



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

เรื่อง

การสร้างชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบ

โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง

Instrumentation of Optical Microscopy Projection for

Maskless Photolithography

โดย

ดร. สือจิตต์ เพ็ชรประสาน และคณะ

สนับสนุนโดย สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

2561



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การสร้างชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟี  
แบบไม่ใช้มาสก์แสง

Instrumentation of Optical Microscopy Projection for Maskless  
Photolithography

โดย

ดร. สือจิตต์ เพ็ชรประสาน และคณะ

สนับสนุนโดย

สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

2561

- ชื่อเรื่อง : การสร้างชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง
- ผู้วิจัย : ดร.สี่อจิตต์ เพ็ชรประสาน (หัวหน้าโครงการ)  
ดร.พิชญ์สินี สุวรรณแพทย์ นายสุวิชา ศศิวิมลกุล และนางสาวชญาณิศรา สุขเกษม
- สถาบัน : วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
- ปีที่พิมพ์ : 2562
- สถานที่พิมพ์ : มหาวิทยาลัยรังสิต
- แหล่งทุนวิจัย : สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต
- แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ : มหาวิทยาลัยรังสิต
- จำนวนหน้างานวิจัย : 111 หน้า
- คำสำคัญ : จุลทรรศนศาสตร์, โฟโตลิโทกราฟี, โฟโตลิโทกราฟีไม่ใช้มาสก์แสง, แสงที่อนุกรม
- ลิขสิทธิ์ : มหาวิทยาลัยรังสิต

#### บทคัดย่อ

โครงการ “การสร้างชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง” มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวิจัยทางด้านแสงและการสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟี โดยไม่ใช้มาสก์แสง อุปกรณ์ต่างๆ ได้ผ่านการออกแบบบนโปรแกรมออกแบบสามมิติและโปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างภาษาจี ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้ในการควบคุมในการทำงานของเครื่องกลึง อุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกกลึงขึ้นจากอลูมิเนียมอัลลอยด์ อุปกรณ์ทางแสงที่สร้างขึ้นสามารถนำมาสร้างทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง ซึ่งเป็นระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ดัดแปลงจากระบบทั่วไป มีการใช้อุปกรณ์ฉายภาพแทนการใช้มาสก์แสง ทำให้การสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีทำได้สะดวกมากขึ้นและประหยัดงบประมาณในการสร้างมาสก์แสงได้ ซึ่งตัวอย่างลวดลายที่สามารถสร้างได้ด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงบนกระจกปิดสไลด์ที่เคลือบด้วยสารไวแสงชนิดฟิล์ม ลวดลายที่ได้มีขนาดในระดับไมครอนลวดลายที่ได้มีหนา 30 ไมครอน กว้าง 68 ไมครอนจากการถ่ายภาพลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงมีประโยชน์ในด้านการวิจัย สามารถสร้างช่องโหว่ระดับจุลภาคสำหรับการผลิตห้องปฏิบัติการบนชิพและเกรตติงซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างระบบในการตรวจจับคลื่นอัลตราซาวด์ที่จะทำต่อไปในอนาคต

Title : Instrumentation of Optical Microscopy Projection for Maskless Photolithography

Researcher : Dr.Suejit Pechprasarn (Head of Research Project)  
Dr.Phitsini Suvarnaphaet, Mr.Suvicha Sasivimolkul and Ms.Chayanisa Sukkasem

Institution : College of Biomedical Engineering, Rangsit University

Year of Publication : 2019

Source : Rangsit University

No. of pages : 111 pages

Keywords : Maskless Photolithography, Microscopy, Photolithography, Optics

Copyrights : Rangsit University

### Abstract

The research entitled an instrumentation of optical microscopy projection for maskless photolithography aims to design and manufacture the optomechanical components for implementation of the optically microscopy systems. These components were designed on computer-aided design software and using G-code, which is a language for controlling a CNC operating machine. The 3-dimensional models of the components were manufactured by milling and shaping the aluminum alloy with the CNC machine. After the production, the optomechanical components were utilized for implementation of the optical microscope projection for maskless UV photolithography system. The significant device in the microscope was a digital-micromirror device (DMD) aligned as a patterning reflector instead of a photomask. Hence, this system could provide a flexibility in working, saving the cost of mask fabrication and saving time. In the experiment, we have created the patterns on the cover slip using a dry-film photoresist. Using FE-SEM and optical macrozoom, the micropatterning of grating was measured in micro-scale thickness, approximately 30  $\mu\text{m}$ , and its width at 68  $\mu\text{m}$ . This grating would be useful for the medical ultrasound detection further.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง “อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง (Instrumentation of Optical Microscopy Projection for Maskless Photolithography)” ดำเนินการวิจัยและพัฒนาโดยได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต ทางคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณทางมหาวิทยาลัยรังสิต ที่เล็งเห็นความสำคัญของการการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงทัศนูปกรณ์ เพื่อการออกแบบสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงรวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ยังสามารถนำไปใช้ในการวิจัยทางด้านแสงและการสร้างลวดลายต่างๆสำหรับไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ในทางการแพทย์ หรือเกรตติง ในการพัฒนาต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สำหรับการเรียนการสอนปฏิบัติการเครื่องมือทัศนศาสตร์ขั้นสูงและจุลทรรศน์ศาสตร์ได้อีกด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณ ผศ.ดร.นเรศวร์ พันธธรร ร่องอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยและการพัฒนาบุคลากร ผ่านทาง รศ.ดร.กานดา ว่องไวลิขิต ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยมหาวิทยาลัยรังสิต ในการช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ สนับสนุนการทำงานของบุคลากร ขอขอบพระคุณ รศ.นันทชัย ทองแป้น คณบดีวิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ ในด้านสิ่งอำนวยความสะดวก สาธารณูปโภคต่างๆ ของวิทยาลัย ทำให้เกิดความสะดวกในการทำงานมากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณศูนย์สังเคราะห์ภาพระดับนาโน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะผู้วิจัยในการสนับสนุนการทำงานของนักวิจัยให้ดำเนินการไปได้ด้วยดี

สื่อจิตต์ เพ็ชรประสาน และ คณะ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญตาราง/รูปภาพ

<b>บทที่ 1</b>	บทนำ	1
	ที่มาและความสำคัญ	1
	วัตถุประสงค์	4
	ขอบเขตของการศึกษา	5
	กรอบแนวคิดวิจัย	5
	นิยามศัพท์เฉพาะ	5
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2</b>	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	7
	อุปกรณ์ทางด้านแสงที่สูญปรกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์	7
	โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)	16
	โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์(Maskless photolithography)	22
	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง	24
	สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	33
<b>บทที่ 3</b>	ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	36
	ขั้นตอนการศึกษา ออกแบบ และ จำลองการออกแบบชิ้นงานโต๊ะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์	
	ขึ้นส่วนต่างๆ	37
	ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานโต๊ะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ขึ้นส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Mini	
	Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z	53
	ขั้นตอนการคำนวณและออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดย	
	ไม่ใช่โฟโตมาสก์	56
	ขั้นตอนการประกอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	62



## สารบัญ(ต่อ)

	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างลวดลายที่ฉายจากจอแอลซีดีและอุปกรณ์กระจก ขนาดไมครอน	62
	ทดสอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	62
	ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของการสร้างลวดลายด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์ สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	67
<b>บทที่ 4</b>	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	68
	ผลการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียงระบบทางเดินแสง	68
	ผลการสร้างทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	71
	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างลวดลายที่ฉายจากจอแอลซีดีและอุปกรณ์กระจก ขนาดไมครอน	76
	ผลการฉายภาพลวดลายลงบนกระจกอลูมิเนียมเพื่อทดสอบความแม่นยำของระบบ	78
	ผลการฉายสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงประเภทฟิล์มในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	79
	ผลการทำซ้ำการฉายสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงประเภทฟิล์มในกระบวนการโฟโตลิ โทกราฟีเพื่อทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพ โดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	85
<b>บทที่ 5</b>	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	88
	สรุปผลการวิจัย	88
	ตารางเปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับแผนการดำเนินการที่ตั้งไว้ (Gantt Chart)	89
	ข้อเสนอแนะ	90
<b>เอกสารอ้างอิง</b>		92
<b>ภาคผนวก</b>		
	สิทธิบัตร: กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช่ มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัลเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมครอน บทความวิจัยที่สืบเนื่องจากงานวิจัย: Widefield Microscope for Projection Maskless Micropattern in Photolithography Applications ภาพระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์ขณะทดลองฉายภาพ	

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในระบบโฟโตลิโทกราฟี	18
ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูปตัดाप	32
ตารางที่ 3 แสดงลักษณะของสารไวแสงชนิดบวกและลบ	34
ตารางที่ 4 ตารางแสดงขั้นตอนการวิจัย วิธีการวิจัย และ สถานที่วิจัย	36
ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมอัลลอยด์เบอร์ 5083	53
ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติและลักษณะของกล้องดิจิทัล แคนนอน รุ่น EOS 50D	59
ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน	61
ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติของสารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T	63
ตารางที่ 9 แสดงคุณสมบัติเลนส์ใกล้วัตถุ	73
ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความกว้าง ความยาวและระยะช่องของลวดลายเกรตติงที่สร้างด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์	86
ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะช่องในแนวนอนและระยะช่องในแนวตั้ง ของลวดลายวงกลมอาร์เรย์ที่สร้างด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์	86
ตารางที่ 12 ตารางแสดงแผนการดำเนินการวิจัย	89



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 อุปกรณ์พื้นฐานที่ห้องปฏิบัติการทางแสงทัศนูปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน	2
ภาพที่ 2 จากโต๊ะแสงสู่อุปกรณ์แสง UV-VIS Spectrometer	3
ภาพที่ 3 การเรียงอุปกรณ์แสงในงานวิจัย	3
ภาพที่ 4 แสดงภาพแผ่นวางอุปกรณ์แสง	8
ภาพที่ 5 แสดงแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ	9
ภาพที่ 6 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างกระจกธรรมดาและกระจกที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์	10
ภาพที่ 7 แสดงภาพตัวจับกระจกซึ่งสามารถปรับองศาของกระจกแบบละเอียดได้	11
ภาพที่ 8 แสดงขั้นตอนการทำเลนส์โดยวิธีการใช้เครื่องฝนและเจียรระโนตามวิธีมาตรฐาน	12
ภาพที่ 9 แสดงภาพตัวจับเลนส์	12
ภาพที่ 10 เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ที่จับเสา และ ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง	13
ภาพที่ 11 ตัวจับแผ่นโพลาริเซอร์ แผ่นครึ่งลูกคลื่น และ แผ่นโพลาริเซอร์วงกลม	14
ภาพที่ 12 ระบบชุดสาธิตที่มีการติดตั้งแผ่นอะเพเจอร์แบบ 2 รู เพื่อศึกษาการแทรกสอดของแสง	14
ภาพที่ 13 แสดงภาพตัวอย่างรูเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 $\mu\text{m}$	15
ภาพที่ 14 แผงหลอด LED เมื่อติดตั้งแผ่น diffuser ด้านหน้า	16
ภาพที่ 15 ระบบเลนส์ซูมที่ใช้ในการสร้างลำแสงขนาดในระบบโพโตลิโทกราฟี	18
ภาพที่ 16 การหักเหของแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่เปลี่ยนไป	19
ภาพที่ 17 แสดงลักษณะมาส์กแสงที่ใช้ในกระบวนการโพโตลิโทกราฟี	20
ภาพที่ 18 ความแตกต่างระหว่างสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ	21
ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างการวางทัศนูปกรณ์ที่อาศัยอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนมาช่วยในการสร้างลายของโฟโตมาร์ค	22
ภาพที่ 20 ก. แสดงส่วนประกอบชิ้นต่าง ๆ ของจอแอลซีดีและ ข. แสดงลักษณะแต่ละพิกเซลในชั้นผลึกเหลว	23
ภาพที่ 21 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องจักร miniCNC รุ่น BS10050Z	25
ภาพที่ 22 แสดงแนวการเคลื่อนที่ของเครื่อง miniCNC	25
ภาพที่ 23 ลักษณะดอกกัดเอ็นมิลด์ที่มีจำนวนฟันที่แตกต่างกัน	28
ภาพที่ 24 ลักษณะเอ็นมิลด์กัดหยาบ	28
ภาพที่ 25 ลักษณะบอลเอ็นมิลล์	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 26	ลักษณะดอกกั๊ดข้าง	29
ภาพที่ 27	ลักษณะดอกสว่าน	30
ภาพที่ 28	ลักษณะดอกตัดแปแต่ละชนิด	31
ภาพที่ 29	ลักษณะด้ามตัดแป ก. ด้ามตัดแปแบบตัวที่ ข. ด้ามตัดแปแบบปรับแต่งได้	31
ภาพที่ 30	แสดงการทำงานของสารไวแสงทั้งสองชนิด ได้แก่ สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ	34
ภาพที่ 31	แสดงสารไวแสงชนิดฟิล์ม	35
ภาพที่ 32	แสดงชิ้นงานโต๊ะแสงที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019	38
ภาพที่ 33	แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 20 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	39
ภาพที่ 34	แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 30 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	39
ภาพที่ 35	แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	40
ภาพที่ 36	แสดงชิ้นงานเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูง 50 และ 75 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019	40
ภาพที่ 37	แสดงชิ้นงานที่จับเสาความสูง 40 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	41
ภาพที่ 38	แสดงชิ้นงานที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่ออกแบบบนโปรแกรมSolidWorks	42
ภาพที่ 39	แสดงชิ้นงานอุปกรณ์จับกระจกออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	42
ภาพที่ 40	แสดงชิ้นงานที่จับเลนส์ใกล้วัตถุออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks	43
ภาพที่ 41	แสดงการบันทึกไฟล์ชิ้นงานบนโปรแกรม SolidWorks 2019 เป็นไฟล์ประเภท Parasolid Binary (*.x_b)	44
ภาพที่ 42	แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปแผ่นวางอุปกรณ์แสงบนโปรแกรมMastercam X5	45
ภาพที่ 43	ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 20 มิลลิเมตรและ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5	46
ภาพที่ 44	ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 30 มิลลิเมตร และ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5	47
ภาพที่ 45	ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 50 มิลลิเมตรและ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5	48

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 46 ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดชิ้นเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ และ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5	49
ภาพที่ 47 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร	50
ภาพที่ 48 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสงบนโปรแกรม MastercamX5	51
ภาพที่ 49 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดอุปกรณ์จับกระจกส่วนบน บนโปรแกรม Mastercam X5	51
ภาพที่ 50 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดอุปกรณ์จับกระจกส่วนล่าง บนโปรแกรม Mastercam X5	52
ภาพที่ 51 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดที่จับเลนส์แก้ววัตถุดิบโปรแกรม MastercamX5	52
ภาพที่ 52 แสดงหน้าต่างโปรแกรม Mach 3 ซึ่งควบคุมการทำงานของเครื่อง MiniCNC	55
ภาพที่ 53 การสร้างไฟล์คำสั่ง G-code ผ่านโปรแกรม Mastercam X5	55
ภาพที่ 54 แสดงทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก	56
ภาพที่ 55 ก. แสดงส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์โปรเจคเตอร์ฉายภาพ และ ข. แสดงลักษณะจอแอลซีดี	57
ภาพที่ 56 แสดงการทำงานของเลนส์กล้องจุลทรรศน์	58
ภาพที่ 57 แสดงลักษณะของตัวแยกแสง	59
ภาพที่ 58 กล้อง DHLR ที่ใช้เป็นส่วนบันทึกภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์	60
ภาพที่ 59 ระบบทางเดินแสงของกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก	60
ภาพที่ 60 ลักษณะของชิพอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน	61
ภาพที่ 61 แสดงภาพที่ใช้ในการทดสอบระบบ	63
ภาพที่ 62 แสดงการสร้างลวดลายวงจรรลงบนทองแดงด้วยสารไวแสงชนิดฟิล์ม	64
ภาพที่ 63 ก. แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่าน ข. แสดงภาพสไลด์ตัวอย่างที่ถ่ายจากกล้องโทรศัพท์ปกติ และ ค. แสดงภาพตัวอย่างสไลด์ที่ส่องดูผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4 เท่าและ 10 เท่า	66
ภาพที่ 64 ก. แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ข. แสดงภาพของหัวมดที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	66

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 65	แสดงแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	68
ภาพที่ 66	แสดงที่จับเลนส์ขนาดต่าง ๆ ที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	68
ภาพที่ 67	แสดงเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ ที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	69
ภาพที่ 68	แสดงที่จับเสาที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	69
ภาพที่ 69	แสดงที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	69
ภาพที่ 70	แสดงอุปกรณ์จับกระจกที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC	70
ภาพที่ 71	แสดงการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการใช้งานในการประกอบทางเดินแสง	71
ภาพที่ 72	ก. โปรแกรม Microsoft PowerPoint บนคอมพิวเตอร์ และ ข. ภาพบนโปรแกรม Microsoft PowerPoint ที่ฉายบนจอแอลซีดี	72
ภาพที่ 73	เลนส์ใกล้วัตถุประเภทสังยุคจำกัดที่มีกำลังขยาย 10 เท่า	72
ภาพที่ 74	แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม digiCamcontrol	73
ภาพที่ 75	แสดงการประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก	74
ภาพที่ 76	แสดงแสงจากระบบส่องสว่างแบบโคเลออร์ตกลบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน	74
ภาพที่ 77	แสดงหน้าต่างของแอปพลิเคชัน Keynote	75
ภาพที่ 78	แสดงการประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แทนโฟโตมาส์ก	76
ภาพที่ 79	ก. แสดงลักษณะของ USAF 1951 และ ข. ภาพถ่ายของ USAF 1951 ที่ถ่ายด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์	77
ภาพที่ 80	แสดงการเปรียบเทียบขนาดของเส้นตรงที่ฉายผ่านระบบทั้งสอง	77
ภาพที่ 81	แสดงผลการทดสอบการฉายภาพผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก ลงบนกระจกอลูมิเนียม ก. ภาพเส้นตรง ข. ภาพเกรตติง ค. ตัวหนังสือภาษาอังกฤษ “RS” และ ง. อารีย์วงกลม	78
ภาพที่ 82	ก. แสดงภาพเส้นตรงที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายเส้นตรงที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	79
ภาพที่ 83	ก. แสดงภาพเกรตติงที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายเกรตติงที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	79

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 84 ก. แสดงภาพตัวอักษรภาษาอังกฤษ “RS” ที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายตัวหนังสือภาษาอังกฤษ “RS” ที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	80
ภาพที่ 85 ก. แสดงภาพอาร์เรย์ของวงกลมที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายอาร์เรย์ของวงกลมที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	80
ภาพที่ 86 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. เส้นตรงต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายเส้นตรงที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	81
ภาพที่ 87 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. เกรตติงต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายเกรตติงที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	82
ภาพที่ 88 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. ตัวอักษรต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายตัวอักษรที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	83
ภาพที่ 89 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. อาร์เรย์วงกลมที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายตัวอาร์เรย์วงกลมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	84
ภาพที่ 90 แสดงภาพถ่ายความหนาของลวดลายจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	85
ภาพที่ 91 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบการวัดเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำของระบบ	85



## บทที่ 1

### บทนำ

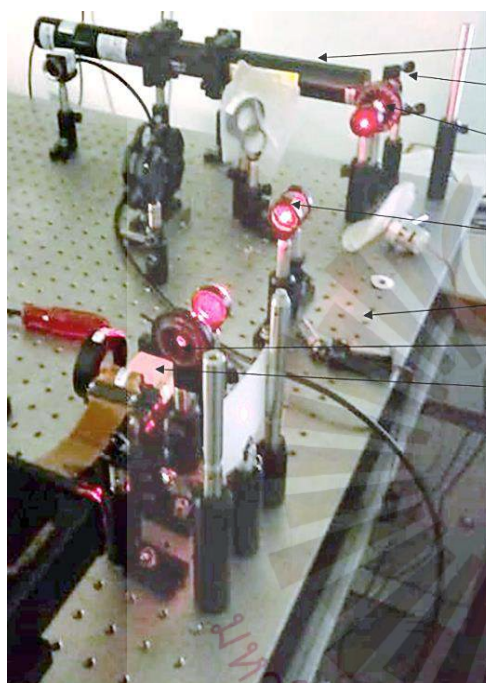
#### ที่มาและความสำคัญ

การวิจัยด้านแสงทัศนูปกรณ์ (Optics) และ จุลทรรศนศาสตร์ (Microscopy) เป็นพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญและถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายกับศาสตร์ในหลายแขนง 1) ด้านฟิสิกส์ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆของแสง เช่น การหักเห แทรกสอด เลี้ยวเบน ปรากฏการณ์คลื่น และ อนุภาคโฟตอนของแสง[1, 2] รวมถึงใช้ในการศึกษาด้านฟิสิกส์ขั้นสูง เช่น การค้นพบสนามแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Wave) ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ทฤษฎีสัมพัทธภาพของทฤษฎีสัมพัทธภาพ (theory of relativity) ของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ซึ่งพิสูจน์โดยการใช้เครื่องแทรกสอดของเลเซอร์แสงที่มีระยะ coherence length ที่ยาวกว่า 4 km [3, 4] เป็นต้น 2) ด้านเคมีใช้ในการศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนของโมเลกุลต่างๆ ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบและบ่งชี้สารต่างๆได้อย่างสเปกโตรสโคป ทำให้เกิดการสร้างอุปกรณ์สเปกโตรสโคปต่างๆ เช่น รามานสเปกโตรสโคป (Raman Spectroscope)[5] อินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Infrared Spectroscope)[6] และ อินฟราเรดฟูเรียลทรานสฟอร์มสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope : FTIR)[7] เป็นต้น 3) ด้านชีววิทยานั้นที่เห็นได้เด่นชัด คือ นวัตกรรมกล้องจุลทรรศน์ที่มีประวัติการพัฒนามาตั้งแต่ศตวรรษที่ 15 จนถึงปัจจุบันการสอนและงานวิจัยด้านนี้ก็ได้ล้ำสมัยลงเลยพิสูจน์ได้จากการได้รับรางวัลโนเบลด้านนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับกล้องจุลทรรศน์แสงในปี ค.ศ. 2014 ในผลงานที่มีชื่อว่า Stimulated emission depletion (STED) microscopy[8, 9] 4) การค้นคว้าวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์อื่นๆ เช่น แพทย์ศาสตร์[10] วัสดุศาสตร์[11] เกษศาสตร์[12] วิศวกรรมศาสตร์ต่างๆ เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยนั้นยังขาดแคลนแหล่งผลิตชิ้นส่วนแสงทัศนูปกรณ์ต่างๆ ไม่มีโรงงานผลิตเลนส์สำหรับวิทยาศาสตร์ จึงทำให้การออกแบบอุปกรณ์แสงต่างๆ เป็นไปได้ยากมาก จึงต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น สิงคโปร์ จีน เป็นต้น ซึ่งมีราคาสูงมาก ใช้เวลาในการสั่งซื้อนาน เสียค่าจัดส่ง และต้องดำเนินการด้านศุลกากรอีกด้วย ซึ่งทำให้ค่อนข้างยุ่งยากและต้องใช้งบประมาณสูง สำหรับในการวิจัยและพัฒนาทางด้านแสงทัศนูปกรณ์ และ จุลทรรศนศาสตร์ยังขาดผู้ที่สนใจศึกษาด้านนี้ เนื่องจากถ้าศึกษาด้านนี้จริงจิงจะต้องมีองค์ความรู้เฉพาะด้านอุปกรณ์ที่พร้อมใช้ในการทดลอง เช่น โต๊ะแสง (Optical bench) ซึ่งราคาสูงมาก เลนส์ต่างๆ และ อุปกรณ์จับเลนส์ (holder) และขาดแคลนผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญ ที่จะสามารถซ่อมบำรุง ดูแลรักษาให้อุปกรณ์ยังคงสภาพการใช้ เมื่อเครื่องมือเกิดการเสียหาย ก็จะต้องติดต่อให้บริษัทในต่างประเทศเข้ามาสำรวจตรวจสอบ และซ่อม เปลี่ยนอุปกรณ์ จึงทำให้



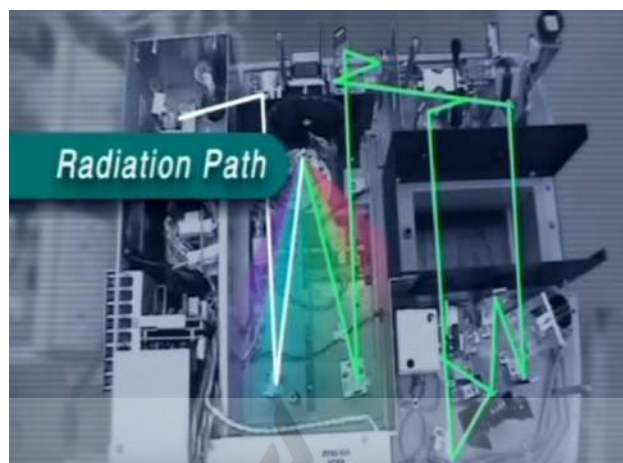
เสียทั้งเวลา และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ค่อนข้างสูง วิศวกรใช้งานที่สะสม ตลอดจนเกิดผลกระทบต่อ การเรียนการสอน และงานวิจัย ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ เครื่องมืออยู่ตลอดเวลา เพื่อยกตัวอย่างให้เห็นภาพง่าย ขึ้นผู้ลงทุนขอยกตัวอย่างภาพถ่ายอุปกรณ์พื้นฐานที่ห้องปฏิบัติการทางแสงทัศนูปกรณ์ที่ได้มาตรฐานใน ระดับที่มีความซับซ้อนต่ำที่สุดเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนสำคัญๆโดยสังเขป ณ ห้องปฏิบัติการทางแสงทัศนูปกรณ์ที่ ดร.สีจิตต์ เพ็ชรประสาน ดูแลที่มหาวิทยาลัยอ่องกงโพลีเทคนิค เขต ปกครองพิเศษอ่องกง ประเทศจีน



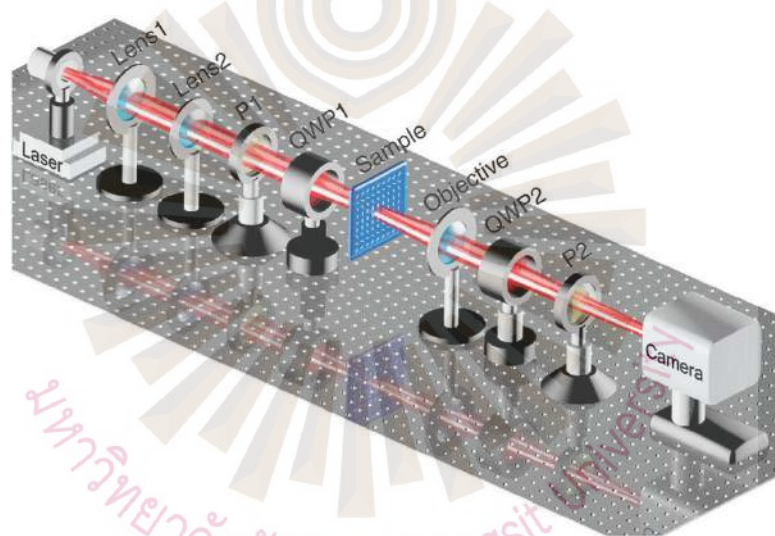
- แหล่งกำเนิดแสง + ตัวจับแหล่งกำเนิดแสง
- แผ่นกระจกวิทยาศาสตร์ และ ตัวจับที่ปรับมุมกระจกได้
- แผ่น waveplate, polarizer, filter ต่างๆ และ ที่จับแผ่น
- เลนส์ต่างๆ และ ตัวจับเลนส์
- โต๊ะแสง ที่มีรูสกรูขนาด M6 ทั่วแผ่น
- แผ่นโคอะแฟรมช่องแสงต่างๆ
- ปริซึม และ ตัวจับ

รูปที่ 1 อุปกรณ์พื้นฐานที่ห้องปฏิบัติการทางแสงทัศนูปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน

เมื่อวิศวกรได้ออกแบบเส้นทางแสงที่ทำหน้าที่ต่างๆแล้วก็จะทำการออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมต่างๆ และ เมื่อเปิดอุปกรณ์แสงเหล่านั้นดูก็จะพบว่าคล้ายคลึงกับโต๊ะแสงเป็นอย่างดังที่ได้ยก UV-Vis spectrometer มาเป็นตัวอย่าง ดังที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวแยกแสง เลนส์รวมแสง กระจกหักเหแสง และอุปกรณ์ตัวตรวจจับ ประกอบรวมกันในเครื่องเดียว ดังนั้นโต๊ะแสงสำหรับจัดเรียงอุปกรณ์แสง จึงมีความจำเป็นอย่างมากใน ขั้นตอนของการเรียนการสอน และการวิจัยทางด้านแสงทัศนูปกรณ์ สำหรับงานวิจัยเชิงลึกที่มีความ ซับซ้อนดังแสดงการจัดเรียงอุปกรณ์แสง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 จากโต๊ะแสงสุ่อุปกรณ์แสง UV-VIS Spectrometer [13]



รูปที่ 3 การเรียงอุปกรณ์แสงในงานวิจัย [14]

ในการนำองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรม มาใช้ในการพัฒนาการผลิต การวิเคราะห์ โดยเฉพาะในทางการแพทย์ ได้มีการคิดค้นพัฒนาเซนเซอร์เพื่อนำมาใช้ในการตรวจรักษา และวินิจฉัยโรคทางการแพทย์มากมาย แต่กระบวนการในการผลิตไบโอเซนเซอร์ต้องอาศัยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี เป็นหนึ่งในกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อสร้างลวดลายในอุปกรณ์เซนเซอร์ โดยการใช้แสงมาช่วยในการสร้างลวดลายวงจรที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมครอน โดยการใช้แสงมาช่วยในการส่งข้อมูลลวดลายจากลวดลายต้นแบบที่อยู่บนโฟโตมาส์กไปยังบนวัสดุแผ่นรองรับที่เราต้องการ

เทคนิคโฟโตลิโทกราฟีสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเซนเซอร์ รวมถึงไมโครชาแนล และเกรตติง ซึ่งปัจจุบันโฟโตมาสก์ที่นำมาใช้นั้นมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูง รวมถึงเมื่อมีการออกแบบลวดลายใหม่ๆ จะต้องมีการผลิตมาสก์ต้นแบบทุกครั้ง ดังนั้นในพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์ชุดตรวจไบโอเซนเซอร์ เซนเซอร์ หรือไมโครชาแนล จึงมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และเพิ่มระยะเวลาในการทำงานที่มากขึ้น ต้องอาศัยเครื่องมือที่ซับซ้อนสร้างขึ้นในห้องสะอาด ด้วยข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ ผู้วิจัย จึงทำการออกแบบเพื่อผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ เพื่อใช้ในการสร้างระบบกล้อง และได้แสดงการประยุกต์ใช้ทัศนูปกรณ์ในการสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) โดยไม่ใช้มาสก์แสง (Photomask) ทางผู้วิจัยจะผลิตในส่วนของชิ้นงานทัศนูปกรณ์ ยึดจับเลนส์ โครงสร้างของระบบกล้อง และการจัดเรียงระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพลวดลายตามหลักการทางทัศนศาสตร์ โดยทำการออกแบบชิ้นงานก่อนการเจาะและแสดงแบบจำลองด้วยโปรแกรม Mastercam X5 ทำการแปลงออกคำสั่ง G-code และควบคุมการสั่งการเครื่องด้วยโปรแกรม Mach 3 ชิ้นงานจะขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC (Computer Numerical Controlled) ซึ่งมีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการวิจัยชีวฟิสิกส์และทัศนศาสตร์การแพทย์ วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิตซึ่งเป็นเครื่องกลึง CNC ที่มี 5 แกน ผลิตชิ้นส่วนโดยใช้วัสดุ เช่น ไม้พาสวูด อะคริลิก และอลูมิเนียมอัลลอยด์ ชิ้นงานต่างๆ ที่ผลิตขึ้นได้แก่ โครงสร้างหลักของอุปกรณ์ เบริดบอร์ดทางแสง (Optical breadboard) อุปกรณ์จับเลนส์ ตัวจับชิ้นงาน (Holder) และประกอบเป็นระบบ แสดงการฉายภาพที่ต้องการได้ด้วยการสร้างลวดลายจาก อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน (Digital Mirror Microdevice, DMD) ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ฉายผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ ลงบนวัสดุที่ต้องการ คาดว่าอุปกรณ์นี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อการวิจัยและศึกษาทางด้านแสง ทัศนูปกรณ์ และการสร้างเซนเซอร์ทางการแพทย์ต่อไป

### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและผลิตทัศนูปกรณ์สำหรับใช้ในการทำวิจัยและปฏิบัติการด้านแสงและจุลทรรศน์ศาสตร์
2. เพื่อพัฒนาและสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) โดยไม่ใช้มาสก์แสง (Photomask) โดยการใช้ทัศนูปกรณ์ที่ผลิตขึ้น
3. เพื่อผลิตทัศนูปกรณ์ที่ใช้ในงานเฉพาะทางและการออกแบบระบบเซนเซอร์ชนิดใหม่ ซึ่งเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

## ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตของการวิจัยเรียงตามลำดับความสำคัญ ดังนี้

1. ศึกษา ออกแบบ และ จำลองการออกแบบชิ้นงานโต๊ะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ตามมาตรฐานของอุปกรณ์ทางด้านแสงทัศนูปกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์ โดยการออกแบบผ่านโปรแกรม Mastercam X5 และสร้างอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยการใช้เครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (miniCNC) รุ่น BS10050Z
2. การทดสอบระบบของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพเป็นการสร้างภาพที่มีลักษณะต่างๆ ได้แก่ เส้นตรง เกรตติง ตัวอักษร และอาเรียเกรตติง ที่สร้างบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนและฉายลงบนโพลีเมอร์ที่สามารถเร่งแข็งได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
3. วัดขนาดของภาพที่ฉายลงบนโพลีเมอร์ที่สามารถเร่งแข็งได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยการนำโครงสร้างที่สามารถสร้างได้นำไปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## กรอบแนวคิดการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์ชิ้นงานซึ่งเกิดจากความขาดแคลนเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับใช้ในทำวิจัยและปฏิบัติการทางด้านแสง ทัศนูปกรณ์ และ จุลทรรศน์ศาสตร์ ซึ่งในการสร้างชิ้นงานอย่างระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพสำหรับระบบโฟโตลิโทกราฟี หรือระบบกล้องชนิดอื่นที่ได้ออกแบบขึ้นมา เป็นระบบเฉพาะทาง จำเป็นต้องทดลองจัดเรียงเส้นทางเดินของแสงก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นชุดอุปกรณ์ โดยทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาชิ้นงานสำหรับออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานของอุปกรณ์ตามที่ได้บททวน และแสดงให้เห็นในข้างต้น และทำการจำลองการทำงานก่อนขึ้นรูปจริง และควบคุมการเจาะ กัด ตีแป และกลึงโดยผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ถูกต้อง ในส่วนของการประยุกต์ใช้ชิ้นงานจะแสดงการสร้างระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพ (Projection microscope) จากอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนเพื่อใช้ในระบบหลักของเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีเพื่อใช้ในการวิจัยและสร้างลวดลายบนวัสดุรองรับต่อไป

## นิยามศัพท์เฉพาะ

โฟโตลิโทกราฟีเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการสร้างลวดลายต่าง ๆ โดยการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตผ่านมาสก์ลงไปยังแผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง

ระบบโฟโตลิโทกราฟี หมายถึง ระบบทางเดินแสงที่ใช้ในการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตลงผ่านมาสก์ไปยังแผ่นรองรับ



โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ คือ ระบบทางเดินแสงที่ใช้ในการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตลงไปยังแผ่นรองรับโดยไม่ใช้มาสก์แสงเป็นต้นแบบในการสร้างลวดลาย

สารไวแสง พอลิเมอร์ที่สามารถถูกทำให้ละลายตัวหรือแข็งตัวเมื่อถูกฉายด้วยแสงมีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต

มาสก์ คือ แผ่นบางที่บวมที่มีการเจาะรูตามรูปแบบหรือลวดลายที่ต้องการพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ

แผ่นรองรับหรือเวเฟอร์ คือ แผ่นโลหะกึ่งตัวนำหรือวัสดุบางที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงที่ต้องการพิมพ์ลายลงไปผ่านการฉายแสงที่ถูกไว้ปลายทางของแสง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ต่างๆในการผลิตโตะแสงที่มีขนาดและการใช้งานตามมาตรฐาน และอุปกรณ์ตัวจับต่างๆ ด้วยเครื่อง CNC
2. สามารถผลิตอุปกรณ์แสงต่างๆใช้เองได้ภายในมหาวิทยาลัย ลดค่าใช้จ่าย และ การนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก ลดการสูญเสียงบประมาณ
3. สามารถประกอบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพในระบบต้นแบบได้
4. ได้อุปกรณ์ชุดทดลองปฏิบัติการด้านแสงและทัศนูปกรณ์ ที่สามารถใช้ในการศึกษา
5. สิทธิบัตร หรือ อนุสิทธิบัตร กล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพในระบบต้นแบบ หรือ ชุดทดลองปฏิบัติการด้านแสงและทัศนูปกรณ์
6. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่ต้องการของตลาด
7. ตีพิมพ์ผลงานจากผลการศึกษาวิจัยของระบบต้นแบบ หรือ ชุดทดลองปฏิบัติการด้านแสงและทัศนูปกรณ์
8. สามารถใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์สร้างระบบ หรือ เทคนิคใหม่ๆ ในการทำวิจัยทางด้าน Optics และตีพิมพ์ผลงานในระดับนานาชาติต่อไปได้
9. สามารถสร้างองค์ความรู้เพื่อการผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์ เพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ หากมีบุคลากรงานช่างที่เพียงพอและมีการระดมทุนเพื่อจัดตั้งโรงงานในอนาคตได้

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทางที่มิวิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมตามหัวข้อต่างๆ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการทำโครงการนี้ โดยแบ่งเป็นประเด็นคำถามวิจัยสำคัญต่างๆ ดังนี้

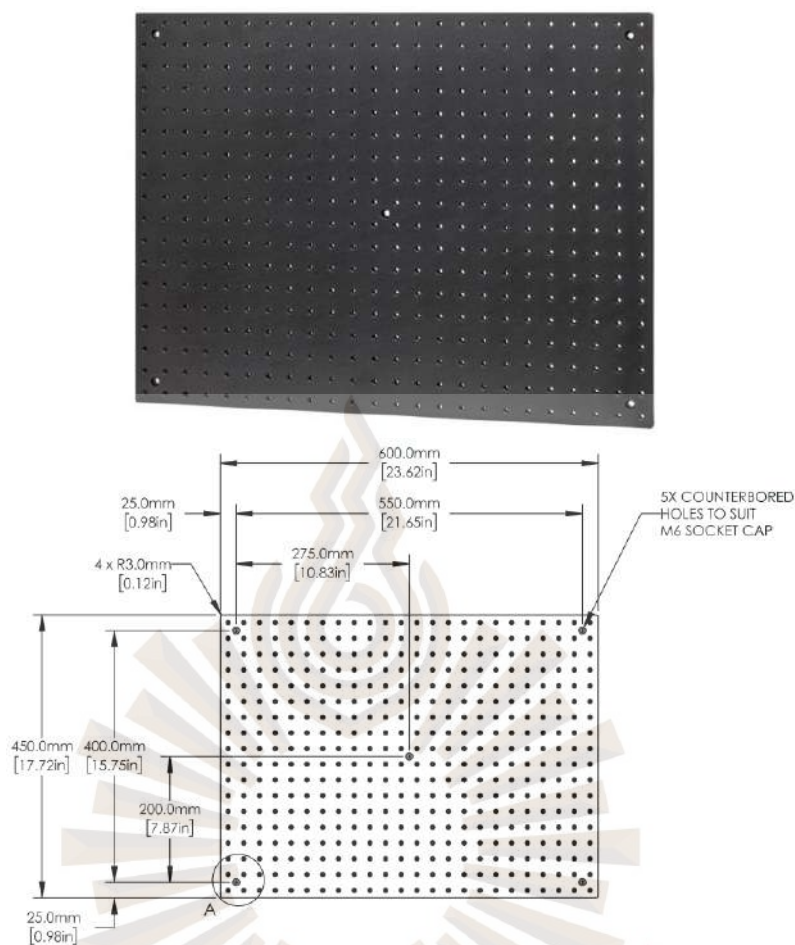
1. อุปกรณ์ทางด้านแสงทัศนูปกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์
2. โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)
3. โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ (Maskless photolithography)
4. การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง
5. สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

#### 1. อุปกรณ์ทางด้านแสงทัศนูปกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์

โครงการวิจัยนี้เน้นด้านการออกแบบและการผลิตชิ้นงานอุปกรณ์ต่างๆทางด้านแสงและทัศนูปกรณ์โดยที่ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงวิธีการผลิตอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1.1. โต๊ะแสง (Optical table) หรือ แผ่นวางอุปกรณ์แสง (Optical breadboard) โดยมากจะเป็นแผ่นรูสกรูขนาด M6 ทัวทั้งแผ่นซึ่งแต่ละรูอยู่ห่างกัน 25 mm ทั้งในแนวแกน x และ แกน y ดังที่แสดงในรูปที่ 4 กระบวนการผลิตแผ่นวางอุปกรณ์แสงนั้นจะต้องใช้วัสดุมาตรฐานคือใช้ วัสดุอลูมิเนียมอัลลอยด์เบอร์ 5083 ซึ่งมีความหนาแน่นสูง คือ 2,650 กิโลกรัม/ลบ.ม. สามารถรับน้ำหนักได้มาก หรือ โลหะสแตนเลส ซึ่งมีราคาที่สูงเกินไป ที่ตัดมาตามขนาดที่ต้องการ ผ่านการปรับให้พื้นผิวให้เรียบด้วยการใช้ laser treatment จากนั้นจึงเอาเข้าเครื่องเจาะ เจาะไปที่ละ 1 รู และ ต๊าปเกลียว M6 ที่ละ 1 รูเช่นกัน มีการทำแชมเฟอร์กััดให้เรียบไม่บาดมือ ซึ่งในต่างประเทศการสร้างอุปกรณ์เหล่านี้เป็นลักษณะ work station อย่างสิทธิบัตร เลขที่ US 2002/0021502 A1 ขึ้นทะเบียนเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2002 และ สิทธิบัตรเลขที่ GB2365991A ขึ้นทะเบียนเมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2002 โดยมีโครงสร้างเหล็กเชื่อมต่อ 4 ขา เป็นส่วนของโต๊ะ และวางแผนเบรตบอร์ด ที่จะใช้ทำงานด้านบน โต๊ะแสงจะใช้โครงเหล็กเชื่อมติดกัน 4 ขา วางระบบกันสั่นสะเทือนด้วย





รูปที่ 4 แสดงภาพแผ่นวางอุปกรณ์แสง [15]

1.2. แหล่งกำเนิดแสง (Light sources) ในทางด้านแสงทัศนูปกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์ได้มีการนำแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ มาใช้ในการออกแบบและสร้างระบบทางเดินแสง โดยการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง มักจะเลือกจากประเภทความเป็น Coherence[16,17] และ Incoherence[16] ความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ความสว่างและพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นต้น

1.2.1. ความเป็น Coherence และ Incoherence ของแสงจะเกี่ยวกับลักษณะของหน้าคลื่นของแสง ถ้าหน้าคลื่นของแสงทั้งหมดเรียงขนานกันและแสงสามารถเดินทางไปยังระยะทางที่ไกลมากได้ เราจะเรียกว่าแสงขนาน (Collimated source) ซึ่งเราสามารถหาความเป็นแสงขนานได้จากความยาวโคฮีเรนซ์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$L = \frac{c}{n\Delta\nu} = \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi n} \frac{\text{Lampda}}{\Delta \text{Lampda}}}$$

