



การออกแบบและสร้างระบบควบคุมด้วยแสงโดยใช้ฟองอากาศสำหรับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785  
นาโนเมตร

ธมนวรรณ อ่องรุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมด้วยแสงโดยใช้ฟองอากาศสำหรับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785  
นาโนเมตร



ธมนวรรณ อ่องรุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Design and Construction of an Optical Manipulation System with Bubbles for a 785-  
nm Laser



THAMONWAN ONGRUNGRUENG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE

IN PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ ธมนวรรณ อ่องรุ่งเรือง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ วิเศษสุวรรณศักดิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีสุขผล)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิหวัศ แจ่มเอี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

65910116: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ออปติคัลวอร์เท็กซ์, ฟองอากาศ, การไหลเวียนโดยการพาความร้อน

ชมนววรรณ อ่องรุ่งเรือง : การออกแบบและสร้างระบบควบคุมด้วยแสงโดยใช้ฟองอากาศสำหรับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร. (Design and Construction of an Optical Manipulation System with Bubbles for a 785-nm Laser) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สิทธิ บัวทอง, สราวุธ เดชะปัญญา ปี พ.ศ. 2567.

การออกแบบและสร้างระบบแสงสำหรับการควบคุมแสงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลฟลูออเรสเซนซ์ ในการทดลอง ใช้ 780 nm fluorescence dye molecules เพื่อระบุตำแหน่งจุดโฟกัสของแสงเลเซอร์และเป็นตัวอย่างสำหรับการสร้างฟองอากาศที่ทำหน้าที่ดักจับหรือดึงดูดโมเลกุล โดยการใช้ปรากฏการณ์มารานโกนีที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความแตกต่างของแรงตึงผิวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวสัมผัส ส่งผลให้เกิดการไหลวนโดยการพาความร้อนรอบๆ ฟองอากาศ ที่ดึงดูดโมเลกุลและทำให้หยุดนิ่งภายในฟองอากาศได้ ฟองอากาศสามารถสร้างขึ้นโดยพลังงานความร้อนของแสงเลเซอร์ ซึ่งขนาดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับกำลังแสงและระยะเวลาที่แสงกระทบบนตัวอย่าง ในการวิจัยนี้ใช้ลำแสงเลเซอร์สองแบบ ได้แก่ ลำแสงเลเซอร์แบบเกาส์เซียนและลำแสงวอร์เท็กซ์พลังงานต่ำ เมื่อเกิดฟองอากาศและการไหลวนโดยการพาความร้อนแล้ว ทำให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กถึง  $2 \mu\text{m}$  ถูกดึงดูดเข้าสู่ฟองอากาศ ด้วยวิธีนี้จึงสามารถดักจับโมเลกุลได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานเลเซอร์น้อย

65910116: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: optical vortex, bubbles, convective flow

THAMONWAN ONGRUNGRUENG : DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN OPTICAL MANIPULATION SYSTEM WITH BUBBLES FOR A 785-NM LASER. ADVISORY COMMITTEE: SITTI BUATHONG, SARAYUT DEACHAPUNYA 2024.

The optical system for optical manipulation was designed and built using a fluorescent confocal microscope. In the experiment, 780 nm fluorescence dye molecules were used to locate the focus of laser light and as a sample for creating bubbles. The bubbles are responsible for trap or attract molecules through the Marangoni effect, which is caused by the movement of fluids with different surface tensions due to changes in temperature at the interface, resulting in convective flow around the bubble, that attract molecules and make them stay inside the bubbles. Bubbles can be generated by the heat energy of a laser beam, and the size of the bubbles depends on the light power and the duration of the light striking the sample. Two types of laser beams were used in this research, i.e. a Gaussian laser beam and a low-energy optical vortex. As bubbles are formed and convective flow, molecules as small as 2  $\mu\text{m}$  are attracted into the bubbles. This way we can capture molecules quickly and use less laser energy.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เตชะปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้ แนวความคิด และเทคนิคต่างๆ ทั้งในแนวทางทฤษฎี และแนวทางการปฏิบัติ อีกทั้งยังเสนอและแนะนำโอกาสที่ดีที่จะเกิดประโยชน์ทั้งด้านการศึกษาและแนวทางในอนาคตแก่ข้าพเจ้าเสมอ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล ผู้คอยให้ความช่วยเหลือ และยังเป็นผู้ที่คอยอธิบายเรื่องให้ข้าพเจ้าเข้าใจมาตลอด ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาเสมอ ขอขอบคุณ คุณพิศสุนีย์ ดีชื่น ผู้ซึ่งคอยอธิบายในเรื่องที่ข้าพเจ้าไม่เข้าใจ คอยบอกแนวทางในการทำงาน รวมทั้งการดำเนินการต่างๆ ตั้งแต่เริ่มศึกษาวิจัย ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าจะนำทุกคำสั่งสอนและคำตำหนิติมที่ได้รับ มาพัฒนาและปรับปรุงตัวเพื่อให้ตัวข้าพเจ้าดียิ่งขึ้น

ธมนวรรณ อ่องรุ่งเรือง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
บทที่ 2.....	8
ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 เลเซอร์.....	8
2.2 โพลาริเซชันของแสง (Polarization of light).....	9
2.3 ออปติคัลสวอร์เท็กซ์.....	14
2.4 น้ำตาของไวน์และปรากฏการณ์มารานโกนี.....	19
2.5 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Motion).....	28
2.6 สมการแลงเกวิน (Langevin equation).....	29
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน.....	31
บทที่ 3.....	33

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	33
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย.....	33
3.2 วิธีการทดลอง.....	34
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	36
บทที่ 4.....	39
ผลการดำเนินงานวิจัย.....	39
4.1 ผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงเกาส์เซียน.....	39
4.2 ผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงออร์เทกซ์.....	46
บทที่ 5.....	52
สรุปผลการทดลอง.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	58

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ภาพตัวอย่างการใช้แหวนเชิงแสงเพื่อศึกษาปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนกับดีเอ็นเอ (a) การยึดโมเลกุลดีเอ็นเอแบบเกลียวคู่อาร์เอ็นเอโพลิเมอเรส (RNAP) ถูกดักจับและหยุดการทำงานที่ $t_1$ , $t_2$ , และ $t_3$ (b) การคลายซิปโมเลกุลดีเอ็นเอ ทำให้เกลียวคู่อาร์เอ็นเอโพลิเมอเรสถูกติดตามด้วยมอเตอร์ (Mfd) (c) การบิดโมเลกุลดีเอ็นเอ เป็นการบิดโมเลกุลดีเอ็นเอสองตัวรวมกันผ่านคีมจับเชิงแสงและหมุนไมโครปิเปต ใช้เพื่อศึกษาการผ่อนคลายของโทโปไอโซเมอเรส (d) การรวมการตรวจจับฟลูออเรสเซนซ์และการควบคุมแรงเข้าด้วยกัน พบว่าเฮลิคาส (CMG) ที่จำลองขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกระหว่างดีเอ็นเอสายเดี่ยว (ssDNA) และโมเลกุลดีเอ็นเอ [6].....	2
ภาพที่ 2 แสดงการดักจับอนุภาคโพลิสไตรีนและซิลิกาที่เกรตติงเรเดียลแอมพลิจูมโพรไฟล์เบนารีต่างกัน คอลัมน์ที่หนึ่งคืออนุภาคโพลิสไตรีนขนาด $1.09 \mu\text{m}$ คอลัมน์ที่สองคืออนุภาคซิลิกาขนาด $2.54 \mu\text{m}$ และกำลังของเลเซอร์ที่ต่ำลง (ดัดแปลงจาก [7]).....	3
ภาพที่ 3 การกำหนดค่าการดักจับพลาสมอนิกบนพื้นผิวผ่านโครงสร้างนาโนที่ออกแบบ (a) การดักจับพลาสมอนิกผ่านโครงสร้างโลหะ รูปแบบของแผ่นทองคำจะเรืองแสงผ่านปริซึมแก้ว [9] (b) ภาพการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ติดอยู่กับรูรับแสงพลาสมอนิกแบบโบว์ไทด์ (ดัดแปลงจาก [10]) (c) การดักจับอนุภาคนาโนสเฟียร์หลายอนุภาคในแลตทิซของออปติคัลพลาสมอนิก (ดัดแปลงจาก [11]) (d) การดักจับและปล่อยอนุภาคนาโนสเฟียร์ขนาด $20 \text{ nm}$ (ดัดแปลงจาก [12]) (e) การดักจับหรือหมุนของอนุภาคไมโครสเฟียร์ (ดัดแปลงจาก [13]).....	4
ภาพที่ 4 แสดงการดักจับอนุภาคไมโครบับเบิล (a) อนุภาคเคลื่อนที่อิสระ (b), (c) และ (d) อนุภาคที่ถูกลูกศรชี้ถูกดักจับ อนุภาคตัวอื่นๆ ยังคงเคลื่อนที่อิสระ [23].....	5
ภาพที่ 5 ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่ติดอยู่ในอากาศ จุดสว่างในวงกลมสี่เหลี่ยมคือแสงที่กระจัดกระจายจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่ติดอยู่ ส่วนภาพที่ขยายแสดงให้เห็นถึงอนุภาคที่ติดอยู่ในอากาศ [24].....	6
ภาพที่ 6 ไดอะแกรมของรูบิลเลเซอร์ [25].....	8
ภาพที่ 7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแสงที่ประกอบด้วยระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [27].....	9
ภาพที่ 8 แสงโพลาริซ์เชิงเส้น [27].....	10

ภาพที่ 9 (a) แสงโพลารไรซ์แบบวงกลมทางขวามือ (b) แสงโพลารไรซ์แบบวงกลมทางซ้ายมือ [27] ...	10
ภาพที่ 10 แสงโพลารไรซ์แบบวงรี [28] .....	11
ภาพที่ 11 แสดงถึงโครงสร้างแบบขดลวด หน้าเฟส และความเข้มของลำแสงวอร์เท็กซ์ .....	14
ภาพที่ 12 น้ำตาของไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ 13.5% [32] .....	19
ภาพที่ 13 น้ำตาของไวน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไล่ระดับของแรงตึงผิว ระหว่างเมนิสคัสกับพื้นผิวของไวน์ [33] .....	20
ภาพที่ 14 แรงตึงผิวในของเหลวที่ทำปฏิกิริยากับไอของของเหลว โมเลกุลของเหลวที่พื้นผิว (สีแดง) มี ปฏิสัมพันธ์ที่ไม่สมมาตร โมเลกุลของเหลวที่อยู่ด้านล่าง (สีม่วง) จะมีปฏิสัมพันธ์ที่สมมาตรมากกว่า เล็กน้อย ในขณะที่โมเลกุลของเหลวที่อยู่กันเป็นกลุ่ม (สีน้ำเงิน) จะมีปฏิสัมพันธ์ที่สมมาตรมากกว่าเดิม [33] .....	21
ภาพที่ 15 ภาพตัวอย่างการทดลอง เมื่อหยดสบู่ลงไป .....	22
ภาพที่ 16 (a)-(f) แสดงการรวบรวมอนุภาคโพลีสไตรีนขนาด 15 $\mu\text{m}$ ที่กระจายแบบสุ่ม และ (g) แสดงการจัดการอนุภาคเดียวตามวิถีโคจรเพื่อทำตัวอักษร P S U จากซ้ายไปขวา [34] .....	23
ภาพที่ 17 การสร้างฟองอากาศในไมโครเซนเนลในช่วงเวลาต่างๆ โดยมีแผ่นโครเมียมสีเหลืองจัดรัศ ขนาด 500 $\mu\text{m}$ จุ่มอยู่ในน้ำ ดัดแปลงจาก [35] .....	24
ภาพที่ 18 ภาพแสดงขนาดของฟองอากาศที่มีความแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นอิเล็กโทรด และประเภทของของเหลว (a)-(c) ฟองอากาศที่อิมิต์ที่เกิดขึ้นในน้ำบนแผ่นอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 200 $\mu\text{m}$ สีเหลืองจัดรัศ 500 $\mu\text{m}$ และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ตามลำดับ และ (d)-(f) ฟองอากาศอิมิต์ที่เกิดขึ้นในเอธานอล น้ำปราศจากไอออน และสารละลาย PBS ตามลำดับ บนแผ่น อิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm [35] .....	24
ภาพที่ 19 ฟองอากาศที่เกิดการรวมตัวของอนุภาคดูดซับแสง (APs) ในระยะเวลาที่ต่างกัน ซึ่งวงกลม สีแดงแสดงถึงจุดโฟกัสของเลเซอร์ ดัดแปลงจาก [36] .....	25
ภาพที่ 20 แผนผังทางกายภาพสำหรับปรากฏการณ์มารานโกนีสองมิติที่เหนียวนำด้วยเลเซอร์ (a) ลำแสงเลเซอร์แก๊สเซียนที่ $(x_c, y_c)$ ตกกระทบกับชั้นของเหลวที่ดูดซับ ทำให้เกิดการไล่ระดับอุณหภูมิที่ รอยต่อระหว่างของเหลวและอากาศ (b) การโค้งงอของรอยต่อเพิ่มขึ้น เมื่อส่วนที่โค้งงอไปถึงตำแหน่ง ของจุดเลเซอร์จะเกิดการไหลวนของของเหลว [37] .....	26

ภาพที่ 21 ภาพถ่ายสนามมืดด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ประกอบด้วยกรไลนวนที่เกิดจากเลเซอร์ใน  
 สารละลาย pNA-1,4 ไดออกเซน เส้นหลายสีแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฟลักซ์ของเหลวที่  
 ถ่ายได้ 100 เฟรมติดต่อกัน แต่ละเฟรมนาน 40 ms ด้านซ้ายของภาพนำเสนอเป็นแบบจำลองกลับ  
 หัวของด้านขวา เพื่อขีดเส้นใต้ความสมมาตรที่สมบูรณ์แบบของการไหล ลูกศรแนวตั้งแสดงแอมพลิจูด  
 การโค้งงอของรอยต่อเนื่องจากแรงตึงผิวเฉพาะที่ลดลงซึ่งเกิดจากการกระจายอุณหภูมิ และลูกศรโค้ง  
 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งตำแหน่งของจุดเลเซอร์อยู่ที่จุดโค้งสูงสุดของรอยต่อ [37]  
 ..... 27

ภาพที่ 22 ภาพถ่ายของฟองอากาศที่ถูกกระแสการไหลวนจับยึดไว้เมื่อมองในสนามมืด ทำให้สามารถ  
 มองเห็นวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดัดแปลงจาก [37] ..... 27

ภาพที่ 23 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน [37] ..... 28

ภาพที่ 24 (a) อนุภาคขนาดเล็กที่แช่อยู่ในของไหลเกิดการชนอย่างต่อเนื่องกับโมเลกุลของของไหล  
 (b) การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งและความเร็วของโมเลกุล  
 ของของไหลได้ [38] ..... 29

ภาพที่ 25 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน: เส้นโคจรและการแจกแจงความน่าจะเป็น การเคลื่อนที่  
 แบบบราวเนียนสามารถจำลองโดยที่ (a) เส้นวิถีโคจรสุ่ม  $r(t)$  ของอนุภาคเดี่ยว หรือ (b) ความ  
 หนาแน่นของความน่าจะเป็น  $\rho(r, t)$  ของกลุ่มอนุภาคบราวเนียน [38] ..... 32

ภาพที่ 26 แผนภาพชุดอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยเลเซอร์ เลนส์นูน (L1, f=15 mm) เลนส์นูน  
 (L2&L3, f=25 mm) โพลารไรซ์เชิงเส้น (LP) แผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท (HWP) แผ่นควอเตอร์เวฟเพลท  
 (QWP) แผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์เดอร์ (VHWR) กระจก (M1&M2) ผลึกแยกลำแสงโพลารไรซ์  
 (PBS) เลนส์ใกล้วัตถุ (Microscope lens) สเตจเคลื่อนที่แบบมือหมุน (3D stages) โคมไฟ (lamp)  
 ฟิลเตอร์ (Filter) และ กล้อง (camera) ตามลำดับ ..... 35

ภาพที่ 27 ตัวอย่างการเตรียมตัวอย่างบนกระจกสไลด์ [38] ..... 36

ภาพที่ 28 หน้าโปรแกรมของ ThorCam ที่ใช้ในการทดลอง ..... 36

ภาพที่ 29 การปรับเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อหาระยะโฟกัสของอนุภาค ดัดแปลงจาก[39] ..... 37

ภาพที่ 30 ภาพตัวอย่างโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye เรืองแสง ..... 37

ภาพที่ 31 ตัวอย่าง dye molecules (วงกลมสีแดง) ที่เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายในฟองอากาศ  
 ซึ่งสังเกตได้จากที่ตัวอย่างเรืองแสงหลังจากเคลื่อนที่เข้าสู่จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์ ..... 40

ภาพที่ 32 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
 ฟองอากาศ โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคเกิดจากการพาความร้อนแบบมารานโกนี่..... 41

ภาพที่ 33 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
 ฟองอากาศ ซึ่งภาพนี้เป็นภาพผลการทดลองต่อเนื่องจากภาพที่ 32 ..... 42

ภาพที่ 34 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
 ฟองอากาศ ซึ่งภาพนี้เป็นภาพผลการทดลองต่อเนื่องจากภาพที่ 32 และ 33 ..... 43

ภาพที่ 35 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ dye molecules ขนาด  
 เล็ก (วงกลมสีแดงซ้ายมือ) จะมีการเคลื่อนที่แบบโค้งเพื่อหลบ dye molecules ตัวอื่น ..... 44

ภาพที่ 36 เนื่องจากการจัดอุปกรณ์เป็นแบบกล้องจุลทรรศน์แบบกลับหัวเพื่อชดเชยแรงโน้มถ่วง ทำ  
 ให้ dye molecules ถูกเลเซอร์ผลักให้ขึ้นมา จะเห็นตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่และชัดขึ้น..... 45

ภาพที่ 37 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศที่  
 ลำแสงเลเซอร์มีลักษณะเป็นลำแสงวอร์เท็กซ์  $l = +1$ ..... 47

ภาพที่ 38 ตัวอย่าง dye molecules ที่มีขนาดมากกว่า 2  $\mu\text{m}$  เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศ ..... 48

ภาพที่ 39 ตัวอย่าง dye molecules ขนาดประมาณ 2  $\mu\text{m}$  ที่เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งใน  
 ฟองอากาศ เมื่อลำแสงวอร์เท็กซ์กระทบกับตัวอย่างจะเห็นได้ว่าแสงเรืองแสงสว่างขึ้น..... 49

ภาพที่ 40 ภาพการทดลองที่ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  ที่เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศ 50

ภาพที่ 41 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye  
 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 500-900 nm ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นโมเลกุล [IR780][1] เส้นสีน้ำเงินเข้ม  
 (ดัดแปลงจาก [39])..... 51

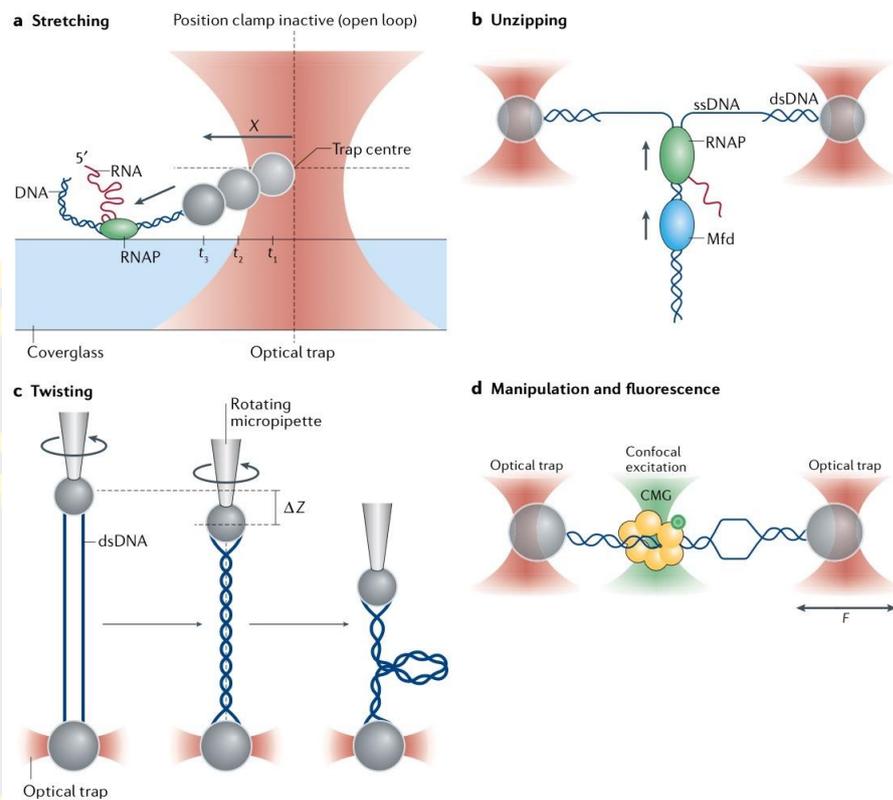
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

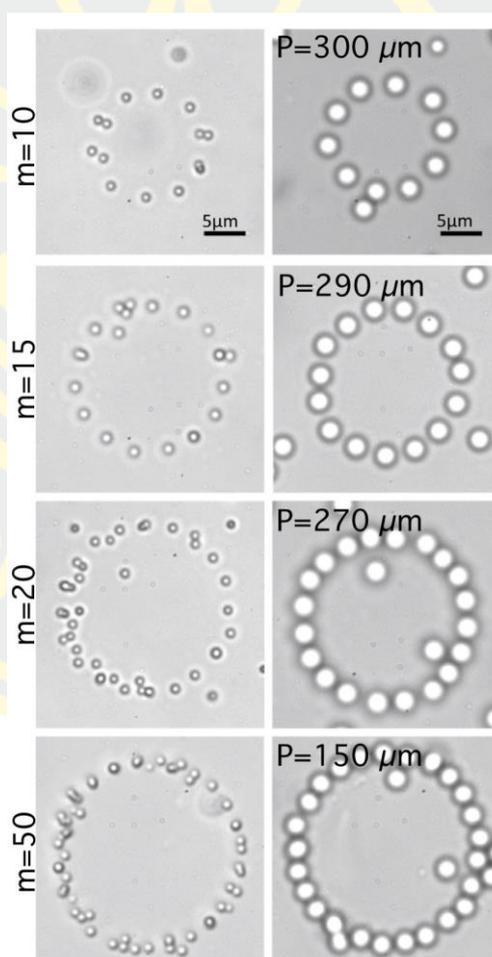
เมื่อปี ค.ศ. 1970 แหนบเชิงแสง (Optical Tweezers) ถูกคิดค้นโดย Arthur Ashkin [1] ซึ่งเป็นเครื่องมือด้านฟิสิกส์ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์เพื่อดักจับและควบคุมอนุภาคขนาดเล็ก โดยอาศัยแรงเพิ่มจากแสงเลเซอร์ โดยประกอบไปด้วยแรงกระเจิง (Scattering force) มีทิศเดียวกับทิศของแสงที่ตกกระทบ และแรงเกรเดียนต์ (Gradient force) มีทิศตั้งฉากกับทิศของแสงตกกระทบและพุ่งสู่บริเวณที่แสงเลเซอร์มีกำลังสูงสุด ทำให้อนุภาคถูกดึงเข้าไปในจุดโฟกัสของแสงเลเซอร์ การประยุกต์ใช้แหนบเชิงแสง ได้แก่ การแยกตัวอสุจิจากตัวอย่างทางนิติวิทยาศาสตร์ [2] การนำคลอโรพลาสต์ออกจากเซลล์พืช [3] ศึกษาคุณสมบัติและอันตรกิริยาของโมเลกุลเดี่ยว [4] และดักจับเซลล์ยีสต์ [5] เป็นต้น

