หรือ ย้อมสีติดยากเช่น สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก หรือเนื้อเยื่อบางชนิด



รูปที่ 2.17 Dark Field Microscope [18]

2.3.1.3 Phase Contrast Microscope ใช้การหักเหของแสงสะท้อนในการสร้างภาพวัตถุที่เป็น สิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่บาง และโปร่งใส ไม่มีสี เช่น เนื้อเยื่อ เซลล์

2.3.1.4 Fluorescence Microscope [19] ใช้งานในห้องวิจัยหรือห้องปฏิบัติการของโรงพยาบาล เพื่อศึกษาสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติสามารถเรืองแสง หรือเปล่งแสงเองได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงจาก แหล่งกำเนิดที่มีพลังงานสูง เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 2.18 Fluorescence Microscope [19]

2.3.1.5 Polarizing Microscope [20] เป็นกล้องจุลทรรศน์รูปแบบหนึ่งของกล้องจุลทรรศน์แสงซึ่ง กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะใช้ในการมองวัตถุประเภทชีววิทยาต่าง ๆ เช่น กล้ามเนื้อ และประเภทของหินแร่ หรือ แร่ธาตุต่างๆ เพื่อดูลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ว่ามีทิศทางไปในทางใด เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรง ของโครงสร้างของวัตถุนั้นๆ



รูปที่ 2.19 Polarizing Microscope [20]

2.3.1.6 Reflected Light Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงจากทางด้านข้าง โดยแสงจะส่องที่พื้นผิวของชิ้นงานแล้วสะท้อนเข้าสู่เลนส์ใกล้ตาก้องประเภทนี้จะใช้ดูชิ้นงานที่มีลักษณะทึบแสง

2.3.1.7 Inverted Microscope [21] เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มี Objective Lens อยู่ทางด้านใต้ชิ้นงาน จะสามารถมองชิ้นงานได้จากทางด้านล่าง จึงถูกเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์หัวกลับ ปัจจุบันจะมีการใช้งานอยู่ 2 ประเภท คือ Inverted Reflected Light Microscope กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะถูกนำไปใช้งานในการดูพื้นผิวโลหะ ซึ่งตัวอย่างดังกล่าวจะต้องทำการขัดเงาจนถึงเนื้อโลหะ จึงทำให้ชิ้นงานส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ Inverted Transmitted Light Microscope กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะมีแหล่งกำเนิดแสงถึงสองเส้นทาง โดยจะมีแหล่งกำเนิดจากทางด้านบนที่แสงส่องผ่านทะลุชิ้นงานลงมา Transmitted และแหล่งกำเนิดจากทางด้านข้างเช่นเดียวกับกล้อง Reflect Light โดยแสงที่มาจากการ Transmitted นั้นจะสามารถทำให้ดูชิ้นงาน ตัวอย่างของสิ่งมีชีวิตที่ถูกบรรจุอยู่ในขวดแก้วทดลองซึ่งตัวอย่างชิ้นงานจะอยู่บริเวณก้นขวด ดังนั้นสามารถใช้ดูชิ้นงานได้ทั้งงานชีววิทยา (Transmitted) และงานดูพื้นผิวโลหะ (Reflected)



รูปที่ 2.20 Inverted Microscope [21]

2.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กตรอน (Electron microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง และราคาที่สูงมาก เพราะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงปกติ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์แก้ว เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง และส่วนประกอบได้อย่างละเอียดนอกจากนี้ Electron microscope แบ่งออกเป็นแต่ละชนิดของการใช้งาน อาทิ

2.3.2.1 Scanning electron microscope [22] หรือเรียกว่า SEM โดยใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของเซลล์หรือพื้นผิวของตัวอย่างวัตถุที่นำมาศึกษา โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุแล้วเกิดสัญญาณภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด คือ เกิดจากการที่ Primary electron วิ่งไปกระทบพื้นผิวของวัตถุ ทำให้มีการสะท้อนกลับของพลังงานในรูปแบบต่างๆเช่น Back-scatter electron, รังสีเอ็กซ์ (X-ray) หรือ Secondary electron เป็นต้น และในลำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะมีตัวรับสัญญาณที่ทำหน้าที่รับ และเปลี่ยน Secondary electron ให้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน (electrical signal) แล้วส่งสัญญาณไปยังจอภาพ (Cathode ray tube) เพื่อทำให้เกิดภาพที่ตามองเห็น



รูปที่ 2.21 Scanning electron microscope [22]

2.3.2.2 Transmission electron microscope [23] เรียกว่า TEM ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์ หรือวัตถุตัวอย่างที่จะศึกษาต้องมีลักษณะบางเป็นพิเศษ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน คือ ลำแสงอิเล็กตรอนเกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปในขดลวดทังสเตน (Tungsten filament) ทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งออกมาจากส่วนปลายของ filament จากนั้นจะวิ่งตรงไปยังวัตถุ ซึ่งลำแสงอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวัตถุจะวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และจะถูกขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้นโดย Objective lens อิเล็กตรอนจะไปกระตุ้นโมเลกุลของซิงค์ซัลไฟด์ (Zinc sulfide) ที่ฉาบอยู่บนฉากรับภาพ (Fluorescence screen) ทำให้เกิดเป็นภาพ 2 มิติ โดยวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic number) มาก ภาพที่ได้จะเห็นเป็นสีดำ ส่วนวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมน้อยภาพที่ได้จะเป็นสีขาว








รูปที่ 2.22 Transmission electron microscope [23]

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของสมาร์ทโฟน

### 2.4.1 ระบบปฏิบัติการบนสมาร์ทโฟน (Operating system)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของชนิดระบบปฏิบัติการบนสมาร์ทโฟน [24]

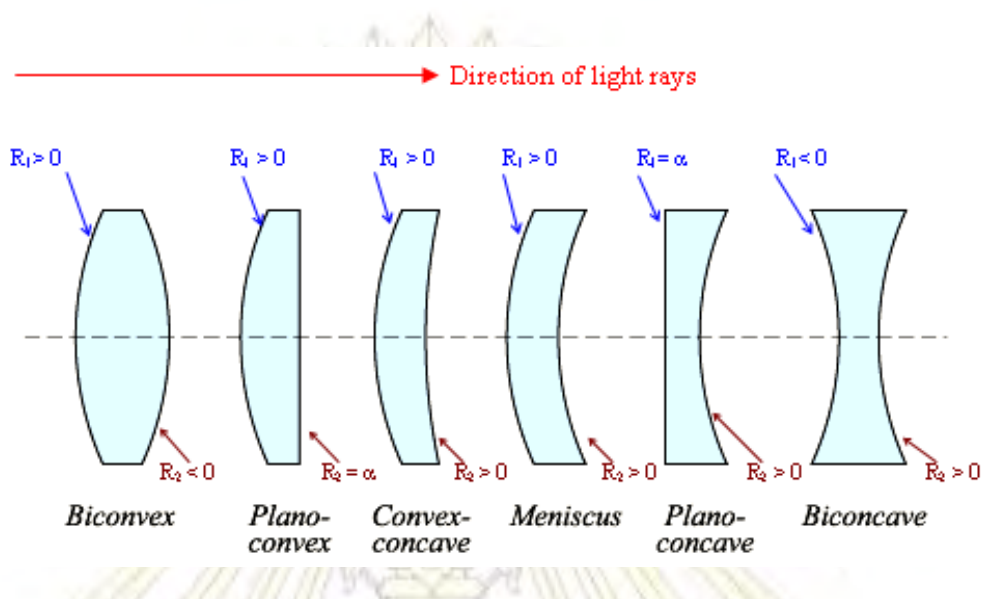
Smartphone operation system	Producer	Advantages	Disadvantages
 Symbian	บริษัท Symbian	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ฟังก์ชันพื้นฐาน เช่น SMS, MMS เป็นต้น</li> <li>- เริ่มใช้อินเตอร์เนตบนมือถือ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รองรับเฉพาะมือถือของบริษัท Nokia</li> <li>- ไม่มี แอ พ พื เค ชั้น ที่ หลากหลาย และทันสมัย</li> </ul>
 Black Berry	บริษัท RIM (Research in motion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นระบบที่มีมาตรการรักษาความปลอดภัยสูง นิยมใช้ในงานธุรกิจ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รองรับเฉพาะมือถือของบริษัท BlackBerry</li> <li>- Web Brower ทำงานช้า</li> <li>- ไม่มีการพัฒนา Application ที่หลากหลาย และมีค่าใช้จ่ายสูงในการดาวน์โหลด</li> </ul>
 Windows Mobile	บริษัท Microsoft	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานร่วมกับ Application ของ Microsoft ได้ดี เช่น Microsoft office</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี Application ให้เลือกใช้น้อย</li> <li>- Web browse ตอบสนองช้า</li> </ul>
 Android	บริษัท Google	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Open Source คือให้บริการฟรี ทำให้สามารถใช้ได้กับมือถือจากหลายยี่ห้อ</li> <li>- ตอบสนองกับบริการของ Google ได้ดี</li> <li>- สามารถเสริม และตกแต่งรูปแบบการใช้งานได้หลากหลายตามความสนใจของผู้ใช้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บาง Application รองรับกับยี่ห้อของมือถือเฉพาะรุ่น</li> </ul>
 iOS	บริษัท Apple	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี Application ที่หลากหลาย มีบริการ App Store, iTunes และ Web Brower ส่วนตัว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รองรับเฉพาะอุปกรณ์ในเครือของบริษัท Apple</li> <li>- ไม่สามารถออกแบบหรือปรับแต่งรูปแบบการใช้งานตามความต้องการส่วนตัว</li> </ul>

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติเซนเซอร์กล้องในสมาร์ทโฟนแต่ละยี่ห้อ [25]

