โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงสำหรับกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน

Fabrication of High Magnification PDMS elastomeric Lens for Smartphone Microscope

ชื่อนิสิต นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงสำหรับกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน

Fabrication of High Magnification PDMS elastomeric Lens for Smartphone Microscope

โดย

นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559

โครงการ การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงสำหรับกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน

โดย นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช

ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วชิรวงศ์กวิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรักษ์สิทธิ์)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)
หัวหน้าภาควิชาเคมี
วันที่.....เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ☑ ดีมาก ☐ ดี ☐ พอใช้

ชื่อโครงการ การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงสำหรับกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน
ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช เลขประจำตัว 5633111423
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

การศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัตินำไปสู่การเข้าถึงระบบขนาดเล็กนั้นได้รับความสนใจและเชื่อมโยงเข้ากับชีวิตประจำวัน การศึกษา วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีทางการแพทย์ การนำเลนส์ที่มีกำลังขยายไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความนิยมสูงสุดในปัจจุบัน อาจเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้เข้าถึงข้อมูลของระบบขนาดเล็ก เพื่อศึกษาและสามารถจัดการกับระบบเหล่านั้นได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กหรือไมโครเลนส์อย่างง่ายผ่านเทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต โดยใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนหรือพีดีเอ็มเอส เริ่มจากการเตรียมวัสดุรองรับไมโครเลนส์ ซึ่งทำได้โดยนำอะคริลิกเรียบรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00-5.00 มิลลิเมตร ติดกับกระจกสไลด์ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หลังจากเตรียมฐานสำหรับขึ้นรูปเลนส์แล้ว จึงนำพีดีเอ็มเอสเหลวใสที่ปราศจากฟองอากาศไปหยดเหนือผิวหน้าของฐานอะคริลิก พีดีเอ็มเอสที่มีความหนืดนั้นจะกระจายตัวไปอย่างช้า ๆ บนฐานที่มีขอบคมก่อนจะเกิดเป็นทรงกลมที่มีความโค้ง หลังจากให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 นาที พีดีเอ็มเอส-เหลวจะเปลี่ยนสภาพเป็นพีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่มีรูปร่างแบบเลนส์นูนแกมระนาบ ในการศึกษาอิทธิพลเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานอะคริลิก และปริมาตรของพีดีเอ็มเอสพบว่าไมโครเลนส์ที่ขึ้นรูปได้มีระยะโฟกัส 2.0-8.0 มิลลิเมตร และมีกำลังขยาย 31.3-125.0 เท่า (เลนส์ที่มีฐานขนาดเล็กกว่าจะทำให้ได้ระยะโฟกัสที่สั้นกว่าและมีกำลังขยายสูงกว่า) เมื่อนำเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ไปติดกับกล้องของสมาร์ตโฟน จะทำให้ได้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลที่สามารถบันทึกทั้งภาพและวิดีโอวัตถุขนาดเล็กอย่างมีประสิทธิภาพได้ โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่การพัฒนาวิธีการขึ้นรูปไมโครเลนส์ที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ กระบวนการผลิตรวดเร็วไม่ซับซ้อน และควบคุมคุณภาพได้

คำสำคัญ: สมาร์ตโฟน, ไมโครเลนส์, พอลิไดเมทิลไซลอกเซน, อีลาสโตเมอร์

Title Fabrication of High Magnification PDMS elastomeric Lens for Smartphone Microscope

Student Name Miss Prowtawun Tunprainich Student ID 5633111423

Advisor name Prof. Dr. Sanong Ekgasit

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2016

Abstract

The studies of material properties in microscale have attached much attention in daily life education, science and medical technology. A magnifying lens coupled with a smartphone, the most popular electronics device at the moment, is the simplest tool to access microscopic information which enables the study and manipulation at the microscales. In this study, we presented the facile protocol for the fabrication of the microlens via “Sessile Drop Casting Technique”. Polydimethylsiloxane (PDMS) was used as the raw material to fabricate the microlens. The flat circular poly (methyl methacrylate) (PMMA) disk with the diameter in the range of 2.00-5.00 mm attached on glass slide and heated at 90 ℃ was employed as a microlens substrate. After heating microlens substrate, the clear liquid PDMS without residual air bubbles was dropped on the top of substrate. Due to its high viscosity the PDMS, it slowly spread toward the sharp edge of the disk and induced a formation of spherical cap. After thermal curing at 90 ℃ for 5-7 min, liquid PDMS was transformed to elastomeric PDMS plano-convex lens. By varying the diameter of PMMA disk and the volume of liquid PDMS, microlenses with focal length of 2.0-8.0 mm and magnifications of 31.3X-125.0X (smaller disk causes shorter focal length and higher magnification) were obtained. When the PDMS elastomeric lens was attached onto a smartphone camera, it transformed into a smartphone digital microscope which can take both of high quality digital images and videos. The advantages of our developed protocol are low cost, rapid, and easy manufacturing process with controllability.

Keywords: Smartphone, microlens, Polydimethylsiloxane, elastomeric

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในหัวข้อ “การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงสำหรับกล้องจุลทรรศน์สมาร์ตโฟน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากผู้มีส่วนร่วมต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่เป็นผู้ชี้แนะแนวทางตั้งแต่เริ่มต้น ทั้งในส่วนการค้นคว้าข้อมูล ระเบียบวิจัย การออกแบบอุปกรณ์ และการทดลอง รวมไปถึงการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการทำงานอย่างใกล้ชิดกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วชิรวงศ์กวิน และรองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรักษ์สิทธิ์ ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นประธานและกรรมการสอบ รวมทั้งตรวจทานและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด เพื่อให้การเขียนรายงานสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในด้านตำรา วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการทำโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ กระทั่งสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตารางประกอบ ..... ฌ

สารบัญรูปประกอบ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ 1

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2

The Replica Molding Technique 3

The Moldless Surface Energy Minimization Technique 4

The Hanging Droplet Technique 4

The Technology was Based on Ultra-Violet (UV) Lithography of SU-8 Thick Resist Technique 6

The Single Step Fabrication on Silicon Substrate Technique 7

The Inkjet Printing and Heat-Assisted *in situ* Curing Technique 7

The Confined Sessile Drop Technique 8

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ 10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 10

บทที่ 2 ทฤษฎี 11

2.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane; PDMS) 11

2.2 เลนส์ 15

2.2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเลนส์ 15

2.2.2 การหาระยะโฟกัสของเลนส์โดยใช้สูตร 16

2.2.3 การหากำลังขยายของเลนส์โดยใช้สูตร 17

บทที่ 3 การทดลอง 18

3.1 สารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ 18

3.2 วิธีการทดลอง 19

3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและวิธีการขึ้นรูป
เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ 19

3.2.2 การเตรียมฐานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์ 19

3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์ 20

3.2.4 การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens 21

3.3 ตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของเลนส์พีดีเอ็มเอสที่สร้างขึ้น 23

3.3.1 ความโค้งนูนของเลนส์ 23

3.3.2 ระยะโฟกัสของเลนส์ 25

3.3.3 กำลังขยายของเลนส์ 25

3.3.4 ขอบเขตของการมองเห็น 25

3.3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเลนส์ที่ขึ้นรูปได้ 26

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 28

4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการขึ้นรูปและประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ 28

4.2 ผลของปริมาตรพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ 34

4.3 ผลของขนาดฐานที่มีต่อกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ 36

4.4 ความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์ 38

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้ 40

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 46

5.1 สรุปผลการทดลอง 46

5.2 ข้อเสนอแนะ 47

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ 47

เอกสารอ้างอิง 48

ประวัติผู้วิจัย 50

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน....12

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป....28

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป....29

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป....30

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป....31

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป....32

ตารางที่ 4.6 ผลความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เมื่อใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ปริมาตรเรียงจากน้อยไปมากบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร....34

ตารางที่ 4.7 ผลความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เมื่อใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนปริมาตรเรียงจากน้อยไปมากบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 มิลลิเมตร....35

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบเลนส์ที่ได้จากการใช้ฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ ในการขึ้นรูป....36

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์....38

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่ 1.1 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Replica Molding 3

รูปที่ 1.2 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Moldless Surface Energy Minimization 4

รูปที่ 1.3 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Hanging Droplet 5

รูปที่ 1.4 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Technology was Based on Ultra-Violet (UV) Lithography of SU-8 Thick Resist 6

รูปที่ 1.5 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Single Step Fabrication on Silicon Substrate 7

รูปที่ 1.6 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Inkjet Printing and Heat-Assisted in situ Curing 8

รูปที่ 1.7 ภาพพาโนรามาโดยใช้เลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Confined Sessile Drop ร่วมกับสมาร์ตโฟน iPhone 6S plus 9

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ (ePDMS) 13

รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ฐาน (ePDMS base) 13

รูปที่ 2. 3 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของสารคงรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ (ePDMS curing agent) . 13

รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อพันธะของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนโดยมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 14

รูปที่ 2.5 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 16

รูปที่ 2.6 รัศมีความโค้งของเลนส์แต่ละชนิด 16

รูปที่ 3.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนหรือพีดีเอ็มเอส (Sylgard® 184, Dow Corning, USA) 19

รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเลเซอร์ (T-BROS LASER) ที่ใช้ในการตัดฐานเลนส์ 19

รูปที่ 3.3 ฐานเลนส์อะคริลิกวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50 และ 5.00 มิลลิเมตร 20

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซน....20

รูปที่ 3.5 การกำจัดฟองอากาศออกจากพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในระบบสุญญากาศ....21

รูปที่ 3.6 การวางฐานอะคริลิกบนกระจกสไลด์โดยมีพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นตัวเชื่อม....21

รูปที่ 3.7 การวัดอุณหภูมิบนฐานอะคริลิกด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัลและเซนเซอร์ตรวจวัดพื้นผิว....22

รูปที่ 3.8 การหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนลงบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร (A) และ
รูป B-E แสดงการกระจายตัวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบนฐาน (รูป B-E ถ่ายโดยใช้สมาร์ตโฟน
รุ่น iPhone 5s พร้อมด้วย CU SmartLens กำลังขยาย 20 เท่า)....22

รูปที่ 3.9 การถ่ายภาพเพื่อนำไปวัดรัศมีความโค้งของเลนส์พีดีเอ็มเอส....24

รูปที่ 3.10 การวัดค่ารัศมีความโค้งของเลนส์โดยใช้โปรแกรม ImageJ หาพื้นที่ เพื่อที่จะทราบค่ารัศมีของ
วงกลมที่สร้างขึ้นดังรูปซึ่งเป็นค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ด้วย เลนส์ที่มีรัศมีความโค้งมาก จะมีความนูนน้อย....24

รูปที่ 3.11 การหาระยะโฟกัสของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้....25

รูปที่ 3.12 การหาขอบเขตการมองเห็นโดยใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 62.5 เท่า ติดบน
กล้องหลังของสมาร์ตโฟน รุ่น iPhone 5s ถ่ายภาพกระดาษกราฟ มีขอบเขตการมองเห็นประมาณ
4×3 ตารางมิลลิเมตร....26

รูปที่ 3.13 การนำเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ไปใช้งานและทดสอบประสิทธิภาพ โดยติดเลนส์ที่กล้องหลังของ
สมาร์ตโฟนให้ตรงรูรับแสงของกล้อง (A) นำไปถ่ายภาพวัตถุได้ทันที (B) หรืออาจต้องใช้อุปกรณ์เสริมช่วยในกรณี
ที่ไมโครเลนส์มีกำลังขยายสูง (C)....26

รูปที่ 3.14 ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss: Axio Scope.A1) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับภาพที่ถ่ายได้
จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ร่วมกับสมาร์ตโฟน....27

รูปที่ 4.1 เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ....33

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโฟกัสของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กับขนาดของฐานอะคริลิก....37

รูปที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ฐานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00, 2.50, 4.00 และ 5.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้ระยะโฟกัสเป็นตัวชี้วัด 39

รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย Sporangium of Lycophyta l.s. ที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 125.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1, 2, 3 และ 4 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ 40

รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย Sporangium of Lycophyta l.s. ขยาย 500 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 125.0 เท่า และ Digital zoom 4 เท่าจากสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 500 เท่า (B) 40

รูปที่ 4. 6 ภาพถ่ายสาหร่ายสีเขียว chlorella (W.m.) Single cells ที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 50.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1, 2, 3 และ 4 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ 42

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายสาหร่ายสีเขียว chlorella (W.m.) Single cells ขยาย 50 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 50.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 50 เท่า (B) 42

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายแบคทีเรียรูปวงกลมที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 33.3 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1, 2, 3 และ 4 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ 44

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายแบคทีเรียรูปวงกลม ขยาย 99.9 และ 100 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 33.3 เท่า และ Digital zoom 3 เท่าจากสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 100 เท่า (B) ตามลำดับ 44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันสมาร์ตโฟนเข้ามามีบทบาทและกลายเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตของคนทุกกลุ่ม ทุกเพศ ทุกวัยทั่วโลก ด้วยความต้องการที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พร้อมกับเทคโนโลยีที่เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพัฒนาประสิทธิภาพและความสามารถในการใช้งานของสมาร์ตโฟนอย่างต่อเนื่อง จนมีการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวอย่างหลากหลาย และเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของมนุษย์แทบทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการติดต่อสื่อสาร ด้านสุขภาพ ด้านการศึกษา ด้านธุรกิจ และที่น่าสนใจคือการวิเคราะห์ และเก็บข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ หนึ่งในคุณสมบัติที่ถูกพัฒนาอย่างโดดเด่น คือกล้องที่สามารถถ่ายรูปได้อย่างสะดวก ใช้งานง่าย ภาพที่ได้มีความละเอียด ความคมชัดสูง ความผิดเพี้ยนของสีน้อย ปรับแสงได้ และขยายภาพได้ จึงถูกนำมาใช้แทนกล้องดิจิทัลมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของกล้องสมาร์ตโฟนเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้ใช้งานนำมาพิจารณาประกอบการตัดสินใจซื้อ และทางผู้ผลิตพยายามนำเสนอให้เป็นจุดขายของผลิตภัณฑ์

ในอดีตที่ผ่านมาการเก็บข้อมูลจากวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่าที่ตาจะมองเห็น จำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ช่วยขยายภาพขนาดเล็กให้เป็นภาพที่มนุษย์สามารถมองเห็นรายละเอียดของวัตถุได้ด้วยคุณสมบัติของเลนส์กำลังขยายสูงที่อยู่ในตัวกล้อง แต่ด้วยข้อจำกัดหลายประการของกล้องจุลทรรศน์ทั้งในเรื่องอุปกรณ์ และการใช้งานที่ซับซ้อน มีน้ำหนักมาก ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ ไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเผยแพร่ หรือใช้งานได้ทันที ทั้งยังมีราคาสูง ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้กล้องจุลทรรศน์ถูกใช้งานโดยบุคคลเฉพาะกลุ่ม ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ไม่ใช่ทุกคนที่สามารถเข้าถึงได้ ระดับการมองเห็นเป็นเพียงแค่ในระดับปกติของสายตาเท่านั้น ทำให้ขาดโอกาสในการเรียนรู้ ต่อมาจึงมีการพยายามคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่าเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กหรือไมโครเลนส์ (Microlens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่สามารถโฟกัสวัตถุในระยะใกล้ และมีกำลังขยายสูงกว่าเลนส์ทั่วไป แล้วดึงคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่น เพื่อทดแทนการใช้งานกล้องจุลทรรศน์โดยตรง

ในช่วงเริ่มต้นไมโครเลนส์มีการผลิตด้วยวิธี Parallel Mold Stamping and High Temperature Reflow ที่ใช้ของแข็ง เช่น แก้ว พลาสติก เป็นวัสดุในการผลิต แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือต้องใช้วิธีการทางวิศวกรรมที่ซับซ้อนและควบคุมได้ยากในการผลิต และอาศัยวัสดุอุปกรณ์ราคาแพง ต่อมาจึงมีการทดลองนำสารพอลิเมอร์มาใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจและมีข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิมหลายประการ เช่น กระบวนการขึ้นรูปง่าย มีค่าใช้จ่ายต่ำ มีคุณสมบัติเชิงแสงและความยืดหยุ่นเชิงกลสูง เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ช่วยให้เลนส์พอลิเมอร์ที่ผลิตออกมามีต้นทุนต่ำลงและมีคุณภาพสูง [1] พอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้ขึ้นรูปเลนส์และอุปกรณ์ด้าน Elastomeric Optics ที่สำคัญ ได้แก่ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane; PDMS) ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งในเชิงกายภาพ เชิงแสง และเคมี ทำให้มีผู้นำพอลิเมอร์ชนิดนี้มาขึ้นรูปไมโครเลนส์มากมาย