ด้วยประโยชน์ที่มากมาย ทำให้มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับแหนบเชิงแสง เช่น ทีมของ Carlos J. ทำการดักจับโมเลกุลเดี่ยว ได้ทบทวนหลักการทำงานของแหนบเชิงแสงและได้ปรับเปลี่ยนวิธีการเพื่อวัดแรงและการกระจัดของโมเลกุลเดี่ยว มีการพัฒนาแหนบเชิงแสงให้มีความเหมาะสมในการดักจับโมเลกุลเดี่ยว และได้มีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของกรดโปรตีน-นิวคลีอิก การพับโปรตีน/อาร์เอ็นเอ และมอเตอร์โมเลกุล [6] แสดงดังภาพที่ 1



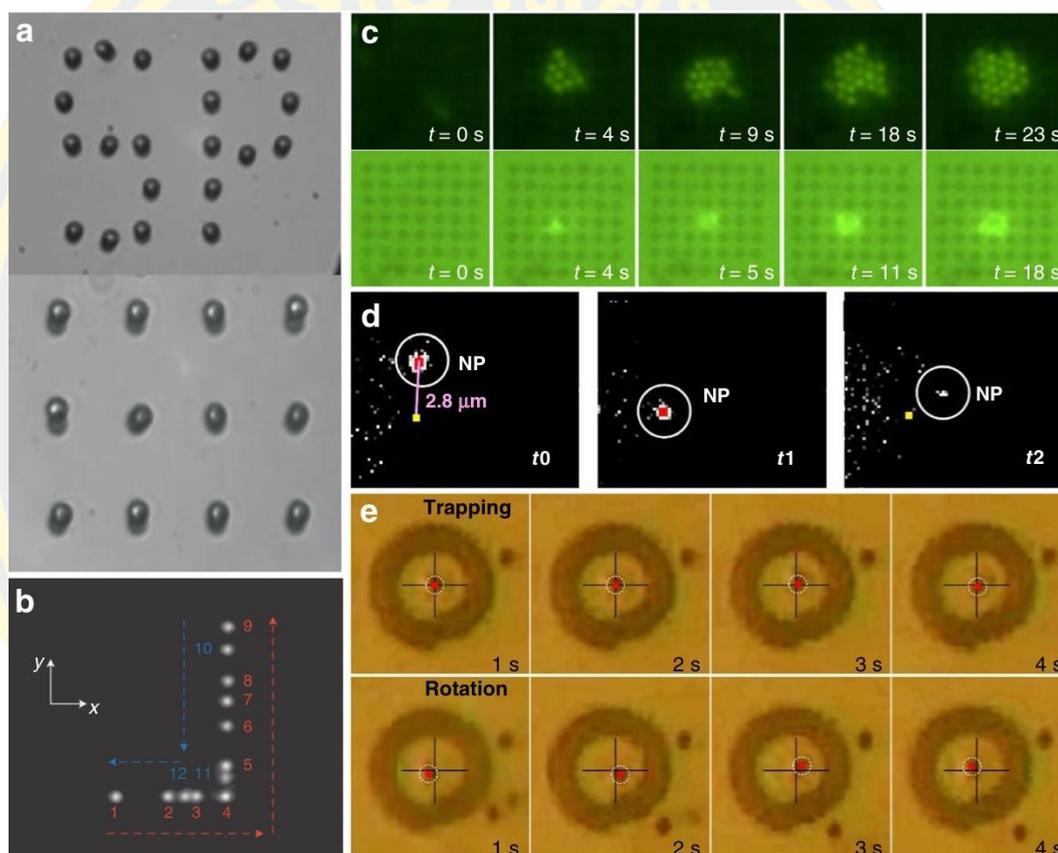
ภาพที่ 1 ภาพตัวอย่างการใช้แหงบเชิงแสงเพื่อศึกษาปฏิกริยาระหวางโปรตีนกับดีเอ็นเอ (a) การยัดโมเลกุลดีเอ็นเอแบบเกลียวคู่อาร์เอ็นเอโพลิเมอเรส (RNAP) ถูกดักจับและหยุดการทำงานที่  $t_1$ ,  $t_2$ , และ  $t_3$  (b) การคลายซิปโมเลกุลดีเอ็นเอ ทำให้เกลียวคู่อาร์เอ็นเอโพลิเมอเรสถูกติดตามด้วยมอเตอร์ (Mfd) (c) การบิดโมเลกุลดีเอ็นเอ เป็นการบิดโมเลกุลดีเอ็นเอสองตัวรวมกันผ่านคีมจับเชิงแสงและหมุนไมโครปิเปต ใช้เพื่อศึกษาการพ่นคลายของโทโปไอโซเมอเรส (d) การรวมการตรวจจับฟลูออเรสเซนซ์และการควบคุมแรงเข้าด้วยกัน พบว่าเฮลิเคส (CMG) ที่จำลองขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกระหว่างดีเอ็นเอสายเดี่ยว (ssDNA) และโมเลกุลดีเอ็นเอ [6]

ทีมของ Bayat J. ทำการดักจับอนุภาค 4 ชนิดดังภาพที่ 2 ได้แก่ อนุภาคโพลีสไตรีน ซิลิกา ไบรีฟริงเจนต์ และวาเทอไรต์ด้วยลำแสงพรมเรเดียล (RCB) ที่สามารถหมุนได้เหมือนเกียร์ เพื่อดักจับอนุภาคหลายอนุภาค ลำแสงพรมเรเดียลจะเกิดจากการเลี้ยวเบนจากเกรตติงเรเดียลแอมพลิจูด เนื่องจากความสมมาตรในแนวรัศมีของเกรตติง การเลี้ยวเบนทั้งหมดจึงกระจายไปตามแกนลำแสง และใช้สำหรับการดักจับ ซึ่งเกรตติงเรเดียลแอมพลิจูดมีโปรไฟล์ไบนารีต่างกัน ทำให้รัศมีของลำแสงพรมเรเดียลต่างกันด้วย การหมุนวงโคจรของอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการหมุนเกรตติงเรเดียลแอมพลิจูดในระนาบรอบแกนลำแสง และยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลดกำลังของเลเซอร์ให้น้อยลง ก็ยังสามารถดักจับอนุภาคทั้ง 4 ได้ ซึ่งแต่ละอนุภาคได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ [7]



ภาพที่ 2 แสดงการดักจับอนุภาคโพลีสไตรีนและซิลิกาที่เกรตติงเรเดียลแอมพลิจูดมีโปรไฟล์ไบนารีต่างกัน คอลัมน์ที่หนึ่งคืออนุภาคโพลีสไตรีนขนาด  $1.09 \mu\text{m}$  คอลัมน์ที่สองคืออนุภาคซิลิกาขนาด  $2.54 \mu\text{m}$  และกำลังของเลเซอร์ที่ต่ำลง (ดัดแปลงจาก [7])

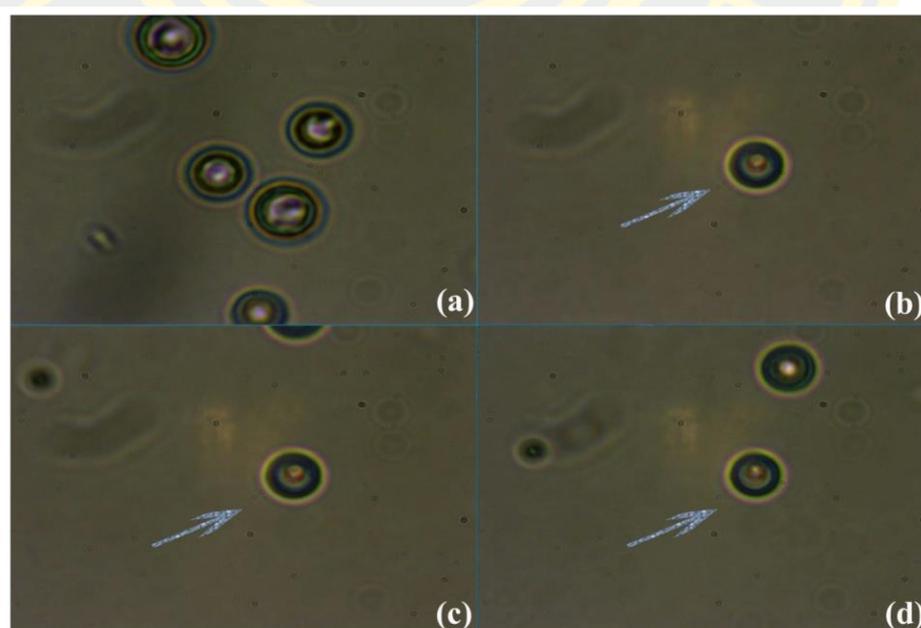
ทีมของ Zhang Y. ทำการทบทวนหลักการของแหวนเชิงแสง พัฒนาเทคนิคแหวนพลาสมอนิก และออกแบบโครงสร้างนาโน ซึ่งการใช้งานของแหวนพลาสมอนิกที่พบได้บ่อยๆ ได้แก่ การเรียงลำดับของและการขนส่งอนุภาคต่างๆ การตรวจจับการถ่ายภาพ และศึกษาทางด้านชีววิทยาใน 3 ระดับคือ โมเลกุล ออร์แกนเนลล์/ไวรัส และเซลล์ ซึ่งมีหลากหลายอนุภาคที่ทำการศึกษาได้แก่ แผ่นทองคำขนาด  $\mu\text{m}$  อนุภาคนาโนสเฟียร์ อนุภาคไมโครสเฟียร์ อนุภาคโลหะ โมเลกุลชีวภาพ และอนุภาคชีวภาพขนาดใหญ่ [8] แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การกำหนดค่าการดักจับพลาสมอนิกบนพื้นผิวผ่านโครงสร้างนาโนที่ออกแบบ (a) การดักจับพลาสมอนิกผ่านโครงสร้างโลหะ รูปแบบของแผ่นทองคำจะเรียงแสงผ่านปริซึมแก้ว [9] (b) ภาพการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ติดอยู่กับรูรับแสงพลาสมอนิกแบบโบว์ไทด์ (ดัดแปลงจาก [10]) (c) การดักจับอนุภาคนาโนสเฟียร์หลายอนุภาคในแลตทิซออปติคัลพลาสมอนิก (ดัดแปลงจาก [11]) (d) การดักจับและปล่อยอนุภาคนาโนสเฟียร์ขนาด 20 nm (ดัดแปลงจาก [12]) (e) การดักจับหรือหมุนของอนุภาคไมโครสเฟียร์ (ดัดแปลงจาก [13])

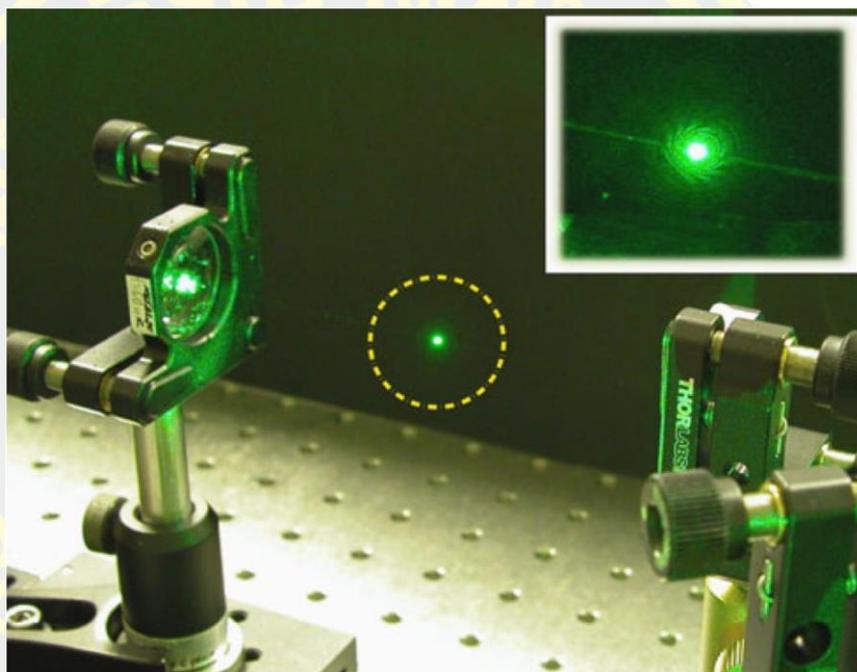
ออปติคัลวอร์เท็กซ์ (Optical Vortex) เป็นลักษณะเฉพาะของคลื่นแสงที่เฟสของหน้าคลื่นหมุนวนรอบแนวแกนการเคลื่อนที่ของแสง ทำให้แสงเคลื่อนที่ควรรอบแนวแกนนี้ ลำแสงวอร์เท็กซ์มีประจุโทโพโลจิคอล (topological charges;  $l$ ) ที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงจำนวนครั้งที่แสงควรรอบแกนแสงที่ระยะหนึ่งความยาวคลื่น ลำแสงวอร์เท็กซ์นี้มีโมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจร (Orbital Angular Momentum; OAM) เป็น  $l\hbar$  [14] ซึ่งลำแสงวอร์เท็กซ์มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ประโยชน์ในการส่งข้อมูลทางแสง ประโยชน์ทางด้านชีวเวชศาสตร์ [15], ความพัวพันของควอนตัม high-order และออปติคัลที่ไม่เชิงเส้น [16], การประมวลผลข้อมูล การเข้ารหัส/ถอดรหัสข้อมูล [17] และแหวนเชิงแสง [16, 18-22] เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยที่ประยุกต์การใช้งานของแหวนเชิงแสงด้วยออปติคัลวอร์เท็กซ์ ทีมของ Zhou X. ทำการตรวจสอบการดักจับอนุภาคไมโครบับเบิล อีกทั้งยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดักจับตามขวางกับประจุโทโพโลจิคอลของลำแสงออปติคัลวอร์เท็กซ์ แสดงให้เห็นว่าแรงดักจับตามขวางของแหวนเชิงแสงที่ประยุกต์ด้วยออปติคัลวอร์เท็กซ์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังของเลเซอร์เมื่อประจุโทโพโลจิคอลคงที่ หากเพิ่มจำนวนประจุโทโพโลจิคอลแต่กำลังของเลเซอร์เท่าเดิม ส่งผลให้แรงดักจับตามขวางลดลง เห็นได้ว่าประจุโทโพโลจิคอลมีอิทธิพลต่อแรงดักจับตามขวาง [23] แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงการดักจับอนุภาคไมโครบับเบิล (a) อนุภาคเคลื่อนที่อิสระ (b), (c) และ (d) อนุภาคที่ถูกถูกรั้งถูกดักจับ อนุภาคตัวอื่นๆ ยังคงเคลื่อนที่อิสระ [23]

ทีมของ Shvedov V.G. ใช้ลำแสงเลเซอร์เฟสซิงกูลาริตี้ทำการดักจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคในอากาศ เป็นการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-10  $\mu\text{m}$  ซึ่งจุดเด่นของการดักจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคในอากาศนี้สามารถทำได้แม้ว่าเลเซอร์จะมีความเข้มต่ำสุด ทำให้มีความร้อนต่ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของอนุภาคและการดักจับเซลล์ที่มีชีวิต [24] แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่ติดอยู่ในอากาศ จุดสว่างในวงกลมสีเขียวคือแสงที่กระจัดกระจายจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่ติดอยู่ ส่วนภาพที่ขยายแสดงให้เห็นถึงอนุภาคที่ติดอยู่ในอากาศ [24]

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการออกแบบและสร้างระบบทางแสงเพื่อนำไปสร้างฟองอากาศสำหรับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร และทำการวิเคราะห์ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์นี้เพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างระบบควบคุมด้วยแสงโดยใช้ฟองอากาศเพื่อตรวจจับโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงพฤติกรรมและสามารถควบคุมโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye เมื่อใช้แสงเลเซอร์และฟองอากาศในการควบคุม

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 785 nm

1.4.2 ใช้โมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye เป็นตัวอย่างในงานวิจัย

1.4.3 ใช้โมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye ในการระบุตำแหน่งโฟกัสของแสงเลเซอร์บน sample

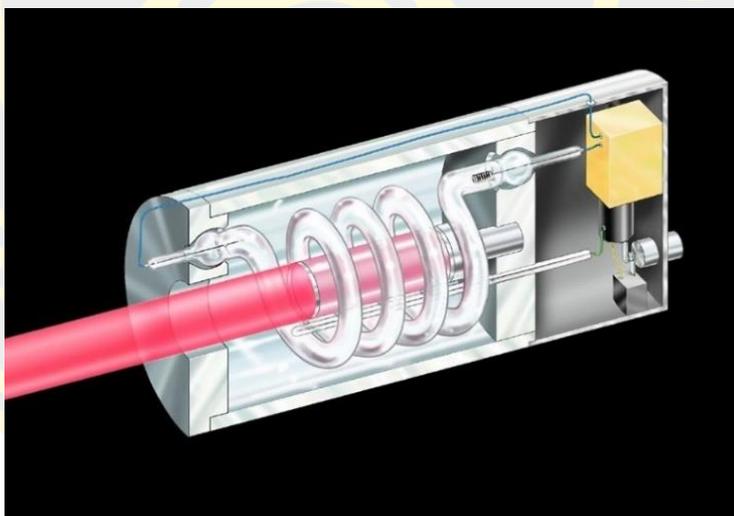
1.4.4 สามารถทำให้อนุภาคฟลูออเรสเซนต์ถูกดูดเข้ามาในฟองอากาศได้ตามปรากฏการณ์มารังโกนี (Marangoni effect)

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เลเซอร์

เลเซอร์ (laser) เป็นอุปกรณ์ที่ปล่อยลำแสงที่มีความโคฮีเรเรนซ์ (coherence) เป็นไปตามทฤษฎีการปลดปล่อยรังสีของไอน์สไตน์ ที่ถูกนำเสนอโดยไอน์สไตน์ในปี ค.ศ. 1917 ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 โธดอร์ เอช ไมแมน (Theodore Harold Maiman) เป็นนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันได้สร้างรูบี้เลเซอร์ (Ruby Laser) [25] โดยกระบวนการสร้างคือพันท่อแสงอิเล็กทรอนิกส์รอบผลึกรูบี้ โดยอะตอมโครเมียมในแท่งรูบี้ถูกกระตุ้นให้ปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะพลังงานต่ำไปยังสถานะพลังงานสูง หลังจากนั้นเมื่ออะตอมโครเมียมกลับสู่สถานะปกติ พลังงานโฟตอนจะถูกปล่อยออกมาชนกับอะตอมโครเมียม ทำให้อะตอมโครเมียมปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาเรื่อยๆ



ภาพที่ 6 ไดอะแกรมของรูบี้เลเซอร์ [25]

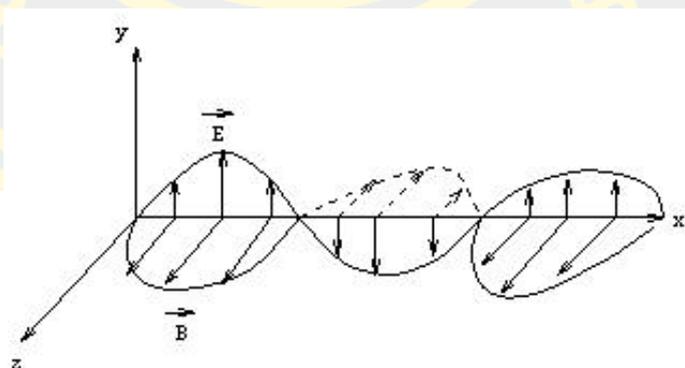
คุณสมบัติโคฮีเรนซ์หรือคุณสมบัติหลักทั้ง 4 ข้อของเลเซอร์ ได้แก่

1. มีค่าความยาวคลื่นเดียว
2. มีหน้าคลื่นและเฟสเป็นค่าเดียวกัน
3. ลำแสงมีทิศทางที่แน่นอน
4. มีความเข้มและจำนวนโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง

ซึ่งเลเซอร์ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านวิทยาศาสตร์ เช่น การทดลองและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์อะตอมและควอนตัม ด้านอุตสาหกรรม เช่น การตัด เจาะ เชื่อมวัสดุ และด้านการแพทย์ เช่น การผ่าตัดแม่นยำสูง เป็นต้น

## 2.2 โพลาริเซชันของแสง (Polarization of light)

โพลาริเซชันเป็นคุณสมบัติหนึ่งของแสง ขึ้นอยู่กับทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสง แสงที่มีระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าเพียงลักษณะเดียวเรียกว่า แสงโพลาริซ์ (polarized light) ในทางตรงกันข้าม แสงที่มีระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งระนาบเรียกว่า แสงไม่โพลาริซ์ (unpolarized light) [26]

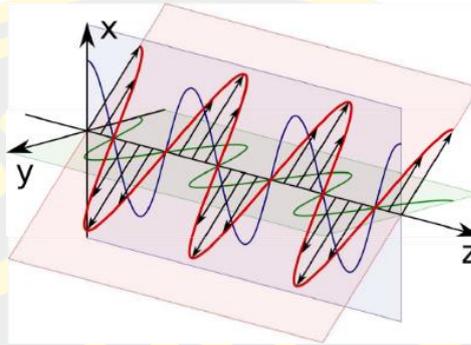


ภาพที่ 7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแสงที่ประกอบด้วยระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [27]

สามารถแบ่งแสงโพลาไรซ์ 3 ประเภท คือ

1. โพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarization)

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงในระนาบเดียว จะเรียกว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น



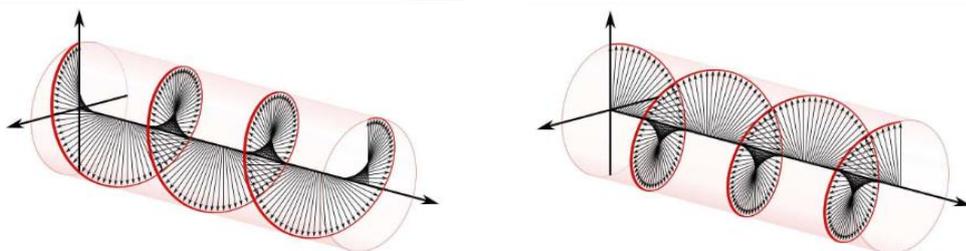
ภาพที่ 8 แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น [27]

2. โพลาไรซ์แบบวงกลม (circular polarization)

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนในรูปแบบเกลียววงกลม จะไม่ได้สั่นอยู่บนระนาบเชิงเส้นเหมือนแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น แกนของสนามไฟฟ้าที่หมุนตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมทางขวามือ (right-handed circularly polarized; RHCP) ในทางตรงกันข้าม ถ้าแกนของสนามไฟฟ้าหมุนทวนเข็มนาฬิกาเรียกว่า แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมทางซ้ายมือ (left-handed circularly polarized; LHCP)

(a)

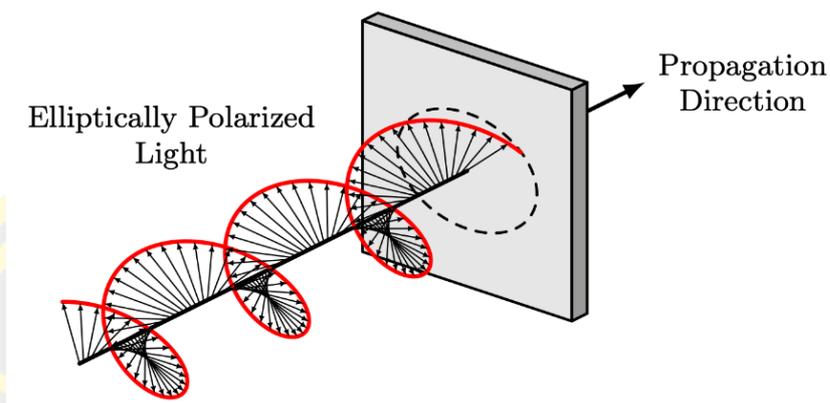
(b)