Specifications	Apple iPhone 5 Sensor	Samsung Galaxy S II Sensor	HTC One X Sensor	Nokia Lumia 1020 Sensor	LG G3 (rear) Sensor
Product type	Mobile Phone	Mobile Phone	Mobile Phone	Mobile Phone	Mobile Phone
Manufacturer	Sony	Sony	Samsung	N/A	Sony
Commercial name	N/A	N/A	N/A	PureView Pro imaging technology	Exmor RS™
Size type	1/3.2-inch	1/3.2-inch	1/3.2-inch	2/3-inch	1/3.06-inch
Architecture type	BSI-CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS
Array type	Color Filter Array	Color Filter Array	Color Filter Array	Color Filter Array	Color Filter Array
Array type design	Bayer	Bayer	Bayer	Bayer	RGBW
Sensor size	4.54x3.42 mm	4.54x3.42 mm	4.54x3.42 mm	8.80x6.60 mm	4.69x3.53 mm
Total pixels	N/A	N/A	N/A	41MP	N/A
Total effective pixels	8MP	8MP	8MP	38MP	13.13MP
Model name	N/A	IMX105	S5K3H2YX	N/A	IMX135
Max. image resolution	3264x2448 pixels	3264x2448 pixels	3264x2448 pixels	7728x5368 pixels	4160x3120 pixels
Image ratio	4:3	4:3	4:3	4:3	4:3
Multiple ratios	N/A	N/A	N/A	4:3 16:9	4:3
Crop factor	7.6x	7.6x	7.6x	3.93x	7.4x

\*N/A = Non-applicable

## 2.5 การคำนวณ



รูปที่ 2.23 รูปชนิดของเลนส์แสดงรัศมีความโค้งของเลนส์แต่ละด้าน [15]

### 2.5.1 Lensmaker's equation [26] : สูตรหาระยะโฟกัสสำหรับเลนส์ทุกชนิด

$$\frac{1}{fl} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$fl$  = ระยะโฟกัส ; มิลลิเมตร (mm)

$n$  = ค่าดัชนีหักเห \*ค่าขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ทำเลนส์

$R_1$  = รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านหน้า ; มิลลิเมตร (mm)

$R_2$  = รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านหลัง ; มิลลิเมตร (mm)

\*  $R > 0$  เลนส์เป็นเลนส์นูน

$R < 0$  เลนส์เป็นเลนส์เว้า

$R = \infty$  เลนส์เป็นระนาบเรียบ



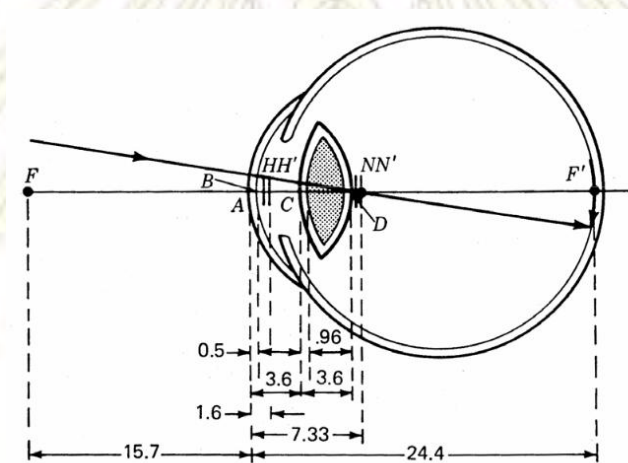
## 2.5.2 Magnification [27] : สูตรหาค่ากำลังขยายของภาพ

$$M = \frac{250}{fl}$$

$M$  = กำลังขยาย

$fl$  = ระยะโฟกัส ; มิลลิเมตร (mm)

250 mm คือระยะที่ตาของมนุษย์สามารถโฟกัสและมองเห็นภาพชัดเจน



รูปที่ 2.24 แสดงระยะที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นภาพชัดเจน [27]

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

1. เครื่องตัดเลเซอร์ (Laser cutting machine)
2. เครื่อง DXR Raman microscope (Thermo scientific), 780-nm excitation laser
3. เวอร์เนีย (Vernier)
4. Smartphone ยี่ห้อ Apple รุ่น iPhone 5
5. กรรไกร
6. กระดาษกราฟ
7. ถ้วยพลาสติก
8. สก๊อตเทป
9. ตะเกียบ
10. กาวสองหน้า
11. แผ่นอะคริลิกหนา 1 มิลลิเมตร

#### 3.2 สารเคมี

1. พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resins)

จากร้าน ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ สาขา สนามกีฬาแห่งชาติ

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 คำนวณเอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพอลิเอสเทอร์เรซิน



รูปที่ 3.1 เรซินใสจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์

#### 3.3.2 พิสูจน์เอกลักษณ์เรซินจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ โดยใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.2 เครื่อง Raman Spectrometer

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

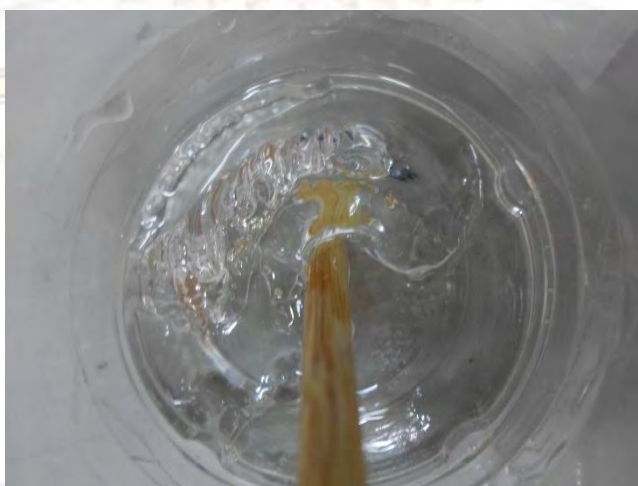
### 3.3.3 ออกแบบการทดลองการขึ้นรูปเลนส์โดยใช้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

1. วาดฐานเลนส์โดยใช้โปรแกรม Solid work
2. ทำการตัดฐานเลนส์โดยใช้เครื่องตัดเลเซอร์ (Laser cutting machine) ดังรูปที่ 3.3 ตัดแผ่นอะคริลิก โครงสร้างทางเคมีของแผ่นอะคริลิกแสดงที่ภาคผนวก ก หน้า 1 มิลลิเมตรเป็นวัสดุทำฐานเลนส์



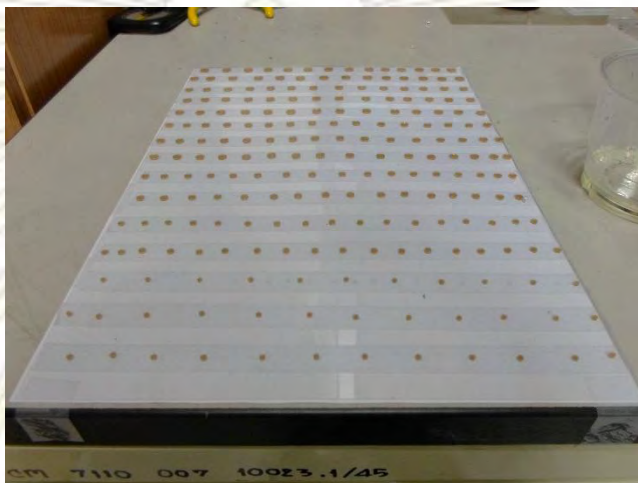
รูปที่ 3.3 เครื่อง Laser cutting machine

3. ผสมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว โดยใช้อัตราส่วน เนื้อเรซิน : ตัวริเริ่มปฏิกิริยา = 20 กรัม : 0.12 กรัม ลงในถ้วยพลาสติก ดังรูปที่ 3.4 คนให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเวลาประมาณ 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศ

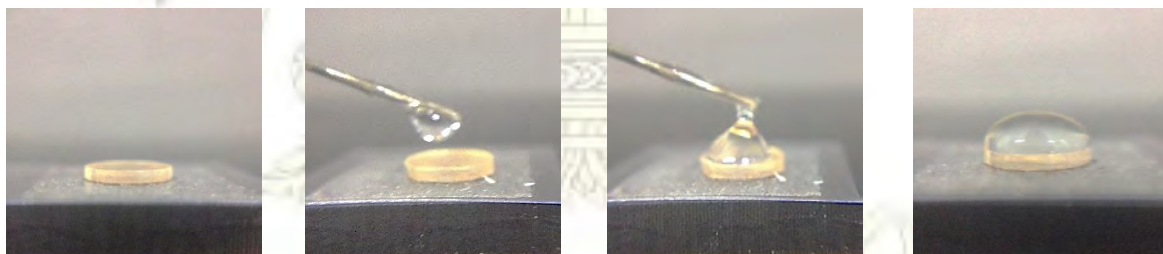


รูปที่ 3.4 เรซินใสที่ผสมในอัตราส่วน 20 กรัม : 0.12 กรัม

4. หยอดของเหลวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวลงบนฐานเลนส์ที่มีการควบคุมขนาดแต่ละเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5 ในการทดลองนี้ไม่สามารถควบคุมปริมาตรหยดของพอลิเอสเทอร์เรซินได้ เพราะเนื้อเรซินมีการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อความหนืดของเรซินที่ไม่คงที่