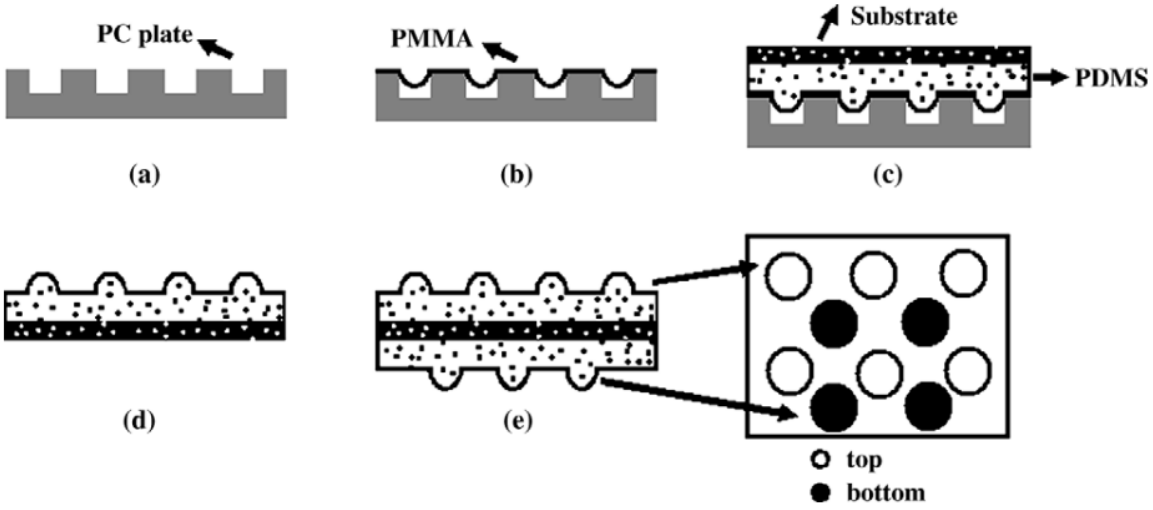
งานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจในการหาแนวทางการพัฒนาขึ้นรูป “เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์” ซึ่งเป็นเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กมีรูปร่างแบบ Plano-Convex Lens โดยใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นวัสดุและใช้เทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) ในการขึ้นรูป ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีกระบวนการไม่ซับซ้อน ไม่มีการใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่ยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของเลนส์ และสามารถควบคุมความโค้งของเลนส์ได้ ส่งผลให้ได้เลนส์ที่มีกำลังขยายหลายขนาด เมื่อนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟน ซึ่งมีกล้องที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ได้กล้องจุลทรรศน์แบบพกพาที่ไร้ข้อจำกัดในเรื่องความยุ่งยากในการใช้งาน ราคา น้ำหนัก เหมือนกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในห้องปฏิบัติการทั่วไป อีกทั้งยังสามารถส่งต่อข้อมูลอย่างง่ายดายผ่านระบบอินเทอร์เน็ต และประหยัดพลังงานอีกด้วย ถือเป็นการส่งเสริมการเรียนรู้ และสร้างนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กล้องจุลทรรศน์มีคุณสมบัติในการขยายภาพได้ คือ เลนส์ ดังนั้นเลนส์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนเพื่อให้เป็นกล้องจุลทรรศน์ได้ ในปัจจุบันมีผู้พยายามพัฒนาวิธีการขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กหรือไมโครเลนส์หลายวิธี ดังตัวอย่างงานวิจัยดังต่อไปนี้

The Replica Molding Technique

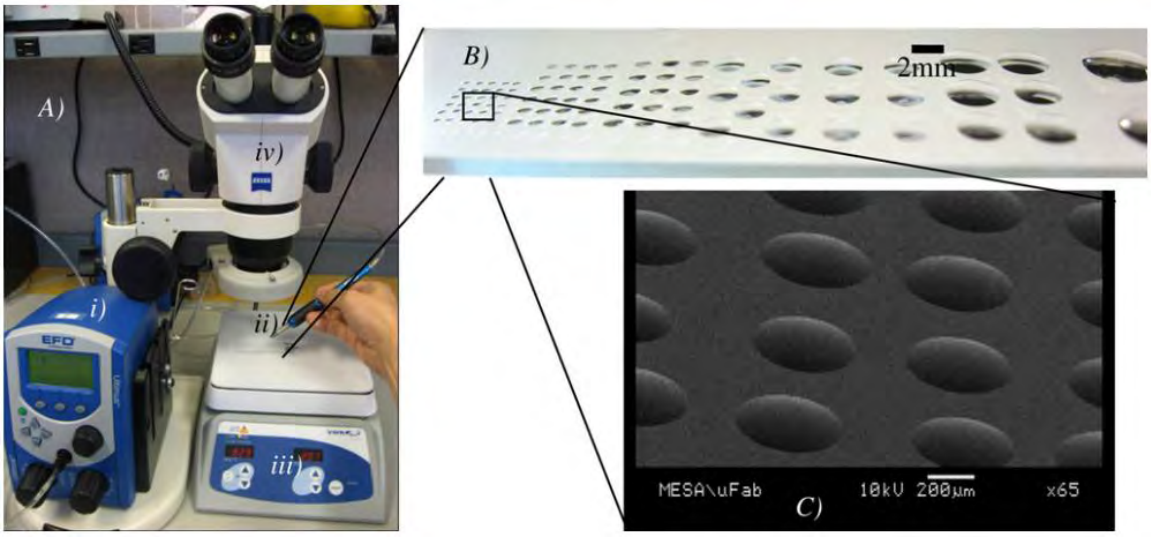
ในปี 2006 Shin และคณะ [2] ได้พัฒนาวิธีการขึ้นรูปไมโครเลนส์โดยใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นวัสดุผ่านกระบวนการแม่พิมพ์แบบจำลอง เริ่มจากการใช้โปรแกรมเขียนรูปแบบ และกำหนดขนาดช่อง นำคำสั่งไปใช้เครื่องเลเซอร์ตัดพอลิคาร์บอเนต (PC) จะได้ฐานสำหรับการขึ้นรูป จากนั้นเคลือบพอลิเมทิลเมทาคริเลตเหลว (PMMA) ผ่านกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin-coating processes) ลงบนฐานพอลิคาร์บอเนต ด้วยน้ำหนัก ความหนืดของเยื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลตเหลวจะทำให้เกิดการกระจายตัวออกอย่างรวดเร็ว และเกิดความโค้งที่มีลักษณะเฉพาะบนฐานเดิม นอกจากนั้นผลของแรงตึงผิวของของเหลวจะช่วยให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตรวมตัวกันเป็นผิวหน้าที่ดีและมีความหนาเหมาะสม เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จะทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตแข็งตัวและมีคงรูปบนฐานพอลิคาร์บอเนต ซึ่งเป็นแม่พิมพ์เว้าสำหรับการขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็ก จากนั้นจึงผสมพีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เหลวกับสารคงรูปในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก เทลงในแม่พิมพ์ แล้วใช้แผ่นแก้วหรือพลาสติกปิดทับ นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะได้เลนส์เป็นแถบยาวตามลักษณะของแม่พิมพ์ จากงานวิจัยนี้พบว่าสามารถพัฒนาวิธีการขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพดี ใช้อุณหภูมิต่ำโดยไม่ต้องพึ่งวิธีโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) ซึ่งมีกระบวนการซับซ้อนและต้นสูงการผลิตสูง



รูปที่ 1.1 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Replica Molding

The Moldless Surface Energy Minimization Technique

ในปี 2010 Cruz-Campa และคณะ [3] ได้พัฒนาวิธีการขึ้นรูปไมโครเลนส์ที่ไม่ต้องใช้แม่แบบ อาศัยการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลักของแรงตึงผิว และคุณสมบัติในการคงตัวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวกับสารคงรูปในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก กำจัดฟองอากาศ แล้วฉีดลงบนวัสดุรองรับที่ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีช่องรองรับหลายขนาด เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเลนส์ สมดุลระหว่างแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วงจะทำให้สารผสมนี้มีรูปร่างเป็น Spherical Microlens อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มความหนืดและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน วิธีนี้จะทำให้ขึ้นรูปเลนส์ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว เลนส์ที่ผลิตได้สามารถควบคุมระยะโฟกัสได้ในช่วง 2-25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์อยู่ในช่วง 450 ไมโครเมตร-4 มิลลิเมตร ความสูงของเลนส์อยู่ในช่วง 14-600 ไมโครเมตร ความโค้งของเลนส์จะถูกควบคุมโดยตำแหน่งและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปซึ่งอยู่ในช่วง 65-130 องศาเซลเซียส (การใช้อุณหภูมิสูงจะช่วยให้พอลิเมอร์แข็งตัวเร็วขึ้น)

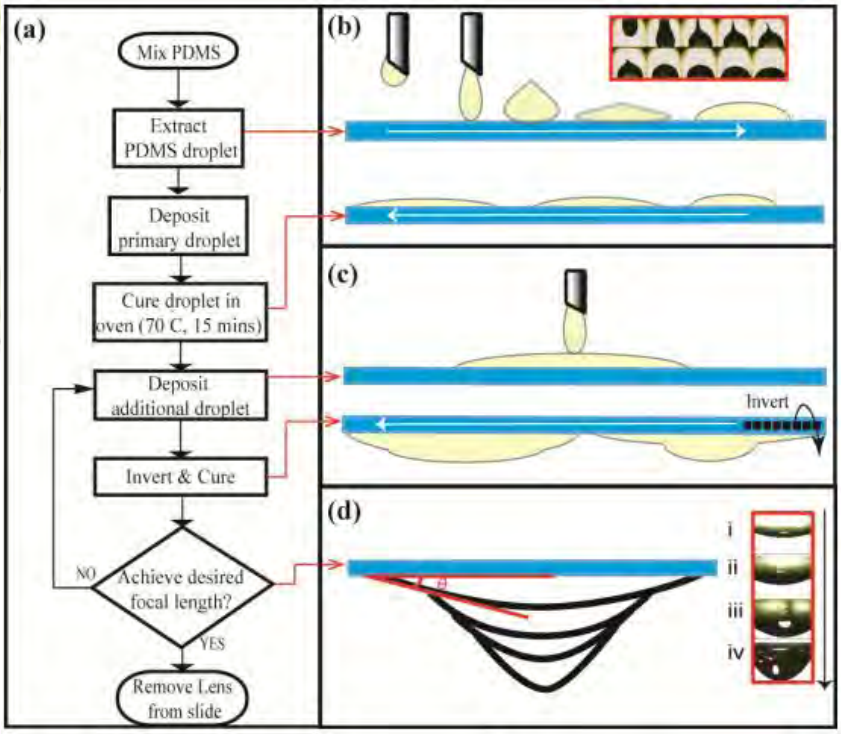


รูปที่ 1.2 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Moldless Surface Energy Minimization

The Hanging Droplet Technique

ในปี 2014 Lee และคณะ [1] ใช้ได้พัฒนาวิธีการขึ้นรูปไมโครเลนส์ด้วยเทคนิค Hanging Droplet โดยใช้เข็มฉีดยาหยดพอลิไดเมททิลไซลอกเซนเหลวประมาณ 100 ไมโครลิตรที่ผ่านการกำจัดฟองอากาศแล้วลงบนกระจกสไลด์ พลิกฐานอย่างรวดเร็วเพื่อให้หยดของเหลวอยู่ในลักษณะห้อยลง แรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วงจะช่วยทำให้พอลิเมอร์เหลวมีความโค้งเป็นแบบพาราโบลา ก่อนนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

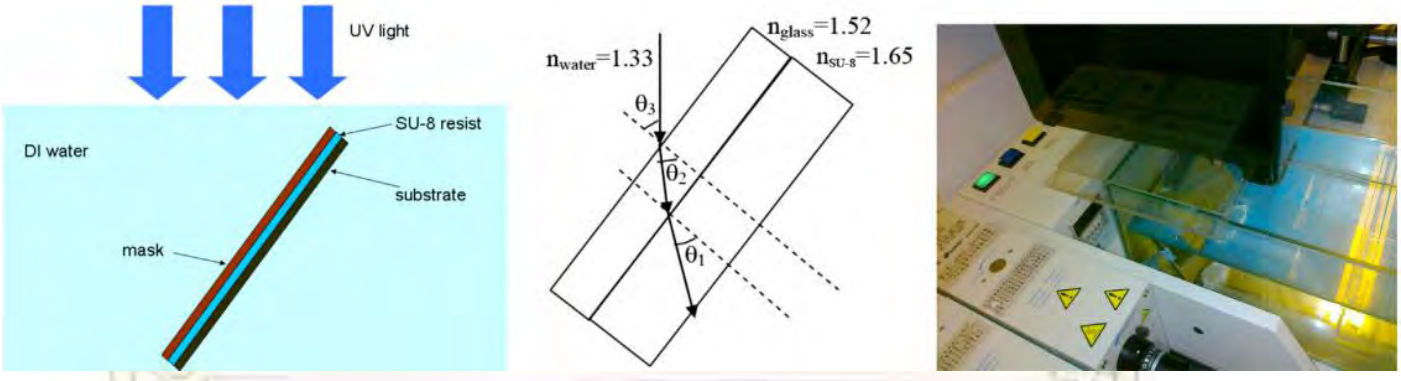
จะได้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผิวโค้งที่คงรูปแล้วเพื่อใช้เป็นฐานสำหรับการหยดพอลิเมอร์ชั้นต่อไป จากนั้นก็หยดซ้ำลงบนฐานที่เตรียมได้ โดยใช้จุดศูนย์กลางของการหยดอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ทำซ้ำแบบนี้จะทำให้ได้เลนส์พอลิ-ไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์หลายชั้น เลนส์จะโค้งขึ้น มีระยะโฟกัสที่สั้นลง และมีกำลังขยายสูงขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นจะทำให้สารที่หยดลงไปใหม่มีผิวสัมผัสกับกับฐานก่อนหน้าน้อยลง แรงโน้มถ่วงจึงมีอิทธิพลมากกว่าแรงตึงผิว คณะผู้วิจัยสามารถควบคุมระยะโฟกัสได้ตามจำนวนชั้นของ 1-4 ชั้น เลนส์ที่ได้มีต้นทุนการผลิตต่ำ มีกำลังขยายเทียบเท่ากล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 160 เท่า สามารถนำไปใช้เป็นเลนส์รวมแสง และเมื่อผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ยึดติดกับตัวเลนส์แล้วนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนในการตรวจวัดผิวหนัง พบว่าใช้งานได้ดี แต่ข้อด้อยของวิธีนี้คือเมื่อจำนวนชั้นของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์มีมากกว่า 2 ชั้น การหยดและพลิกฐานให้พีดีเอ็มเอสเหลวอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพลดลงถึง 60% เนื่องจากการหยดพีดีเอ็มเอสให้อยู่ตำแหน่งศูนย์กลางเดิม และเวลาที่ใช้ในการพลิกฐานเลนส์ให้คงที่นั้นค่อนข้างควบคุมได้ยาก



รูปที่ 1.3 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Hanging Droplet

The Technology was Based on Ultra-Violet (UV) Lithography of SU-8 Thick Resist Technique

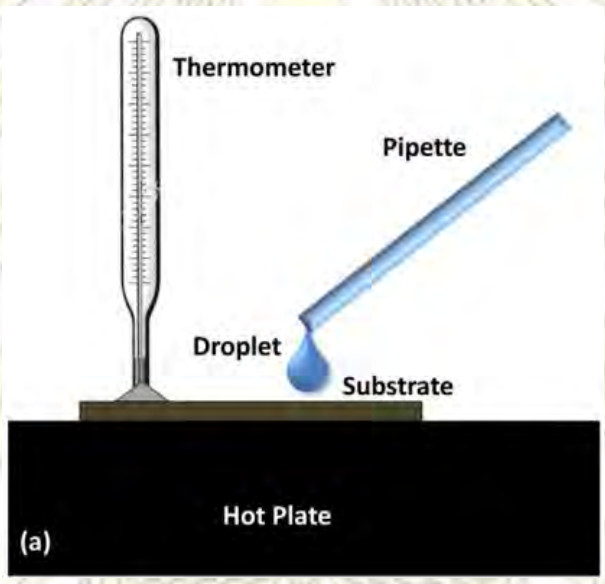
ในปี 2013 Zhang และคณะ [4] ใช้ได้พัฒนาวิธีการขึ้นรูปไมโครเลนส์ เริ่มจากการเตรียมพื้นผิว โดยนำแผ่นเวเฟอร์ไปล้างแบบความถี่สูง (ultrasonically cleaned) ด้วยอะซิโตน แอลกอฮอล์ และน้ำปราศจากไอออนตามลำดับ เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน จากนั้นนำไปวางบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำ SU-8 resist ซึ่งเป็นสารละลายเคมีไวแสงเชิงลบ (negative tone photoresist) ที่จะมาสามารถเชื่อมต่อพันธะกันได้เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเลต ไปเคลือบลงบนแผ่นเวเฟอร์ผ่านกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 1000 ไมโครเมตร ก่อนจะนำไปวางตามแนวนอนบนเตาให้ความร้อน แล้วค่อย ๆ ปรับอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส ให้คงที่เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส อย่างช้า ๆ และให้อุณหภูมินี้คงที่เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงค่อย ๆ ปรับให้กลับมาอยู่ที่อุณหภูมิห้อง นำไปผึ่งในอ่างน้ำเพื่อรับแสงอัลตราไวโอเลตในแนวเฉียง 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที (สลับทิศทางด้วย) จะทำให้ได้รับปริมาณแสง 3800 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร นำออกมาวางในแนวนอนบนเตาให้ความร้อน ให้ความร้อน 65 องศาเซลเซียสคงที่นาน 15 นาที จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 100 องศาเซลเซียสคงที่นาน 30 นาที แล้วลดกลับมาที่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายนำไปปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยใช้สารเฉพาะในทิศทางขึ้น-ลง นาน 40 นาที ชะด้วยสารปรับปรุงนั้นที่เตรียมใหม่อีกรอบ 10 นาที ทำให้สารปรับปรุงที่หลงเหลือร้อนแดงด้วยละอองน้ำปราศจากไอออน และเป่าแห้งด้วยไนโตรเจน จะทำให้ได้ไมโครเลนส์อาร์เรย์ที่มีพื้นผิวเรียบมาก