ภาพที่ 9 (a) แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมทางขวามือ (b) แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมทางซ้ายมือ [27]

### 3. โพลาริซ์แบบวงรี (elliptical polarization)

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นทางแบบวงรี



ภาพที่ 10 แสงโพลาริซ์แบบวงรี [28]

#### แคลคูลัสของโจนส์ (Jones's calculus)

แคลคูลัสของโจนส์เป็นวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์สถานะโพลาริเซชันของแสงโพลาริซ์ โดยใช้เวกเตอร์คอมเพล็กซ์ที่เรียกว่าเวกเตอร์ของโจนส์เพื่ออธิบายสถานะโพลาริเซชัน และใช้เมทริกซ์ของโจนส์อธิบายการทำงานของอุปกรณ์หรือวัสดุที่มีผลต่อโพลาริเซชันของแสง ซึ่งองค์ประกอบของวิธีการคำนวณของโจนส์มีดังนี้

#### เวกเตอร์ของโจนส์ (Jones's Vector)

เวกเตอร์โจนส์เป็นเครื่องมือในการอธิบายลักษณะโพลาริเซชันของลำแสงเชิงขั้วในรูปแบบเวกเตอร์คอมเพล็กซ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของเฟสและแอมพลิจูดในทิศทางต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้า

เวกเตอร์ของโจนส์ทั่วไปสำหรับลำแสงเชิงขั้วสามารถเขียนได้ในรูปแบบ:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \exp(ikz) \quad (1)$$

โดยที่  $E_x$  และ  $E_y$  คือค่าความซับซ้อน (Complex Amplitude) ของสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $x$  และ  $y$

$k$  คือ เลขคลื่น (Wave Number)

$z$  คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสง

$\exp(ikz)$  คือ เฟสของสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างสถานะโพลาไรเซชันในรูปของเวกเตอร์ของโจนส์

1. โพลาไรเซชันเชิงเส้น

- แสงโพลาไรซ์ในแนวแกน  $x$ :  $E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
- แสงโพลาไรซ์ในแนวแกน  $y$ :  $E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
- แสงโพลาไรซ์ทำมุม  $\theta$  กับแกน  $x$ :  $E = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$

2. โพลาไรเซชันเชิงวงกลม

- โพลาไรเซชันวงกลมตามเข็มนาฬิกา:  $E_{RHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
- โพลาไรเซชันวงกลมทวนเข็มนาฬิกา:  $E_{LHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$

ซึ่งสำหรับ ลำแสงวอร์เท็กซ์แบบโพลาไรซ์ การแทนด้วยเวกเตอร์ของโจนส์จะมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากลำแสงวอร์เท็กซ์มีการกระจายเฟสที่ขึ้นกับมุมเชิงขั้ว (Azimuthal Angle,  $\phi$ ) และยังสามารถมีการบิดเบี้ยวของเฟสตามค่าโมเมนตัมเชิงมุม ( $\ell$ ) ด้วย

1. ลำแสงวอร์เท็กซ์แบบโพลาไรเซชันเชิงเส้น

- โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวแกน  $x$ :  $E = \begin{bmatrix} E_x e^{i\ell\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
- โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวแกน  $y$ :  $E = \begin{bmatrix} 0 \\ E_y e^{i\ell\theta} \\ 0 \end{bmatrix}$

2. ลำแสงวอร์เท็กซ์แบบโพลาไรเซชันเชิงวงกลม

- โพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา

$$E_{RHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \exp(i\ell\phi) \quad (2)$$

- โพล่าไรเซชันแบบวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

$$E_{LHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \exp(i\ell\phi) \quad (3)$$

โดยที่  $\ell$  คือ เลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งระบุทิศทางและจำนวนรอบของการบิดเกลียวของเฟสในลำแสง

$\phi$  คือ มุมเชิงขั้วเป็นมุมที่วัดจากแกน  $x$  บนระนาบ  $xy$  ของพิกัดเชิงกระบอก (Cylindrical Coordinates)

#### เมทริกซ์ของโจนส์ (Jones's metric)

เมทริกซ์ของโจนส์คือเมทริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ที่ใช้เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพล่าไรเซชันของแสงเมื่อผ่านอุปกรณ์ออปติคัล ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้อาจจะเป็นโพล่าไรซ์เชิงเส้น แผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท แผ่นควอเตอร์เวฟเพลท หรือแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟปริทาร์เดอร์ โดยการใช้เมทริกซ์ของโจนส์สามารถคำนวณสถานะโพล่าไรเซชันของแสงที่หลังจากผ่านอุปกรณ์เหล่านี้ได้

1. เมทริกซ์ของโจนส์ของโพล่าไรเซอร์ที่ทำมุม  $\theta$  กับแกน  $x$ :

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. เมทริกซ์ของโจนส์ของแผ่นฮาล์ฟเวฟเพลทที่มุมของแกนของแผ่นอยู่ที่แนวนอน

$$P = \begin{bmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix} = e^{-i\pi/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. เมทริกซ์ของโจนส์ของแผ่นควอเตอร์เวฟเพลทที่มุมของแกนของแผ่นอยู่ที่แนวนอน

$$P = \begin{bmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix} = e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \quad (6)$$

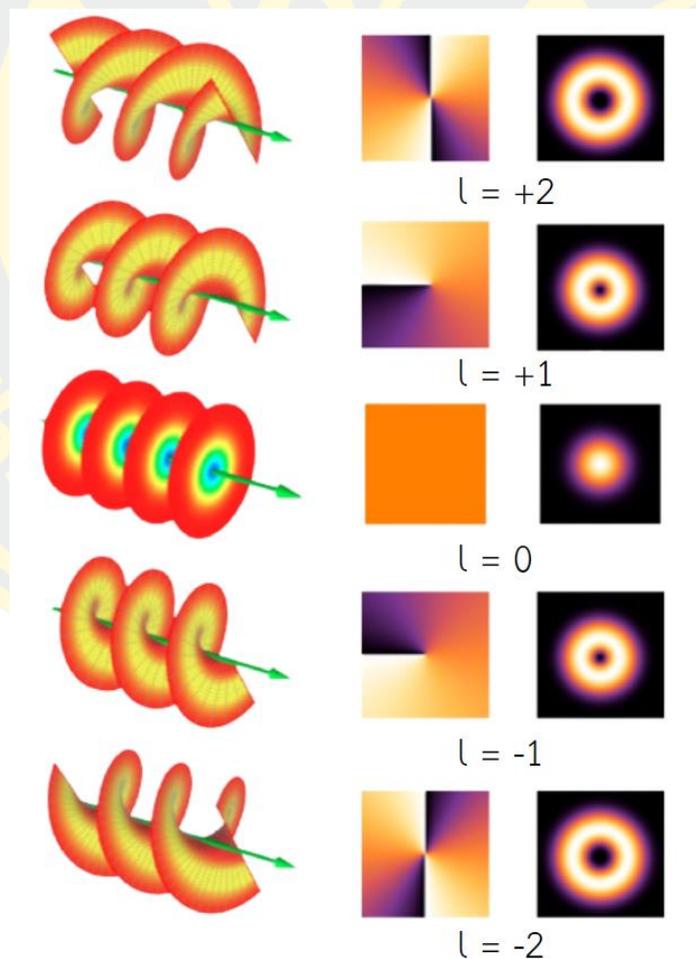
4. เมทริกซ์ของโจนส์ของแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟปริทาร์เดอร์

$$V = e^{i2\theta} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมเชิงขั้วในพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinates) ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งมุมของแสงที่ตกกระทบในแผ่นวอร์เท็กซ์

### 2.3 ออปติคัลวอร์เท็กซ์

ออปติคัลวอร์เท็กซ์ หรือที่เรียกว่าภาวะเฟสซิงกูลาริตี (phase singularity) หรือมีลักษณะเฉพาะของคลื่นแสงที่เฟสของหน้าคลื่นวนรอบจุดศูนย์กลาง ลำแสงวอร์เท็กซ์สามารถมีประจุโทโพโลยีคัลที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงจำนวนครั้งที่เฟสหมุนรอบแกนแสง (optical axis) ในระยะหนึ่งความยาวคลื่น ลำแสงวอร์เท็กซ์มีโมเมนตัมเชิงมุมของวงเป็น  $l\hbar$  เมื่อ  $\hbar$  คือค่าคงตัวของพลังค์แบบลดทอน (Reduced Planck's constant) [27]



ภาพที่ 11 แสดงถึงโครงสร้างแบบขดลวด หน้าเฟส และความเข้มของลำแสงวอร์เท็กซ์

(ดัดแปลงจาก [29])

เมื่อประจุโทโลจีคอล  $l$  ต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $l = 0$  จะไม่มีจุดมืดตรงกลาง เป็นแสงที่มีความเข้มแสงกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) แต่เมื่อ  $l = \pm 1$  มีจุดมืดตรงกลาง แต่เล็กกว่า  $l = \pm 2$  ซึ่งเกิดจากการที่แสงหมุนรอบจุดมืดนี้ โดยความต่างของเครื่องหมายบวกลบ คือ ถ้าเป็นเครื่องหมายบวกจะหมุนควงในทิศตามเข็มนาฬิกา เมื่อมองจากทิศทางการเคลื่อนที่เข้าของแสง แต่ถ้าเป็นเครื่องหมายลบ แสงจะหมุนควงในทิศทวนเข็มนาฬิกาแทน

### 1. ฟังก์ชันคลื่นของลำแสงวอร์เท็กซ์

ฟังก์ชันคลื่นของลำแสงวอร์เท็กซ์เป็นฟังก์ชันที่อธิบายการกระจายเชิงพื้นที่และเฟสของสนามไฟฟ้าในลำแสง ซึ่งลำแสงวอร์เท็กซ์จะมีลักษณะเด่นคือเฟสของสนามไฟฟ้าหมุนรอบแกนการเคลื่อนที่ของลำแสงและมีจุดศูนย์กลางที่มีความเข้มเป็นศูนย์

ฟังก์ชันคลื่นของลำแสงวอร์เท็กซ์ที่มีโมเมนตัมเชิงมุมบนระนาบ  $x_0, y_0$  ที่ตำแหน่ง  $z_0$  โดยสมมติให้ฟังก์ชันคลื่นขาเข้าที่มีเลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุม  $\pm \ell$  ในรูปของคลื่นระนาบบนระนาบ  $x_0 y_0$  ที่  $z_0$  เป็น  $\psi_0(x_0, y_0, z_0) = (x_0 \pm iy_0)^{|\ell|} \exp\{ikz_0\}$  โดยที่ระยะ  $z_0$  จะแปลงฟังก์ชันคลื่นขาเข้า [30] เป็น

$$\psi_0(x_0, y_0, +0) = \sum_n A_n (x_0 \pm iy_0)^{|\ell|} \exp\{ink_d x_0\} \quad (8)$$

โดยที่  $\psi_0(x_0, y_0, +0)$  คือ ฟังก์ชันคลื่นในตำแหน่งเริ่มต้น ( $z = 0$ )

$A_n$  คือ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละโหมด  $n$  ซึ่งสามารถกำหนดลักษณะความเข้มและเฟสของคลื่นได้

$x_0$  และ  $y_0$  คือ พิกัดเชิงพื้นที่ของลำแสงในแกน  $x, y$

$(x_0 \pm iy_0)^{|\ell|}$  คือ พจน์ที่แสดงถึงการบิดเกลียวของลำแสง (helical phase) ขึ้นกับ  $\ell$  ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงอันดับของโมเมนตัมเชิงมุม

$\exp\{ink_d x_0\}$  คือ พจน์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวในเชิงเฟส ซึ่ง  $n$  เป็นดัชนีของโหมด (mode index) และ  $k_d$  เป็นพารามิเตอร์เชิงความถี่เชิงพื้นที่

ลำแสงวอร์เท็กซ์สามารถสร้างได้จากการกระจายเชิงพื้นที่แบบโหมดลาแกร์-เกาส์เซียน (Laguerre-Gaussian Mode) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างลำแสงวอร์เท็กซ์ที่ใช้กันมากที่สุด ฟังก์ชันคลื่นของลำแสงแบบนี้ในรูปของสนามไฟฟ้า [31] เขียนได้ว่า

$$E(r, \phi, z) = E_0 \frac{C_{p\ell}}{w(z)} \left( \frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right)^{|\ell|} L_p^{|\ell|} \left( \frac{2r^2}{w(z)^2} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right) \exp\left(-i\frac{kr^2}{2R(z)}\right) \exp(i\ell\phi) \exp(i(2p + |\ell| + 1)\zeta(z)) \quad (9)$$

โดยที่  $E(r, \phi, z)$  คือ ฟังก์ชันสนามไฟฟ้าของลำแสงวอร์เท็กซ์ในพิกัดเชิงกระบอก  $(r, \phi, z)$

$E_0$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าสูงสุด

$C_{p\ell}$  คือ ค่าคงที่สำหรับโหมดลาแกร์-เกาส์เซียน

$z$  คือ ระยะตามทิศทางการแพร่กระจายของลำแสง

$w(z)$  คือ ความกว้างของลำแสง (Beam Waist) ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง  $z$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

โดยที่  $w_0$  คือ ขนาดของความกว้างลำแสงที่ตำแหน่งโฟกัส

$$Z_R \text{ คือ ระยะเรย์ลีห์, } Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของลำแสง

$r$  คือ ระยะรัศมีจากแกนกลางของลำแสง (Radial Distance)

$L_p^{|\ell|}$  คือ ฟังก์ชันลาแกร์ (Laguerre Polynomial) ในรูปเชิงรัศมี  $r$  โดยขึ้นกับดัชนีนี

$p$  และ  $|\ell|$

$p$  คือ ตัวบอกโหมดตามแนวรัศมี

$\ell$  คือ เลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุม

$\phi$  คือ มุมเชิงขั้ววัดจากแกน  $x$

$R(z)$  คือ รัศมีของความโค้งของลำแสง

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_R}{z} \right)^2 \right]$$

$\exp\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right)$  คือ ตัวบอกการกระจายเชิงรัศมีของความเข้มลำแสง

$\exp(i\ell\phi)$  คือ การกระจายเฟสของลำแสงวอร์เท็กซ์ ซึ่งเฟสนี้แปรผันตามมุมเชิงขั้ว  $\phi$  โดย  $\ell$  เป็นเลขโมเมนตัมเชิงมุม

$\exp(i(2p + |\ell| + 1)\zeta(z))$  คือ เฟสของกูออย (Gouy Phase) ซึ่งเป็นเฟสสะสมที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง  $z$

$$\zeta(z) = \tan^{-1} \left( \frac{z}{z_R} \right)$$

## 2. การกระจายความเข้มของลำแสงวอร์เท็กซ์

การกระจายความเข้มของลำแสงวอร์เท็กซ์มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากลำแสงเกาส์เซียน เนื่องจากการมีโมเมนตัมเชิงมุมซึ่งทำให้ความเข้มของลำแสงมีการกระจายตัวที่เป็นเอกลักษณ์และมีจุดศูนย์กลางที่ความเข้มเป็นศูนย์ ส่งผลให้ลำแสงมีลักษณะเป็นวงแหวนรอบๆ จุดศูนย์กลาง

ความเข้มของลำแสงวอร์เท็กซ์  $I(r, \phi, z)$  เป็นสัดส่วนกับค่าสัมบูรณ์กำลังสองของฟังก์ชันสนามไฟฟ้า  $E(r, \phi, z)$  ดังนี้

$$I(r, \phi, z) = |E(r, \phi, z)|^2 \quad (10)$$

สำหรับลำแสงลาแกรี-เกาส์เซียนในกรณีง่าย ๆ ที่โหมดเชิงรัศมี  $p = 0$  และมีเฉพาะโมเมนตัมเชิงมุม  $\ell$  ฟังก์ชันความเข้มสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I(r, \phi) = I_0 \left( \frac{r}{w_0} \right)^{2|\ell|} \exp \left( -\frac{2r^2}{w_0^2} \right) \quad (11)$$

โดยที่  $I(r, \phi)$  คือ ความเข้มของลำแสงที่ตำแหน่ง  $r$  และ  $\phi$

$I_0$  คือ ความเข้มสูงสุดของลำแสง (Peak Intensity)

$r$  คือ ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางของลำแสง

$w_0$  คือ ขนาดความกว้างของลำแสงที่ตำแหน่งโฟกัส

$\ell$  คือ เลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุม

สำหรับกรณีที่มีโหมดเชิงรัศมี  $p \neq 0$  การกระจายความเข้มจะเขียนได้ดังนี้

$$I(r, \phi) = I_0 \left| \frac{C_{p\ell}}{w_0} \left( \frac{\sqrt{2}r}{w_0} \right)^{|\ell|} L_p^{|\ell|} \left( \frac{2r^2}{w_0^2} \right) \exp \left( -\frac{r^2}{w_0^2} \right) \right|^2 \quad (12)$$

โดยที่  $I(r, \phi)$  คือ ความเข้มของลำแสงที่ตำแหน่ง  $r$  และ  $\phi$

$I_0$  คือ ความเข้มสูงสุดของลำแสง

$C_{p\ell}$  คือ ค่าคงที่สำหรับโหมดลาแกรี-เกาส์เซียน

$w_0$  คือ ขนาดความกว้างของลำแสงที่ตำแหน่งโฟกัส

$r$  คือ ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางของลำแสง

$\ell$  คือ เลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุม

$L_p^{|\ell|}$  คือ ฟังก์ชันลาแกรี (Laguerre Polynomial) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดโหมด

เชิงรัศมีของลำแสง ซึ่งทำให้เกิดการกระจายความเข้มเป็นวงแหวนหลายวงตามค่า  $p$

$p$  คือ ตัวบอกโหมดตามแนวรัศมี

ค่าของโมเมนต์เชิงมุม  $\ell$  มีผลกระทบอย่างมากต่อการกระจายความเข้ม

- หาก  $\ell = 0$  ลำแสงจะมีลักษณะเป็นลำแสงเกาส์เซียนซึ่งมีความเข้มสูงสุดที่จุดศูนย์กลาง (ไม่มีการบิดเกลียวของเฟส)
- หาก  $\ell = 1$  ลำแสงจะมีวงแหวนความเข้มรอบๆ จุดศูนย์กลาง และความเข้มจะเป็นศูนย์ที่จุดศูนย์กลาง
- หาก  $\ell > 1$  ขนาดของวงแหวนความเข้มจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และความเข้มที่บริเวณจุดศูนย์กลางจะยังคงเป็นศูนย์ แต่ลักษณะวงแหวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามค่า  $\ell$

## 2.4 น้ำตาของไวน์และปรากฏการณ์มารานโกนี่

เป็นการทดลองทางวิทยาศาสตร์ เมื่อลองเทไวน์ลงในแก้วจะเห็นสิ่งที่ดูเหมือนหยดน้ำตาไหลลงมาด้านข้าง น้ำตาของไวน์เหล่านี้เกิดจากปรากฏการณ์มารานโกนี่ ซึ่งอธิบายการถ่ายโอนมวลตามพื้นผิวของเฟสของเหลวสองเฟสที่เกิดจากการไล่ระดับแรงตึงผิวตามรอยต่อระหว่างสองเฟส

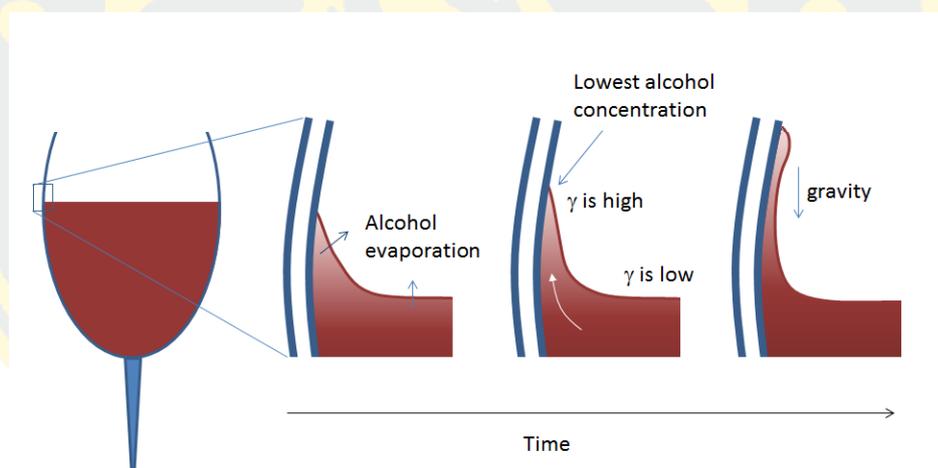
### 1. น้ำตาของไวน์ (Tears of Wine)

คำว่าน้ำตาของไวน์ถือขึ้นกำเนิดครั้งแรกในปี ค.ศ. 1865 โดยนักฟิสิกส์ เจมส์ ทอมสัน (James Thomson) ต่อมานักฟิสิกส์ชาวอิตาลี คาร์โล มارانโกนี่ (Carlo Marangoni) ได้ศึกษาหัวข้อนี้สำหรับการวิจัยระดับปริญญาเอกของเขาและตีพิมพ์ผลการวิจัยของเขา ปรากฏการณ์มารานโกนี่ทำให้เกิดน้ำตาของไวน์และปรากฏการณ์อื่นๆ ที่พบในเคมีพื้นผิวและการไหลของของไหล ซึ่งไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงจะแสดงน้ำตาของไวน์มากกว่าไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ที่ต่ำ



ภาพที่ 12 น้ำตาของไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ 13.5% [32]

ในน้ำตาของไวน์ เมนิสคัส (เมนิสคัสเป็นเส้นโค้งที่มองเห็นได้ที่ด้านบนของของเหลวเพื่อตอบสนองต่อภาชนะ เมนิสคัสสามารถเข้าหรือออกก็ได้ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของของเหลวและการยึดเกาะกับผนังของภาชนะ) ก่อตัวที่จุดเชื่อมต่อสามเฟสระหว่างผนังแก้วไวน์ ไวน์ และอากาศ นี่คือจุดที่ของเหลวเกาะติดกับพื้นผิวกระจกอย่างหลวมๆ ไวน์ประกอบด้วยแอลกอฮอล์ที่ระเหยออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่องในอัตราที่สูงกว่าน้ำ (เนื่องจากเอธานอลมีความดันไอสมมูลสูงกว่าน้ำ) และสิ่งนี้ก็เกิดขึ้นในเมนิสคัสด้วย ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ลดลงเร็วขึ้นในเมนิสคัสเนื่องจากค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นจึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ระหว่างเมนิสคัสและพื้นผิวที่เรียบระหว่างไวน์และอากาศ จากนั้นจะทำให้เกิดการไล่ระดับแรงตึงผิวซึ่งเคลื่อนเมนิสคัสขึ้นไปตามผนังแก้วไวน์ เมื่อเมนิสคัสเริ่มก่อตัวเป็นแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของผนังแก้วไวน์ แอลกอฮอล์ก็จะยิ่งหมดลง ซึ่งส่งผลให้เกิดการไล่ระดับแรงตึงผิวมากขึ้น โดยแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นตามความสูงของไวน์ ไวน์จะถูกดึงขึ้นไปตามผนังแก้วไวน์และมีแรงโน้มถ่วงทำให้เกิดหยดน้ำตาของไวน์ แสดงดังภาพที่ 13