สมการที่ 1

โดยที่  $L$  คือ ความยาวโคฮีเรนต์ ในหน่วย เมตร หรือ นาโนเมตร

$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 299,792,458 เมตร/วินาที

$n$  คือ ค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่แสงเดินทาง

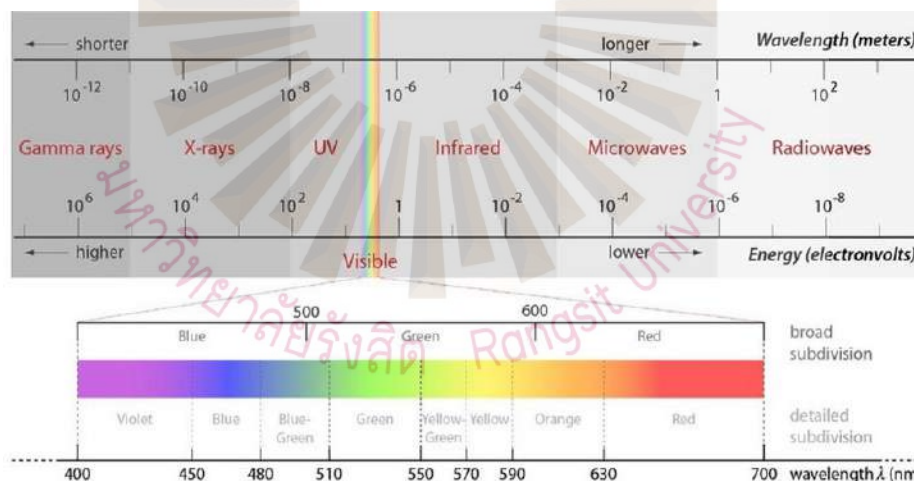
$\Delta\nu$  คือ ผลต่างของความถี่แสงสูงสุด และ ความถี่แสงต่ำสุด ในหน่วย เฮิรต

$\lambda c$  คือ ค่าความยาวคลื่นเฉลี่ยของแหล่งกำเนิดแสง หรือ ค่ากลางของความยาวคลื่น (Central wavelength) ในหน่วยเมตรหรือนาโนเมตร

$\Delta\lambda_0$  คือ ผลต่างความยาวคลื่นสูงสุดและความยาวคลื่นต่ำสุด ในหน่วยเมตรหรือนาโนเมตร

[18]

1.2.2. ความยาวคลื่นของแสง แสงเป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่มีความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ คือ ตั้งแต่ 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ [19]

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าแสงที่คนเราสามารถมองเห็นจะมีตั้งแต่สีแดงที่มีความยาวคลื่นยาวจนถึงสีม่วงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า ในการเรียงแสงของแต่ละระบบก็จะมีการเลือกแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีการใช้แสงในช่วงของรังสี

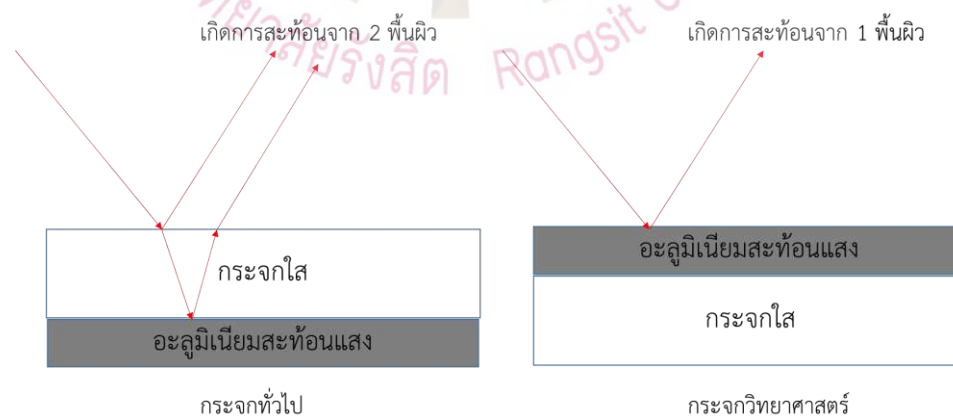
อัลตราไวโอเล็ตหรือเรียกว่า ยูวี เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยากับสารไวแสง ในขณะที่กระบวนการเตรียมตัวอย่างหรือแผ่นรองรับในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีนิยมทำในบริเวณที่มีแสงที่เหลือง โดยการใส่แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงสีเหลือง เพื่อป้องกันไม่ให้สารไวแสงทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม เป็นต้น

1.2.3. ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีหน่วยเป็นลูเมน (Lumen,lm) ซึ่งจะสัมพันธ์กับกำลังหรือจำนวนวัตต์ที่หลอดไฟใช้เพื่อให้เกิดแสงสว่าง โดยปกติค่าความสว่างและกำลังวัตต์จะระบุไว้ที่บรรจุภัณฑ์ของหลอดไฟ

1.2.4. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสง เกิดจากกระบวนการในการสร้างแสงสว่างของหลอดไฟ เช่น หลอดไฟประเภททังสแตนหรือหลอดไส้ ใช้กระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านไส้หลอดทำให้เกิดความร้อนสูงถึง 500 องศาเซลเซียส หลอดไฟจึงจะเริ่มเปล่งแสงออกมาพร้อมๆ กับความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นต้น

1.3. ตัวจับแหล่งกำเนิดแสง (Light source holder) สามารถกลึงได้ด้วยเครื่องกลึง CNC เพื่อให้สามารถจับกับแหล่งกำเนิดแสงได้ เช่น เลเซอร์ หรือหลอดไฟประเภทต่าง ๆ เช่น หลอดไฟแอลอีดีหรือหลอดแสงจันทร์ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันไปการออกแบบตัวจับแหล่งกำเนิดแสงขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของแหล่งกำเนิดแสง เป็นต้น

1.4. แผ่นกระจกวิทยาศาสตร์ (Scientific grade mirror) สามารถสร้างได้จากการเคลือบกระจกใสด้วยอะลูมิเนียม ความแตกต่างระหว่างแผ่นกระจกธรรมดาและแผ่นกระจกวิทยาศาสตร์ คือ ด้านของการสะท้อนจะอยู่บนตัวกระจก ไม่ใช่ใต้แผ่นกระจก ถ้าแนวสะท้อนอยู่ใต้แผ่นกระจกจะทำให้แสงตกกระทบเกิดการสะท้อนจาก 2 พื้นผิวได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งกระจกวิทยาศาสตร์นั้นสามารถสร้างได้โดยการเคลือบกระจกใสด้วยอะลูมิเนียมบางโดยใช้เทคนิคการเคลือบ เช่น sputter coating หรือ thermal evaporator เป็นต้น



รูปที่ 6 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างกระจกธรรมดาและกระจกที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

1.6. อุปกรณ์จับกระจกซึ่งสามารถปรับองศาการเบน (Kinematic mirror mount) ของแสงเพื่อจัดเรียงแสงได้ อุปกรณ์ดังกล่าวเป็นดังรูปที่แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะมีสกรูหมุนอยู่ด้านหลัง 2 แกนสามารถใช้ในการปรับทิศทางของกระจกได้ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างได้โดยใช้เครื่องกลึง CNC เช่นกัน



รูปที่ 7 แสดงภาพตัวจับกระจกซึ่งสามารถปรับองศาของกระจกแบบละเอียดได้ [20]

1.7. เลนส์ (Lens) ต่างๆทางวิทยาศาสตร์นั้นจะต้องเป็นเลนส์ที่คำนวณมาอย่างดีเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนต่างๆ (Aberrations) และถูกเจียรระโนและวัดค่าดัชนีหักเหอย่างดี อีกทั้งมีการเคลือบสาร Anti-reflective มาด้วย[21, 22] จึงทำให้ราคาสูง ขั้นตอนในการผลิตเลนส์ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถวาดเป็นภาพขั้นตอนได้ดังรูปที่ 8

- ตัดแก้วที่มีดัชนีหักเหตามที่ต้องการมาให้เป็นวงกลมกระบอกให้ขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเลนส์ที่ต้องการ
- นำแก้วมาเข้าเครื่องเจียรระโนแก้ว ให้ได้รัศมีความโค้ง และ ความหนาตามที่ต้องการ
- ทำการขัดหน้าเลนส์ด้วยสารอลูมิเนียมออกไซด์ จนกว่าจะเรียบและใส
- ทำการวัดความเรียบของพื้นผิว และ รอยขีดข่วนต่างๆว่าได้มาตรฐาน หรือไม่
- ทำการเคลือบด้วยสาร Anti-reflective coating เช่น  $MgF_2$  โดยการใช้ Thermal evaporator หรือ Sputtering coater
- ทำการทดสอบคุณสมบัติทางแสงของชั้นที่เคลือบ
- ทำการทดสอบคุณสมบัติทางแสงด้วยอุปกรณ์แทรกสอดของแสง หรือ กล้องจุลทรรศน์





รูปที่ 8 แสดงขั้นตอนการทำเลนส์โดยวิธีการใช้เครื่องฝนและเจียรระโนตามวิธีมาตรฐาน

1.8. ตัวจับเลนส์ (Lens Mount) เป็นอุปกรณ์ที่ใส่เลนส์เข้าไปแล้วมีเกลียวสกรูขนาดตามขนาดของเลนส์ในทางแสงมักจะใช้ 1 นิ้ว และเป็นเกลียว SM1 หมุนเพื่อล็อกเลนส์ให้ได้ศูนย์กลางดังรูปที่ 9 ซึ่งเครื่องกลึง CNC ที่มีนั้นสามารถต๊าปเกลียวในขนาด SM1 ได้ และ เกลียวนอกที่เป็นวงแหวนล็อกสามารถทำได้โดยการต๊าปมือด้วยเครื่องต๊าปเกลียวนอกซึ่งมีอยู่ที่ห้องปฏิบัติการฯ



รูปที่ 9 แสดงภาพตัวจับเลนส์ [23]

1.9. เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ที่จับเสา และ ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง (base, post, post holder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดดังกล่าวนี้สามารถผลิตโดยใช้เครื่องกลึง CNC ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการได้



รูปที่ 10 เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ที่จับเสา และ ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง [24]

1.10. แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) สามารถสร้างได้จากการติดแผ่นฟิล์มโพลาไรเซอร์ [25] ลงบนแผ่นแก้ว coverslip ขนาด 1 นิ้ว รีดให้แผ่นฟิล์มให้เรียบก็จะสามารถใช้เป็น Polarizer สำหรับอุปกรณ์แสงได้

1.11. แผ่นครึ่งลูกคลื่น (half wave plate:  $1/2 \lambda$ ) และ แผ่นโพลาไรเซอร์วงกลม หรือ เรียกอีกชื่อว่าแผ่นคลื่นควอเตอร์ (circular polarizer or quarter wave plate:  $1/4 \lambda$ ) ในลักษณะเดียวกับแผ่นโพลาไรเซอร์ สามารถสั่งซื้อแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ [26] ขนาดใหญ่มาใส่วงแหวน 1 นิ้ว เพื่อใส่กับที่จับในทางอุปกรณ์แสงโดยปกติแล้วแผ่นพอลิเมอร์เหล่านี้นิยมนำไปใช้ในการผลิตแว่นตาสามมิติในอุตสาหกรรมภาพยนตร์ทำให้มีราคาถูก

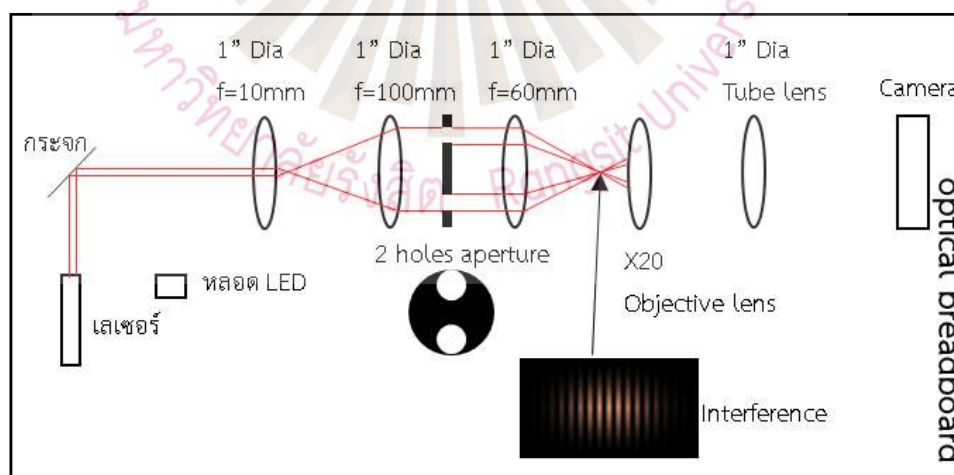


1.12. ตัวจับแผ่นโพลาริเซอร์ แผ่นครึ่งลูกคลื่น และ แผ่นโพลาริเซอร์วงกลม นั้นมีลักษณะเหมือนอย่างหนึ่ง คือ เมื่อติดตั้งแผ่นโพลาริเซอร์เข้าไปแล้วจะต้องหมุนองศาที่ตั้งที่แสดงในรูป 11 เช่นเดียวกับอุปกรณ์จับสำหรับอุปกรณ์อื่นสามารถกลิ้งได้ด้วยเครื่องกลึง CNC



รูป 11 แสดงภาพตัวจับแผ่นโพลาริเซอร์ แผ่นครึ่งลูกคลื่น และ แผ่นโพลาริเซอร์วงกลม [27]

1.11. แผ่นอะเพเจอร์ (Aperture) แผ่นอุปกรณ์ที่ทำให้แสงผ่านแผ่นแก้วที่อนุญาตให้แสงบางช่วงผ่านได้ และ บางช่วงผ่านไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นอะเพเจอร์ที่มี 2 รู สำหรับการศึกษการแทรกสอดของแสง ดังที่แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ระบบชุดสาธิตที่มีการติดตั้งแผ่นอะเพเจอร์แบบ 2 รู เพื่อศึกษการแทรกสอดของแสง

จากภาพในระบบที่ 12 แผ่นอะเพเจอร์แบบ 2 รู นั้นถูกใช้เพื่อแยกแสงเลเซอร์ที่ขยายขนาดลำแสงแล้วเป็น 2 ช่องแสงเพื่อนำมารวมกันให้เกิดการแทรกสอดตรงตำแหน่งที่ระบุไว้ และมีเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และ เลนส์หลอด (Tube lens) ซึ่งเป็นระบบขยายภาพและฉายภาพการแทรกสอดไปยังกล้อง หรือ ฉากที่อยู่ด้านหลัง แผ่นอะเพเจอร์ (Aperture) สามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ 1 การเจาะแผ่นพลาสติก หรือ แผ่นโลหะต้นให้เป็น หรือ การติดสติกเกอร์สีดำลงบนแผ่นแก้วให้เกิดลักษณะแนวทางแสงที่ต้องการ

1.12. แผ่นรูเข็ม (Pinhole) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อย่างกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอล ทำให้เกิดภาพในลักษณะที่ให้ความละเอียดภาพดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้าง และ ยังใช้ในการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงแบบที่ไม่เป็นโคฮีเรนต์ให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นโคฮีเรนต์โดยการโฟกัสแสงผ่านรูเข็มอีกด้วย รูเข็มทางวิทยาศาสตร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่  $1\mu\text{m}$  ไปจนถึง  $1\text{mm}$  ดังที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งถ้าเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่  $0.3\text{ mm}$  ถึง  $1\text{ mm}$  สามารถสร้างได้จากการใช้ดอกสว่านเจาะด้วยความเร็วรอบต่ำ ถ้าขนาดเล็กกว่านั้นจะต้องใช้เข็มสำหรับเซลล์ที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ  $90\mu\text{m}$  ถ้าจะสร้างให้เล็กกว่านั้นเท่ากับมาตรฐานสากลต้องนำวิธี lithography ของแสงมาใช้ โครงการนี้จะเน้นด้วยการเจาะด้วยสว่านขนาดประมาณ  $0.5\text{mm}$  เพื่อใช้ในการสาธิตคุณสมบัติของแสงเมื่อผ่านรูเข็ม

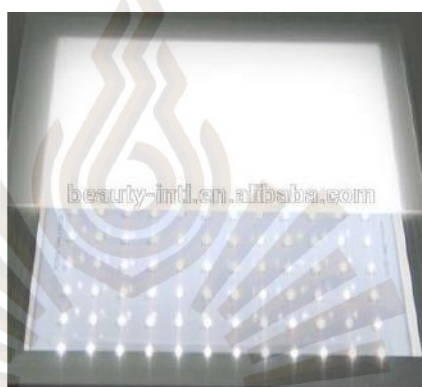


รูปที่ 13 แสดงภาพตัวอย่างรูเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง  $50\mu\text{m}$  ซึ่งสร้างจาก laser lithography [28]

1.13. แผ่นลดแสง (Neutral density filter) นำ ND2 ND4 ND6 ที่สามารถหาซื้อได้จากร้านถ่ายภาพมาประยุกต์ใช้ทำที่จับอุปกรณ์ [29]

1.14. แผ่นกรองสี (Color filter) เช่นเดียวกับแผ่นลดแสงสามารถนำอุปกรณ์ของกล้องถ่ายภาพมาประยุกต์ใช้ได้โดยต้องศึกษาหาข้อมูลว่าสามารถตัดทอนแสงในช่วงที่ต้องการได้หรือไม่ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

1.15. แผ่น diffuser คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำลายความเป็นโคฮีเรนต์ของเลเซอร์ หรือ เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงกระจายแสงได้อย่างสม่ำเสมอเช่นที่แสดงในรูปที่ 14 แผ่น diffuser มีหลายเบอร์แบ่งตามความหยาบของผิว คือ 120, 220, 600 และ 1500 Grit ยิ่งค่า Grit สูงจะยิ่งมีความหยาบน้อย วิธีการผลิต คือ ชัดแผ่นแก้วที่ใสทั้ง 2 ให้ด้านใดด้านหนึ่งเกิดผิวหยาบขึ้นโดยการขัดหน้าแก้ว



รูปที่ 14 แผงหลอด LED เมื่อติดตั้งแผ่น diffuser ด้านหน้า [25]

1.16. เกรตติง (grating) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญของอุปกรณ์แสงสามารถใช้ในการแบ่งแยกสีและความถี่ต่างๆของแสงได้ดี เกรตติงนั้นมีหลายแบบและหลายรูปร่างโดยมากสร้างจากเทคนิคยูวีลิโทกราฟี (UV lithography) [17, 21] ซึ่งอยู่ในโครงการวิจัยหลักที่ต้องการสร้างอุปกรณ์สำหรับเครื่องดังกล่าว เพื่อสามารถที่จะใช้งานสร้างเกรตติงรูปแบบต่างๆด้วย เทคนิคยูวีลิโทกราฟี ในอนาคตอันใกล้สำหรับโครงการวิจัยนี้ สำหรับกรณีที่คาบของเกรตติงไม่เล็กจนเกินไปสามารถสร้างได้โดยการเจียรระโนแผ่นแก้วด้วยเครื่องกลึงทำให้เกิดรอยเส้นเป็นคาบตามที่ต้องการได้

## 2. โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หรือ ออปติคอลลิโทกราฟี (Optical lithography)

โฟโตลิโทกราฟี เป็นกระบวนการที่บทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมโลหะกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการการพิมพ์ลายวงจรที่ทำให้เกิดการลดขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากในอดีตมีขนาด 50 ไมครอนจนปัจจุบันเหลือเพียง 14 นาโนเมตร โดยอาศัยหลักการกระจายและการหักเหของแสงในระบบโฟโตลิโทกราฟี กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มีแนวคิดเดียวกับการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์

กล่าวคือเป็นสารสร้างลวดลายลงบนแผ่นรองรับที่ผ่านการออกแบบบนมาสก์แล้วฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของระบบผ่านมาร์คเพื่อให้เกิดภาพและลวดลายบนแผ่นรองรับ ประเภทของโฟโตลิโทกราฟีมีหลายประเภท สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดพลังงานในระบบได้ดังนี้

1. ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นสั้น เป็นกระบวนการที่ใช้ในการย้ายรูปแบบที่ถูกออกแบบบนมาสก์ไปยังฟิล์มพอลิเมอร์ โดยการใชแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตส่องผ่านมาสก์ไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งวิธีนี้จะสามารถสร้างรูปร่างที่มีขนาดเล็กได้ถึง 1 ไมครอน กระบวนการนี้สามารถถูกพัฒนาให้มีความละเอียดมากขึ้นได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลง

2. ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซเรย์ ในห้องปฏิบัติการหลาย ๆ ที่ได้มีการมีการแทนที่ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นสั้นด้วยระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซเรย์ เป็นระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงอังสตรอมน้อย ๆ ในการฉายแสงให้กับระบบ วิธีนี้สามารถสร้างรูปร่างที่มีขนาดเล็กถึง 0.02 ไมครอนและเป็นระบบที่มีราคาสูง

3. ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน เป็นระบบที่มีการพัฒนามาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ระบบที่คล้ายคลึงกับระบบของกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นระบบที่มีราคาสูงมาก เป็นระบบที่ใช้หลักการฉายภาพใช้ในการสร้างโฟโตมาสก์

4. ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ลำแสงของไอออน ระบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะให้ความละเอียดที่สูงกว่า ระบบจะมีความคล้ายคลึงกับระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดแสงของระบบ

ซึ่งระบบที่นักศึกษาจะทำการพัฒนา คือ ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นสั้น เพราะเป็นระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและไม่มีอันตราย

#### 2.1. องค์ประกอบในระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นสั้น

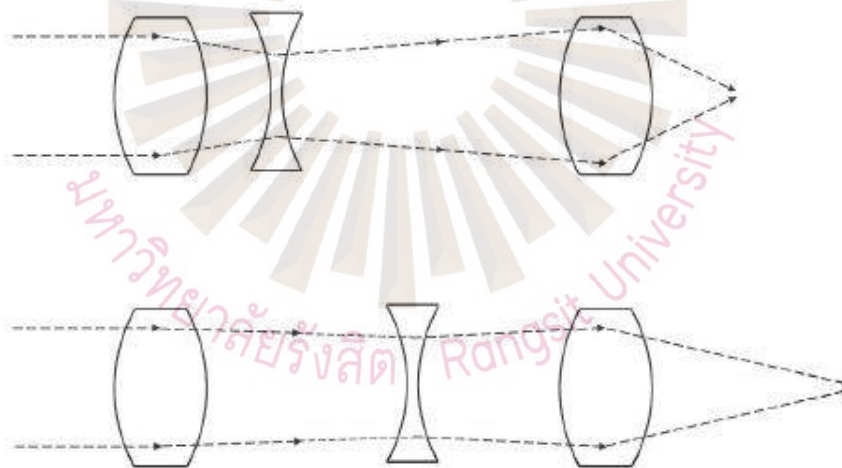
ระบบโฟโตลิโทกราฟีมีส่วนประกอบสำคัญที่เป็นระบบย่อย ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงของระบบ ระบบเลนส์สำหรับทางเดินแสง ระบบเลนส์สำหรับลดขนาดภาพและมาสก์

2.1.1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) สิ่งที่ต้องคำนึงในการเลือกแหล่งกำเนิดแสงให้กับระบบโฟโตลิโทกราฟี คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ส่งผลต่อการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเลนส์แต่การเลือกใช้ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของแสงในระบบต้องคำนึงถึงประเภทของสารไวแสงที่ใช้เคลือบบนแผ่นรองรับและความเข้มแสง ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงที่มีการนำมาใช้ในระบบ ได้แก่ หลอดแสงจันทร์หรือหลอดไฟไอปรอท (Mercury arc lamp) และ เครื่องเอ็กไซเมอร์เลเซอร์ (Excimer Laser)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในระบบโฟโตลิโทกราฟี

Class of light source	Specific type	Wavelength (nm)	Location in the electromagnetic spectrum
Mercury-arc lamps	g line	436	visible
	h line	405	visible
	i line	365	mid-ultraviolet
	DUV	240–255	DUV
Excimer lasers	KrF	248	DUV
	ArF	193	DUV

2.1.2. ระบบแสงสว่าง ประกอบไปด้วยหลายฟังก์ชัน ได้แก่ สเปกตรัมฟิลเตอร์โดยเฉพาะระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแสงจันทร์ การทำให้แสงจากแหล่งกำเนิดแปลงเป็นแสงขนาน สร้างรูปแบบของการส่องสว่าง รวมถึงการควบคุมระดับปริมาณแสงและสร้างแสงที่มีความสม่ำเสมอในระบบ รวมถึงระบบส่องสว่างมีการสร้างลำแสงขนานของแสงในระบบ ระบบส่องสว่างในปัจจุบันถูกออกแบบให้มีการแปลงทิศทางของแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงให้เป็นแสงขนานโดยไม่มีการก่อกวนความเข้มแสงโดยการใช้ระบบเลนส์ซุม ดังรูปที่ 15

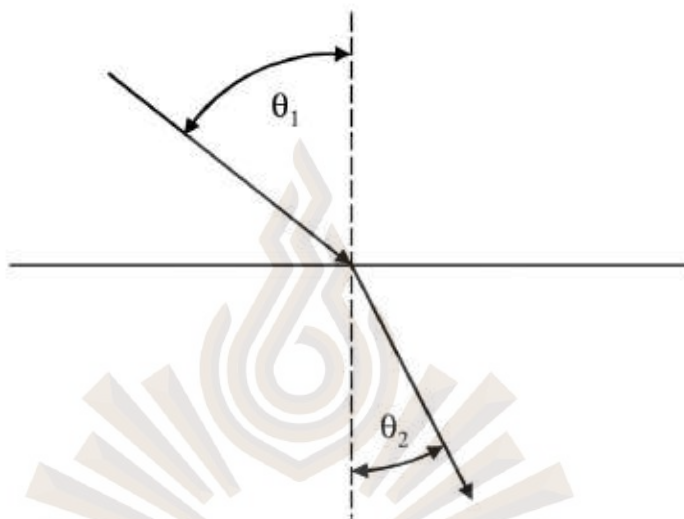


รูปที่ 15 ระบบเลนส์ซุมที่ใช้ในการสร้างลำแสงขนานในระบบโฟโตลิโทกราฟี [30]

2.1.3. Reduction Lenses บนแผ่นรองรับรูปร่างที่ถูกฉาย เช่น วงจรไอซี จะมีการลดขนาดโดยเลนส์ไมโครลิโทกราฟี ที่อยู่บนผิวของแผ่นรองรับขึ้นไป ในระบบทั่วไปจะใช้กำลังในการลดขนาดรูปร่างจากมาสก์ลง 4 เท่า และเลนส์ที่ใช้จะมีค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงมากกว่าหรือเท่ากับ 0.93 เลนส์ไมโครลิโทกราฟีจะถูกออกแบบตามทฤษฎีของ “double-Gaussian”



เลนส์ที่ทำให้เกิดการหักเหโดยทั่วไปจะให้อภาพที่มีคุณภาพดีในแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงแคบ การหักเหของแสงจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางในการเดินทางของแสง ทำให้มุมที่ตกกระทบและมุมหักเหมีค่าไม่เท่ากันดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การหักเหของแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่เปลี่ยนไป [30]

ตามทฤษฎีของสเนลล์ ตามสมการที่ 2

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

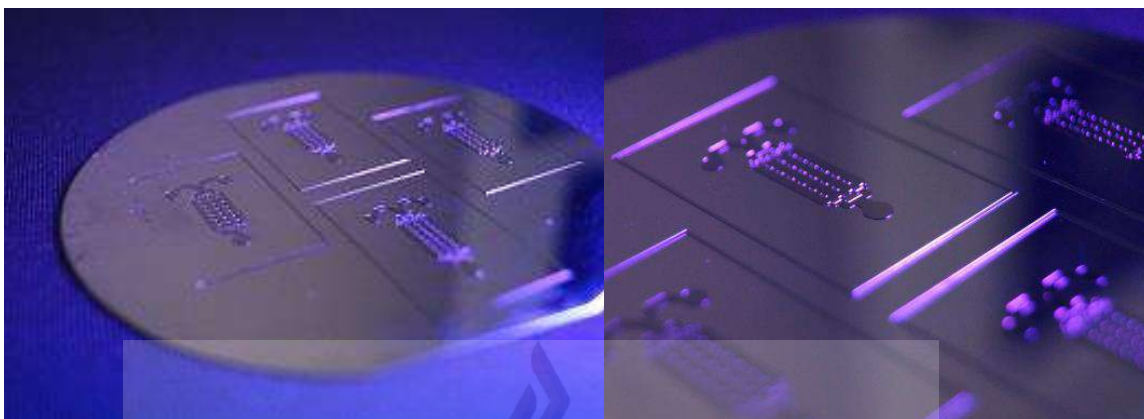
สมการที่ 2

โดยที่  $n$  คือค่าดัชนีการหักเหของวัสดุที่แสงเดินทางผ่าน

จากความสัมพันธ์แสงจะเปลี่ยนแปลงเมื่อดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของแสงซึ่งจะเชื่อมโยงไปถึงช่วงความยาวคลื่นที่ถูกจำกัดจากการหักเหของแสงเมื่อผ่านเลนส์ การออกแบบเลนส์ที่มีการหักเหในช่วงจำกัดในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ๆ เป็นการยาก และระบบเลนส์ที่ถูกออกแบบได้จะเป็นระบบที่ใหญ่ ซับซ้อนและมีราคาแพง[30]

2.1.4. โฟโตมาส์ก มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ประกอบไปด้วยรู หรือส่วนที่สามารถให้แสงผ่านได้เพื่อสำหรับฉายภาพลดขนาดเฉพาะส่วนที่ออกแบบลงบนแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 17





รูปที่ 17 แสดงลักษณะมาสก์แสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี [31]

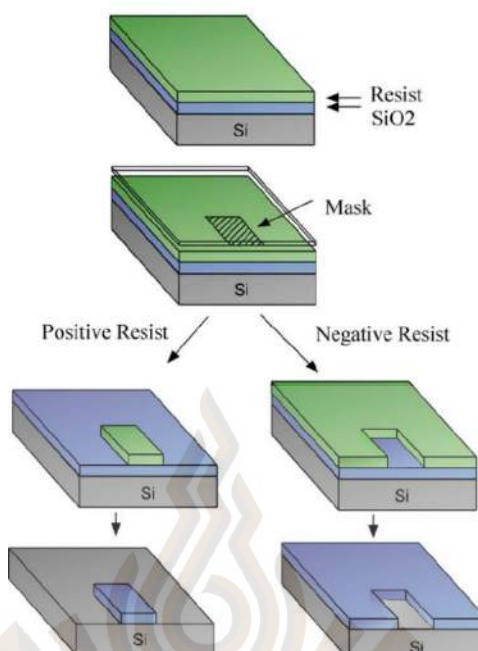
## 2.2. ขั้นตอนการผลิตลวดลาย โดยวิธีโฟโตลิโทกราฟี มีขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทำความสะอาดแผ่นรองรับหรือเวเฟอร์ หลังจากกระบวนการเตรียมเวเฟอร์โดยใช้ตัวทำละลายทำความสะอาดออกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้น ในกรณีเวเฟอร์ชิ้นใหม่อาจจะเป็นต้องใช้ isopropyl (IPA) หรือเมทานอลล้าง ถ้าเวเฟอร์ถูกเคลือบด้วยตัวต้านทานควรทำความสะอาดด้วยอะซิโตน หรือการกัดผิวโดยใช้พลาสมาเป็นต้น และควรอบเวเฟอร์ให้แห้งก่อนการเคลือบด้วยสารไวแสง

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการเคลือบด้วยการปั่นเหวี่ยง เพื่อให้ได้ผิวที่มีความเรียบสม่ำเสมอ วิธีการนี้จะถูกกำหนดโดยอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่มีอยู่ในสารไวแสงที่อยู่ในรูปของเหลว

ขั้นตอนที่ 3 การอบก่อนทำการฉายแสงเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยจากสารไวแสงหลังจากกระบวนการเคลือบด้วยการปั่นเหวี่ยง เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากถ้าเวลาอบไม่เพียงพอ จะไม่สามารถกำจัดตัวทำละลายทั้งหมดได้ จะส่งผลต่อคุณภาพของสารไวแสงแต่การอบมากเกินไปอาจทำให้เกิดการทำลายสารประกอบในสารไวแสงและลดความไวแสง ระยะเวลาทั่วไปที่ใช้ในการอบทั่วไปคือ 1 นาทีภายในเครื่องทำความร้อนแบบสุญญากาศ 115 องศาเซลเซียสหรือ 30 นาทีในเตาอบร้อน 90 องศา สำหรับสารไวแสง Shipley 1813 ซึ่งสารไวแสงแต่ละชนิดจะมีค่าที่เหมาะสมเฉพาะตัวของสารชนิดนั้น ๆ

ขั้นตอนที่ 4 การฉายแสงลงบนเวเฟอร์ที่ผ่านการเคลือบสารไวแสงโดยใช้ความยาวคลื่นหรือแหล่งกำเนิดแสงเฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้สารไวแสงกลายเป็นสารละลาย ลวดลายที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับโฟโตมาสก์ ถ้าเป็นสารไวแสงชนิดบวกและตรงกันข้ามเมื่อใช้สารไวแสงชนิดลบดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ความแตกต่างระหว่างสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ [30]

ขั้นตอนที่ 5 การอบหลังจากผ่านการฉายแสง เพื่อลดคลื่นนิ่ง (standing waves) ในสารไวแสง โดยทั่วไปใช้การอบร้อนที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เวลา 1 นาทีแต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสงด้วย

ขั้นตอนที่ 6 การล้างในน้ำยาเคมี (Developer) โดยใช้สารละลายที่มีค่าเป็นด่างภายในตู้ดูดไอสารเคมี ตัวอย่างน้ำยาเคมีที่ใช้ ได้แก่ Tetramethyl ammonium hydroxide โดยใช้กับสารไวแสงชนิด S1800 series ใช้ระยะเวลา 60 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง

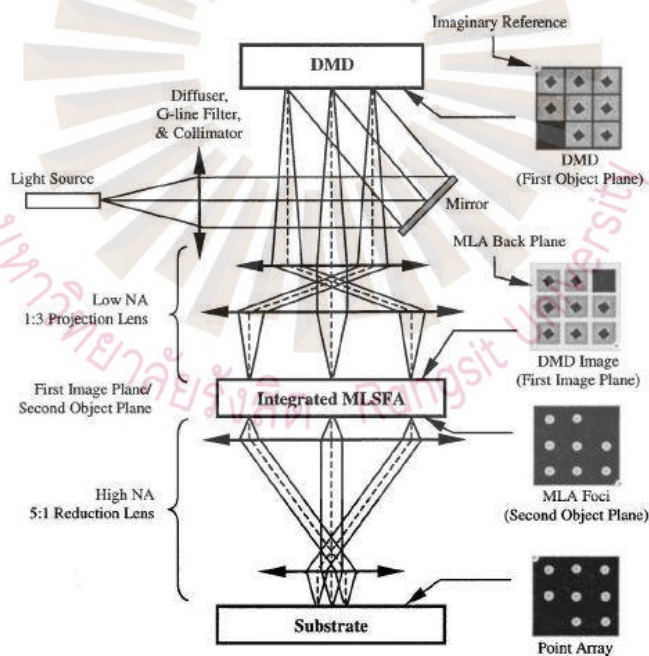
ขั้นตอนที่ 7 การอบร้อนหลังจากการล้างในน้ำยาเคมี ใช้เพื่อปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนของสลายโดยการขจัดตัวทำละลายออกหลังจากการบวมการผลิต

ขั้นตอนที่ 8 Photoresist Stripping หลังจากการทำโฟโตลิโทกราฟีแล้วจำเป็นต้องขจัดสารไวแสง วิธีที่ง่ายที่สุดคือการละลายสารไวแสงในอะซิโตนหรือ Shipley 1165 Remover (aka NMP) แต่อะซิโตน ไม่เหมาะที่จะใช้ในการกำจัดสารไวแสง ความดันไอสูงของอะซิโตนทำให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและทำให้เกิดการสึกกร่อนของผิวเคลือบที่ตกค้างบนแผ่นรองรับ หลังการใช้อะซิโตนต้องล้างด้วย isopropyl alcohol (IPA) ทันที นอกจากนี้สารไวแสงสามารถขจัดออกด้วยก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในสภาพแตกตัวเป็นไอออน (Oxygen plasma) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารไวแสง [34]

### 3. โฟโตลิโธกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์(Maskless photolithography)

เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการผลิตมาสก์ในการการสร้างลายวงจรรีเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมทำให้ระบบโฟโตลิโธกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์เป็นที่สนใจ เพราะเป็นระบบที่สามารถลดงบประมาณในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีได้ การพิมพ์ลายวงจรรด้วยระบบโฟโตลิโธกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์มีข้อดีคือ ต้นทุนไม่สูง มีความยืดหยุ่นในการสร้างลวดลายและใช้ระยะเวลาในการผลิตไม่นาน ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ถูกนำมาแทนการใช้มาสก์ในกระบวนการดังกล่าวมีหลายประเภท ได้แก่ อุปกรณ์จอภาพแอลซีดีหรือจอภาพผลึกเหลว (Liquid crystal display, LCD) อุปกรณ์ spatial light modulator (SLM) และอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน เป็นต้น

3.1. อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน (DMD) ในระบบอุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัล มีหน้าที่เหมือนรูเปิดปิดแสงของในการถ่ายภาพของระบบที่ประกอบด้วยอาร์เรย์ของกระจกสี่เหลี่ยมเป็นพิกเซล ในแต่ละพิกเซลสามารถเอียงได้ด้วยการควบคุมผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้แสงที่ตกกระทบเกิดการเปลี่ยนแปลง ในระบบโฟโตลิโธกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์จะใช้อุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัล ในการสร้างรูปแบบหรือลวดลายที่ต้องการฉายแทนการใช้มาสก์ ดังรูปที่ 19



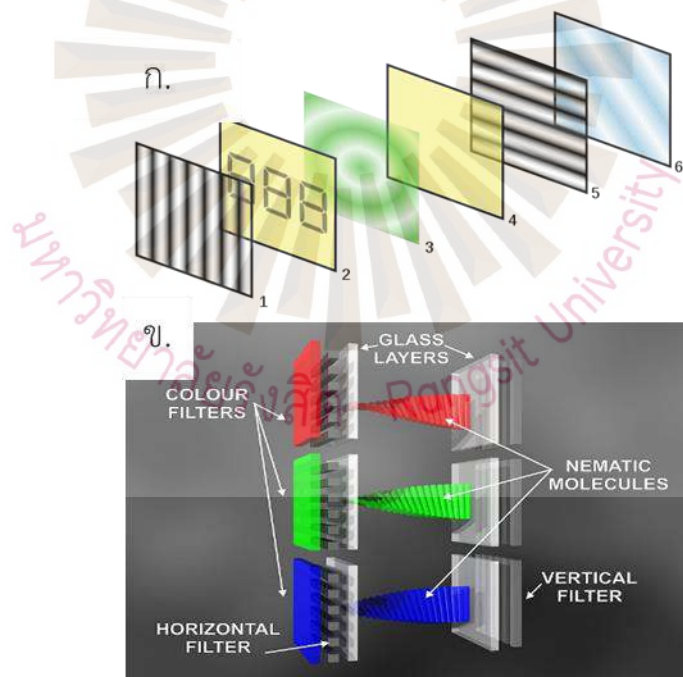
รูปที่ 19 แสดงตัวอย่างการวางทัศนูปกรณ์ที่อาศัยอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนมาช่วยในการสร้างลายของโฟโตมาร์ค[33]

### 3.2. จอภาพผลึกเหลวหรือจอแอลซีดี (Liquid Crystal Display)

จอภาพแอลซีดี เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงผลในรูปแบบของ ภาพ หรือสี เช่น การแสดงภาพของ โทรทัศน์ จอพิวเตอร์ รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการฉายภาพ เช่น โปรเจคเตอร์ เป็นต้น จอแอลซีดีมีลักษณะ เป็นแผ่นแบนราบ ประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ ได้แก่

1. ชั้นของแผ่นโพลาริซในแนวตั้ง
2. แผ่นแก้วที่ประกอบด้วยอินเดียมทินออกไซด์
3. ชั้นของผลึกเหลว
4. แผ่นแก้วที่ประกอบด้วยอินเดียมทินออกไซด์ที่เรียงตัวกันในแนวนอน
5. ชั้นของแผ่นโพลาริซในแนวนอนและ
6. กระจก

ดังรูปที่ 20 ก. องค์ประกอบสำคัญของจอแอลซีดีได้แก่ ผลึกเหลว หรือ Liquid Crystal ซึ่งเป็น สารที่มีสถานะอยู่ระหว่างของแข็งและของเหลว และมีความโปร่งใสในตัว มีลักษณะเรียงกันหลายพิกเซล ซึ่งเรียงตัวกันอยู่ 3 เซลล์ในแต่ละ 1 พิกเซล และมีฟิลเตอร์สีต่าง ๆ ได้แก่ สีน้ำเงิน สีแดงและสีเขียว เพื่อ ควบคุมสีที่ปรากฏบนจอภาพ 20 ข.