รูปที่ 1.4 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Technology was Based on Ultra-Violet (UV) Lithography of SU-8 Thick Resist

The Single Step Fabrication on Silicon Substrate Technique

ในปี 2015 Damodara และคณะ [5] ได้พยายามพัฒนาวิธีการขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กที่ไม่ซับซ้อน โดยผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์เหลวกับสารคงรูปในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก แล้วใช้ปิเปตต์หรือกระบอกฉีดยาเป็นอุปกรณ์ในการหยดพอลิเมอร์เหลวลงบนแผ่นรองรับซิลิคอนที่วางอยู่บนเตาให้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้จะถูกควบคุมโดยมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอยู่ ซึ่งใช้แผ่นฟอยล์อลูมิเนียมหุ้มและทำเป็นฐานตรงปลายเพื่อเพิ่มผิวสัมผัสกับแผ่นรองรับซิลิคอน โดยการหยดพอลิเมอร์นั้นจะทำเมื่อแผ่นรองรับได้รับอุณหภูมิคงที่แล้ว ขณะที่หยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวออกมาจากอุปกรณ์ที่ใช้หยดมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 90 องศา เวลาที่ใช้ในการทำให้พอลิเมอร์คงตัวเป็นเลนส์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าอุณหภูมิสูงจะลดเวลาการคงตัว และเกิดปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศในเลนส์ ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าเกิดจากการหยดที่ให้เวลาในการหลุดจากอุปกรณ์หยดของพอลิเมอร์น้อยเกินไป จึงแก้ปัญหาด้วยการค่อย ๆ หยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

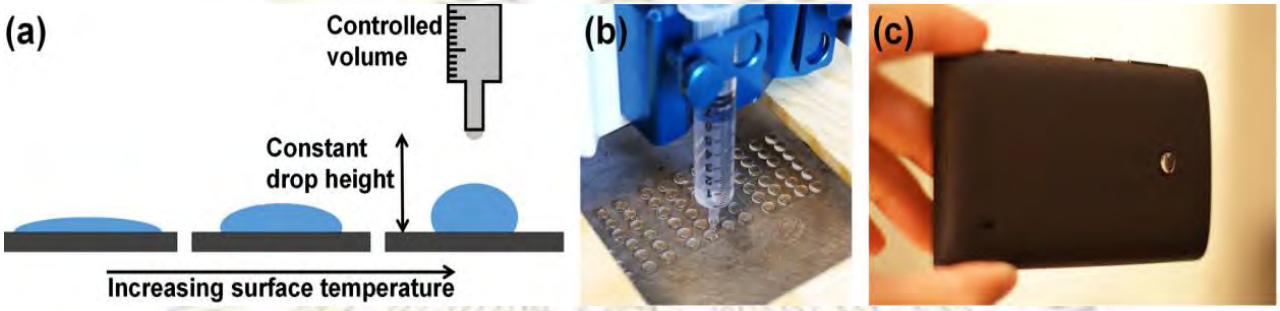


รูปที่ 1.5 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Single Step Fabrication on Silicon Substrate

The Inkjet Printing and Heat-Assisted *in situ* Curing Technique

ในปี 2015 Sung และคณะ [6] ใช้วิธี Inkjet Printing and Heat-Assisted *in situ* Curing ในการขึ้นรูปไมโครเลนส์ โดยผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวกับสารคงรูปในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก นำไปกำจัดฟองอากาศด้วยระบบสุญญากาศ เตรียมระบบฉีดซึ่งจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถสั่งให้พอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ออกมาจาก Syringe Pump ปรับระดับความสูงเหนือวัสดุรองรับได้ให้ความร้อนและควบคุม

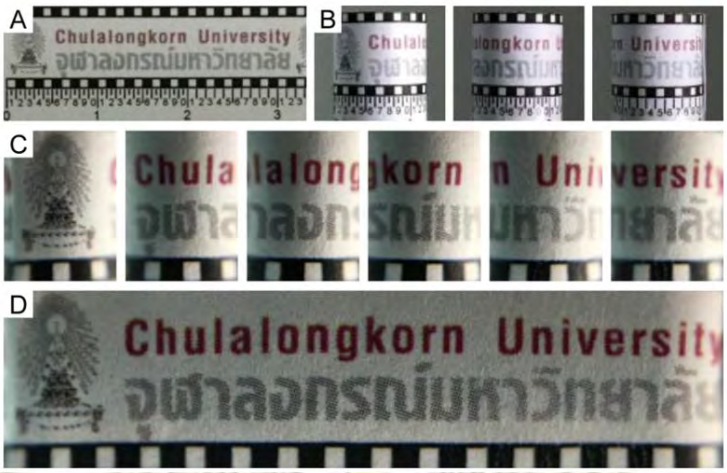
อุณหภูมิในช่วง 60-200 องศาเซลเซียส (การเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการคงรูปของพอลิเมอร์) โดยการฉีดจะต้องควบคุมอัตราเร็วและปริมาตรอย่างแม่นยำ เลนส์ที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะสามารถนำไปติดกับสมาร์ตโฟนได้อย่างสะดวกโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เสริมอื่น มีระยะโฟกัสสั้นที่สุด 5.6 มิลลิเมตร ซึ่งให้กำลังขยายประมาณ 120 เท่า สามารถปรับเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับปริมาตรพอลิเมอร์ที่ใช้ และอุณหภูมิบนวัสดุรองรับ มีความละเอียด 1 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ใกล้เคียงกับเลนส์กล้องจุลทรรศน์ Olympus IX-70 Microscope กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 1.6 การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กด้วยเทคนิค Inkjet Printing and Heat-Assisted in situ Curing

The Confined Sessile Drop Technique

ในปี 2016 หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ (Sensor Research Unit) ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้เทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) ในการขึ้นรูปไมโครเลนส์ [7] โดยใช้ Syringe Pump หยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวที่ผ่านการกำจัดฟองอากาศแล้วลงบนแผ่นอะคริลิกวงกลมหนา 1 มิลลิเมตร ให้ความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้เลนส์พอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์รูปร่าง Plano-Convex ซึ่งจะควบคุมระยะโฟกัสได้ตามความโค้งของเลนส์ เมื่อหยดพอลิเมอร์ในปริมาตรมากที่สุดที่สามารถอยู่บนฐานได้โดยไม่ล้นออกมา จะให้เลนส์ที่มีความโค้งนูนสูงสุดหรือระยะโฟกัสสั้นที่สุด และกำลังขยายสูงสุด ทางผู้วิจัยได้ทำฐานหลายขนาด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-10 มิลลิเมตร ไมโครเลนส์ที่ได้มีระยะโฟกัสอยู่ในช่วง 55.2-3.4 มิลลิเมตร และมีกำลังขยาย 4.5-73.5 เท่า มีความคมชัดสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนได้ดี



รูปที่ 1.7 ภาพพาโนรามาโดยใช้เลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Confined Sessile Drop ร่วมกับสมาร์ตโฟน iPhone 6S plus

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กหรือไมโครเลนส์ยังมีข้อจำกัดหลายประการที่ทำให้ไม่สามารถผลิตเลนส์ขึ้นมาได้อย่างสะดวก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน มีตัวแปรที่ต้องควบคุมหลายอย่าง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้มีราคาสูง ต้องใช้ทักษะความชำนาญส่วนบุคคล ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาวิธีการขึ้นรูปเลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กโดยมุ่งเน้นเรื่องการประหยัดต้นทุนการผลิต มีวิธีการง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือน้อย แต่มีประสิทธิภาพ และได้ตัดสินใจเลือกใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นวัสดุ ผ่านเทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ในการขึ้นรูปเลนส์รูปร่างแบบ Plano-Convex โดยต่อยอดให้เลนส์ที่ผลิตได้มีกำลังขยายสูงขึ้น ต้นทุนการผลิตต่ำลง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนได้อย่างสะดวกเป็นกล้องจุลทรรศน์ขนาดพกพาได้ ถือเป็นการส่งเสริมการเรียนรู้ และสร้างนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม ผลผลิตที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย อาทิ การศึกษาเกี่ยวกับชีววิทยา เคมี ธรณีวิทยา การดูฉลากยาของผู้มีปัญหาทางสายตา ตรวจผิวหนังเบื้องต้น ดูพระเครื่อง เป็นต้น

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1) พัฒนาการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงเพื่อนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนให้เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบพกพาได้
2) สามารถหาความโค้ง ระยะโฟกัส และกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่สร้างขึ้นได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูง รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens โดยใช้เทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) ที่ทราบความโค้ง ระยะโฟกัส และกำลังขยายที่แน่นอน สามารถนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนอย่างสะดวกให้เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบพกพา

บทที่ 2

ทฤษฎี

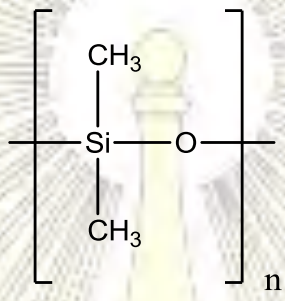
2.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane; PDMS)

พอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้ขึ้นรูปเลนส์และอุปกรณ์ด้าน Elastomeric Optics อย่างกว้างขวาง ได้แก่ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane; PDMS; $(CH_3)_3SiO[Si(CH_3)_2O]_n(CH_3)_3$) มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000-60,000 กรัม/โมล และ n คือ หน่วยซ้ำของมอนอเมอร์ $[SiO(CH_3)_2]$ ซึ่งมีมวลโมเลกุล 207.4 กรัม/โมล [8] โครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยซิลิกอน (Si) กับออกซิเจน (O) มีหมู่ข้างเคียงเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นสารที่สลายตัวยาก คงรูปได้ที่อุณหภูมิห้อง และทนทานต่อความร้อนสูง มีความเป็นผลึกสูง ยึดติดกับวัตถุได้ดี ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และไม่เกิดปฏิกิริยากับร่างกายมนุษย์ [9-10] มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง เป็นสารที่ไม่มีสี รวมแสงได้ ยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่นกว้างครอบคลุมไปทั้งช่วงอัลตร้าไวโอเลต (Ultraviolet) แสงที่มองเห็นได้ (Visible) และอินฟาเรดใกล้ (Near-Infared) แสงที่ผ่านจากเลนส์พีดีเอ็มเอสมีความยาวคลื่นและความเข้มใกล้เคียงกับแสงที่ไม่มีเลนส์พีดีเอ็มเอสกั้น ซึ่งจะทำให้ภาพที่มองผ่านเลนส์พีดีเอ็มเอสมีสีผิดเพี้ยนเล็กน้อยเท่านั้น [1] ด้วยคุณสมบัติและเหตุผลที่กล่าวมาจึงทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุในการขึ้นรูปไมโครเลนส์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น สารลดแรงตึงผิว สารลดการเกิดโฟม สารไฮดรอลิก และการประยุกต์ใช้ที่เกี่ยวข้อง ใช้ในทางการแพทย์ เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวและผม หรือนำไปผ่านการฉายแสงใส่พอลิเมอร์ให้แข็งตัว ก่อนนำไปหล่อและพิมพ์แบบสามมิติเพื่อนำไปใช้ประดิษฐ์หุ่นยนต์ใช้งานด้านอาหาร [11-12] และคุณสมบัติอื่น ๆ ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนแสดงใน**ตารางที่ 2.1** [9]

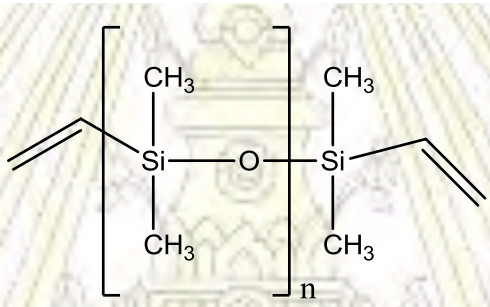
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

คุณสมบัติ	ข้อมูล
เคมี	- หน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์มีมวลโมเลกุล 207.4 กรัม/โมล - พอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 27,000 กรัม/โมล - ความหนาแน่น 0.982 กรัม/มิลลิลิตร - ความหนืด 500 เซนติสโตรก
เชิงแสง	- เป็นวัตถุที่ยอมให้แสงทะลุผ่านได้ - จุดตัดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV cut-off) 240 นาโนเมตร - ค่าดัชนีการหักเหแสง 1.4235 - มีค่าการดูดกลืน 0.04% และค่าการทะลุผ่านมากกว่า 95% ในช่วงแสงที่ตามองเห็น
เชิงไฟฟ้า	- เป็นฉนวนไฟฟ้า - ความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้า 2×10^{7} โวลต์
เชิงกล	- มอดูลัสของยัง (Young's modulus) 1.2 เมกะปาสกาล - อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) 0.46 - โมดูลัสของแรงเฉือน (shear modulus) 411 กิโลปาสกาล - ขีดจำกัดของแรงดึง (Traction limit) 1.9 เมกะปาสกาล - ความเค้นวิกฤติที่ทำให้เกิดการคราก (Yield strength) 700 กิโลปาสกาล - ความหนาแน่น 0.982 กรัม/มิลลิลิตร - ค่าแรงอัดมอดูลัส (Compressive modulus) 2 เมกะปาสกาล - ความเค้นวิกฤตที่ทำให้เกิดแรงอัดคราก (Compressive yield strength) 1.01 เมกะปาสกาล
ความร้อน	- เป็นฉนวนความร้อน - สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.2 วัตต์ต่อเมตร–เคลวิน - ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 310 ไมโครเมตร/มิลลิองศาเซลเซียส
พื้นผิว	- พลังงานเชิงพื้นผิวประมาณ 20 เอิร์ก/ตารางเซนติเมตร - การยืดขยาย 100%
สภาพให้ซึมผ่าน	- น้ำซึมผ่านไม่ได้ - แก๊สและตัวทำละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วซึมผ่านได้
การเกิดปฏิกิริยา	- เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา - สามารถถูกออกซิไดส์ให้อยู่ในรูปพลาสมา $Bu_4N^+F^-$[(TBAA)F
ความเป็นพิษ	- ไม่เป็นพิษ

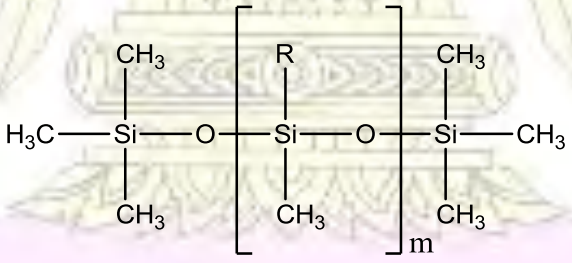
พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่จะนำมาขึ้นรูปไมโครเลนส์นั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่แยกกัน [13] ส่วนแรกคือพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ฐาน (ePDMS base) มีสูตรเคมี คือ $CH_2=CH[Si(CH_3)_2O]_nSi(CH_3)CH=CH_2$ (เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยซ้ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 60) และส่วนที่สองคือ สารคงรูป (curing agent) มีสูตรเคมี คือ $CH_3Si(CH_3)_2O[SiRCHO]_mSiCH_3$ (เมื่อ m คือ จำนวนหน่วยซ้ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 10 และ R มักจะเป็น CH_3 หรือ H) [14-15]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ (ePDMS)