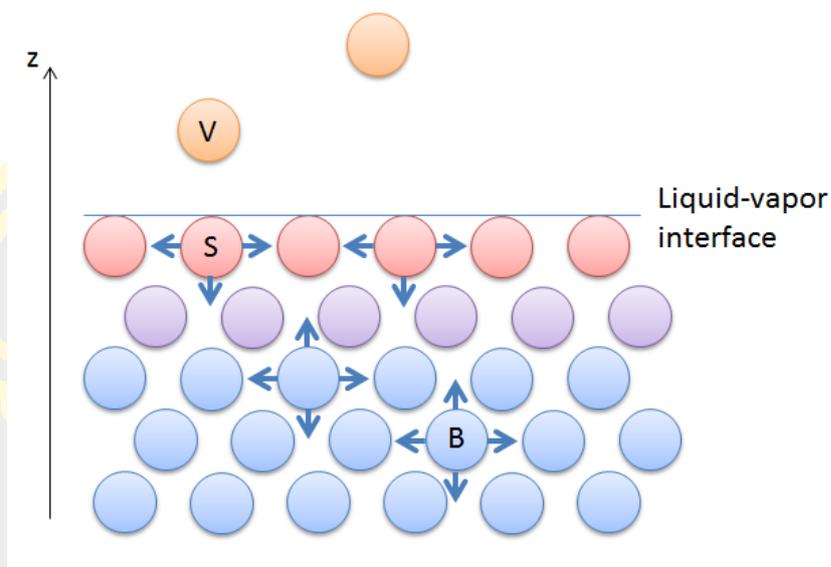


ภาพที่ 13 น้ำตาของไวน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไล่ระดับของแรงตึงผิวระหว่างเมนิสคัสกับพื้นผิวของไวน์ [33]

## 2. ปราบกฎการณ์มารานโกนี

แรงตึงผิวเป็นคุณสมบัติของส่วนต่อประสานระหว่างสองเฟส โดยจะอธิบายปริมาณพลังงานที่จำเป็นในการขยายพื้นที่ผิวของส่วนต่อประสานนั้นหนึ่งหน่วย สามารถดูแรงตึงผิวเป็นแรงต่อหน่วยความยาวที่จำเป็นในการสร้างพื้นที่ผิวใหม่ จากภาพที่ 14 แสดงสถานะของเหลวเมื่อสัมผัสกับไอของเหลว โมเลกุลของพื้นผิว (สีแดง) มีปฏิกิริยาโต้ตอบกับโมเลกุลไอเพียงเล็กน้อย (สีส้ม) ทำให้ได้รับ

แรงที่ไม่สมดุลซึ่งดึงพื้นผิวของของเหลวมารวมกัน โมเลกุลในกลุ่มของเหลว (สีน้ำเงิน) มีปฏิกิริยาโต้ตอบกันในทุกทิศทาง ในการขยายพื้นที่ผิวของของเหลว ทำให้โมเลกุลจำนวนมากเคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิว



ภาพที่ 14 แรงดึงผิวในของเหลวที่ทำปฏิกิริยากับไอของของเหลว โมเลกุลของเหลวที่พื้นผิว (สีแดง) มีปฏิสัมพันธ์ที่ไม่สมมาตร โมเลกุลของเหลวที่อยู่ด้านล่าง (สีม่วง) จะมีปฏิสัมพันธ์ที่สมมาตรมากกว่าเล็กน้อย ในขณะที่โมเลกุลของเหลวที่อยู่กันเป็นกลุ่ม (สีน้ำเงิน) จะมีปฏิสัมพันธ์ที่สมมาตรมากกว่าเดิม

[33]

น้ำมีอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับของเหลวจำนวนมากเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นจึงมีแรงดึงผิวค่อนข้างมาก แรงดึงผิวซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลในของเหลว ทำให้ปรากฏการณ์มารานโกนี่คือการไหลที่เกิดจากการไล่ระดับของแรงดึงผิวตามแนวพื้นผิวรอยต่อระหว่างของไหล 2 สถานะ ซึ่งในภาพที่ 14 การไล่ระดับสีของโมเลกุลอาจเกิดจากความแตกต่างในองค์ประกอบหรืออุณหภูมิของสารละลายตามพื้นผิว

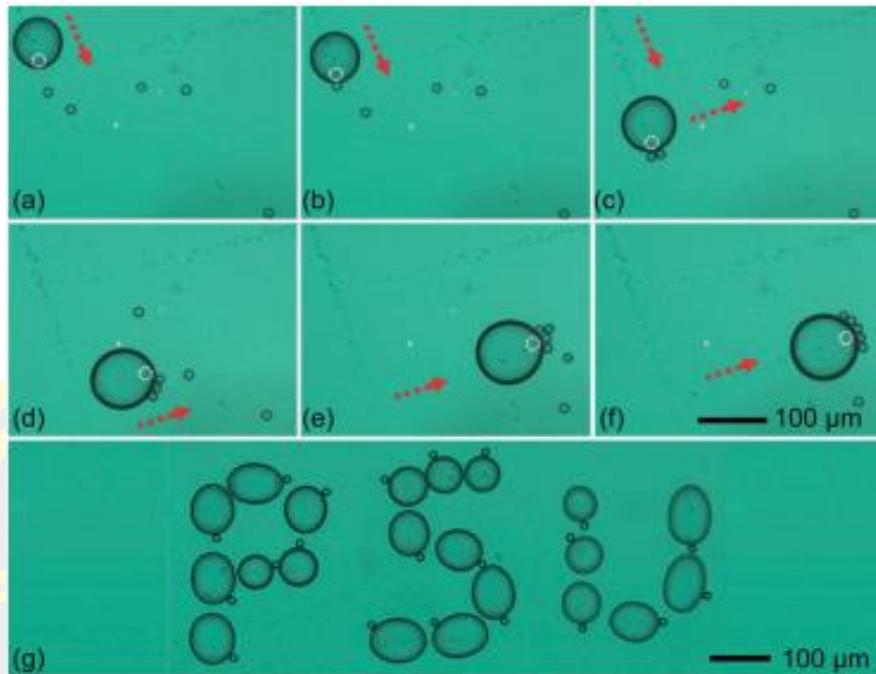
เพื่อให้เห็นภาพว่าวิธีการนี้ทำงานอย่างไร จึงได้มีการทดลองโดยการเทน้ำลงบนจานแล้วเติมกลิตเตอร์หรือวัสดุประเภทอื่น และทำการหยดสารละลายสบู่ แอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่อง หรือของเหลวใดๆ ที่มีแรงดึงผิวที่ตัดกัน หยดไปที่ตรงกลางจานจะทำให้กลิตเตอร์ทั้งหมดพุ่งไปที่ด้านข้างโดยห่างจากศูนย์กลางทันที แสดงดังภาพที่ 15

อธิบายได้ว่าขณะที่เทสบู่ โมเลกุลของสบู่จะก่อตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ซึ่งมีความหนาเพียงโมเลกุลเดียวหรือสองสามโมเลกุลบนผิวน้ำ พื้นผิวมีความแตกต่างกันในเรื่องแรงตึงผิวระหว่างส่วนที่ปกคลุมด้วยสบู่กับส่วนที่มีเพียงน้ำ ทำให้ฟิล์มของสบู่แพร่กระจายและอนุภาคของกลิตเตอร์ไหลไปด้านข้างเนื่องจากแรงตึงผิวที่มากกว่าของน้ำเมื่อเทียบกับสบู่ ซึ่งในที่สุดโมเลกุลของสบู่ก็ปกคลุมทั่วทั้งพื้นผิวทำให้พลังงานพื้นผิวลดลง



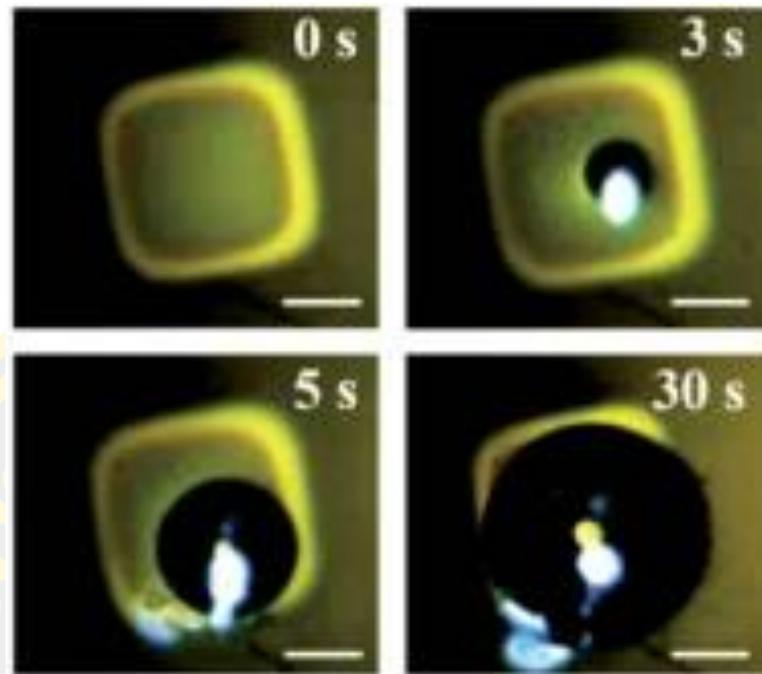
ภาพที่ 15 ภาพตัวอย่างการทดลอง เมื่อหยดสบู่ลงไป  
กลิตเตอร์จะเคลื่อนที่หนีออกจากจุดศูนย์กลาง [33]

ทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ฟองอากาศในการดักจับอนุภาคมามากมาย เช่น ทีมของ Zhao C. แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่อยู่ในรัศมี  $500 \mu\text{m}$  ของฟองอากาศสามารถถูกดึงดูดเข้าฟองอากาศได้ด้วยแรงลากที่เกิดจากการไหลเวียนของการพาความร้อน ซึ่งทำการดักจับอนุภาคโพลีสไตรีนขนาด  $15 \mu\text{m}$  ด้วยเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น  $405 \text{ นาโนเมตร}$  กำลังของเลเซอร์  $200 \text{ mW}$  และใช้เลนส์ใกล้วัตถุ (Microscope lens) ที่มีกำลัง  $\times 10$  ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงกระบวนการดักจับอนุภาคอยู่ภายใต้ผลรวมของแรงตึง แรงกด และแรงตึงผิว เมื่ออนุภาคถูกดูดให้เข้าสู่สนามการไหลรอบๆ ฟองอากาศที่สร้างขึ้นด้วยพลังงานความร้อน (convective flow) อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวฟองอากาศเป็นอันดับแรก จากนั้นอนุภาคจะติดอยู่บนพื้นผิวของฟองอากาศด้วยความสมดุลของแรงตึงผิวและแรงกด อีกทั้งยังสาธิตความสามารถในการดักจับอนุภาคสองแบบคือการรวบรวมอนุภาคโพลีสไตรีนที่กระจายแบบสุ่มและการจัดการอนุภาคเดี่ยวตามวิถีโคจรที่กำหนดไว้ ซึ่งเทคนิคนี้ยังสามารถจัดการอนุภาคในพื้นที่ถึงระดับ  $\text{cm}$  [33]

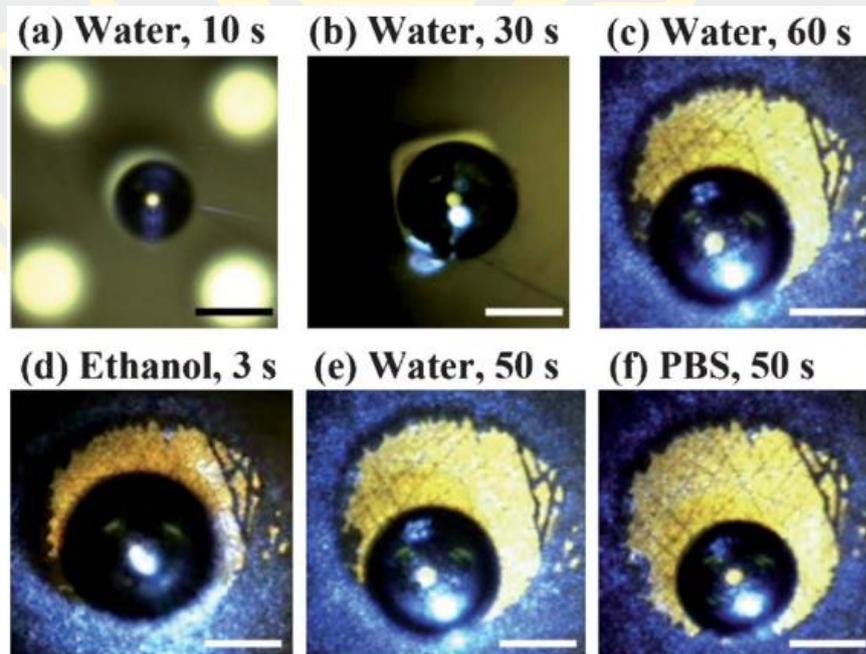


ภาพที่ 16 (a)-(f) แสดงการรวบรวมอนุภาคโพลีสไตรีนขนาด 15  $\mu\text{m}$  ที่กระจายแบบสุ่ม และ (g) แสดงการจัดการอนุภาคเดี่ยวตามวิถีโคจรเพื่อทำตัวอักษร P S U จากซ้ายไปขวา [34]

ทีมของ Zhang K. เสนอเทคนิคการสร้างฟองอากาศกับไมโครแชนเนล โดยใช้ความร้อนที่เกิดจากเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร และกำลังแสงเลเซอร์ถูกตั้งไว้ที่ 250 mW ซึ่งมีแผ่นโครเมียมสีเคลือบจัตูร์สขนาด 500  $\mu\text{m}$  จุ่มลงในจานเพาะเชื้อที่เต็มไปด้วยของเหลวที่เป็นน้ำ เมื่อเปิดเลเซอร์ ฟองอากาศจะเริ่มก่อตัวที่กลางลำแสงเลเซอร์ภายใน 3 วินาที ฟองอากาศจะค่อยๆ ขยายตัว จากนั้นเมื่อถึงจุดอิ่มตัว ฟองอากาศจะขยายจนเกือบครอบคลุมพื้นผิวแผ่นสีเคลือบจัตูร์สทั้งหมดหลังจากผ่านไป 30 วินาที และยังพิจารณาถึงผลกระทบของขนาดแผ่นและประเภทของของเหลวต่อการเกิดฟองอากาศด้วย โดยการใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200  $\mu\text{m}$  สีเคลือบจัตูร์ส 500  $\mu\text{m}$  และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ตามลำดับ ในของเหลวที่เป็นน้ำดังภาพที่ 17 และใช้ขนาดของแผ่นอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ในเอธานอล น้ำปราศจากไอออน และสารละลายน้ำเกลือบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (PBS) ซึ่งพบว่าในของเหลวที่เป็นเอธานอลสร้างฟองอากาศในจุดที่อิ่มตัวเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเพียง 3 วินาที และยังสามารถสร้างฟองอากาศที่ใหญ่ที่สุดในทางตรงกันข้าม ของเหลวที่เป็นสารละลาย PBS ใช้เวลาในการสร้างฟองอากาศในจุดที่อิ่มตัวถึง 50 วินาที และยังสามารถสร้างฟองอากาศที่เล็กที่สุดอีกด้วยดังภาพที่ 18 เทคนิคนี้สามารถผลิตฟองอากาศได้หลากหลายรูปทรง และยังสามารถสร้างฟองอากาศได้มากถึง 106 ฟองต่อวินาที [34]



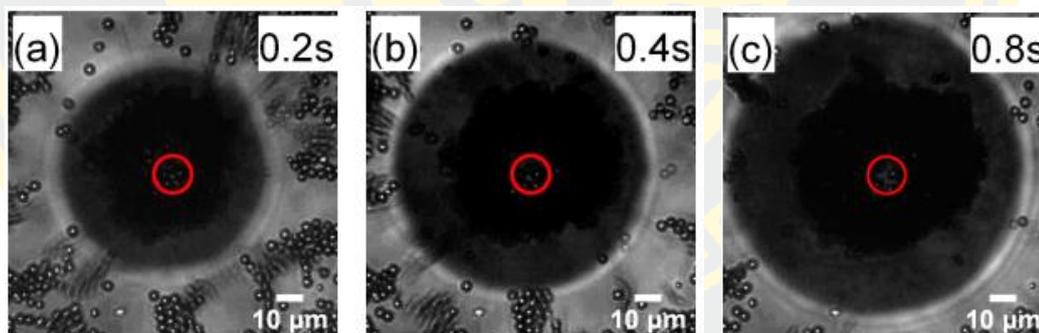
ภาพที่ 17 การสร้างฟองอากาศในไมโครแชนเนลในช่วงเวลาต่างๆ โดยมีแผ่นโครเมียมสีเหลืองจัตรัส ขนาด 500  $\mu\text{m}$  จุ่มอยู่ในน้ำ ดัดแปลงจาก [35]



ภาพที่ 18 ภาพแสดงขนาดของฟองอากาศที่มีความแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นอิเล็กโทรด และประเภทของของเหลว (a)-(c) ฟองอากาศที่อิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในน้ำบนแผ่นอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200  $\mu\text{m}$  สีเหลืองจัตรัส 500  $\mu\text{m}$  และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ตามลำดับ และ (d)-(f)

ฟองอากาศอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในเอธานอล น้ำปราศจากไอออน และสารละลาย PBS ตามลำดับ บนแผ่น อิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm [35]

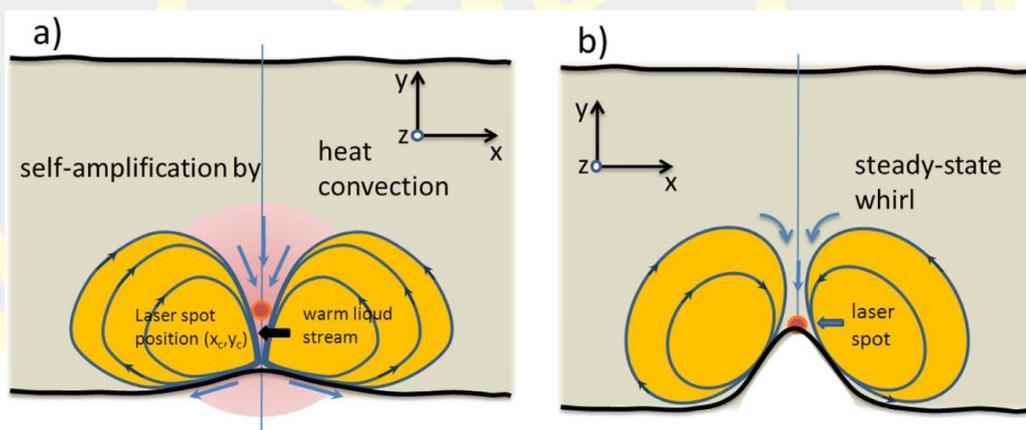
ทีมของ Li B.W. ได้ศึกษาการรวมตัวกันของอนุภาคดูดซับแสง (APs) ซึ่งในงานวิจัยนี้ อนุภาคดูดซับแสงที่ใช้คือไมโครสเฟียร์แม่เหล็กแบบเปลือกหุ้มแกนกลาง (โพลีสไตรีน@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-5  $\mu\text{m}$  โดยการไหลเวียนของการพาความร้อนรอบๆ จุดศูนย์กลางความร้อนของเลเซอร์ ด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1,064 นาโนเมตรและใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลัง  $\times 40$  ซึ่งต้องใช้กำลังเลเซอร์ 104 mW ถึงจะเกิดฟองอากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นเฟสของเหลวเพื่อสร้างรอยต่อระหว่างของเหลวกับอากาศ เมื่อให้ความร้อนด้วยแสงเลเซอร์ เกิดการไหลวนโดยการพาความร้อน และต้องเพิ่มกำลังเลเซอร์เป็น 120 mW ถึงจะทำให้เกิดการสะสมอนุภาคโพลีสไตรีนและเกาะติดกับรอยต่อของน้ำฟองอากาศอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีการนี้ใช้งานเพิ่มเติมในการบำบัดด้วยความร้อน ไมโครฟลูอิดิก การนำส่งยา ฯลฯ [35]



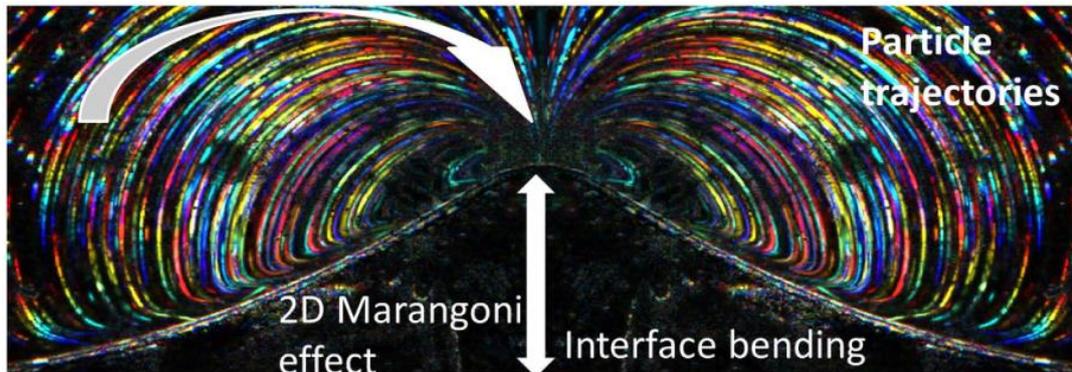
ภาพที่ 19 ฟองอากาศที่เกิดการรวมตัวของอนุภาคดูดซับแสง (APs) ในระยะเวลาที่ต่างกัน ซึ่งวงกลมสีแดงแสดงถึงจุดโฟกัสของเลเซอร์ ดัดแปลงจาก [36]

ทีมของ Miniewicz A. ได้ศึกษาฟองอากาศโดยใช้ปรากฏการณ์มารานโกนีที่มองเห็นได้ในสองมิติ ซึ่งสามารถสังเกตเส้นทางการไหลของของไหลได้โดยตรง เนื่องจากผลของเทอร์โมแคปิลารีมารานโกนีที่เหนี่ยวนำด้วยแสงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ด้วยการดักจับสารละลายของตัวดูดซับแสงที่ดูดซับได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป (ในงานวิจัยนี้คือพารา-ไนโตรอะนิลีน:  $\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_2$  ใน 1,4-ไดออกเซน:  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ ) ด้วยฟองอากาศโดยใช้ลำแสงเลเซอร์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร กำลังเลเซอร์ 70 mW ซึ่งได้อธิบายถึงปรากฏการณ์มารานโกนีว่าความแปรผันของแรงตึงผิวที่