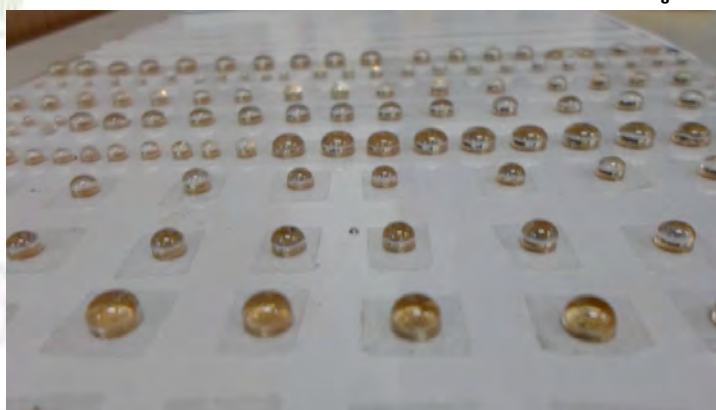


รูปที่ 3.5 ฐานอะคริลิกที่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3-7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 วิธีการหยดพอลิเอสเทอร์เรซินเลนส์

5. รอเป็นเวลา 12 ชั่วโมงให้เลนส์จากพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวคงตัว ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พอลิเอสเทอร์เรซินเลนส์ที่รอเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

### 3.3.4 เลือกสมาร์ตโฟนยี่ห้อ Apple รุ่น iPhone 5 สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเลนส์

จากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว โดยศึกษา

1. กำลังขยาย
2. ขนาดรัศมีความโค้งงอของเลนส์
3. ระยะโฟกัส
4. Field of View (FOV)

### 3.3.5 ถ่ายภาพตัวอย่างของธนบัตรจากประเทศเวียดนาม โดยใช้สมาร์ตโฟนของบริษัท Apple



รูปที่ 3.8 การถ่ายภาพตัวอย่างด้วยเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซิน

### 3.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลสรุปผล และเขียนรายงาน

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอธิบายผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองหาอัตราส่วนระหว่างเนื้อเรซินกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสม

เนื้อเรซิน : ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (กรัม)	เวลาที่เรซินคงรูป (นาท)	เวลาที่ฟองอากาศหายไป (นาท)
20 : 0.08	177	26
20 : 0.12	51	13
20 : 0.16	32	10
20 : 0.20	24	7

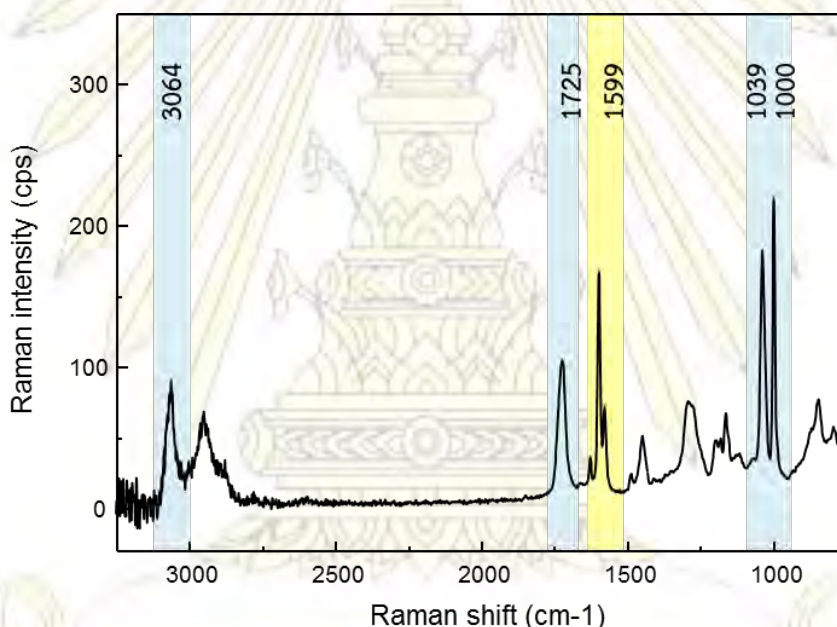
**ที่อัตราส่วน 20 กรัม : 0.08 กรัม** พบว่า ใช้เวลา 26 นาทีในการรอให้ฟองอากาศหายไปหมดในเนื้อเรซินที่ผสมแล้วถึงจะสามารถนำเรซินที่อัตราส่วนนี้ไปใช้ในการหยดเลนส์ พบว่าเวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนับตั้งแต่ผสมเนื้อเรซิน และตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 177 นาที แสดงว่าพอลิเอสเทอร์เรซินอัตราส่วนนี้มีเวลาทำงานทั้งหมด 151 นาทีนับตั้งแต่ฟองอากาศในเนื้อเรซินหมดหลังจากนี้เนื้อเรซินจะเริ่มหนืดจนไม่สามารถใช้งานได้

**ที่อัตราส่วน 20 กรัม : 0.12 กรัม** พบว่า ใช้เวลา 13 นาทีในการรอให้ฟองอากาศหายไปหมดในเนื้อเรซินที่ผสมแล้วถึงจะสามารถนำเรซินที่อัตราส่วนนี้ไปใช้ในการหยดเลนส์ พบว่าเวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนับตั้งแต่ผสมเนื้อเรซิน และตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 51 นาที แสดงว่าพอลิเอสเทอร์เรซินอัตราส่วนนี้มีเวลาทำงานทั้งหมด 38 นาทีนับตั้งแต่ฟองอากาศในเนื้อเรซินหมดหลังจากนี้เนื้อเรซินจะเริ่มหนืดจนไม่สามารถใช้งานได้

**ที่อัตราส่วน 20 กรัม : 0.16 กรัม** พบว่า ใช้เวลา 10 นาทีในการรอให้ฟองอากาศหายไปหมดในเนื้อเรซินที่ผสมแล้วถึงจะสามารถนำเรซินที่อัตราส่วนนี้ไปใช้ในการหยดเลนส์ พบว่าเวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนับตั้งแต่ผสมเนื้อเรซิน และตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 32 นาที แสดงว่าพอลิเอสเทอร์เรซินอัตราส่วนนี้มีเวลาทำงานทั้งหมด 22 นาทีนับตั้งแต่ฟองอากาศในเนื้อเรซินหมดหลังจากนี้เนื้อเรซินจะเริ่มหนืดจนไม่สามารถใช้งานได้

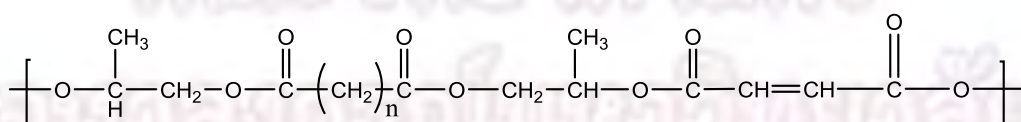
**ที่อัตราส่วน 20 กรัม : 0.20 กรัม** พบว่า ใช้เวลา 7 นาทีในการรอให้ฟองอากาศหายไปหมดในเนื้อเรซินที่ผสมแล้วถึงจะสามารถนำเรซินที่อัตราส่วนนี้ไปใช้ในการหยดเลนส์ พบว่าเวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนับตั้งแต่ผสมเนื้อเรซิน และตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 24 นาที แสดงว่าพอลิเอสเทอร์เรซินอัตราส่วนนี้มีเวลาทำงานทั้งหมด 17 นาทีนับตั้งแต่ฟองอากาศในเนื้อเรซินหมดหลังจากนี้เนื้อเรซินจะเริ่มหนืดจนไม่สามารถใช้งานได้

ดังนั้น ผู้ทดลองจึงเลือกใช้ เนื้อเรซิน : ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่อัตราส่วน 20 กรัม : 0.12 กรัม เพราะเวลาที่รอฟองอากาศหมดไปจากเนื้อเรซินที่เกิดจากการผสมให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยากับเนื้อเรซินเป็นเนื้อเดียวกันมีเวลาที่พอเหมาะไม่เร็วหรือช้าเกินไป และระยะเวลาที่สามารถใช้อัตราส่วนนี้ในการหยดเลนส์มีความเหมาะสมสอดคล้องกับเวลาที่รอให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์ คือ ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ถ้าดูจากตารางผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเวลาที่ฟองอากาศหายไปสัมพันธ์กับจำนวนหยดของตัวตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากอัตราส่วนที่ทางผู้ค้าแนะนำมา คือ 20 กรัม : 0.20 กรัม แต่ผู้ทดลองไม่สามารถใช้อัตราส่วนนี้ได้ เพราะพอลิเอสเทอร์เรซินที่ใช้เป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดยืดหยุ่นที่ใช้ในงานหล่อใส หรือเคลือบกรอบรูปวิทยาศาสตร์ ไม่ได้เน้นใช้เวลาในการทำงาน และเวลาที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่สมบูรณ์ คือ ประมาณ 10 ชั่วโมง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ ในอัตราส่วนที่ 20 กรัม : 0.08 กรัม จะเห็นได้ว่าใช้เวลานานมากกว่าจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งส่งผลต่อเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ที่จะใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าเวลาที่นานขึ้นกว่าจะได้เลนส์ที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเอกลักษณ์ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อึดตัวจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์




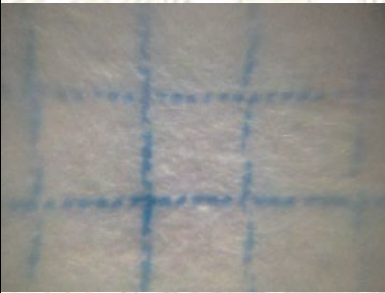
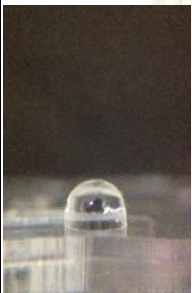

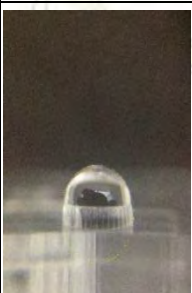
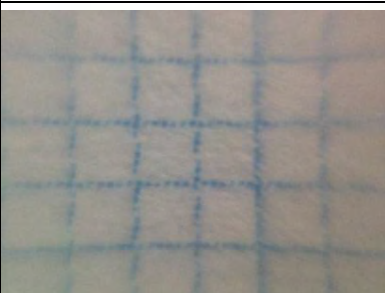