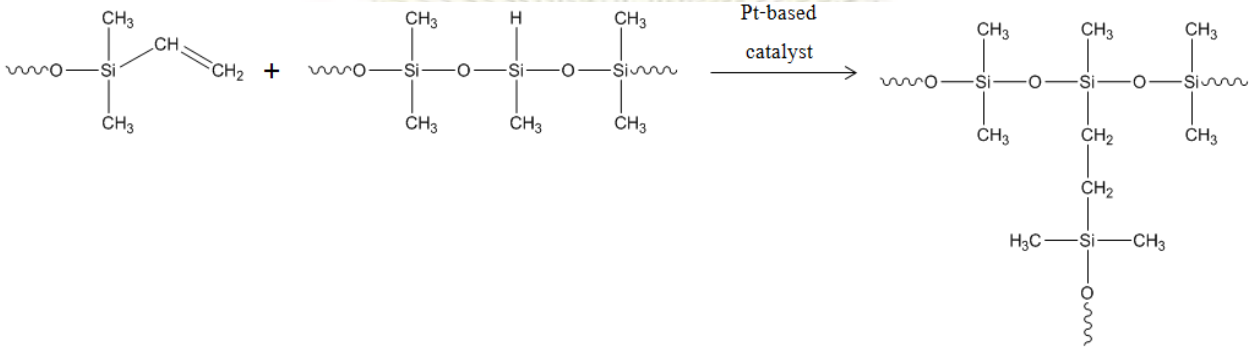


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ฐาน (ePDMS base)



รูปที่ 2. 3 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของสารคงรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอีลาสโตเมอร์ (ePDMS curing agent)

เมื่อนำส่วนประกอบทั้งสองส่วนที่กล่าวข้างต้นมาผสมกันจะเกิดปฏิกิริยา Hydrosilylation ของพันธะคู่ โดยมีแพลทินัม (Pt) ที่อยู่ในสารคงรูปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อพันธะของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนโดยมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเชื่อมต่อพันธะของโอลิโกเมอร์ต้องประกอบด้วยพันธะ Si-H อย่างน้อย 3 พันธะ ซึ่งแพลทินัม (Pt) ที่อยู่ในสารคงรูปจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการเติมพันธะ Si-H ระหว่างหมู่ไวนิลที่อยู่บนโอลิโกเมอร์ของไซลอกเซนเชื่อมกันเป็นสาย Si-CH_2-CH_2-Si เมื่อเกิดพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมต่อพันธะกันอย่างสมบูรณ์แล้ว จะทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวหนืดกลายเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ หากอัตราส่วนของสารคงรูปต่อพอลิไดเมทิลไซลอกเซนฐานเพิ่มขึ้นมากเพียงใด ก็จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะมากขึ้น และสารผสมก็จะมีความแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ความร้อนก็ช่วยเร่งอัตราการการเชื่อมพันธะได้เช่นกัน [16]

2.2 เลนส์

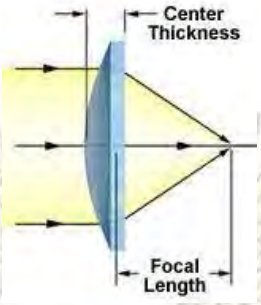
เลนส์ คือตัวกลางโปร่งใสที่มีผิวหน้าโค้ง ซึ่งอาจมีรูปร่างเป็นผิวโค้งทรงกระบอก ทรงกลม หรือพาราโบลา โดยส่วนใหญ่มักทำมาจากแก้ว หรือพลาสติกใส ใช้หลักการหักเหเพื่อให้เกิดการรวมแสงหรือกระจายแสงที่มาตกกระทบเลนส์ [17]

2.2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเลนส์ [18]

1) จุดศูนย์กลางความโค้ง มี 2 จุด อยู่ด้านหน้า และด้านหลังเลนส์
2) แกนมุขสำคัญของเลนส์ คือ เส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งทั้งสอง
3) จุดโฟกัส คือ จุดตัดร่วมของรังสีหักเหทุกรังสีที่เกิดจากรังสีตกกระทบหักเหผ่านเลนส์
4) ทางยาวโฟกัส คือ ระยะจากจุดโฟกัสถึงจุดกึ่งกลางเลนส์
5) รัศมีความโค้ง คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางความโค้งถึงผิวโค้งของเลนส์

เลนส์โดยทั่วไปมักจะมีพื้นผิวเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลม หากมีส่วนของทรงกลมเว้าออกด้านนอกจะเรียกว่า เลนส์นูน (Convex lens) ซึ่งจะมีตรงกลางหนากว่าตรงขอบเสมอ ผิวด้านโค้งนูนจะช่วยรวมแสง แต่ถ้าส่วนของวงกลมเว้าเข้าไปด้านในเรียกว่า เลนส์เว้า (Concave lens) จะมีตรงกลางบางกว่าตรงขอบเสมอ และผิวโค้งด้านเว้าจะช่วยกระจายแสง [19]

ในงานวิจัยนี้ต้องการขึ้นรูปไมโครเลนส์รูปร่างแบบเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano-convex lens) ซึ่งจัดเป็นเลนส์นูนประเภทหนึ่งที่มีด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม อีกด้านหนึ่งมีลักษณะราบเป็นระนาบ ทำหน้าที่รวมแสง ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริงที่ต้องมีฉากรับ เลนส์ชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาความคลาดทรงกลม (spherical aberration) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ภาพไม่สมบูรณ์เนื่องจากการหักเหของแสงที่มากขึ้นตามส่วนโค้งของบริเวณขอบเลนส์ และแสงตกกระทบหน้าเลนส์ที่มุมมองศาต่างกัน จุดโฟกัสหลังเลนส์จึงมีระยะไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องของสี และความคมชัดของภาพ เลนส์นูนแกมระนาบจะใช้ในการรวมรังสีของแสงให้ตกที่ระยะโฟกัสในอุปกรณ์จำพวกกล้องจุลทรรศน์ [20]



รูปที่ 2.5 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) [20]

2.2.2 การหาระยะโฟกัสของเลนส์โดยใช้สูตร

โดยทั่วไปในการหาระยะโฟกัสของเลนส์จะใช้สมการ Lensmaker (Lensmaker's equation) [21] ดังนี้

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

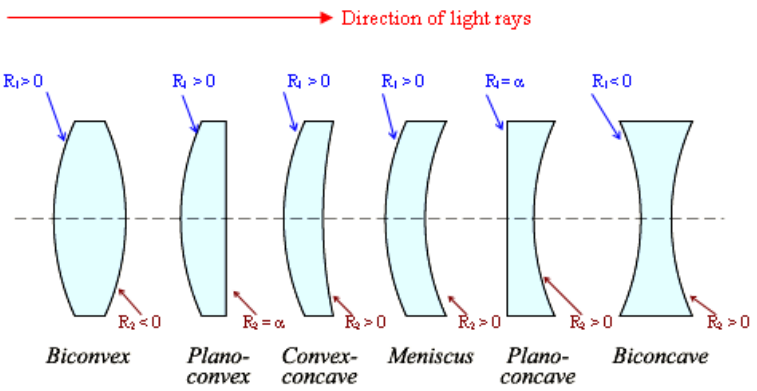
เมื่อ fl แทน ระยะโฟกัสของเลนส์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

n แทน ค่าดัชนีหักเห ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเลนส์

R_1 แทน รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านหน้า มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

R_2 แทน รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านหลัง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

หมายเหตุ $R = \infty$, $R > 0$, $R < 0$ เมื่อเลนส์ที่พิจารณาเป็นเลนส์ระนาบ เลนส์นูน และเลนส์เว้า ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 รัศมีความโค้งของเลนส์แต่ละชนิด [20]

2.2.3 การหากำลังขยายของเลนส์โดยใช้สูตร

สมการที่ใช้ในการหากำลังขยายของเลนส์ทั่วไป [18] คือ

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

เมื่อ M แทน กำลังขยาย

fl แทน ระยะโฟกัสของเลนส์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

หมายเหตุ 250 คือ ระยะที่สายตาปกติมนุษย์โฟกัสภาพวัตถุ หรือมองเห็นภาพชัดเจนในหน่วยมิลลิเมตร

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์

1) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนหรือพีดีเอ็มเอส (Sylgard® 184, Dow Corning, USA)
2) แผ่นอะคริลิกหนา 1 มิลลิเมตร
3) เข็มเย็บผ้าขนาดกลาง (SINGER 1101/18) และขนาดเล็ก (Needles 8)
4) ปิเปตทิป ขนาด 100 ไมโครลิตร
5) ตะเกียบไม้
6) ถ้วยพลาสติก
7) กระจกสไลด์
8) ที่คีบพลาสติก
9) โถดูดความชื้น (desiccator)
10) เครื่องปั๊มสุญญากาศ (EDWARDS, รุ่น RV3)
11) เครื่องตัดเลเซอร์ (T-BROS LASER)
12) เตาความร้อน (Heidolph)
13) เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล (SK SATO, SK-1110) และเซนเซอร์ตรวจวัดพื้นผิว (SK SATO, SK-7000PRT)
14) เครื่องชั่งอ่านละเอียด (TC-254)
15) ชุดวัดระยะโฟกัส
16) กระดาษกราฟ
17) Calibration slide (Motic)
18) CU SmartLens กำลังขยาย 20 เท่า
19) แท่นวางตัวอย่างความสูงคงที่ และแท่นวางสมาร์ตโฟนที่ปรับระดับความสูงได้
20) หลอดไฟ LED
21) กล้องจุลทรรศน์ (Carl Zeiss: Axio Scope.A1)
22) สมาร์ตโฟน (iPhone 5s)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและวิธีการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ

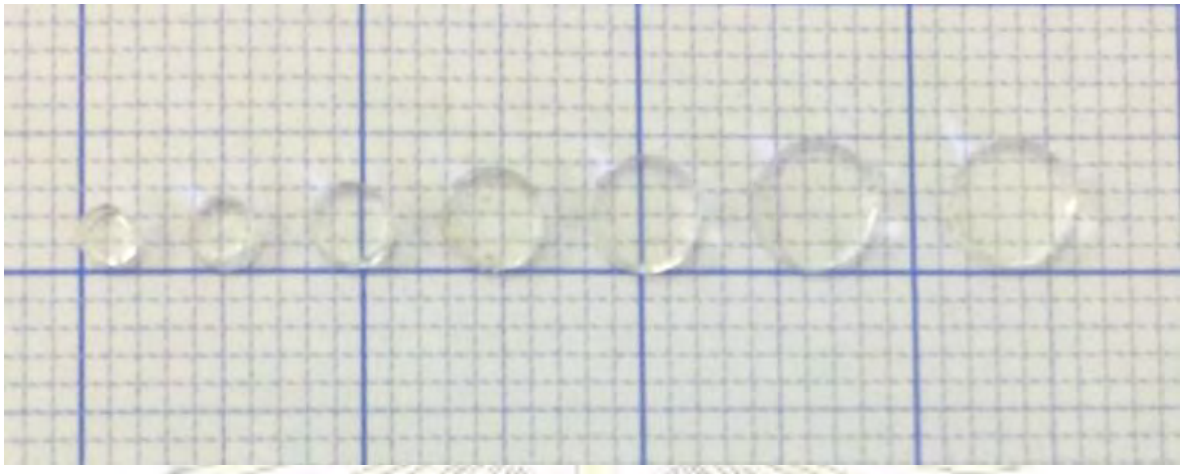
รูปที่ 3.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนหรือพีดีเอ็มเอส (Sylgard® 184, Dow Corning, USA)

3.2.2 การเตรียมฐานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์

1) ออกแบบฐานเลนส์รูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50 และ 5.00 มิลลิเมตร ด้วยคอมพิวเตอร์

2) ใช้เครื่องตัดเลเซอร์ตัดอะคริลิกความหนา 1.00 มิลลิเมตรเป็นฐานเลนส์รูปวงกลมดังกล่าว โดยใช้กำลังเลเซอร์จากหลอดคาร์บอนไดออกไซด์ 25 วัตต์ และความเร็วในการตัด 35 มิลลิเมตร/นาที

รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเลเซอร์ (T-BROS LASER) ที่ใช้ในการตัดฐานเลนส์



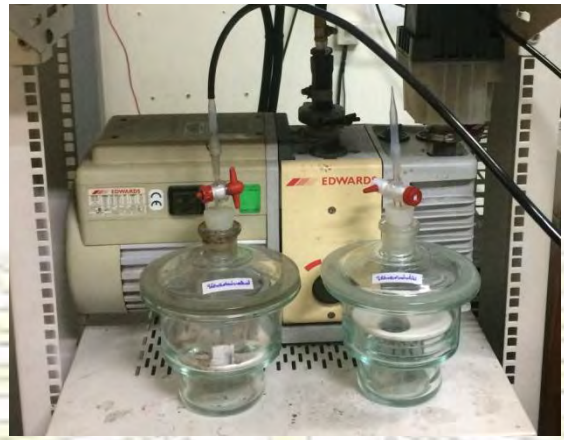
รูปที่ 3.3 ฐานเลนส์อะคริลิกวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50 และ 5.00 มิลลิเมตร

3) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ประกอบด้วยตะเกียบไม้ ปิเปตทิปขนาด 100 ไมโครลิตร เข็มเย็บผ้าขนาดกลาง (SINGER 1101/18) และเข็มเย็บผ้าขนาดเล็ก (Needles 8) โดยเข็มเย็บผ้าจะเป็นตัวหยดสาร ตะเกียบเป็นด้ามจับให้ผู้ทดลอง และปิเปตทิปเป็นตัวช่วยยึดระหว่างเข็มเย็บผ้าและตะเกียบ

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์

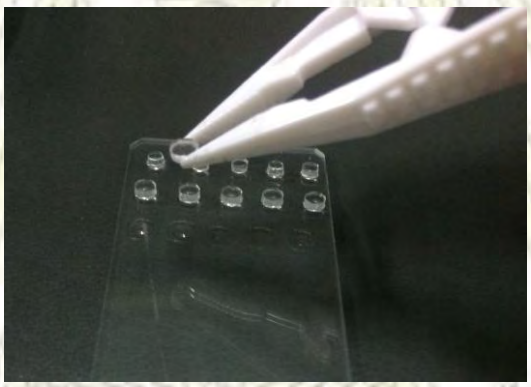
ชั่งพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Sylgard® 184 Silicone Elastomer Base) กับสารคงรูป (Sylgard® 184 Silicone Elastomer Curing Agent) ในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก (ประมาณ 1.5: 0.15 กรัม) ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที จากนั้นกำจัดฟองอากาศในระบบสุญญากาศเป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งฟองอากาศหมดไป



รูปที่ 3.5 การกำจัดฟองอากาศออกจากพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในระบบสุญญากาศ

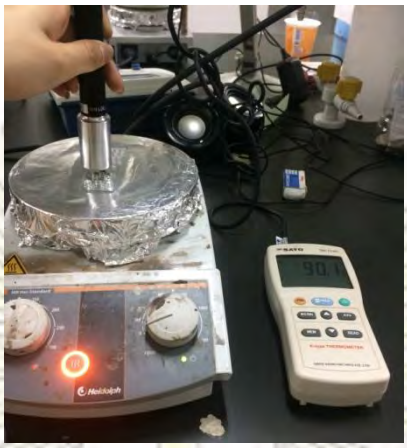
3.2.4 การขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens

1) ติดฐานวงกลมเข้ากับกระจกสไลด์ โดยนำฐานอะคริลิกวงกลมป้ายกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเล็กน้อย แล้วแปะลงบนกระจกสไลด์



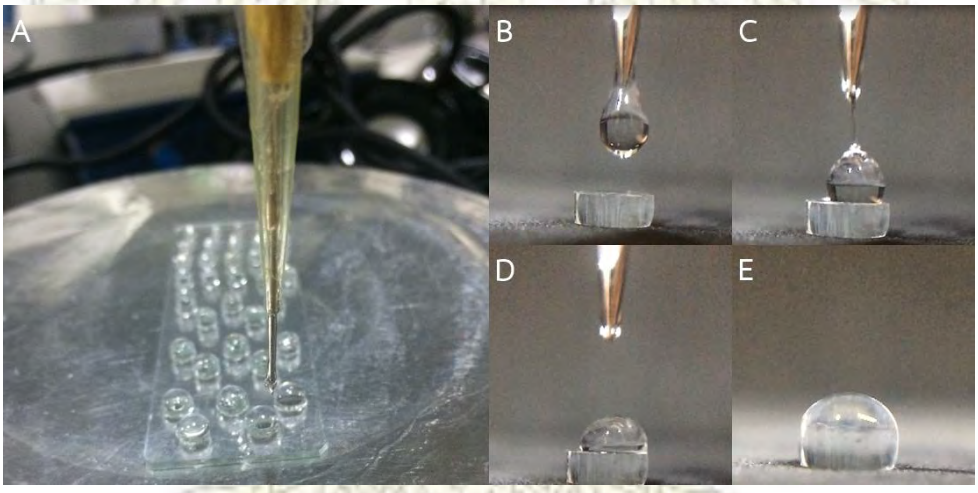
รูปที่ 3.6 การวางฐานอะคริลิกบนกระจกสไลด์โดยมีพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นตัวเชื่อม

2) นำกระจกสไลด์ที่มีฐานวงกลมแปะอยู่วางบนเตาความร้อน รอจนกระทั่งความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (ผู้วิจัยทำการศึกษาอุณหภูมิ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส) โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบตรวจวัดพื้นผิวทำการตรวจวัดโดยใช้หัววัดสัมผัสกับฐานอะคริลิกรูปวงกลม ตรวจวัดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลา 10 นาที จึงดำเนินการทดลองขั้นต่อไป และในขั้นตอนนี้พอลิไดเมทิล-ไซลอกเซนที่หยดจากข้อ 1) จะแข็งตัว ทำให้ฐานอะคริลิกและกระจกสไลด์ติดกัน