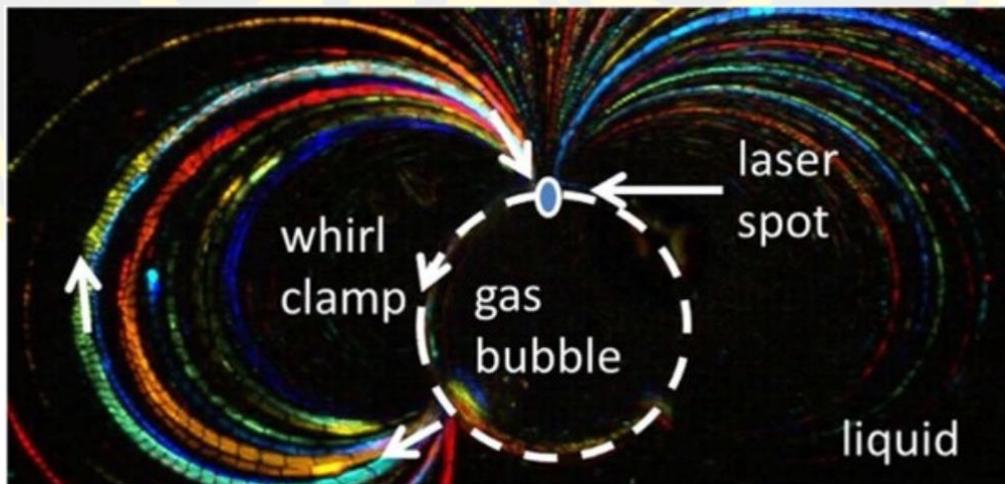
เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะนำไปสู่การเคลื่อนที่ของอนุภาคและพาความร้อนไปยังส่วน รอยต่อระหว่างของเหลวและอากาศที่แสดงไว้ในภาพที่ 20 อีกทั้งที่นักวิจัยนี้ยังจัดวางภาพถ่าย 100 เฟรม ที่แต่ละเฟรมมีการลงสีที่ต่างกัน ในภาพที่ 21 ดังนั้นจึงสามารถประเมินความเร็วของอนุภาคได้ สำหรับรูปที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30  $\mu\text{m}$  มีความเร็วประมาณ 2.4 mm/s และรูปที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 2 mm มีความเร็วประมาณ 0.6 mm/s ซึ่งสามารถกำหนดวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ อย่างแม่นยำ และได้ศึกษาการไหลวนของอนุภาคที่มาพร้อมกับฟองอากาศ ซึ่งรูปแบบการไหลของ ของเหลวเป็นการไหลวนโดยการพาความร้อนแสดงในภาพที่ 22 นักวิจัยทีมนี้ไม่สามารถระบุการ กระจายอุณหภูมิรอบฟองอากาศและความแตกต่างระหว่างตำแหน่งจุดเลเซอร์นี้ได้ ซึ่งเทคนิคทั้งหมด นี้เป็นไปได้ที่จะพัฒนาวิธีการจัดการกับฟองอากาศหลายฟองโดยใช้ spatial light modulator (SLM) ทำการสังเคราะห์อนุภาคขนาดเล็ก การเคลื่อนที่และการสะสมของอนุภาคบนพื้นผิว ฟองอากาศ และอาจนำไปใช้ในการตรวจสอบทางชีวการแพทย์ [36]



ภาพที่ 20 แผนผังทางกายภาพสำหรับปรากฏการณ์มารานโกนีสองมิติที่เหนี่ยวนำด้วยเลเซอร์ (a) ลำแสงเลเซอร์แก๊สเขียนที่  $(x_c, y_c)$  ตกกระทบกับชั้นของเหลวที่ดูดซับ ทำให้เกิดการไล่ระดับอุณหภูมิที่ รอยต่อระหว่างของเหลวและอากาศ (b) การโค้งงอของรอยต่อเพิ่มขึ้น เมื่อส่วนที่โค้งงอไปถึงตำแหน่ง ของจุดเลเซอร์จะเกิดการไหลวนของของเหลว [37]



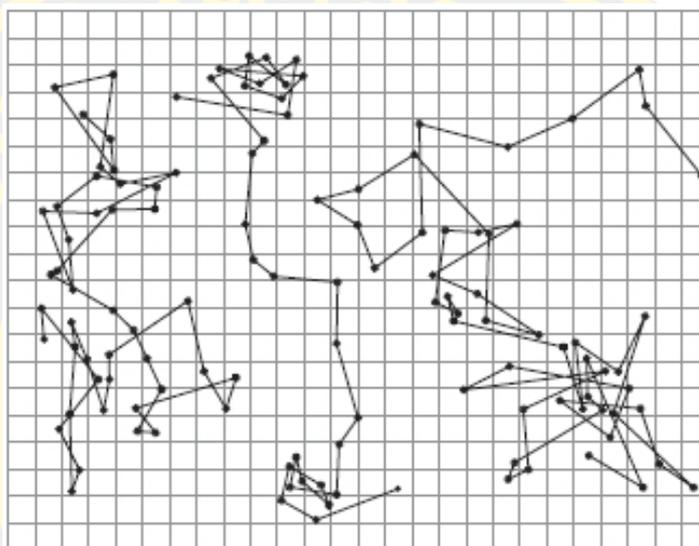
ภาพที่ 21 ภาพถ่ายสนามมืดด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ประกอบด้วย การไหลวนที่เกิดจากเลเซอร์ในสารละลาย pNA-1,4 ไดออกเซน เส้นหลายสีแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฟลักซ์ของเหลวที่ถ่ายได้ 100 เฟรมติดต่อกัน แต่ละเฟรมนาน 40 ms ด้านซ้ายของภาพนำเสนอเป็นแบบจำลองกลับหัวของด้านขวา เพื่อชี้ให้เห็นถึงความสมมาตรที่สมบูรณ์แบบของการไหล ลูกศรแนวตั้งแสดงแอมพลิจูดการโค้งงอของรอยต่อเนื่องจากแรงตึงผิวเฉพาะที่ลดลงซึ่งเกิดจากการกระจายอุณหภูมิ และลูกศรโค้งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งตำแหน่งของจุดเลเซอร์อยู่ที่จุดโค้งงอสูงสุดของรอยต่อ [37]



ภาพที่ 22 ภาพถ่ายของฟองอากาศที่ถูกกระแสการไหลวนจับยึดไว้เมื่อมองในสนามมืด ทำให้สามารถมองเห็นวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดัดแปลงจาก [37]

## 2.5 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Motion)

เป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกมองว่าเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในระยะสั้นๆ สุ่ม (random motion) ภายใต้อิทธิพลของไหล อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางตลอดเวลา อาจเกิดการชนกับอนุภาคข้างเคียงได้



ภาพที่ 23 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน [37]

ศตวรรษที่ 19 นักพฤกษศาสตร์ Robert Brown ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของบราวเนียนเป็นครั้งแรก ในขณะที่ตรวจสอบสารแขวนลอยในน้ำของละอองเรณู พบว่าธัญพืชเหล่านี้เคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วอยู่เสมอ แต่ได้รับการอธิบายว่าอนุภาคนั้นมีชีวิต บราวน์จึงทำการทดลองด้วยการสังเกตเก๋าก่านบางส่วนจากปล่องไฟ สันนิษฐานว่าอนุภาคไม่มีชีวิตและมีการเคลื่อนไหว

จากภาพที่ 23 แสดงตัวอย่างของวิถีโคจรแบบบราวเนียน อธิบายได้จากการสันนิษฐานว่าการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอนของอนุภาคที่อยู่ในของไหล เป็นผลมาจากการชนกันอย่างต่อเนื่องกับโมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่จากพลังงานความร้อนของอนุภาคเอง หรือว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์ ไม่ได้เกิดจากการรบกวนจากภายนอก การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ความหนืดของของไหลลดลง และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น [38]

สามารถสังเกตการเคลื่อนที่เหล่านี้เป็นเชิงปริมาณมากขึ้น จากสมการของนิวตันที่อธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุและโมเลกุล

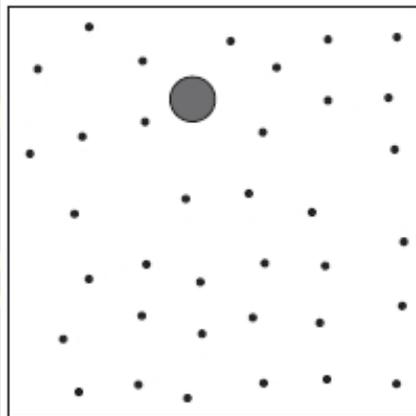
$$m_n \frac{d^2}{dt^2} r_n = F_n(r_1, \dots, r_N) \quad (13)$$

โดยที่  $m_n$  คือ มวลของอนุภาคที่  $n$  ;  $n = 1, \dots, N$

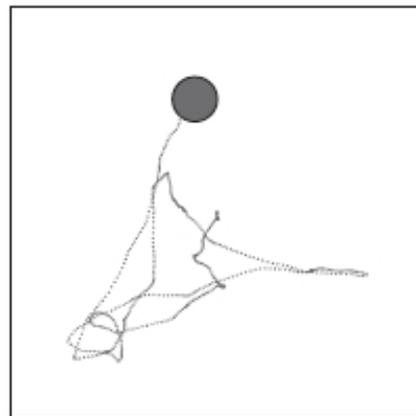
$r_n$  คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่  $n$  ;  $r_n = r_1, \dots, r_N$

$F_n$  คือ แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่  $n$  ;  $F_n = F_1, \dots, F_N$

(a)



(b)



ภาพที่ 24 (a) อนุภาคขนาดเล็กที่ข่อยอยู่ในของไหลเกิดการชนอย่างต่อเนื่องกับโมเลกุลของของไหล  
(b) การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งและความเร็วของโมเลกุลของของไหลได้ [38]

## 2.6 สมการแลงเวิน (Langevin equation)

โดยการเพิ่มแรงผันผวนให้กับสมการการเคลื่อนที่ของนิวตันสำหรับอนุภาคมวล  $m$  ในของไหลหนืด จะได้สมการแลงเวิน

$$m \frac{d^2}{dt^2} r(t) = -\gamma \frac{d}{dt} r(t) + \chi(t) \quad (14)$$

โดยที่  $\gamma$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอนุภาค สำหรับอนุภาคที่เคลื่อนที่ในของไหลที่มีความหนืด  $\eta$  ที่ถูกกำหนดโดยกฎของสโตกส์ (Stokes' law)

$$\gamma = 6\pi\eta a \quad (15)$$

เมื่อมีศักย์  $U(r)$  จึงมีแรง  $F(r) = -\frac{d}{dr}U(r)$  ที่กระทำต่ออนุภาค จากสมการ (14) จะกลายเป็น

$$m \frac{d^2}{dt^2} r(t) = -\frac{d}{dr}U(r) - \gamma \frac{d}{dt} r(t) + \chi(t) \quad (16)$$

โดยที่  $\chi(t)$  เป็นแรงสุ่มที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มี 3 คุณสมบัติได้แก่ 1.  $\langle \chi(t) \rangle = 0$  2. แรงสุ่มไม่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของอนุภาค เช่น  $\langle \chi(t)x(t) \rangle = 0$  และ 3. มีความผันผวนเร็วกว่าตำแหน่งของอนุภาคมาก เช่น  $\langle \chi(t)\chi(t+\tau) \rangle = 2S\delta(\tau)$  โดยที่  $2S$  คือความเข้มของเสียง เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ จะได้

$$\chi(t) = \sqrt{2S} W(t) \quad (17)$$

โดยที่  $S = \gamma k_B T$ ;  $k_B$  คือค่าคงตัวโบลทซ์มันน์ และ  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์  $W(t)$  คือ ไวท์นอยส์ (white noise)

#### White noise

การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเป็นแรงบันดาลใจในการพัฒนาแนวคิดทางคณิตศาสตร์ของไวท์นอยส์ และสมการเชิงอนุพันธ์สุ่มทั้งหมด  $W(t)$  มีคุณสมบัติต่อไปนี้

1.  $\langle W(t) \rangle = 0$  สำหรับแต่ละ  $t$
2.  $\langle W(t)^2 \rangle = 1$  สำหรับแต่ละ  $t$
3.  $W(t_1)$  และ  $W(t_2)$  เป็นอิสระจากกันสำหรับ  $t_1 \neq t_2$

เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ ไวท์นอยส์จึงไม่ใช่ฟังก์ชันมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $W(t)$  แทบจะทุกที่ที่ไม่ต่อเนื่องและมีความแปรผันที่ไม่สิ้นสุด สามารถถูกมองว่าเป็นเวลาต่อเนื่องเทียบเท่ากับลำดับที่ไม่ต่อเนื่องของตัวเลขสุ่มอิสระ

ของไหลจะดูดซับการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์เช่นเดียวกับในกรณีที่มีการกระจายตัวอย่างอิสระ แต่ในปัจจุบันศักยภาพที่จำกัดได้จำกัดการกระจัดของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคจึงสำรวจได้เฉพาะบริเวณที่จำกัดเท่านั้น ในกรณีที่สำคัญซึ่งศึกษาศึกษ์ฮาร์มอนิกครั้งแรกในปี ค.ศ.1930 โดย George Eugene Uhlenbeck และ Leonard Salmon Ornstein

ในระบบเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำ มีความเป็นไปได้ที่จะตัดเทอมระบอบเฉื่อยทิ้งในสมการ (16) ทำให้ได้สมการแลงเกวิน

$$\frac{d}{dt} \mathbf{r}(t) = -\frac{1}{\gamma} \frac{d}{dr} U(r) + \xi(t) \quad (18)$$

โดยที่  $\xi(t) = \sqrt{2D}W(t)$  เป็นไวท์นอยส์ที่มีความเข้ม 2 มิติ

$D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

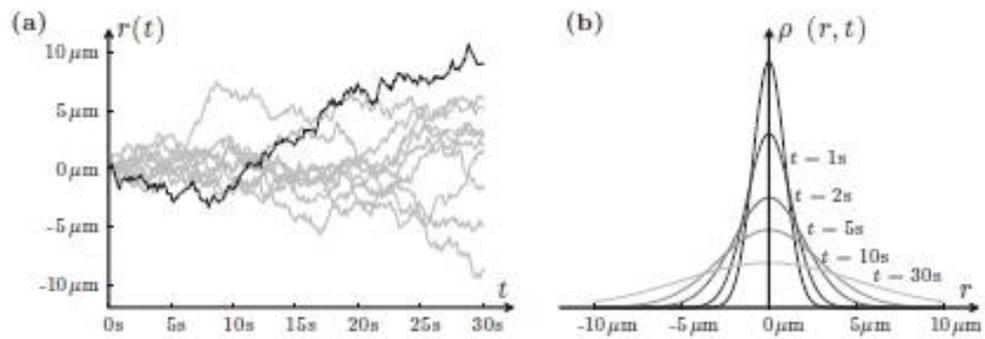
## 2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

ตามหลักการแล้ว อาจสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจากสมการการเคลื่อนที่แต่ละอนุภาคของนิวตัน (สมการ 13) แต่ไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีโมเลกุลจำนวนมาก ที่เป็นไปตามค่าคงตัวอาโวกาโดร  $6.02 \times 10^{23}$  ทำให้ 2 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนได้รับการพัฒนาในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา

1. มุ่งเน้นไปทางวิถีโคจรสุ่ม  $\mathbf{r}(t)$  ของอนุภาคเดี่ยว สร้างแบบจำลองด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งมีการเพิ่มแรงสุ่มเพื่ออธิบายปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคกับสิ่งแวดล้อม

2. มุ่งเน้นไปทางการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น  $\rho(\mathbf{r}, t)$  ของกลุ่มอนุภาคบราวเนียน สร้างแบบจำลองโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

การแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสามารถทำได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของวิถีโคจร ในทางกลับกัน คุณสมบัติทางสถิติของแรงสุ่มที่ใช้ในการคำนวณวิถีโคจรขึ้นอยู่กับ การกระจายความหนาแน่นของความน่าจะเป็น



ภาพที่ 25 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน: เส้นโคจรและการแจกแจงความน่าจะเป็น การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนสามารถจำลองโดยที่ (a) เส้นวิถีโคจรสุ่ม  $r(t)$  ของอนุภาคเดี่ยว หรือ (b) ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น  $\rho(r, t)$  ของกลุ่มอนุภาคบราวเนียน [38]

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือการศึกษาระบวนการสร้างฟองอากาศเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์มารรานโกนี และทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการดูด fluorescence dye molecules โดยมีขั้นตอนการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยดังต่อไปนี้

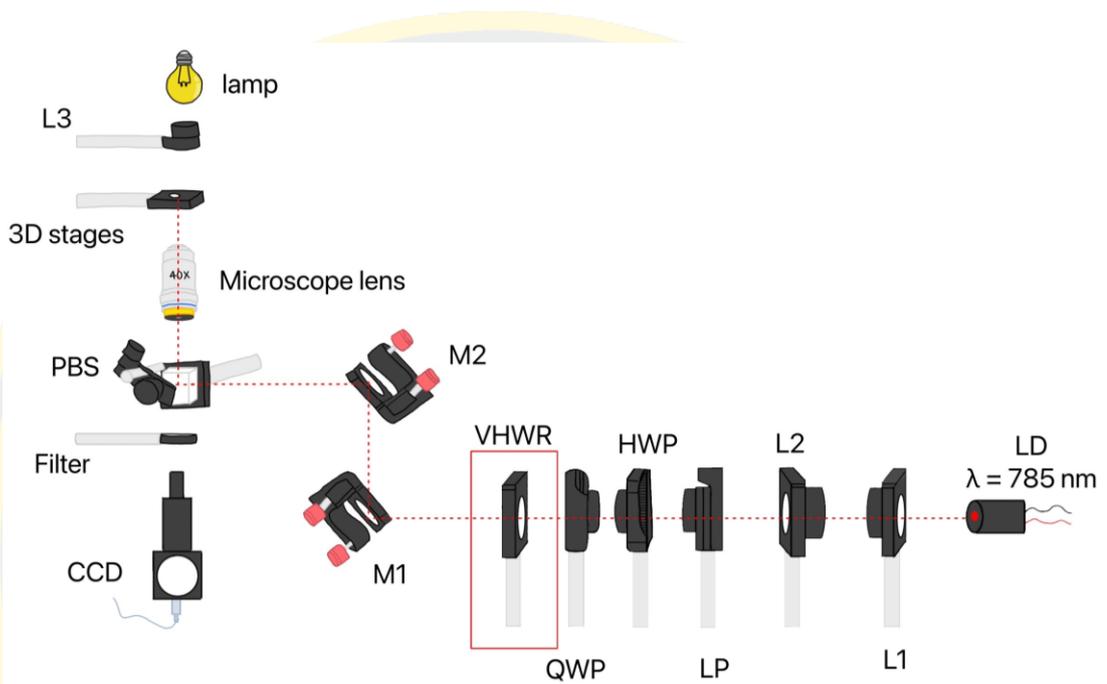
#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย

1. Laser diode (LD, Thorlabs: LD785-SE400)
2. Laser diode controller (Thorlabs: LDC205C)
3. Convex lens  $f=15$  mm (L1, Thorlabs: LB1092-B-ML)
4. Convex lens  $f=25$  mm (L2, Thorlabs: LB1761-B-ML)
5. Linear polarizer (LP, Thorlabs: LPVIS100-MP2)
6. Half-wave plate (HWP, Thorlabs: WPH10M-780)
7. Quarter-wave plate (QWP, Thorlabs: WPQSM05-633)
8. Vortex half-wave retarder (VHWR, Thorlabs: WPV10L-780)
9. Mirror (M1&M2, Thorlabs: BB1-E03-10)
10. Polarization beamsplitter cube (PBS, Thorlabs: PBS205)
11. Microscope lens x40 (Olympus: Model CHS)
12. 3D stages (Thorlabs: PT3A/M)
13. Convex lens  $f=25$  mm (L3, Thorlabs: LB1761-A-ML)
14. Lamp (EVE Lighting: LED 3W Gen2)
15. Filter (Thorlabs: NF785-33)
16. Camera (CCD, Thorlabs: DCU223C)
17. 780 nm fluorescence dye molecules (Sigma-Aldrich: IR-780 iodide, dye content  $\geq 95\%$ , CAS Number: 207399-07-3)
18. Compact Power and Energy Meter Console (Thorlabs: PM100D)

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

การจัดอุปกรณ์เริ่มต้นจากการให้กระแสไฟฟ้า 400 mA ด้วยเลเซอร์ไดโอดคอนโทรลเลอร์กับเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 785 nm ขยายขนาดแสงเต็มหน้ารับแสงของเลนส์ใกล้วัตถุและให้แสงโฟกัสด้วยเลนส์ใกล้วัตถุเอง เพื่อให้แสงโฟกัสเป็นจุดได้ดีกว่าและมีเกรเดียนต์มากขึ้น ด้วยเลนส์นูน (L1) ที่มีความยาวโฟกัส 15 mm และเลนส์นูน (L2) ที่มีความยาวโฟกัส 25 mm ซึ่งกำลังขยายของแสงเป็น 1.66 เท่า ( $M = f_2/f_1$ ) ผ่านโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) เลือกโพลาไรซ์ในเหลือแนวแกนเดียว ร่วมกับแผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท (HWP) ผ่านแผ่นควอเตอร์เวฟเพลท (QWP) ทำมุม 45° กับแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนโพลาไรซ์ของแสงเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลม เนื่องจากแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์เดอร์ (VHWR) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมถึงจะเป็นแสงวอร์เท็กซ์ เมื่อแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมผ่านแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์เดอร์ (VHWR) ที่จะเปลี่ยนเฟสของแสงตามมุมรอบๆ จุดศูนย์กลางของแสง ทำให้แสงมีโครงสร้างเฟสแบบควงรอบจุดศูนย์กลาง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แสงวอร์เท็กซ์ที่มีประจุโทโพโลจิคอล  $l = +1$  โดยที่โพลาไรซ์แบบวงกลมต้องหมุนทวนเข็มนาฬิกาถึงจะทำให้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ได้เป็น  $l = +1$  จากนั้นแสงผ่านกระจก (M1) ทำให้แสงเลเซอร์สะท้อนขึ้นไปที่ด้านบน แสงตกกระทบบนกระจก (M2) สะท้อนไปยังผลึกแยกลำแสงโพลาไรซ์ (PBS) แยกลำแสงเลเซอร์ออกเป็น 2 แนว คือแนวตั้งและแนวนอนตามโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ลำแสงโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) ในการทดลอง ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลัง x40 ที่อยู่ด้านล่างของกระจกสไลด์บนสเตจเคลื่อนที่แบบมือหมุน (3D stages) ที่สามารถปรับได้ 3 มิติ ซึ่งเลนส์นูน (L3) ที่มีความยาวโฟกัส 25 mm ทำหน้าที่รวมแสงจากโคมไฟ (lamp) เพื่อสร้างภาพให้แก่กล้อง (camera) ที่รับภาพจากกระจกสไลด์ และฟิลเตอร์ (Filter) ที่กันแสงเลเซอร์ ไม่ให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนบนกระจกสไลด์ตกลงบนกล้องรับภาพ



ภาพที่ 26 แผนภาพชุดอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยเลเซอร์ เลนส์นูน (L1,  $f=15 \text{ mm}$ ) เลนส์นูน (L2&L3,  $f=25 \text{ mm}$ ) โพลาริซิงเส้น (LP) แผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท (HWP) แผ่นควอเตอร์เวฟเพลท (QWP) แผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์ดอร์ (VHWR) กระจก (M1&M2) ผลึกแยกลำแสงโพลาริซิง (PBS) เลนส์ใกล้วัตถุ (Microscope lens) สเตจเคลื่อนที่แบบมือหมุน (3D stages) โคมไฟ (lamp) ฟิลเตอร์ (Filter) และ กล้อง (camera) ตามลำดับ

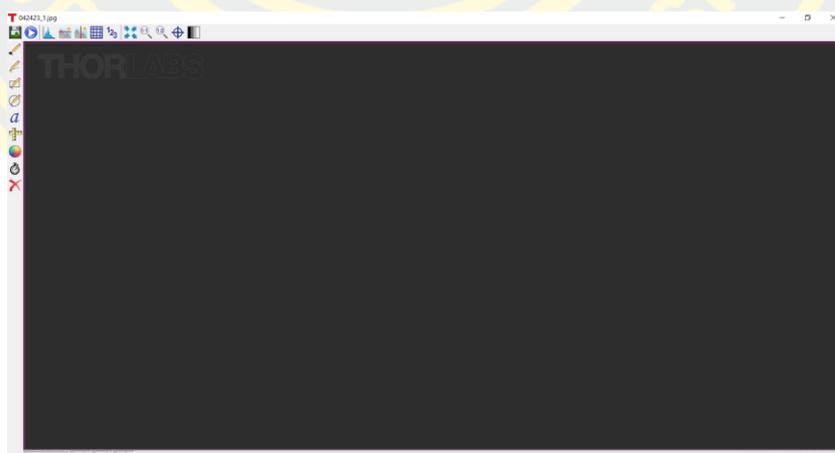
### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเตรียมตัวอย่างโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye ที่จะเรืองแสงเมื่อแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 นาโนเมตรมากระทบ โดยนำแผ่น dye molecules มาบดด้วยครกบดสารให้ละเอียดและนำมาผสมกับน้ำปราศจากไอออน (DI water) จากนั้นหยดตัวอย่างลงกระจกสไลด์เพียง 1 หยด และปิดด้วย cover glass