จากกราฟรามานของ รูปที่ 4.1 แสดงเอกลักษณ์ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อึดตัวจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ พบว่า ที่  $1599.64 \text{ cm}^{-1}$  คือ พีคของ  $\text{C}=\text{C}$  และปรากฏพีค  $\text{C-H}$  แบบ  $sp^2$  ที่  $3064.24 \text{ cm}^{-1}$  ยืนยันว่ามี สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อึดตัว นอกจากนี้ที่  $1725.54 \text{ cm}^{-1}$  แสดงพีคของ  $\text{C}=\text{O}$  และที่  $1039.29 \text{ cm}^{-1}$  กับ  $1000.06 \text{ cm}^{-1}$  คือ พีคของ  $\text{C-O}$  แสดงให้เห็นว่าเรซินที่ซื้อจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ และไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะคู่ จากการศึกษารูปของพอลิเอสเทอร์ เรซินจึงสรุปได้ว่า เรซินที่ใช้ขึ้นรูปเลนส์ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อึดตัวแบบยืดหยุ่น (Flexible Polyester Resin) ดังตัวอย่าง รูปที่ 4.2

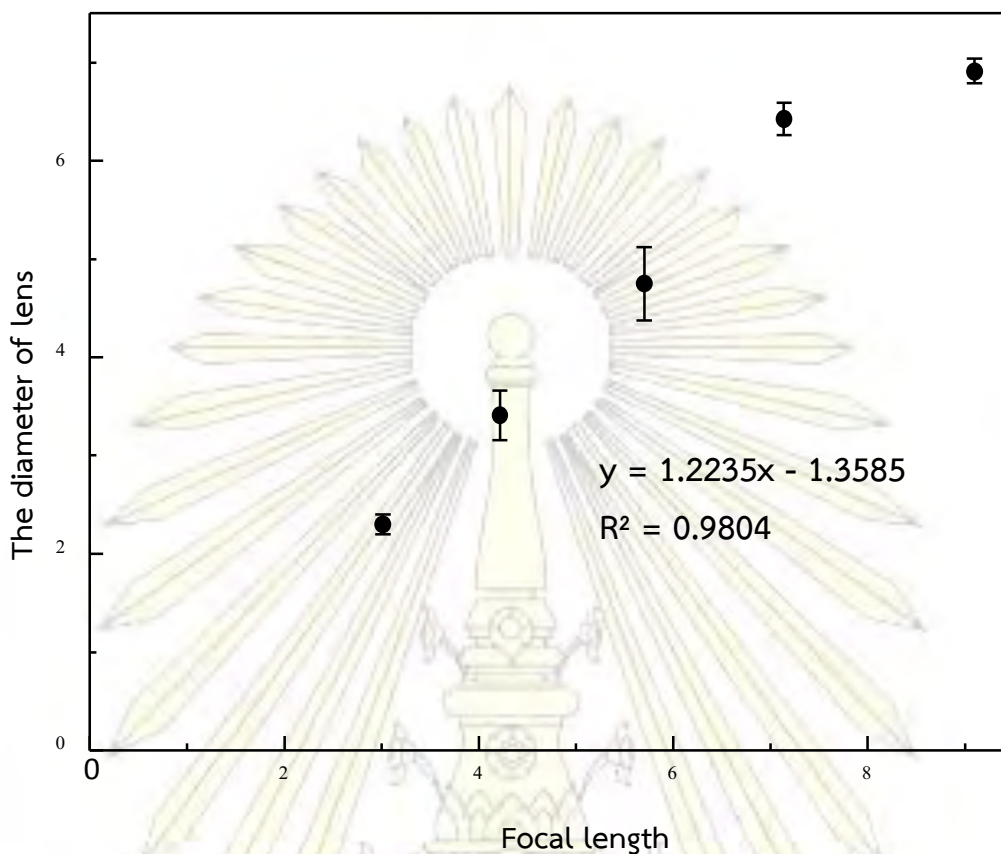


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อึดตัวแบบยืดหยุ่น (Flexible Polyester Resin)



ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดลองแสดงค่าต่าง ๆ ของเลนส์แต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	รูปเลนส์	ภาพถ่ายกระดาษกราฟด้วยเลนส์	รัศมี (มิลลิเมตร)	ระยะโฟกัส (มิลลิเมตร)	กำลังขยาย (มิลลิเมตร)	ขอบเขตการมองเห็น (มิลลิเมตร)
3			1.51	2.30	110	2.97
4			2.11	3.41	75	4.80
5			2.85	4.75	50	6.36
6			3.57	6.42	40	8.58
7			4.55	6.91	36	10.67



รูปที่ 4.3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเลนส์ผ่านศูนย์กลางเลนส์ตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรกับระยะโฟกัสของเลนส์

**ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มิลลิเมตร :** จากรูปเลนส์มีขนาดรัศมี 1.51 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 2.30 มิลลิเมตร กำลังขยาย 108.88 เท่า ที่ภาพถ่ายกระดาษกราฟพบว่า สีพื้นหลังของภาพไม่สม่ำเสมอ ตรงกลางของภาพมีความชัดเจน แต่บริเวณขอบภาพไม่คมชัด โค้งงอเล็กน้อย เพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด และเลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มิลลิเมตร มีขนาดเล็กกว่ารูรับแสงของกล้องมาก จึงทำให้เห็นขอบภาพมืด

**ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร :** จากรูปเลนส์มีขนาดรัศมี 2.11 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 3.41 มิลลิเมตร กำลังขยาย 73.65 เท่า ที่ภาพถ่ายกระดาษกราฟพบว่า สีพื้นหลังของภาพไม่สม่ำเสมอ ตรงกลางของภาพมีความชัดเจน แต่บริเวณขอบภาพไม่คมชัด และพื้นผิวกระดาษกราฟขรุขระ เพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

**ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร :** จากรูปเลนส์มีขนาดรัศมี 2.85 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 4.75 มิลลิเมตร กำลังขยาย 52.92 เท่า ที่ภาพถ่ายกระดาศกรภาพพบว่า สีพื้นหลังของภาพไม่สม่ำเสมอ ตรงกลางของภาพมีความชัดเจน แต่บริเวณขอบภาพไม่คมชัด และพื้นผิวกระดาศกรภาพขรุขระ เพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

**ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร :** จากรูปเลนส์มีขนาดรัศมี 3.57 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 6.42 มิลลิเมตร กำลังขยาย 38.99 เท่า ที่ภาพถ่ายกระดาศกรภาพพบว่า สีพื้นหลังของภาพไม่สม่ำเสมอ ภาพมีลักษณะนูนและโค้งงอ ตรงกลางของภาพมีความชัดเจน แต่บริเวณขอบภาพไม่คมชัด เพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

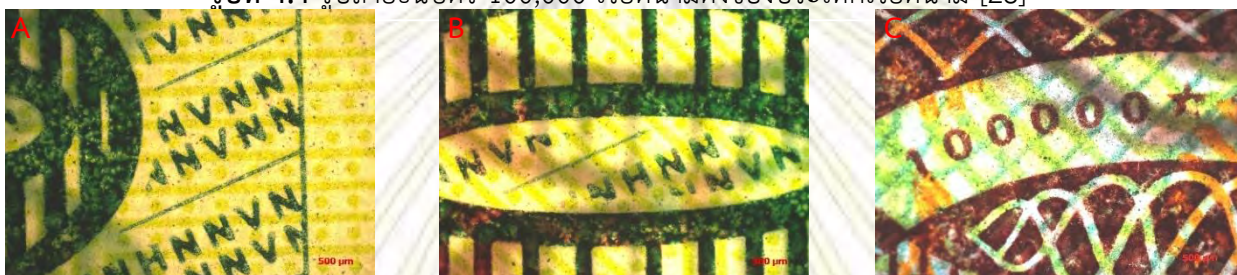
**ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มิลลิเมตร :** จากรูปเลนส์มีขนาดรัศมี 4.55 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 6.91 มิลลิเมตร กำลังขยาย 36.19 เท่า ที่ภาพถ่ายกระดาศกรภาพพบว่า สีพื้นหลังของภาพไม่สม่ำเสมอ ภาพมีลักษณะนูนและโค้งงอ ตรงกลางของภาพมีความชัดเจน แต่บริเวณขอบภาพไม่คมชัด เพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

จาก **รูปที่ 4.3** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร กับระยะโฟกัสที่วัดได้ พบว่ากราฟเป็นเส้นตรง แต่จะเห็นได้ว่าที่เส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์ขนาด 5 มิลลิเมตร มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดมีสาเหตุมาจากเลนส์จำนวน 10 ตัวของเลนส์ ดังที่แสดงที่ภาคผนวก ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรมีรัศมีความโค้งที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ระยะโฟกัสเปลี่ยนแปลง การทดลองนี้ไม่สามารถควบคุมปริมาณหยดของพอลิเอสเทอร์เรซินให้คงที่ได้เพราะพอลิเอสเทอร์เรซินเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดตลอดเวลา นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าภาพถ่ายกระดาศกรภาพจะมีความคมชัดที่ระยะตรงกลางภาพมากกว่าขอบภาพ สาเหตุมาจากไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสที่แน่นอน และอิทธิพลของชนิดเลนส์จากพอลิเอสเทอร์เรซินด้วย