รูปที่ 3.7 การวัดอุณหภูมิบนฐานอะคริลิกด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลและเซนเซอร์ตรวจวัดพื้นผิว

3) ใช้อุปกรณ์สำหรับหยดที่เตรียมไว้ จุ่มและหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนลงบนฐานอะคริลิกรูปวงกลม โดยใช้เข็มเย็บผ้าขนาดเล็ก (Needles 8) ในกรณีที่ฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร แต่หากมีขนาดใหญ่กว่านั้น ใช้เข็มเย็บผ้าขนาดกลาง (SINGER 1101/18) โดยจับเข็มในแนวตรงตั้งฉาก และอยู่เหนือฐานเลนส์ประมาณ 5-7 มิลลิเมตร สารจะค่อย ๆ หลุดลงมาจากเข็มแล้วกระจายตัวช้า ๆ ไปบนฐานอะคริลิก ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนลงบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร (A) และ รูป B-E แสดงการกระจายตัวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบนฐาน (รูป B-E ถ่ายโดยใช้สมาร์ตโฟน รุ่น iPhone 5s พร้อมด้วย CU SmartLens กำลังขยาย 20 เท่า)

4) เมื่อทิ้งให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้รับความร้อน ความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาโดยทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากของเหลวกลายเป็นของแข็งยืดหยุ่นได้หรืออีลาสโตเมอร์ เกิดเป็นไมโครเลนส์รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ผ่าน 5 หัวข้อ ดังนี้

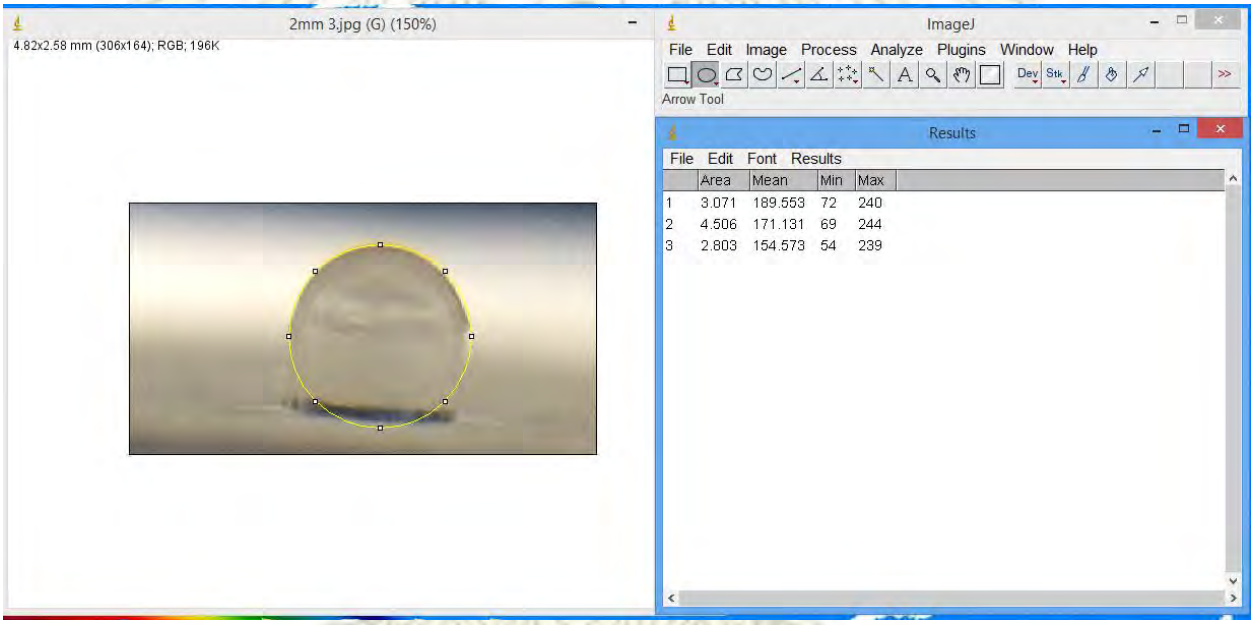
1) ผลของอุณหภูมิ
   โดยใช้อุณหภูมิ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเลนส์ที่ขึ้นรูปจากแต่ละอุณหภูมิ
2) ผลของปริมาตรพอลิไดเมทิลไซลอกเซน
   ทดลองหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในปริมาตรต่างกันบนฐานอะคริลิกขนาดเท่ากัน แล้ววัดรัศมีความโค้ง ระยะโฟกัส กำลังขยาย และประสิทธิภาพของเลนส์เปรียบเทียบกัน
3) ผลของขนาดฐานอะคริลิก
   ทดลองหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในปริมาตรมากที่สุดที่ไม่ทำให้สารล้นออกมาจากฐานอะคริลิกกลมขนาดต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ แล้วเปรียบเทียบกำลังขยาย และประสิทธิภาพของเลนส์
4) ความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์
   ทดลองหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในปริมาตรมากที่สุดที่ไม่ทำให้สารล้นออกมาล้นออกมาจากฐานอะคริลิกกลมขนาดต่าง ๆ 5 ครั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบระยะโฟกัส และภาพถ่ายที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสที่นำมาหาความเที่ยงเหล่านั้น
5) การทดสอบประสิทธิภาพของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้
   ดังรายละเอียดในข้อ 3.3.5

3.3 ตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของเลนส์พีดีเอ็มเอสที่สร้างขึ้น

3.3.1 ความโค้งนูนของเลนส์

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้วัดรัศมีความโค้ง เพื่อเป็นตัวชี้วัดระดับความนูนของเลนส์ โดยใช้วิธีถ่ายภาพเลนส์บนฐานอะคริลิกด้วยสมาร์ตโฟนพร้อมด้วย CU SmartLens กำลังขยาย 20 เท่า ในระดับเดียวกับสายตา แล้วนำภาพที่ได้ไปเข้าโปรแกรม ImageJ หาพื้นที่วงกลมที่สร้างรอบเลนส์ ก่อนแปลงค่าเป็นรัศมีของวงกลม ซึ่งเป็นค่าเดียวกับรัศมีความโค้ง

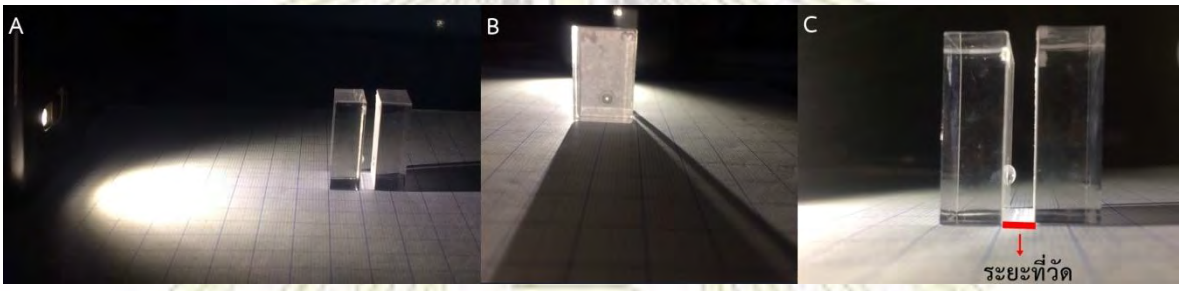
รูปที่ 3.9 การถ่ายภาพเพื่อนำไปวัดรัศมีความโค้งของเลนส์พีดีเอ็มเอส



รูปที่ 3.10 การวัดค่ารัศมีความโค้งของเลนส์โดยใช้โปรแกรม ImageJ หาพื้นที่ เพื่อที่จะทราบค่ารัศมีของวงกลมที่สร้างขึ้นดังรูป ซึ่งเป็นค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ด้วย เลนส์ที่มีรัศมีความโค้งมาก จะมีความนูนน้อย

3.3.2 ระยะโฟกัสของเลนส์

การวัดระยะโฟกัสของเลนส์พีดีเอ็มเอส ทำได้โดยนำเลนส์ที่ต้องการหาระยะโฟกัสไปติดบนแท่งอะคริลิกใส รูปสี่เหลี่ยมที่วางบนกระดาษกราฟ ฉายแสงไปที่อะคริลิก โดยให้แหล่งกำเนิดแสงอยู่ห่างออกไป 10 เซนติเมตร แล้วใช้แท่งอะคริลิกสี่เหลี่ยมอีกชิ้นซึ่งมีกระดาษสีขาวเป็นฉากรับแสงดัง**รูปที่ 3.11** (A) เลื่อนฉากรับแสงเพื่อหาระยะที่แสงถูกรวมเป็นจุดเล็ก สว่าง และขอบคมที่สุดบนฉากรับแสง ดัง**รูปที่ 3.11** (B) จากนั้นอ่านค่าระยะห่างระหว่างฐานเลนส์กับฉากรับแสงบนกระดาษกราฟในหน่วยมิลลิเมตร จะทราบระยะโฟกัสของเลนส์ดัง**รูปที่ 3.11** (C)



รูปที่ 3.11 การหาระยะโฟกัสของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้

3.3.3 กำลังขยายของเลนส์

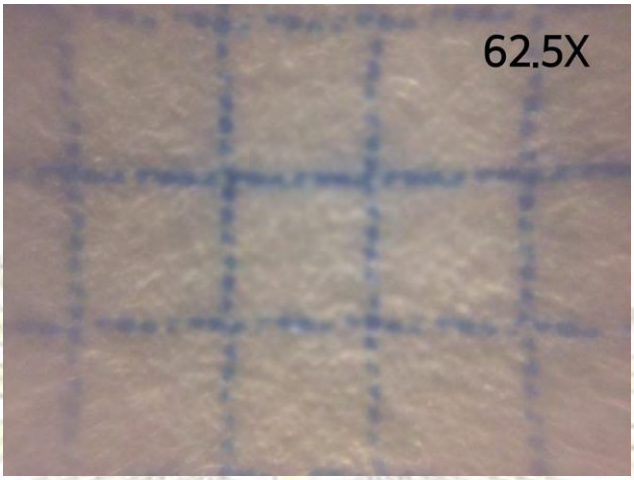
กำลังขยายของไมโครเลนส์สามารถคำนวณจากสมการ

$$M = \frac{250}{f} \qquad [7]$$

เมื่อ M คือ กำลังขยาย และ f คือ ระยะโฟกัสของเลนส์เป็นหน่วยมิลลิเมตรที่วัดได้จาก 3.3.2

3.3.4 ขอบเขตของการมองเห็น

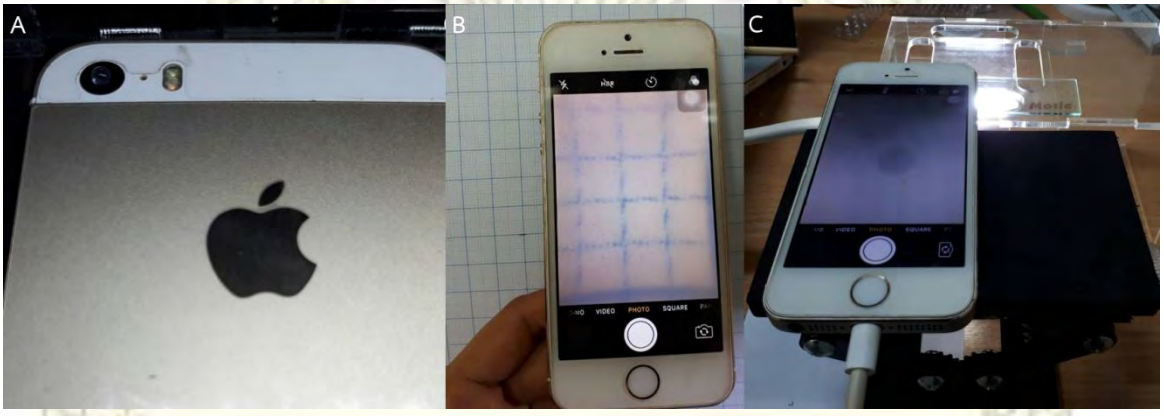
ขอบเขตของการมองเห็น คือพื้นที่ของภาพที่ถ่ายได้หลังจากติดเลนส์ โดยเมื่อเลนส์มีกำลังขยายสูงขึ้น พื้นที่ในการมองเห็นจะเล็กลง ทำให้มองเห็นรายละเอียดเล็ก ๆ ได้ชัดเจนขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้เลนส์ที่ต้องการหาขอบเขตของการมองเห็นไปติดบนกล้องหลังของสมาร์ตโฟน นำไปถ่ายภาพกระดาษกราฟที่ระยะโฟกัส แล้วพิจารณาจำนวนช่องสี่เหลี่ยมของกระดาษกราฟเป็นขอบเขตของการมองเห็น



รูปที่ 3.12 การหาขอบเขตการมองเห็นโดยใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 62.5 เท่า ติดบนกล้องหลังของสมาร์ตโฟน รุ่น iPhone 5s ถ่ายภาพกระดาษกราฟ มีขอบเขตการมองเห็นประมาณ 4×3 ตารางมิลลิเมตร

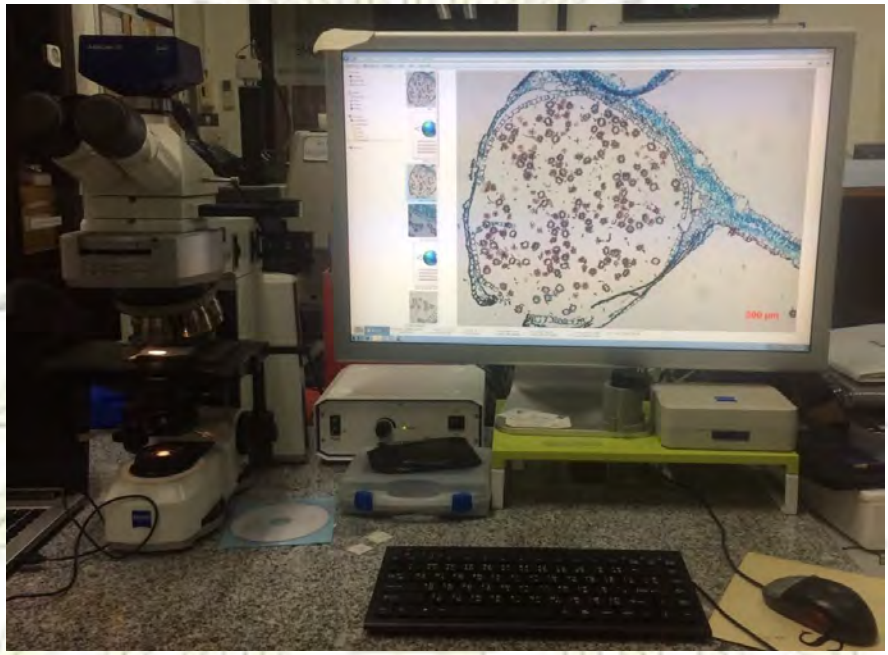
3.3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเลนส์ที่ขึ้นรูปได้

3.3.5.1 นำเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ขึ้นรูปได้ไปติดที่กล้องหลังของสมาร์ตโฟนให้ตรงรูรับแสงของกล้อง แล้วนำไปถ่ายภาพ ทั้งนี้เลนส์จะอยู่ใกล้วัตถุมาก เนื่องจากมีระยะโฟกัสอยู่ในระดับมิลลิเมตร ในกรณีที่กำลังขยายไม่สูงมากสามารถใช้มือถ่ายภาพได้ตามปกติ แต่หากเลนส์มีกำลังขยายสูงอาจต้องใช้แท่นวางวัตถุที่มีความสูงคงที่ แท่นวางสมาร์ตโฟนที่ปรับระดับความสูงได้ และมีให้แสงเพิ่มเติมเข้ามาช่วย



รูปที่ 3.13 การนำเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ไปใช้งานและทดสอบประสิทธิภาพ โดยติดเลนส์ที่กล้องหลังของสมาร์ตโฟน ให้ตรงรูรับแสงของกล้อง (A) นำไปถ่ายภาพวัตถุได้ทันที (B) หรืออาจต้องใช้อุปกรณ์เสริมช่วยในกรณีที่ไมโครเลนส์มีกำลังขยายสูง (C)

3.3.5.2 เปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จาก 3.3.5.1 กับกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss: Axio Scope.A1) โดยใช้กำลังขยายที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.14 ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss: Axio Scope.A1) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับภาพที่ถ่ายได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ร่วมกับสมาร์ตโฟน