รูปที่ 20 ก. แสดงส่วนประกอบชั้นต่าง ๆ ของจอแอลซีดี [34]

และ ข. แสดงลักษณะแต่ละพิกเซลในชั้นผลึกเหลว [35]



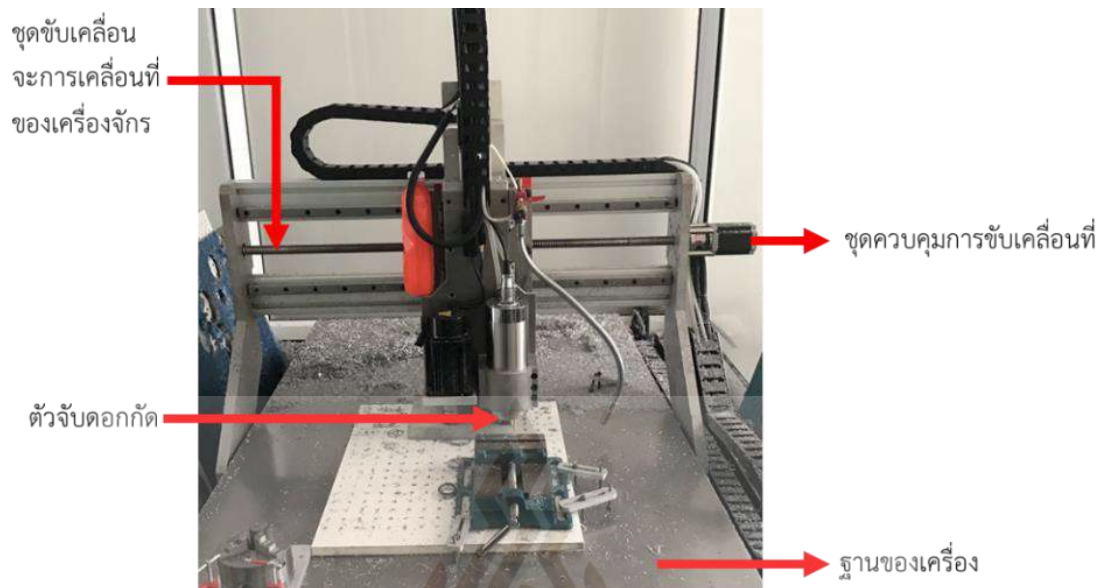
#### 4. การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง Computer Numerically Controlled (CNC)

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง หมายถึง การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรด้วยคำสั่งเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบคอมพิวเตอร์และระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวประมวลผลและสั่งงานเครื่องจักรให้ทำงานหรือเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งทางห้องปฏิบัติการของนักศึกษาที่มีเครื่อง miniCNC รุ่น BS10050Z มีลักษณะดังรูปที่ 21 เครื่อง miniCNC จะเป็นเครื่องจักรขนาดเล็กที่ทำงานด้วยการควบคุมแบบ CNC ทำให้เกิดการขับเคลื่อนของเครื่องจักรในแกนต่าง ๆ ด้วยมอเตอร์ เครื่อง miniCNC สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การขึ้นรูปชิ้นงาน กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC มีชื่อเรียกว่า Subtractive Process ซึ่งเป็นการบวนการขึ้นรูปโดยการกัดหรือตัดผิวของวัสดุตั้งต้นให้มีรูปร่างคงเหลือจากการตัดตามที่ออกแบบ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า ดอกกัด (cutting tool) ซึ่งตัวดอกกัดเองก็มีหลากหลายรูปแบบ การใช้งานของดอกกัดขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่เราออกแบบ เช่น แกะสลัก หรือเจาะ และประเภทวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น ไม้ อลูมิเนียม เป็นต้น [36] ซึ่งเครื่องจักรดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นอุปกรณ์ในการเรียงแสงของระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์

เครื่อง miniCNC จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่

1. โครงสร้างของเครื่องจักร จะประกอบไปด้วย
  - 1.1 ฐานของเครื่อง ซึ่งเป็นบริเวณสำหรับยึดวางวัสดุที่ต้องกัดขึ้นรูป บริเวณฐานนี้ต้องมีความแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักของวัสดุได้ ทนต่อสภาวะการสั่นสะเทือน
  - 1.2 ชุดขับเคลื่อนจะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร เป็นอุปกรณ์กลไกทางกลที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของดอกกัด ชุดขับเคลื่อนจะประกอบด้วย บอลสกรู และลูกปืนเป็นต้น
  - 1.3 ตัวจับดอกกัด เป็นส่วนที่ยึดดอกกัด ส่วนนี้จะมีมอเตอร์เฉพาะ ที่ควบคุมการหมุนของหัวกัดในระหว่างกัดขึ้นงาน
2. ชุดควบคุมการขับเคลื่อน คือ อุปกรณ์ที่เป็นตัวควบคุมชุดขับเคลื่อนซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวจับดอกกัดให้เคลื่อนที่ในแกนต่าง ๆ อุปกรณ์ในส่วนนี้ เช่น สเตปเปอร์มอเตอร์และบอร์ดควบคุมมอเตอร์
3. โปรแกรมควบคุมทำการ ขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ใช้งาน เช่น โปรแกรม Mach3 โปรแกรมควบคุมจะมีหน้าที่ในการอ่านไฟล์ G-code ให้เป็นสัญญาณในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ทั้งในส่วนควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ในแนวแกนต่าง ๆ และความเร็วในการหมุนของหัวจับดอกกัด

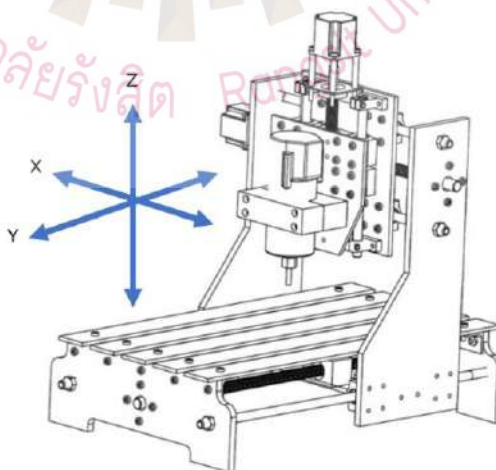




รูปที่ 21 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องจักร miniCNC รุ่น BS10050Z

แนวการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร miniCNC

เครื่องจักร mini CNC จะประกอบไปด้วยแกนเคลื่อนที่ในแนว 3 มิติ ได้แก่ แกน X แกน Y และ แกน Z ในการเคลื่อนที่ของแกน X นั้นจะเป็นแกนการเคลื่อนที่ของตัวจับดอกกัดเดินในทิศทางที่ตั้งฉากกับฐานของเครื่อง ในแกน Y จะเป็นแนวการเคลื่อนที่ของตัวจับดอกกัดตั้งฉากขวางกับการเคลื่อนที่ของแกน X และในแนวแกน Y จะเป็นแนวการเคลื่อนที่ของตัวจับดอกกัดในแนวขึ้น – ลง ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 แสดงแนวการเคลื่อนที่ของเครื่อง miniCNC

หลักการกัดขึ้นรูปโตนขึ้นรูปโดยเครื่อง miniCNC

การทำงานของเครื่อง miniCNC จะถูกควบคุมด้วย NC code หรือ G-code เป็นหนึ่งในภาษาคอมพิวเตอร์ ตัวไฟล์ G-code จะควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่าง ๆ ของหัวจับดอกกัด ซึ่งไฟล์ภาษาดังกล่าวจะสามารถเขียนขึ้นมาเอง หรือใช้โปรแกรมในการสร้างขึ้นมา ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างไฟล์ G-code ได้แก่ โปรแกรม Mastercam X5 เป็นต้น หลักในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่อง miniCNC นั้นจะใช้พิกัดในการเคลื่อนที่ ดังนั้นเราต้องมีการตั้งพิกัดเริ่มต้นในแกน X Y และ Z (0,0,0) เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามการออกแบบชิ้นงาน

ตัวอย่าง NC code หรือ G code ในการควบคุมเครื่อง miniCNC

```
%
O0000 (T)
  (DATE=DD-MM-YY - 05-03-19 TIME=HH:MM - 20:18)
  (MCX FILE - T)
  (NC FILE - C:\USERS\MITAR\DESKTOP\T.NC)
  (MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)
  ( T60 | 5. DRILL | H60 )
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
N104 T60 M6
N106 G0 G90 G54 X10. Y10. A0. S6000 M3
N108 G43 H60 Z25.
N110 G99 G73 Z-10. R25. Q0. F200.
N112 G80
N118 G0 X0. Y0. A0.
N120 M30
%
```

ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

1. ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรมสำหรับออกแบบชิ้นงาน เช่น SolidWorks
2. บันทึกชิ้นงานด้วยประเภทไฟล์
3. เปิดไฟล์ที่บันทึกด้วยโปรแกรม Mastercam X5
4. ออกแบบวิธีการกัดชิ้นงานที่ใช้บนโปรแกรม Mastercam X5 ซึ่งบนตัวโปรแกรมจะมีประเภทการกัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่าง ๆ ให้เลือก ได้แก่ การกัดขอบ การตัดผิวหน้าและการเจาะ เป็นต้น
5. เลือกประเภทดอกกัดที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน ขนาดดอกกัด รวมถึงกำหนดความเร็วในการหมุนของดอกกัด ความเร็วในการเดินของดอกกัด ระยะในการกัดลงไปในแต่ละครั้ง ความลึกในการกัด ซึ่งการกำหนดลักษณะของดอกกัดและค่าอื่น ๆ ต้องคำนึงถึงวัสดุที่เรานำมาขึ้นรูปชิ้นงานและลักษณะงานที่เราออกแบบ

6. หลังจากตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วเราสามารถแปลงไฟล์คำสั่งให้เป็นไฟล์ G-code ด้วยโปรแกรม Mastercam
7. ไฟล์ที่ได้จะเป็นไฟล์ประเภท .NC สามารถนำไปเปิดด้วยโปรแกรม Mask3 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง miniCNC
8. เตรียมวัสดุในการกัดชิ้นงานยึดกับฐานของเครื่อง miniCNC และเลือกตำแหน่งพิกัด (0,0,0) สำหรับการควบคุมการเดินของเครื่อง CNC แล้วกดปุ่ม Start เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่องจักรตามคำสั่งบนไฟล์ .NC

#### 4.1 ดอกกัดชิ้นรูปที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

เครื่อง miniCNC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกัดสิ่งวัสดุได้หลากหลายประเภท ได้แก่ อะคลิลิก งานไม้ งานนูนมึนเรีย รวมถึงงานกัดเหล็ก เป็นต้น ในการกลึงชิ้นงานนั้น การออกแบบผิวลักษณะต่าง ๆ ทำให้ต้องใช้ดอกกัดแต่ละประเภทแตกต่างกันไป ประเภทดอกกัดที่ใช้กับเครื่อง miniCNC มีดังนี้

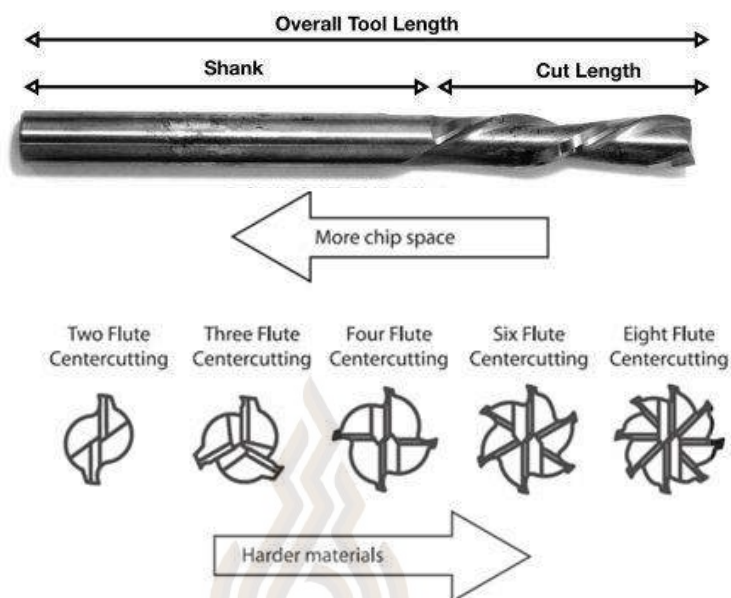
4.1.2. ดอกกัดเอ็นมิลด์ (Square End mill) จะถูกใช้ในการตัดหรือเจาะ มีลักษณะคือปลายดอกกัดจะเรียบ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างดอกกัดเอ็นมิลด์กับดอกเจาะคือ ดอกเจาะจะสามารถกัดชิ้นงานได้ในแนวแกนตั้ง(z) เท่านั้น ส่วนดอกเอ็นมิลด์จะสามารถตัดเนื้อวัสดุได้ในทุกแกน (x,y,z) โดนปกติดอกเอ็นมิลด์จะมีส่วนที่เรียกว่า ฟัน(flutes) จำนวนฟันของดอกกัดจะมีข้อดีและลักษณะการนำไปใช้งานที่ต่างกันไป ดังนี้

เอ็นมิลด์แบบ 1 ฟัน เหมาะสำหรับการใช้งานวัสดุที่มีเนื้อเหนียว และใช้รอบในการกัดสูง  
 เอ็นมิลด์แบบ 2 ฟัน ข้อดีของดอกกัดที่มี 2 ฟันจะมีร่องคายเศษกว้าง เหมาะกับการกัดวัสดุเนื้อ

นิ่มและกัดร่องลึก แต่ข้อเสียคือ แกนกลางของตัวดอกกัดนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าดอกกัดเอ็นมิลด์แบบหลายฟัน ความแข็งแรงจึงลดลงตามไปด้วย

เอ็นมิลด์แบบ 3 ฟัน เป็นรูปแบบดอกกัดที่อยู่ระหว่าง 2 ฟันและ 4 ฟัน สามารถใช้แทนดอกกัดทั้งสองแบบได้แต่ไม่เป็นที่นิยมนัก

เอ็นมิลด์แบบ 4 ฟัน ข้อดีของเอ็นมิลด์ประเภทนี้คือจะมีแกนกลางที่ใหญ่ ทำให้แข็งแรงกว่าดอกกัดเอ็นมิลด์ประเภทอื่น ๆ ฟันจำนวนมากจะทำให้งานกัดที่ได้มีผิวเรียบมากกว่าแบบอื่น ๆ นิยมใช้กับวัสดุที่มีความแข็ง เช่น เหล็ก แต่ข้อเสียคือ การคายเศษเหล็กออกขณะกัดงานจะทำได้ไม่ดีเท่าเอ็นมิลด์ประเภทอื่น ๆ [37]



รูปที่ 23 ลักษณะดอกกัดเอ็นมิลด์ที่มีจำนวนฟันที่แตกต่างกัน [38]

4.1.2. เอ็นมิลด์กัดหยาบ มีลักษณะคล้ายดอกเอ็นมิลแบบปกติแต่บริเวณฟันจะมีผิวไม่เรียบ มีลักษณะเป็นเกลียว ดังรูปที่ 15 เอ็นมิลด์กัดหยาบถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เอ็นมิลฟันหยาบ (Coarse Pitch) และแบบฟันละเอียด (Fine Pitch) โดยทั้งสองแบบจะมีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ประเภทฟันหยาบจะนำไปใช้กับงานกัดร่องลึก ต้องการนำเนื้อวัสดุออกมามาก ๆ อย่างรวดเร็ว ประเภทฟันละเอียดจะมีคมฟันแข็งแรงกว่า ผิวงานที่ได้จะมีความเรียบมากกว่า เหมาะสำหรับกัดร่องแคบ ๆ ไม่ลึกมาก



รูปที่ 24 ลักษณะเอ็นมิลด์กัดหยาบ [39]

4.1.3. บอลเอ็นมิลด์ (Ball nose cutters) เป็นดอกกัดชิ้นงานที่ปลายมีลักษณะมนกลม ผิวงานที่ได้จะไม่เรียบเหมือนเอ็นมิลด์ปลายเรียบ ใช้กัดงานที่ต้องการผิวโค้ง มีฟันตั้งแต่ 2-6 ฟัน



รูปที่ 25 ลักษณะบอลเอ็นมิลล์ [40]

4.1.4. ดอกกัดข้าง (Side & face cutter) มีลักษณะแบนบาง คมตัดอยู่บริเวณรอบนอก ด้านข้างของดอกกัด ประเภทใบมีดของดอกกัดข้างนั้นถูกออกแบบมาหลายประเภท เพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ดอกกัดข้างปกติ (plain side milling cutter) คมตัดจะอยู่บนดอกกัดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก การกัดงานด้วยดอกกัดข้างประเภทนี้จะทำให้ผิวชิ้นงานเรียบขึ้น ส่วนมากนำไปใช้ในการกัดร่องงานด้านข้างหรือร่องฉาก มีหลายขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรถึง 200 มิลลิเมตร มีความหนาตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตร เป็นต้น



รูปที่ 26 ลักษณะดอกกัดข้าง [41]

4.1.5. ดอกกัดเรียว (Angle milling cutters) รูปร่างจะมีลักษณะคล้ายกับดอกกัดข้าง แต่รูปร่างจะไม่ใช้ทรงกระบอกขนาน มีลักษณะเรียว แบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

1. ดอกกัดเรียวเดี่ยว (Single angle) คมตัดจะอยู่รอบนอกของตัวดอกกัด เหมาะสำหรับในการตัดร่องท่างเหลี่ยม มุมสามารถกัดได้มีขนาด 45 และ 60 องศา

2. ดอกกัดเรียวคู่ (Double angle) คมตัดจะอยู่รอบนอกของดอก มีลักษณะเรียวแล้วค่อยๆ ขึ้นมาบรรจบกันหน้าขึ้นตรงกลางดอก



4.1.6. มีดกัดหน้าราบหรือมีดปาดผิว(Face milling cutter) ใช้สำหรับการขับผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบ ลักษณะจะมีหน้ากว้างกว่าดอกกัดชนิดอื่น ๆ

4.1.7. ดอกเลื่อย (Metal slitting saws) เป็นดอกกัดที่มีขนาดบางมาก คมกัอยู่ที่รอบนอกของดอก เหมาะสำหรับการตัดชิ้นงานให้ขาด มีหลากหลายขนาดตั้งแต่ 63.5 มิลลิเมตร ถึง 200 มิลลิเมตร

4.1.8. ดอกสว่าน (Drill) คือดอกที่ใช้ในการเจาะโลหะ ลักษณะคือจะมีร่องเกลียวอยู่รอบดอกสว่านเพื่อใช้ในการขับเศษโลหะระหว่างการเจาะชิ้นงาน



รูปที่ 27 ลักษณะดอกสว่าน [42]

4.1.9. ดอกตีป (Tap) เป็นดอกกัดที่ทำให้เกิดเกลียวภายในรูของชิ้นงาน หรือเรียกทั่วไปว่า เกลียวใน ในการตีปเกลียวในนั้นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษที่สามารถหมุนไปและหมุนกลับได้ ดอกตีปเกลียวมีหลายประเภท ได้แก่

1. ดอกตีปร่องเกลียว เหมาะสำหรับการตีปชิ้นงานหรือรูตัน ลักษณะของดอกจะถูกออกแบบให้มีร่องสำหรับการดึงเศษโลหะออกมาขณะทำการตีป
2. ดอกตีปร่องตรง เหมาะสำหรับการตีปงานที่เป็นรูทะลุ ลักษณะของดอกตรงปลายจะเฉียงไปทางซ้ายสำหรับการผลักเศษโลหะลงปาด้านล่าง
3. ดอกตีปปลายร่องเฉียง
4. ดอกตีปแบบรีดเกลียว



รูปที่ 28 ลักษณะดอกตัดาปแต่ละชนิด [43]

วิธีในการตัดาปเกลียวใน มีทั้งแบบ Manual หรือแบบตัดาปด้วยมือ โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า ด้ามตัดาป ซึ่งตัวด้ามตัดาปเองมี 2 ประเภท โดยการใช้งานจะเลือกจากลักษณะการใช้งาน ด้ามตัดาปแบบตัวที่จะสามารถควบคุมความตรงของดอกตัดาปได้ขณะทำการตัดาปได้ง่าย ดอกตัดาปแบบปรับแต่งได้จะเหมาะสำหรับดอกตัดาปขนาดใหญ่ ความยาวที่ทำให้สามารถจับได้เต็มมือทำให้สามารถควบคุมแรงได้ดีกว่า นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ในการทำงานอีกด้วย



รูปที่ 29 ลักษณะด้ามตัดาป ก. ด้ามตัดาปแบบตัวที่ ข. ด้ามตัดาปแบบปรับแต่งได้ [44]

ในการตัดาปเกลียวนั้น ต้องมีการเจาะรูนำร่องก่อนการใช้ดอกตัดาปกัดสร้างเกลียวโดยการเจาะรูนำร่องนั้นต้องสอดคล้องกับขนาดกับดอกตัดาปที่ใช้ในการสร้างเกลียวด้วย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูปตัด

Nominal Diameter	Metric Coarse			Metric Fine		
	Metric	Pitch	Drill Size in mm		Pitch	Drill Size in mm
			Fluted	Fluteless		
1	0.25	0.75	--	--	--	
1.1	0.25	0.85	--	--	--	
1.2	0.25	0.95	--	--	--	
1.4	0.30	1.10	--	--	--	
1.6	0.35	1.25	--	--	--	
1.8	0.35	1.45	--	--	--	
2	0.40	1.60	--	0.25	1.75	
2.2	0.45	1.75	--	0.25	1.95	
2.3	0.40	1.90	--	--	--	
2.5	0.45	2.05	--	0.35	2.15	
2.6	0.45	2.15	--	--	--	
3	0.50	2.50	2.75	0.35	2.65	
3.5	0.60	2.90	--	--	--	
4	0.70	3.30	3.70	0.50	3.50	
4.5	0.75	3.70	--	0.50	4.00	
5	0.80	4.20	4.60	0.50	4.50	
5	--	--	--	0.75	4.25	
5.5	--	--	--	0.50	5.00	
6	1.00	5.00	5.50	0.75	5.25	
7	1.00	6.00	--	0.75	6.25	
8	1.25	6.80	7.40	0.75	7.25	
8	--	--	--	1.00	7.00	
9	1.25	7.80	--	0.75	8.25	
9	--	--	--	1.00	8.00	
10	1.50	8.50	9.30	0.75	9.25	
10	--	--	--	1.00	9.00	
10	--	--	--	1.25	8.75	
11	1.50	9.50	--	1.00	10.00	
11	--	--	--	1.25	9.75	
12	1.75	10.20	11.10	1.00	11.00	
12	--	--	--	1.25	10.75	
12	--	--	--	1.50	10.50	
14	2.00	12.00	--	1.00	13.00	

#### 4.2. ความเร็วในการกัดชิ้นงาน(Cutting speed) และอัตราป้อน(feed rate)

ความเร็วในการกัดหรือตัดชิ้นงาน(Cutting speed) หมายถึงระยะที่ดอกกัดหมุนแล้วทำให้ฟันของดอกกัดเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง(การเคลื่อนที่ในรอบวงของดอกกัด) มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที ซึ่งความเร็วดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากความเร็วรอบของดอกกัด ดังความสัมพันธ์ ดังนี้

$$N = \frac{CS}{\pi D}$$

สมการที่ 3

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบ(Spindle speed) มีหน่วยเป็น รอบ/นาที

$CS$  คือ ความเร็วตัด (Cutting speed) มีหน่วยเป็น เมตร/นาที

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางดอกกัด มีหน่วยเป็น เมตร

อัตราป้อน(feed rate) เป็นระยะที่ดอกกัดเคลื่อนที่บนวัสดุที่ต้องการขึ้นรูปในระยะที่ดอกกัดหมุนไปหนึ่งรอบต่อหนึ่งฟันกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อฟัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Vf = n \times fz \times Z$$

สมการที่ 4

โดยที่  $Vf$  คือ ความเร็วในการป้อนงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที

$n$  คือ ความเร็วรอบ(Spindle speed) มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที

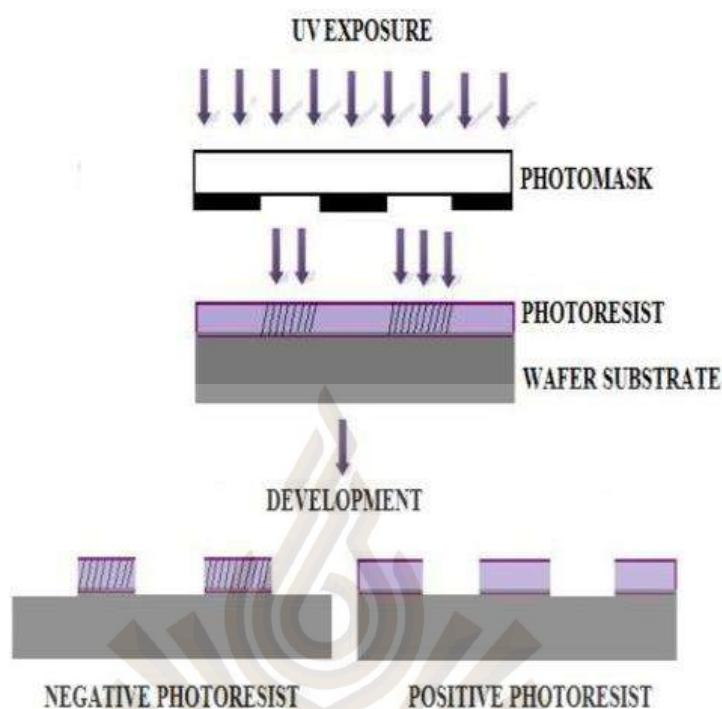
$fz$  คือ อัตราป้อน(feed rate) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อฟัน

$Z$  คือ จำนวนฟันของดอกกัด [44]

นอกจากตัวแปร ความเร็วในการกัดชิ้นงาน และอัตราป้อนแล้วในการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน อีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญคือความลึกในการกัด(Depth of cut) ขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องและชนิดของดอกกัดว่าผลิตขึ้นจากวัสดุชนิดใด ดอกกัดประเภท High speed steel ควรใช้ความลึกในการกัดครั้งละ 1-1.25 มิลลิเมตร สำหรับการกัดหยาบ และ ใช้ความลึกในการกัดครั้งละ 0.25 – 0.5 มิลลิเมตร สำหรับการกัดเรียบ

## 5. สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

สารไวแสง เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมสารโลหะกึ่งนำ สารไวแสงเป็นพอลิเมอร์ ชนิดหนึ่ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ สารไวแสงชนิดลบและสารไวแสงชนิดบวก สารไวแสง 2 ชนิดดังกล่าวแตกต่างกันที่สภาพหลังการฉายแสง สารไวแสงชนิดลบบริเวณที่สัมผัสกับแสงจะแข็งตัวและไม่ถูกทำให้ละลายตัวไปหลังจากกระบวนการใช้น้ำยาล้าง ในทางตรงกันข้ามสารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่ถูกฉายแสง จะถูกทำให้ละลายในตัวน้ำยาล้าง ในขณะที่บริเวณที่ไม่ถูกแสงจะคงอยู่แม้ว่าจะถูกชะล้างด้วยสารเคมี [45] ดังรูปที่ 30 สารไวแสงทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดบวกและชนิดลบมีคุณลักษณะและข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 3



รูปที่ 30 แสดงการทำงานของสารไวแสงทั้งสองชนิด ได้แก่ สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ  
[46]

ตารางที่ 3 แสดงลักษณะของสารไวแสงชนิดบวกและลบ[47]

คุณลักษณะ	สารไวแสงชนิดบวก	สารไวแสงชนิดลบ
การจับตัวกับซิลิกอน	ไม่ดี	ดีมาก
ราคา	มีราคาสูง	ราคาไม่สูง
ชนิดน้ำยาเคมี	สารที่ละลายในน้ำ	ออร์แกนิก
สิ่งที่ละลายในน้ำยาเคมี	บริเวณที่ถูกฉาย	บริเวณที่ไม่ถูกฉาย
ขนาดเล็กที่สุดที่สร้างได้	0.5 ไมครอน	2 ไมครอน
ความต้านทานการสึกกร่อนทางเคมี	ต่ำ	สูง

สารไวแสง นอกจากจะถูกแบ่งประเภทตามลักษณะหลังการฉายแล้ว ยังมีการแบ่งตามโครงสร้างทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารไวแสงชนิดโฟโตพอลิเมอร์ (Photopolymer photoresist) สารไวแสงชนิดที่ละลายตัวด้วยแสง (photo-decomposing photoresist) และสารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง (photo-cross-linking photoresist)



โฟโตพอลิเมอร์ (Photopolymer) มักเป็นสารประเภทแอลิล มอนอเมอร์ (Allyl monomer) เมื่อถูกฉายแสงจะกลายเป็นสารที่เป็นอนุกรมเสรี คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวในชั้นนอกสุดสามารถจับหรือสร้างพันธะกับสารอื่นได้อย่างรวดเร็ว โฟโตพอลิเมอร์นิยมนำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ ยกตัวอย่างเช่น เมทิลเมทาคริเลต (MMA)

สารไวแสงชนิดที่ละลายตัวด้วยแสง (photo-decomposing photoresist) เป็นสารไวแสงที่จะกลายเป็นสารที่สามารถละลายในน้ำ (hydrophilic) นิยมนำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดบวก ตัวอย่างสารไวแสงประเภทนี้ ได้แก่ azide quinone

สารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง (photo-cross-linking photoresist) เป็นสารไวแสงที่สามารถเกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหที่ไม่ละลายได้ เมื่อผ่านการฉายแสง สารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง นำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ

นอกจากนี้ยังมีสารไวแสงที่มีชื่อว่า Off-Stoichiometry Thiol-Ene (OSTE) polymers เป็นสารที่ประกอบไปด้วย off-stoichiometry thiol-ene (OSTE) และ off-stoichiometry thiol-ene-epoxies (OSTE+) เมื่อนำมาสร้างเป็นชั้นเลเยอร์ (Self-assembled monolayer) บนแผ่นรองรับ เมื่อเราฉายลงตลอดผ่านแสงลงบน Off-Stoichiometry Thiol-Ene (OSTE) polymers ซึ่งจะมีผลลัพธ์เหมือนกับสารไวแสงชนิดอื่น ๆ ที่สามารถล้างบริเวณที่ไม่ต้องการได้ด้วยน้ำยาเคมี [48]

ในส่วนของสารไวแสงชนิดต่าง ๆ นั้น นอกจากในรูปของของเหลวแล้ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์ม มีชื่อว่า Dry film Photoresist ซึ่งส่วนมากฟิล์มชนิดนี้จะถูกนำไปใช้ในการกัดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า แผ่นพีซีบี (PCB) ลักษณะของสารไวแสงชนิดฟิล์ม ดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 แสดงสารไวแสงชนิดฟิล์ม [49]

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงทัศนูปกรณ์ ซึ่งจะนำมาใช้ประกอบเป็นกล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) โดยไม่ใช้มาสก์แสง (Photomask) จะมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยทางด้านแสง เช่น การสร้างลวดลายที่มีโครงสร้างระดับไมครอน และ เกรตติง ได้ตามต้องการ และวงการวิจัยทางการแพทย์ในการสร้างโครงสร้างในไบโอเซนเซอร์ รวมไปถึงการพัฒนาเซนเซอร์ทางแสงชนิดใหม่ๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นจากงานวิจัยนี้ไปออกแบบและวิจัยเครื่องมือทัศนศาสตร์ขั้นสูง และสามารถใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการแสงทัศนูปกรณ์และจุลทรรศน์ศาสตร์ด้วย ขั้นตอนการวิจัย ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย และ สถานที่ทำการทดลองวิจัย แบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆ ตามตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ตารางแสดงขั้นตอนการวิจัย วิธีการวิจัย และ สถานที่วิจัย

ขั้นตอน	วิธีการ	สถานที่
1. ศึกษา ออกแบบ และ จำลองการออกแบบชิ้นงาน โตะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ ชิ้นส่วนต่างๆ ตามมาตรฐาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนและส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์	ออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ ได้แก่ โตะแสง และ ตัวยึดจับอุปกรณ์ผ่านโปรแกรม ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2019 และ สร้างไฟล์สั่งคำสั่งในการควบคุมการทำงานของเครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ด้วยโปรแกรม Mastercam X5	ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์ และทัศนศาสตร์การแพทย์
2. สร้างชิ้นงานแผ่นวาง อุปกรณ์แสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ ชิ้นส่วนต่างๆ	สร้างอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยการใช้ เครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ซึ่ง ควบคุมการทำงานโดยโปรแกรม Mask3	ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์ และทัศนศาสตร์การแพทย์

ขั้นตอน	วิธีการ	สถานที่
3. คำนวณและออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	ศึกษาการออกแบบระบบทางเดินแสงของระบบโฟโตลิโทกราฟีและระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพ	ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์และทัศนศาสตร์การแพทย์
4. ประกอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	เรียงทางเดินทางตามทีออกแบบบนโต๊ะแสงด้วยอุปกรณ์ยึดจับที่สร้างขึ้นโดยเครื่อง Mini Computer Numerically Controlled(miniCNC) รุ่น BS10050Z	ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์และทัศนศาสตร์การแพทย์
5. ทดสอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์	ฉายภาพที่สร้างด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์ลงบนแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสง แล้วนำลวดลายที่สร้างได้ส่งดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)	ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์และทัศนศาสตร์การแพทย์

1. ขั้นตอนการศึกษา ออกแบบ และ จำลองการออกแบบชิ้นงานโต๊ะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ตามมาตรฐานเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบทางเดินแสงจากอุปกรณ์ของบริษัท Thorlabs, Inc. ซึ่งมีสิทธิบัตรเลขที่ US 2002/0021502 A1 ขึ้นทะเบียนเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2002 และ สิทธิบัตรเลขที่ GB2365991A ขึ้นทะเบียนเมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2002 และทำการออกแบบและสร้างบนโปรแกรม SolidWorks และ Mastercam X5

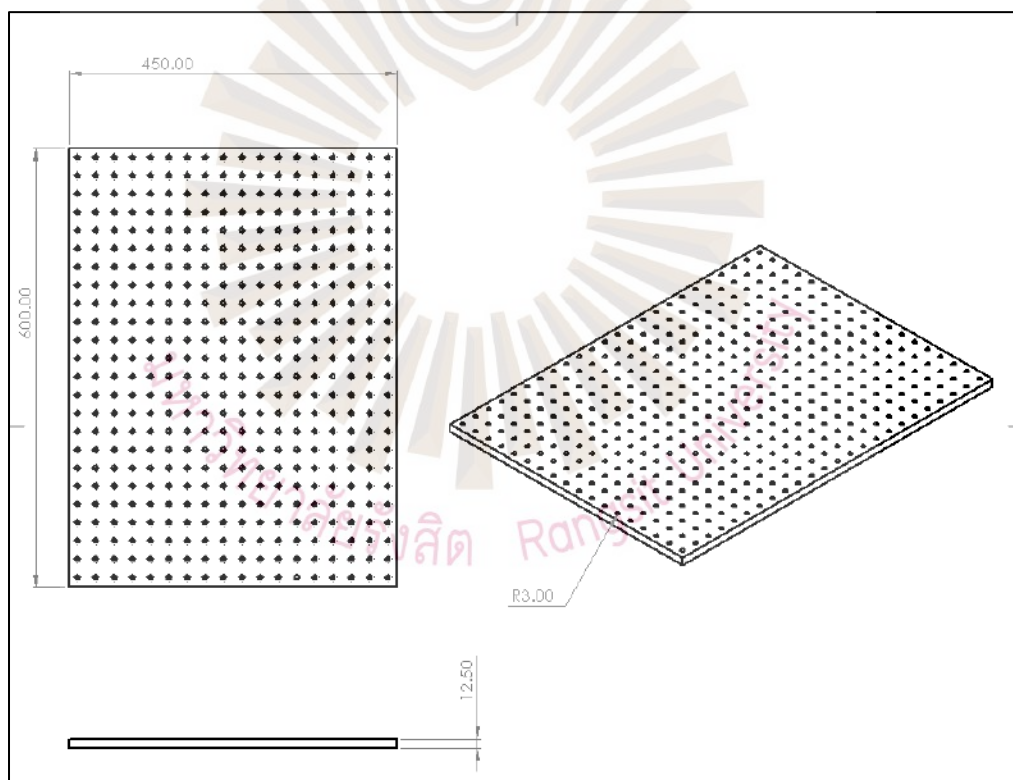
- 1.1 อุปกรณ์ที่ทำการศึกษาและออกแบบและ จำลองการออกแบบชิ้นงาน มีดังนี้

1. แผ่นวางอุปกรณ์แสง
2. ตัวจับเลนส์ขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร
3. เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ ได้แก่ 50 75 และ 100 มิลลิเมตร
4. ที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร

5. ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง
6. อุปกรณ์จับกระจก
7. ที่จับเลนส์ใกล้วัตถุ

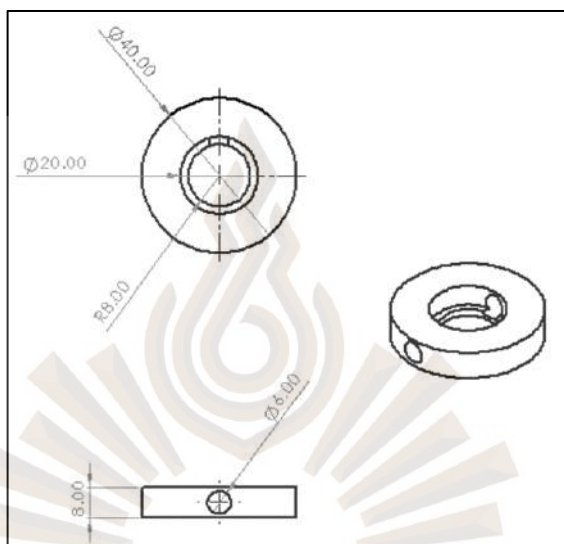
1.2. ออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ ได้แก่ โต้ะแสง และ ตัวยึดจับอุปกรณ์ผ่านโปรแกรมด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS 2019 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สำหรับออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ 3 มิติบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถรู้ระยะเวลาในการออกแบบชิ้นงาน ช่วยให้เราได้เห็นภาพผลงานก่อนสร้างหรือผลิตชิ้นงานจริง

1.2.1. แผ่นวางอุปกรณ์แสงหรือโต้ะแสง ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโต้ะแสงที่มีขนาดกว้าง 450 มิลลิเมตรและยาว 600 มิลลิเมตร ได้มีการออกแบบให้มีรูสำหรับยึดอุปกรณ์แสง โดยแต่ละรูจะมีขนาด 6 มิลลิเมตรมีระยะห่างกัน 25 มิลลิเมตรและออกแบบให้โต้ะแสงมีความหนา 12.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 32

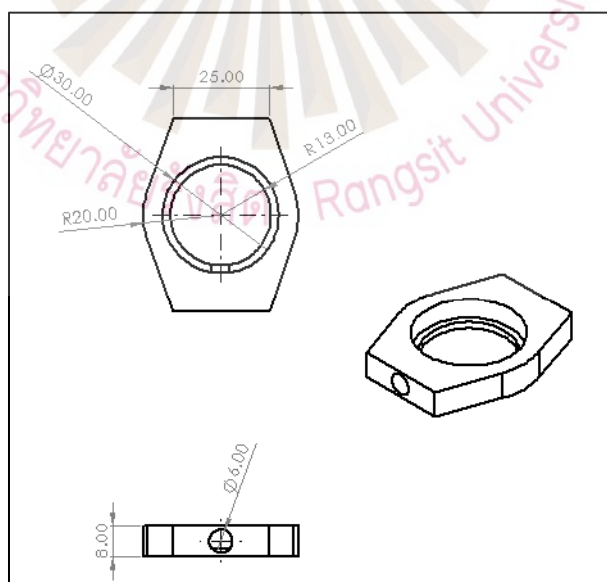


รูปที่ 32 แสดงชิ้นงานโต้ะแสงที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

1.2.2. ตัวจับเลนส์ขนาดต่าง ๆ เนื่องจากในการเรียงแสงนั้นอาจจะมีการใช้เลนส์ที่มีขนาดแตกต่างกันไป ทำให้ต้องมีการออกแบบตัวจับเลนส์ที่มีขนาดพอดีกับตัวเลนส์เพื่อป้องกันไม่ให้เลนส์หลุดออกมาจากตัวจับเลนส์ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตรและ 50 มิลลิเมตร

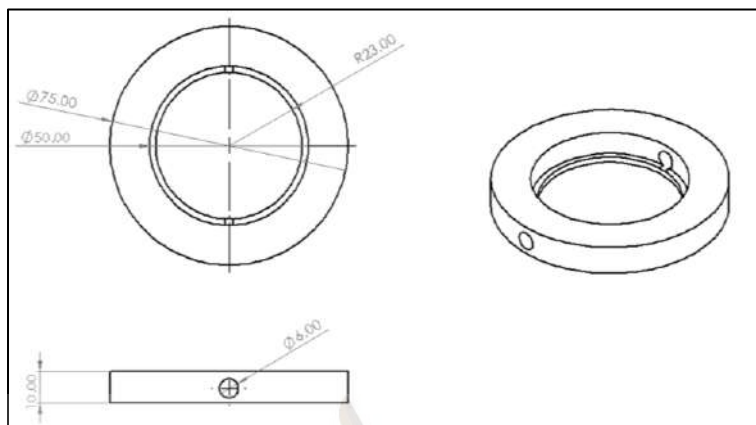


รูปที่ 33 แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 20 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019



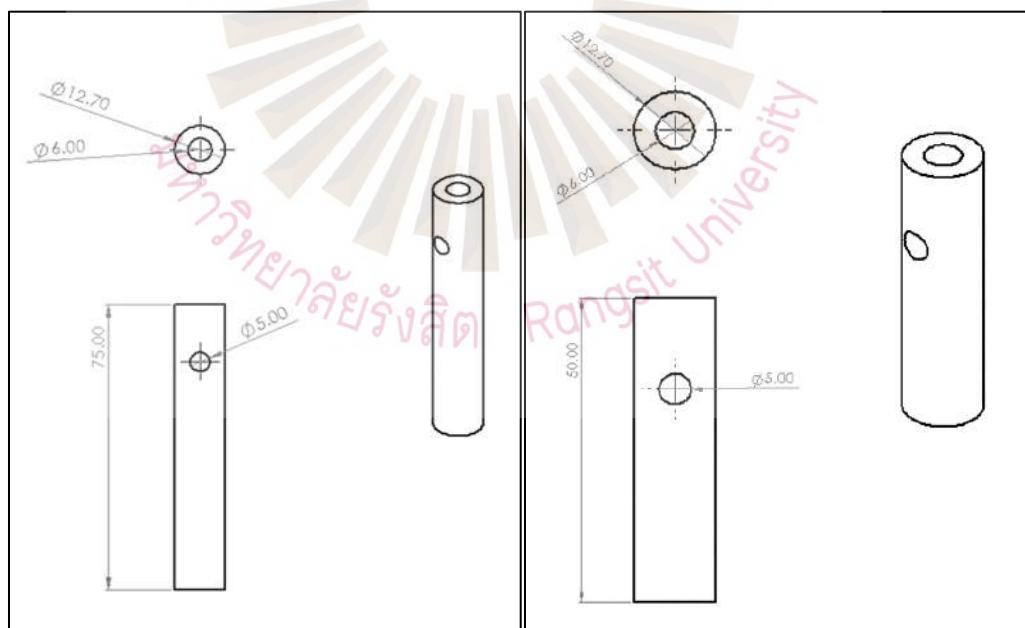
รูปที่ 34 แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 30 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019





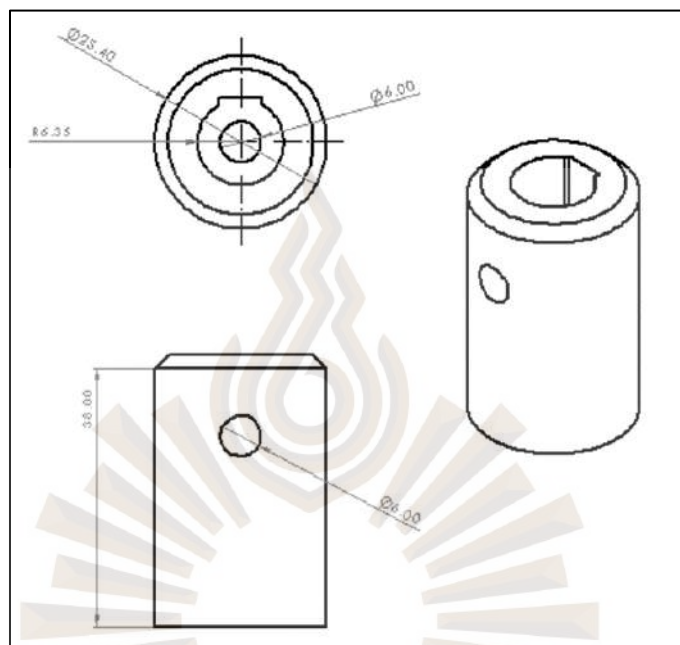
รูปที่ 35 แสดงชิ้นงานตัวจับเลนส์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

1.2.3. เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ เนื่องจากเลนส์ที่ใช้แต่ละชิ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน มีขนาดตั้งแต่ 12.4 มิลลิเมตร จนถึง 50 มิลลิเมตร เสาวางอุปกรณ์จึงต้องถูกออกแบบให้มีความสูงที่แตกต่างกันเพื่อจะให้จุดศูนย์กลางของเลนส์แต่ละตัวที่ถูกนำมาเรียงแสงอยู่ในระนาบเดียวกัน ความสูงของเสาวางอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบ ได้แก่ 50 75 และ 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 36 แสดงชิ้นงานเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูง 50 และ 75 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

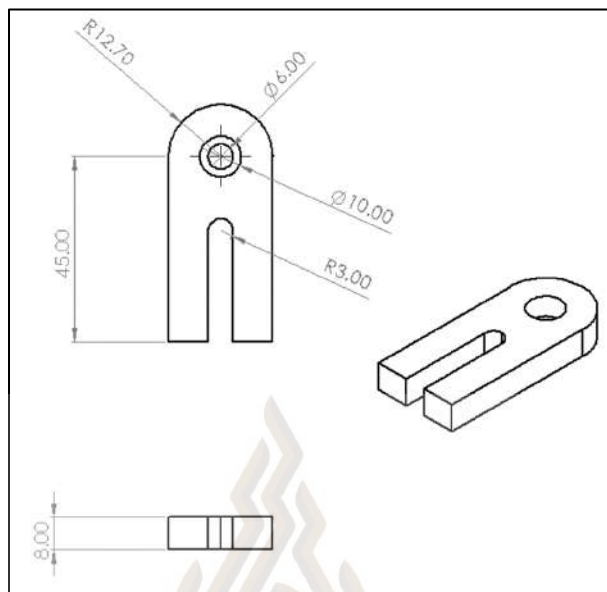
1.2.4. ที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร ที่จับเสาสามารถช่วยให้การเรียงแสงโดยการใช้เลนส์มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากที่จับเสาช่วยให้เราสามารถขยับ ปรับความสูงของเสา วางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ทำให้จุดศูนย์กลางของเลนส์แต่ละตัวที่ถูกนำมาเรียงแสงอยู่ในระนาบเดียวกัน



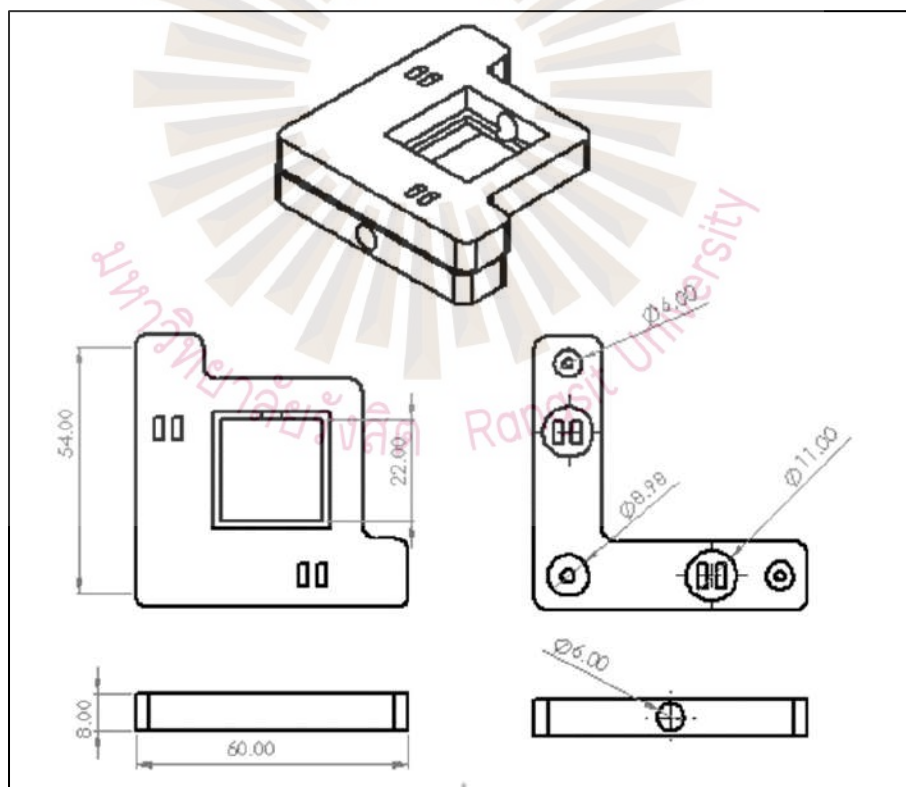
รูปที่ 37 แสดงชิ้นงานที่จับเสาความสูง 40 มิลลิเมตรที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