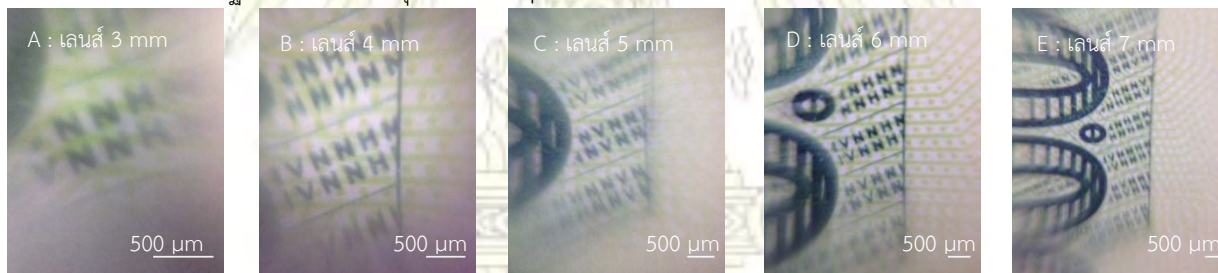
4.1 ภาพถ่ายธนบัตรของประเทศเวียดนามด้วยเลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ



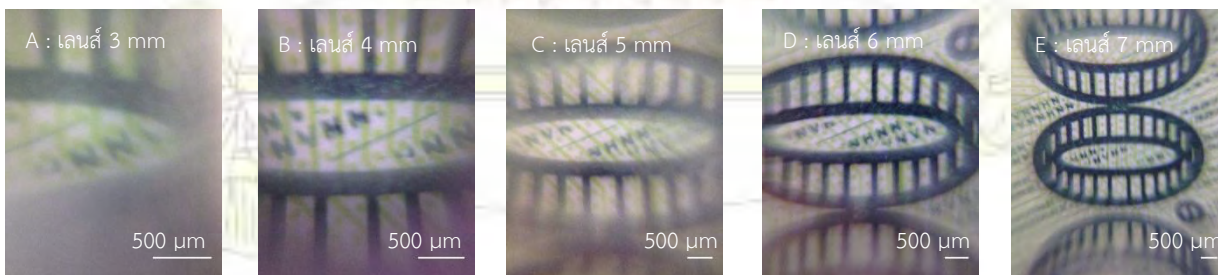
รูปที่ 4.4 รูปถ่ายธนบัตร 100,000 เวียดนามแดงของประเทศเวียดนาม [28]



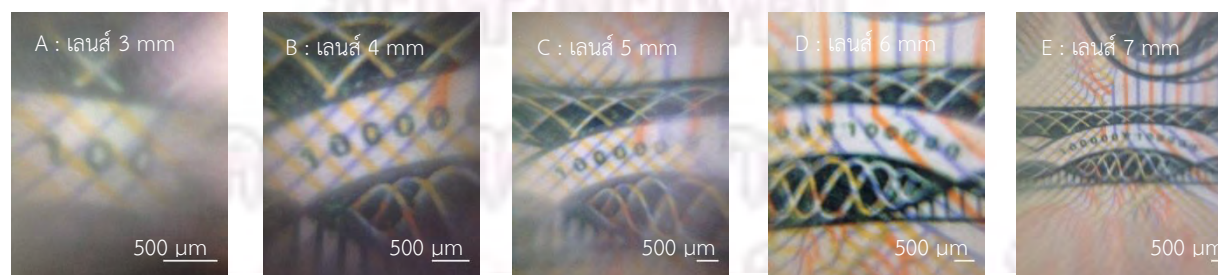
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (A) A, ตำแหน่ง (B) B และตำแหน่ง (C) C ด้วยกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (carl Zeiss รุ่น Axio Scope)



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (A) ด้วยเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม้อิมตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (B) ด้วยเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม้อิมตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายธนบัตรเวียดนามตำแหน่ง (C) ด้วยเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม้อิมตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง A 3 มม B 4 มม C 5 มม D 6 มม และ E 7 มม

จากภาพ 4.4 คือภาพธนบัตร 100,000 เวียดนามดง ทำการทดลองถ่ายภาพทั้งหมด 3 ตำแหน่งจาก รูปที่ 4.5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss รุ่น Axio scope) เทียบกับรูปถ่ายโดยใช้เลนส์พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่มีมิตัวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 จากการทดลองพบว่า

ที่ รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งภาพธนบัตรตำแหน่ง A ของ รูปที่ 4.4 พบว่าที่ รูปที่ 4.6 A ที่ 3 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ ภาพค่อนข้างมืด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดเพราะเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม มีขนาดเล็กกว่ารูกล้องมากจึงทำให้ขอบภาพมืด และไม่ชัดเจน นอกจากนี้มีระยะโฟกัสที่สั้นจึงทำให้แสงไม่สามารถส่งผ่านไปที่บริเวณภาพได้หมดทำให้สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.6 B ที่ 4 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด ตรงกลางของภาพมีความคมชัด และชัดเจนที่สุดสามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนแต่ตรงกลางของภาพมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อยเพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ภาพบางส่วนไม่ชัดเจน รูปที่ 4.6 C ที่ 5 มม พบว่าภาพไม่คมชัดสีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ แต่สามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพคมชัด รูปที่ 4.5 ก 4 : เลนส์ 6 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดสามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด รูปที่ 4.5 ก 5 : เลนส์ 7 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัดแต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดและชัดเจนที่สุด สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพคมชัด

ที่ รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งภาพธนบัตรตำแหน่ง B ของ รูปที่ 4.4 พบว่าที่ รูปที่ 4.7 A ที่ 3 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ ภาพค่อนข้างมืด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดเพราะเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม มีขนาดเล็กกว่ารูรับแสงของกล้องมากจึงทำให้ขอบภาพมืดและไม่ชัดเจน นอกจากนี้มีระยะโฟกัสที่สั้นจึงทำให้แสงไม่สามารถส่งผ่านไปที่บริเวณภาพได้หมดทำให้สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.7 B ที่ 4 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดสามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจน สาเหตุเพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ภาพบางส่วนไม่ชัดเจน รูปที่ 4.7 C ที่ 5 มม พบว่าภาพไม่คมชัด สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ แต่สามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด รูปที่ 4.7 D ที่ 6 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดสามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด รูปที่ 4.7 E ที่ 7 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัดแต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุด สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

กรมวิชาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ รูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งภาพบนบัตรตำแหน่ง C ของ รูปที่ 4.4 พบว่าที่ รูปที่ 4.8 A ที่ 3 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ ภาพค่อนข้างมืด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดเพราะ เลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม มีขนาดเล็กกว่ารูรับแสงของกล้องมากจึงทำให้ขอบภาพมืดและไม่ ชัดเจน นอกจากนี้มีระยะโฟกัสที่สั้นจึงทำให้แสงไม่สามารถส่งผ่านไปทั่วบริเวณภาพได้หมดทำให้สีพื้นหลังไม่ สม่ำเสมอ รูปที่ 4.8 B ที่ 4 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุดสามารถเห็น ตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจน สาเหตุเพราะไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ภาพ บางส่วนไม่ชัดเจน รูปที่ 4.8 C ที่ 5 มม พบว่าภาพไม่คมชัด สีพื้นหลังไม่สม่ำเสมอ แต่สามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้ แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด รูปที่ 4.8 D ที่ 6 มม พบว่าขอบภาพไม่คมชัด แต่ตรงกลางของภาพมีความ คมชัดที่สุดสามารถเห็นตัวอักษร และตัวเลขที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของภาพ สาเหตุมาจากการไม่มี ฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด รูปที่ 4.8 E ที่ 7 มม พบว่าขอบภาพไม่ คมชัด แต่ตรงกลางของภาพมีความคมชัดที่สุด สาเหตุมาจากการไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้ แน่นอนจึงทำให้ขอบภาพไม่คมชัด

จากผลการทดลองพบว่าที่เส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์ขนาดสั้น สามารถขยายภาพในบริเวณเดียวกันได้ มาก แต่ภาพไม่คมชัด สาเหตุมาจากไม่มีฐานที่สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้แน่นอน และขนาดของเลนส์เล็ก กว่ารูรับแสงของกล้องมาก ทำให้กล้องของสมาร์ทโฟนไม่สามารถโฟกัสได้ครบทุกจุดของภาพ นอกจากนี้ยัง พบว่า ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นเลนส์นั้นยังส่งผลต่อความคมชัดของภาพ เช่น พอลิเอสเตอร์เรซินมีค่าดัชนีหัก เหน้ที่น้อยกว่ากระจก และจากภาพพบว่าสามารถโฟกัสภาพได้เฉพาะตรงกลางนั้น เพราะพอลิเอสเตอร์เรซิน เลนส์เป็นเลนส์ชนิด เลนส์นูนแกมระนาบ (plano-convex Lens) จากความโค้งของเลนส์นูนทำให้แสงที่ตก กระทบเลนส์เกิดทิศทางการเบี่ยงเบนของแสงไม่เท่ากันส่งผลกระทบให้เกิดมุมตกกระทบที่ไม่เท่ากัน บริเวณ ขอบภาพจึงมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อย การบิดเบือนของภาพ (distortion) นี้เป็นความผิดพลาดที่สามารถรับได้ เมื่อเทียบกับเลนส์ที่ทำจากกระจก หรือฟิสิกส์เอ็มเอสเลนส์ เพราะราคาถูกกว่ากันมาก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตเลนส์ด้วยวิธีการ confined sessile droplet lens สามารถผลิตเลนส์นูนแกมระนาบที่มีกำลังขยายสูงจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวได้จริง ลดข้อจำกัดในเรื่องต้นทุนการผลิต ต้นทุนวัสดุ และปัญหาการขึ้นรูปเลนส์ เช่น ฟองอากาศ การควบคุมทิศทางการไหลของของเหลว จากการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ให้มีขนาด 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร พบว่าระยะโฟกัสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์มีความสัมพันธ์กัน ส่งผลถึงกำลังขยายของเลนส์ เลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ คือ 7 มม จะได้ระยะโฟกัสที่ยาวที่สุด คือ 6.91 มม และกำลังขยายที่ต่ำ คือ 10.67 เท่า ในขณะที่เลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก คือ 3 มม มีระยะโฟกัสที่สั้นที่สุด คือ 2.3 มม และกำลังขยายที่สูง คือ 108.88 เท่า เมื่อนำเลนส์ต้นแบบจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมาประยุกต์เข้ากับสมาร์ตโฟนพัฒนากลายเป็นกล้องจุลทรรศน์พบว่า สามารถถ่ายภาพตัวอย่างธันดรเวียดนามได้ที่กำลังขยายขนาดต่างๆ ตามที่เลนส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆกัน ทำให้ได้ต้นแบบกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟนราคาถูกจากเลนส์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีราคาต้นทุนที่ถูกกว่ากล้องจุลทรรศน์ในห้องปฏิบัติการ และสามารถพกพาอุปกรณ์ไปได้ทุกที่