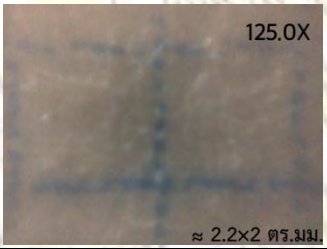
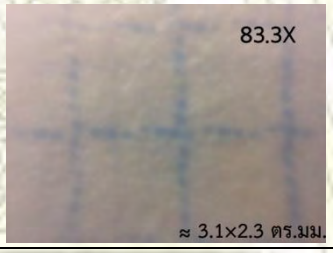
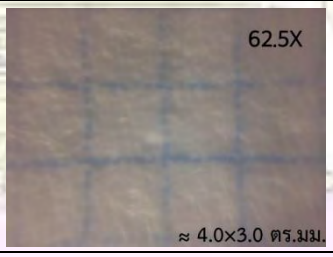
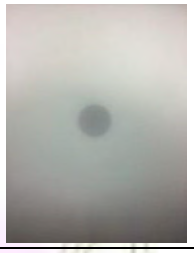
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการขึ้นรูปและประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์

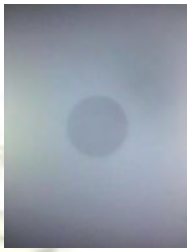
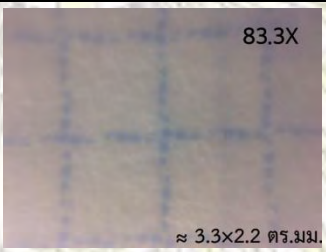
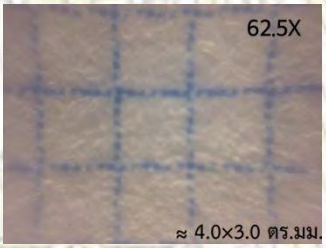
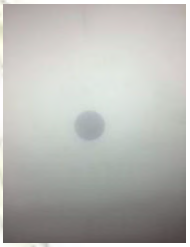
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการขึ้นรูปและประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มม.)	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายภาพกระดาษกราฟ	ภาพถ่าย Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
2.00	2.0	125.0		
2.50	3.0	83.3		
3.00	4.0	62.5		

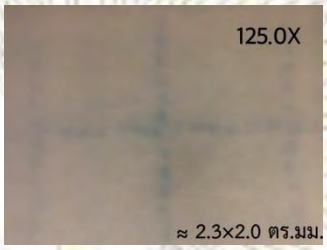
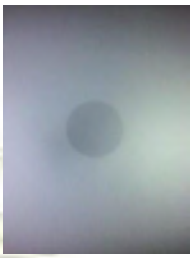
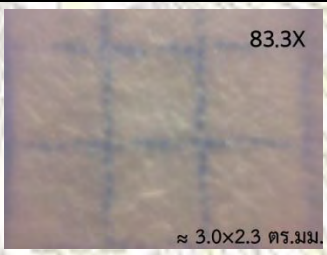
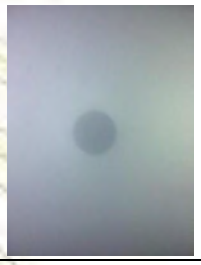
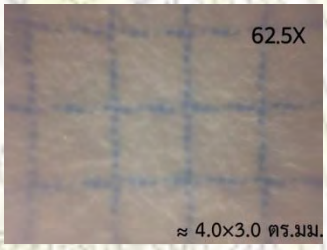
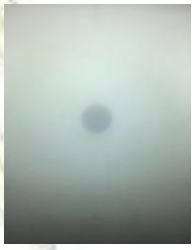
เมื่อใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 8-10 นาที เพื่อให้พอลิ-ไดเมทิลไซลอกเซนแข็งตัว ดังนั้นในกรณีที่เลนส์ยังมีความนูนน้อยสามารถเพิ่มความนูนของเลนส์ได้ โดยค่อย ๆ หยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเพิ่ม เพราะมีเวลาก่อนพอลิเมอร์แข็งตัวค่อนข้างนาน เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ผลิตได้ใส ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัด

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มม.)	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายภาพกระดาษกราฟ	ภาพถ่าย Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
2.00	2.0	125.0		
2.50	3.0	83.3		
3.00	4.0	62.5		

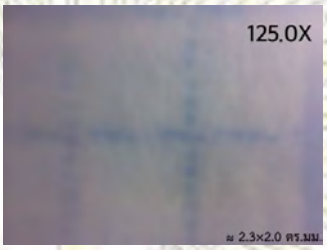
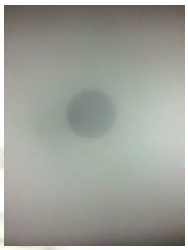
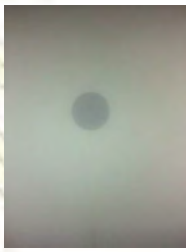
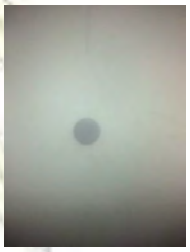
เมื่อใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 5-7 นาที เพื่อให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนแข็งตัว สามารถเพิ่มความโค้งของเลนส์ได้ โดยค่อย ๆ หยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเพิ่มก่อนสารจะเริ่มแข็งตัว เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ผลิตได้ใส ภาพถ่ายที่ได้จากการใช้เลนส์ร่วมกับสมาร์ตโฟนมีความคมชัด ขอบเขตการมองเห็นภาพ และกำลังขยายของเลนส์แต่ละขนาดมีค่าเท่ากับเลนส์ที่ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มม.)	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายภาพกระดาษกราฟ	ภาพถ่าย Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
2.00	2.0	125.0		
2.50	3.0	83.3		
3.00	4.0	62.5		

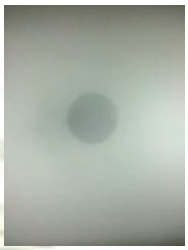
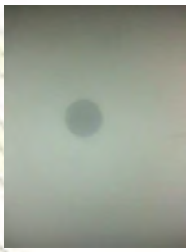
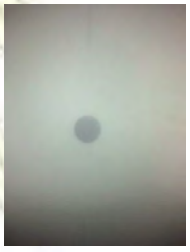
เมื่อใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที เพื่อให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนแข็งตัว มีฟองอากาศเกิดขึ้นในเลนส์บางชิ้นเล็กน้อยขณะให้ความร้อน จึงทำให้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ผลิตได้บางชิ้นใส บางชิ้นมีฟองอากาศ ทำให้ความความคมชัดของภาพลดลงเล็กน้อย ขอบเขตการมองเห็นภาพ และกำลังขยายของเลนส์แต่ละขนาดมีค่าเท่ากับเลนส์ที่ใช้อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

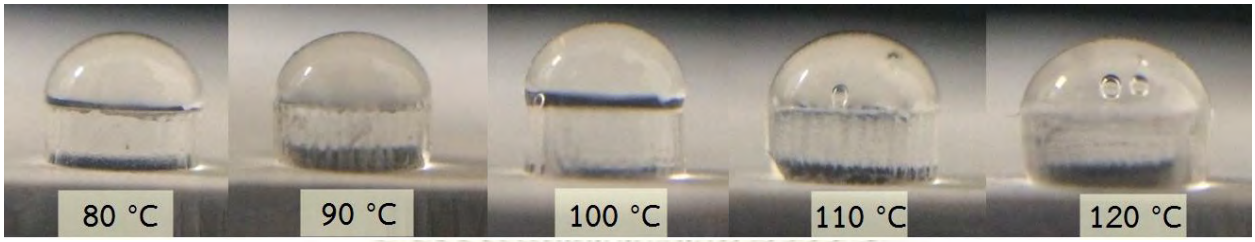
เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มม.)	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายภาพกระดาษกราฟ	ภาพถ่าย Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
2.00	2.0	125.0		
2.50	3.0	83.3		
3.00	4.0	62.5		

เมื่อใช้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสในการขึ้นรูป พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนแข็งตัว การปรับความนูนของเลนส์โดยการเติมพอลิเมอร์เริ่มยากขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาก่อนสารแข็งตัวค่อนข้างน้อย มีฟองอากาศเกิดขึ้นเล็กน้อยในเลนส์หลายชิ้นขณะให้ความร้อน จึงทำให้เลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์ที่ผลิตได้บางชิ้นใส บางชิ้นมีฟองอากาศ เมื่อเปรียบเทียบเลนส์ขนาดฐานเท่ากันที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิอื่น พบว่ามีขอบเขตการมองเห็นภาพใกล้เคียงกัน และมีกำลังขยายเท่ากัน แต่ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดน้อยกว่า

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป

เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มม.)	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายภาพกระดาษกราฟ	ภาพถ่าย Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
2.00	2.0	125.0		
2.50	3.0	83.3		
3.00	4.0	62.5		

เมื่อใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที เพื่อให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนแข็งตัว การปรับความนูนของเลนส์โดยการเติมพอลิเมอร์ทำได้ยาก เนื่องจากช่วงเวลาก่อนสารแข็งตัวน้อยมาก เมื่อสารกระจายตัวไปบนฐานเลนส์แล้วแทบคงรูปในทันที การเติมสารเพิ่มจึงอาจส่งผลให้รูปร่างของเลนส์ผิดแปลกไป มีฟองอากาศเกิดขึ้นในเลนส์หลายชิ้นขณะให้ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบเลนส์ขนาดฐานเท่ากันที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิอื่น พบว่ามีขอบเขตการมองเห็นภาพใกล้เคียงกัน และมีกำลังขยายเท่ากัน แต่ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดน้อยที่สุด



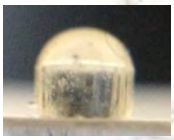
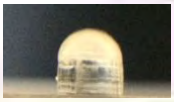
รูปที่ 4.1 เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่มีผลต่อกำลังขยาย แต่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของเลนส์ หากใช้อุณหภูมิสูงจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นในเลนส์ ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้การหักเหของแสงที่มากระทบเลนส์เปลี่ยนทิศทางจากที่ควรจะเป็น ภาพที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์จึงไม่คมชัด จาก**รูปที่ 4.1** จะเห็นว่าอุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ให้เลนส์ที่ไร้ฟองอากาศ จึงทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เพื่อศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ในการทดลองขั้นต่อไป เพราะที่อุณหภูมินี้นอกจากเลนส์ที่ขึ้นรูปได้มีคุณภาพดี ไม่มีฟองอากาศแล้ว ยังสามารถเพิ่มความนูนของเลนส์โดยการเติมพอลิเมอร์เพิ่มได้ เนื่องจากพอลิไดเมทิลไซลอกเซนไม่ได้แข็งตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และใช้เวลาน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสที่ให้ประสิทธิภาพเลนส์ใกล้เคียงกัน

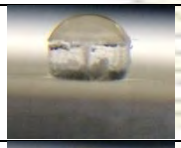
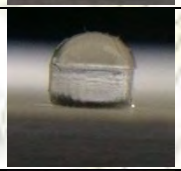
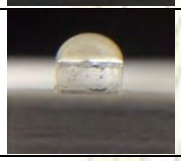
4.2 ผลของปริมาตรพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์

จากงานวิจัยในหัวข้อ Elastomeric PDMS Planoconvex Lenses Fabricated by a Confined Sessile Drop Technique ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [7] พบว่าเมื่อพิจารณาเลนส์ที่มีฐานขนาดเท่ากัน หากใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนปริมาตรมากในการขึ้นรูปจะส่งผลให้เลนส์มีความนูนและกำลังขยายสูงกว่าเมื่อใช้ปริมาตรน้อยกว่า แม้ในงานวิจัยนี้จะไม่ได้วัดค่าปริมาตรของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการหยดสารได้พัฒนามาเพื่อลดต้นทุนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปเลนส์นี้เน้นนำไปเผยแพร่ให้เป็นประโยชน์ต่อสังคม อุปกรณ์จึงไม่ซับซ้อน ใช้การประมาณค่าในการกำหนดปริมาตรพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์แต่ละชิ้น แต่เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าปริมาตรพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อความนูนและกำลังขยายของเลนส์ ผู้วิจัยจึงทดลองหยดพอลิเมอร์ในปริมาตรต่างกันบนฐานอะคริลิกขนาดเท่ากัน เมื่อเรียงลำดับการใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนในการขึ้นรูปเลนส์จากน้อยไปมากตามลำดับ 1-5 พบว่าได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ผลความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เมื่อใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนปริมาตรเรียงจากน้อยไปมากบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร

ชิ้นที่	รูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์	รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร)	ระยะโฟกัส (มิลลิเมตร)	กำลังขยาย (เท่า)
1		1.284	3.0	83.3
2		1.198	3.0	83.3
3		0.989	2.5	100.0
4		0.944	2.0	125.0
5		0.930	2.0	125.0

ตารางที่ 4.7 ผลความนูนและกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์เมื่อใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนปริมาตรเรียงจากน้อยไปมากบนฐานอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 มิลลิเมตร

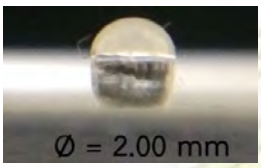
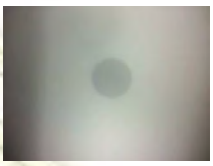
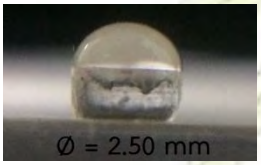
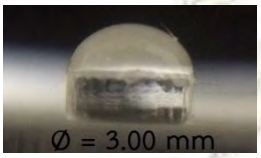
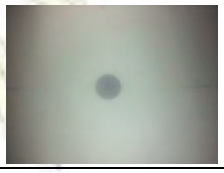
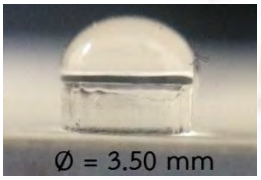
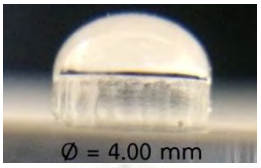
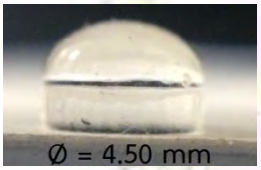
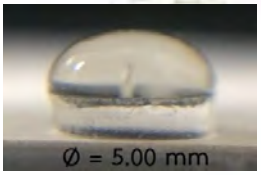
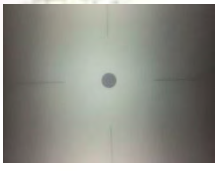
ชิ้นที่	รูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์	รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร)	ระยะโฟกัส (มิลลิเมตร)	กำลังขยาย (เท่า)
1		1.394	3.5	71.4
2		1.347	3.5	71.4
3		1.326	3.5	71.4
4		1.285	3.0	83.3
5		1.250	3.0	83.3

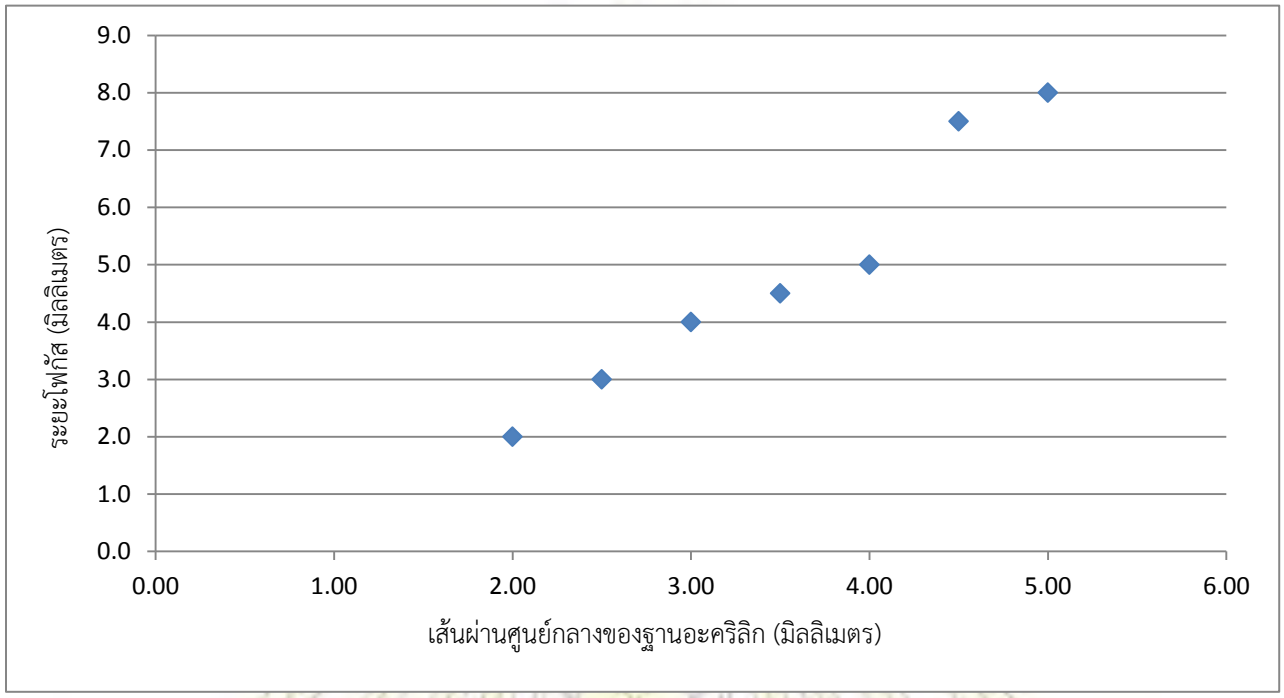
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ในการขึ้นรูปจะทำให้รัศมีความโค้งของเลนส์ลดน้อยลง หรือมีความนูนมากขึ้น มีระยะโฟกัสสั้นลง และมีกำลังขยายสูงขึ้น ตรงตามงานวิจัยที่กล่าวอ้างอิงในข้างต้น และจะเห็นว่าหากเลนส์มีรัศมีความโค้งต่างกันเพียงเล็กน้อย จะทำให้มีระยะโฟกัส และกำลังขยายเท่ากัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ปริมาตรสูงสุดที่ไม่ทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนล้นออกมาจากฐานอะคริลิกในการขึ้นรูปเลนส์ เพื่อทำให้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์มีกำลังขยายสูงเท่าที่จะเป็นไปได้