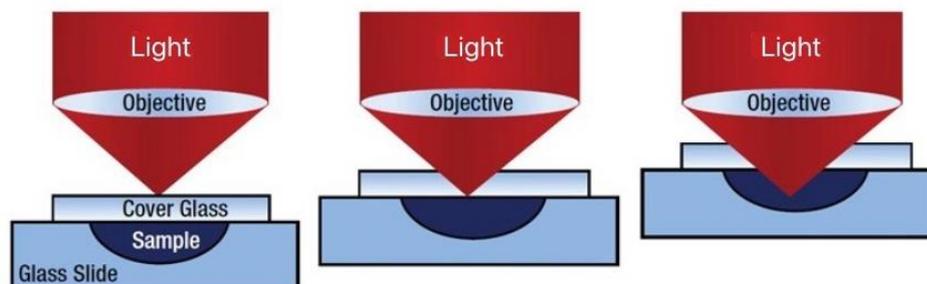
ภาพที่ 27 ตัวอย่างการเตรียมตัวอย่างบนกระจกสไลด์ [38]

2. เปิดโปรแกรม ThorCam เพื่อดูภาพจากกล้อง DCU223C ที่รับภาพบนกระจกสไลด์



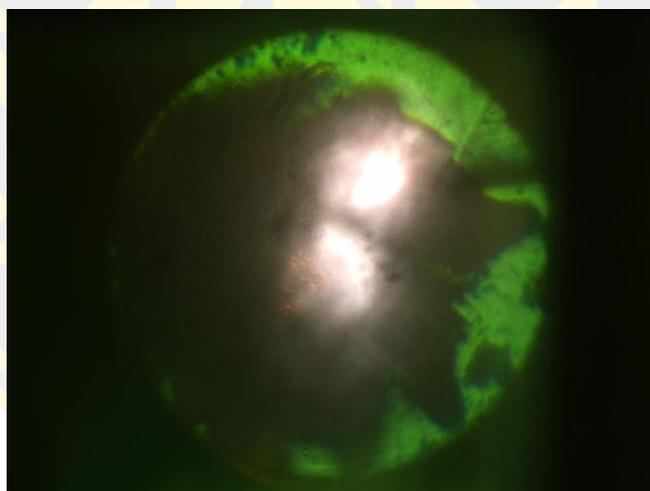
ภาพที่ 28 หน้าโปรแกรมของ ThorCam ที่ใช้ในการทดลอง

3. วางกระจกสไลด์บนสแตงเคลื่อนที่แบบมือหมุน ปรับสแตงในแนวแกน z (แนวตั้ง) เพื่อหา ระยะโฟกัสของตัวอย่างดังภาพที่ 29 เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจน



ภาพที่ 29 การปรับเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อหาระยะโฟกัสของอนุภาค ดัดแปลงจาก[39]

4. เลื่อนสแตงเพื่อหาโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye แผ่นใหญ่ เมื่อแสงเลเซอร์ที่ ถูกโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุตกกระทบ ทำให้แผ่น dye molecules เรืองแสง สังเกตว่าจะมี ฟองอากาศเกิดขึ้นมาจากโมเลกุล



ภาพที่ 30 ภาพตัวอย่างโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye เรืองแสง เมื่อลำแสงเลเซอร์เป็นแสงวอร์เท็กซ์

5. ทำการดักจับโมเลกุล ด้วยการเลื่อนสแตงให้ลำแสงเลเซอร์อยู่ตรงกลางฟองอากาศ
6. บันทึกวิดีโอ เมื่อโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye ถูกดูดเข้ามาในฟองอากาศ

7. ทำการทดลองซ้ำ ด้วยการเพิ่มแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์เตอร์ให้เป็นลำแสงวอร์เท็กซ์ และ นำวิดีโอมาวิเคราะห์พฤติกรรมโมเลกุลและเปรียบเทียบกับตอนที่เป็นลำแสงเกาส์เซียน



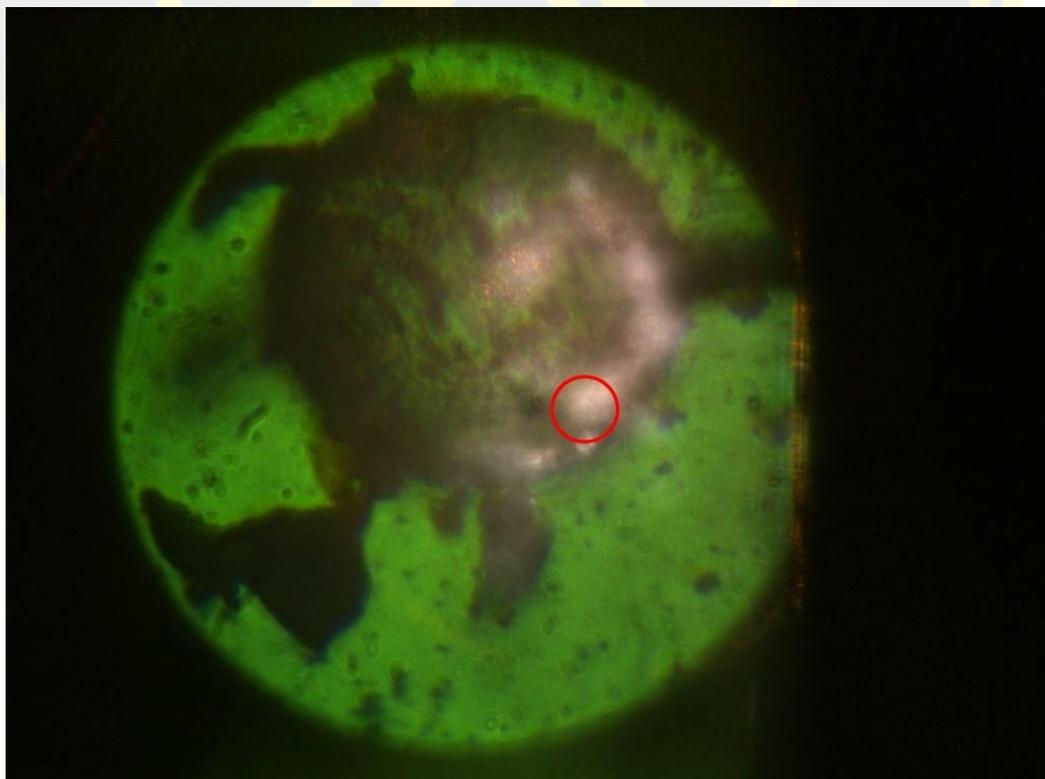
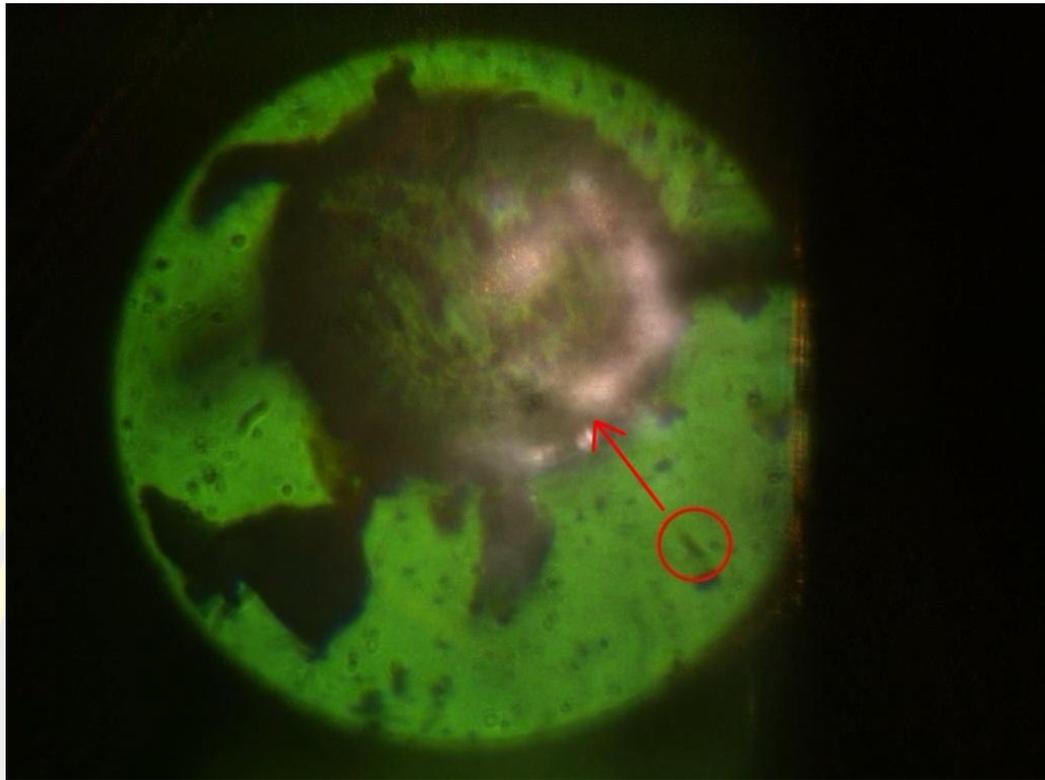
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

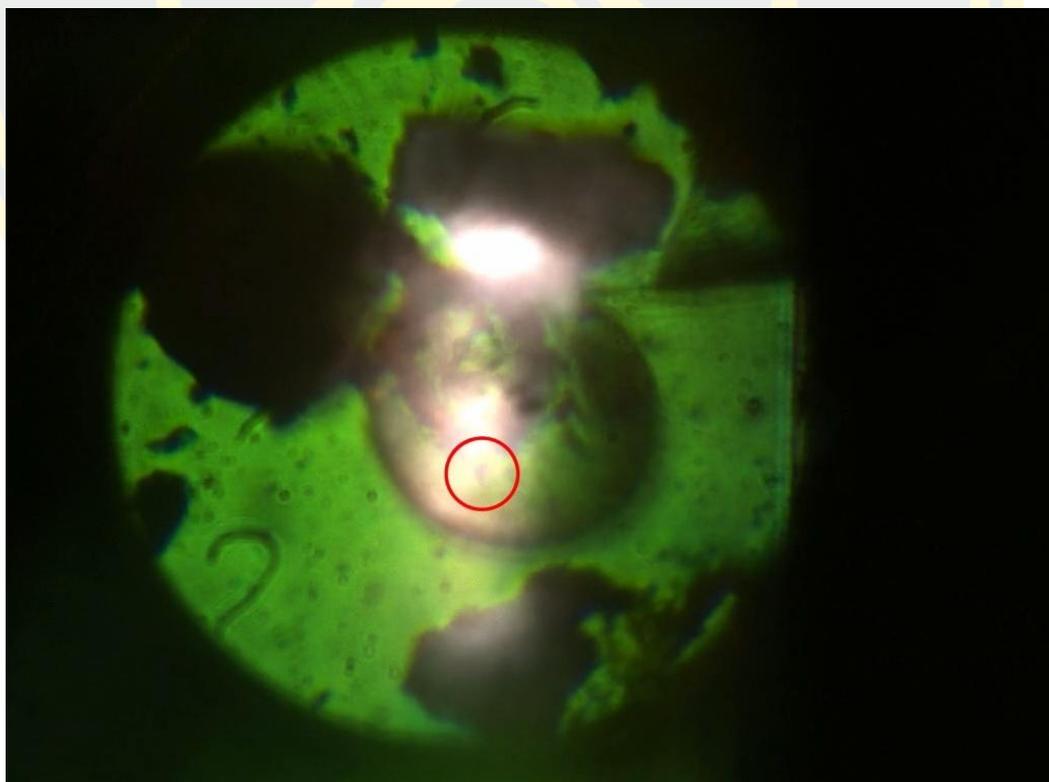
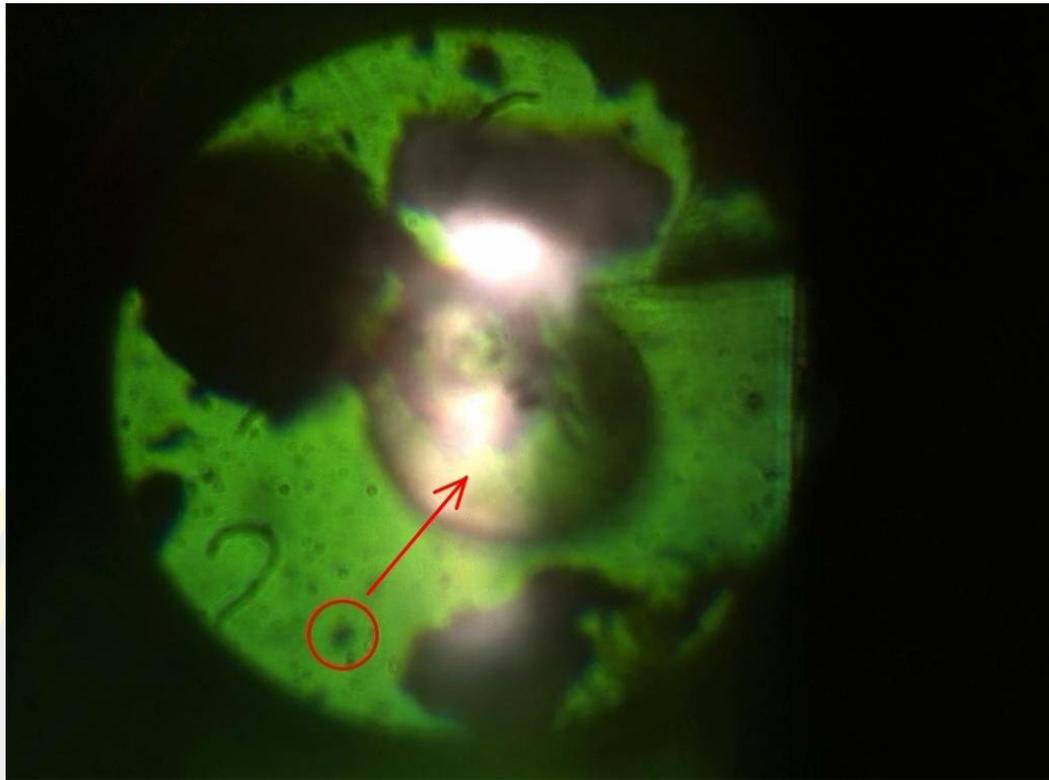
ในงานวิจัยฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างฟองอากาศเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์มารานโกนี่สำหรับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร ให้สามารถดักจับโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye โดยใช้ลำแสงแก๊สซีเนียนและวอร์เท็กซ์ของแสง ซึ่งผลการดำเนินการที่ได้นั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกัน ประกอบไปด้วยแบบแรกคือผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงแก๊สซีเนียน และแบบที่สองคือผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงวอร์เท็กซ์

#### 4.1 ผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงแก๊สซีเนียน

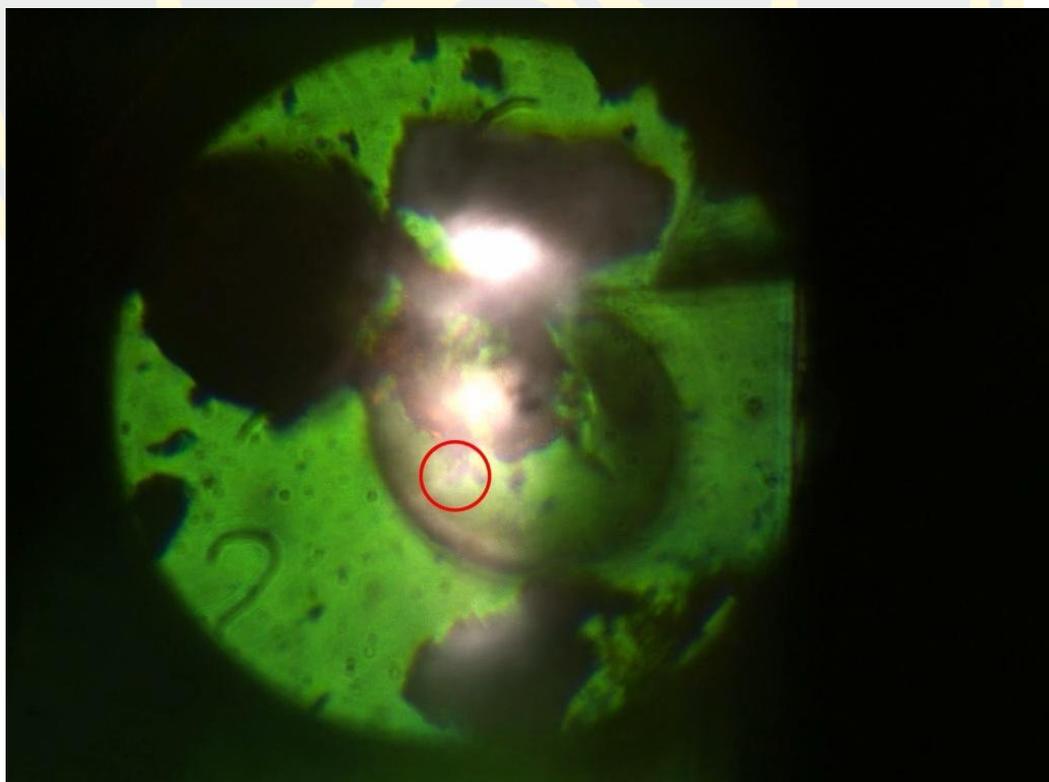
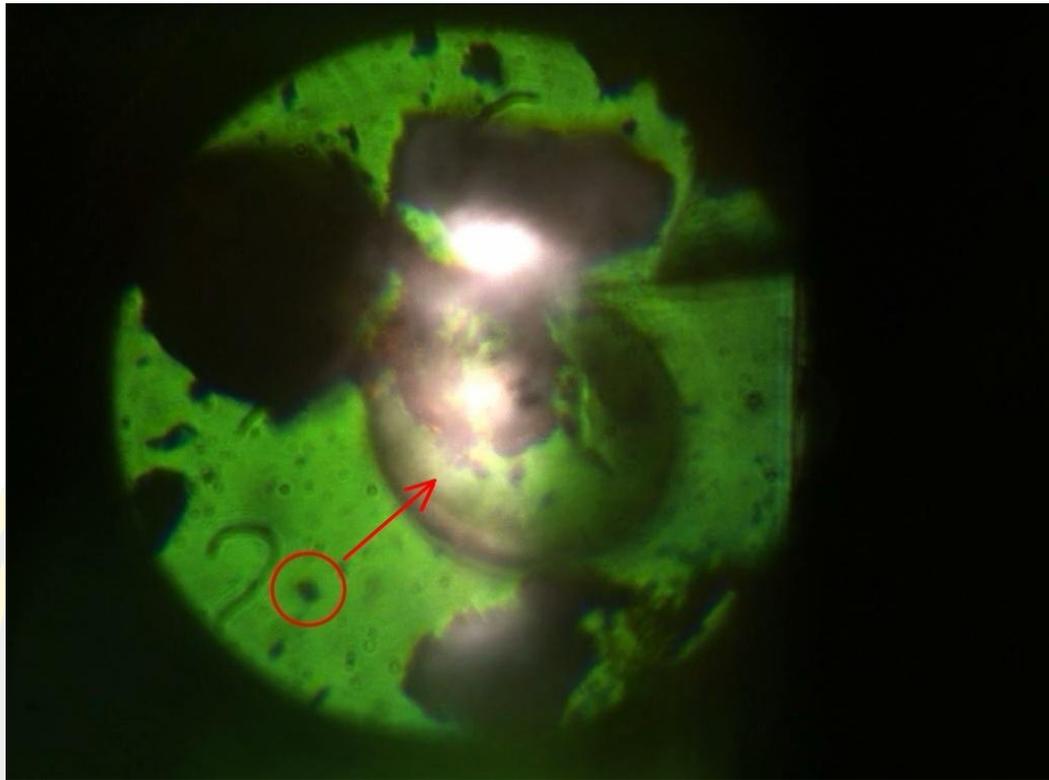
ในส่วนแรกเป็นผลการทดลองของการดักจับโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye ที่เป็นตัวอย่างของงานวิจัยนี้ โดยการออกแบบระบบและสร้างฟองอากาศสำหรับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร ที่การจัดอุปกรณ์ไม่มีแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟรีทาร์เดอร์ (VHWR) แสงเลเซอร์มีความเข้มที่มีลักษณะเป็นแก๊สซีเนียน โดยให้กระแสไฟฟ้า 250 mA ด้วยเลเซอร์ไดโอดคอนโทรลเลอร์กับเลเซอร์ไดโอด เมื่อแสงเลเซอร์มากระทบกับแผ่น dye molecules แล้ว แผ่น dye molecules ตัวอย่างจะแตกกระจายออกเป็นขนาดเล็กๆ และสร้างฟองอากาศขึ้นมาเนื่องจากพลังงานความร้อนของแสงเลเซอร์ ซึ่งขนาดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับกำลังเชิงแสง (optical power) และเวลาที่กระทบโดนตัวอย่างของเลเซอร์ หากเลื่อนสแตจให้แสงเลเซอร์อยู่ตรงกลางฟองอากาศ dye molecules ตัวอย่างขนาดเล็กจะถูกดึงดูดให้เข้ามาในฟองอากาศโดยผลของของการไหลวนโดยการพาความร้อน และทำการวัดกำลังของเลเซอร์ที่ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุได้ 109 mW แต่เนื่องจากเครื่องวัดกำลัง (Power meter) ที่ใช้ในการวัดนั้น ใช้สำหรับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ทำให้ต้องนำมาสอบเทียบ (calibration) เพื่อใช้สำหรับเลเซอร์ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร พบว่าค่าที่ได้จากเครื่องวัดกำลังเท่ากับ 31.14 mW เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยของอนุภาคพบว่ามีความเร็วค่าประมาณ  $\sim 130 \mu\text{m/s}$