1.2.5. ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์และที่จับเสากับแผ่นวางอุปกรณ์แสงเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเรียงแสงเกิดการขยับของอุปกรณ์ซึ่งอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการเรียงแสงได้ ดังรูปที่ 38

1.2.6. อุปกรณ์จับกระจกขนาด 25.4 มิลลิเมตร ในการเรียงแสงบนแผ่นวางอุปกรณ์แสง ที่มีพื้นที่จำกัด การใช้กระจกเป็นการลดพื้นที่ที่ใช้ในการเรียงแสงโดยการใช้กระจกสะท้อนแสงเพื่อเปลี่ยนทิศทางของแสง ในการใช้กระจกบังคับทิศทางของแสงต้องมีการควบคุมทิศทางของแสงเพื่อไปในทิศทางที่เราต้องการ ผู้วิจัยจึงออกแบบให้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถปรับทิศทางของหน้ากระจกได้ ดังรูปที่

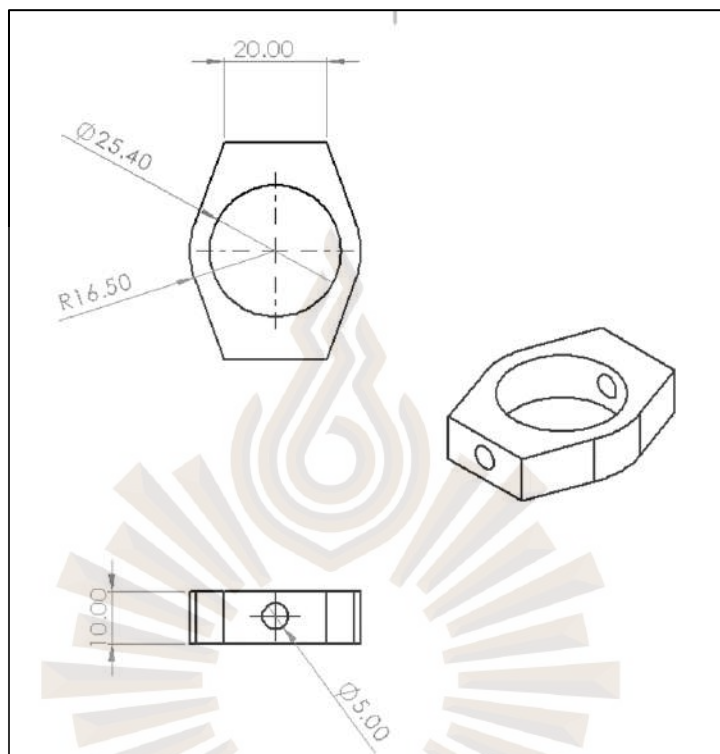


รูปที่ 38 แสดงชิ้นงานที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019



รูปที่ 39 แสดงชิ้นงานอุปกรณ์จับกระจกออกที่ออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

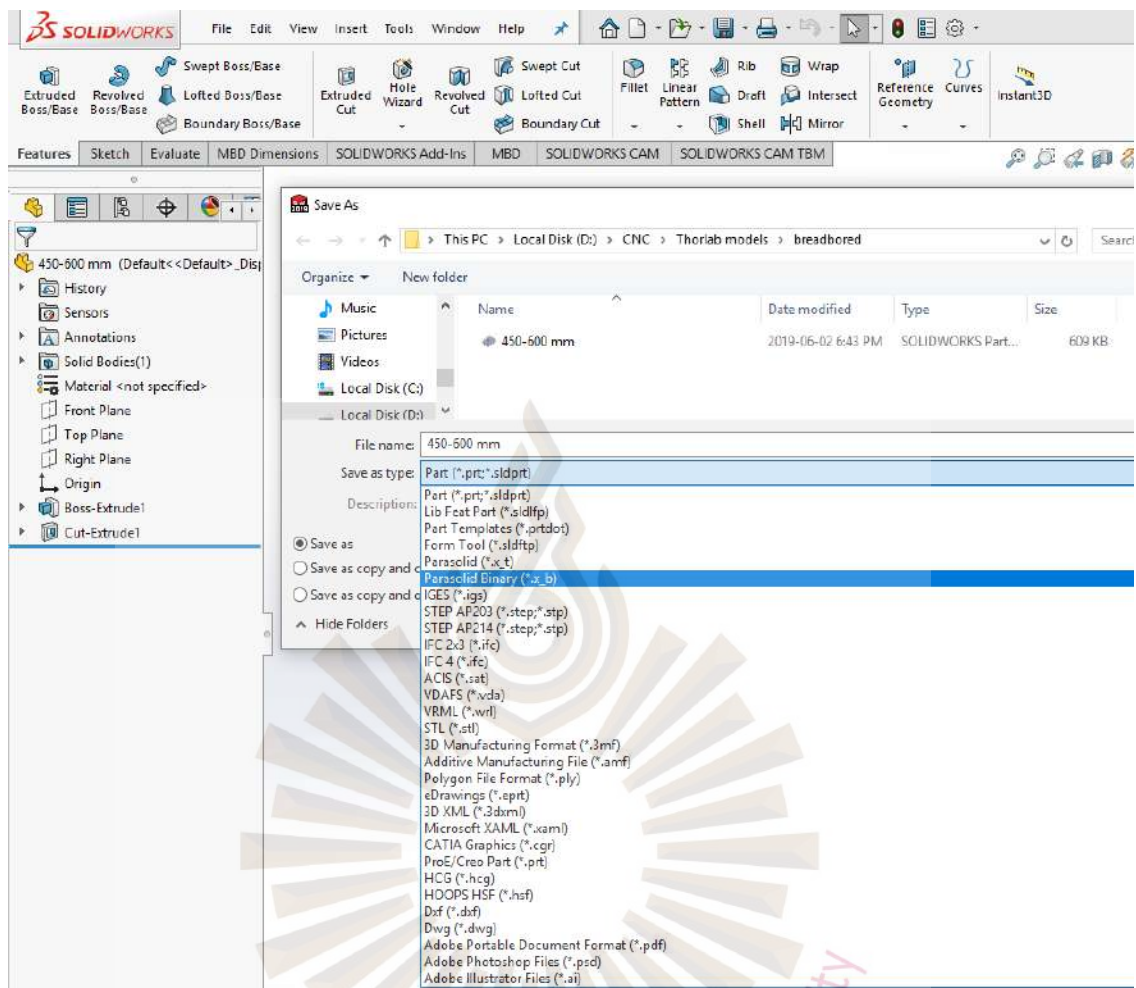
### 1.2.7. ที่จับเลนส์ใกล้วัตถุ ใช้สำหรับจับตัวเลนส์ใกล้วัตถุ



รูปที่ 40 แสดงชิ้นงานที่จับเลนส์ใกล้วัตถุออกแบบบนโปรแกรม SolidWorks 2019

1.3. สร้างไฟล์สั่งคำสั่งในการควบคุมการทำงานของเครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ด้วยโปรแกรม Mastercam X5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนและอุปกรณ์ 3 มิติ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานกับเครื่องจักร CNC ได้ โปรแกรม Mastercam X5 จะถูกใช้ในการควบคุมเครื่องจักร CNC ในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยการกัดขึ้นรูปชิ้นงานจากการควบคุมการเคลื่อนที่และการเลือกใช้ลักษณะของดอกกัดประเภทต่าง ๆ ผ่านการสร้างไฟล์ G-code ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสั่งและควบคุมการทำงานของเครื่องจักร CNC

หลังจากผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงทัศนูปกรณ์ ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการเรียงแสงแล้วนั้น การบันทึกไฟล์บนโปรแกรม SolidWorks 2019 มีการบันทึกเป็นไฟล์ประเภท Parasolid Binary(\*.x\_b) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้ในโปรแกรม Mastercam X5 ดังรูปที่ 41

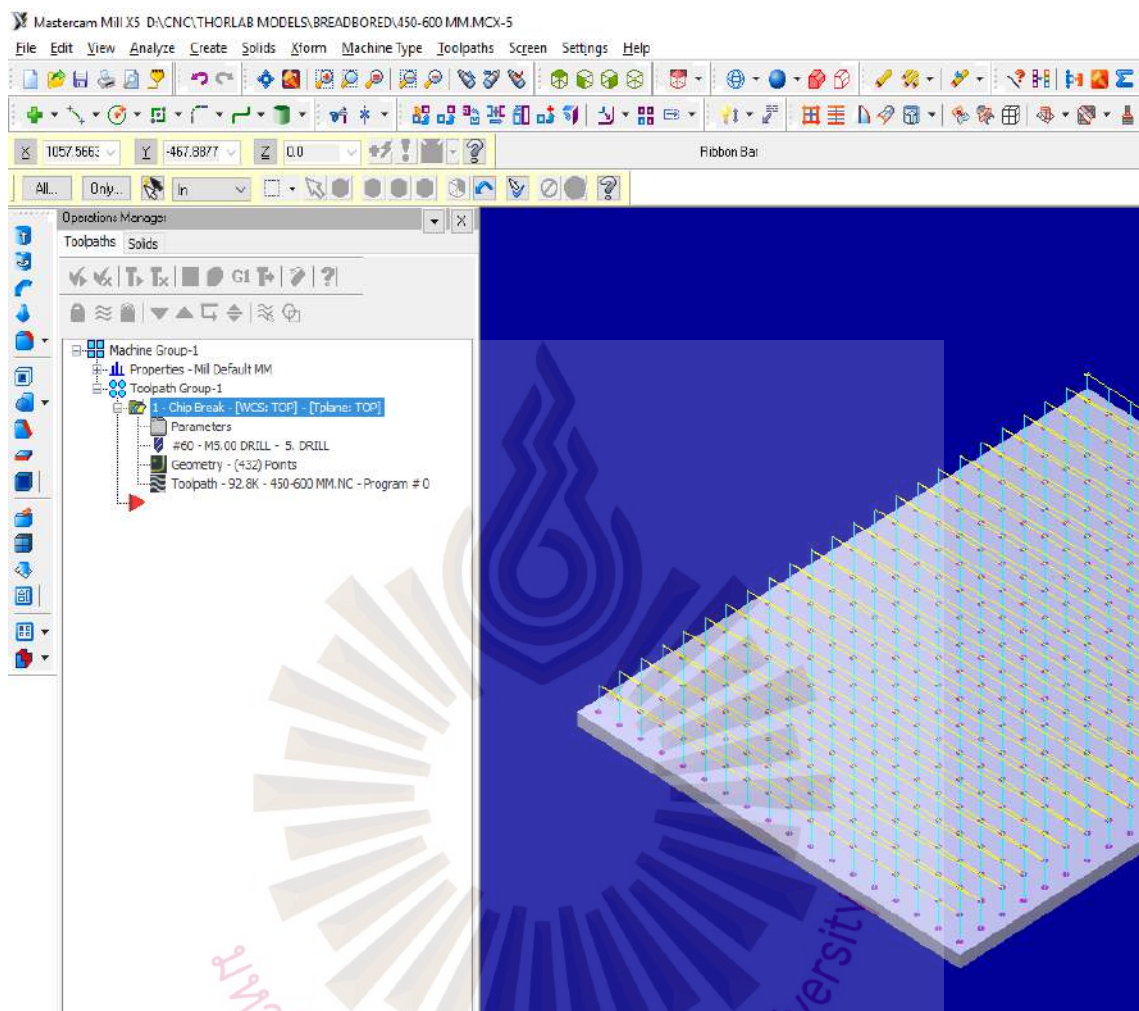


รูปที่ 41 แสดงการบันทึกไฟล์ชิ้นงานบนโปรแกรม SolidWorks 2019 เป็นไฟล์ประเภท Parasolid Binary (\*.x\_b)

ไฟล์ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ 3 มิติประเภท Parasolid Binary (\*.x\_b) สามารถเปิดใช้งานได้ในโปรแกรม Mastercam X5 ดังนั้นผู้วิจัยสามารถสร้างไฟล์คำสั่งควบคุมการทำงานของเครื่องจักร MiniCNC ซึ่งมีรายละเอียดของการสร้างอุปกรณ์และชิ้นงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

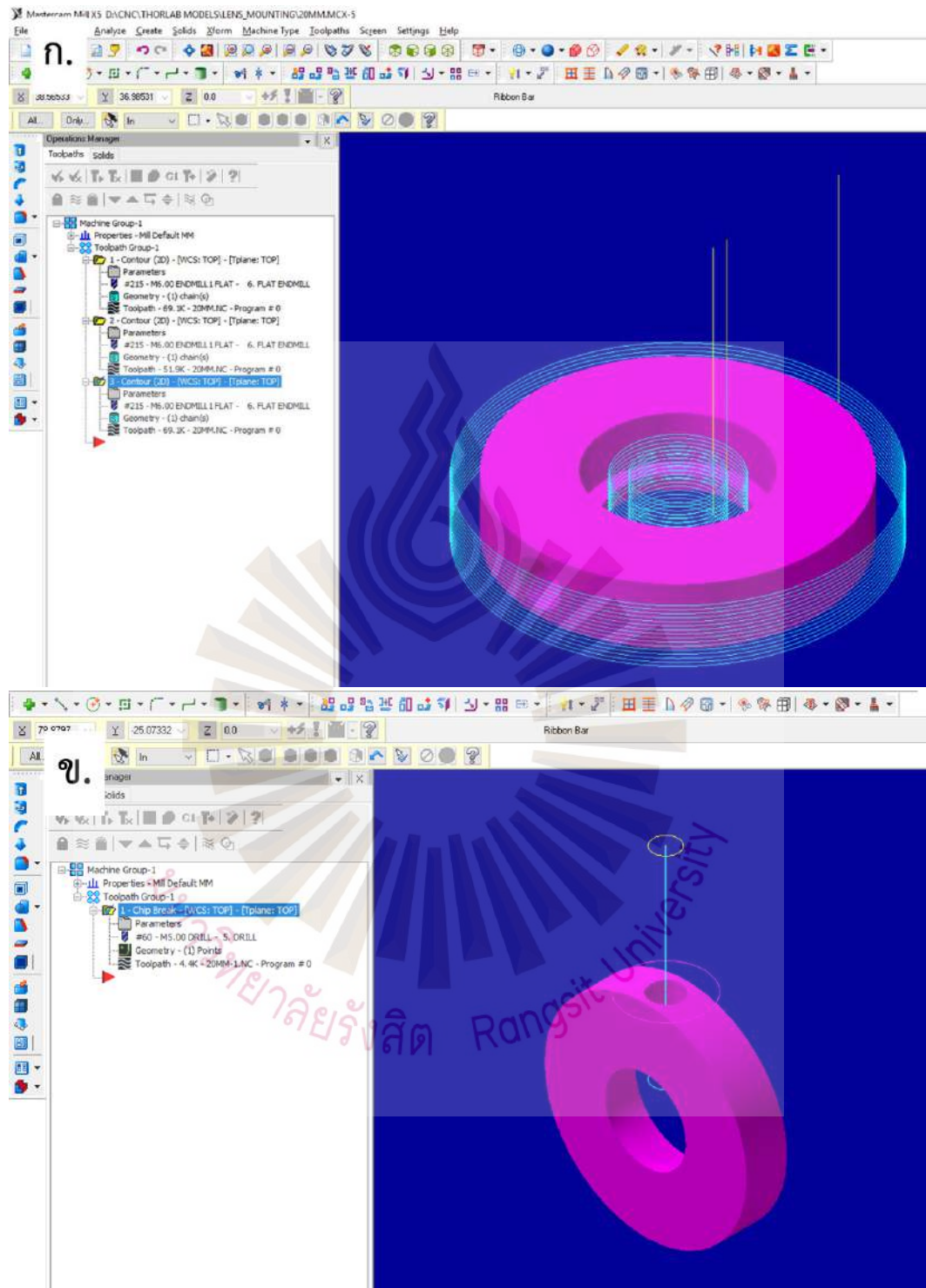
1.3.1. แผ่นวางอุปกรณ์แสง ในการสร้างแผ่นวางอุปกรณ์แสง ผู้วิจัยเลือกใช้ดอกเจาะที่มีขนาด 5 มิลลิเมตร (M5) เจาะลงไปแบบ Chip Break โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนของดอกเจาะ 6000 รอบ/นาที ตามรูของแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่ออกแบบไว้และนำไปสร้างเกลียวโอบการใช้ดอกตัดาขนาด 6 มิลลิเมตรต่อไป ดังรูปที่ 42



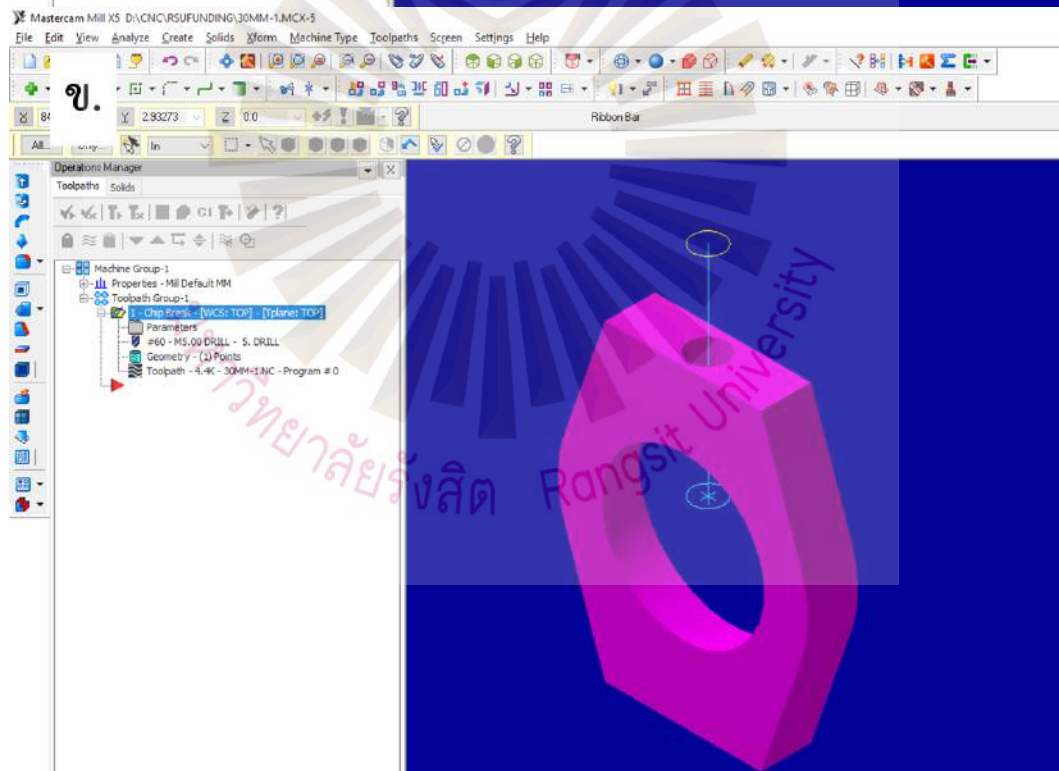
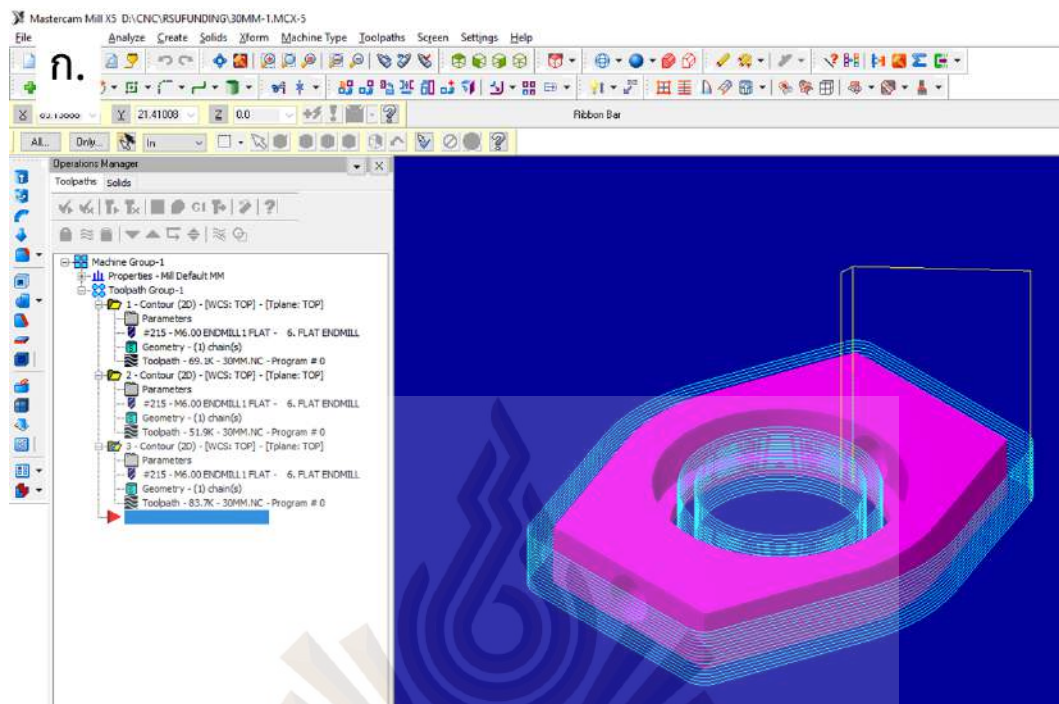


รูปที่ 42 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปแผ่นวางอุปกรณ์แสงบนโปรแกรม Mastercam X5

1.3.2. ตัวจับเลนส์ขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตรและ 50 มิลลิเมตร ผู้วิจัยเลือกใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์แบบ 4 ฟันโดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนของดอกเจาะ 12000รอบ/นาที ในการกัดขึ้นรูปชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบและเจาะรูสำหรับใส่สกรูในการยึดเลนส์และสำหรับยึดกับเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ดังรูปที่ 43 44 และ 45

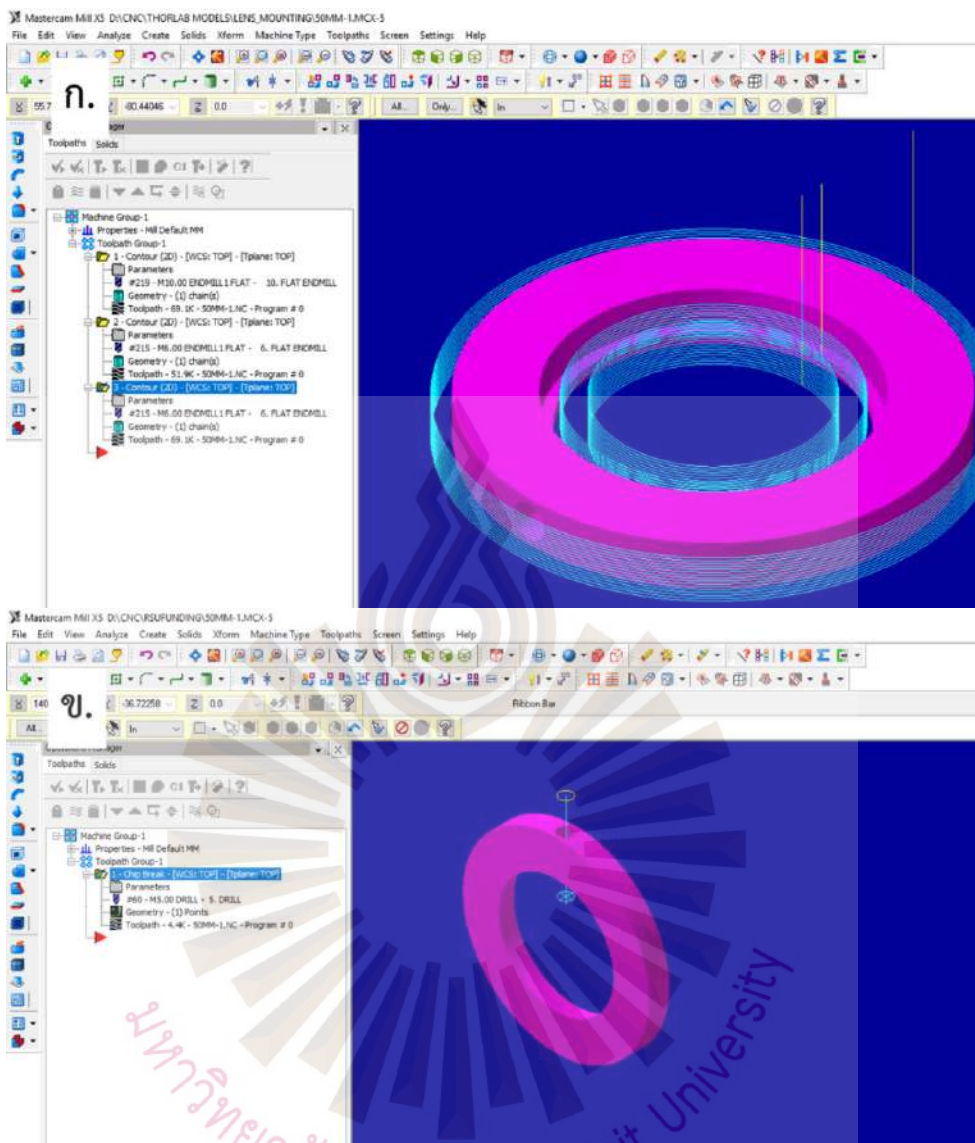


รูปที่ 43 ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 20 มิลลิเมตรและ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5



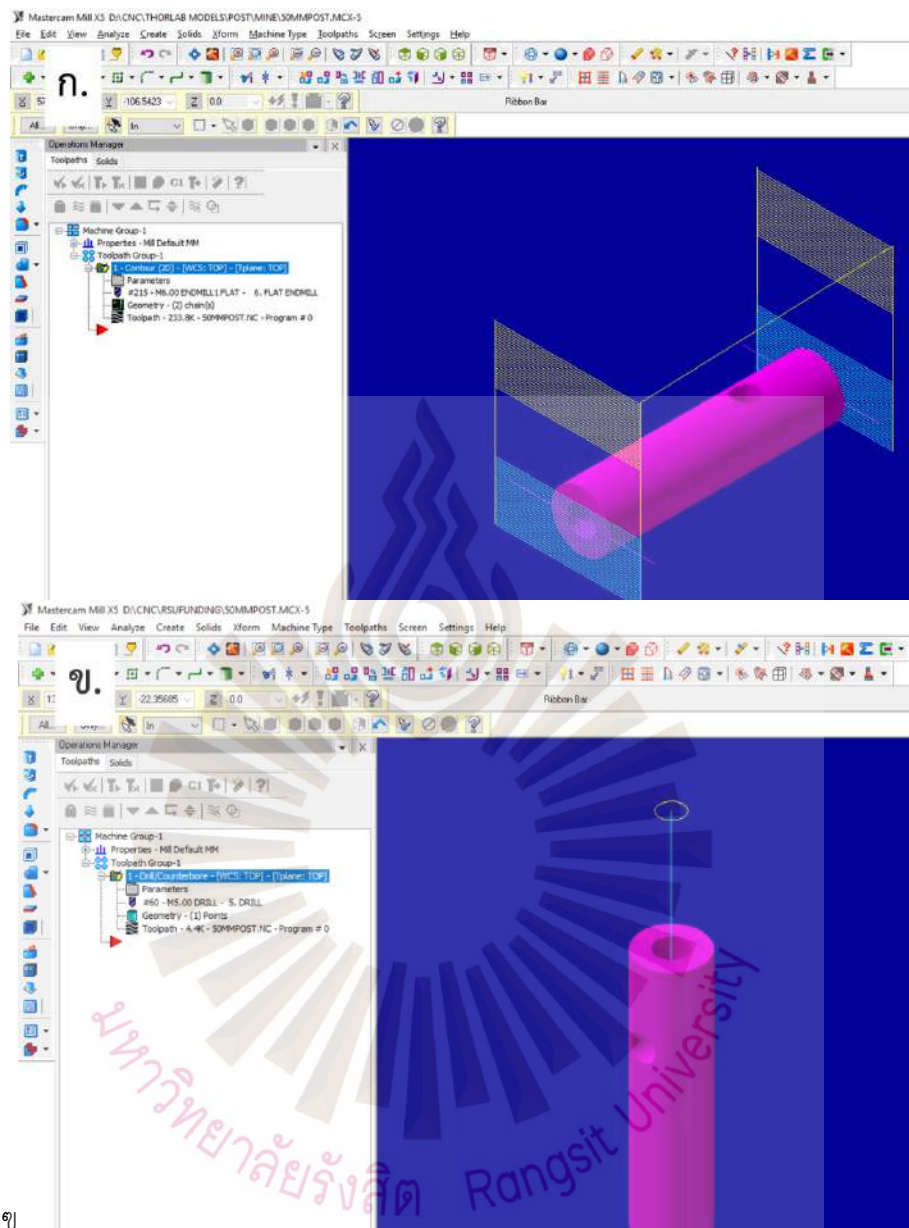
รูปที่ 44 ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 30 มิลลิเมตร และ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5





รูปที่ 45 ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นรูปตัวจับเลนส์ขนาด 50 มิลลิเมตรและ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5

1.3.3. เสาวงามอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ ในอุปกรณ์ชิ้นนี้ต้องมีการตัดแต่งอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ตามความยาวที่ต้องการได้แก่ 50 75 และ 100 มิลลิเมตร โดนการใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์ขนาด 6 มิลลิเมตร ก่อนนำมาเจาะรูที่บริเวณกลางแท่งอลูมิเนียมสำหรับสร้างเป็นเกลียวโนโดยการตีไปด้วยดอกตีขนาด 6 มิลลิเมตร (M6) เพื่อใช้ในการยึดตัวจับเลนส์ดังรูปที่ 46

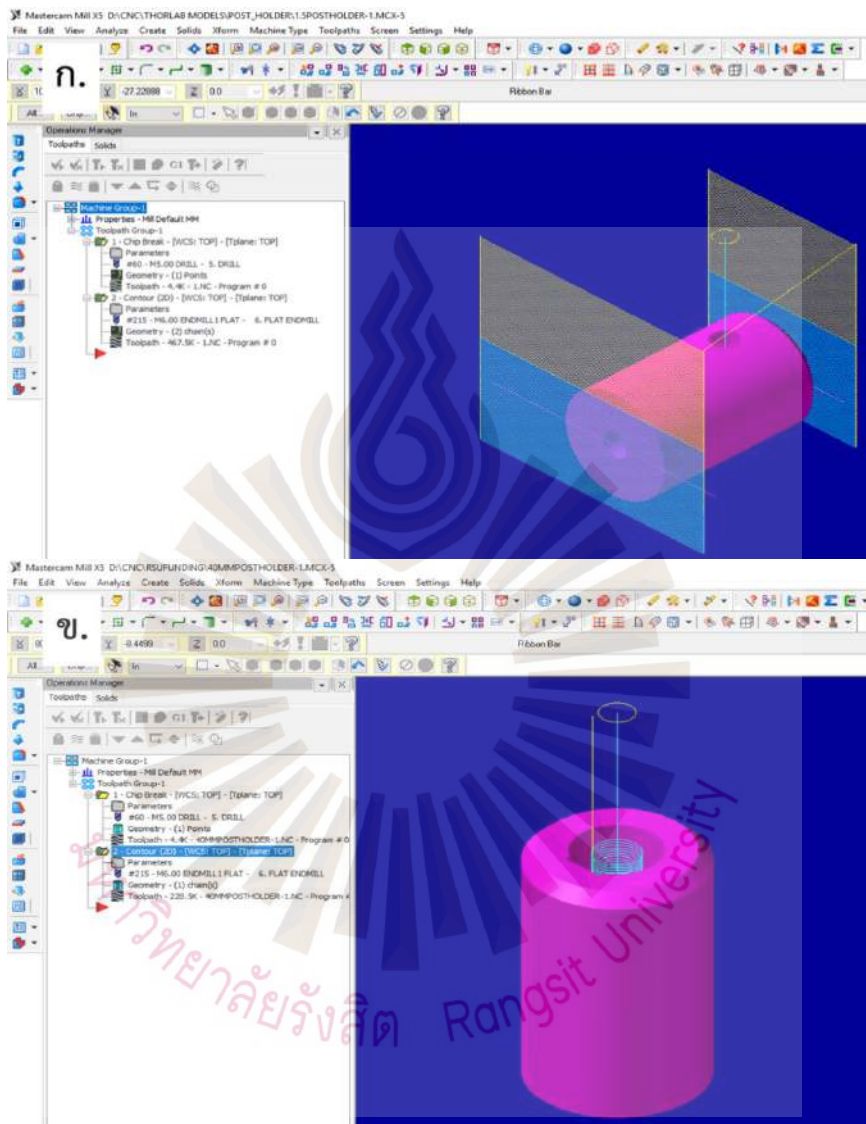


รูปที่ 46 ก. แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดขึ้นเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ  
และ ข. เจาะรูบนโปรแกรม Mastercam X5

1.3.4. ที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร อุปกรณ์ชนิดนี้ต้องมีการตัดแต่งอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ให้มีความยาวที่ต้องการได้แก่ 40 มิลลิเมตร รวมถึงเจาะรูขนาด 5 มิลลิเมตร(M5) สำหรับสร้างเกลียวสำหรับใส่กรูสำหรับยึดเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ดังรูปที่ 47 ก.



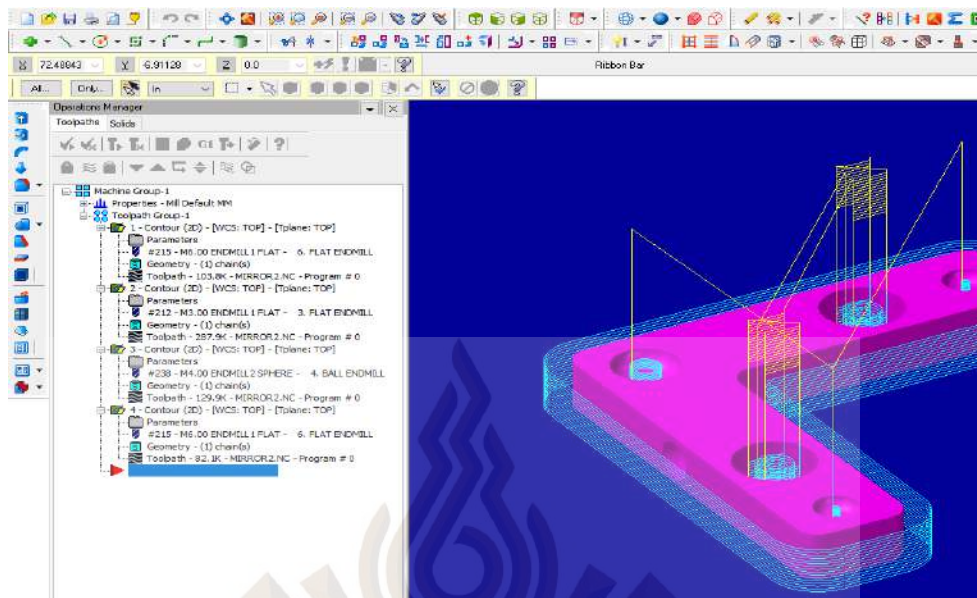
หลังจากนั้นอุปกรณ์ชิ้นนี้จะถูกกัดในลักษณะถูกขุดสำหรับเป็นช่องสำหรับใส่เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ดังรูปที่ 48 ข.



รูปที่ 47 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร

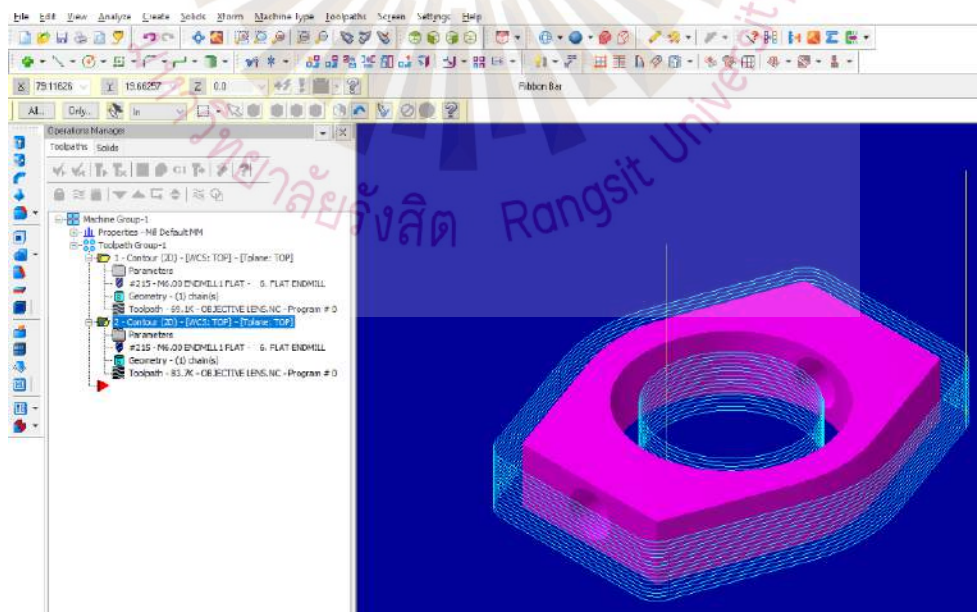
1.3.5. ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง จะเป็นการกัดขึ้นรูปตามที่ออกแบบจากโปรแกรม SolidWorks 2019 โดยการใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์ขนาด 6 มิลลิเมตร (M6) และเจาะรูด้วยดอกสว่านขนาด 5 มิลลิเมตรเพื่อสำหรับสร้างเกลียวเพื่อใส่กรูในการยึดที่จับเสากับแผ่นวางอุปกรณ์แสง ดังรูปที่ 48





รูปที่ 50 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดอุปกรณ์จักรกลส่วนล่างบนโปรแกรม MastercamX5

1.3.7. ที่จับเลนส์แก้ววัตถุ ในส่วนนี้จะเป็นการกัดขึ้นรูปตามชิ้นส่วนที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม SolidWorks 2019 โดยใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์ขนาด 6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 51



รูปที่ 51 แสดงการออกแบบขั้นตอนการกัดที่จับเลนส์แก้ววัตถุบนโปรแกรม MastercamX5

## 2. ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานโต๊ะแสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ด้วย เครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z

2.1. วัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ คือ อลูมิเนียมอัลลอยด์เบอร์ 5083 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมอัลลอยด์เบอร์ 5083 [50]

คุณสมบัติ	ปริมาณ
ความหนาแน่นของอลูมิเนียม (กิโลกรัม/ปริมาตร)	2650
มอดูลัสของยัง (Young's modulus) (Gpa)	72
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	$25 \times 10^{-6}/K$
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (W/m.K)	121
สภาพการต้านทานไฟฟ้า	$0.058 \times 10^{-6} \Omega.m$
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	570

อลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 ประกอบไปด้วยธาตุแมกนีเซียม โครเมียม และแมงกานีส ในสัดส่วนที่แตกต่างกันไปในแต่ละผู้ผลิต อลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 เป็นอลูมิเนียมประเภทที่ไม่สามารถทำการอบร้อนหลังการเชื่อมได้ (non-heat-treatable) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กรีดแบน เป็นอลูมิเนียมชนิดที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและมีความแข็งแรงสูง นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับทะเล เช่น โครงสร้างของเรือ คุณสมบัติของอลูมิเนียม 5083 ในด้านต่างๆ ได้แก่

### 2.1.1. สภาพความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียม 5083

อลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 เป็นอลูมิเนียมชนิดที่สามารถทนการกัดกร่อนในสถานะต่าง ๆ ได้ดี ทั้งในกระบวนการของอุตสาหกรรมอาหารหรือทางสถาปัตยกรรม แต่ในส่วนมากอลูมิเนียมชนิดนี้ นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทางทะเล เนื่องจากทนสภาพในระบบนิเวศทางทะเลได้ดี แต่เนื่องจากอลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 มีส่วนผสมของธาตุแมกนีเซียม อาจทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากเกิดความอ่อนแอจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนในอุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส

### 2.1.2. สภาพต้านทานความร้อนของอลูมิเนียม 5083

อลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 เป็นอลูมิเนียมที่ไม่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยความร้อน ซึ่งเกิดการอ่อนตัวของอลูมิเนียมแทน แต่ความแข็งแรงของโลหะสามารถเสริมสร้างได้ด้วยความเย็น ซึ่งเป็น



กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำๆ ตัวอย่างเช่นในกระบวนการรีดเย็น เพื่อให้ได้โลหะที่มีขนาดแน่นอนและผิวเรียบ ผลที่ได้จากกระบวนการนี้จะได้แผ่นอลูมิเนียมที่มีผิวเรียบและเป็นมัน

### 2.1.3. ความสามารถในการเชื่อมโลหะ

อลูมิเนียมอัลลอยด์ 5083 มีความสามารถในการนำมาเชื่อมได้ดีในกระบวนการเชื่อมแบบการเชื่อมต้านทานซึ่งเป็นการเชื่อมโลหะโดยการสร้างความร้อนจากการผ่านของกระแสไฟฟ้าบนโลหะที่มีความต้านทานโดยเฉพาะบริเวณมีความต้านทานสูง ๆ ได้แก่ บริเวณที่สัมผัสกันของโลหะ ทำให้เกิดการหลอมละลายและเกิดการเชื่อมกัน

2.1.4. กระบวนการขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนเนื้อวัสดุออกจะไม่ค่อยดีนักเนื่องจากวัสดุมีความแข็งแรงสูง [51]

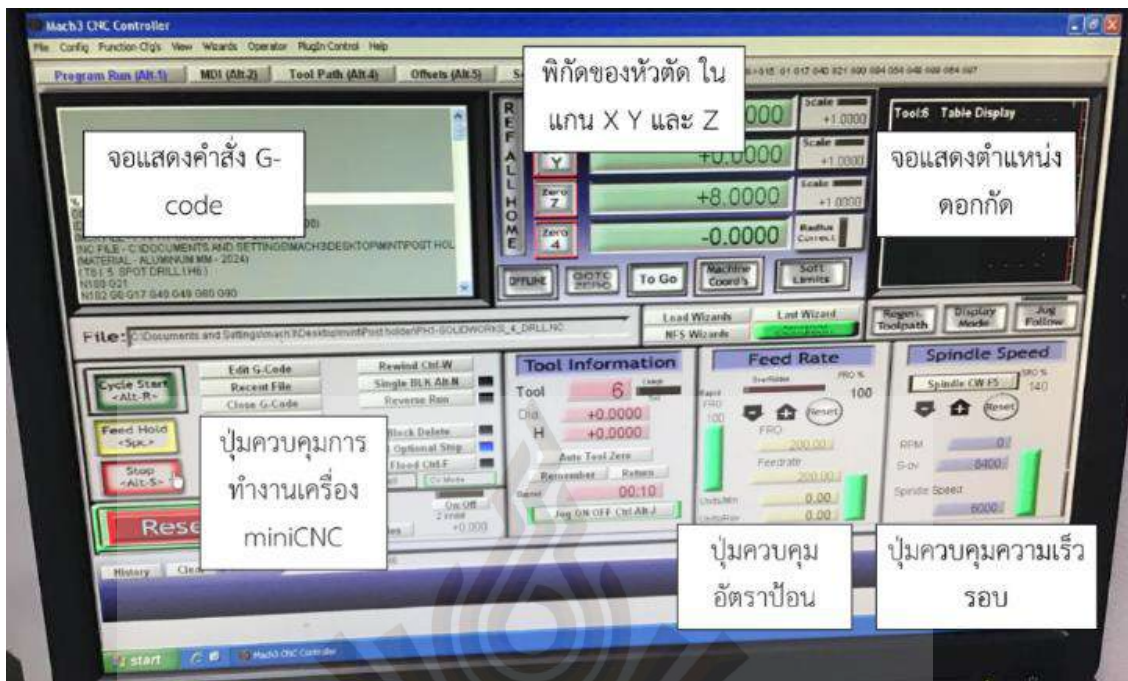
2.2. การควบคุมการทำงานของ เครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ผ่านโปรแกรม Mach 3 โดยโปรแกรม Mach 3 จะเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง MiniCNC ที่สามารถควบคุมได้ด้วยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยการสั่งงานผ่านคีย์บอร์ดให้เครื่องเดินไปในทิศทางต่าง ๆ ได้แก่ ขึ้น-ลง และซ้าย-ขวา ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ Manual และควบคุมด้วยชุดคำสั่งจาก G-code ซึ่งเป็นภาษาที่สร้างขึ้นได้จากโปรแกรม Mastercam ที่ประกอบไปด้วยคำสั่งที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง MiniCNC อัตโนมัติ ตามรูปแบบที่ได้สร้างไว้บนโปรแกรม MasterCam X5

2.2.1. การควบคุมแบบ Manual เป็นการควบคุมการขึ้น - ลง ซ้ายขวาของหัวจับดอกของเครื่อง รวมถึงการควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ของที่จับดอกและอัตราการหมุนของดอกหรือที่เรียกว่าความเร็วรอบ (Spindle speed) ผ่านหน้าต่างควบคุม ดังรูปที่ 52