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ไม่ควรใช้เครื่องดูดสุญญากาศเร่งเวลาการหายไปของฟองอากาศในเนื้อเรซินที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะจะทำให้เนื้อเรซินหนืดจนไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเลนส์ได้

#### 5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้เลนส์กำลังขยายสำหรับพัฒนาเป็นต้นแบบกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน ที่มีราคาต้นทุนถูก โดยใช้วิธี Confined sessile droplets สามารถลดปัญหาในการทำเลนส์ และใช้วัสดุที่ราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป คือ พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

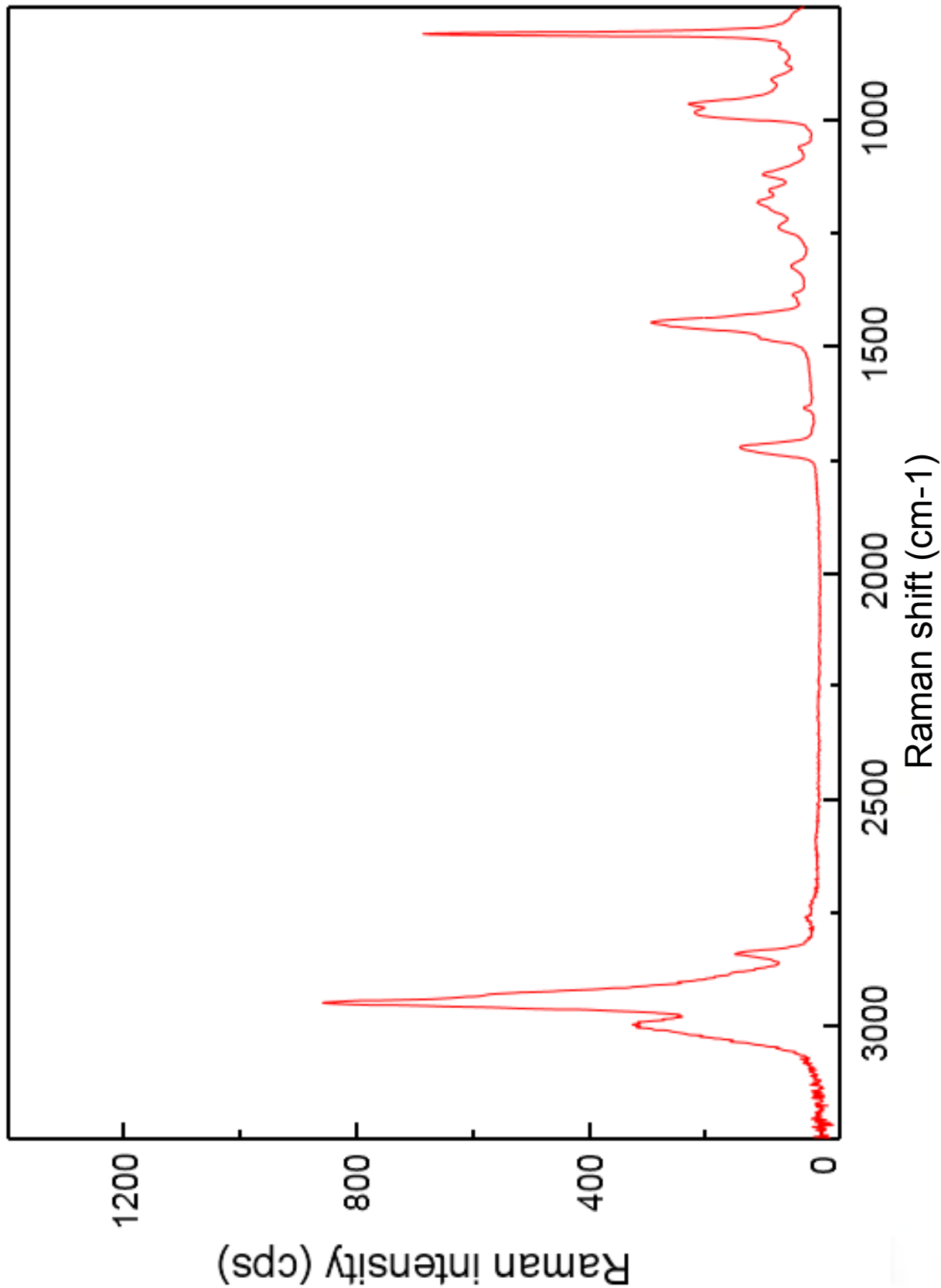
## เอกสารอ้างอิง

1. Gopinath, C. B.; Tang, T. H.; Chen, Y.; Citartan, M.; Lakshmipriya, T. Bacterial Detection: from Microscope to Smartphone. *Biosens Bioelectron* **2014**, *60*, 332-342.
2. Breslauer, D. N.; Maamari, R. N.; Switz, N. A.; Lam, W. A.; Fletcher, D. A. Mobile Phone Based Clinical Microscopy for Global Health Applications. *PLOS ONE* **2014**, *4*, e6320.
3. Qing, Y.; Ding, X.; Qing, J.L.; Bao, J.Y.; Guang, Q.D.; Jian, T. Automated Counting of Rice Planthoppers in Paddy Fields Based on Image Processing. *Int. Argi.* **2014**, *13*, 1736-1745.
4. Smith, J. Z.; Chu, K.; Espenson, R. A.; Rahimzadeh, M.; Gryshuk, A.; Molinaro M.; Dwyre, M. D.; Lane, S.; Matthewa, D.; Wachsmann-Hogiu, S. Cell-Phone-Based Platform for Biomedical Device Development and Education Applications. *PLOS ONE* **2011**, *6*, e17150.
5. McDonald, C.; McGloin, D. Low-Cost Optical Manipulation using Hanging Droplets of PDMS. *RSC Adv.* **2015**, *5*, 55561-55565.
6. Wong, E. J. Modeling and Control of Rapid Cure in Polydimethylsiloxane (PDMS) for Microfluidic Device Applications. Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2010.
7. Shih, T. K.; Chen, C. F.; Ho, J. R.; Chuang, F. T. Fabrication of PDMS (Polydimethylsiloxane) Microlens and Diffuser using Replica Molding. *Microelectronic Eng* **2006**, *83*, 2499–2503.
8. Hsieh, H. T.; Lin, V.; Hsieh, J. L.; Wei, H. C.; Su, G. J. Design and Fabrication of Long-Focal-Length Microlens Arrays for Shack-Hartmann Wavefront Sensors. *Opt Commun* **2011**, *284*, 5225–5230.
9. Lee, W. M.; Upadhyaya, A.; Reece, P. J.; Phan, T. G. Fabricating Low Cost and High Performance Elastomer Lenses using Hanging Droplets. *Biomed. Opt. Express.* **2014**, *5*, 1626-1635.
10. Sung, Y. L.; Jeang, J.; Lee, C. H.; Shih, W. C. Fabricating Optical Lenses by Inkjet Printing and Heat-Assisted in Situ Curing of Polydimethylsiloxane for Smartphone Microscopy. *J. Biomed. Opt.* **2015**, *20*, 047005.
11. Klubdee K. Preparation of Unsaturated Polyester Resin from Polyester Fabric Scraps. M.A. Dissertation, Chulalongkorn University, 2004.