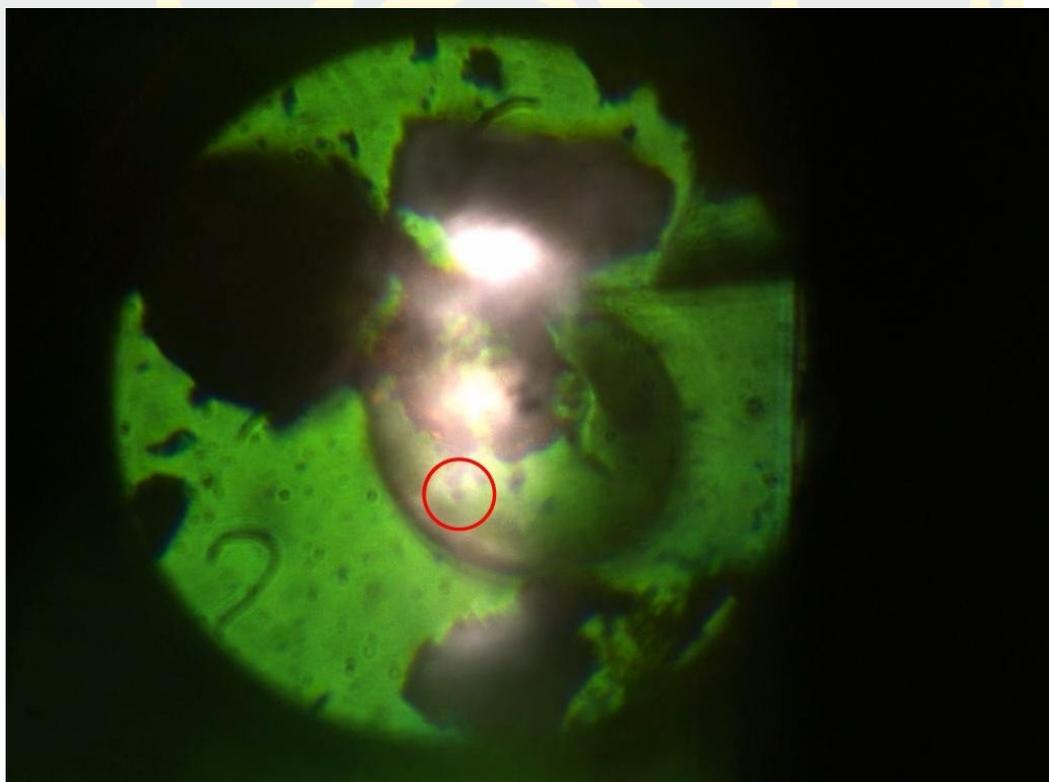
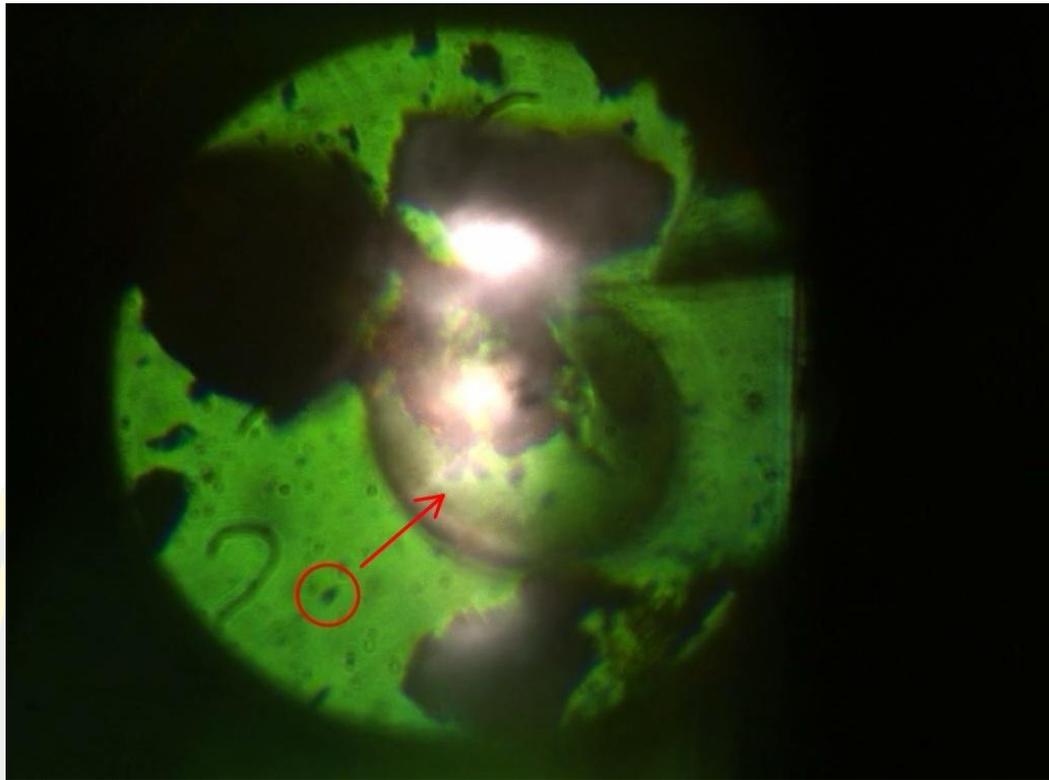
ภาพที่ 31 ตัวอย่าง dye molecules (วงกลมสีแดง) ที่เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายในฟองอากาศ ซึ่งสังเกตได้จากที่ตัวอย่างเรืองแสงหลังจากเคลื่อนที่เข้าสู่จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์



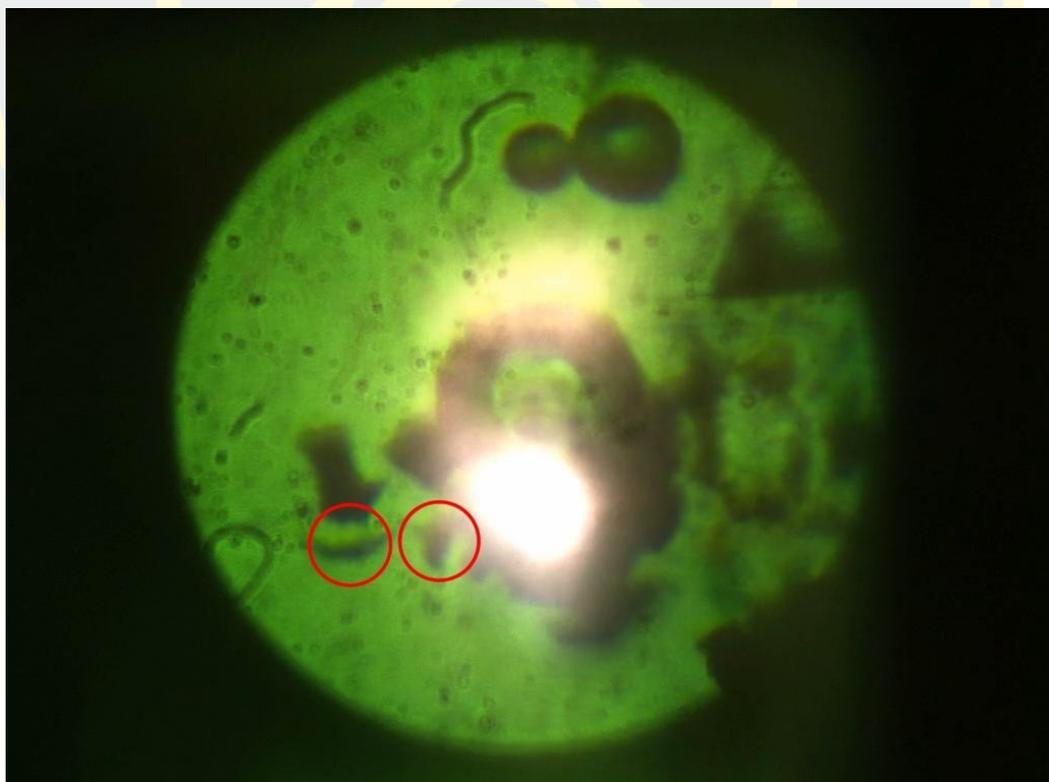
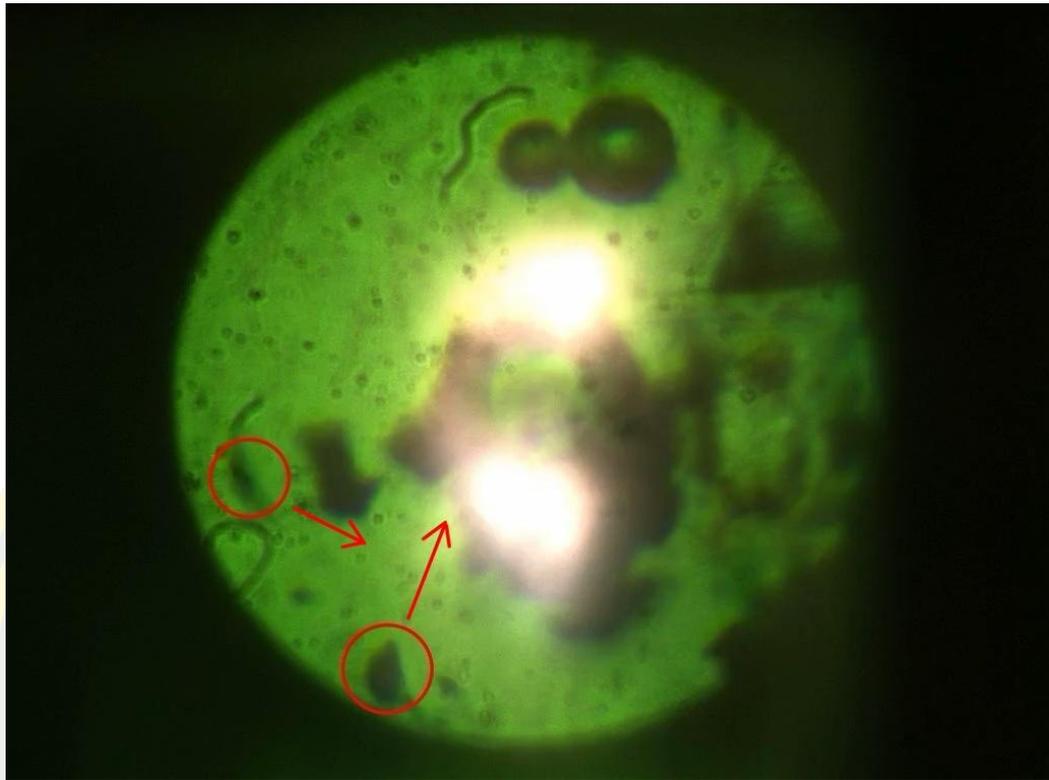
ภาพที่ 32 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
ฟองอากาศ โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคเกิดจากการพาความร้อนแบบมารานโกนี่



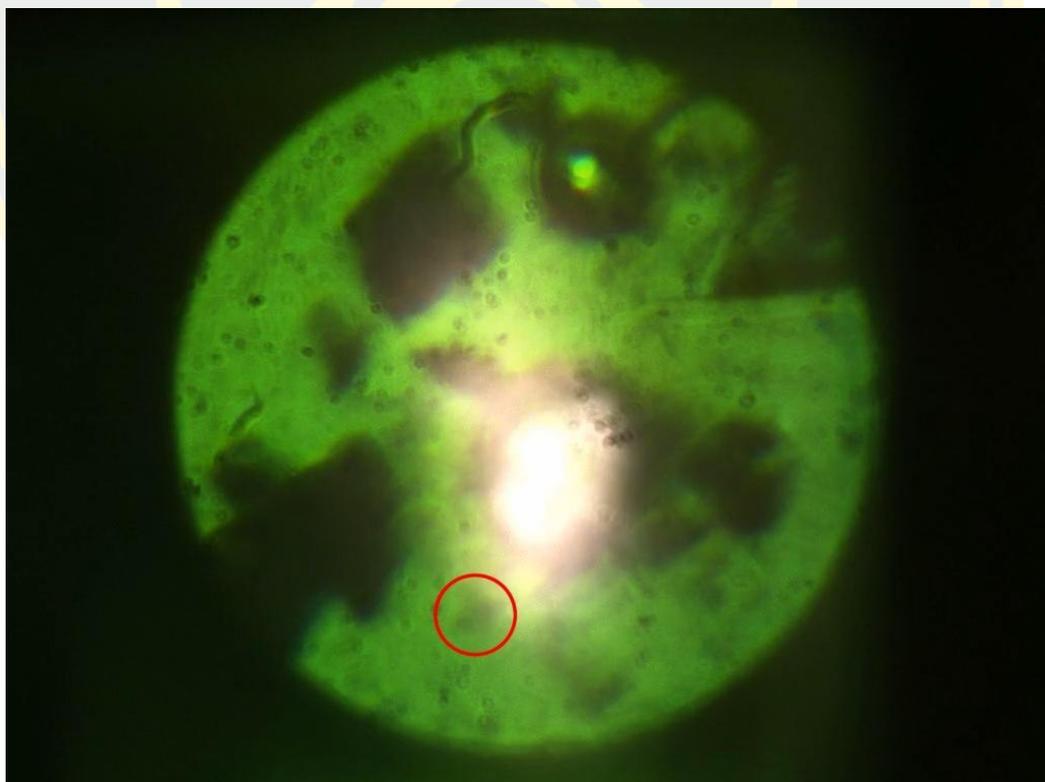
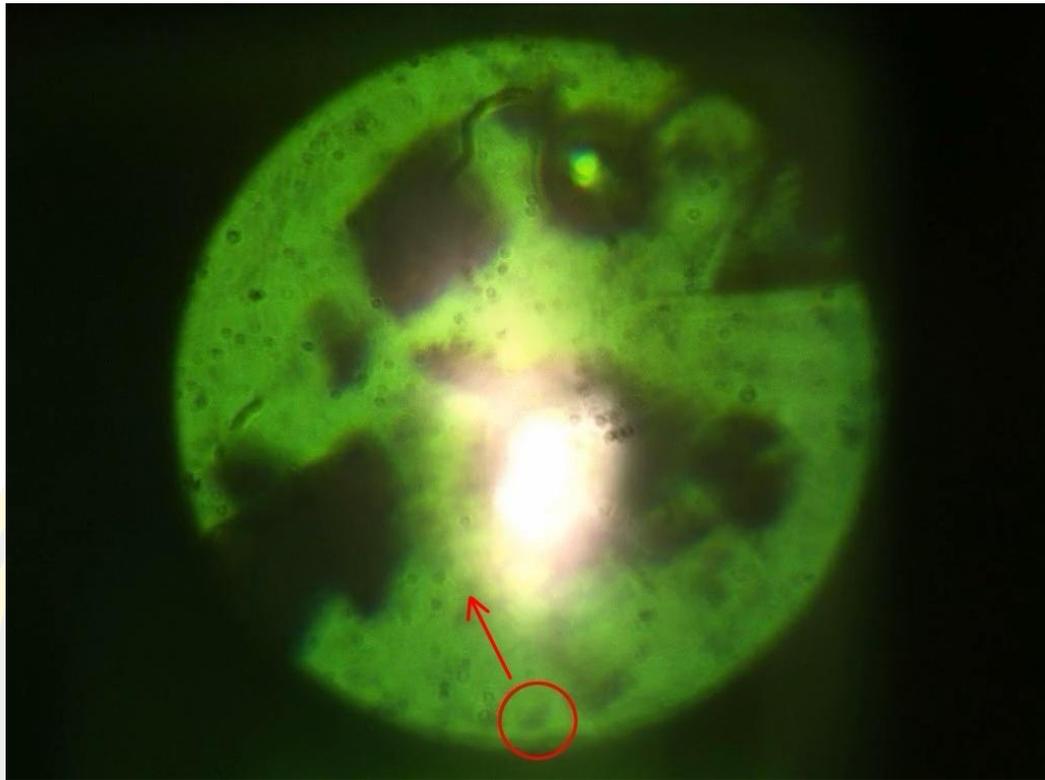
ภาพที่ 33 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
ฟองอากาศ ซึ่งภาพนี้เป็นภาพผลการทดลองต่อเนื่องจากภาพที่ 32



ภาพที่ 34 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด 2  $\mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งภายใน  
ฟองอากาศ ซึ่งภาพนี้เป็นภาพผลการทดลองต่อเนื่องจากภาพที่ 32 และ 33



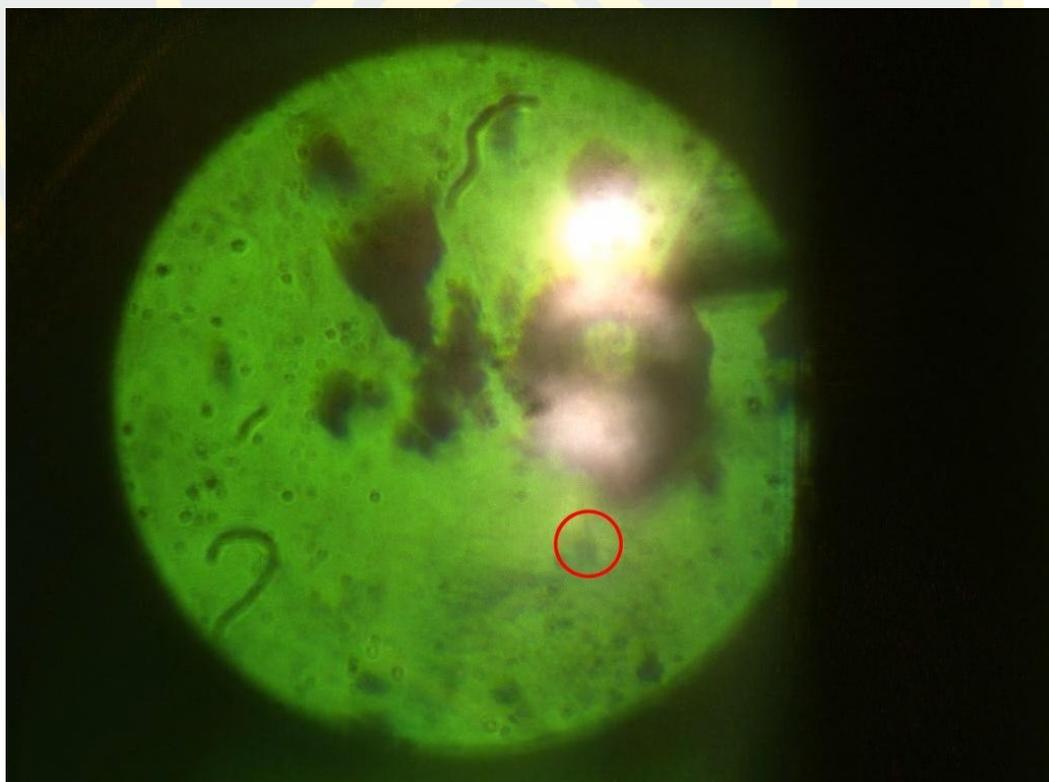
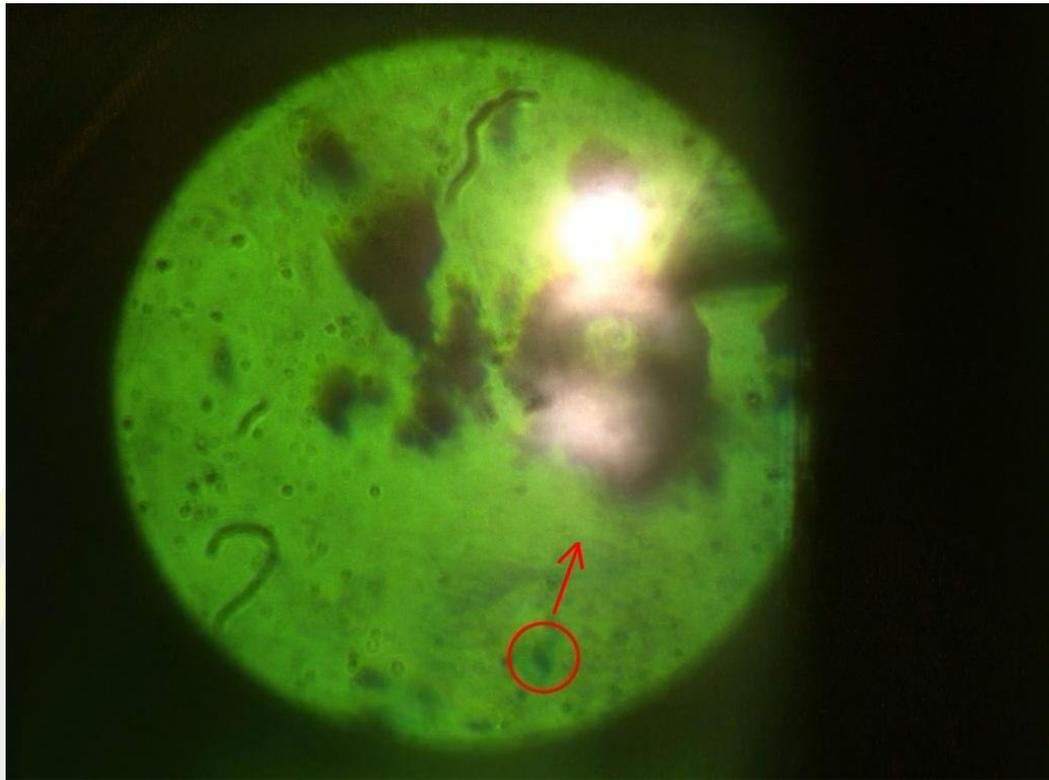
ภาพที่ 35 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ dye molecules ขนาดเล็ก (วงกลมสีแดงซ้ายมือ) จะมีการเคลื่อนที่แบบโค้งเพื่อหลบ dye molecules ตัวอื่น



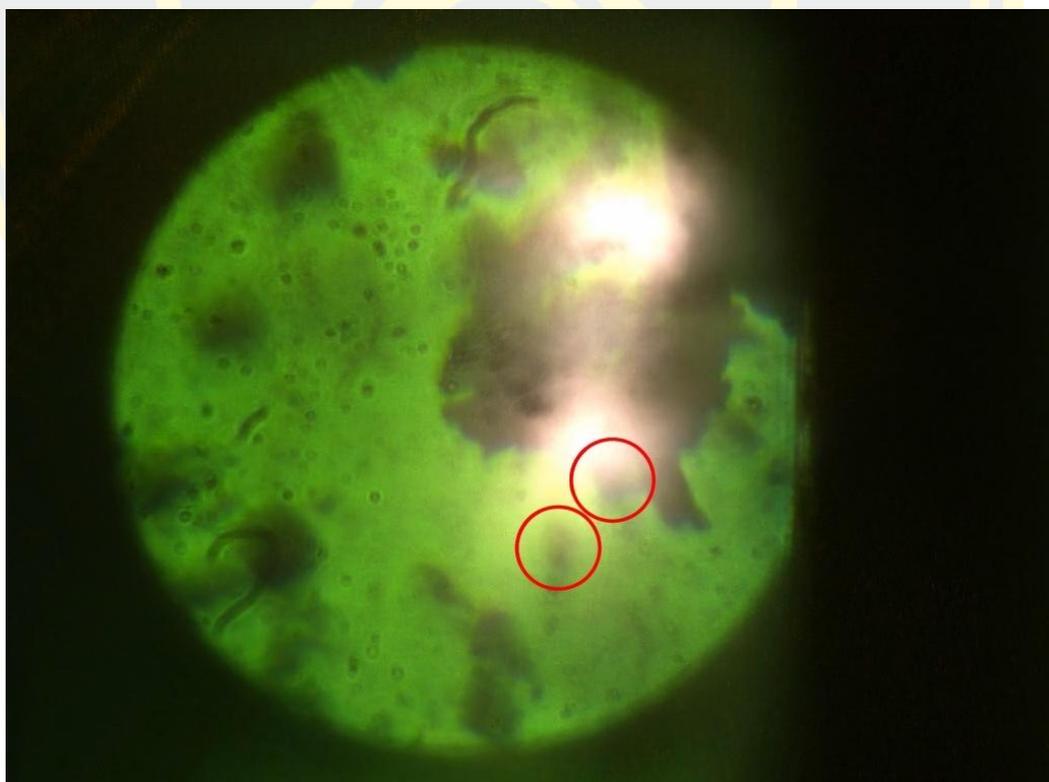
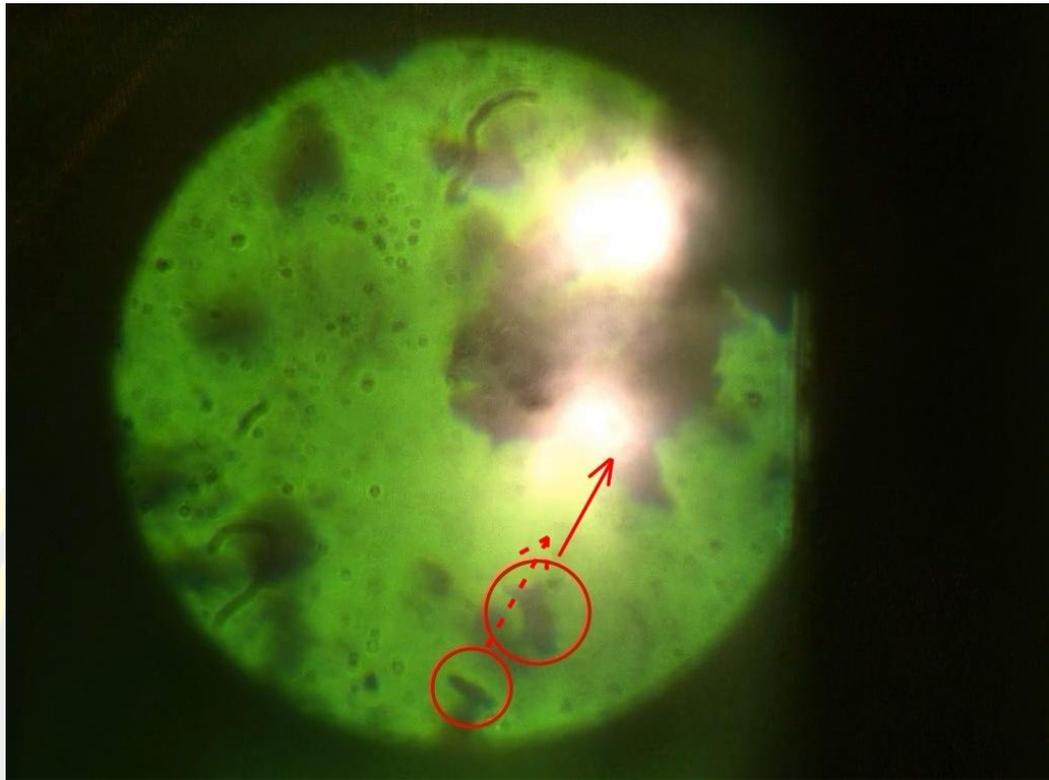
ภาพที่ 36 เนื่องจากการจัดอุปกรณ์เป็นแบบกล้องจุลทรรศน์แบบกลับหัวเพื่อชดเชยแรงโน้มถ่วง ทำให้ dye molecules ถูกเลเซอร์ผลักให้ขึ้นมา จะเห็นตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่และชัดขึ้น

## 4.2 ผลการดำเนินงานวิจัยที่เป็นแสงวอร์เท็กซ์

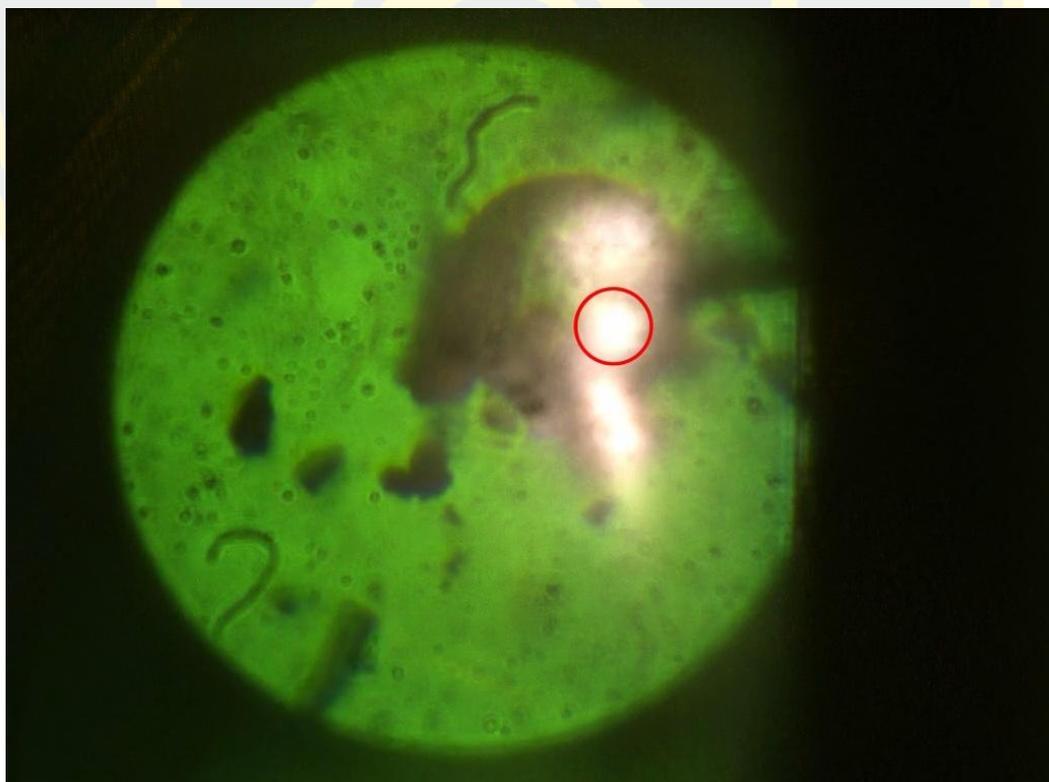
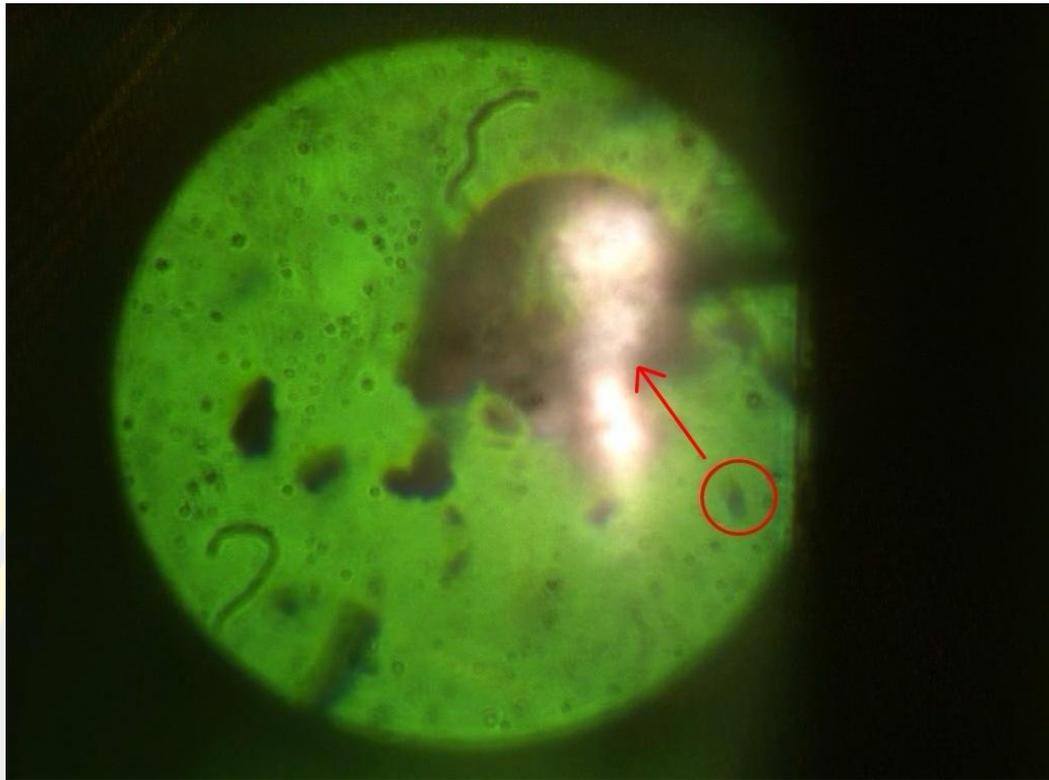
ในส่วนที่สองเป็นผลการทดลองของการดักจับโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye โดยการสร้างระบบสร้างฟองอากาศสำหรับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร ที่การจัดอุปกรณ์มีแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟปริซึมเตอร์ โดยให้กระแสไฟฟ้า 400 mA กับเลเซอร์ไดโอด เมื่อทำการทดลองซ้ำ พลังงานจากแสงเลเซอร์จะทำให้เกิดความร้อนและเกิดการแตกตัวของแผ่น dye molecules โดยผลของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อยู่ภายในของเหลว อาจเกิดจากการพาความร้อนแบบมารานโกนี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงตึงผิวที่สามารถเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นที่ผิวสัมผัส สำหรับฟองอากาศ เมื่ออุณหภูมิหรือความเข้มข้นแตกต่างกันตามพื้นผิวของฟองอากาศจะทำให้เกิดแรงตึงผิวที่ต่างกัน แรงตึงผิวที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้แรงตึงผิวของฟองอากาศบริเวณที่อุณหภูมิสูงมีแรงตึงผิวน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ ของฟองอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ของไหลจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีแรงตึงผิวน้อยไปยังบริเวณที่มีแรงตึงผิวสูง สร้างการไหลวนแบบวงจรรอบๆ ฟองอากาศ โดยแรงที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอนุภาคจะเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว อันเนื่องมาจากความดันที่แตกต่างกันระหว่างความดันภายนอกและภายในฟองอากาศ และแรงต้าน (drag force) จากการไหลของของไหล [35] การไหลที่รวดเร็วของของไหล (ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาค) ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคเอาชนะแรงตึงผิวและแรงจากความดันภายในและภายนอกของฟองอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่เข้าไปและหยุดนิ่งภายในฟองอากาศได้ ซึ่งตัวอย่างจะถูกดึงเข้ามาในฟองอากาศและดึงเข้าหาจุดโฟกัสของเลเซอร์ได้เร็วกว่า และทำการวัดกำลังของแสงวอร์เท็กซ์ได้เท่ากับ 22.86 mW โดยอัตราเร็วเฉลี่ยของอนุภาคพบว่ามีค่าประมาณอยู่ที่ 260  $\mu\text{m/s}$  นอกจากนี้จะพบแนวรอยบากของแสงที่เรืองแสง ซึ่งเป็นผลจากแสงวอร์เท็กซ์เคลื่อนที่ผ่านผลึกแบ่งแสงทางโพลาไรซ์



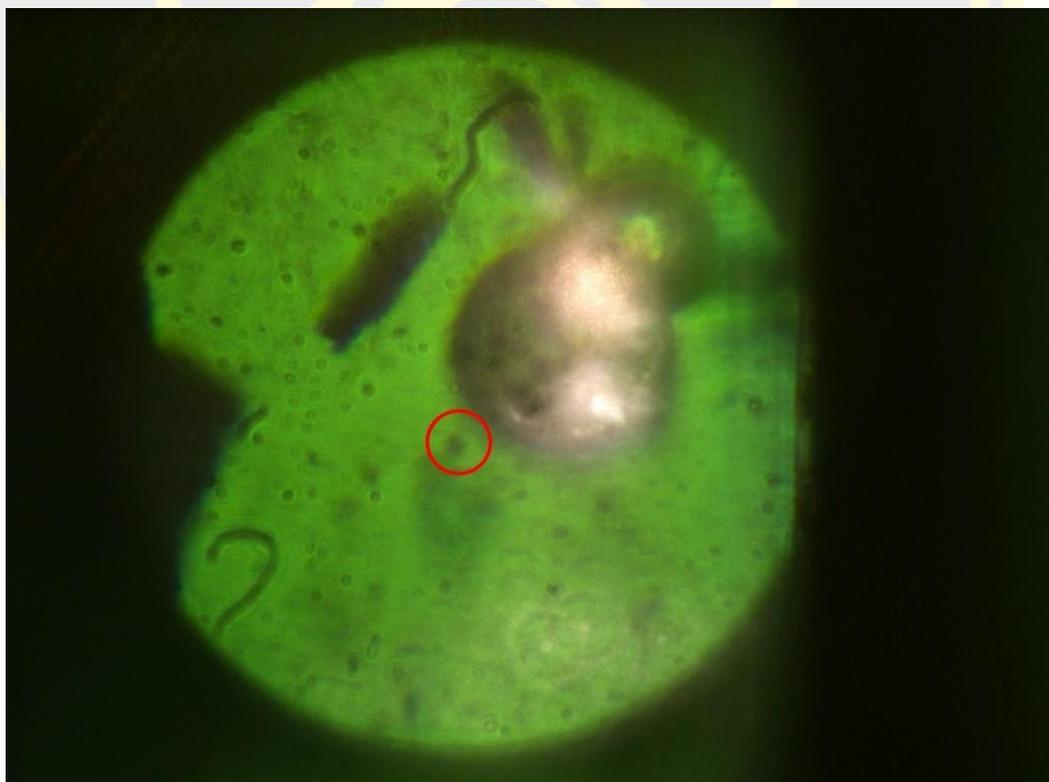
ภาพที่ 37 ตัวอย่าง dye molecules ขนาด  $2 \mu\text{m}$  (วงกลมสีแดง) เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศที่  
ลำแสงเลเซอร์มีลักษณะเป็นลำแสงวอร์เท็กซ์  $l = +1$



ภาพที่ 38 ตัวอย่าง dye molecules ที่มีขนาดมากกว่า  $2 \mu\text{m}$  เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศ

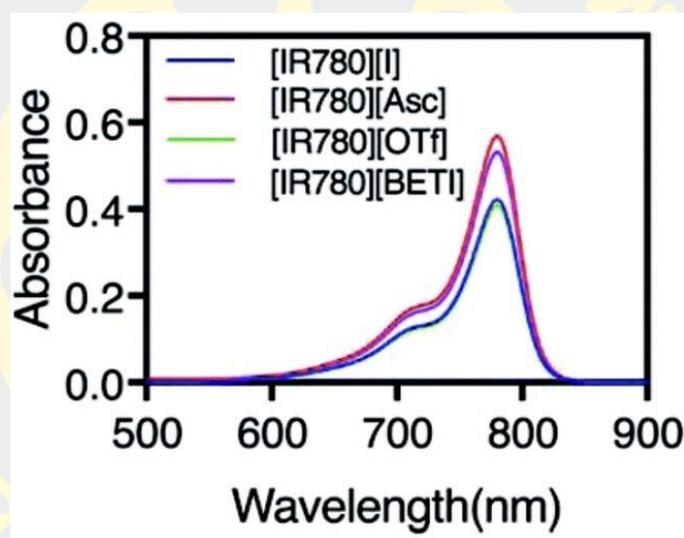


ภาพที่ 39 ตัวอย่าง dye molecules ขนาดประมาณ 2  $\mu\text{m}$  ที่เคลื่อนที่เข้าหาและหยุดนิ่งใน  
ฟองอากาศ เมื่อลำแสงวอร์เท็กซ์กระทบกับตัวอย่างจะเห็นได้ว่าแสงเรืองแสงสว่างขึ้น



ภาพที่ 40 ภาพการทดลองที่ตัวอย่าง dye molecules ขนาด  $2 \mu\text{m}$  ที่เคลื่อนที่เข้าหาฟองอากาศ

ซึ่งการใช้โมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye กับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 nm ด้วยกันได้นั้น เนื่องจากการดูดกลืนแสง (absorption) และการเรืองแสง (fluorescence emission) ของโมเลกุลฟลูออเรสเซนต์นั้นไม่ได้จำกัดอยู่เพียงความยาวคลื่นเดียว แต่สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่าเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเรืองแสงของโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งพลังงานของโฟตอนจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 nm ก็เพียงพอที่จะกระตุ้นโมเลกุลฟลูออเรสเซนต์ที่มีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 780 nm ให้เกิดการเรืองแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 41 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 500-900 nm ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นโมเลกุล [IR780][I] เส้นสีน้ำเงินเข้ม (ดัดแปลงจาก [39])

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการออกแบบและสร้างระบบฟองอากาศเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์มารานโกนีโดยใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร และใช้โมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye เป็นตัวอย่างในงานวิจัยและใช้ในการระบุตำแหน่งโฟกัสของแสงเลเซอร์บนตัวอย่าง เพื่อดักจับโมเลกุลของ 780 nm fluorescence dye จากการทดลอง เนื่องจาก fluorescence dye สามารถดูดกลืนแสงเลเซอร์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดี ทำให้แผ่น fluorescence dye เกิดการแตกตัวและเกิดฟองอากาศได้ ผลของการกระจายตัวของความร้อนและการเกิดฟองอากาศทำให้เกิดการไหลเวียนของอนุภาคและของไหลไหลเวียนมายังบริเวณที่ฉายเลเซอร์ ในกรณีทีลำแสงเลเซอร์เป็นแสงเกาส์เซียน พบว่าการดักจับตัวอย่างจะเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองอากาศจาก dye molecules เมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าใกล้ฟองอากาศที่เกิดจากพลังงานความร้อนของเลเซอร์ ตัวอย่างขนาดเล็กจะถูกดึงดูดให้เข้ามาในฟองอากาศด้วยกำลังของเลเซอร์ 31.14 mW และในกรณีทีลำแสงเลเซอร์เป็นแสงวอร์เท็กซ์ พบว่าตัวอย่างจะถูกดึงเข้ามาในฟองอากาศและดึงเข้าหาจุดโฟกัสของเลเซอร์ได้เร็วกว่า อีกทั้งยังใช้กำลังของเลเซอร์เพียงแค่ 22.86 mW ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการใช้วอร์เท็กซ์ของแสงโดยการเพิ่มแผ่นวอร์เท็กซ์ฮาล์ฟเวฟริทาร์เตอร์ (VHWR) ในอุปกรณ์การทดลองเหมาะสมกว่า ทั้งในเรื่องของการดักจับตัวอย่างและการใช้กำลังของเลเซอร์ที่น้อยกว่า อันเนื่องมาจาก แสงวอร์เท็กซ์สามารถทะลุทะลวงผ่านตัวกลางแสง ถูกดูดกลืนโดย dye molecules ได้ดีกว่าแสงแบบเกาส์เซียนทั่วไป จึงทำให้เกิดความร้อนและฟองอากาศได้ง่ายกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดแยกสเปิร์มเพศผู้และเพศเมียในอุตสาหกรรมปศุสัตว์ต่างๆ รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์และการแพทย์ได้อีกด้วย

## บรรณานุกรม

1. Prize, T.N. *The Nobel Prize in Physics 2018*. 2018; Available from: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>.
2. Auka, N., et al., *Optical tweezers as an effective tool for spermatozoa isolation from mixed forensic samples*. PLoS ONE, 2019. **14**(2).
3. Ashkin, A. and J.M. Dziedzic, *Internal cell manipulation using infrared laser traps*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1989. **86**: p. 7914-7918.
4. Dr., S.J., et al., *Mechanical Properties of Single Motor Molecules Studied by Three-Dimensional Thermal Force Probing in Optical Tweezers*. Chemistry Europe, 2004. **5**(8): p. 1150-1158.
5. Gao, H., et al., *Rotation Dynamics of Yeast Cell in Vortex Optical Tweezers*. Chinese Journal of Lasers, 2011. **38**(4).
6. Bustamante, C.J., et al., *Optical tweezers in single-molecule biophysics*. Nature Reviews Methods Primers, 2021. **25**.
7. Bayat, J., et al., *Gear-like rotatable optical trapping with radial carpet beams*. Scientific Reports, 2020. **10**.
8. Zhang, Y., et al., *Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond*. Light: Science & Applications, 2021. **10**.
9. Righini, M., et al., *Parallel and selective trapping in a patterned plasmonic landscape*. Nature Physics, 2007. **3**: p. 477-480.
10. Berthelot, J., et al., *Three-dimensional manipulation with scanning near-field optical nanotweezers*. Nature Nanotechnology, 2014. **9**: p. 295-299.
11. Chen, K.-Y., et al., *Transport and Trapping in Two-Dimensional Nanoscale Plasmonic Optical Lattice*. Nano Letters, 2013. **13**(9): p. 4118-4122.
12. Xu, Z., W. Song, and K. Crozier, *Direct Particle Tracking Observation and Brownian Dynamics Simulations of a Single Nanoparticle Optically Trapped by a Plasmonic Nanoaperture*. ACS Photonics, 2018.
13. Tsai, W.-Y., J.-S. Huang, and C.-B. Huang, *Selective Trapping or Rotation of*

- Isotropic Dielectric Microparticles by Optical Near Field in a Plasmonic Archimedes Spiral.* Nano Letters, 2014. **14**(2): p. 547-552.
14. Deachapunya, S., S. Srisuphaphon, and S. Buathong, *Production of orbital angular momentum states of optical vortex beams using a vortex half-wave retarder with double-pass configuration.* Scientific Reports, 2022. **12**.
  15. Liu, C., *Vortex beam and its applications in optical tweezers.* Journal of Physics: Conference Series, 2020. **1549**.
  16. Shen, Y., et al., *Optical vortices 30 year on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities.* Light: Science & Applications, 2019. **8**.
  17. Wang, X., et al., *Recent advances on optical vortex generation.* Nanophotonics, 2018.
  18. Schut, T.C.B., et al., *Experimental and Theoretical Investigations on the Validity of the Geometrical Optics Model for Calculating the Stability of Optical Traps.* Cytometry, 1991. **12**(6): p. 479-485.
  19. Shakhov, A.M., et al., *Femtosecond Optical Trap-Assisted Nanopatterning through Microspheres by a Single Ti:Sapphire Oscillator.* The Journal of Physical Chemistry C, 2015. **119**(22): p. 12562-12571.
  20. Bechhoefer, J. and S. Wilson, *Faster, cheaper, safer optical tweezers for the undergraduate laboratory.* Am. J. Phys., 2002. **70**: p. 393-400.
  21. Wang, X., et al., *Enhanced cell sorting and manipulation with combined optical tweezer and microfluidic chip technologies.* Lab on a Chip, 2011. **11**(21): p. 3656-3662.
  22. Huft, P., et al., *A simple, passive design for large optical trap arrays for single atoms.* Phys. Rev. A, 2022. **105**.
  23. Zhou, X., et al., *Experimental investigation on optical vortex tweezers for microbubble trapping.* Open Physics, 2018. **16**: p. 383-386.
  24. Shvedov, V.G., et al., *Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air.* Applied Physics A, 2010. **100**: p. 327-331.
  25. DAEnotes. *Ruby Laser.* Available from: <https://shorturl.asia/rvQZo>.
  26. Shan, C., *Natural and Controlled Source Magnetotelluric Data Processing and Modeling.* Physics, Geology, 2014.

27. Ellingson, S.W. *9.6: Wave Polarization*. Available from: <https://shorturl.asia/Lpmo2>.
28. Tsagkaropoulos, A. *Elliptical Polarization*. Available from: <https://tikz.net/elliptical-polarization/>.
29. Encyclopedia, W.T.F. *Optical vortex*. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_vortex](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_vortex).
30. Srisuphaphon, S., S. Buathong, and S. Deachapunya, *Simple technique for producing a 1D periodic intensity profile with a desired open fraction for optical sensor applications*. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020. **37**(7): p. 2021-2025.
31. Plick, W.N. and M. Krenn, *Physical meaning of the radial index of Laguerre-Gauss beams*. *PHYSICAL REVIEW A*, 2015. **92**: p. 063841.
32. Christopher, B. *Tears of Wine and the Marangoni Effect*. 2015; Available from: <https://shorturl.asia/WYz3R>.
33. Zhao, C., et al., *Theory and experiment on particle trapping and manipulation via optothermally generated bubbles*. *Lab on a Chip*, 2014. **14**(2): p. 384-391.
34. Zhang, K., et al., *Laser-induced thermal bubbles for microfluidic applications*. *Lab on a Chip*, 2011. **11**(7): p. 1389-1395.
35. Li, B.-W., M.-C. Zhong, and F. Ji, *Laser Induced Aggregation of Light Absorbing Particles by Marangoni Convection*. *Appl. Sci.*, 2020. **10**(21): p. 7795.
36. Miniewicz, A., et al., *Marangoni effect visualized in twodimensions Optical tweezers for gas bubbles*. *Scientific Reports*, 2016. **6**.
37. Jones, P.H., O.M. Maragò, and G. Volpe, *Optical Tweezers*. 2015, Cambridge University Press. p. 188-218.
38. Discovery, T. *Portable Optical Tweezers Kit*. 2016; Available from: <https://shorturl.asia/DNSUT>.
39. Chen, M., et al., *Mitochondria targeting IR780-based nanoGUMBOS for enhanced selective toxicity towards cancer cells*. *RSC Advances*, 2018. **8**(55): p. 31700–31709.





## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวธมนวรรณ อ่องรุ่งเรือง  
วัน เดือน ปี เกิด 5 มิถุนายน 2543  
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร  
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 641/65 ม.10 ต.หนองกี่ อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี 25110  
ประวัติการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