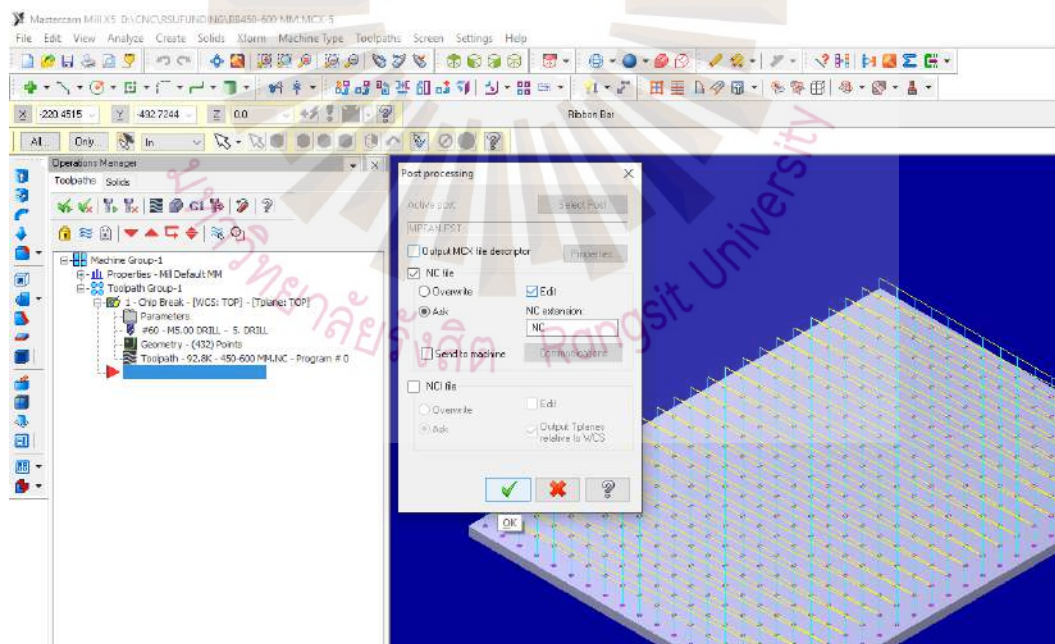
2.2.2 การควบคุมโดยคำสั่งไฟล์ G-code หลังจากการสร้างรูปแบบของการกัดชิ้นงานบนโปรแกรม Mastercam X5 แล้ว โปรแกรม Mastercam X5 สามารถสร้างไฟล์คำสั่ง G-code จากการสร้างไฟล์ .NC ดังรูปที่ 53

ไฟล์ประเภท .NC สามารถเปิดอ่านได้บนโปรแกรม Mach3 และคำสั่งจะปรากฏบนหน้าต่างของโปรแกรม เมื่อกดปุ่ม Cycle start โปรแกรม Mach 3 จะทำการควบคุมเครื่อง Mini CNC ตามคำสั่งบนไฟล์ โดยไล่อ่านไปที่ละบรรทัดคำสั่ง จนครบทุกบรรทัด





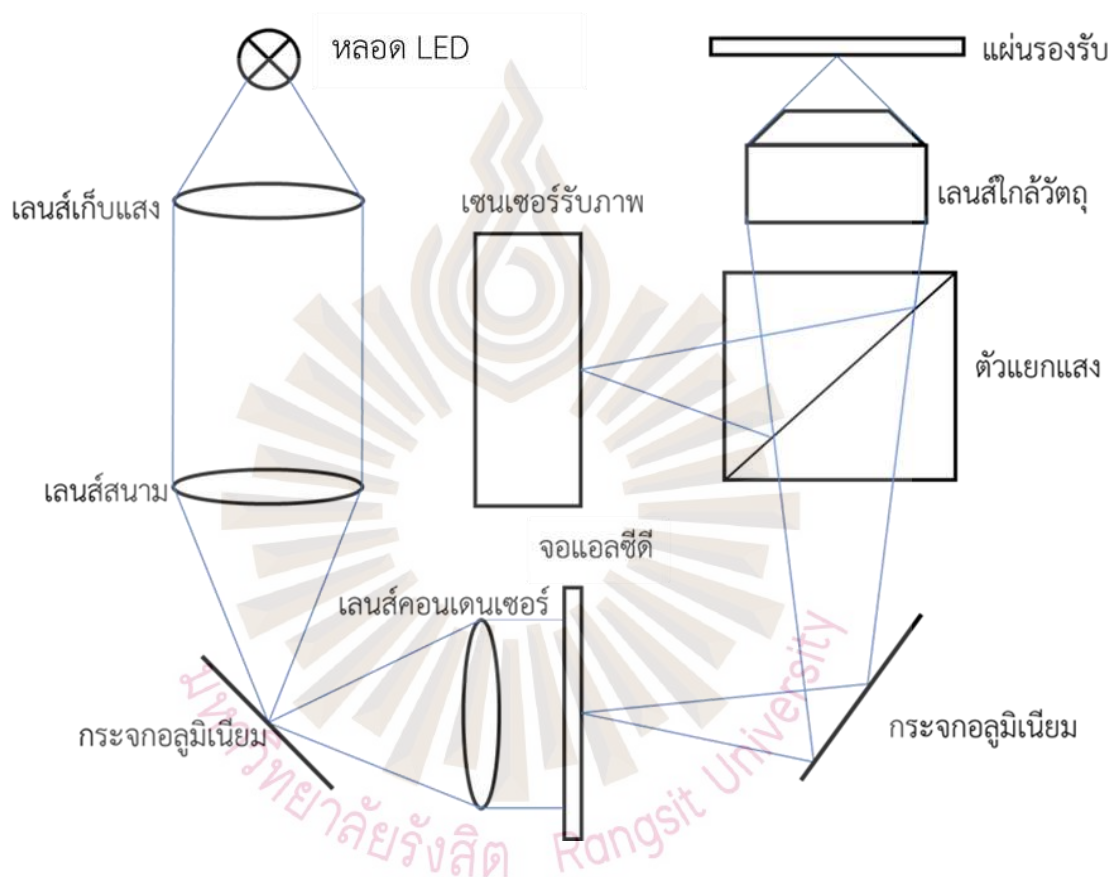
รูปที่ 52 แสดงหน้าต่างโปรแกรม Mach 3 ซึ่งควบคุมการทำงานของเครื่อง MiniCNC



รูปที่ 53 การสร้างไฟล์คำสั่ง G-code ผ่านโปรแกรม Mastercam X5

### 3. ขั้นตอนการคำนวณและออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก

3.1. การออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ระบบส่องสว่างแบบโคเคลอร์ 2) อุปกรณ์ฉายภาพ ได้แก่ จอแอลซีดี 3) เลนส์สำหรับฉายภาพ และ 4) ระบบบันทึกภาพ ดังรูปที่ 54



รูปที่ 54 แสดงทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก

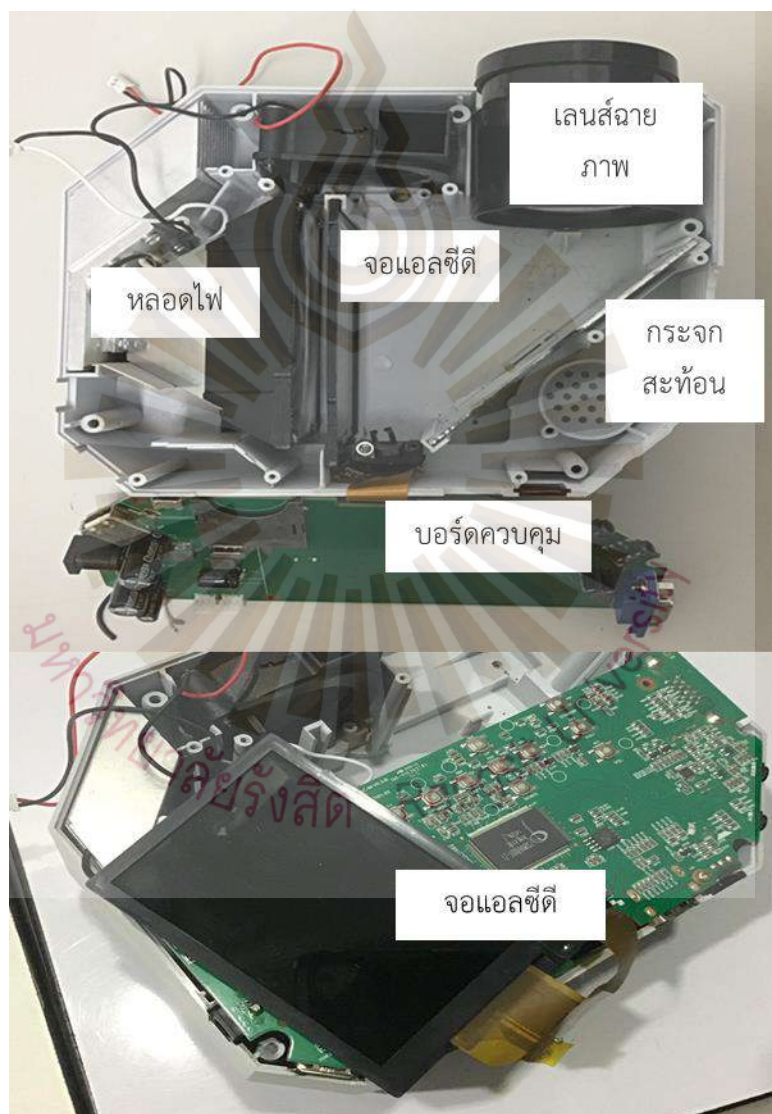
#### 3.1.1. ระบบส่องสว่าง

ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสง ได้มีการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไฟแอลซีดีที่มีกำลังวัตต์สูง (High power LED) และระบบส่องสว่างแบบโคเคลอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยเลนส์นูนจำนวน 3 ชิ้น ได้แก่ เลนส์เก็บรวบรวมแสง เลนส์สนามและเลนส์คอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่ในการจัดเรียงหรือแก้ไข

หน้าคลื่นแสงไม่เท่ากันจากหลอดไฟให้มีหน้าคลื่นแสงที่เท่ากันทุกจุดก่อนตกกระทบหรือส่องลงบนตัวอย่าง

### 3.1.2. จอแอลซีดี

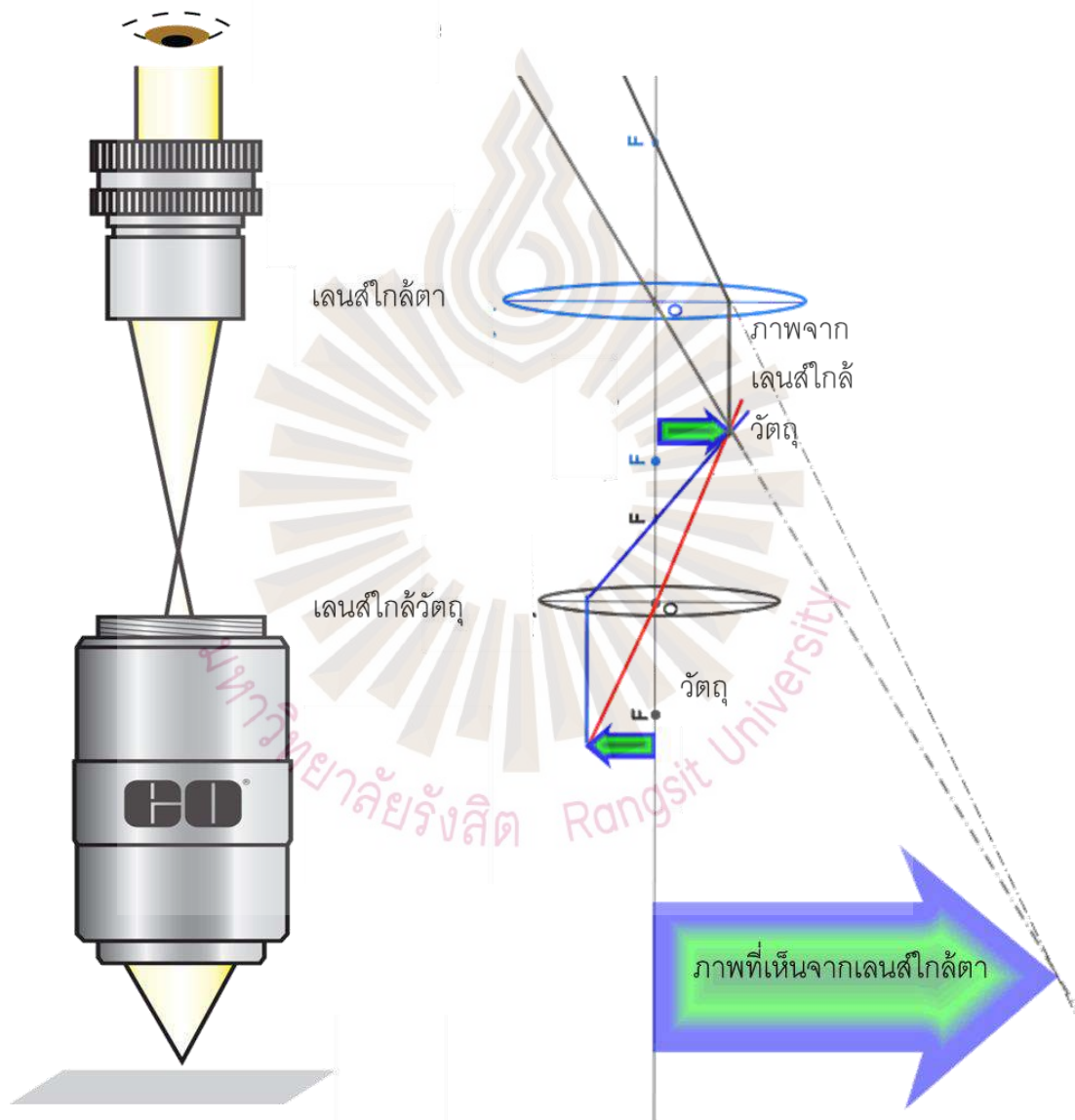
ผู้วิจัยเลือกใช้จอแอลซีดีที่อยู่ระบบของอุปกรณ์ฉายภาพหรือเรียกว่า โปรเจคเตอร์ ดังรูปที่ 55 โดยที่จอแอลซีดีมีขนาดพิกเซล พิกเซลละ 100 ไมครอน การควบคุมภาพที่ฉายบนจอแอลซีดีนั้นควบคุมด้วยการแสดงภาพบนคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 55



รูปที่ 55 ก. แสดงส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์โปรเจคเตอร์ฉายภาพ และ ข. แสดงลักษณะจอแอลซีดี

### 3.1.3. เลนส์สำหรับฉายภาพ

ในการฉายภาพบนจอแอลซีดีลงบนแผ่นรองรับ ผู้วิจัยเลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์ใกล้ตา วัตถุเป็นอุปกรณ์ชิ้นสำคัญของกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถขยายภาพที่มีขนาดเล็ก ๆ ให้มองเห็นได้ผ่านเลนส์ใกล้ตา ดังรูปที่ 56

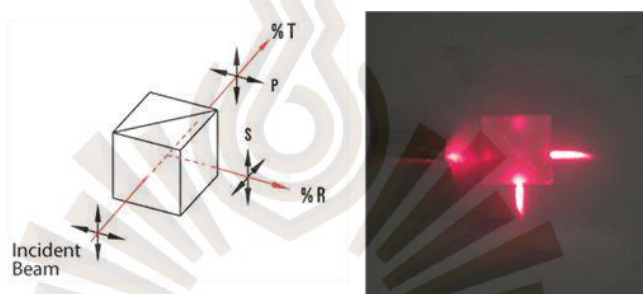


รูปที่ 56 แสดงการทำงานของเลนส์กล้องจุลทรรศน์



### 3.1.4. ระบบบันทึกภาพ

ในการถ่ายภาพลงบนแผ่นรองรับตำแหน่งของภาพที่ต้องการถ่ายก็ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นเดียวกัน ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาระบบกล้องจุลทรรศน์โพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ที่สามารถบันทึกภาพที่เกิดขึ้นบนแผ่นรองรับได้ ในส่วนระบบนี้ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มทัศนอุปกรณ์ ที่มีชื่อว่า ตัวแยกแสง (Beam splitter) ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแบ่งแยกแสงที่เข้ามาออกเป็น 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางของการส่องผ่านและทิศทางของการสะท้อน ดังรูปที่ 61 ซึ่งจำนวนแสงที่จะถูกแบ่งไปในแต่ละทิศทางจะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวแยกแสง เช่น ส่องผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์และ สะท้อน 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น



รูปที่ 57 แสดงลักษณะของตัวแยกแสง

ในส่วนของตัวรับข้อมูลผู้วิจัยเลือกใช้เป็นเซนเซอร์รับภาพประเภท CMOS จากกล้อง digital single lens reflex (DHLR) เป็นกล้องสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิทัลแคนนอน รุ่น EOS 50D ภายในประกอบด้วยเซนเซอร์รับภาพ ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติและลักษณะของกล้องดิจิทัล แคนนอน รุ่น EOS 50D

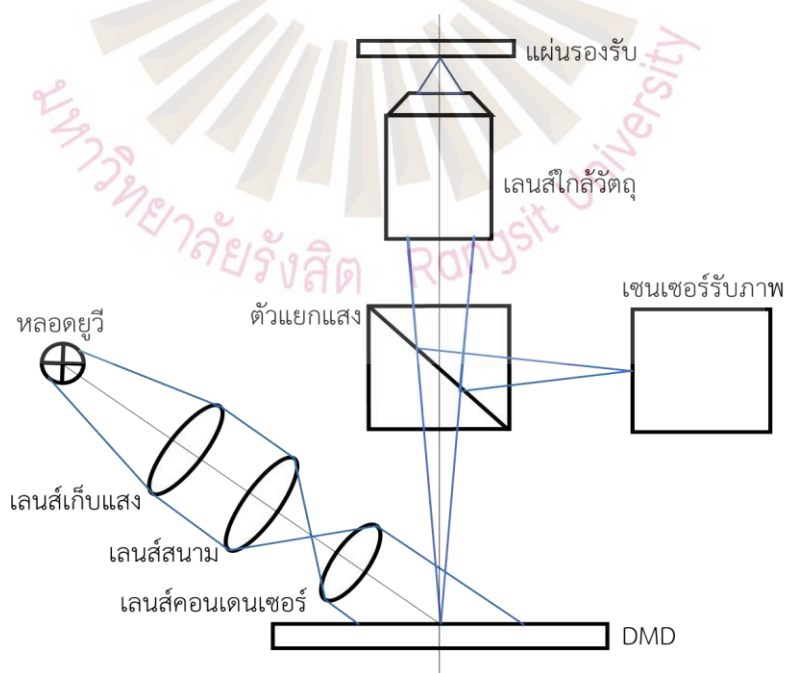
ประเภทเซนเซอร์	CMOS
ความละเอียดภาพสูงสุด	4752 x 3168 (15.1 เมกะพิกเซล)
ขนาดเซนเซอร์รับภาพ	22.3x14.9 มิลลิเมตร
อัตราส่วนขนาด	3:2
ความหนาแน่นของพิกเซล	4.5 เมกะพิกเซล/ตารางเซนติเมตร
ขนาดของพิกเซลแต่ละพิกเซล	4.99 ไมครอน
ระบบกรองสี	RGB
ประเภทไฟล์	JPEG, RAW (14-bit, Canon original), sRAW, RAW+JPEG





รูปที่ 58 กล้อง DHLR ที่ใช้เป็นส่วนบันทึกภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์

3.2. การออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับถ่ายภาพโดยใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แทนโฟโตมาส์ก จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ระบบส่องสว่าง อุปกรณ์ถ่ายภาพ เลนส์สำหรับถ่ายภาพ และระบบบันทึกภาพ ดังรูปที่ 59 ผู้วิจัยได้ทำการดัดแปลงระบบให้มีการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน เนื่องจากอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน มีขนาดพิกเซลที่เล็กถึง 5.5 ไมครอนซึ่งเล็กกว่าพิกเซลบนจอแอลซีดีถึง 18 เท่า



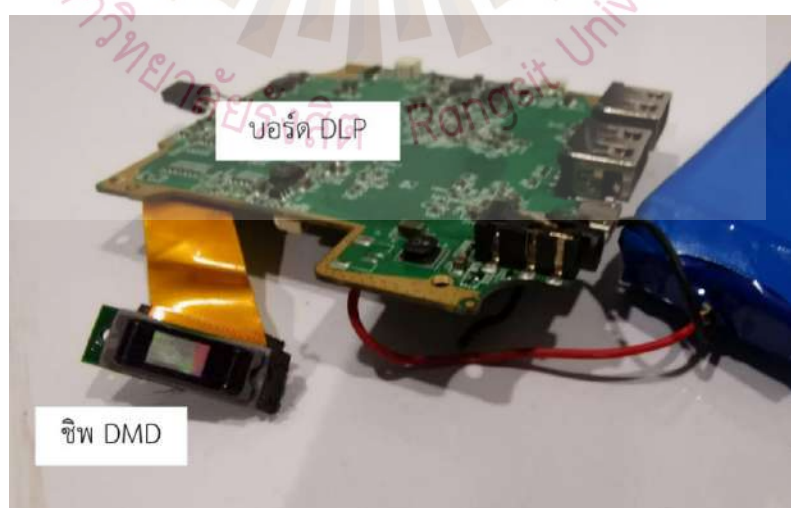
รูปที่ 59 ระบบทางเดินแสงของกล้องจุลทรรศน์สำหรับถ่ายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก

3.2.1. ระบบส่องสว่าง ในส่วนของระบบส่องสว่างจะประกอบไปด้วย หลอดไฟ เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับระบบกล้องจุลทรรศน์ สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก ในระบบผู้วิจัยได้เลือกหลอดไฟแอลอีดีที่ให้แสงที่อยู่ในช่วงของยูวี ได้แก่แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 395-400 นาโนเมตร มีกำลัง 50 วัตต์ และมีระบบส่องสว่างแบบโคเลอร์ ที่แก้ไขหน้าคลื่นแสงไม่เท่ากันจากหลอดไฟให้มีหน้าคลื่นแสงที่เท่ากันทุกจุดก่อนตกกระทบหรือส่องลงบนตัวอย่าง

3.2.2. อุปกรณ์ฉายภาพ ผู้วิจัยเลือกใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ของบริษัท Texas Instrument ซึ่งเป็นอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ของตัว DLP (Digital light Processing) Projector 2010 คุณสมบัติของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แสดงดังตารางที่ 7 และลักษณะของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ดังรูปที่ 59

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน

	คุณสมบัติ
ชื่อรุ่น	DLP2010
ขนาด (ความยาวเส้นทแยงมุม)	5.29 มิลลิเมตร
อัตราส่วน	16:9
ระยะระหว่างกึ่งกลางของแต่ละพิกเซล	5.4 ไมครเมตร
ขนาดอาร์เรย์	854 × 480
มุมในการปรับของกระจก	17°



รูปที่ 60 ลักษณะของชิพอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน

3.2.3. เลนส์สำหรับฉายภาพ ใช้เป็นเลนส์ใกล้วัตถุ ดังหัวข้อที่ 3.1.3

3.2.4. ระบบบันทึกภาพ มีการใช้ตัวแยกแสงและกล้องเคลื่อน DHLR ดังหัวข้อที่ 3.1.4

#### 4. ขั้นตอนการประกอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก

ผู้วิจัยประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์กตามระบบที่ออกแบบในหัวข้อที่ 3 โดยการใช้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางทัศนูปกรณ์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม SOLIDSWORK 2019 และสร้างขึ้นด้วยเครื่อง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ซึ่งถูกควบคุมด้วยโปรแกรม Mask 3

#### 5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างลวดลายที่ฉายจากจอแอลซีดีและอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความสามารถในการสร้างภาพที่เล็กที่สุดของระบบ ที่ประกอบขึ้นจากอุปกรณ์จอแอลซีดีและอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน โดยการเปรียบเทียบจากขนาดของเส้นตรงที่เล็กที่สุดของแต่ละระบบของอุปกรณ์ฉายภาพสามารถสร้างและฉายลงบนแผ่นรองรับได้

#### 6. ทดสอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก

##### 5.1. การทดสอบการฉายภาพของกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก

ผู้วิจัยได้ทดสอบระบบในเบื้องต้นโดยการฉายภาพบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ลงบนกระจกอลูมิเนียม ที่สามารถทำหน้าที่ในการสะท้อนกลับของแสงหรือภาพฉายที่ตกกระทบลงมาได้ดี ทำให้ผู้วิจัยสามารถตรวจสอบความถูกต้องของลวดลายที่ฉายผ่านระบบจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์กได้ โดยภาพที่ใช้ในการทดสอบระบบเป็นภาพของลวดลายที่มีการถูกนำไปสร้างด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและนำไปใช้ในการวิจัยทางด้านต่าง ๆ ได้แก่ 1) เส้นตรง ซึ่งเป็นลวดลายพื้นฐานของลวดลายอื่น ๆ 2) เกรตติง เป็นลวดลายที่ถูกนำมาใช้ในทางเซนเซอร์แสง เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการวัดของเซนเซอร์ 3) ตัวหนังสือคำว่า “RS” และ 4) อาเรย์วงกลม สำหรับตรวจจับแบคทีเรียและใช้ในการเลี้ยงเซลล์ ดังรูปที่ 63 ในส่วนนี้ผู้วิจัยออกแบบให้ลวดลายที่สร้างมีขนาด 50 ไมครอนเนื่องจากความสามารถในการสร้างลวดลายที่เล็กที่สุดของสารไวแสงอยู่ที่ประมาณ 50 ไมครอน



รูปที่ 61 แสดงภาพที่ใช้ในการทดสอบระบบ

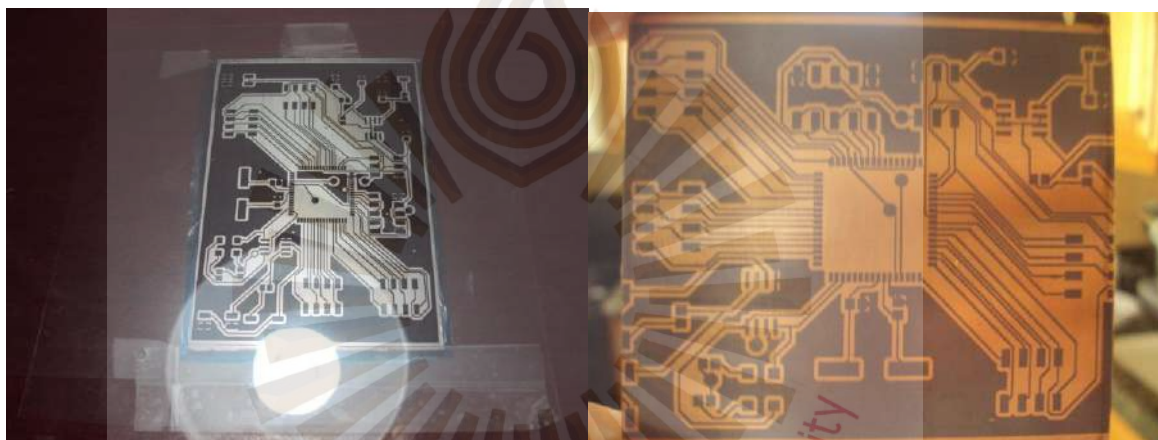
5.2. ทดสอบลวดลายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ โดยการฉายลวดลายลงบนสารไวแสง สารไวแสงที่ผู้วิจัยทำการเลือกใช้ ได้แก่สารไวแสง รุ่น ETERTEC HT-115T DRY FILM PHOTORESIST เป็นสารไวแสงชนิดลบ (Negative) สามารถล้างบริเวณที่ไม่ต้องการได้ด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี (Etching) คุณสมบัติของสารไวแสงแบบฟิล์ม ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติของสารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T DRY FILM PHOTORESIST [52]

ประเภทสารไวแสง	สารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T
ความหนาของสารไวแสง	40 ไมโครเมตร
สีของสารไวแสงก่อนการฉายแสง	เขียว
สีของสารไวแสงหลังการฉายแสง	น้ำเงิน
ข้อแนะนำในการใช้	ใช้ในการเคลือบบนผิวของโลหะ
	ใช้สารเคมีในการกัดลวดลาย

จุดเด่นของสารไวแสงชนิดนี้คือ ใช้การได้ดีกับการเคลือบบนผิวของโลหะและสามารถสร้างลวดลายด้วยความละเอียดสูง รวมถึงใช้เวลาในการสร้างลวดลายไม่นาน ทำให้สารไวแสง ชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T นิยมนำมาใช้ในการผลิตแผ่นวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 8.20 ที่แสดงกระบวนการฉายแสงลงบนแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยสารไวแสง ลายวงจรจากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์จะเป็นต้นแบบของลวดลายที่ต้องการสร้างบนแผ่นทองแดง เมื่อผ่านการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ตัวสารไวแสงจะทำปฏิกิริยากับแสงที่ส่องลงมา เมื่อนำไปล้างด้วยน้ำยาเคมี ทำให้บริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงจะถูกทำให้ละลายหายไป เนื่องจากตัวสารไวแสงชนิดฟิล์มเป็นสารไวแสงชนิดลบ



รูปที่ 62 แสดงการสร้างลวดลายวงจรลงบนทองแดงด้วยสารไวแสงชนิดฟิล์ม

- 5.2.1) ขั้นตอนการเตรียมแผ่นรองรับที่ใช้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม
1. แผ่นปิดสไลด์
  2. น้ำสบู่
  3. อะซิโตน
  4. แก๊สไนโตรเจน
  5. สารไวแสงชนิดฟิล์ม
  6. เครื่องรีดบัตร



### ขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมแผ่นรองรับ

#### 1. ทำความสะอาดกระจกปิดสไลด์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ล้างกระจกปิดสไลด์ด้วยน้ำสบู่

1.2 นำไปล้างด้วยเครื่อง

1.3 นำมา

1.4 เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

2. ทำการติดสารไวแสงลงบนแผ่นปิดสไลด์โดยการลอกแผ่นใสที่ติดอยู่บนสารไวแสงฟิล์ม แล้วติดสารไวแสงลงบนแผ่นปิดสไลด์แล้วรีดให้ติดกันด้วยเครื่องเคลือบบัตร โดยไม่ใช้ความร้อนเลยเพื่อให้ฟิล์มแนบสนิทไปกับแผ่นรองรับหรือแผ่นปิดสไลด์พอดี

3. ขั้นตอนการเตรียมสารต่าง ๆ ควรทำในที่ที่ไฟสีเหลือง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารไวแสงที่ใช้กับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีอยู่ตามธรรมชาติ

5.2.2. การตรวจสอบผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

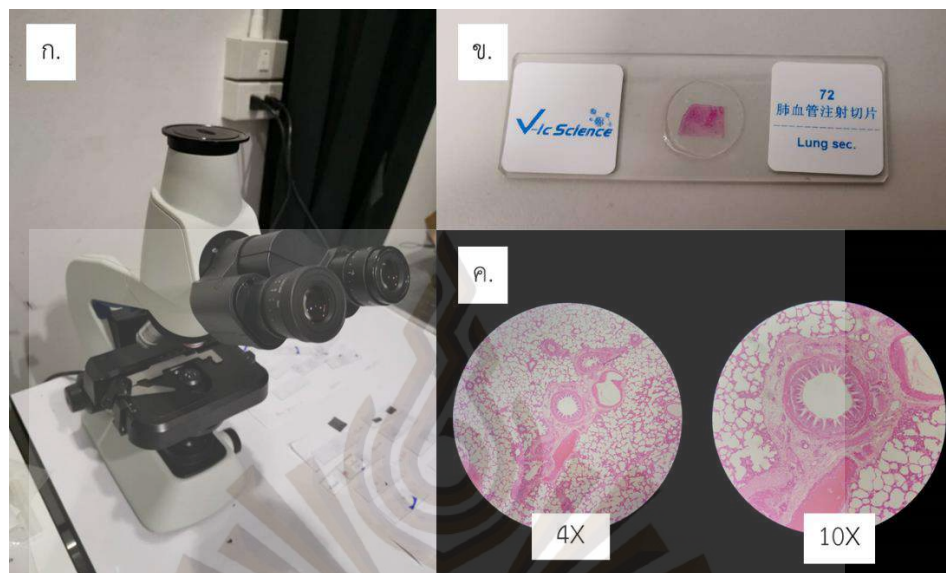
5.2.2.1. การถ่ายภาพผลที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างเป็นกล้องจุลทรรศน์พื้นฐานที่ใช้ในการส่องสิ่งต่าง ๆ หรือตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมากๆ จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือมองเห็นรายละเอียดได้ไม่ครบถ้วนเนื่องจากตาไม่สามารถแยกรายละเอียดต่างๆ ออกได้ หลักการของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้คือการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านตัวอย่างที่มีลักษณะโปร่งแสงหรือแสงสามารถส่องผ่านได้ลงบนอีกด้านของตัวอย่างและผ่านไปยังเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อทำการขยายภาพ ตามกำลังขยายที่ทำการเลือกใช้ของตัวอย่างแล้วส่งไปยังเลนส์ใกล้ตา ผู้ใช้งานสามารถมองภาพของตัวอย่างที่ถูกขยายผ่านทางเลนส์ใกล้ตา [53] ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างภาพเปรียบเทียบกับระหว่างตัวอย่างปกติและภาพตัวอย่างที่ถูกขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยายต่าง ๆ ดังรูปที่ 63

5.2.2.2. การถ่ายภาพผลที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะสามารถถ่ายภาพที่มีความละเอียดสูง ๆ ได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงตรงที่การใช้แสงจากแหล่งกำเนิดส่องลงบนตัวอย่างถูกแทนที่ด้วยลำแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งลำแสงอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนสามารถสร้างภาพของตัวอย่างที่มีความละเอียดสูง ๆ ได้ แต่ข้อเสียของกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนขณะที่ทำการส่องดูหรือถ่ายภาพ ตัวอย่างจะถูกนำไปวางในตัวเครื่องที่เป็นสุญญากาศอยู่ภายใน ดังนั้นเซลล์ที่มีชีวิตจะไม่สามารถทนสภาพดังกล่าวได้ [54] กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนจึงไม่สามารถถ่ายภาพเซลล์ที่มีชีวิตได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นหนึ่งใน

ประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน หลักการของเครื่องคือ ลำแสงจะถูกย้ายไปยังตำแหน่งต่าง ๆ บนตัวอย่างเพื่อสร้างภาพที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ ทำให้ภาพมีความชัดเจน ดังรูปที่ 66



รูปที่ 63 ก. แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่าน ข. แสดงภาพสไลด์ตัวอย่างที่ถ่ายจากกล้องโทรศัพท์ปกติ และ ค. แสดงภาพตัวอย่างสไลด์ที่ส่องดูผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4 เท่าและ 10 เท่า



รูปที่ 64 ก. แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [55] ข. แสดงภาพของหัวมดที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [56]

## 7. การทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของการสร้างลวดลายด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์

ในการทดสอบความสามารถของการทำซ้ำ

1. การสร้างทัศนูปกรณ์ ชิ้นส่วน ต่างๆ โดยใช้แบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้น และ ขึ้นรูป กัด ขึ้นงานด้วยเครื่อง miniCNC ใช้ code เดียวกัน ชนิด เบอร์ของวัสดุลุ่มิเนียม รอบของการกัดเดียวกัน

2. การสร้างลวดลายเกรตติงด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ ทำการสร้างลวดลาย 2 แบบ ได้แก่ เกรตติง และ อาร์เรย์วงกลมขนาด  $2 \times 2$  จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 6 โดยการสร้างลวดลายซ้ำ จำนวน 5 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่านแสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วนำภาพมาวัดขนาดด้วยโปรแกรม imagej เปรียบเทียบขนาดที่สร้างได้ในแต่ละลวดลาย ได้แก่

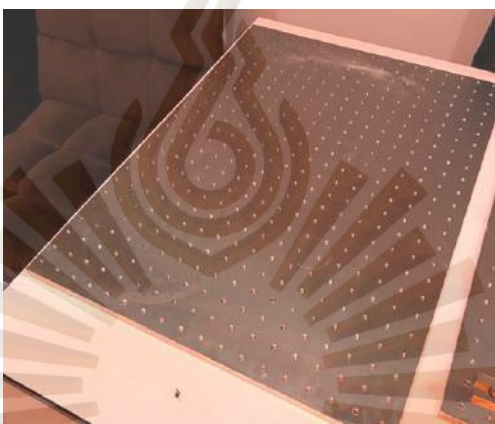
- 2.1 ขนาดความกว้างและความยาว ของเกรตติง
- 2.2 ระยะห่างระหว่างเส้นเกรตติง
- 2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม
- 2.4 ระยะระหว่างวงกลม

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียงระบบทางเดินแสง ได้แก่ แผ่นวางอุปกรณ์แสง ตัวจับเลนส์ขนาดต่าง ๆ เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ที่จับเสา ที่ยึดอุปกรณ์ โดยการออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWork 2017 และขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

#### 1.1. แผ่นวางอุปกรณ์แสง



รูปที่ 65 แสดงแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

#### 1.2. ตัวจับเลนส์ขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 66 แสดงที่จับเลนส์ขนาดต่าง ๆ ที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC



1.3. เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ ได้แก่ 50 มิลลิเมตร 75 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 67 แสดงเสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ที่มีความสูงต่าง ๆ ที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

1.4. ที่จับเสาที่มีความสูง 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 68 แสดงที่จับเสาที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

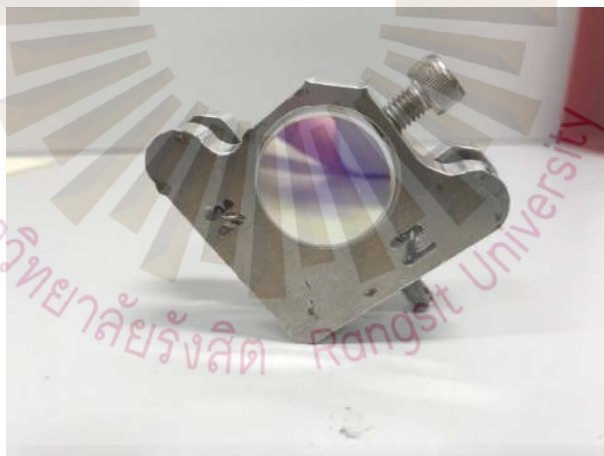


### 1.5. ที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง



รูปที่ 69 แสดงที่ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสงที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

### 1.6. อุปกรณ์จับกระจกขนาด 25.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 70 แสดงอุปกรณ์จับกระจกที่กัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC

เมื่อนำอุปกรณ์แต่ละชิ้นมาประกอบกันสำหรับการเรียงแสงจะมีลักษณะดังรูปที่ 71



รูปที่ 71 แสดงการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการใช้งานในการประกอบทางเดินแสง

## 2. ผลการสร้างทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก

2.1. ผลการสร้างทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยการใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก ผู้วิจัยได้ประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์ที่ประกอบไปด้วย ได้แก่ ระบบส่องสว่างจอแอลซีดี เลนส์สำหรับฉายภาพ และระบบบันทึกภาพ ดังที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3

2.1.1. ระบบส่องสว่าง เลนส์ที่เลือกใช้ในระบบการส่องสว่างแบบโคเลอร์ ได้แก่ เลนส์เก็บรวบรวมแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เลนส์สนามมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร และเลนส์คอนเดนเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร ทำให้ได้แสงที่มีหน้าคลื่นที่เท่ากันก่อนตกกระทบบนหน้าจอแอลซีดี

2.1.2. จอแอลซีดี ควบคุมการฉายภาพด้วยโปรแกรม Microsoft PowerPoint บนคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 72



รูปที่ 72 ก. โปรแกรม Microsoft PowerPoint บนคอมพิวเตอร์ และ ข. ภาพบนโปรแกรม Microsoft PowerPoint ที่ฉายบนจอแอลซีดี

2.1.3 เลนส์สำหรับฉายภาพ เลนส์ใกล้วัตถุประเภทสังยุคจำกัดที่มีกำลังขยาย 10 เท่า ดังรูปที่ 73 แสดงลักษณะเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ และตารางคุณสมบัติของเลนส์ใกล้วัตถุดังตารางที่ 9



รูปที่ 73 เลนส์ใกล้วัตถุประเภทสังยุคจำกัดที่มีกำลังขยาย 10 เท่า

ตารางที่ 9 แสดงคุณสมบัติเลนส์ไกล์วต์ดูที่ใช้

ประเภทเลนส์ไกล์วต์ดู	สังยุคจำกัด
กำลังขยาย	10 เท่า
NA	0.25
ระยะโฟกัส	160

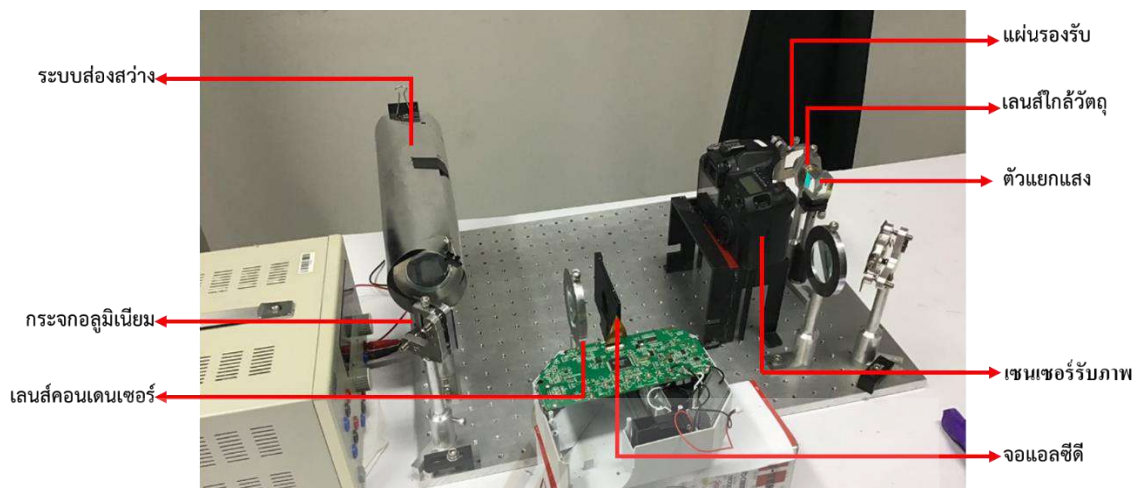
2.1.4. ระบบบันทึกภาพ ระบบบันทึกภาพของระบบใช้เป็นเซนเซอร์รับภาพของกล้อง DSLR ของ Canon รุ่น ผู้วิจัยได้ทำการถอดเลนส์หน้ากล้องออกเพื่อให้ภาพจากเลนส์ไกล์วต์ดูตกลงบนเซนเซอร์รับภาพโดยตรง ซึ่งตัวกล้องสามารถเชื่อมต่อโดยตรงผ่านสายส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ได้ทันที ทำให้ผู้วิจัยสามารถมองเห็น ลวดลายที่ฉายไปบนแผ่นรองรับได้ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์มีชื่อว่า digiCamcontrol หน้าต่างควบคุมการทำงานของกล้องประกอบไปด้วยรวมถึงการบันทึกข้อมูลภาพที่ถ่ายผ่านกล้องได้อีกด้วย ดังหน้าต่างแสดงการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 74



รูปที่ 74 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม digiCamcontrol

ทางเดินของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากอลูมิเนียม เกรด 5083 และกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC ดังรูปที่ 75

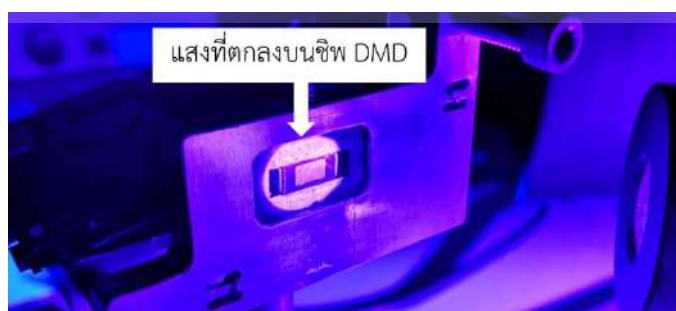




รูปที่ 75 แสดงการประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้จอแอลซีดีแทนโฟโตมาส์ก

2.2 ผลการสร้างทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แทนโฟโตมาส์ก ผู้วิจัยได้ประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์ที่ประกอบไปด้วย ได้แก่ ระบบส่องสว่าง อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน เลนส์สำหรับฉายภาพ และระบบบันทึกภาพ ดังที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3