4.3 ผลของขนาดฐานที่มีต่อกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์

จากการศึกษาผลของขนาดฐานที่มีต่อกำลังขยายของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ โดยทำการทดลองหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในปริมาตรมากที่สุดที่ไม่ทำให้สารล้นออกมาจากฐานอะคริลิกกลมขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ได้เลนส์ที่มีความนูนสูงสุดและมีระยะโฟกัสสั้นที่สุด พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบเลนส์ที่ได้จากการใช้ฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ ในการขึ้นรูป

รูปเลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์	ระยะโฟกัส (มม.)	กำลังขยาย (เท่า)	ขอบเขตของการมองเห็นเมื่อถ่ายจากกระดาษกราฟ	ภาพ Calibration slide เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม.
	2.0	125.0		
	3.0	83.3		
	4.0	62.5		
	4.5	55.6		
	5.0	50.0		
	7.5	33.3		
	8.0	31.3		



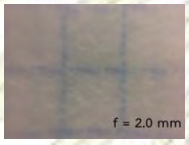
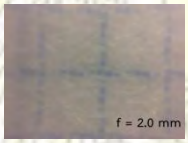
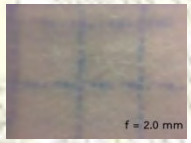
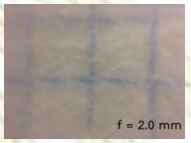
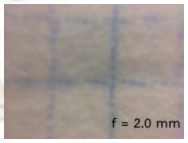
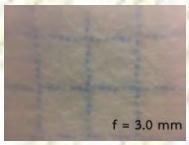
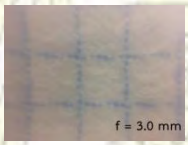
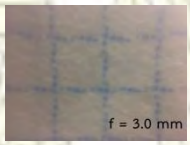
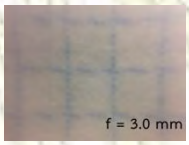
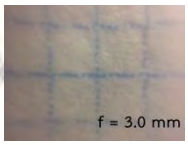
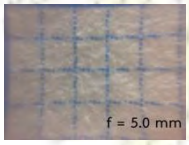
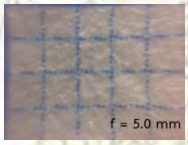
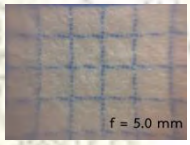
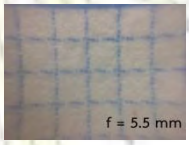
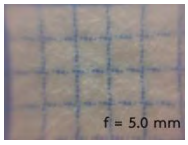
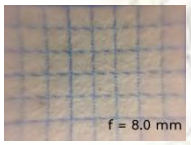
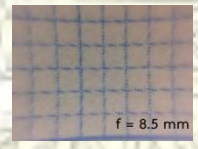
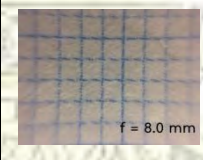
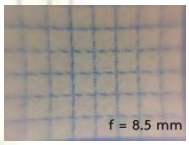
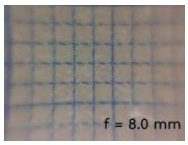
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโฟกัสของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กับขนาดของฐานอะคริลิก

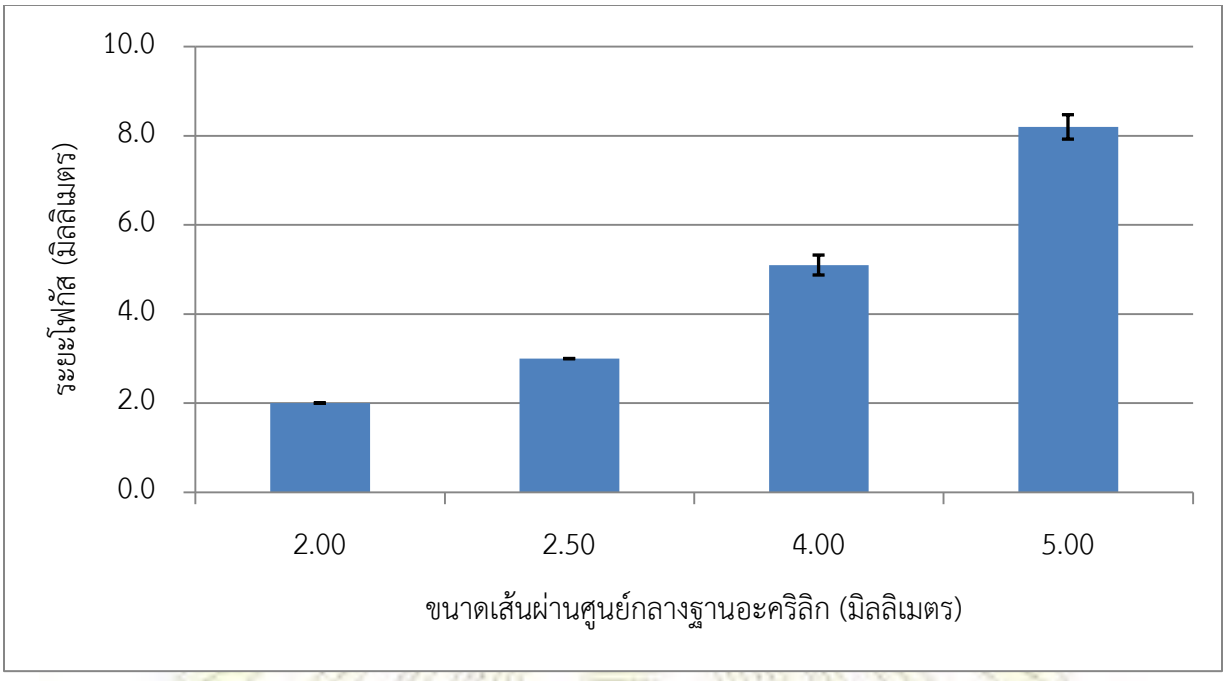
จากผลการทดลองพบว่าขนาดของฐานอะคริลิกที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อระยะโฟกัสและกำลังขยายของเลนส์ คือเมื่อฐานอะคริลิกมีขนาดใหญ่ขึ้น เลนส์ที่ได้จะมีความนูนน้อยลง มีระยะโฟกัสมากขึ้น และมีกำลังขยายต่ำลง ภาพถ่ายที่ได้จากการใช้งานเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์จะมีขอบเขตการมองเห็นที่มากขึ้น แต่รายละเอียดภาพลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ฐานอะคริลิกขนาดเล็กกว่า ดังจะเห็นจากภาพกระดาษกราฟที่มีพื้นที่ในการมองเห็นมากขึ้น แต่ขนาดของช่องสี่เหลี่ยมเล็กลง และจุดสีดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตรบน Calibration slide ที่ดูเล็กลงเรื่อย ๆ เมื่อใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่มีฐานขนาดใหญ่ร่วมกับสมาร์ตโฟนในการบันทึกภาพภาพ

4.4 ความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์

จากการทดสอบความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์ โดยหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในปริมาตรมากที่สุดที่ไม่ทำให้สารล้นออกมาล้นออกมาจากฐานอะคริลิกกลมขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ได้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่มีความนูนมากที่สุดและมีระยะโฟกัสสั้นที่สุด 5 ครั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์

เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (มิลลิเมตร)	ระยะโฟกัสและภาพถ่ายกระดาษกราฟ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.00					
2.50					
4.00					
5.00					

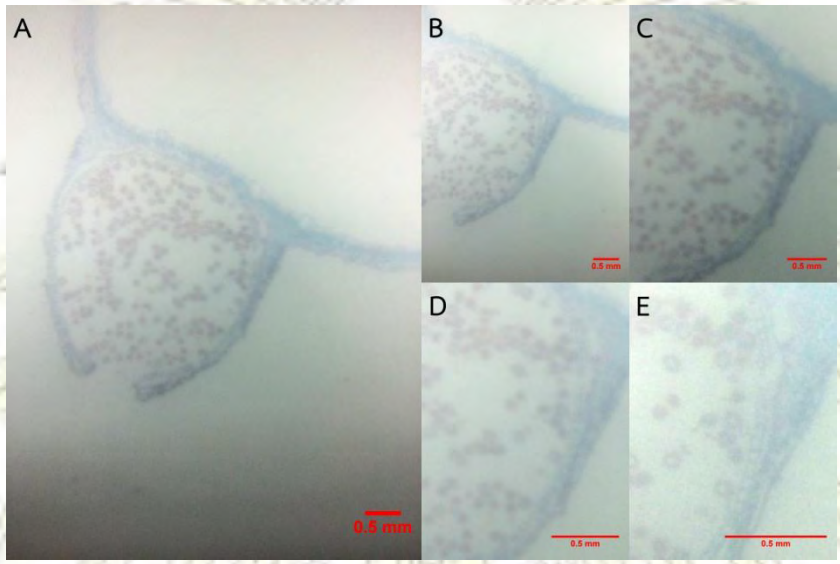


รูปที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์บนฐานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00, 2.50, 4.00 และ 5.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้ระยะโฟกัสเป็นตัวชี้วัด

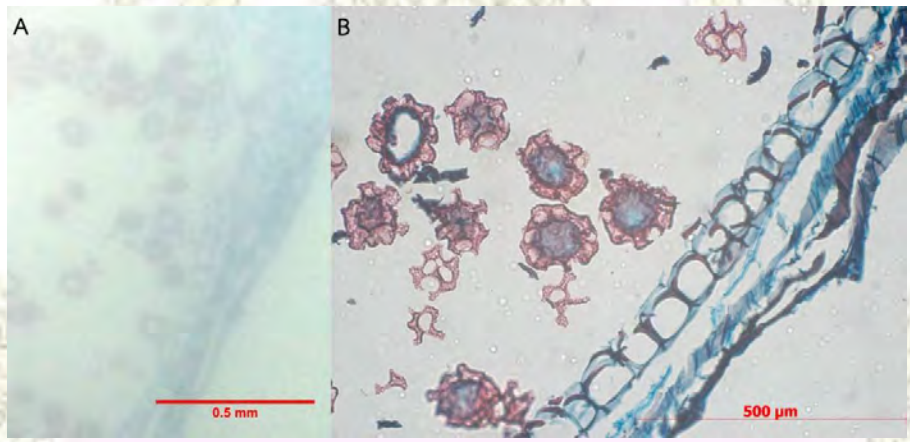
จากที่กล่าวไปในผลการทดลองที่ 4.2 ว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการหยดพอลิเมอร์ลงบนฐานไม่สามารถทราบปริมาตรที่แน่นอนได้ จึงอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพและคุณสมบัติของเลนส์ ไม่ว่าจะเป็นระยะโฟกัส กำลังขยาย ขอบเขตการมองเห็น และความคมชัดของภาพ ผู้วิจัยจึงต้องการหาความเที่ยงในการขึ้นรูปเลนส์ด้วยวิธีการขึ้นรูปนี้ โดยพยายามหยดพอลิไดเมทิลไซลอกเซนให้มากที่สุดโดยไม่ล้นออกมาจากฐานอะคริลิก เพื่อทำให้เลนส์มีระยะโฟกัสสั้นที่สุดและมีกำลังขยายสูงสุดในแต่ละครั้งพบว่า เมื่อใช้ฐานอะคริลิกขนาดเล็กจะมีความแม่นยำในการ กะปริมาตรมากกว่า จะเห็นได้จากค่าระยะโฟกัสที่วัดได้มีค่าคงเดิมตลอด ขอบเขตการมองเห็น และความคมชัดของภาพใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อฐานอะคริลิกมีขนาดใหญ่ขึ้น ต้องใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากขึ้น การควบคุมปริมาตรให้คงที่นั้นทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้เข็มจุ่มพอลิเมอร์เพื่อไปหยดลงบนฐานหลายครั้ง ทำให้เลนส์มีความนูนไม่เท่ากัน จึงเกิดค่าเบี่ยงเบนของระยะโฟกัสขึ้นเล็กน้อย แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเลนส์ที่ขึ้นรูปได้ โดยนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนในการถ่ายภาพ พร้อมทั้งทดลองขยายภาพด้วยตัวกล้อง (Digital zoom) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน (Carl Zeiss: Axio Scope.A1) พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

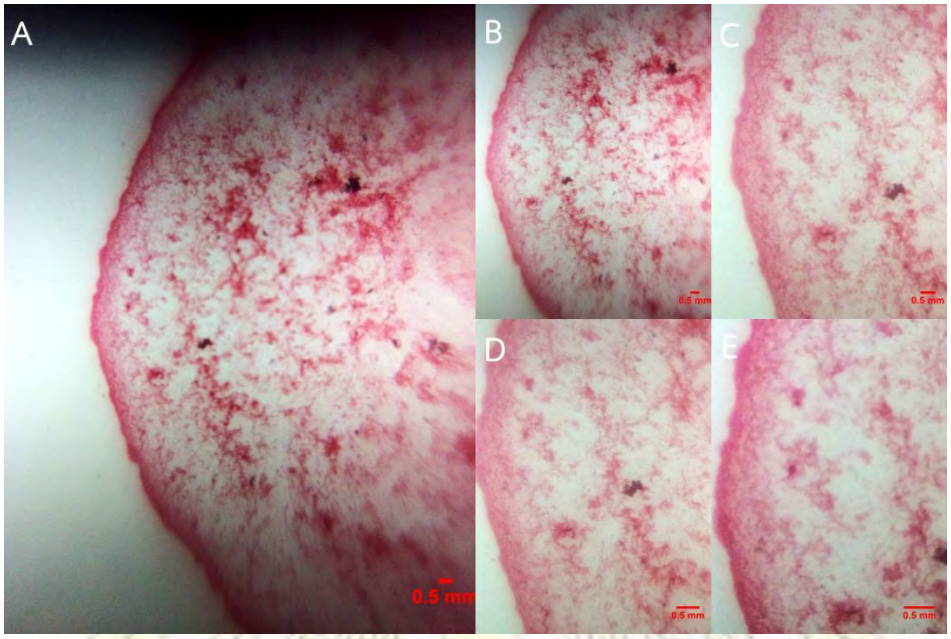


รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย Sporangium of Lycophyta l.s. ที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 125.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1.75, 2.50, 3.25 และ 4.00 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ

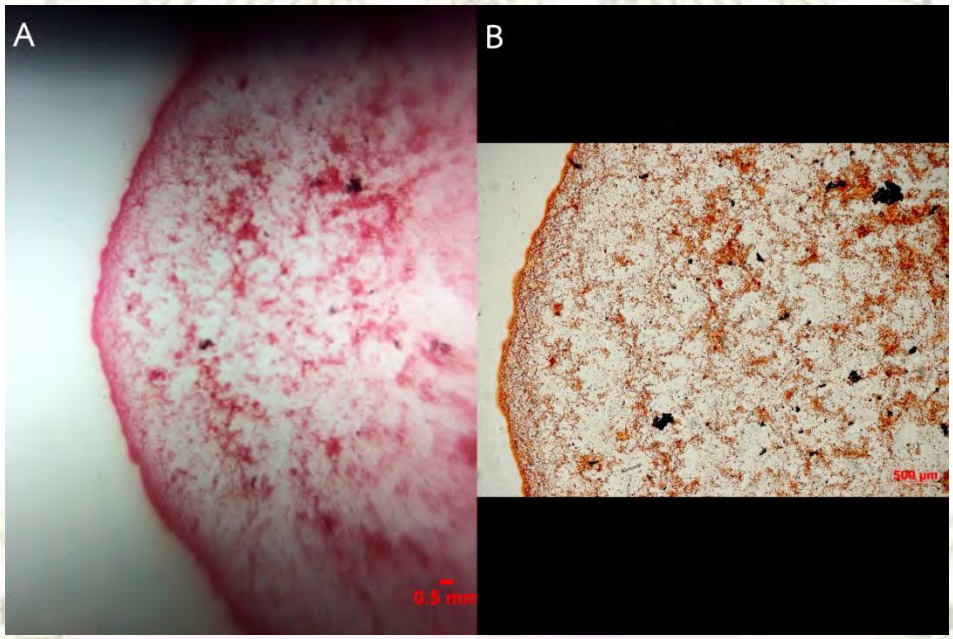


รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย Sporangium of Lycophyta l.s. ขยาย 500 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอส-อีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 125.0 เท่า และ Digital zoom 4 เท่าจากสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 500 เท่า (B)

จากการทดสอบคุณภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร เลนส์มีระยะโฟกัส 2.0 มิลลิเมตร และมีกำลังขยาย 125.0 เท่า พบว่าสามารถขยายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กมากได้จริง แต่ภาพไม่ค่อยคมชัดเท่าใดนัก เนื่องจากเลนส์ที่นูนมากนั้นจะโฟกัสภาพได้ในระยะที่ใกล้และมีพื้นที่น้อยมาก ทำให้ภาพในพื้นที่นอกระยะดังกล่าวเบลอ และการใช้งานจะยากกว่าเลนส์ที่มีขนาดอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ฐานสำหรับสัมผัสกับกล้องของสมาร์ตโฟนน้อย อาจควบคุมยาก และรูรับแสงมีขนาดเล็ก ดังนั้นในการนำไปถ่ายภาพจึงต้องให้แสงเพิ่มมากพอ เมื่อนำภาพถ่าย Sporangium of Lycophyta l.s. ที่ได้จากการใช้เลนส์นี้ร่วมกับ Digital zoom 4 เท่าจากสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s เปรียบเทียบกับภาพที่บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 500 เท่า พบว่ามีขอบเขตการมองเห็นที่ใกล้เคียงกัน ความคมชัด และการมองเห็นสีของภาพอาจยังด้อยกว่ามาก ต้องหาวิธีพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไป

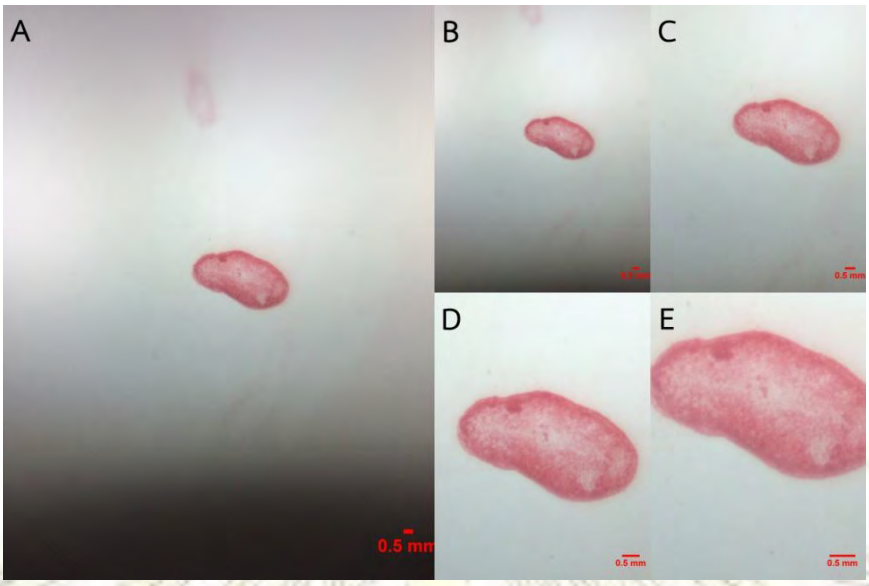


รูปที่ 4. 6 ภาพถ่ายสาหร่ายสีเขียว chlorella (W.m.) Single cells ที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 50.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1.75, 2.50, 3.25 และ 4.00 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ

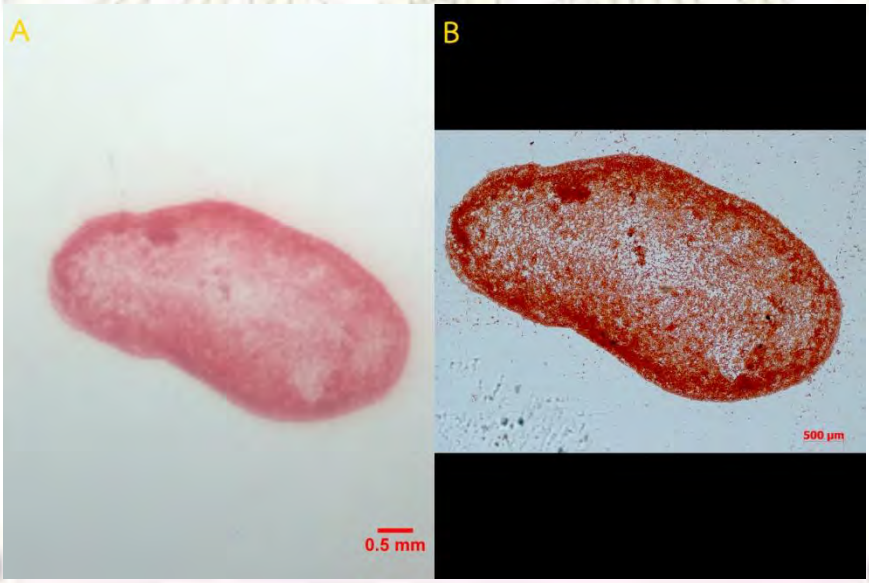


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายสาหร่ายสีเขียว chlorella (W.m.) Single cells ขยาย 50 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 50.0 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 50 เท่า (B)

จากการทดสอบคุณภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.00 มิลลิเมตร เลนส์มีระยะโฟกัส 5.0 มิลลิเมตร และมีกำลังขยาย 50.0 เท่า พบว่าสามารถขยายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็ก เห็นรายละเอียดต่าง ๆ ของวัตถุได้ดี ภาพคมชัดในขอบเขตของการมองเห็นซึ่งมีพื้นที่มากกว่า และใช้งานง่ายกว่าเลนส์ที่มีกำลังขยาย 125.0 เท่า แต่อาจมีรายละเอียดขนาดเล็กที่ไม่สามารถแยกได้ชัดเจน เมื่อนำภาพถ่ายสาหร่ายสีเขียว chlorella (W.m.) Single cells ที่ได้จากการใช้เลนส์นี้ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s เปรียบเทียบกับภาพที่บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 50 เท่า พบว่ามีขอบเขตการมองเห็นที่กว้างกว่าเล็กน้อย ที่ขอบภาพเบลอ แต่ความคมชัดและสีของภาพโดยรวมถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และใกล้เคียงมากกว่าการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่มีกำลังขยาย 125.0 เท่า



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายแบคทีเรียรูปวงกลมที่ได้จากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 33.3 เท่า ร่วมกับสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และใช้ Digital zoom ขยายภาพเพิ่ม 1.75, 2.50, 3.25 และ 4.00 เท่าในรูป (B), (C), (D), (E) ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายแบคทีเรียรูปวงกลม ขยาย 108.2 และ 100 เท่า เมื่อบันทึกภาพจากการใช้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยาย 33.3 เท่า และ Digital zoom 3.25 เท่าจากสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s (A) และบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 100 เท่า (B) ตามลำดับ

จากการทดสอบคุณภาพของเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ที่ฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.50 มิลลิเมตร เลนส์มีระยะโฟกัส 7.5 มิลลิเมตร และมีกำลังขยาย 33.3 เท่า พบว่าสามารถขยายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กได้โดยมีขอบเขตในการมองเห็นมากกว่าเลนส์ 2 กำลังขยายที่ผ่านมา แต่อาจเห็นรายละเอียดของวัตถุน้อยกว่า ใช้งานง่ายเนื่องจากฐานเลนส์มีขนาดใหญ่ จึงมีพื้นที่สัมผัสกับบริเวณกล้องของสมาร์ตโฟนมากกว่า มีระยะโฟกัสไกล และรูรับแสงที่กว้างกว่า ทำให้ไม่จำเป็นต้องให้แสงเพิ่ม (ในกรณีที่วัตถุตัวอย่างไม่ได้มีขนาดเล็กมาก) เมื่อนำภาพถ่ายแบคทีเรียรูปวงกลมที่ได้จากการใช้เลนส์นี้ร่วมกับ Digital zoom 3.25 เท่า ของสมาร์ตโฟนรุ่น iPhone 5s เปรียบเทียบกับภาพที่บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 กำลังขยาย 100 เท่า พบว่ามีขอบเขตการมองเห็นที่ใกล้เคียงกัน ความคมชัดของภาพถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ สีภาพที่ได้ใกล้เคียงกับสีของวัตถุจริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ผู้วิจัยสามารถพัฒนาการขึ้นรูปเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูงโดยใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวที่ผ่านการกำจัดฟองอากาศในระบบสุญญากาศหยดลงบนฐานอะคริลิกกลมที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 5-7 นาที สารจะกระจายตัวอย่างช้า ๆ ไปบนฐานซึ่งมีขอบคมเกิดความโค้งนูนขึ้น ก่อนจะค่อย ๆ คงตัวเป็นของแข็งยืดหยุ่นได้หรืออีลาสโตเมอร์ ด้วยเทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) นี้ จะทำให้ได้เลนส์จุลทรรศน์ขนาดเล็กหรือไมโครเลนส์รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens โดยกำลังขยายที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของฐานอะคริลิก และปริมาตรพอลิ-ไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ ยิ่งฐานมีขนาดเล็ก และปริมาตรสารที่ใช้มากเพียงใด ก็จะทำให้เลนส์ที่ได้มีความนูนมาก มีระยะโฟกัสสั้น และมีกำลังขยายสูงขึ้นมากเท่านั้น ในงานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปเลนส์ที่มีระยะโฟกัส 8.0-2.0 มิลลิเมตร ซึ่งให้กำลังขยาย 31.3-125.0 เท่า เมื่อใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนปริมาตรมากที่สุดที่อยู่บนฐานอะคริลิก-กลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00-5.00 มิลลิเมตรได้ หลังจากนำเลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์ไปติดกับกล้องหลังของสมาร์ตโฟนพบว่าใช้งานร่วมกันได้ดี เมื่อนำไปส่อง หรือถ่ายภาพวัตถุพบว่าภาพขยายที่ได้มีความคมชัดและความละเอียดสูงประสิทธิภาพเทียบเคียงกับกล้องจุลทรรศน์มาตรฐาน ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 ทั้งยังสามารถขยายภาพเพิ่มแบบ Digital Zoom ได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์เสริมที่เรียกว่า “เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์” ซึ่งสามารถเปลี่ยนสมาร์ตโฟนให้กลายเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบพกพา โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ อุปกรณ์และวิธีการไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปเลนส์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ ที่ผ่านมา ผลผลิตที่ได้ช่วยลดข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์ในห้องปฏิบัติการในเรื่องราคา การใช้งานที่ยุ่งยากและใช้พลังงานสูง ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้หรือส่งต่อได้ทันที ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเมื่อนำไปเผยแพร่จะเป็นการส่งเสริมการเรียนรู้ และสร้างนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ก่อนนำพอลิไดเมทิลไซลอกเซนไปขึ้นรูปเลนส์ควรแน่ใจก่อนว่าได้กำจัดฟองอากาศหมดแล้ว เนื่องจากฟองอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพของเลนส์
2) อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปเลนส์ทุกชิ้นควรสะอาด โดยเฉพาะฐานอะคริลิก และเข็มที่ใช้หยดพอลิได-เมทิลไซลอกเซน เพื่อให้เลนส์ที่ได้ไม่มีฝุ่นละออง หรือสิ่งเจือปนอยู่ภายใน ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพลดลง
3) ควรขึ้นรูปเลนส์หลังจากเตรียมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวในทันที เนื่องจากหากทิ้งไว้นานสารจะเริ่มหนืดมากขึ้นเรื่อย ๆ รวมทั้งอาจมีฝุ่นละอองเข้าไปเจือปน ซึ่งจะเป็นปัญหาต่อการขึ้นรูปเลนส์
4) ในหยดการพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเหลวควรใช้เข็มจุ่มที่สารช้า ๆ ค่อย ๆ หยด และไม่คนสาร เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ และการหยดโดยจับเข็มในแนวตั้งฉากจะทำให้การกะปริมาตรสารทำได้ง่ายและแม่นยำกว่าการจับเข็มแบบเอียง
5) การนำเลนส์มาใช้ต้องค่อย ๆ แยกส่วนที่เป็นเลนส์กับส่วนฐานออกจากกัน หากแยกจากกันอย่างไม่ระมัดระวัง อาจทำให้ขอบฐานไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะติดกับสมาร์ทโฟนได้ไม่ดีนัก

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้เลนส์พีดีเอ็มเอสอีลาสโตเมอร์กำลังขยายสูง รูปร่างแบบ Plano-Convex Lens โดยใช้เทคนิคการหยดแบบตรึงที่จำกัดขอบเขต (Sessile Drop Casting Technique) ที่ทราบความโค้ง ระยะโฟกัส และกำลังขยายที่แน่นอน โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ อุปกรณ์และวิธีการไม่ซับซ้อน สามารถนำไปใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนอย่างสะดวกให้เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบพกพา

เอกสารอ้างอิง

1. Lee, W. M.; Upadhya, 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.
2. Shih, T. K.; Chen, C. F.; Ho, J. R.; Chuang, F. T. Fabrication of PDMS (Polydimethylsiloxane) Microlens and Diffuser using Replica Molding. *Microelectron. Eng.* **2006**, *83*, 2499–2503.
3. Cruz-Campa, J. L.; Okandan, M.; Busse, M. L.; Nielson, G. N. Microlens Rapid Prototyping Technique with Capability for Wide Variation in Lens Diameter and Focal Length. *Microelectron. Eng.* **2010**, *87*, 2376-2381.
4. Zhang, Y.; Cui, M.; Fan, X.; Zhang, B.; Wang, W. The fabrication and fast replication of out of plane parabolic arrays. *Sens. Actuator A-Phys.* **2014**, *216*, 190–195.
5. Damodara, S.; George, D.; Sen, A.K. Single step fabrication and characterization of PDMS microlens and its use in optocapillary flow manipulation. *Sens. Actuator B-Chem.* **2016**, *227*, 383–392
6. 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(4)*, 047005.
7. Ekgasit, S.; Kaewmanee, N.; Jangtawee, P.; Thammacharoen, C.; Donphoongpri M. Elastomeric PDMS Planoconvex Lenses Fabricated by a Confined Sessile Drop Technique, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, *8*, 20474-20482.
8. Seethapathy, S.; Górecki, T., Applications of Polydimethylsiloxane in Analytical Chemistry: A Review. *Anal. Chim. Acta* **2012**, *750*, 48-62.
9. Félix, A. S. C.; Santiago-Alvarado, A.; Iturbide-Jiménez, F.; Licona-Morán, B. Physical-chemical properties of PDMS samples used in tunable lenses, *IJESIT* **2014**, *3*, 563-571.
10. Ren, H.; Wu, S.-T., *Introduction to Adaptive Lenses.* Wiley: USA, **2012**; p 286.
11. Lillehoj, P. B.; Huang, M.-C.; Truong, N.; Ho, C.-M. Rapid Electrochemical Detection on a Mobile Phone. *Lab chip* **2013**, *13*, 2950-2955

12. Duffy, D. C.; McDonald, J. C.; Schueller, O. J. A.; Whitesides, G. M. Rapid Prototyping of Microfuidic Systems in Poly(dimethylsiloxane). *Anal Chem.* **1998**, *70*, 4974-4984.
13. Evenou, F.; Fujii, T.; Sakai, Y. Liver Cells Culture on Three-Dimensional Micropatterned Polydimethylsiloxane Surfaces. In *6th World Congress on Alternatives & Animal Use in the Life Sciences,* August 21-25, 2007, Tokyo, Japan, **2007**; Vol. 14, 665-668.
14. http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?R=131EN (accessed 5 Apr 2017)
15. Lisensky, G. C.; Campbell, D. J.; Beckman, K. J.; Calderon, C. E.; Doolan, P. W.; Rebecca, M. O.; Ellis, A. B. Replication and Compression of Surface Structures with Polydimethylsiloxane Elastomer. *J. Chem. Educ.* **1999**, *76*, 537-541
16. http://education.mrsec.wisc.edu/background/PDMS/ (accessed 9 Apr 2017)
17. http://www.bigshotcamera.com/learn/imaging-lens/basics (accessed 9 Apr 2017)
18. http://www2.ensc.sfu.ca/~glennc/e894/e894l5i.pdf (accessed 9 Apr 2017)
19. http://www.sjc.ac.th/sjc2014/images/Lreaning-online/M2/4.pdf (accessed 11 Apr 2017)
20. https://micro.magnet.fsu.edu/optics/lightandcolor/lenses.html (accessed 11 Apr 2017)
21. http://www.livephysics.com/tools/optics-tools/focal-length-thin-lens (accessed 11 Apr 2017)

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวพราวตะวัน ตันไพรนิช เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดยโสธร สำเร็จชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนก วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนยโสธรพิทยาคม จังหวัดยโสธร เมื่อปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังจบการศึกษาปริญญาตรี 119 หมู่ 1 ตำบลกระจาย อำเภอป่าติ้ว จังหวัดยโสธร 35150