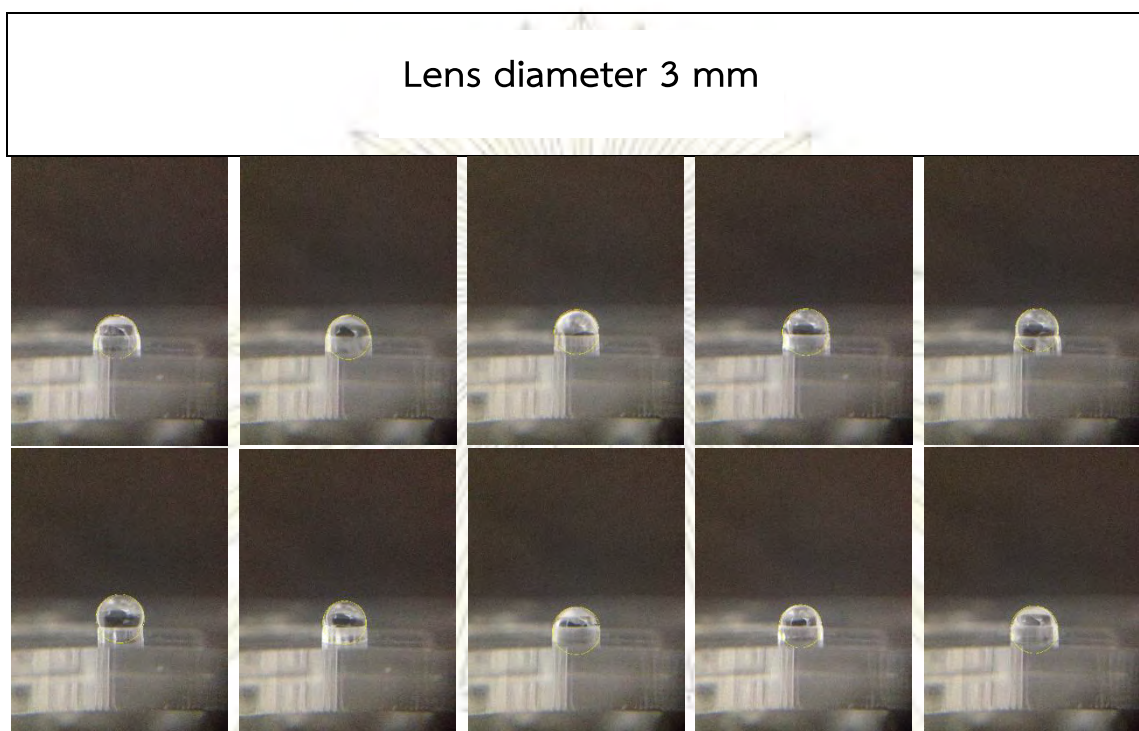
12. <http://www.intechopen.com/books/export/citation/ReferenceManager/polyester/unsaturated-polyester-resin-for-specialty-applications> (accessed 1 Apr. 2016)
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lens\\_%28optics%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_%28optics%29) (accessed 4 Apr. 2016)
14. <http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh14.htm> (accessed 4 Apr. 2016)
15. <https://micro.magnet.fsu.edu/optics/lightandcolor/lenses.html> (accessed 2 Apr. 2016)
16. <https://th.wikipedia.org/wiki/กล้องจุลทรรศน์> (accessed 4 Apr. 2016)
17. <http://accu-scope.com/products/3075-stereo-microscope-series/> (accessed 4 Apr. 2016)
18. <http://altered-states.net/barry/darkfieldmicroscope/index.htm> (accessed 4 Apr. 2016)
19. <http://www.microscope.com/specialty-microscopes/epi-fluorescence-microscopes/meiji-techno-mt6000-epi-fluorescence-microscope.html> (accessed 4 Apr. 2016)
20. <http://www.microscope.com/specialty-microscopes/polarizing-microscopes/motic-ba310p-polarizing-compound-microscope.html> (accessed 4 Apr. 2016)
21. <http://microscopecentral.com/collections/inverted-microscopes> (accessed 4 Apr. 2016)
22. [http://www.futurelabs.co.in/?page\\_id=28](http://www.futurelabs.co.in/?page_id=28) (accessed 4 Apr. 2016)
23. <http://jiam.utk.edu/facilities/microscopy/tem/index.php> (accessed 4 Apr. 2016)
24. <http://www.orientalprincesssociety.com/lifestyle.php?id=418> (accessed 2 Apr. 2016)
25. <http://cameraimagesensor.com/size/#> (accessed 2 Apr. 2016)
26. <http://www.livephysics.com/tools/optics-tools/focal-length-thin-lens/> (accessed 1 Apr. 2016)
27. <http://www2.ensc.sfu.ca/~glenn/e894/e894l5i.pdf> (accessed 1 Apr. 2016)
28. <http://akparts.com/index.htm?c93.htm&1> (accessed 2 Apr. 2016)

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก1 แสดงสเปกตรัมของอะคริลิก คือ Polymethylmethacrylate ที่ใช้เป็นฐานเลนส์

ตารางที่ ก1 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม จำนวน 10 อัน



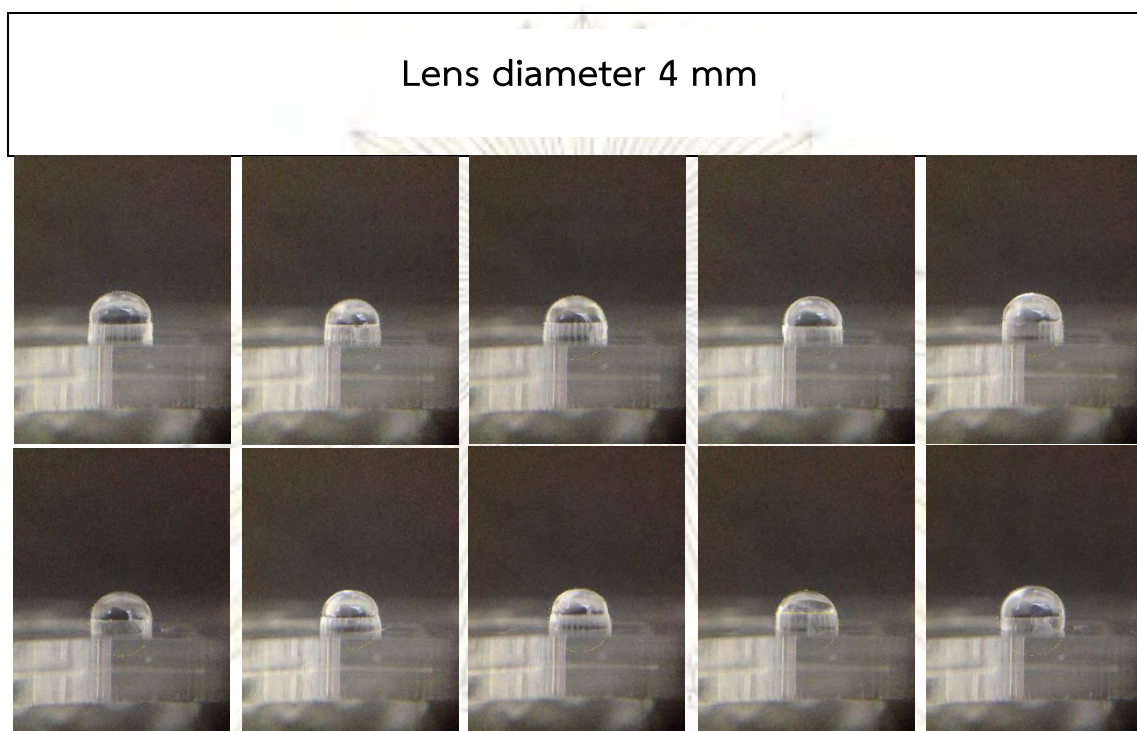
ตารางที่ ก2 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มม จำนวน 10 อัน

Lens 3 mm	FOV (mm)	R (mm)	Focal length (mm)	Magnification
1	2.851	1.452	2.200	113.636
2	2.650	1.558	2.350	106.383
3	2.923	1.558	2.300	108.696
4	3.038	1.511	2.500	100.000
5	2.955	1.485	2.350	106.383
6	3.199	1.540	2.300	108.696
7	3.048	1.476	2.350	106.383
8	2.987	1.485	2.200	113.636
9	2.994	1.479	2.300	108.696
10	3.010	1.520	2.150	116.279
เฉลี่ย	$2.966 \pm 0.143$	$1.506 \pm 0.0368$	$2.300 \pm 0.100$	$108.879 \pm 4.686$

\* FOV = Field of View

R = รัศมีความโค้งเลนส์

ตารางที่ ก3 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม จำนวน 10 อัน



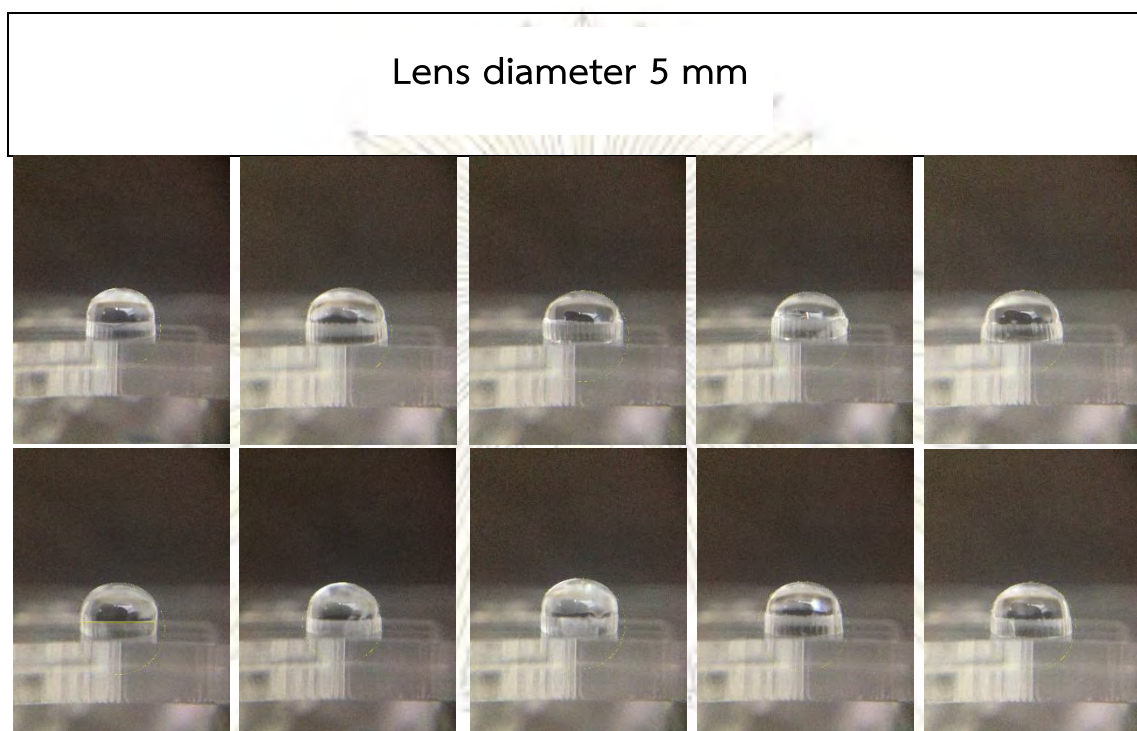
ตารางที่ ก4 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม จำนวน 10 อัน