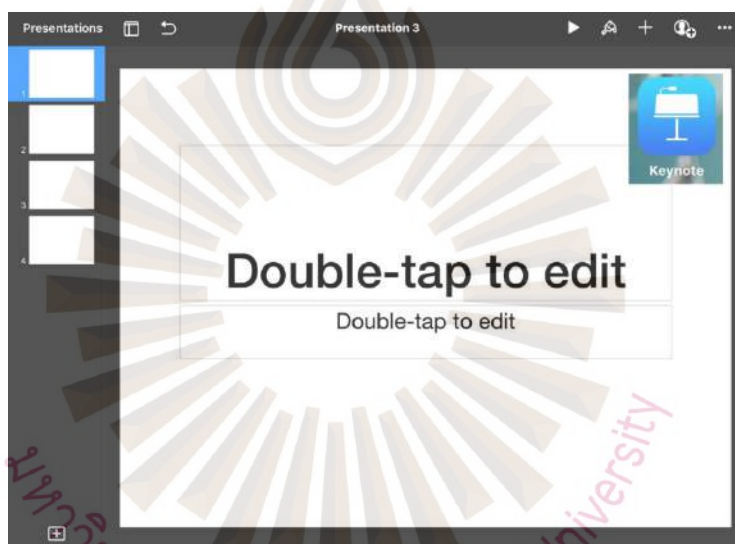
2.2.1. ระบบส่องสว่าง เลนส์ที่เลือกใช้ในระบบการส่องสว่างแบบโคเลอร์ ได้แก่ เลนส์เก็บรวบรวมแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เลนส์สนามมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร และเลนส์คอนเดนเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มิลลิเมตรและความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร ทำให้ได้แสงที่มีหน้าคลื่นที่เท่ากันก่อนตกกระทบบนหน้าอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน



รูปที่ 76 แสดงแสงจากระบบส่องสว่างแบบโคเลอร์ตกกระทบบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน



2.2.2. อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาใช้ในการสร้างรูปแบบหรือ ลวดลายที่ต้องการฉายผ่านระบบ กล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์ ผู้วิจัยได้ออกแบบ ลวดลายบนอุปกรณ์ แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ระบบสัมผัส (iPad) ยี่ห้อ Apple รุ่น 2018 ผ่านแอปพลิเคชันที่มีชื่อว่า Keynote ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำหรับนำเสนองาน สามารถสร้างลวดลายต่างๆ และแสดงผลไปยัง โปรเจคเตอร์แบบเต็มจอได้ มีลักษณะคล้ายกับ Microsoft PowerPoint ดังรูปที่ 77 เป็นหน้าแอปพลิเคชัน ของ Keynote ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน กับแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ระบบ สัมผัสนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการเชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย ที่เรียกว่า Screen mirroring หรือการคัดลอก หน้าจอ เป็นหนึ่งในวิธีใช้ในการส่งข้อมูลบนจอของอุปกรณ์จำพวกสมาร์ทโฟนไปยังอุปกรณ์ฉายภาพ ประเภทต่าง ๆ เช่น ทีวี และโปรเจคเตอร์ ได้

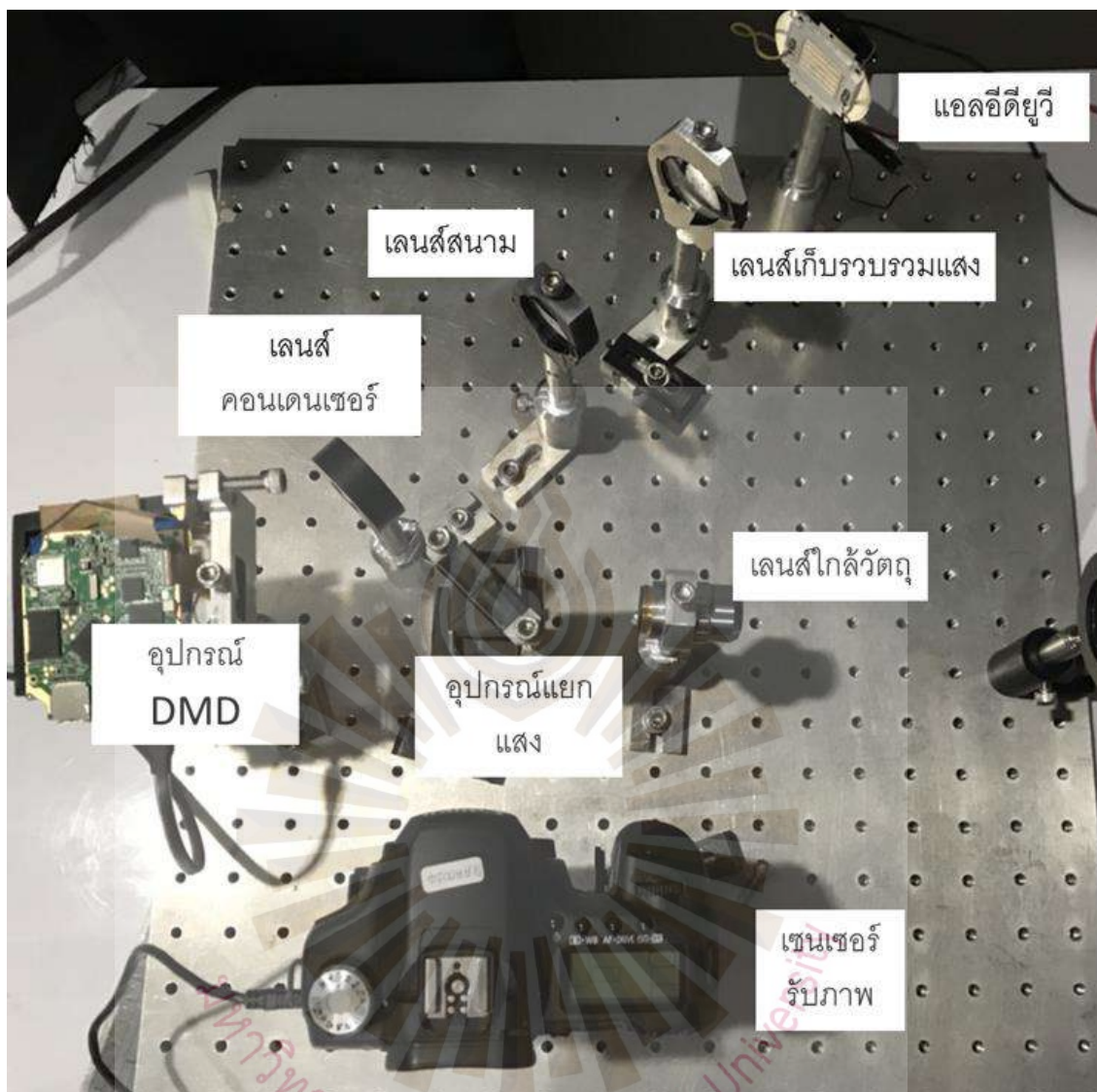


รูปที่ 77 แสดงหน้าต่างของแอปพลิเคชัน Keynote

ข้อดีของแอปพลิเคชัน Keynote คือ การสามารถปรับขนาดของสไลด์แสดงผลให้มีขนาดต่าง ๆ ได้ ดังนั้น เราจึงสามารถปรับขนาดของสไลด์แสดงผลในการฉายภาพให้มีขนาดเดียวกับอุปกรณ์กระจกขนาด ไมครอน นั่นก็คือ 854×480 พิกเซล ในการวาดรูปขนาด 100×100 พิกเซลบนแอปพลิเคชัน Keynote จะได้ภาพที่มีขนาด 100×100 พิกเซลปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนด้วย

2.2.3. เลนส์ฉายภาพใช้เป็นเลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยาย 10 เท่า ดังหัวข้อที่ 2.1.3

2.2.4. ระบบบันทึกภาพ โดยใช้กล้อง DHLR ที่ควบคุมด้วยโปรแกรม digiCamcontrol ทางเดินของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาสก์โดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากอลูมิเนียม เกรด 5083 และกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC ดังรูปที่ 79

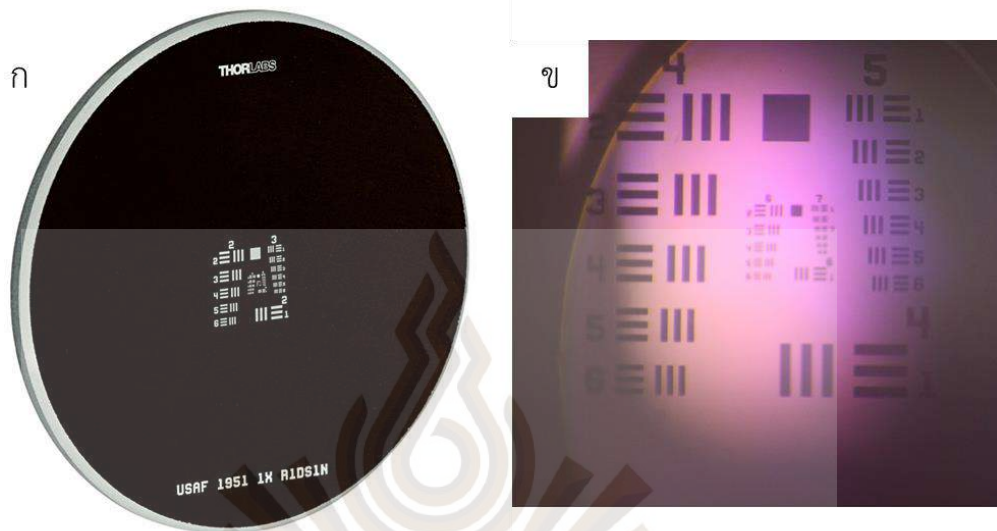


รูปที่ 78 แสดงการประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แทนโฟโตมาส์

### 3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างลวดลายที่ฉายจากจอแอลซีดีและอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน

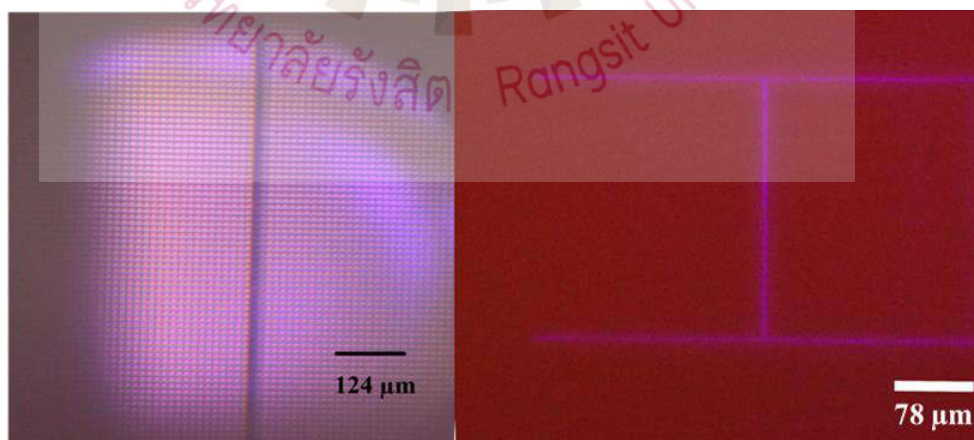
จากการฉายภาพเส้นตรงที่มีขนาด 1 พิกเซลซึ่งเล็กที่สุดลงบนจอแอลซีดีและเส้นตรงที่มีขนาด 5 พิกเซลบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน เปรียบเทียบขนาดภาพที่ได้จากระบบโดยการถ่ายภาพอุปกรณ์ทางแสงที่มีชื่อว่า USAF 1951 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มักใช้ในการตรวจสอบหาประสิทธิภาพและความละเอียด

ของภาพในระบบทางเดินแสง มีลักษณะดังรูปที่ 79 ก. และเมื่อถ่ายภาพ USAF 1951 ดังรูปที่ 79 ข. ด้วยระบบที่สร้างขึ้น



รูปที่ 79 ก. แสดงลักษณะของ USAF 1951 และ ข.ภาพถ่ายของ USAF 1951 ที่ถ่ายด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์

ผู้วิจัยได้ทำการถ่ายภาพเส้นตรงบนจอแอลซีดี และอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แล้วฉายลงบนกระจกอลูมิเนียม และบันทึกภาพด้วยระบบบันทึกภาพผ่านกล้อง DHLR แล้วเปรียบเทียบขนาดตั้งภาพที่ 80

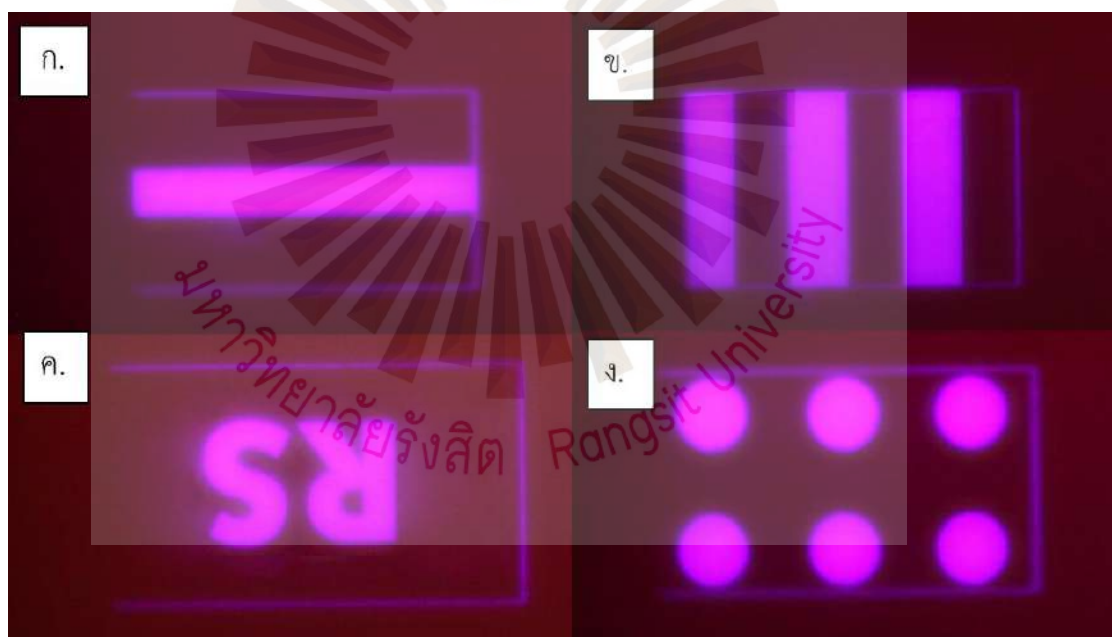


รูปที่ 80 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของเส้นตรงที่ฉายผ่านระบบทั้งสอง

จากภาพที่แสดงภาพถ่ายเส้นตรงที่ฉายบนระบบจากลวดลายเส้นตรงที่ปรากฏลงบนกระจกอลูมิเนียม พบว่า ภาพถ่ายเส้นตรงที่ฉายด้วยระบบที่ใช้จอแอลซีดีแทนการใช้โฟโตมาส์ก เส้นตรงที่ได้มีขนาดประมาณ 10 ไมครอนและภาพถ่ายเส้นตรงที่ฉายด้วยระบบที่ใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน แทนการใช้โฟโตมาส์ก ได้ภาพเส้นตรงที่มีขนาดประมาณ 2.6 ไมครอน

#### 4. ผลการฉายภาพลวดลายลงบนกระจกอลูมิเนียมเพื่อทดสอบความแม่นยำของระบบ

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก เนื่องจากระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กมีส่วนประกอบที่เป็นระบบบันทึกภาพที่สามารถบันทึกบนของลวดลายที่ทำการฉาย การทดสอบระบบเบื้องต้นจะเป็นการทดสอบการฉายภาพของระบบโดยการฉายลงบนกระจกอลูมิเนียมที่สามารถสะท้อนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ถึง 98 เปอร์เซ็นต์และบันทึกภาพที่สะท้อนกลับมาจากกระจกอลูมิเนียม ภาพที่ทำการฉายลงบนระบบจะเป็นลวดลาย 4 รูป ได้แก่ 1) เส้นตรง ซึ่งเป็นลวดลายพื้นฐานของลวดลายอื่น ๆ 2) เกรตติง 3) ตัวหนังสือภาษาอังกฤษ “RS” และ 4) อาเรย์วงกลม ดังรูปที่ 81



รูปที่ 81 แสดงผลการทดสอบการฉายภาพผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์ก ลงบนกระจกอลูมิเนียม ก. ภาพเส้นตรง ข. ภาพเกรตติง ค. ตัวหนังสือภาษาอังกฤษ “RS” และ ง. อาเรย์วงกลม

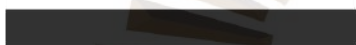


## 5. ผลการฉายสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงประเภทฟิล์มในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

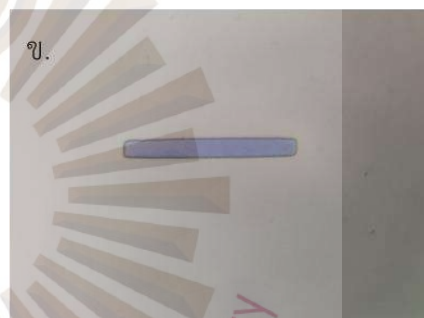
ผู้วิจัยได้ทำการสร้างลวดลายต่าง ๆ ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยการฉายลวดลายผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นตัวนำพาลวดลายจากบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ไปยังสารไวแสงแบบลบ ชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T โดยใช้กำลังหลอดไฟ 29.2 โวลท์ ใช้ระยะเวลาในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตลงบนสารไวแสง 4 นาที หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำยาเคมี บริเวณบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงจะถูกทำให้ละลายสลายไป ลวดลายที่ถูกสร้างถูกนำไปวิเคราะห์และตรวจสอบ ดังนี้

5.1. การวิเคราะห์ลักษณะและความถูกต้องของลวดลายจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่าน การถ่ายภาพลวดลายที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างแบบส่องผ่านเป็นการส่องดูลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เบื้องต้นว่าลวดลายมีความถูกต้องตามที่ออกแบบ ดังรูปที่ 82 83 84 และ 85

ก.



ข.

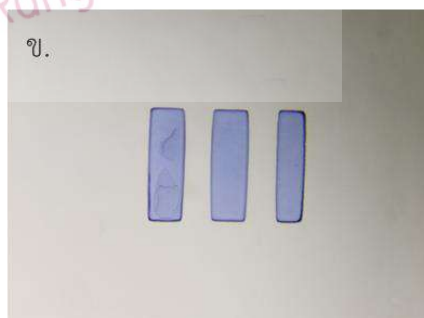


รูปที่ 82 ก. แสดงภาพเส้นตรงที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายเส้นตรงที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

ก.

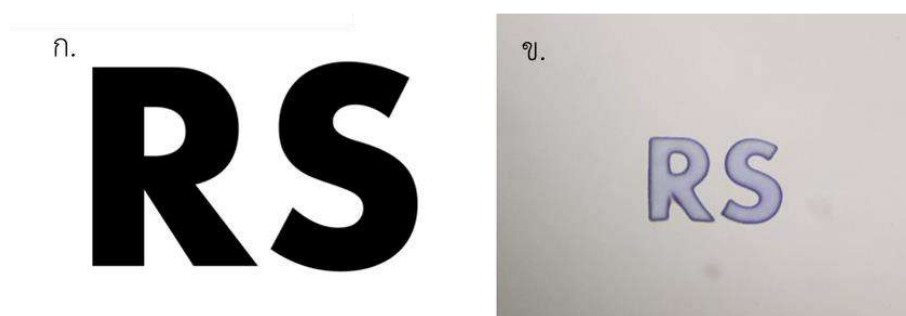


ข.

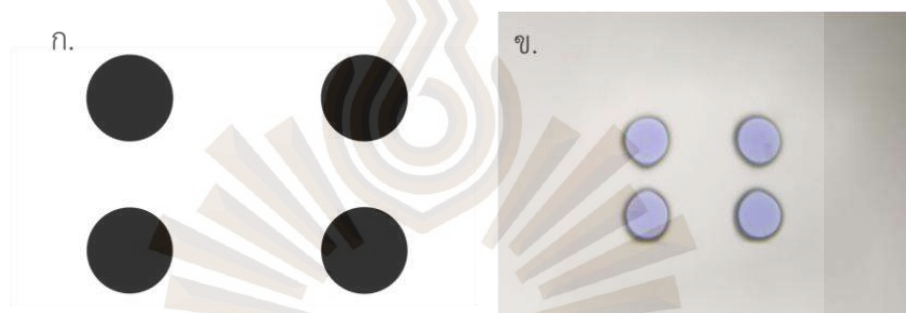


รูปที่ 83 ก. แสดงภาพเกรตติงที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018 ข. ลวดลายเกรตติงที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี





รูปที่ 84 ก. แสดงภาพตัวอักษรภาษาอังกฤษ “RS” ที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018  
 ข. ลวดลายตัวหนังสือภาษาอังกฤษ “RS” ที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี



รูปที่ 85 ก. แสดงภาพอาร์เรย์ของวงกลมที่สร้างบนอุปกรณ์ Ipad 2018  
 ข. ลวดลายอาร์เรย์ของวงกลมที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

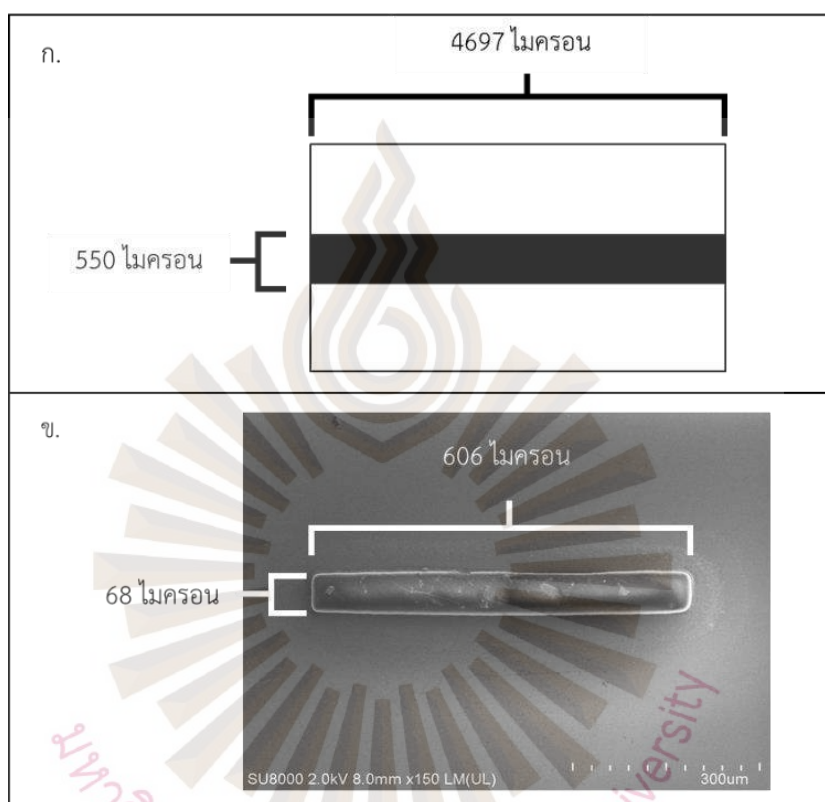
จากรูปที่ 82 83 84 และ 85 พบว่าจากการทดสอบฉายภาพลวดลายของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงชนิดฟิล์ม และทำการสร้างลวดลายเส้นตรง เกรตติง ตัวอักษร “RS” และ อาร์เรย์ของวงกลม ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี จากการส่องดูลวดลายที่สร้างได้เบื้องต้นผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสนามกว้างพบว่า ลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีลักษณะที่ถูกต้องและคล้ายคลึงกับลวดลายต้นแบบ

5.2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ จากถ่ายภาพลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การถ่ายภาพลวดลายที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อวิเคราะห์ลักษณะ ขนาด และความถูกต้องของลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของลวดลาย เทียบกับลวดลายต้นแบบ จะทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์โดยการเปรียบเทียบขนาดของลวดลายที่ปรากฏบน

อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน กับสารไวแสงชนิดฟิล์มที่ถูกกัดเป็นลวดลายตามการฉายภาพด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือเรียกว่ากระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

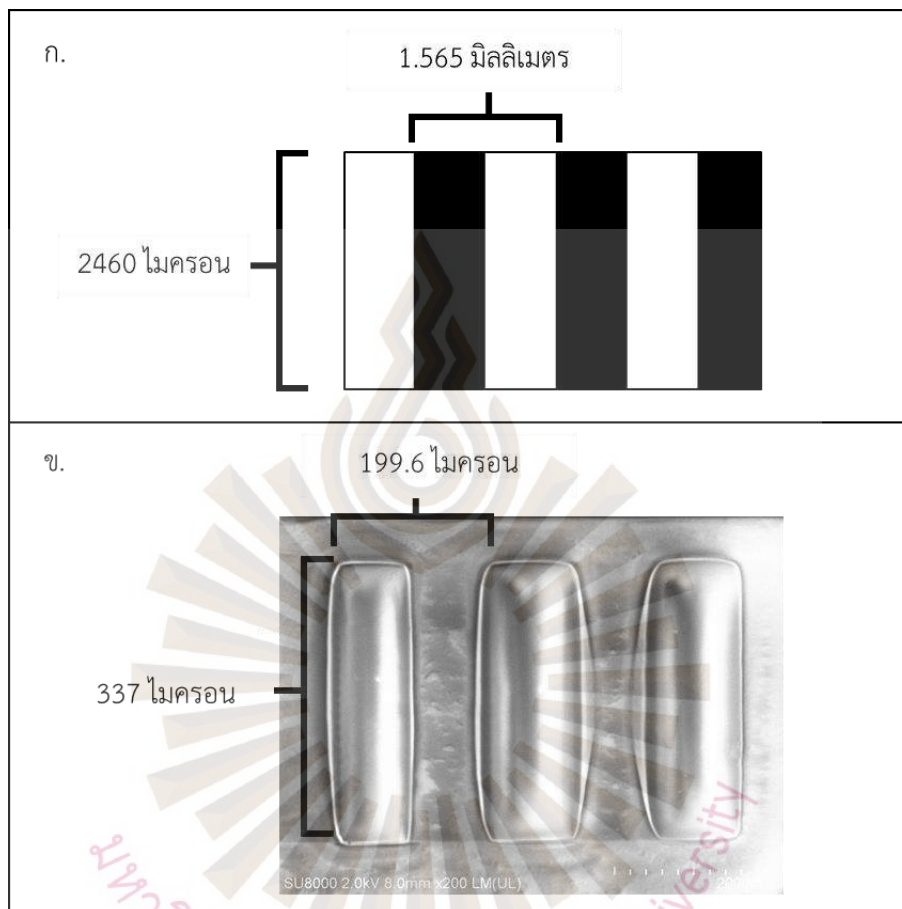
5.2.1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์จากถ่ายภาพลวดลายเส้นตรงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 86 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. เส้นตรงต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายเส้นตรงที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 87 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของลวดลายเส้นตรงที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ที่เป็นต้นแบบลวดลายระหว่างการฉายแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี กับลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดฟิล์ม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะรูปร่างของเส้นตรงที่สร้างมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างเส้นตรงต้นแบบจากบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และขนาดของลวดลายถูกย่อขนาดลดลงจากขนาดที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ในส่วนของความกว้างและความยาวของเส้นตรงนั้นลดลงประมาณ 8 เท่า

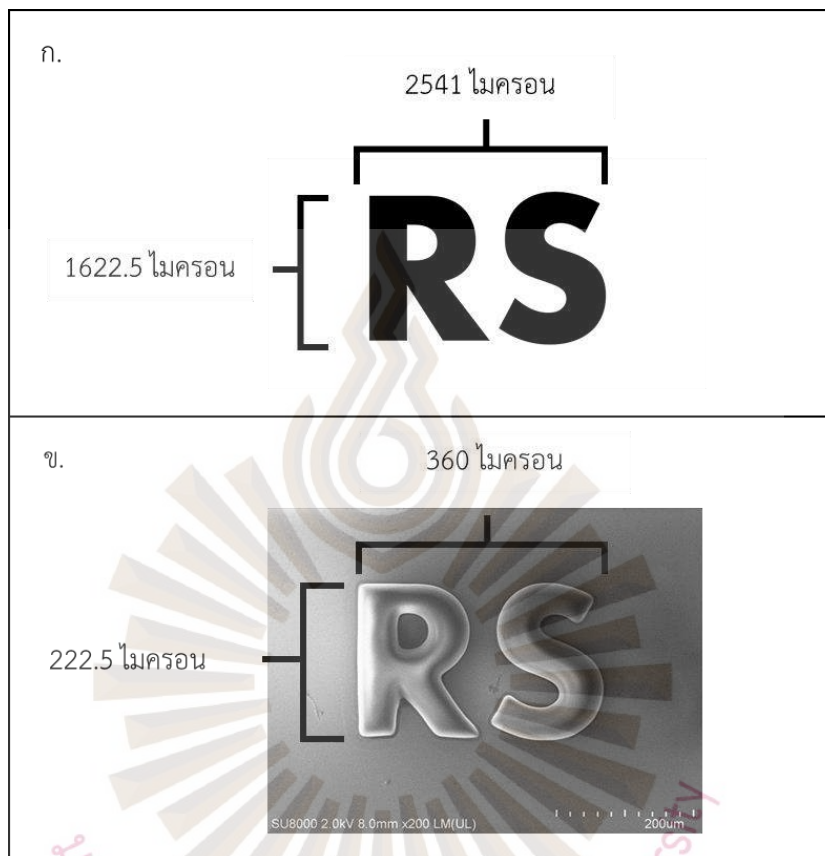
5.2.2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กจากถ่ายภาพลวดลายเกรตติงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 87 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. เกรตติงต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายเกรตติงที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 87 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของลวดลายเกรตติงที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนที่เป็นต้นแบบลวดลายระหว่างการฉายแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี กับลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดฟิล์ม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะรูปร่างของเกรตติงที่สร้างมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างเส้นตรงต้นแบบจากบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และในส่วนของขนาดจะเป็นการเปรียบเทียบความยาวและความกว้างของเกรตติง 1 คาบ พบว่าความยาวของเกรตติงลดลง 7.3 เท่าและความกว้างของเกรตติง 1 คาบ ลดลง 7.8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับลวดลายต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน

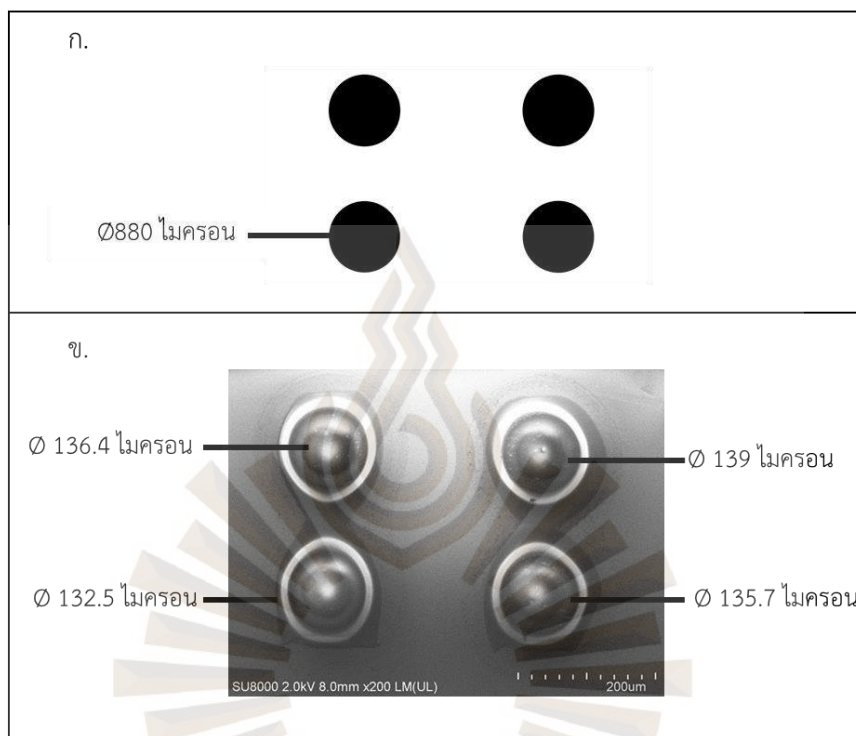
5.2.3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กจากถ่ายภาพลวดลายตัวอักษร “RS” ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 88 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. ตัวอักษรต้นแบบที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และ ข. ลวดลายตัวอักษรที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 88 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของลวดลายตัวอักษร “RS” ที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ที่เป็นต้นแบบลวดลายระหว่างการฉายแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี กับลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดฟิล์ม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะรูปร่างของตัวอักษร “RS” ที่สร้างมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างตัวอักษร “RS” ต้นแบบจากบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และขนาดของลวดลายถูกย่อขนาดลดลงจากขนาดที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ในส่วนของขนาดของตัวอักษร “RS” นั้น ลดลงประมาณ 7 เท่า

5.2.4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์จากการถ่ายภาพลวดลายอาร์เรย์ของวงกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

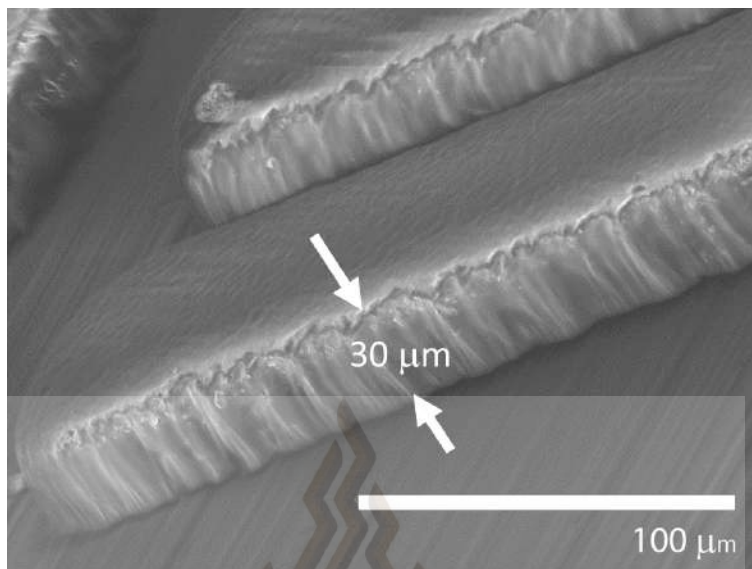


รูปที่ 89 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ก. อาร์เรย์วงกลมที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนและ ข. ลวดลายตัวอาร์เรย์วงกลมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 89 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของลวดลายอาร์เรย์ของวงกลมที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ที่เป็นต้นแบบลวดลายระหว่างการฉายแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี กับลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดฟิล์ม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะรูปร่างของเกรตติงที่สร้างมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างเส้นตรงต้นแบบจากบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอาร์เรย์ถูกย่อขนาดลดลงจากขนาดที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอน ในส่วนของความกว้างและความยาวของเส้นตรงนั้นลดลงประมาณ 6.5 เท่า

5.2.5. วิเคราะห์ความหนาของลวดลายที่ได้จากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีด้วยจากภาพถ่ายลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการถ่ายภาพลวดลายที่สร้างได้ในมุมเอียง เพื่อให้เห็นความสูงของลวดลายที่สร้างได้ ดังรูปที่ 90



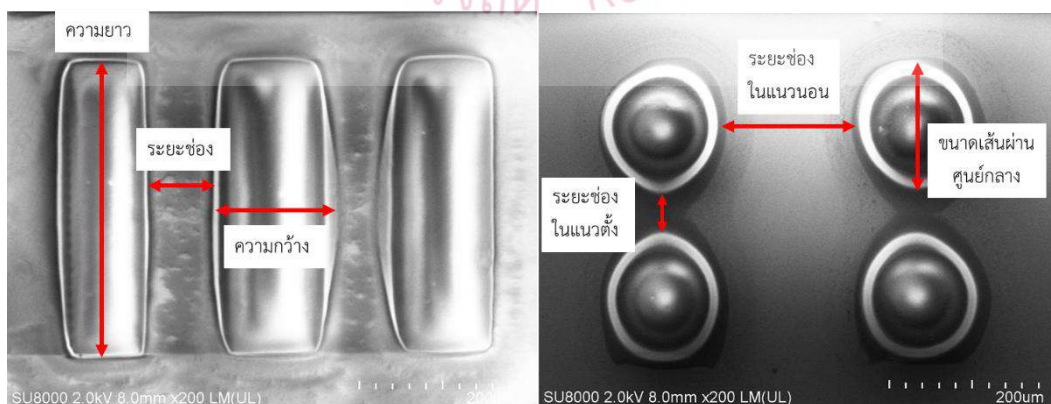


รูปที่ 90 แสดงภาพถ่ายความหนาของลวดลายจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

จากรูปที่ 90 แสดงภาพลวดลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดฟิล์ม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าความหนาของลวดลายที่สร้างได้เท่ากับ 30 ไมครอน

## 6. ผลการทำซ้ำการฉายสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงประเภทฟิล์มในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์

ตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบสำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำของระบบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์ ดังรูปที่ 91



รูปที่ 91 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบการวัดเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำของระบบ

**ตารางที่ 10** แสดงการเปรียบเทียบความกว้าง ความยาวและระยะช่องของลวดลายเกรตติงที่สร้างด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก

ครั้งที่	ความกว้าง(ไมครอน)	ความยาว(ไมครอน)	ระยะช่อง(ไมครอน)
1	102.39	322.87	105.80
2	103.75	322.87	106.49
3	103.75	333.88	99.66
4	104.44	344.03	98.976
5	107.17	332.423	104.437
ค่าเฉลี่ย	104.30	331.21	103.07
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.77	8.83	3.51

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการทำซ้ำในการสร้างลวดลายของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์กจากการวัดความกว้าง ความยาวและระยะช่องของลวดลายเกรตติงพบว่าขนาดความกว้างและระยะช่องที่วัดได้มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.77 และ 3.51 ตามลำดับ ในส่วนของความยาวมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างแตกต่างกันอยู่ที่ 8.83

**ตารางที่ 11** แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะช่องในแนวนอนและระยะช่องในแนวตั้งของลวดลายวงกลมอาร์เรย์ที่สร้างด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช่โฟโตมาส์ก

ครั้งที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(ไมครอน)	ระยะช่องในแนวนอน(ไมครอน)	ระยะช่องในแนวตั้ง(ไมครอน)
1	136.42	167.55	46.36
2	139.07	172.85	52.32
3	137.75	167.55	49.01
4	136.42	172.28	53.64
5	139.74	172.18	54.96
ค่าเฉลี่ย	137.88	170.48	51.26
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.51	2.69	3.52

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการทำซ้ำในการสร้างลวดลายของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะช่องในแนวนอนและระยะช่องในแนวตั้งของลวดลายวงกลมอาร์เรย์พบว่าขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะช่องในแนวนอนและระยะช่องในแนวตั้งที่วัดได้มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเบนเบี่ยงมาตรฐานที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.77 2.69 และ 3.52 ตามลำดับ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผลการวิจัย

โครงการ “การสร้างชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต มีระยะเวลาการดำเนินการวิจัย 12 เดือน เริ่มวันที่ 1 กันยายน 2561 ถึง 31 สิงหาคม 2562 เพื่อมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงที่สูญอุปกรณ์ซึ่งจะนำมาใช้ประกอบเป็นกล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) โดยไม่ใช้มาสก์แสง (Photomask) จะมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยทางด้านแสง เช่น การสร้างลวดลายที่มีโครงสร้างระดับไมครอน ผู้วิจัยขอสรุปผลการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1) การสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงที่สูญอุปกรณ์ ได้แก่ แผ่นวางอุปกรณ์แสง ตัวจับเลนส์ เสาวางอุปกรณ์ตัวจับเลนส์ ที่จับเสา ยึดอุปกรณ์กับแผ่นวางอุปกรณ์แสง และอุปกรณ์จับกระจก ถูกสร้างขึ้นได้ด้วยการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงจากวัสดุอะลูมิเนียม เกรด 5083 ผ่านการออกแบบลักษณะรูปร่างบนโปรแกรม SolidWork 2017 และสร้างไฟล์สั่งคำสั่งในการควบคุมการทำงานของเครื่องกลึง Mini Computer Numerically Controlled (CNC) รุ่น BS10050Z ด้วยโปรแกรม Mastercam X5 สามารถนำมาใช้ประกอบทางเดินแสงสำหรับระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ได้

2) อุปกรณ์ทางแสงที่สูญอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถนำมาประกอบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ ที่ประกอบไปด้วยระบบส่องสว่างแบบโคเคลอร์ เลนส์สำหรับถ่ายภาพ ระบบบันทึกภาพและอุปกรณ์ถ่ายภาพหรืออุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนที่สามารถถ่ายภาพลวดลายต่าง ๆ ที่ออกแบบผ่านคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์แท็บเล็ตแบบสัมผัสได้แทนการใช้โฟโตมาสก์ ทำให้การสร้างและการออกแบบลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีทำได้สะดวก ประหยัดเวลาและงบประมาณในการผลิตโฟโตมาสก์

3) ระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ สามารถนำมาใช้สร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีได้ ลวดลายที่ได้ทำการทดลองสร้างได้แก่ เส้นตรง เกรตติง ตัวอักษรภาษาอังกฤษ และอาร์เรย์วงกลม ระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์สามารถถ่ายภาพและสร้างผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ลวดลายที่ได้มีลักษณะเหมือนลวดลายต้นแบบและระบบที่สร้างขึ้นเป็นการดัดแปลงระบบของกล้องจุลทรรศน์ทำให้สามารถย่อลวดลายที่ฉายบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนได้มากถึง 8 เท่าทำให้ระบบระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์สร้างลวดลายที่มีขนาดในระดับไมครอนได้





ประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์												
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ตารางที่ 12 ตารางแสดงแผนการดำเนินการวิจัย (ต่อ)

การดำเนินการวิจัย	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
2) สร้างชิ้นงานแผ่นวางอุปกรณ์แสง ตัวยึดจับอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ				←-----→								
3) คำนวณและออกแบบทางเดินแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์							←-----→					
4) ประกอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์								←-----→				
5) ทดสอบระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาสก์										←-----→		
6) จัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์										←-----→		←-----→

←-----→ หมายถึง งานหรือกิจกรรมที่วางแผนไว้ว่าจะทำตามข้อเสนอโครงการ

←-----→ หมายถึง งานหรือกิจกรรมที่ได้ทำแล้ว

### 3. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยและพัฒนาการสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสงที่ซับซ้อนขึ้นส่วนด้วยโปรแกรม SolidWorks 2019 สร้างคำสั่ง G-code ด้วยโปรแกรม Mastercam X5 และขึ้นรูปด้วยเครื่อง miniCNC รุ่น BS10050Z นั้นสามารถสร้างอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้งานในการประกอบทางเดินแสงได้จริง สำหรับระบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ แต่ระบบทางเดินแสงอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น อาจจะต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย เช่น แท่นสำหรับเคลื่อนที่ใน 3 มิติ เป็นต้น

ในส่วนของการสร้างลวดลายที่มีต้นแบบลวดลายจากภาพบนอุปกรณ์อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนนั้นยังมีปัญหาในส่วนของการโพโตลิโทกราฟี เนื่องจากสารไวแสงที่ใช้เป็นสารไวแสงชนิดฟิล์ม มีข้อจำกัดในด้านของความละเอียดที่สามารถสร้างลวดลายได้ รวมถึงสารไวแสงชนิดฟิล์มที่สามารถเกิดบวมและเกิดการละลายได้เมื่อนำเข้าไปในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อาจจะทำให้ขนาดของลวดลายที่วัดได้เกิดการผิดเพี้ยน วิธีแก้ไขคือ การทดสอบการสร้างลวดลายด้วยสารไวแสงด้วยวิธีอื่น อาจจะทำให้ลวดลายที่ได้มีขนาดเล็กลงได้และการวัดขนาดด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การตรวจวัดโปรไฟล์พื้นผิว และ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และการเคลือบด้วยฟิล์มนำไฟฟ้าก่อนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นต้น รวมถึงการพัฒนากระบวนการกล้องจุลทรรศน์โพโตลิโทกราฟีที่สามารถพัฒนาให้ลวดลายที่ฉายมีขนาดเล็กลง โดยการใช้เลนส์ฉายภาพที่ให้ภาพที่ละเอียดมากขึ้น

นอกเหนือจากนี้ลวดลายต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็ก ๆ ถูกนำไปใช้ในการวิจัยหลากหลายแขนง เช่น ทางไบโอเซนเซอร์ที่มีการสร้างลวดลายสำหรับสร้างไมโครชาแนลที่ใช้ในเซนเซอร์ เพื่อลดปริมาณตัวอย่างสารที่ใช้ในการทดสอบ และเอมไซม์หรือสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทดสอบ รวมถึงทางเซนเซอร์แสง ลวดลายเกรตติงได้มีการนำมาใช้ในการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับสารของไบโอเซนเซอร์ทางด้านแสง เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยหวังว่าการสร้างระบบกล้องจุลทรรศน์โพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์เป็นการพัฒนาการสร้างและออกแบบผลิตเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ ที่มีการใช้ลวดลายที่มีขนาดในระดับไมครอนอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jenkins, F.A. and H.E. White, *Fundamentals of optics 4th edition*. Fundamentals of Optics 4th edition by Francis A. Jenkins, Harvey E. White New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1976, 1976.
- [2] Hecht, E., *Optics 4th edition*. Optics, 4th Edition, Addison Wesley Longman Inc, 1998, 1998.
- [3] Misner, C.W., K.S. Thorne, and J.A. Wheeler, *Gravitation*. 2017: Princeton University Press.
- [4] Marion, F., *GW150914: Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*. *Nuovo Cim.*, 2017. 39: p. 310.
- [5] Baker, M.J. and K. Faulds, *Fundamental developments in clinical infrared and Raman spectroscopy*. *Chemical Society Reviews*, 2016. 45(7): p. 1792-1793.
- [6] Gremlich, H.-U. and B. Yan, *Infrared and Raman spectroscopy of biological materials*. 2000: CRC Press.
- [7] Smith, B.C., *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy*. 2011: CRC press.
- [8] Harke, B., et al., *Resolution scaling in STED microscopy*. *Optics express*, 2008. 16(6): p. 4154-4162.
- [9] Nägerl, U.V., et al., *Live-cell imaging of dendritic spines by STED microscopy*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. 105(48): p. 18982-18987.
- [10] Pechprasarn, S. and M.G. Somekh, *Detection limits of confocal surface plasmon microscopy*. *Biomedical optics express*, 2014. 5(6): p. 1744-1756.
- [11] Leng, Y., *Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods*. 2009: John Wiley & Sons.
- [12] Gowen, A., et al., *Recent applications of chemical imaging to pharmaceutical process monitoring and quality control*. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics*, 2008. 69(1): p. 10-22.
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=O39avevqndU>

- [14] Chen, X., Huang, L., Mühlenbernd, H., Li, G., Bai, B., Tan, Q., ... & Zentgraf, T. *Dual-polarity plasmonic metalens for visible light*. Nature communications, 2012, 3: 1198.
- [15] Thorlabs, I. Aluminum Breadboard, 450 mm x 600 mm x 19.05 mm, M6 Taps. 2019 [ cited 2 0 1 9 - 0 7 - 2 4 ] ; Available from: [https://www.thorlabs.com/drawings/6f7221f15da4ba3f5ABFA802-CD2D-D1F1-37B30A9469EA74F0/MBH4560\\_M-AutoCADPDF.pdf](https://www.thorlabs.com/drawings/6f7221f15da4ba3f5ABFA802-CD2D-D1F1-37B30A9469EA74F0/MBH4560_M-AutoCADPDF.pdf).
- [16] Harbecke, B., Coherent and incoherent reflection and transmission of multilayer structures. Applied Physics B, 1986. 39(3): p. 165-170.
- [17] Wolf, E., Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light. 2007: Cambridge University Press.
- [18] เพ็ชรประสาน, ส., พื้นฐานทางฟิสิกส์ และ วิศวกรรมของกล้องจุลทรรศน์แสง. 2558.
- [19] Verhoeven, G., The reflection of two fields – Electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. Vol. 55. 2017. 13-18.
- [20] Thorlabs, I. KM100 - Kinematic Mirror Mount for Ø1" Optics. 2019; Available from: <https://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=KM100#ad-image-0>.
- [21] Kidger, M.J., Fundamental optical design. 2002: SPIE Press.
- [22] Kingslake, R., Lens Design Fundamentals. 1978: Elsevier Science.
- [23] Thorlabs, I., Fixed Lens Mounts. 2019.
- [24] Thorlabs, I., Optical Post Assemblies. 2019.
- [25] Land, E.H., Some Aspects of the Development of Sheet Polarizers\*. Journal of the Optical Society of America, 1951. 41(12): p. 957-963.
- [26] Nersisyan, S., et al., Fabrication of liquid crystal polymer axial waveplates for UV-IR wavelengths. Optics Express, 2009. 17(14): p. 11926-11934.
- [27] Thorlabs, I., Rotation Mounts. 2019.
- [28] Thorlabs, I., Precision Pinholes and Pinhole Wheel. 2019.
- [29] Kingslake, R. and R.B. Johnson, Lens Design Fundamentals. 2010.
- [30] Levinson, H.J., Principles of Lithography. 2010: Society of Photo Optical.
- [31] Elveflow. INTRODUCTION ABOUT PHOTOMASK IN MICROFLUIDICS. 2019 [cited 2019 1 4 . 0 8 ] ; Available from: <https://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/soft->

lithography-reviews-and-tutorials/introduction-in-soft-lithography/introduction-about-photomask-in-microfluidic/.

- [32] Louisville, U.o. PHOTOLITHOGRAPHY PROCEDURE. 2013 [cited 2019 14-08]; Available from:<http://louisville.edu/micronano/files/documents/standard-operating-procedures/PhotolithographyProcess.pdf/>.
- [33] Zhong, K.J., Y.Q. Gao, and F. Li, Maskless Lithography Based on DMD. Key Engineering Materials, 2013. 552: p. 207-213.
- [34] Wiora, G. File:LCD-Layers.svg. 2005 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LCD-Layers.svg>.
- [35] Raaijmakers, M. File:LCD RGB subpixel.jpg. 2009 [cited 2019 14-08]; Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LCD\\_RGB\\_subpixel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LCD_RGB_subpixel.jpg).
- [36] LIMITED, S.C. ทำความรู้จักกับดอกเอ็นมิลในงานกัดวัสดุ. 2017 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.sumipol.com/knowledge/knowning-end-mills/>.
- [37] Neo Tools Co., L. หลักการเลือกจำนวนฟันเอ็นมิลให้เหมาะกับงาน. 2016 [cited 2019 14-08]; Available from: <http://www.neotools1.com/Tips/%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%88%E0%B8%B3%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%99%E0%B8%9F%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B9%87%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B9%83%E0%B8%AB%E0%B9%89%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99.html>.
- [38] Co..LTD, C.J.T. Tungsten Carbide End Mills/solid carbide endmills for cnc milling machine 2019; Available from: [https://www.alibaba.com/product-detail/Tungsten-Carbide-End-Mills-solid-carbide\\_1803475734.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Tungsten-Carbide-End-Mills-solid-carbide_1803475734.html).
- [39] Neo Tools Co., L. เอ็นมิลคาร์ไบด์ 4 ฟัน 2016 [cited 2019 14-08]; Available from:[http://www.neotools1.com/index.php?lay=show&ac=cat\\_show\\_pro\\_detail&pid=657105](http://www.neotools1.com/index.php?lay=show&ac=cat_show_pro_detail&pid=657105).



- [40] SUN RISE TECHNOLOGIES Co., L. เอ็นมิลคาร์ไบด์ หัวบอล. 2018 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.sunrisegr.com/th/product/947/Carbide-Ball-End-Mills-%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B9%87%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B9%84%E0%B8%9A%E0%B8%94%E0%B9%8C-%E0%B8%AB%E0%B8%B1%E0%B8%A7%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%A5>.
- [41] KBCTools. Side Milling Cutters. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.kbctools.com/CatSearch/168/side-milling-cutters>.
- [42] EQ Industrial Connection Co., L. ดอกสว่านเจาะเหล็ก. ม.ป.ป; Available from: <http://www.eqindustrial.com/%e0%b8%94%e0%b8%ad%e0%b8%81%e0%b8%aa%e0%b8%a7%e0%b9%88%e0%b8%b2%e0%b8%99%e0%b9%80%e0%b8%88%e0%b8%b2%e0%b8%b0%e0%b9%80%e0%b8%ab%e0%b8%a5%e0%b9%87%e0%b8%81/>.
- [43] Coromant, S. วิธีเลือกประเภทดอกต๊าปที่เหมาะสม. ม.ป.ป [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.sandvik.coromant.com/th-th/knowledge/threading/tapping/pages/how-to-choose-tap-type.aspx>.
- [44] Coromant, S. สูตรคำนวณและความหมายสำหรับงานกัด. ม.ป.ป [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.sandvik.coromant.com/th-th/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>.
- [45] Etsu MicroSi, I. The Difference Between Positive and Negative Photoresist. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.microsi.com/the-difference-between-positive-and-negative-photoresist/>.
- [46] Roxana Marinescu, M., et al., Considerations regarding the use of SU-8 photoresist in MEMS technique. 2018.
- [47] Madou, M.J., Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, Second Edition. 2002: Taylor & Francis.
- [48] Huang, J., D.A. Dahlgren, and J.C. Hemminger, Photopatterning of Self-Assembled Alkanethiolate Monolayers on Gold: A Simple Monolayer Photoresist Utilizing Aqueous Chemistry. Langmuir, 1994. 10(3): p. 626-628.

- [49] Ltd., F.E. Dry Film Photo Resist. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <http://www.fortex.co.uk/product/dry-film-photoresist/>.
- [50] METAL, M. *ALUMINIUM ALLOY 5083*. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <http://mallinathmetal.com/aluminium-alloy-5083-manufacturer-exporter.html>.
- [51] Steels, A. *Aluminium Alloy Data Sheet 5083*. 2013 [cited 2019 14-08]; Available from: [http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas\\_Aluminium\\_datasheet\\_5083\\_rev\\_Oct\\_2013.pdf](http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5083_rev_Oct_2013.pdf).
- [52] Eternal Materials Co., L. *ETERTEC® HT-115 DRY FILM PHOTORESIST*. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: [https://voron.ua/files/pdf/photores/photoresist\\_film\\_ht-115.pdf](https://voron.ua/files/pdf/photores/photoresist_film_ht-115.pdf).
- [53] Edinburgh, T.U.o. *What is Microscopy?* 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.ed.ac.uk/clinical-sciences/edinburgh-imaging/for-patients-study-participants/tell-me-more-about-my-scan/what-is-microscopy>.
- [54] Academy, K. *Microscopy*. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.khanacademy.org/science/high-school-biology/hs-cells/hs-introduction-to-cells/a/microscopy>.
- [55] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ส.อ. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. ม.ป.ป [cited 2019 14-08]; Available from: [sri.or.th/bdd/th/?option=com\\_content&view=article&id=73:scanning-electron-microscope-sem&catid=22:บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์&Itemid=101](http://sri.or.th/bdd/th/?option=com_content&view=article&id=73:scanning-electron-microscope-sem&catid=22:บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์&Itemid=101).
- [56] JEOL USA, I. *2015 SEM/TEM/EPMA Image Contest Winners*. 2019 [cited 2019 14-08]; Available from: <https://www.jeolusa.com/NEWS-EVENTS/JEOL-USA-Image-Contest-Entries-Winners/2015-Entries-Winners>.

ภาคผนวก 1

สิทธิบัตร

กล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตนิกส์แบบไม่ใช้แสงโดยอาศัย  
อุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัลเพื่อสร้างสวดลายในระดับไมครอน

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University





## คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- การประดิษฐ์  
 การออกแบบผลิตภัณฑ์  
 อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้  
 ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522  
 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535  
 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ	- 3 ส.ค. 2561	เลขที่คำขอ	1801007483
วันยื่นคำขอ	3 ส.ค. 2561		

สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ

ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์

ประเภทผลิตภัณฑ์

วันประกาศโฆษณา

เลขที่ประกาศโฆษณา

วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ กิ่งจูลทรศน์ฉายภาพในระบบไฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครสำหรับสร้าง  
 ลวดลายบนวัสดุ

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่  
 ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร  บุคคลธรรมดา  นิติบุคคล  หน่วยงานรัฐ  มูลนิธิ  อื่นๆ สถาบันการศึกษา

ชื่อ มหาวิทยาลัยรังสิต

ที่อยู่ 52/347 หมู่ที่ 7

ตำบล/แขวง หลักหก อำเภอ/เขต เมือง จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12000 ประเทศ ไทย

อีเมล patentsu@gmail.com

เลขประจำตัวประชาชน  เลขทะเบียนนิติบุคคล  เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0 9 9 4 9 0 0 2 4 1 2 4 1  เพิ่มเติม (ตั้งแบบ)

ในกรณีที่กรมฯ สื่อสารกับท่าน ท่านสะดวกใช้ทาง  อีเมลผู้ขอ  อีเมลตัวแทน

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ  ผู้รับโอน  ผู้ขอรับสิทธิโดยผู้คิดค้น

5. ตัวแทน (ถ้ามี)

ชื่อ

ที่อยู่

ตำบล/แขวง อำเภอ/เขต จังหวัด รหัสไปรษณีย์ ประเทศ

อีเมล

เลขประจำตัวประชาชน  เพิ่มเติม (ตั้งแบบ)

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์  ชื่อและที่อยู่เดียวกับผู้ขอ

ชื่อ นายสีจิตต์ เพ็ชรประสาน

ที่อยู่ 428/11 ถ.ดำรงรักษ์

ตำบล/แขวง คลองมหานาค อำเภอ/เขต ป้อมปราบฯ จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10100 ประเทศ ไทย

อีเมล Suejit.p@rsu.ac.th

เลขประจำตัวประชาชน 1 1 0 0 8 0 0 1 2 6 2 2 7  เพิ่มเติม (ตั้งแบบ)

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร

เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง  ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ  ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไมอาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่

จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	<input type="checkbox"/> กลุ่มวิศวกรรม	<input type="checkbox"/> กลุ่มเคมี	สิทธิบัตรการออกแบบ	อนุสิทธิบัตร
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมีเทคนิค)		<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1)	<input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ปิโตรเคมี)		<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2)	<input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (เคมี)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิสิกส์)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เทคโนโลยีชีวภาพ)		<input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)	
	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัชภัณฑ์)			

## รายละเอียดการประดิษฐ์

### ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

กล้องจุลทรรศน์ฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัล  
5 ระดับไมโครสำหรับสร้างลวดลายบนวัสดุ

### สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

จุลทรรศน์ศาสตร์ (ฟิสิกส์), แสงและทัศนูปกรณ์, โฟโตลิโทกราฟี, การพิมพ์ลายวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

### 10 ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ต่างๆ เช่น แผงวงจรรวม ไอซี หรือทรานซิสเตอร์ รวมไปถึงลวดลายบนไมโครชิปในเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์ อาศัยกระบวนการผลิตที่เรียกว่า โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) เป็นกระบวนการพิมพ์รูปแบบหรือสร้างลวดลายวงจรถ้าต้องการลงบนแผ่นรองรับเพื่อให้เกิดลวดลายต่างๆ โดยการใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตบนวัสดุแผ่นรองรับ กระบวนการดังกล่าว จะมีลักษณะเหมือนการแกะสลักลงบนผิวของวัสดุรองรับที่เป็นของแข็ง โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจรร วัสดุแผ่นรองรับที่มักจะถูกนำมาสร้างลวดลายผลิตจากแผ่นโลหะ กึ่งตัวนำบางจะใช้ ซิลิกอนที่นำไปผ่านกระบวนการตัดขวางให้เป็นแผ่นบางเคลือบด้วยออกไซด์เพื่อให้พื้นผิวของโลหะกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แล้วนำมาเคลือบด้วยสารไวแสงซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ส่งผลให้สารไวแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีและการเรียงตัวโมเลกุล สารไวแสงนั้น แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) กรณีสารไวแสงชนิดบวก เมื่อผ่านการฉายด้วยแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต และนำมาให้ความร้อนโมเลกุลจะสลายหายไป ส่วนกรณีสารไวแสงชนิดลบเมื่อผ่านการฉายแสงและให้ความร้อนโมเลกุลจะจับตัวกันแน่นไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำยาล้างเคมี (Develop solution) เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าวของสารไวแสง แสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ฉายผ่านแผ่นบางๆ ที่มีลักษณะเป็นแผ่นทึบและถูกเจาะรูตามลวดลายที่ต้องการ เรียกว่า มาสก์ฉายแสง (Photomask) แสงจะสามารถผ่านลวดลายที่เป็นช่องให้แสงผ่านเท่านั้น เมื่อเอาวัสดุแผ่นรองรับมารับแสงที่ฉายผ่านมาสก์ฉายแสง หลังจากการฉายแสงจึงนำไปให้ความร้อนและล้างด้วยน้ำยาล้างเคมีจะทำให้เกิดลวดลายวงจรถ้าต้องการ ที่แสงฉายผ่านช่องของมาสก์ฉายแสงลงบนวัสดุแผ่นรองรับและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารไวแสงที่ใช้ ถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตลิโทกราฟีจะเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในวงการอุตสาหกรรมการผลิตลวดลายวงจรรต่างๆ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความยืดหยุ่นในการสร้างลวดลายใหม่ๆ และต้นทุนการผลิต เนื่องจากในการสร้างลวดลายต้องมีการผลิตมาสก์ฉายแสงของลวดลายนั้นๆ ทุกครั้ง ผู้ประดิษฐ์จึงออกแบบและสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบของโฟโตลิโทกราฟี โดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร (Digital micromirror device) ซึ่งเป็นชิปขนาดเล็กที่ประกอบด้วยกระจกอลูมิเนียมขนาดเล็กระดับไมโครเรียงกันเป็นอาร์เรย์ 2 มิติ



หรือ พิกเซล (Pixel) ซึ่งเป็นระบบเชิงกลไฟฟ้า สามารถควบคุมการทำงานของกระจกให้หมุนปรับเปลี่ยน  
องศา และ ควบคุมการเปิด-ปิด เพื่อการฉายภาพหรือลวดลายต่างๆ ผ่านการควบคุมของโปรแกรมทาง  
คณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับการจัดเรียงระบบของกล้องจุลทรรศน์ที่ผู้ประดิษฐ์ออกแบบอาศัยหลักการ  
การเรียงระบบเลนส์แบบโคเลอร์ (Köhler illumination) เพื่อให้ลวดลายแสงที่ควบคุมผ่านอุปกรณ์  
5 กระจกดิจิทัลระดับไมโครฉายตกกระทบไปยังวัสดุแผ่นรองรับ ในระบบโพโตลิโทกราฟีโดยไม่ต้องใช้มาสก์ และ  
สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดระดับไมโคร และมีระบบควบคุมตำแหน่งที่ถูกต้องในการพิมพ์ลวดลายผ่าน  
สายตาแบบระบบของกล้องจุลทรรศน์

### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

10 ผู้ประดิษฐ์ออกแบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง  
โดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายบนวัสดุรองรับ และเพื่อเป็นอุปกรณ์ฉายภาพแทน  
การใช้มาสก์ที่ต้องผลิตใหม่เมื่อออกแบบลวดลายใหม่ และช่วยลดต้นทุนการผลิตส่วนของมาสก์ในอุตสาหกรรม  
ในระบบประกอบด้วย ส่วนควบคุมการฉายภาพที่ได้จากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครไปยังวัสดุแผ่น  
รองรับอาศัยการจัดเรียงระบบเชิงแสงแบบกล้องจุลทรรศน์แบบโคเลอร์ฉายแสงขนานลงบนอุปกรณ์  
15 กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ในการจัดเรียงเชิงแสงแบบโคเลอร์ ใช้หลอดแสงจันทร์ (Mercury Lamp) ที่ให้ความ  
ยาวคลื่นของแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและช่วงรังสีที่ตาสามารถมองเห็น ให้แสงที่มีกำลังแสงสูง ซึ่งเมื่อ  
แสงจากแหล่งกำเนิดผ่านระบบฉายแสงแบบโคเลอร์จะทำให้เป็นแสงขนาน และใช้ไดอะแฟรมในการปรับ  
ขนาดหน้าแสงให้มีขนาดเหมาะสมไปตกกระทบยังอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ที่มีลักษณะเป็นกระจกทำ  
หน้าที่เป็นหน้าจอบางเล็ก หรือ พิกเซล ขนาด 5 – 10 ไมโครเมตร โดยแต่ละพิกเซลสามารถเลือกปรับมุมได้  
20 จึงใช้ในการควบคุมและเลือกช่วงของความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการฉายไปยังวัสดุรองรับ การควบคุมการ  
ทำงานมุมของกระจกทำได้ด้วยการเปิด – ปิดพิกเซลผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ใช้  
เลนส์ใกล้วัตถุในการปรับขนาดของภาพหรือลวดลายที่ต้องการฉายจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครให้มี  
ขนาดเล็กลงหรือใช้ขยายภาพให้เหมาะสมตกลงบนวัสดุแผ่นรองรับ ใช้ตัวแยกลำแสงในการสะท้อนภาพจาก  
เลนส์ใกล้วัตถุเข้ามายังเซนเซอร์รับภาพ เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งในการพิมพ์ลวดลายที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถ  
25 สังเกตได้ผ่านคอมพิวเตอร์ เมื่อนำวัสดุแผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงมารับการฉายลวดลายด้วย  
ระบบกล้องจุลทรรศน์นี้ และนำไปผ่านความร้อนหรือการล้างด้วยน้ำยาล้างสารเคมีจะทำให้ได้ลวดลาย  
แกะสลักที่มีขนาดในระดับไมโคร

### คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

30 รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบและการจัดเรียงแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพใน  
ระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร

รูปที่ 2 แสดงการควบคุมการฉายภาพด้วยแสงจากกล้องจุลทรรศน์ผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3 แผนภาพหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร

5 รูปที่ 4 แสดงถึงขั้นตอนที่ 1 ของวิธีการใช้หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครและการควบคุมแสงสะท้อนออกมาจากอุปกรณ์ให้มีลวดลายตามต้องการ

10 รูปที่ 6 แสดงถึงขั้นตอนที่ 2 การวางวัสดุแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงบนตำแหน่งที่ต้องการฉายภาพผ่าน

รูปที่ 7 แสดงถึงขั้นตอนที่ 4 การฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครผ่านเลนส์ใกล้วัตถุไปยังวัสดุแผ่นรองรับ

รูปที่ 8 แสดงผลการสร้างลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร

15

### การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

จากรูปที่ 1 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร เพื่อสร้างลวดลายที่มีขนาดในระดับไมครอน มีการเรียงชุดแสง ซึ่งประกอบไปด้วยหลอดไฟ (1) เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับอุปกรณ์ ซึ่งสามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 285 – 400 นาโนเมตร และแสงในช่วงที่ตามองเห็น ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร เลนส์คอนเดนเซอร์ (2) ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงที่มีหน้าคลื่นแสงไม่เท่ากันให้มีหน้าคลื่นแสงที่เท่ากันทุกจุด เข้าสู่ไดอะแฟรม (3) สำหรับปรับขนาดลำแสงที่มาจากเลนส์คอนเดนเซอร์ (2) ให้มีขนาดลำแสงเหมาะสมพอดีกับขนาดของชิปอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร (5) เมื่อฉายผ่านแผ่นกรองแสง (4) ซึ่งมีหน้าทีเลือกกรองแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้ผ่านไปยังอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร (5) ที่ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ผ่านคอมพิวเตอร์(14) ในการสร้างลวดลายผ่านการเปิด-ปิดพิกเซล ภาพที่ต้องการสร้างลงบนวัสดุแผ่นรองรับจะถูกกระเจกขนาดเล็กลงบนอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร(5) สะท้อนไปยังคู่เลนส์(6)(7) เพื่อปรับขนาดให้พอดีกับเลนส์ใกล้วัตถุ(10)ก่อนถูกส่งไปยังตัวแยกแสง(8) หลังจากผ่านตัวแยกแสงภาพจะถูกส่งไปยังเลนส์หลอด(9) และเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ตามลำดับ ภาพที่เข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ(10) จะถูกลดขนาดตามกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุนั้น ๆ ก่อนฉายลงบนแผ่นรองรับที่วางอยู่บน 30 แท่นวางแผ่นรองรับ(11) ส่วนอื่น ๆ ได้แก่ เลนส์นูน(12) และเซนเซอร์รับภาพ(13) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

(14) ผ่านสายนำส่งข้อมูลเชื่อมต่อผ่านสายยูเอสบี(USB) (15) จะถูกใช้งานเมื่อต้องการบันทึกภาพบนแผ่นรองรับผ่านโหมดของกล้องจุลทรรศน์

จากรูปที่ 2 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง โดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร สามารถนำมาใช้งานในโหมดของ 5 กล้องจุลทรรศน์แสงได้ จะมีการนำแผ่นกรองแสงออก(4) เพื่อให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นสามารถผ่านเข้าไปในระบบได้ ถ้าหากต้องการบันทึกหรือส่งดูภาพบนแผ่นรองรับโดยไม่ต้องฉายภาพ ให้เลือกให้กระจกเล็ก ๆ ของอุปกรณ์ดิจิทัลไมโครมิเตอร์(5) อยู่ในโหมดใช้งานหรือเปิดพิกเซลทั้งหมด หลังจากแสงผ่านคู่เลนส์(6)(7)ปรับขนาด ตัวแยกแสง(8) เลนส์หลอด(9)และเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ภาพบนแผ่นรองรับ(11) จะสะท้อนกลับมายังเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ผ่านเลนส์หลอด(11) ไปยังตัวแยกแสง(8) สะท้อนไปยังเลนส์นูนหน้า 10 เซนเซอร์รับภาพ(12)เพื่อรวมสร้างภาพลงบนเซนเซอร์รับภาพ(13) และภาพที่บันทึกได้จะถูกแสดงบนคอมพิวเตอร์(14) ผ่านการเชื่อมต่อผ่านสายนำส่งข้อมูลเชื่อมต่อผ่านสายยูเอสบี(USB) (15)

จากรูปที่ 3 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโพโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง โดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโครหลักการทำงานดังที่อธิบายไว้โดยละเอียดในแผนภาพแสดงขั้นตอนการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

15 จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนที่ 1 (S1) เป็นการออกแบบลวดลายที่ต้องการพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับลงบนโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์(14) และเชื่อมต่ออุปกรณ์ดิจิทัลระดับไมโครกับคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์(16)ที่เชื่อมต่อผ่านสายนำส่งข้อมูลผ่านสายยูเอสบี(USB)(15) ซึ่งเราจะสามารถสร้างลวดลายต่าง ๆ (19)(20) ผ่านการควบคุมการเปิด(17)-ปิด(18) ของแต่ละพิกเซลของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครได้

20 รูปที่ 5 แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครที่ทำต่อแสงที่ตกกระทบลงบนผิวของกระจก จากการออกแบบลวดลายผ่านคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ ในส่วนบริเวณที่เราไม่ต้องการสร้างภาพ(19) กระจกพิกเซลของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร(5) จะมีการเอียงมุมเพื่อให้แสงที่ตกกระทบ(21)สะท้อนไปยังทิศทางอื่นหรือออกจากระบบออกไป(23) แต่ส่วนที่เราต้องการสร้างภาพ(20) แสงที่ตกกระทบบนอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร(5) ที่ถูกควบคุมโดยบอร์ดควบคุม(16) จะถูกสะท้อนออกไปยังเลนส์ในระบบต่อไป(22)ทำให้เราสามารถควบคุมแสงที่จะสะท้อนออกมาจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัล(5)ระดับไมโครให้มีลวดลายตามที่เราต้องการได้

30 จากรูปที่ 6 แสดงขั้นตอนที่ 2 (S2) เป็นการนำแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสง(24)มาวางบนแท่นวางตัวอย่างหรือแผ่นรองรับ (11) และขยับแผ่นรองรับให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการสร้างลวดลาย เพื่อทำการฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครลงบนตำแหน่งที่ต้องการก่อนทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงในระบบเพื่อเริ่มทำการฉายภาพในขั้นตอนที่ 3 (S3) และทำการฉายภาพในขั้นตอนที่ 4 (S4)

จากรูปที่ 7 แสดงขั้นตอนที่ 4 (S4) กล้องจุลทรรศน์ฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ไปยังแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสง(24) เพื่อเป็นการลดขนาดภาพที่ฉายให้มีขนาดเล็กลงในระดับไมโครแล้วนำไปอบร้อนและล้างด้วยน้ำยาเคมีต่อไปในขั้นตอนที่ 5

จากรูปที่ 8 แสดงผลการสร้างลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโครด้วยลวดลายตัวอย่าง(25)และการเปรียบเทียบการเคลือบสารไวแสงประเภทชนิดบวกและลบ แผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงชนิดบวก(26) บริเวณที่ถูกฉายแสงจะละลายหายไปเมื่อถูกความร้อน ส่วนสารไวแสงประเภทลบ(27) บริเวณที่ถูกฉายแสงจะยึดติดแน่นเมื่ออบด้วยความร้อนและไม่สามารถล้างออกได้ด้วยสารเคมี ทำให้บริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงละลายหายไป

### วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

ดังที่ได้เปิดเผยไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์





### ข้อถ้อยสัญญา

1. กล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์  
กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร อาศัยหลักการจัดเรียงระบบแสงแบบกล้อง  
จุลทรรศน์ชนิดใช้แสงสะท้อนในการสร้างลวดลายลงบนวัสดุแผ่นรองรับในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี  
5 ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟแสงจันทร์ มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตถึง  
ช่วงที่ตามองเห็น คือ 285 – 700 นาโนเมตร ระบบการจัดเรียงเลนส์แบบโคเลอร์ ทำหน้าที่รวบรวมแสงที่  
ไร้ทิศทางจากหลอดไฟ และสร้างลำแสงที่มีความสม่ำเสมอและมีหน้าคลื่นแสงเท่ากัน ปรับขนาดภาพให้มี  
ความเหมาะสมกับอุปกรณ์ภายในระบบ ใช้อุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครในการสร้างลวดลายผ่านการ  
ควบคุมด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ และเลนส์ใกล้วัตถุทำหน้าที่ย่อขนาด  
10 ลวดลายที่ต้องการพิมพ์ลงบนวัสดุแผ่นรองรับ และ ขยายภาพเพื่อการมองเห็นผ่านเซนเซอร์รับภาพที่รับ  
ภาพมาจากตัวแยกแสงและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์
2. ระบบการสร้างลวดลายด้วยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ในระบบของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการ  
ถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร  
เพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร ตามข้อถ้อยสัญญาที่ 1 ในการสร้างลวดลายผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรม  
15 คำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ควบคุมการทำงานของกระจกขนาดเล็กที่เรียงตัวกันเป็นพิกเซล  
ควบคุมการปรับเอียงองศา การเปิด-ปิดของพิกเซล และควบคุมการสร้างภาพที่จะฉายออกไปยังวัสดุแผ่น  
รองรับ
3. ระบบแบ่งแยกแสงออกเป็นสองส่วน ในระบบของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟ  
โตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไม  
โคร ตามข้อถ้อยสัญญาที่ 1 เพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านและสะท้อนออกด้วยมุม 90 องศา เพื่อการสะท้อน  
20 ภาพที่เกิดจากการมองเห็นผ่านเลนส์ใกล้วัตถุไปยังเซนเซอร์รับภาพแสดงผลผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์  
และเพื่อการส่งผ่านภาพเข้าไปในเลนส์ใกล้วัตถุและการย่อขนาดของลวดลายที่ถูกสร้างผ่านอุปกรณ์  
กระจกดิจิทัลระดับไมโคร
4. วิธีการใช้งานกล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดย  
25 อาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร ตามข้อถ้อยสัญญาที่ 1 ถึง 3 ข้อใด  
ข้อหนึ่ง มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้  
ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างลวดลายผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ และ  
เชื่อมต่ออุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครกับคอมพิวเตอร์ และนำภาพเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ลวดลาย  
ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง  
30 ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงไปวางยังตำแหน่งที่ต้องการฉายภาพผ่าน



ขั้นตอนที่ 3 ควบคุมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อนไปยังเซนเซอร์รับภาพแสดงผลในคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 ลดขนาดลวดลายที่ได้รับจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร โดยการเลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุกำลังขยายต่างๆ และฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครไปยังวัสดุแผ่นรองรับ เพื่อทำให้เกิดลวดลายที่สามารถพิมพ์ผ่านกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพที่มีขนาดในระดับไมโครได้

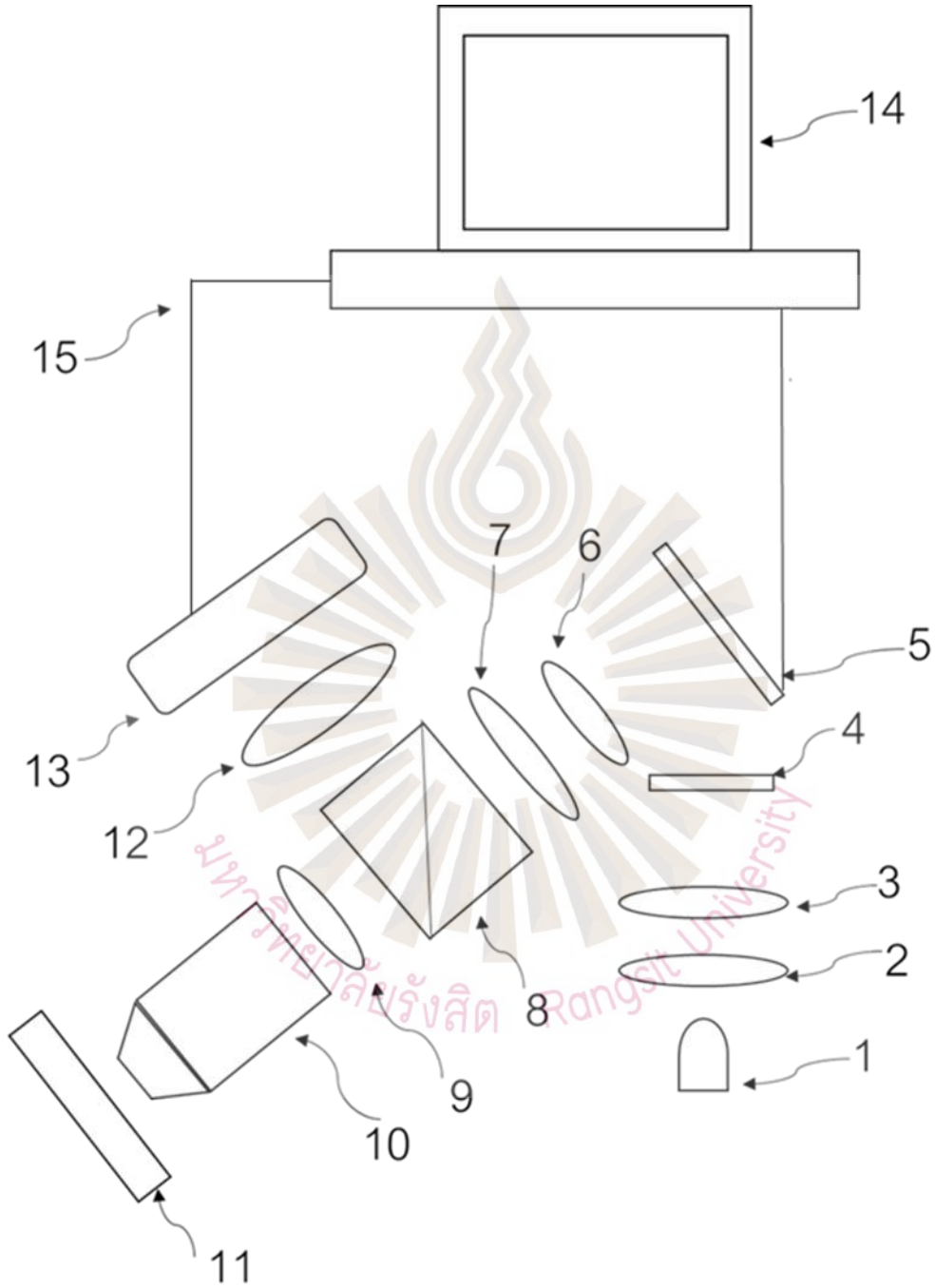
ขั้นตอนที่ 5 คือ นำแผ่นรองรับไปอบร้อนและล้างด้วยน้ำยาล้างเคมี

ขั้นตอนที่ 6 คือ ได้แผ่นรองรับที่ถูกแกะสลักตามลวดลายที่ออกแบบ

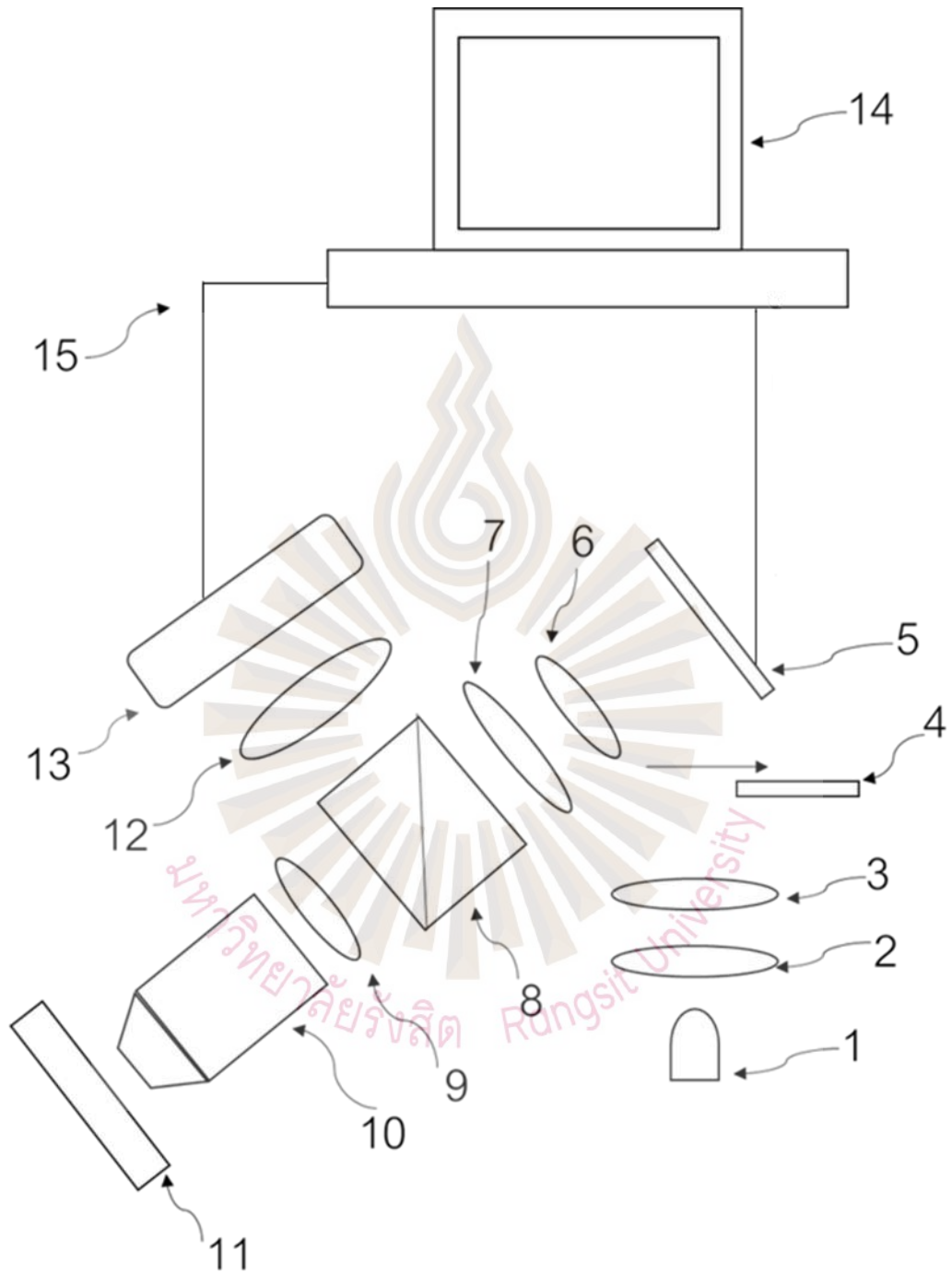
5. กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร การใช้งาน และ ลวดลายที่ออกแบบได้จากระบบ ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 1 ถึง 4 ข้อในข้อหนึ่ง



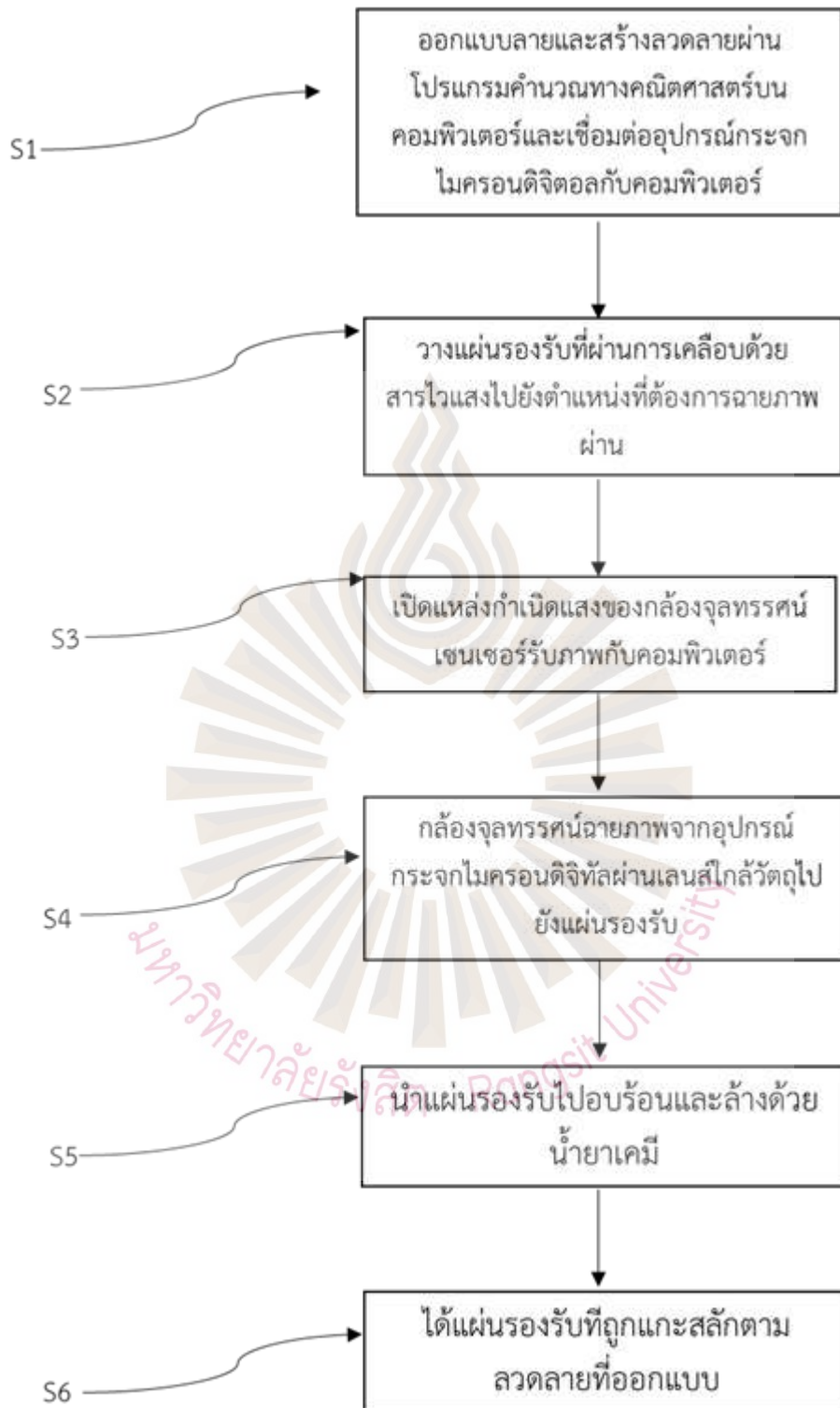
รูปเขียน



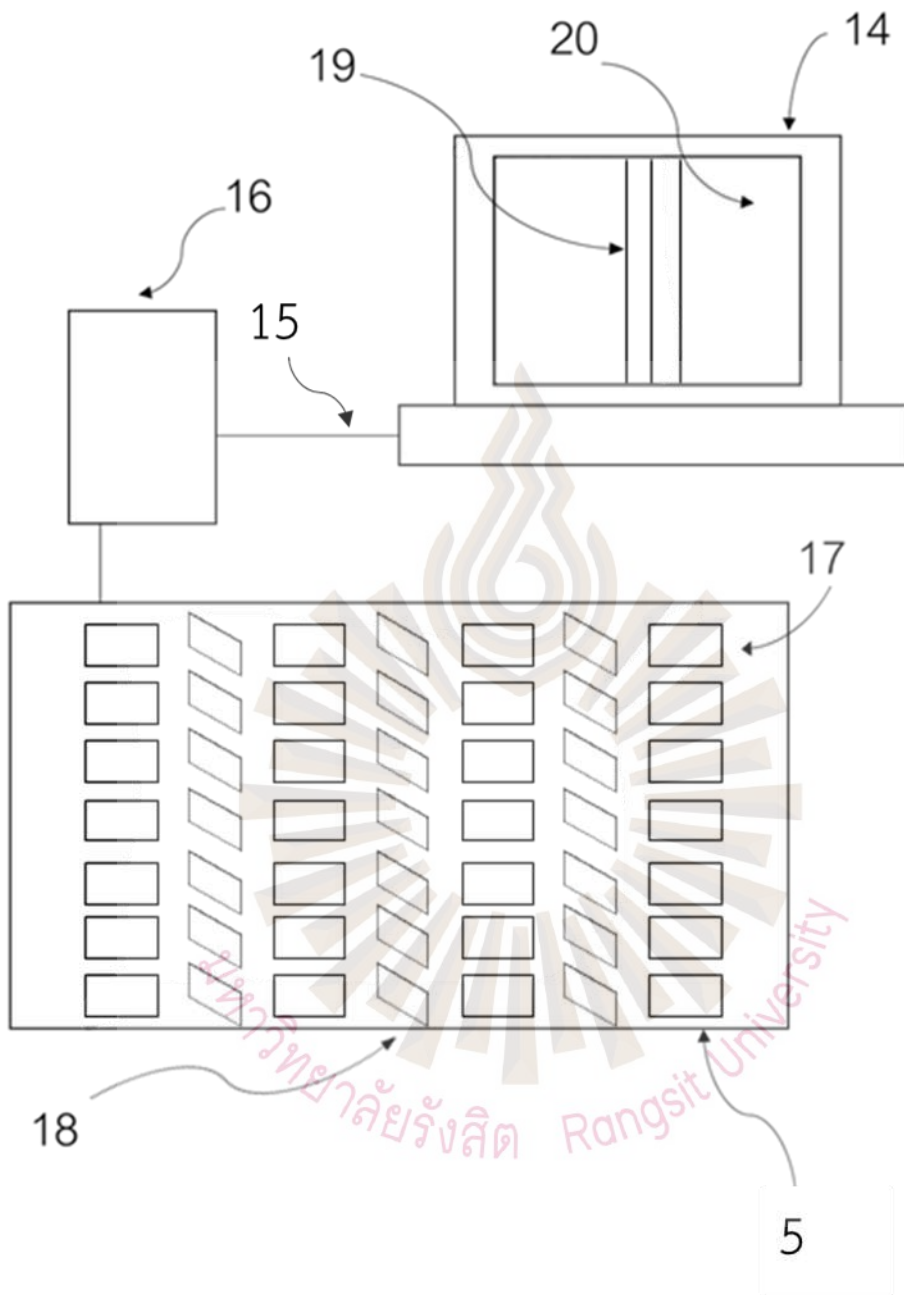
รูปที่ 1



รูปที่ 2

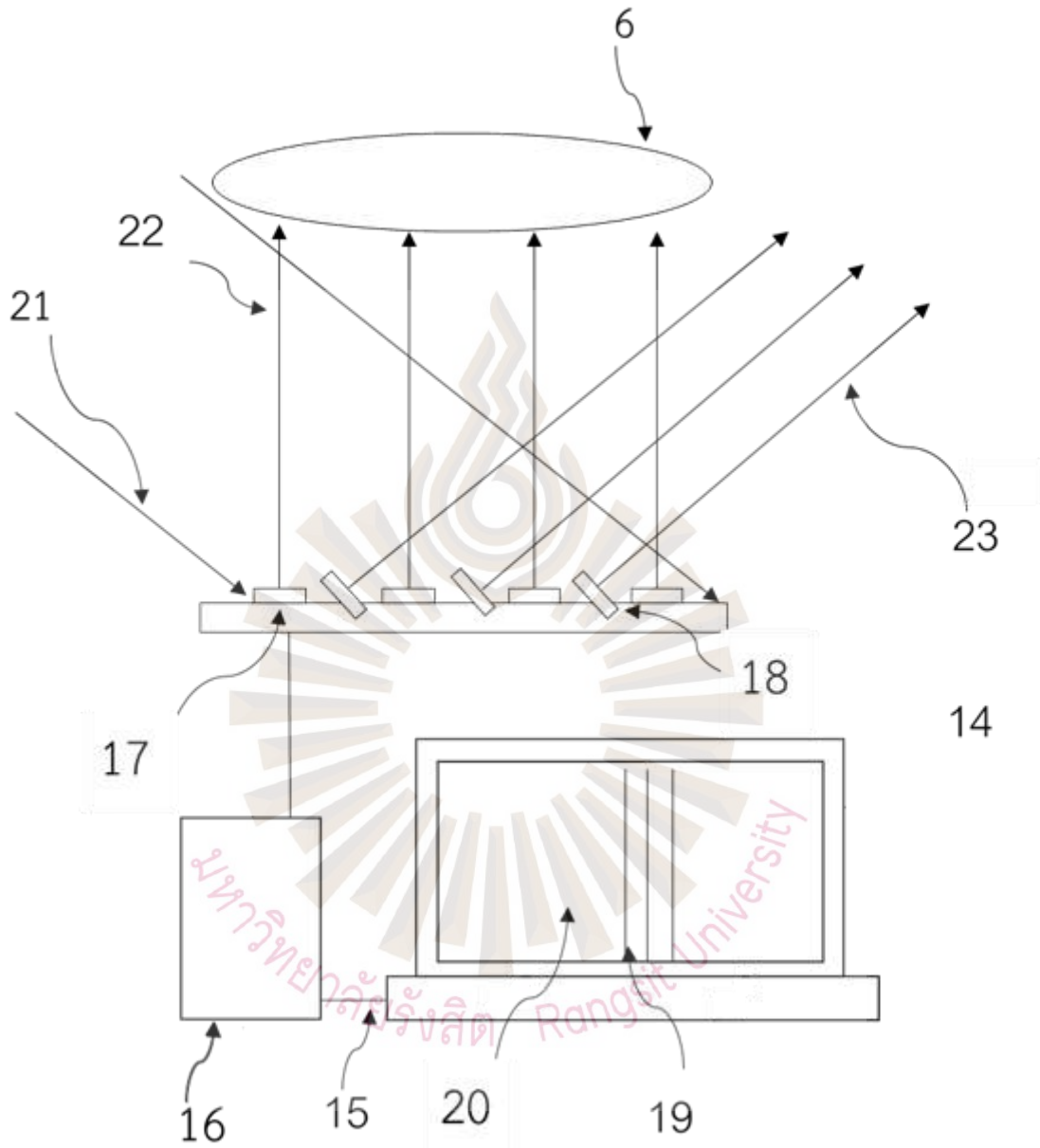


รูปที่ 3

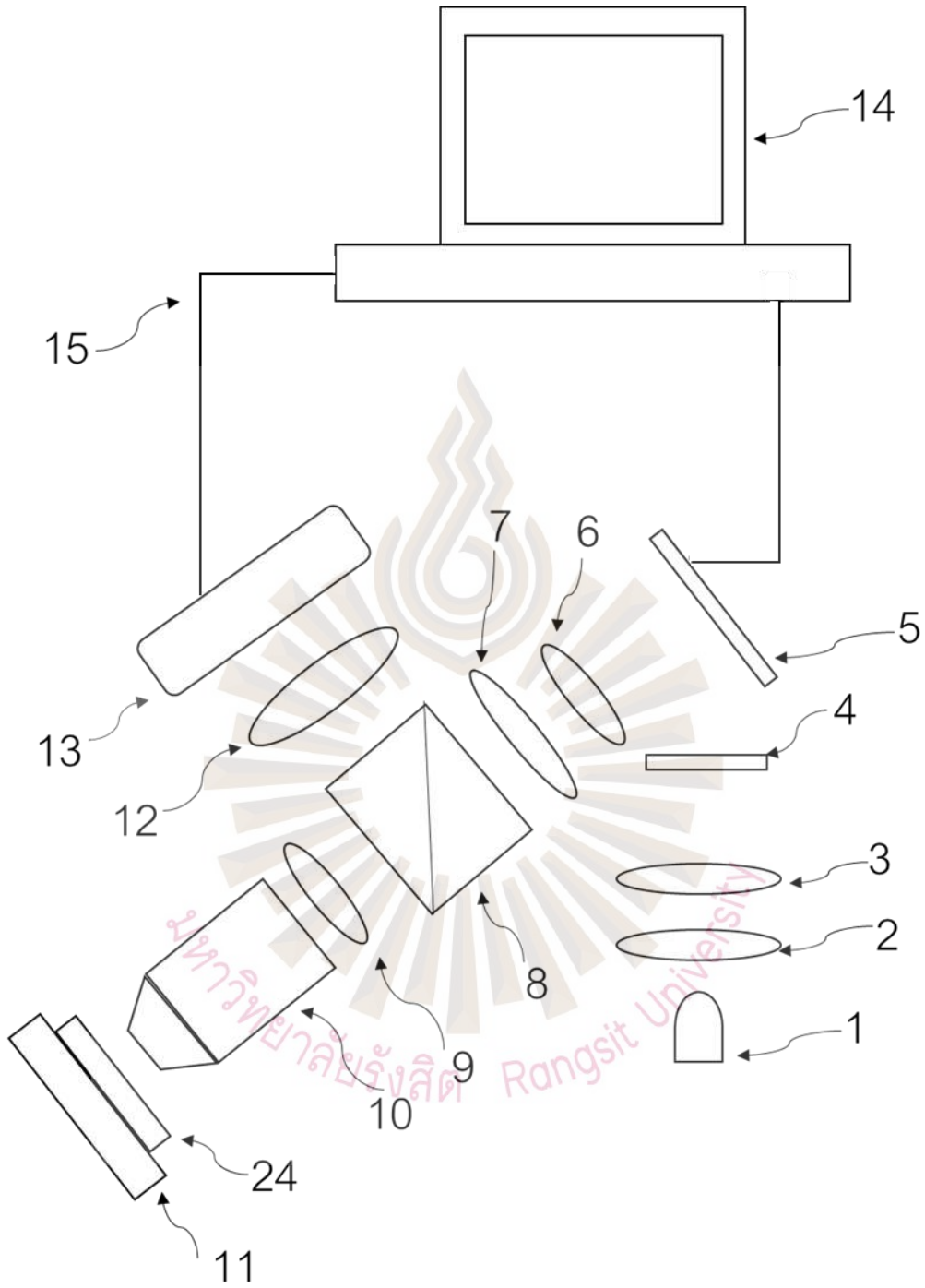


รูปที่ 4

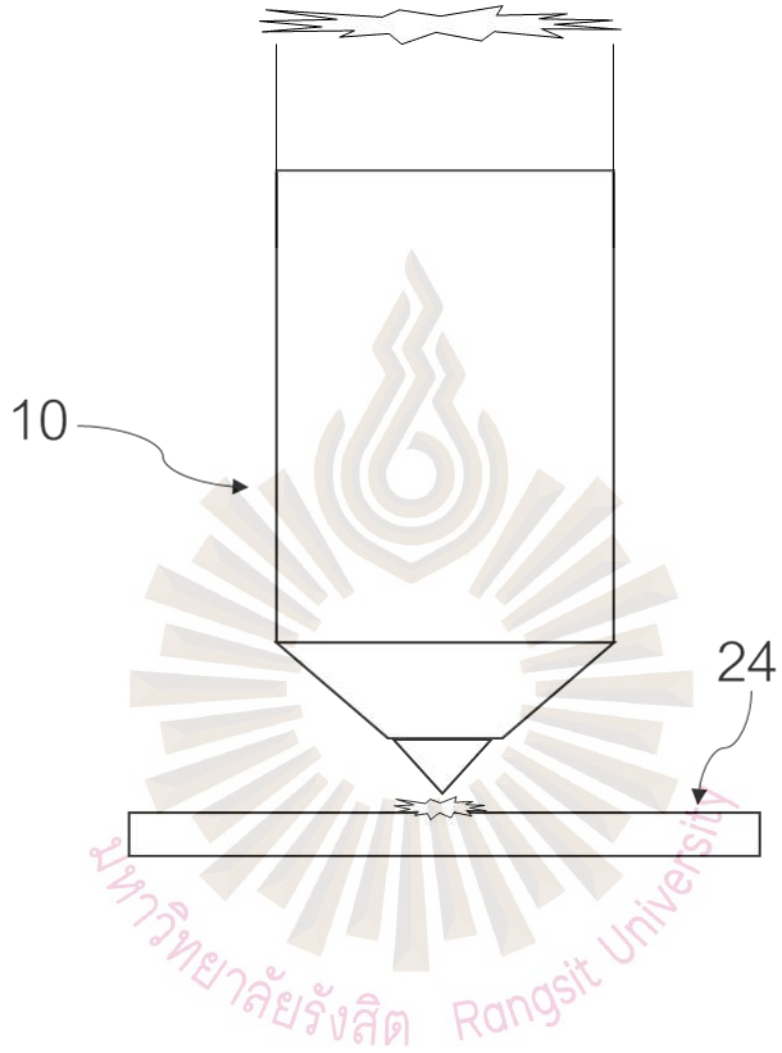




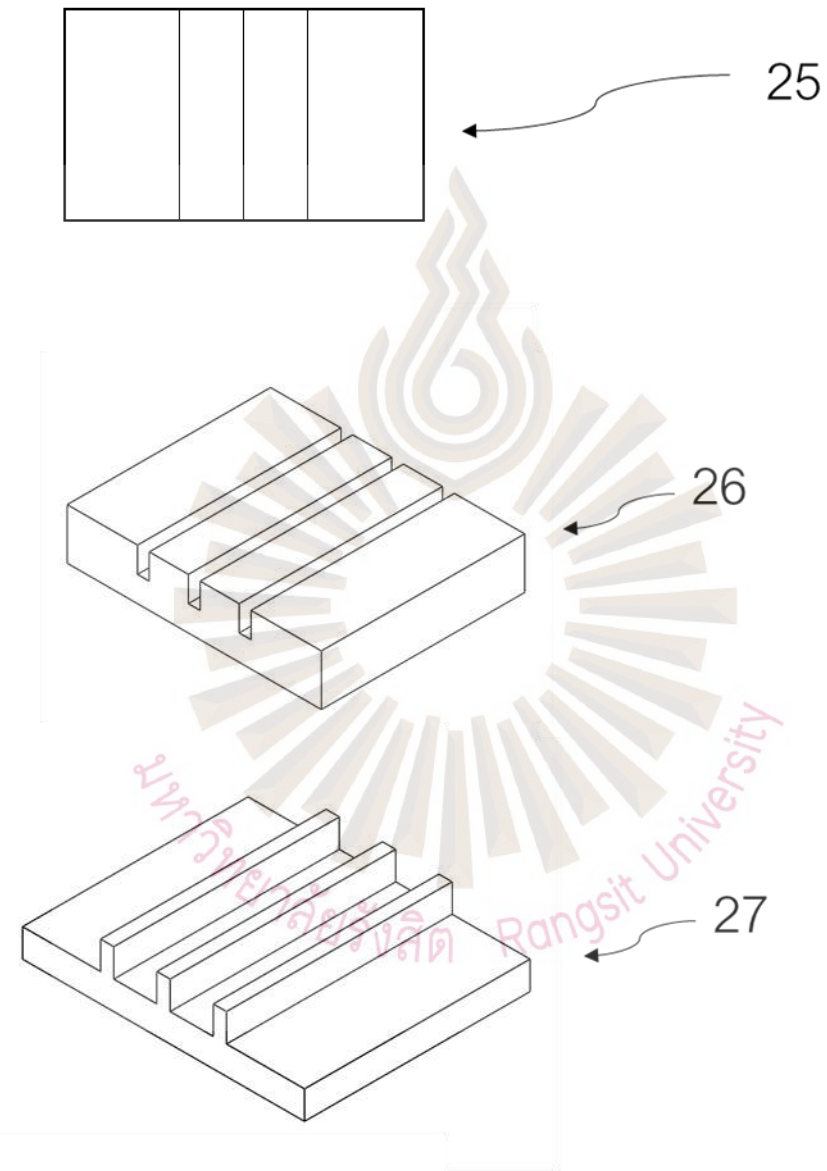
รูปที่ 5



รูปที่ 6



รูปที่ 7



รูปที่ 8

## บทสรุปการประดิษฐ์

กล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยอาศัยหลักการของกล้องจุลทรรศน์สองโหมด ได้แก่ ชนิดส่งผ่านแสงเพื่อฉายภาพไปยังวัสดุแผ่นรองรับและพิมพ์ลวดลาย และชนิดสะท้อนแสงเพื่อใช้แสดงภาพของลวดลายด้วยเซนเซอร์บนคอมพิวเตอร์ทำให้เห็นภาพและระบุตำแหน่งที่ต้องการพิมพ์ได้ ระบบกล้องจุลทรรศน์ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงในช่วงที่ตามองเห็น เลนส์คอนเดนเซอร์แบบโคเลอร์ แผ่นกรองแสง คูเลนส์ปรับขนาดลำแสง อุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ตัวแยกแสง เลนส์ใกล้วัตถุ และ เซนเซอร์รับภาพ มีหลักการของการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แต่ใช้อุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครที่ประกอบไปด้วยกระจกขนาดเล็กเป็นพิกเซลที่สามารถปรับเอียงมุม เพื่อกำหนดทิศทางและรูปร่างของแสงที่สะท้อนออกไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการสร้างลวดลายผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์ ไปยังบริเวณวัสดุแผ่นรองรับที่เคลือบสารไวแสง เมื่อแสงที่มีลวดลายถูกฉายลงบนวัสดุแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสง นำไปอบร้อนและล้างออกด้วยน้ำยาล้างเคมี เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารไวแสง ทำให้ได้ลวดลายที่สร้างขึ้น





ภาคผนวก 2

Widefield Microscope for Projection Maskless Micropattern in Photolithography  
Applications

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University



## Widefield Microscope for Projection Maskless Micropattern in Photolithography Applications

Chayanisa Sukkasem, Suejit Pechprasarn, Suvicha Sasivimolkul, and Phitsini Suvarnaphaet\*

College of Biomedical Engineering, Rangsit University, Pathum Thani, Thailand

\*Corresponding author, E-mail: phitsini.s@rsu.ac.th

### Abstract

Widefield microscopy refers to a technique to illuminate the light to the whole sample. The primary function of a microscope is not only resolving details of the specimen but also enlarging the size. Though the microscope's applications are mostly serving as a magnifying device, however, its optical alignment could be modified reversely. In this work, we propose to modify the widefield microscope for projection micro-pattern without the mask that would be utilized in the photolithography process. Herein, we used LED as a light source in Köhler illumination where the light was condensed and projected onto a transmission LCD by the three-compound lens, namely a collector lens, a field lens, and a condenser lens. The light passed through the transmission LCD originated the desired pattern to be projected through an objective lens, where it is adjustable for 4x and 10x magnifications. The objective lens was used to reduce the transmission pattern size to the micrometer scale before projecting on the substrate. To observe the image plane of the pattern, we can use a beam splitter added into the alignment to reflect the pattern back to a CMOS sensor. Based on this alignment, the pattern can be designed easily using a computer program such as Microsoft PowerPoint. Consequently, the minimum size of a micro-scale pattern can be reduced to 10  $\mu\text{m}$  when the projected image was exposed on the substrate, i.e., linear line, droplet array, grating, and T-junction. This work can be applied towards cost-effective photolithography applications where the mask for patterning would not be needed.

**Keywords:** *Widefield microscopy, Projection maskless micropattern, Microfabrication, Optics, Instrumentation*

### 1. Introduction

In a general view, a microscope is an essential device used in various fields of biomedical studies in order to magnify and resolve small details down to 0.2  $\mu\text{m}$  which is a limitation of visible light (Chen, Zheng, & Liu, 2011). Because of the abilities of the microscope, it would help scientists to work easier and more effective, especially in the medical field trip and school laboratory. For the optical view, the system of the microscope is conventionally aligned based on a basic of widefield technique. It is one of the illumination methods that could be modified and developed to more advanced techniques. For example, Pechprasarn et al. (2018) have shown the modified widefield microscope for low-cost automated whole-slide imaging applications (S. Pechprasarn et al., 2018). The widefield illumination system consisting of three lenses, namely a collector lens, a field lens, and a condenser lens, was used to shine the light upon the whole sample and was combined with a motorized stage in 3-dimensional movement. Therefore, this microscope could capture and stitch images for a large-scale area. Such illumination is called Köhler illumination (Dawe, Schantz, Abramowitz, Davidson, & Hutmacher, 2006). This method does not only give even illumination onto the sample with condensed and uniform light but also reduces artifacts in images wherein they are useful in phase contrast imaging, differential interference contrast microscopy, and projection photolithography (Love, Wolfe, Jacobs, & Whitesides, 2001)

Photolithography, so-called optical lithography, is the main process for the fabrication of semiconductor (Ronse, 2006) and microelectronic industries such as integrated circuits (IC) and micro-electro-mechanical systems (MEMS). This technology has allowed printing of scaffolding pattern in printing technology and microfluidic fabrication in a laboratory on a chip. This technique uses the exposure of UV light with a wavelength between 193-436 nm to transfer the pattern through a photomask onto a substrate that requires a photoresist coating (Li & Wang, 2012; Pimpin & Srituravanich, 2012). The photoresist is a combination of a film-forming agent that is sensitive to the irradiated light. The photoresist area, which is unprotected, can break down in the development (Pimpin & Srituravanich, 2012). Therefore, the photolithography technique is most widely used in small patterning as well as microchannel fabrication (Ali et al., 2013) where the photolithography process is used to create the platform in a biosensor system.



Pechprasarn et al. (2016) have enhanced the sensitivity in the optical biosensor via grating platform in which the micro-patterning needed the photolithography technique (Suejit Pechprasarn et al., 2016).

However, the limitation of this technique involves the fabrication of the photomask process and its cost. When the mask designer creates a new pattern, it leads to the new mask fabrication. This process produces the difficulty of patterning, manufacturing time and costs leading to disruption of innovation (Menon, Patel, Gil, & Smith, 2005; Seok Park et al., 2009). Recently, maskless photolithography has been developed. This system integrates either the digital micromirror device (DMD) or spatial light modulator (SLM) instead of the photomask. The maskless photolithography technique is cost-effective, flexible, and time-saving (Jun Zhong, Qing Gao, & Li, 2013).

In this work, we introduce an idea to modify the widefield microscope to be the maskless projection system for micropatterning. The optical alignment has been developed by adding the optical component and projection device using liquid crystal display (LCD) to project the pattern image, like turning the light ON and OFF. The pattern passed through the LCD will be then minimized and transferred to the substrate. This maskless patterning system based on the widefield microscopy leads to a uniform projection of pattern image. In addition, the modified system provides cost-effective maskless patterning giving more flexibility in pattern design.

## 2. Objectives

1. To study and design the optical alignment of the widefield microscope for projecting image.
2. To construct the modified widefield microscope for projection maskless micropatterning which is to be useful in photolithography applications.

## 3. Materials and Methods

In order to study and design the optical system for the widefield microscope-based maskless patterning projection system, we first illustrated the schematics of optical components and alignment conditions for image implementing.

### 3.1 Implementation of conventional widefield microscope system

The optical system of the widefield microscope consists of a light source, an illumination optical system, objective lens, tube lens, and CMOS sensor, respectively. The schematic of the optical system for a conventional widefield microscope is shown in Figure 1.

Based on the instrumentation system, the light source produced the light passing through the alignment of the system. In conventional, many types of lamps in the commercial microscope are available such as halogen, xenon, and arc lamp, including LED. The illumination of the optical system was designed to create the condensed and uniform light to expose onto the whole sample. Köhler illumination provided the condensed and uniform light through three lenses which are the collector lens, field lens, and condenser lens, respectively. The field diaphragm was also placed between the field lens and the condenser lens in order to control the field of the image plane and adjust the intensity of the light. As a result, the light passing through this illumination will be achieved the proper light intensity onto the sample. Objective lens was used to magnify and resolve sample details in which there were 4x, 10x, 40x and 100x magnifications. The higher the magnification, the higher the resolution can achieve. The resolution which is the ability to resolve two points in the image significantly involves the ability to gather light, or so-called numerical aperture (NA). The NA, therefore, is used to measure how much the light can be collected. The high magnification lens having very short working distance provides the high NA value. In the experiment, we used the NA value of the objective lens as same as that of the condenser lens in Köhler illumination. The NA value can be calculated from a reflective index of the lens related to the light cone angle that the lens can be collected (Mansfield, Studenmund, Kino, & Osato, 1993). In general, there are two types of objective lens, i.e., finite conjugate and infinite conjugate objective lenses. The finite conjugate lens will focus the light from the specimen at the focal plane of the objective lens. On the other hand, the infinite conjugate lens will create the parallel rays, the light is not focused. So, tube lens must be required in an optical system with using the infinite conjugated objective lens to adjust the focal length of the light from the objective lens. The last component was the CMOS sensor adopted from the sensor of a digital camera



for recording the image and manipulate in a computer program. This conventional system has manipulated the referred results related to the resolution and the optimization via Köhler illumination technique.

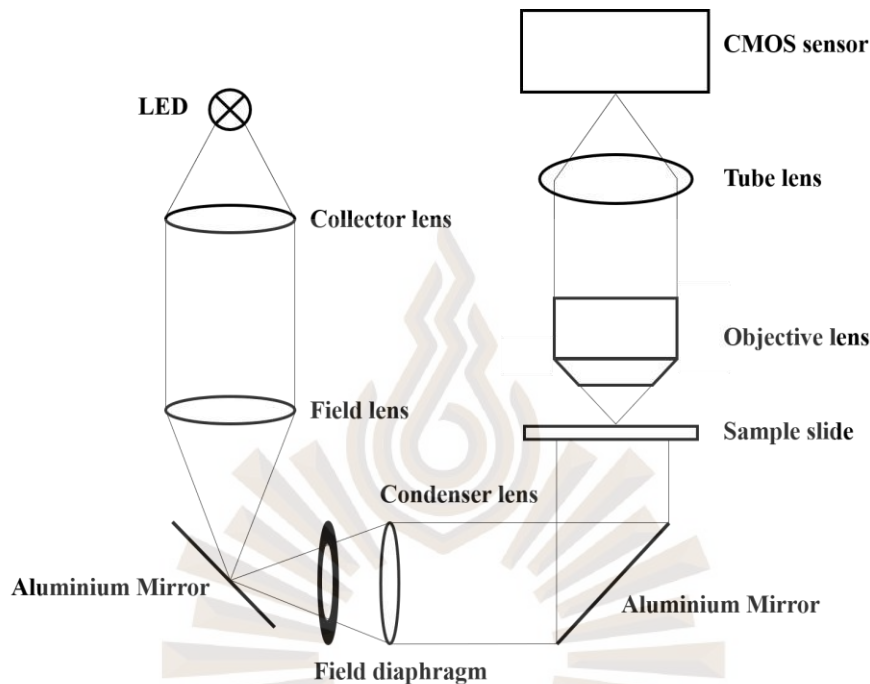


Figure 1 Schematic of the optical alignment of conventional widefield microscope

### 3.2 Modification of widefield microscope-based maskless patterning projection system

To transform the conventional widefield microscope into the modified widefield microscope for the projection system of micropatterning, we have designed the optical alignment as shown in Figure 2 which use the same technique as in Köhler illumination. The optical components inserted were two parts, that are, the patterning used as the light obstacle and the monitoring used for capturing the picture for further processing.

Figure 2 shows the system of the modified widefield microscope. The selection of the light source for the photolithography was considered depending on the wavelength which can engrave the photoresist on the substrate. Some experiment used a halogen lamp with 405 nm wavelength (Lee, 2010; Love et al., 2001). However, in this experiment, we have proposed to demonstrate the setup of the projection microscope for micropatterning. This work thus used the 50 watts warm white LED with approximately 600 nm as a light source of the system.

The illumination system was similar to the conventional widefield microscope that uses Köhler illumination. In this system, the light was illuminated to the transmission LCD plate where the pattern can be created easily using a computer program, for example, the Microsoft PowerPoint and Paint. The pattern composing black and white patterns will obstruct as an analogy between OFF and ON light, respectively. This provides the flexibility to design the new pattern dependent on the applications. In addition, the transmission LCD has controlled the area and field of view of designing patterns matching to the minimizing lens. Thus, we can remove the field diaphragm from the illumination system. The pattern on the transmission LCD was carried by a convex lens and reduced its size using the finite conjugated objective lens. The pattern image whose size was reduced was projected onto the substrate. In the monitoring part, the image of the pattern on the substrate can be reflected back from the objective lens to the CMOS sensor adopted from the digital camera where the beam splitter was placed as in the figure.



This system has been demonstrated both of the projection microscope and the monitoring of the pattern simultaneously serving the precision and the pattern correction to be engraved of the desired microfabrication.

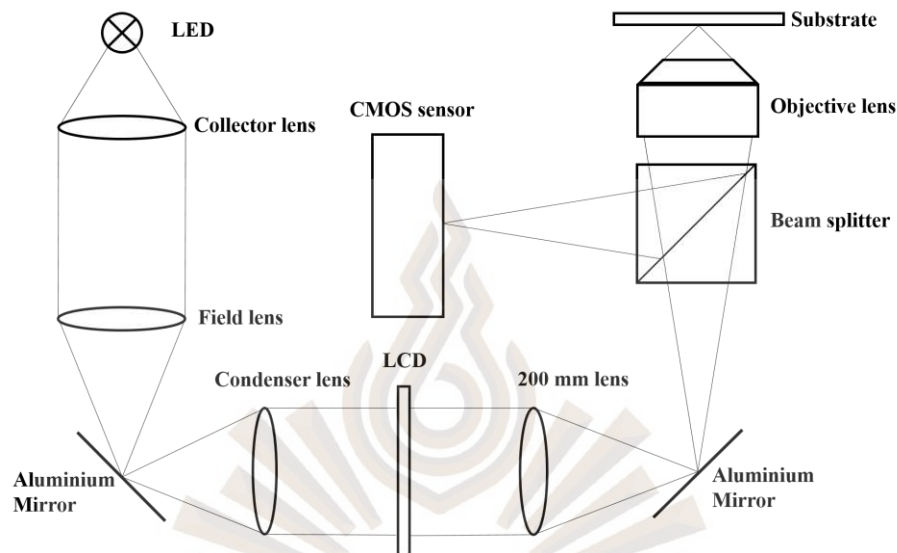


Figure 2 Schematic of the optical alignment of modified widefield microscope for projection maskless micropattern

### 3.3 Patterns and optical alignment testing

Figure 3 shows four patterns as the sample to be demonstrated the projection onto the substrate. There are a linear line, droplet array, grating, and T-junction, respectively. Due to the projection technique based on this microscope, the patterns are capable to design conveniently using a basic computer program and interface to the transmission LCD plate. In this work, we created the patterns to be projected using the Microsoft PowerPoint. The first pattern was a linear line with a 0.11 mm width projected through this microscope to find the narrowest line on the substrate. The second pattern was a 3×3 droplets array with a 1.20 mm diameter of each circle and is useful for the fabrication of microfluidic platform for the detection of *E.coli* in the water (Golberg et al., 2014). The third pattern was a linear grating with a 0.25 mm width and gap used to enhance the sensitivity in the optical sensor (Suejit Pechprasarn et al., 2016). The last pattern was T-junction with a 0.20 mm width as a basic pattern of the microfluidic channel for mixing the chemical agents.

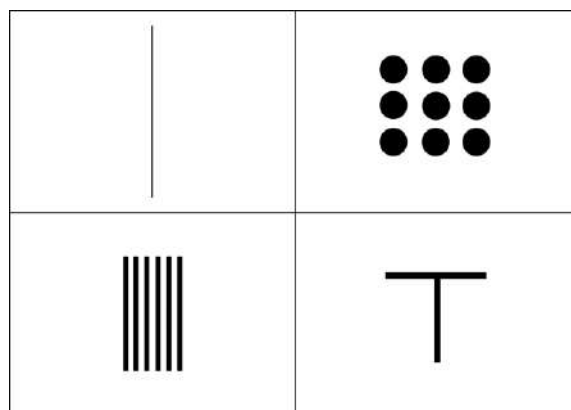


Figure 3 Pattern for projection on the substrate





#### 4. Results and Discussion

The optical alignment of the conventional widefield microscope has been implemented showing in Figure 4. As seen, the components consisted of the high-power LED as a light source of the system as a reason of cost-effective and avoiding the heat problem from some types of the lamp (Albeanu, Soucy, Sato, Meister, & Murthy, 2008). The illumination system consisting of three convex lenses were the collector lens (50 mm), field lens (200 mm), and condenser lens (50 mm, 0.4472NA). The field diaphragm was placed between the field lens and condenser lens. The magnification system consisting of the 4x objective lens (0.1NA) and the 10x objective lens (0.25NA), was used herein. These lenses were matched with the NA of the condenser lens which was below 0.44. The tube lens with a 200 mm focal length was matched with the finite objective lens. The image acquisition system and monitoring were used CMOS sensor having size of 22.3mm x 14.9mm (4752 x 3168 pixel, Canon 50D). Other components, the aluminum mirror was sputtered aluminum with a 202 nm thickness used as the reflector where %transmission was less than 0.05% in a range of 200-1100 nm wavelength.

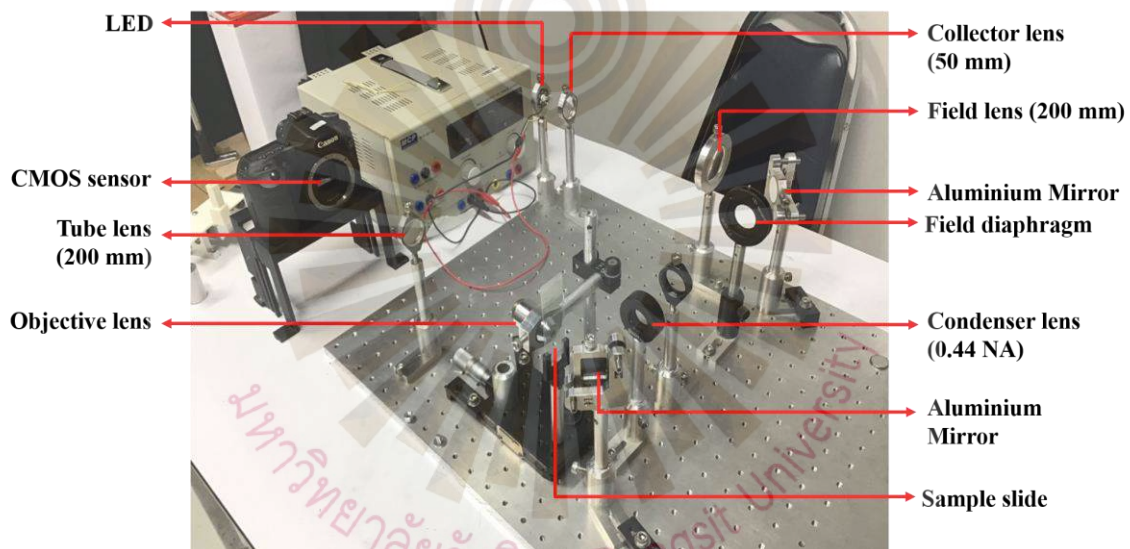
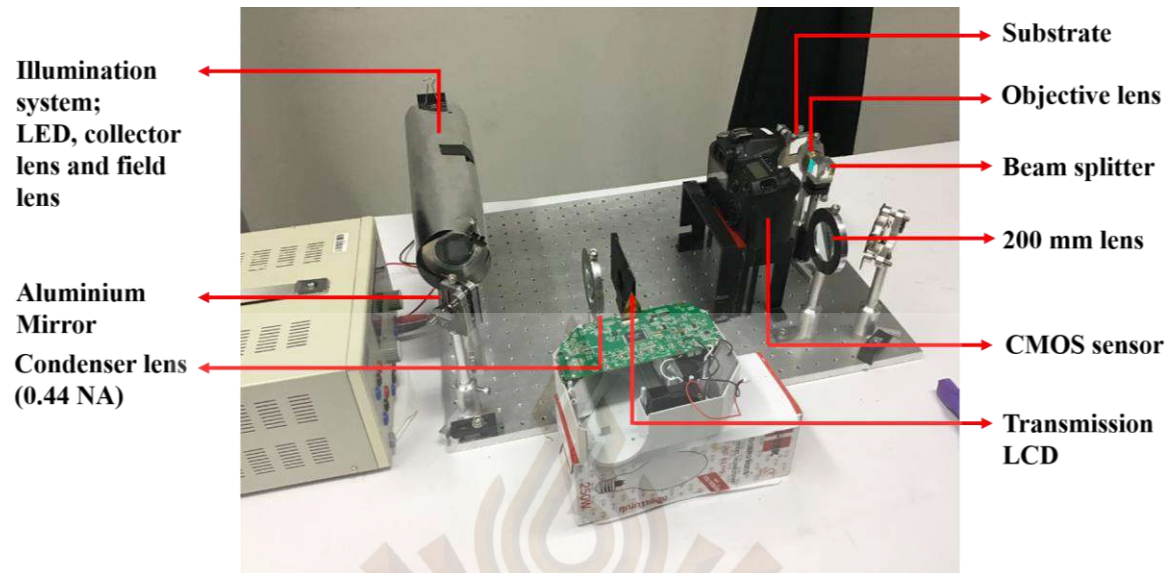


Figure 4 Implementation of the optical alignment of conventional widefield microscope

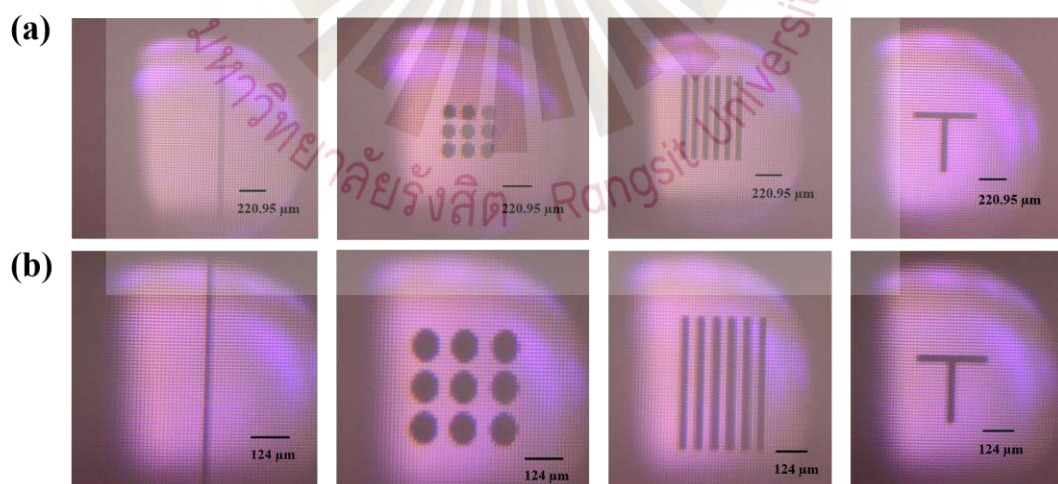
As a result, the grating target of USAF1951 (R1DS1N, Negative 1951 USAF Test Target, Thorlabs, Inc.) was used for testing the resolution of this widefield microscope. It was placed in the position of the sample slide as seen in the figure. The resolution of the image acquired from this system can obtain a measurement of approximately 8.7  $\mu\text{m}$  which was the smallest details that are able to resolve the image.

Figure 5 shows the modified widefield microscope that has been implemented. We have transformed the system into a projection microscope for maskless patterning. As seen, the transmission LCD was inserted into the projector part. The convex lens with a 200 mm focal length was used for carrying out the pattern from the transmission LCD to the finite conjugated lens and the beam splitter which helped us to collect the image from the substrate. The objective lens was inversely used in order to minimize the pattern instead of magnification which was the result of the conventional method. Therefore, the image was projected on the substrate with micro-size and high-resolution image. In addition, the illumination part has to be covered with the aluminum sheet because the amount of noise from the circumstance affected the low intensity of imaging. The imaging results of the patterns in Figure 3 will be demonstrated in the next section.



**Figure 5** Implementation of the optical alignment of modified widefield microscope for projection maskless micropattern

The results of the system in the figure below show the four patterns projected on the substrate using 4x and 10x objective lens related to Figure 6a and Figure 6b, respectively. The results show that more magnification and more NA gave more resolution and contrast in accordance with the rules of resolution that were  $0.61\lambda$  over NA in the xy-axis and  $1.67\lambda$  over  $NA^2$  in the z-axis (Mansfield et al., 1993).



**Figure 6** Patterns projected onto the substrate (a) using 4x objective lens and (b) using 10x objective lens. The patterns were linear lines, droplet array, grating and T-junction, respectively

As a result of pattern projection shown in Figure 6, we acquired these images from the monitoring part using CMOS sensor interfaced to the computer. All of the patterns can be obviously seen and resolved with the details. To evaluate the size of the patterns that was projected on the substrate, the demonstration was achieved to project the minimized patterns on the substrate and simultaneously reflect back to the CMOS sensor through an objective lens for monitoring. The CMOS sensor was connected to PC via USB



cable so we can control the digital camera to capture and collect the image. Then, we can estimate the size of the patterns by comparing with a known object (width of line pair) of 1951 USAF image where we captured 1951 USAF with the same objective lens. The smallest micropattern size that can be projected on the substrate using this alignment was approximately 50  $\mu\text{m}$  with 4x objective lens and 10  $\mu\text{m}$  with 10x objective lens, respectively. However, the size was calculated theoretically related to the resolution of the CMOS sensor, which their real size could be observed under the electron microscope after the etching process for further work.

## 5. Conclusion

The modified alignment system of the widefield microscope for projecting a maskless micropatterning system has been implemented. The developed system consists of high-power LED as the light source of the system, the three-convex lens of Kohler illumination for uniformly illuminating the whole pattern, the 4x and 10x objective lens for reducing pattern images instead of magnifying, the beam splitter, and CMOS sensor for observation. As a system testing, we projected four patterns, namely the linear line, droplet array, grating, and T-junction on the substrate. Consequently, the pattern projected onto the substrate was measured at the size of approximately 50  $\mu\text{m}$  with the 4x objective lens and 10  $\mu\text{m}$  with the 10x objective lens. The projection pattern can be taken simultaneously by the CMOS camera in the backward reflection alignment which is very convenient for observing during the projection pattern incident on the substrate. The projection system will be integrated into the microfabrication of grating for further process. We expect that this system would reduce the cost of photomask fabrication, provide flexibility, and save production time.

## 6. Acknowledgements

This work was funded by the Research Institute of Rangsit University and STEM program of National Science and Technology Development Agency (NSTDA). CS and SS also would like thank Photonics Technology Laboratory (PTL) of National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Biophysics and Medical Optic laboratory in College of Biomedical Engineering for supporting facilities during doing research.

## 7. References

- Albeanu, D. F., Soucy, E., Sato, T. F., Meister, M., & Murthy, V. N. (2008). LED Arrays as Cost Effective and Efficient Light Sources for Widefield Microscopy. *PLoS ONE*, 3(5), e2146.
- Ali, M. A., Srivastava, S., Solanki, P., Venu, R., Agrawal, V., Kim, C., John, R., & Malhotra, B. D. (2013). Highly Efficient Bionzyme Functionalized Nanocomposite-Based Microfluidics Biosensor Platform for Biomedical Application. *Scientific Reports*, 3, 2661.
- Chen, X., Zheng, B., & Liu, H. (2011). Optical and digital microscopic imaging techniques and applications in pathology. *Analytical cellular pathology*, 34(1-2), 5-18.
- Dawe, G. S., Schantz, J.-T., Abramowitz, M., Davidson, M. W., & Huttmacher, D. W. (2006). Light microscopy. *Techniques in Microscopy for Biomedical Applications*, 2, 9.
- Mansfield, S., Studenmund, W., Kino, G. S., & Osato, K. (1993). High-numerical-aperture lens system for optical storage. *Optics Letters*, 18(4), 305-307.
- Menon, R., Patel, A., Gil, D., & Smith, H. I. (2005). Maskless lithography. *Materials Today*, 8(2), 26-33.
- Pechprasarn, S., Larkthanakhachon, S., Zheng, G., Shen, H., Lei, D. Y., & Somekh, M. G. (2016). Grating-coupled Otto configuration for hybridized surface phonon polariton excitation for local refractive index sensitivity enhancement. *Optics Express*, 24(17), 19517-19530.
- Pechprasarn, S., Sukkasem, C., Suvarnaphaet, P., Thongchoom, R., Chuwittaya, S., & Janyasupab, M. (2018, November). Low-cost instrumentation of Automated Whole-slide Microscope for Biomedical Imaging. In *2018 11<sup>th</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)* (pp. 1-4). IEEE.
- Seok Park, E., Jang, D., Lee, J., Jeong Kim, Y., Na, J., Ji, H., Choi, J. W., & Kim, G.-T. (2009). Maskless optical microscope lithography system. *Review of Scientific Instruments*, 80(12), 126101.

ภาคผนวก 3

ภาพระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับฉายภาพโดยไม่ใช้โฟโตมาส์กขณะทดลองฉายภาพ







ภาพแสดงระบบต้นแบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์



ภาพแสดงขณะฉายภาพด้วยระบบต้นแบบกล้องจุลทรรศน์โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์