Lens 4 mm	L (mm)	R (mm)	Focal length (mm)	Magnification
1	4.871	2.095	3.950	63.291
2	4.541	2.074	3.300	75.758
3	4.890	2.116	3.300	75.758
4	4.709	2.155	3.200	78.125
5	4.907	2.093	3.200	78.125
6	4.821	2.109	3.200	78.125
7	4.910	2.097	3.300	75.758
8	4.642	2.179	3.450	72.464
9	4.887	2.070	3.750	66.667
10	4.773	2.096	3.450	72.464
เฉลี่ย	$4.795 \pm 0.127$	$2.109 \pm 0.0343$	$3.447 \pm 0.254$	$73.654 \pm 5.080$

\* FOV = Field of View

R = รัศมีความโค้งเลนส์

ตารางที่ ก5 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มม จำนวน 10 อัน



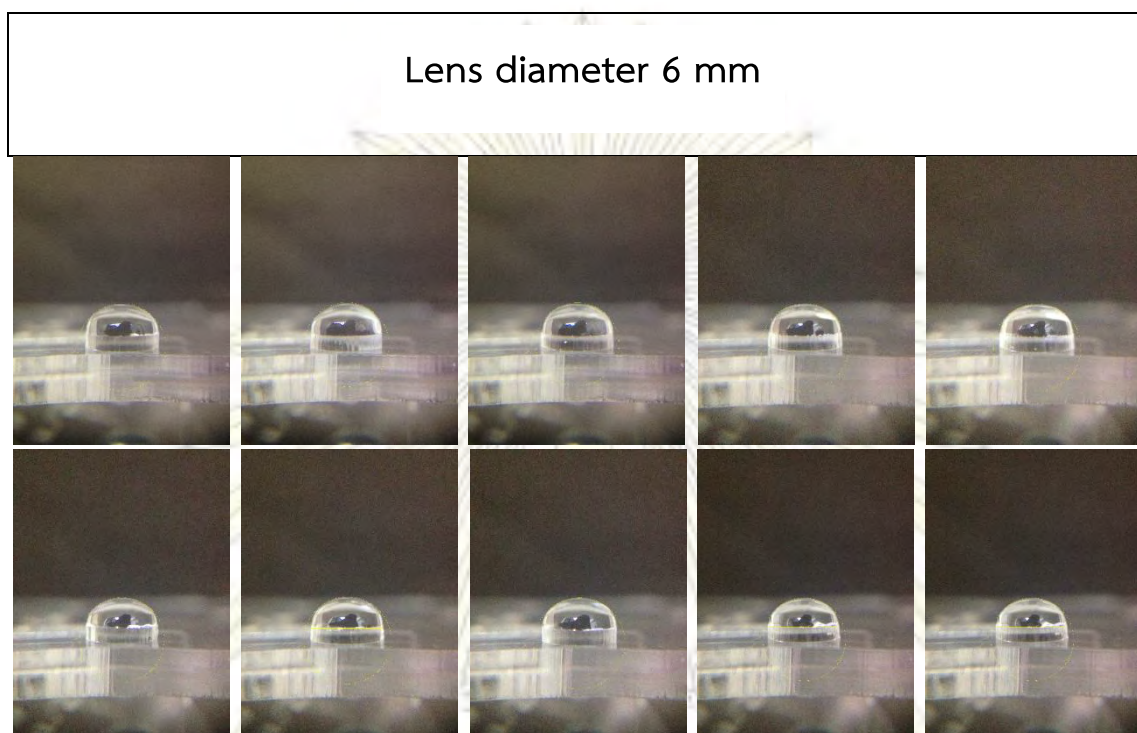
ตารางที่ ก6 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มม จำนวน 10 อัน

Lens 5 mm	L (mm)	R (mm)	Focal length (mm)	Magnification
1	6.772	2.962	4.650	53.763
2	6.042	2.962	4.400	56.818
3	5.747	2.702	4.750	52.632
4	6.821	2.946	5.400	46.296
5	6.232	2.926	4.900	51.020
6	6.609	2.815	4.500	55.556
7	6.479	2.846	5.350	46.729
8	6.557	2.848	4.600	54.348
9	5.813	2.750	4.700	53.191
10	6.517	2.756	4.250	58.824
เฉลี่ย	$6.359 \pm 0.382$	$2.851 \pm 0.0955$	$4.750 \pm 0.377$	$52.918 \pm 4.024$

\* FOV = Field of View

R = รัศมีความโค้งเลนส์

ตารางที่ ก7 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม จำนวน 10 อัน



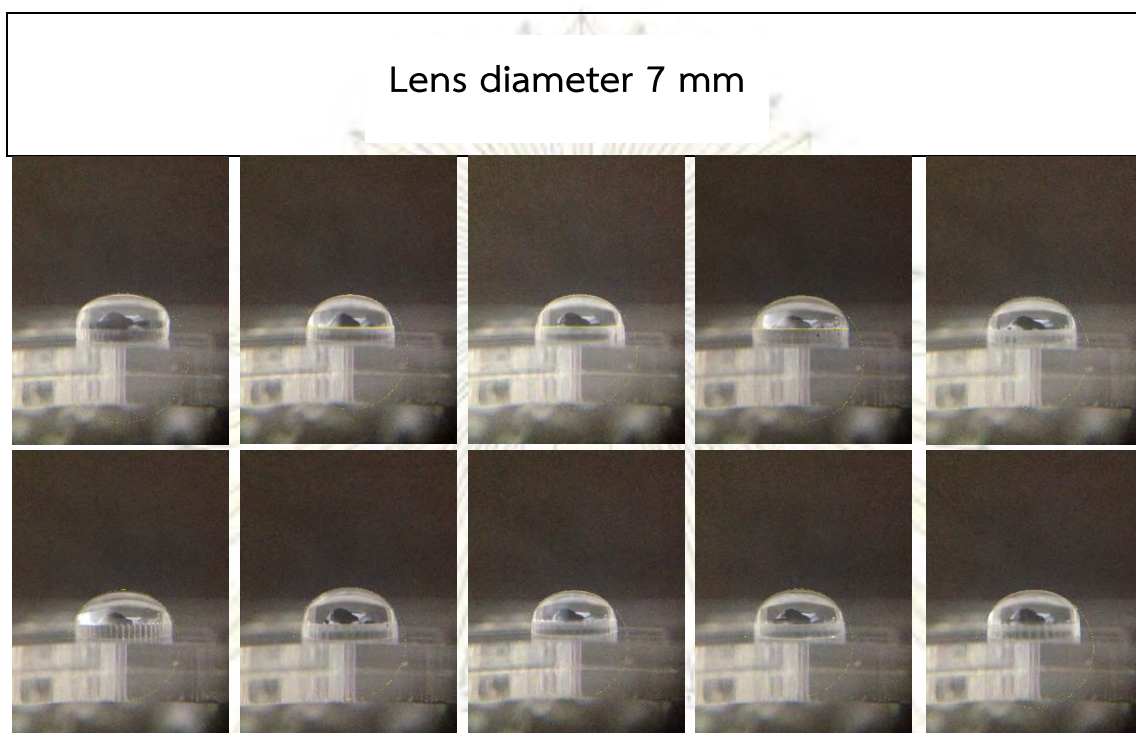
ตารางที่ ก8 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม จำนวน 10 อัน

Lens 6 mm	L (mm)	R (mm)	Focal length (mm)	Magnification
1	8.608	3.550	6.300	39.683
2	8.402	3.586	6.800	36.765
3	8.684	3.518	6.500	38.462
4	8.911	3.598	6.400	39.063
5	9.077	3.508	6.350	39.370
6	8.831	3.524	6.450	38.760
7	7.694	3.601	6.350	39.370
8	9.596	3.652	6.500	38.462
9	8.458	3.635	6.200	40.323
10	7.587	3.506	6.300	39.683
เฉลี่ย	$8.585 \pm 0.604$	$3.568 \pm 0.0538$	$6.415 \pm 0.165$	$38.994 \pm 0.977$

\* FOV = Field of View

R = รัศมีความโค้งเลนส์

ตารางที่ ก9 ตารางแสดงรูปถ่ายเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มม จำนวน 10 อัน



ตารางที่ ก10 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ศึกษาจากเลนส์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7 มม จำนวน 10 อัน

Lens 7 mm	L (mm)	R (mm)	Focal length (mm)	Magnification
1	9.411	4.527	6.900	36.232
2	11.041	4.501	6.750	37.037
3	9.688	4.420	6.800	36.765
4	11.367	4.552	7.050	35.461
5	10.588	4.570	6.850	36.496
6	11.420	4.591	6.900	36.232
7	10.458	4.682	7.150	34.965
8	10.458	4.317	7.000	35.714
9	11.302	4.716	6.900	36.232
10	10.938	4.598	6.800	36.765
เฉลี่ย	$10.667 \pm 0.165$	$4.547 \pm 0.117$	$6.910 \pm 0.124$	$36.190 \pm 0.644$

\* FOV = Field of View

R = รัศมีความโค้งเลนส์

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้ทำวิจัย

นางสาวปิยพร ศักดิ์ภิรมย์ เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดชุมพร สำเร็จชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนก วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ จากโรงเรียน เซนหลุยส์ ฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา เมื่อปีการศึกษา 2553 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศา สตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 ที่ อยู่ที่สามารถติดต่อกันได้หลังจบการศึกษาปริญญาตรี 86/9-/10 ถนนมหาจักรพรรดิ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000



ภาควิชาเคมี  
 คณะวิทยาศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย