



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมความเป็นไครอลของโครงสร้างท่อนาโนลิปิด ทดสอบโดยคุณสมบัติ
เซอร์คิวลาร์ไดโครอิสซึม

Chirality Control on Lipid Nanotubule Morphology Investigated by Circular Dichroism

นามผู้วิจัย นางสาวยุริดา จันทร์ทิพนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยัมรัฐพร นิตระแกม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Arg.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมความเป็นไครอลของโครงสร้างท่อนาโนลิปิด ทดสอบ
โดยคุณสมบัติเซอรัคูลาร์ไดโครอิคซึม

Chirality Control on Lipid Nanotubule Morphology Investigated
by Circular Dichroism

โดย

นางสาวยูวธิดา จันทร์ทิพนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยุวธิดา จันทร์ทิพนา 2553: การควบคุมความเป็นไครอลของโครงสร้างท่อนานโนลิปิด
ทดสอบโดยคุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ณัฐพร นัทรแถม,
Ph.D. 73 หน้า

การขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกของ 1,2-bis(tricosyl-10,12-diynoyl)-sn-glycero-3-phosphocholine ($DC_{29}PC$) ที่เกิดการขึ้นรูปภายใต้การลดอุณหภูมิแบบควบคุม โดยนำลิปิด $DC_{29}PC$ ทำละลายในสารละลายที่มีส่วนผสมระหว่างเอทานอล:น้ำ [75:25 (v:v)] และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ลิปิดละลาย จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิต้อง โดยการควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิ แผ่นลักษณะคล้ายริบบิ้นของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิดสามารถขึ้นรูปด้วยตัวเองกลายเป็น โครงสร้างเกลียวบิดแน่นเป็นท่อลิปิดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงในระหว่างขั้นตอนการลดอุณหภูมิ

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความยาวเกลียวของท่อจะขึ้นอยู่กับอัตราการลดอุณหภูมิ โดยความยาวเกลียวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาลดลง ผู้วิจัยรายงานผลการทดลองจากการวัดการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมที่ตั้งฉากกัน โดยให้ตกกระทบบนท่อนานโนลิปิดที่มีความยาวเกลียวต่างกัน ในการทดลองใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 nm , 633 nm และ 810 nm จากการศึกษาเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม แสดงให้เห็นว่าความเป็นไครอลของท่อลิปิดสามารถดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมที่หมุนแสงด้านหนึ่งได้มากกว่าอีกด้านหนึ่ง และพบว่าการดูดกลืนนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของระยะเกลียวของท่อลิปิด ดังนั้นความเป็นไครอลของท่อลิปิดสามารถปรับปรุงได้ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิแบบควบคุมในระหว่างที่ท่อลิปิดขึ้นรูปด้วยตัวเอง

Yuwathida Jantippana 2010: Chirality Control on Lipid Nanotubule Morphology
Investigated by Circular Dichroism. Master of Science (Physics), Major Field: Physics,
Department of Physics. Thesis Advisor: Miss.Nattaporn Chattham, Ph.D. 73 pages.

Self-assembled cylindrical tubules of chiral 1,2-bis(tricosano-10,12-dioyl)-*sn*-glycero-3-phosphocholine (DC_{8,9}PC) formed under controlled cooling process. A mixture of DC_{8,9}PC in ethanol : water [75:25 (v:v)], was heated to 60 °C to dissolve the lipid, and then was allowed to cool to room temperature with controlled cooling rate. Ribbons of lipid bilayers self assembled into tight helical structure forming hollow cylindrical nanotubules during the cooling process.

Images from Atomic Force Microscopy (AFM) revealed strong dependence of helical pitches on cooling rates. The helical pitches increase with decreasing cooling rate. We report experimental measurement on absorption of two orthogonal circularly polarized light by chiral lipid nanotubules of different helical pitches. The optical experiment is carried out with 532 nm, 633 nm and 810 nm lasers. The preference of absorption of one handedness of circularly polarized light is revealed through circular dichroism study along with an evidence of absorption strength increasing with the length of lipid tubule helical pitches. Thus, other than molecular chirality, chirality of lipid tubules can be enhanced through controlled cooling process during the lipid tubule formation.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. ฉัฐพร ฉัตรแถม ประธานกรรมการที่ปรึกษาซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เชิงกา ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอขอบพระคุณดร.วิศิษฐ์ สิงห์สมโรจน์ และอาจารย์สุจินต์ ว่างสุข อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่น้อง ญาติๆ ทุกคน สำหรับความเชื่อมั่น และดูแลให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายจักรกฤษณ์ พัดปุย นางสาวจริณี เกียงเอีย และนายวีรวัฒน์ อินทรทัต สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือ ในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นน้องทุกคน ทั้งที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และมหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับคำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอมา

บุวธิดา จันท์ทิพนา

ตุลาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
วิธีการวิเคราะห์	30
ผลการทดลองและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
สรุป	46
ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	47
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก กิ่งจุกุทธรศน์แรงอะตอม	51
ภาคผนวก ข กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม	57
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	73

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมท่อนานอลิปีด	25
2	อัตราส่วนการลดอุณหภูมิต่อเวลา	30
3	แสดงค่ามุมเกลียวของท่อนานอลิปีดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตราต่าง ๆ	42
4	ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์	43
5	Molar ellipticity ในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์	44

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงโครงสร้างของฟอสโฟลิปิด	8
2 แสดงโครงสร้างชั้นคู่ของฟอสโฟลิปิด	9
3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ DC8,9PC	9
4 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนลิปิด	10
5 แสดงลักษณะของท่อนาโนลิปิด	10
6 แสดงแบบจำลองท่อทรงกระบอก	12
7 แสดงค่าคงที่สำหรับการเบี่ยงเบนของ โมเลกุลแบบกระจาย การหมุน การเอียง	13
8 แสดงทิศทางของแถบที่เกิดขึ้น (ก) เมื่อ $qr \gg 1$ และ (ข) เมื่อ $qr \ll 1$	15
9 แสดงเกลียวที่เกิดขึ้น (ก) คือเกลียววนซ้าย และ(ข)เกลียววนขวา	16
10 แสดงการเปลี่ยนธาตุในโครงสร้างฟอสโฟลิปิดจาก C-O-P เป็น C-C-P	17
11 แสดง (ก) แสงโพลาไรซ์ (ข) แสงไม่โพลาไรซ์	17
12 แสดงแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น	19
13 แสดงแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมแบบทางซ้ายและทางขวา	20
14 แสดงความเป็นไครอลของโมเลกุล ที่มีลักษณะเหมือนกัน แต่ไม่สามารถซ้อนทับกัน ได้ เช่นเดียวกับมือซ้ายและมือขวา	21
15 แสดงลักษณะการเกิด CD	22
16 แนวโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่าน quarter-wave plate	24
17 เครื่องซั่งอย่างละเอียด	26
18 ไมโครปีเปต	26
19 เครื่องฉายรังสี UV	26
20 แสดง (ก) กล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ (ข) ภาพถ่ายของท่อนาโนลิปิดที่ บันทึกได้จากกล้องจุลทรรศน์	27
21 แสดงกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	28
22 แสดงภาพเครื่องตรวจนับโฟตอนที่ใช้ในการทดลอง (ก) แสดงภาพเครื่องตรวจนับโฟ ตอนทางด้านข้าง (ข) แสดงภาพด้านหน้า	29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมท่อนาโนลิปิด	31
24	แสดงการเตรียมเซลล์ (ก) ลักษณะการติดแก้วสองหน้า (ข) เซลล์ที่เตรียมได้ (ค) เซลล์ที่ใส่ท่อนาโนลิปิดและปิดผนึกเซลล์ทั้ง 4 ด้าน	32
25	แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยคุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม	33
26	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยคุณสมบัติ เซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม	34
27	แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองการวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด	34
28	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 10°C/hr	36
29	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 4.8°C/hr	37
30	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.8°C/hr	37
31	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.2°C/hr	38
32	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 0.6°C/hr	38
33	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 10°C/hr จากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม	39
34	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 4.8°C/hr จากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม	40
35	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.8°C/hr จากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม	40
36	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.2°C/hr จากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม	41
37	แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 0.6°C/hr จากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเกลียวของท่อนา โนลิปิดกับส่วนกลับของอัตรา การลดอุณหภูมิแบบควบคุม	42
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของการดูดกลืนแสงโพลาริซวงกลม กับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม	44
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง molar ellipticity กับส่วนกลับของอัตราการลด อุณหภูมิแบบควบคุม	45
ภาพผนวกที่	
ก1 แสดง (ก) เครื่อง AFM เครื่องแรกของโลก (ข) หลักการทำงานของเครื่อง AFM	52
ก2 แสดง (ก) คานกระเดื่องที่มีเข็มติดอยู่ด้านล่าง (ข) แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคาน กระเดื่อง (ค) เข็มที่กวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง	53
ก3 แสดง (ก) ภาพของเข็มที่ติดอยู่บนสปริง (ข) ภาพของหลอดสแกนภาพ	55
ก4 ระบบควบคุมของ AFM เป็นระบบแบบย้อนกลับ	55
ก5 แสดง (ก) เข็มจะเคลื่อนที่ขึ้นและลง เครื่องตัวจับ โฟตอนจึงวัดอยู่เพียง 2 แกน (ข) เป็น AFM แบบพิเศษ เครื่องตัวจับโฟตอนจะต้องวัดได้ถึง 3 แกน คือ x, y และ z	56
ก6 ภาพขนาด 2.5mm x 2.5 mm สร้างขึ้นจากคอมพิวเตอร์กราฟิก เป็นภาพของอะตอมกรา ไฟต์ แสดงภาพสี แบบ 3 มิติ รอยเว้าในภาพแสดงรูปร่างของอะตอม	56
ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr	59
ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr	59
ข3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr	60
ข4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr	60
ข5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 0.6 °C/hr	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 532 nm	61
ข7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 532 nm	62
ข8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr	64
ข9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr	64
ข10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr	65
ข11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr	65
ข12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 0.6 °C/hr	66
ข13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm	66
ข14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm	67
ข15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr	69
ข16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr	69
ข17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr	70
ข18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr	70
ข19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 0.6 °C/hr	71
ข20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm	71
ข21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาริซ์วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm	72

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

AFM	= กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy)
M	= จำนวน โมล
TEM	= กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

คำอธิบายอักษรย่อ

CD	= Circular Dichroism
DC _{8,9} PC	= 1,2-bis(tricosano-10,12-dinoyl)- <i>sn</i> -glycero-3-phosphocholine
DNPC	= 1,2-bis(dinonoyl)- <i>sn</i> -glycero-3-phosphocholine

การควบคุมความเป็นไครอลของโครงสร้างท่อนาโนลิปิด ทดสอบโดยคุณสมบัติ

เซอร์คูลาร์ไดโครอิซึม

**Chirality Control on Lipid Nanotubule Morphology Investigated by
Circular Dichroism**

คำนำ

ในปัจจุบันท่อนาโนลิปิด (lipid nanotubes) เป็นวัสดุที่เริ่มได้รับความสนใจในสาขา นาโนเทคโนโลยี เนื่องจากสามารถขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร และสามารถควบคุมความยาวของท่อลิปิดให้มีความยาวตามที่ ต้องการได้ โดยท่อลิปิดที่ได้จะมีลักษณะที่น่าสนใจหลายประการ เช่น การที่ท่อมีลักษณะเป็นท่อ ทรงกระบอกกลวงทำให้เกิดโพลิเมอร์ไรซ์ได้ง่าย สามารถจัดเรียงโมเลกุลในสนามแม่เหล็กและ สนามไฟฟ้าได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวอาจจะเพิ่มประสิทธิภาพทางกลศาสตร์ไฟฟ้า และปรับปรุง คุณสมบัติทางแสงได้ โดยท่อนาโนลิปิดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เกี่ยวกับการ บรรจุสารเพื่อนำไปใช้ในร่างกาย หรือในทางอุตสาหกรรมสามารถใช้ในการกรองสารที่มีขนาด เล็กๆได้ เป็นต้น

การสังเคราะห์ท่อนาโนลิปิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำละลายลิปิดในแอลกอฮอล์ การทำละลายลิปิดในแอลกอฮอล์ผสมกับน้ำ การทำให้เป็นฟิล์มบางลิปิด เป็นต้น และมีสารลิปิด หลายตัวที่สามารถขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อลิปิดได้ ซึ่งลิปิดแต่ละตัวมีการขึ้นรูปเป็นท่อลิปิดได้ไม่ เหมือนกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสังเคราะห์ เช่นท่อทรงกระบอกกลวง เกลียวแบบริบบิ้น หรือ เวสิเคิล (vesicle) เป็นต้น ซึ่งท่อลิปิดที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับ ไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร และความยาวท่อนาโนลิปิดสามารถกำหนดได้ โดยลิปิดที่ ได้รับความนิยมนำมาสังเคราะห์ท่อลิปิดคือ 1,2-bis(tricosyl-10,12-diynoyl)-sn-glycero-3- phosphocholine (DC₈,PC) และทำละลายลิปิดในแอลกอฮอล์ผสมกับน้ำ ซึ่งจะขึ้นรูปด้วยตัวเอง เป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่เกิดจากการพันเป็นเกลียวของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิด เนื่องมาจากความเป็น ไครอลของโมเลกุล

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนานาโนลิปิด โดยใช้ลิปิด DC_{8,9}PC ทำละลายในแอลกอฮอล์ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นผสมให้เข้ากัน แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นลดอุณหภูมิถึงอุณหภูมิห้อง โดยลดอุณหภูมิแบบควบคุม ซึ่งกำหนดให้แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 10 °C/hr, 4.8 °C/hr, 1.8 °C/hr, 1.2 °C/hr และ 0.6 °C/hr ตามลำดับ จากนั้นนำท่อนานาโนลิปิดที่ได้จากการสังเคราะห์มาศึกษาโครงสร้างภายนอกโดยกล้องจุลทรรศน์ ศึกษาลักษณะทางกายภาพของท่อนานาโนลิปิดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และศึกษาความเป็นไครอลของท่อนานาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเซอร์คูลาไรโคโรอิสซึม



วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนลิปิด โดยการลดอุณหภูมิแบบควบคุมด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างภายนอกของท่อนาโนลิปิด โดยกล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ
3. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพท่อนาโนลิปิด โดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope ; AFM)
4. เพื่อประยุกต์การทดลองทางทัศนศาสตร์ในการศึกษาความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเชอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนลิปิด ที่มีการลดอุณหภูมิแบบควบคุม โดยใช้ลิปิด DC₈,PC ทำละลายในแอลกอฮอล์ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 ผสมให้เข้ากัน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแบบควบคุมจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยกำหนดให้มีอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุมแตกต่างกัน 5 อัตราคือ 10 °C/hr, 4.8 °C/hr, 1.8 °C/hr, 1.2 °C/hr และ 0.6 °C/hr จากนั้นนำท่อนาโนลิปิดที่ได้จากการสังเคราะห์ในแต่ละอัตรา มาศึกษาโครงสร้างของท่อนาโนลิปิดโดยกล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ ศึกษาลักษณะทางกายภาพท่อนาโนลิปิด และวัดมุมเกลียวของท่อนาโนลิปิดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ศึกษาความเป็นไครอลของโครงสร้างท่อนาโนลิปิดโดยใช้คุณสมบัติเชอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นต่างกันคือ 532 nm, 633 nm และ 810 nm

การตรวจเอกสาร

Chappell and Yager (1991) ได้ทำการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้ในการเกิดเกลียวและท่อนานโนลิปิด พบว่าทฤษฎีที่ใช้อธิบายการบรรจุ (packing) โมเลกุลของลิปิดจะเหมือนกับคอเลสเตอรอลของผลึกเหลว ซึ่งเกิดการโค้งงอกลายเป็นท่อทรงกระบอกเนื่องจากความเป็นไครอลของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิด

Selinger and Schnur (1993) ได้เสนอทฤษฎีการขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกจากความไม่เป็นไครอลของชั้นคู่ลิปิด ซึ่งทำให้โมเลกุลเอียง โดยทฤษฎีนี้แสดงให้เห็นว่าการเกิดท่อลิปิดจะเกิดจากแรงภายในเนื่องจากการโค้งงอของโมเลกุลไครอล และทฤษฎีนี้ยังสามารถบอกทิศทางการเอียงว่าเกิดจากรีวของเกลียวบนท่อ

Thomas et al. (1995) ได้ทดลองทำละลาย DC₈₉PC ในเอทานอล:น้ำ ที่มีความเข้มข้น 1 mg/ml แล้วให้ความร้อนที่ 55 °C จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง พบว่าถ้าลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ลิปิดจะขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นทรงกลมกลวง (vesicle) ในขณะที่เมื่อลดอุณหภูมิอย่างช้าๆ ลิปิดจะขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกกลวง และถ้าใช้เวลาในการลดอุณหภูมินานมากๆ ท่อนานโนลิปิดจะมีความยาวเพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษานี้เป็นการค้นพบว่าอัตราการลดอุณหภูมิมิมีผลต่อความยาวของท่อนานโนลิปิด

Spector et al. (1996) ได้ศึกษาโครงสร้างไครอลในท่อฟอสโฟลิปิดที่เกิดจากการละลายในสารผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำ และขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกที่มีลักษณะกลวงภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม จากการใช้คุณสมบัติเซอร์คิวลาร์ไดโครอิสซึม (circular dichroism ; CD) ซึ่งสามารถวัดการเกิดไครอลของโครงสร้างโมเลกุลได้โดยตรง พบว่าสเปกตราของเซอร์คิวลาร์ไดโครอิสซึมจากท่อลิปิดที่เกิดจากการผสมของแอลกอฮอล์และน้ำ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ และความเข้มข้นของลิปิด โดยความเข้มของสเปกตราที่เกิดจากความแตกต่างของเซอร์คิวลาร์ไดโครอิสซึม จะสัมพันธ์กับจำนวนของชั้นคู่ของลิปิด เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าการเกิดท่อมีพื้นฐานจากความไม่เป็นไครอลเนื่องจากการจัดเรียงโมเลกุลของลิปิด และจากอันตรกิริยาภายในชั้นคู่ของลิปิด ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างท่อ

Komura and Zhong-can (1997) ได้เสนอว่าการบรรจุโมเลกุลชั้นคู่ ลิพิดให้กลายเป็นเกลียวแบบริบบิ้น เกิดจากโมเลกุลไครอลที่มีการเอียง จากการศึกษาในผลึกเหลว ชนิดคอเลสเทอรอล พบว่ามีเกลียวเกิดขึ้นสองชนิด คือ มุมพิท (pitch) สูง และ มุมพิท (pitch) ต่ำ ซึ่งสัมพันธ์กับการบรรจุโมเลกุลในแนวขนานและตั้งฉากของโมเลกุลที่ขอบของริบบิ้น

Spector et al. (1998) ได้ทดลองควบคุมความยาวและความหนาของผนังท่อนลิพิด พบว่ามีหลายวิธีที่สามารถทำได้ เช่นการเปลี่ยนตัวทำละลาย โดยพบว่าการทำละลายลิพิดในตัวทำละลายแอลกอฮอล์กับน้ำ จะได้ท่อนานโนลิพิดที่มีความยาวมากและมีการแตกหักเสียหายน้อยกว่าการทำละลายลิพิดในน้ำเพียงอย่างเดียว และความยาวกับความหนาของท่อนานโนลิพิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ด้วย เช่น ถ้าท่อนานโนลิพิดได้จากการทำละลายใน เมทานอล/น้ำ จะได้ ท่อนานโนลิพิดที่มีความยาวมากและมีความหนาของโมเลกุลชั้นคู่ลิพิดเป็นแบบเดี่ยว (single-bilayer) ในขณะที่ท่อนานโนลิพิดจากการทำละลายในเอทานอล/น้ำ จะได้ท่อนานโนลิพิดที่มีความยาวมากเช่นเดียวกัน แต่ความหนาของโมเลกุลชั้นคู่ลิพิดจะเป็นแบบหลายชั้น (multi-bilayer) การเปลี่ยนความเข้มข้นของลิพิดพบว่าความยาวและความหนาของท่อจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของลิพิด กล่าวคือ ความเข้มข้นต่ำจะได้ผนังท่อเป็นแบบเดี่ยวในขณะที่ความเข้มข้นสูงจะได้ผนังท่อเป็นแบบหลายชั้น และการควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิ พบว่าถ้ามีการลดอุณหภูมิช้าลง จะได้ท่อที่มีความยาวโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าความหนาของท่อที่ดีที่สุดคือ 2 ชั้นคู่

Svenson and Messersmith (1999) ได้ทดลองผสมลิพิด $DC_{8,9}PC$ และ $DNPC$ ในจำนวนโมลที่เท่ากัน คือ 12 mM พบว่าลิพิดจะขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่มีความยาวท่อโดยเฉลี่ย 100 μm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโดยเฉลี่ย 50-60 nm ซึ่งมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ลิพิด $DC_{8,9}PC$ บริสุทธิ์ โดยพบว่าท่อนานโนลิพิดจะเกิดขึ้นหลังจากการสังเคราะห์ลิพิดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องหลายชั่วโมง ซึ่งท่อนานโนลิพิดที่ได้จะแขวนลอยอยู่และหากวางท่อนานโนลิพิดทิ้งไว้ต่อไปเรื่อยๆ ท่อลิพิดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจนกลายเป็นเจล ซึ่งเกิดจากการที่ท่อนานโนลิพิดมีการคลายเกลียวกลายเป็นเกลียวแบบริบบิ้น (helical ribbon) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงท่อนานโนลิพิดเป็นเกลียวริบบิ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของลิพิด กล่าวคือที่ความเข้มข้นลิพิดสูงๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วกว่าที่ความเข้มข้นลิพิดต่ำๆ แต่พบว่าสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงท่อนานโนลิพิดเป็นเกลียวแบบริบบิ้นได้โดยการเก็บท่อนานโนลิพิดที่อุณหภูมิ 4 °C โดยโมเลกุลลิพิดทั้ง 2 แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการผสม $DC_{8,9}PC$ กับ $DNPC$ ในอัตราส่วน 1:1 เท่านั้น

Selinger et al. (2001) ได้ศึกษาแอมฟิฟิลิก พบว่ามีแอมฟิฟิลิกอยู่หลายชนิดที่โมเลกุลสามารถขึ้นรูปด้วยตัวเองในสารละลาย กลายเป็นท่อทรงกระบอกและเกลียวรีบบิ้น เช่น ไดอะเซทิลิน ลิปิด น้ำดี เป็นต้น โดยเขาได้นำเสนอโมเดลมาอธิบายเกี่ยวกับการเกิดความโค้งสูง โมเดลนี้สามารถแยกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ กล่าวคือประเภทแรก โมเดลจะมีพื้นฐานบนคุณสมบัติการยืดหยุ่น และความเป็นไครอลของเมมเบรน และประเภทที่สอง โมเดลจะสร้างเนื่องจากผลกระทบอื่นๆ ซึ่งจะรวมถึงอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตย์ และ ความยืดหยุ่นของการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความโค้งด้วยตัวเอง

Spector et al. (2001) ได้ผสมลิปิดที่มีความยาวของโซ่อัลคิลแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ โซ่อัลคิลยาว คือ 1,2-bis(tricosyl)-sn-glycero-3-phosphocholine ($DC_{8,9}PC$) และ โซ่อัลคิลสั้นๆ คือ 1,2-bis(dinonyl)-sn-glycero-3-phosphocholine (DNPC) ในจำนวนโมลเท่ากัน โดยทำให้เป็นฟิล์มบางลิปิดจากการทำละลายลิปิดในคลอโรฟอร์ม และระเหยแห้ง จากนั้นเติมน้ำกลั่น ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ $60^{\circ}C$ จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิ $4^{\circ}C$ และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ อย่างน้อย 10 ชั่วโมง พบว่าลิปิดจะขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ที่มีลักษณะเป็นท่อสมบูรณ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร คือ ประมาณ 50 นาโนเมตร และความยาวจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสังเคราะห์ และบางส่วนจะเกิดลักษณะเป็นเกลียว (helical marking) ซึ่งจะไม่เกิดในการสังเคราะห์ลิปิด $DC_{8,9}PC$ บริสุทธิ์ โดยเกลียวนี้แสดงว่ามีความเป็นไครอลในชั้นคู่ลิปิด ทำให้เกิดการบิดตัวนำไปสู่การเกิดท่อนานาโนลิปิด จากการค้นพบนี้ทำให้เกิดการศึกษาการเตรียมท่อนานาโนลิปิดแบบใหม่ๆ ที่ได้จากการผสมกันของโมเลกุลลิปิด

Singh et al. (2002) ได้ทดลองเตรียมท่อนานาโนลิปิดจากการผสม $DC_{8,9}PC$ กับ DNPC ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 4:6, 4.5:5.5, 1:1, 5.5:4.5 และ 6:4 โดยการทำละลายลิปิดในคลอโรฟอร์ม และระเหยแห้งโดยใช้เตาอบสุญญากาศ ซึ่งจะได้ลักษณะเป็นฟิล์มลิปิด จากนั้นเติมน้ำกลั่น เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยเครื่องวอเท็กซ์ที่มีฮีทเตอร์ในตัว โดยคงอุณหภูมิที่ $60^{\circ}C$ นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงช้าๆ จนถึงอุณหภูมิต่ำ โดยใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จะได้ท่อนานาโนลิปิด และเก็บท่อนานาโนลิปิดที่ได้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ อย่างน้อย 10 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์โดยเซอร์คิวลาร์ไดโครอสมิซึม (circular dichroism ; CD) พบว่าการผสมลิปิดในจำนวนโมลที่เท่ากัน คือ 1:1 จะได้โครงสร้างท่อนานาโนลิปิดที่มีความเสถียรที่สุด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในเทคโนโลยีการควบคุมการปลดปล่อยยาได้

Singh et al. (2002) ได้ศึกษาการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไคอะเซทีลีนฟอสโฟลิปิด ในระดับนาโนเมตร โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง n ในโซ่อัลคิลของไคอะเซทีลีน ฟอสโฟลิปิดกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนลิปิด โดยทดลองเตรียม $DC_{m,n}PC$ กับ $DC_m PC$ โดย m คือ 8 และ n คือ 9 และ m' คือ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยทำละลายในคลอโรฟอร์ม จากนั้นระเหยแห้ง เติมน้ำกลั่นแล้วให้ความร้อน จากนั้นลดอุณหภูมิโดยเริ่มที่ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลานาน 3 ชั่วโมง พบว่า n ของไคอะเซทีลีน เข้าคู่กับ m จะมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนลิปิด โดยพบว่าความยาวของโซ่อัลคิลมีอิทธิพลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้อยกว่าความยาวของท่อ

Zhan-ning-hu and Lo (2004) ได้ศึกษาการเกิดไครอลของชั้นคู่ลิปิดในเฟสที่โมเลกุลเอียง (tilted phase) เมื่อกำหนดทิศทางของโมเลกุลที่เอียงให้ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของพิกัดทรงกระบอก พบว่าวิธีการแก้สมการที่ถูกต้องนั้นสัมพันธ์กับการกำหนดทิศทางของแกนโมเลกุลตามยาว ซึ่งสามารถอธิบายคุณสมบัติของท่อนาโนลิปิด ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนการเอียง เมื่อกำหนดให้ทิศทางของโมเลกุลนั้นไม่ขึ้นอยู่กับพิกัดทรงกระบอก θ , z และมีรูปแบบการเกิดท่อนาโนลิปิดจากโมเลกุลไครอลเป็นเกลียววนขวา และวนซ้าย โดยความโค้งและการบิดเป็นเกลียวจะสอดคล้องกับเส้นโค้งที่แน่นอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการม้วนของโมเลกุลรอบๆ แกนทรงกระบอกและพวกเขาังพบอีกว่า มุมระหว่างทิศทางโมเลกุลกับทิศทางของแกนปกติของทรงกระบอกจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของทรงกระบอกลดลง เมื่อมุมการเอียง ϕ จากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอกไม่เปลี่ยนแปลง

Mahajan (2005) ได้ทดลองเตรียม $DC_{8,9}PC$ ในตัวทำละลายเอทานอล/น้ำ [70:30;v/v] ที่ความเข้มข้น 5 mg/ml แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และลดอุณหภูมิต่ำๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตรา $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/นาที่}$ จากนั้นวิเคราะห์ด้วย AFM พบว่าโครงสร้างของลิปิดจะขึ้นรูปด้วยตนเองเป็นเกลียว (twisted) เป็นเกลียวแบบริบบิ้น (helicecal ribbon) เป็นท่อทรงกระบอกปิด และความยาวพิท (pitch) ของริบบิ้นประมาณ $200 \pm 30\text{ nm}$ และท่อจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง $200 - 650\text{ nm}$ โดยความหนาของริบบิ้นจะสัมพันธ์กับเส้นรอบวงของท่อนาโนลิปิด

ท่อนาโนลิปิด

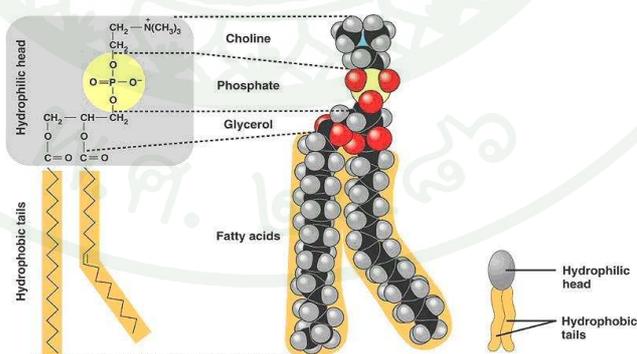
1. ความเป็นมาของท่อนาโนลิปิด

1.1 ลิปิด

ลิปิด หรือ ไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายและสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ และเบนซิน โดยที่โครงสร้างมีความหลากหลายแต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมัน และกลีเซอรอล

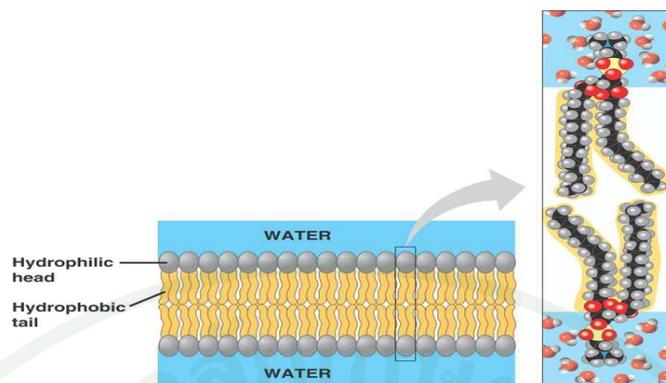
1.2 ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid)

ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) หรือฟอสโฟกลีเซอไรด์ (Phosphoglyceride) หรือกลีเซอโรฟอสโฟลิปิด (Glycerophospholipid) เป็นลิปิดชนิดหนึ่งที่เอสเตอร์อยู่ระหว่างกรดฟอสโฟริก (H_3PO_4) กับหมู่ไฮดรอกซิล โดยโมเลกุลของฟอสโฟลิปิดจะแบ่งเป็น 2 ส่วน แสดงดังภาพที่ 1 คือ ส่วนหัวของโมเลกุลซึ่งมีขั้ว (polar) จะดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำ และส่วนหางของโมเลกุลซึ่งไม่มีขั้ว (non-polar) จะหันส่วนหางเข้าหาหางของโมเลกุลฝั่งตรงข้ามประกอบกันเป็นชั้นคู่ (bilayer) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของฟอสโฟลิปิด

ที่มา: department of Chemistry and Biochemistry New Mexico State University (2006)

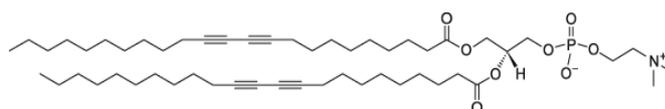


ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างชั้นคู่ของฟอสโฟลิปิด

ที่มา: department of Chemistry and Biochemistry New Mexico State University (2006)

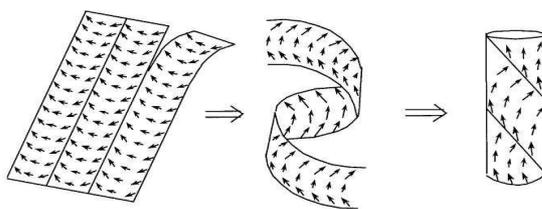
1.3 การค้นพบท่อนานิลิปิด

ท่อนานิลิปิดค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1984 โดย Yager และคณะจากการทดลองนำสารประกอบฟอสโฟลิปิด (phospholipid) ที่ชื่อว่า 1,2-bis(tricoso-10,12-diynoyl)-sn-glycerol-3-phosphocholine ($DC_{8,9}PC$) ซึ่งชื่อนี้มาจากการที่โมเลกุลลิปิดประกอบด้วยเมทิลีน (methylenes) 8 ตัวอยู่ระหว่างอีเทอร์และไดอะเซตทีลีน และมีเมทิลีน 9 ตัวอยู่ระหว่างไดอะเซตทีลีนและหมู่เมทิล (methyl groups) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 3 มาทำละลายในสารผสมระหว่างเอทานอล : น้ำในอัตราส่วน (7 : 3) แล้วพบว่าลิปิดจะขึ้นรูปด้วยตัวเองเป็นท่อทรงกระบอกกลวงดังภาพที่ 4 โดยท่อนิลิปิดที่ได้จะมีผนังหนาหลายชั้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.5 ไมโครเมตร และความยาวท่อเฉลี่ยประมาณ 50-200 ไมโครเมตร โดยขนาดและรูปร่างของท่อนิลิปิดที่ได้ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ จากการสังเคราะห์ เช่น ความเข้มข้นของลิปิด อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำ อัตราการลดอุณหภูมิ เป็นต้น



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ $DC_{8,9}PC$

ที่มา: Jonathan *et al.* (2001)

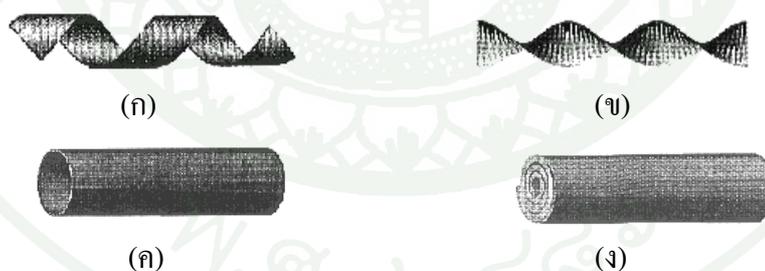


ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนลิปิด

ที่มา: Jonathan *et al.* (2001)

1.4 ท่อนาโนลิปิด

ท่อนาโนลิปิดจากการขึ้นรูปด้วยตัวเองมีหลายลักษณะ โดยที่พบส่วนใหญ่มี 4 แบบ ใหญ่ๆ ดังภาพที่ 5 โดยภาพที่ 5(ก) แสดงท่อนาโนลิปิดที่โมเลกุลชั้นคู่มีวนเป็นเกลียว (helix bilayers) 5(ข) แสดงท่อนาโนลิปิดที่โมเลกุลชั้นคู่บิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้น (twisted bilayer ribbon) 5(ค) แสดงท่อนาโนลิปิดที่ขึ้นรูปเป็นท่อทรงกระบอกกลวง (tubule hollow bilayer cylinder) ส่วนภาพที่ 5(ง) แสดงท่อนาโนลิปิดที่ขึ้นรูปเป็นท่อทรงกระบอกที่มีผนังหลายชั้น (cylinder formed by rolled-up bilayer)



ภาพที่ 5 แสดงลักษณะของท่อนาโนลิปิด

- (ก) โมเลกุลชั้นคู่มีวนเป็นเกลียว
- (ข) โมเลกุลชั้นคู่บิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้น
- (ค) ท่อนาโนลิปิดที่เป็นท่อทรงกระบอกกลวง
- (ง) ท่อนาโนลิปิดที่เป็นท่อทรงกระบอกที่มีผนังหลายชั้น

ที่มา: Jonathan *et al.* (2001)

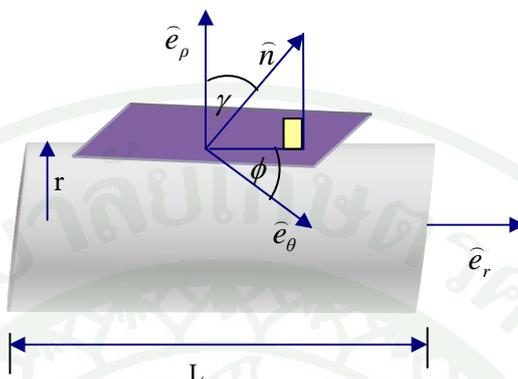
2. ทฤษฎี

การอธิบายการเกิดท่อนาโนลิปิดจากการขึ้นรูปด้วยตัวเองนี้มีผู้เสนอความคิดเห็นเพื่อนำไปสู่การใช้ทฤษฎีในการอธิบายไว้มากมาย โดยที่ได้รับการยอมรับมีอยู่ทั้งหมด 3 แนวคิด แนวคิดแรกเสนอโดยเดอจีแนส(de Gennes) กล่าวว่า การที่ชั้นลิปิดมีการโค้งงอขึ้นเป็นท่อนเกิดจากโพลาริเซชันที่มีอยู่ในตัวเอง แนวคิดที่สองเสนอโดยลูเบนสกี(Lubensky) และพรอสท์(Prost) ทั้งคู่ได้เขียนแผนภาพเฟสในรูปแบบทั่วไป ซึ่งนำไปใช้ในการทำนายการเกิดท่อทรงกระบอกได้ดี โดยพบว่าความยาวและรัศมีของท่อทรงกระบอกที่เกิดขึ้นมีผลมาจากพลังงานสองชนิดคือ พลังงานจากขอบ(edge energy) และพลังงานจากความโค้ง(curvature energy) และแนวคิดสุดท้ายโดยเฮลฟริช(Helfrich) และพรอสท์(Prost) เสนอว่าการโค้งงอเกิดเป็นทรงกระบอกเป็นผลมาจากแรงโค้งงอที่เกิดจากความไม่เป็นไอโรตของโมเลกุล มีผู้สนับสนุนแนวคิดดังกล่าวโดยการสร้างแบบจำลองการเกิดท่อด้วยผลึกเหลว(liquid crystal) ชนิดคอเลสเทอริก(chloresteric) รวมถึงมีผู้คิดคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากผลของอุณหภูมิ

หลังจากมีการเสนอแนวคิดไม่นานก็มีการทดลองเกิดขึ้นหลักๆ 3 การทดลอง ซึ่งผลที่ได้ขัดกับแนวคิดที่เสนอมานานอย่างแรกคือ มีการใส่สารอิเล็กโทรไลต์ลงไป พบว่าไม่มีผลต่อการขึ้นรูปหรือรัศมีของการเกิดท่อเลย ซึ่งหมายความว่าไม่น่าจะมีทฤษฎีทางไฟฟ้าสถิตมาเกี่ยวข้อง การทดลองที่สองพบว่ารัศมีและความยาวที่เกิดขึ้นนั้นไม่มีความสัมพันธ์กันทำให้ขัดแย้งกับที่เดอจีแนสทำนายว่า $r \propto L^{1/3}$ และลูเบนสกีและพรอสท์ทำนายว่า $r \propto L^{1/2}$ การทดลองสุดท้ายพบว่าจากการตรวจสอบเร็วของเกลียวที่กลายเป็นท่อด้วย TEM (Transmission Electron Micrograph) พบว่าโครงสร้างของท่อที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่สารเป็นไอโรตซึ่งก็ขัดกับแนวคิด 2 แนวคิดแรก ดังนั้นจึงมีผู้สรุปว่ามีเพียงทฤษฎีแรงโค้งงอจากความไม่เป็นไอโรตของโมเลกุลทฤษฎีเดียวที่สามารถอธิบายผลการทดลองทั้ง 3 ได้หมด

ผู้เสนอการใช้ทฤษฎีดังกล่าว คือ เซลิงเจอร์ (Selinger) และโชน (Schnur) โดยได้ทำการพิสูจน์ให้เห็นว่าความไม่เป็นไอโรตของโมเลกุลนั้นเหนี่ยวนำให้เกิดท่อได้อย่างไร โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทั่วไปดังภาพที่ 6 ให้ท่อมีรัศมี r และมีความยาว L ในพิกัดทรงกระบอก (ρ, θ, z) โดยตำแหน่งบนทรงกระบอกทุกจุดจะมีเวกเตอร์แสดงทิศทางของโมเลกุล(\hat{n}) ทำมุม (γ) กับเวกเตอร์ปกติ(\hat{e}_ρ) และเงาของ \hat{n} ลงบนระนาบจะทำมุม ϕ กับเวกเตอร์ \hat{e}_θ และสมมุติให้ γ มีค่า

เดียว แต่ให้ ϕ มีค่าขึ้นกับตำแหน่ง (การพิสูจน์จะมุ่งไปที่การเปลี่ยนแปลงค่ามุม ϕ เป็นหลัก โดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ)



ภาพที่ 6 แสดงแบบจำลองท่อทรงกระบอก

ที่มา: Jonathan and Schnur (2001)

พลังงานอิสระของท่อจะเกิดจากผลรวมของสามเทอมต่อไปนี้

2.1 พลังงานอิสระการโค้งงอ (the curvature free energy)

$$F_{curve} = \int d^2x \left[\frac{1}{2} \kappa \left(\frac{1}{r} \right)^2 \right] \quad (1)$$

โดย κ คือค่าความแข็งโค้งงอ (bending rigidity)

2.2 พลังงานอิสระการเอียง (the tilt free energy)

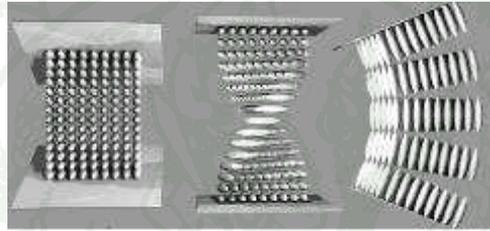
$$F_{tilt} = \int d^2x \left[-\frac{1}{2} a \gamma^2 + \frac{1}{4} b \gamma^4 \right] \quad (2)$$

โดยให้มุม γ มีค่าเป็น $\gamma = \sqrt{\frac{b}{a}}$

2.3 พลังงานอิสระแฟรงค์

$$F_{Frank} = \int d^2x \left[\frac{1}{2} K_1 |\nabla \cdot \hat{n}|^2 + \frac{1}{2} K_2 |\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n} - q|^2 + \frac{1}{2} K_3 |\hat{n} \times \nabla \times \hat{n}|^2 \right] \quad (3)$$

โดยค่า K_1, K_2, K_3 เป็นค่าคงที่สำหรับการเบี่ยงเบนแบบกระจาย (Splay) แบบเป็นเกลียว (Twist) และแบบการเอียง (Bend) ตามลำดับ (ดังภาพที่ 7) เพื่อให้สมการง่ายขึ้นสามารถประมาณค่า $K_1 = K_2 = K_3 \equiv K$ ส่วนตัวแปร q แสดงถึงความโค้งของโมเลกุล (q จะมีค่าเป็น 0 สำหรับโมเลกุลที่ไม่ใช่โครอล)



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 7 แสดงค่าคงที่สำหรับการเบี่ยงเบนของโมเลกุล (ก) กระจาย (ข) การหมุน (ค) การเอียง

ที่มา: Jonathan and Schnur (2001)

เมื่อรวมพลังงานอิสระทั้งหมดจะได้ว่า $F = F_{curve} + F_{tilt} + F_{Frank}$ เขียนในพิกัดทรงกระบอกได้เป็น

$$F = \int d^2x \left\{ \frac{\kappa}{2r^2} - \frac{a\gamma^2}{2} + \frac{b\gamma^4}{4} + \frac{K}{2r^2} \cos^2 \gamma + \frac{K}{2r^2} \sin^2 \gamma \cos^2 \phi - \frac{Kq}{r} \sin^2 \gamma \sin \phi \cos \phi \right. \\ \left. + \frac{K}{r} \sin \gamma \cos \gamma \left[\frac{\partial}{r\partial\theta} (\cos \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\sin \phi) \right] - Kq \sin \gamma \cos \gamma \left[\frac{\partial}{r\partial\theta} (\sin \phi) - \frac{\partial}{\partial z} (\cos \phi) \right] \right. \\ \left. + \frac{K}{2} \sin^2 \gamma \left[\left(\frac{\partial \phi}{r\partial\theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

จากสมการจะเห็นว่าหกเทอมแรกไม่เกี่ยวกับอนุพันธ์ของ ϕ และสองเทอมถัดมามีลักษณะเป็นเชิงเส้นของอนุพันธ์ของ ϕ ส่วนเทอมสุดท้ายเป็นกำลังสองในรูปอนุพันธ์ของ ϕ

พิจารณาเทอมที่ไม่เกี่ยวกับอนุพันธ์ของ ϕ คือหกเทอมแรก หลังจากทำการหาค่าต่ำสุด (minimizing) จะได้ว่า

$$\frac{K \sin^2 \gamma (2) \cos \phi_0 (-\sin \phi_0)}{2r^2} - \frac{Kq \sin^2 \gamma (\sin \phi_0 (-\sin \phi_0) + \cos^2 \phi_0)}{r} = 0$$

$$\frac{-\sin \phi_0 \cos \phi_0}{r^2} = \frac{(-\sin^2 \phi_0 + \cos^2 \phi_0)q}{r}$$

$$\frac{-\sin \phi_0 \cos \phi_0}{-\sin^2 \phi_0 + \cos^2 \phi_0} = -qr$$

นำ 2 มาคูณทุกเทอม และหารเทอมซ้ายทั้งเศษและส่วนด้วย $\cos^2 \phi_0$ จะได้

$$\frac{2 \tan \phi_0}{1 - \tan^2 \phi_0} = -2qr$$

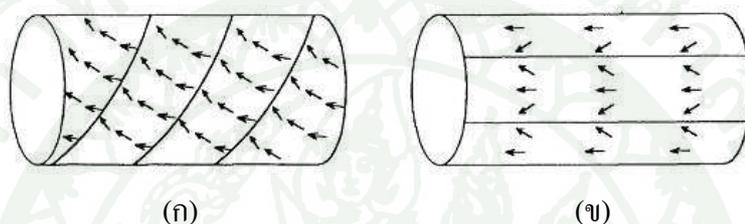
$$\tan 2\phi_0 = -2qr \quad (5)$$

โดยค่า ϕ_0 สามารถหาได้จากขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของการโค้ง จากพลังงานอิสระการโค้งจะเห็นว่าเมื่อขีดจำกัดความโค้งมีค่าต่ำสุดจะได้เทอม r มีค่ามาก ทำให้ค่า $qr \gg 1$ ค่า ϕ_0 ที่ได้จึงมีค่าเป็น $\phi_0 = 45^\circ$ นั่นคือจะมีการเอียงเฉลี่ย 45° เทียบกับแกนกลางทรงกระบอก ในทางตรงกันข้ามกรณีที่ขีดจำกัดความโค้งค่าสูงสุดจะได้ $qr \ll 1$ จะได้ $\phi_0 = 90^\circ$ นั่นคือมีมุมเอียงเฉลี่ยขนานไปกับแกนกลางทรงกระบอก

จากเงื่อนไขขีดจำกัดทั้ง 2 แบบสามารถนำมาอธิบายการเกิดแถบริบิ้นของโมเลกุลได้ดังภาพที่ 8 โดยภาพที่ 8 (ก) เป็นการแสดงการเกิดทิศทางแถบริบิ้นในกรณีที่ $qr \gg 1$ โดยมุมเอียงเฉลี่ยมีค่าเป็น 45° กับเส้นรอบทรงกระบอกและแถบริบิ้นตั้งฉากกับมุมเอียงเฉลี่ย ถ้าคุณภาพเป็น 2 มิติจะพบว่าการเปลี่ยนของมุมเอียงเมื่อเปลี่ยนแถบจะขึ้นอยู่กับการเอียงเท่านั้น แต่ใน 3 มิติ จะมีการ

เกิดเกลียวมาเกี่ยวข้องกับซึ่งซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติเป็นไครอลของโมเลกุล (คูเทอมของการเป็นเกลียวในพลังงานอิสระแฟรงค์จะเห็นว่าการเกิดเกลียวเกี่ยวข้องกับความเป็นไครอล)

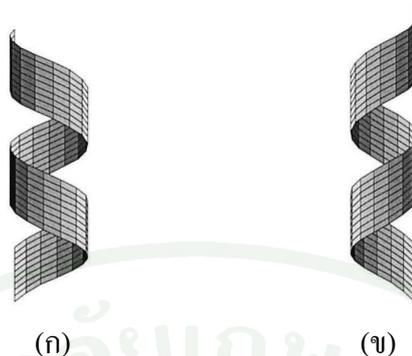
สำหรับในภาพที่ 8 (ข) เป็นการแสดงการเกิดทิศทางแถบในกรณีที่ $qr \ll 1$ โดยมุมเอียงเฉลี่ยมีค่าเป็น 90° กับเส้นรอบทรงกระบอกนั่นคือมุมเอียงเฉลี่ยจะขนานไปกับแกนกลางทรงกระบอกและแถบโมเลกุลที่เกิดขึ้นก็จะขนานไปด้วย การเปลี่ยนของมุมเอียงเมื่อเปลี่ยนแถบจะขึ้นอยู่กับการกระจายซึ่งเป็นผลมาจากการเอียงมากกว่าผลจากสมบัติไครอลในโมเลกุล



ภาพที่ 8 แสดงทิศทางของแถบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี (ก) เมื่อ $qr \gg 1$ (ข) เมื่อ $qr \ll 1$

ที่มา: Jonathan *et al.* (2001)

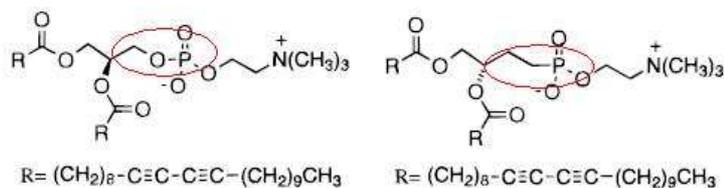
จากทฤษฎีดังกล่าวทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเกิดการม้วนเป็นท่อนั้นเป็นผลมาจากการใช้ฟอสโฟลิปิดที่มีคุณสมบัติความเป็นไครอลของโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตามคำอธิบายนี้ยังไม่สามารถอธิบายครอบคลุมถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ซึ่งจากงานวิจัยหลายปีต่อมาพบว่าการเกิดท่อน้ำหรือขวาน้ำนั้นไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความเป็นไครอล ทำให้ความคิดที่ว่าเกิดการก่อที่อธิบายด้วยสมบัติไครอลนั้นอาจไม่ถูกต้อง โดยในการทดลองของทอมัส(Thomas), ลินเดอร์มัน (Lindermann) และคลาร์ก (Clark) โดยการใช้ฟอสโฟลิปิดที่เป็นเอ็นแอนชิโอเมอร์ (Enantiomer) บริสุทธิ์ (ไครอลโมเลกุลสามารถเกิดโมเลกุลคู่เงาได้ เรียกแต่ละตัวว่าเอ็นแอนชิโอเมอร์) และพบว่าท่อลิปิดที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นของกระบวนการขึ้นรูปด้วยตัวเองมีลักษณะเป็นทั้งเกลียวน้ำและขวาน้ำ (ภาพที่ 9) โดยมีจำนวนพอๆ กัน ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้ถ้าอธิบายว่าการก่อที่นั้นมาจากคุณสมบัติความเป็นไครอล



ภาพที่ 9 แสดงเกลียวที่เกิดขึ้น (ก) คือเกลียววนซ้าย และ (ข) เกลียววนขวา

ที่มา: Thomas *et al.* (1999)

การขึ้นรูปของฟอสโฟลิปิดนี้เป็นกระบวนการเปลี่ยนเฟสแบบย้อนกลับขั้นที่หนึ่ง (reversible first-order phase transition) โดยจะเป็นการเปลี่ยนจากเฟส L_α เป็นเฟส L_β หรือเมื่อคูลิ่งโครงสร้างจะเป็นการเปลี่ยนจากเวสิเคิลที่มีผนังหลายชั้น (spherical multilamellar vesicles; MLVs) ที่อุณหภูมิสูงเป็นท่อที่มีผนังหลายชั้น (tubular multilamellar vesicles) ที่อุณหภูมิต่ำ การทดลองเพื่อจะควบคุมลักษณะทางกายภาพนั้น ในส่วนของความยาวสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยอาศัยการเปลี่ยนอัตราการลดลงของอุณหภูมิซึ่งมีผู้ทดลองตั้งแต่การลดอุณหภูมิด้วยอัตรา $0.08\text{ }^\circ\text{C}$ ต่อชั่วโมง จนถึง $10^5\text{ }^\circ\text{C}$ ต่อชั่วโมง (อย่างหลังใช้ในโตรเจนเหลว) หรือเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูปก็ได้ โดยพบว่าที่สภาวะการสังเคราะห์เดียวกันเมื่อใช้เมทานอลหรือโพรพานอลสายปกติ (n-propanol) แทนเอทานอล จะมีความยาวที่ต่างกัน โดยความยาวท่อเฉลี่ยในสายละลายโพรพานอลมีค่าประมาณ $40 \pm 10\ \mu\text{m}$ และประมาณ $65 \pm 10\ \mu\text{m}$ ในสารละลายเมทานอล นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการใช้สารละลายเมทานอลทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบผนังเดี่ยวมากกว่าการใช้สารละลายแอลกอฮอล์ชนิดอื่น ในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยวิธีดังกล่าวแต่สามารถทำให้ขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 2 เท่าของการใช้ฟอสโฟลิปิดชนิด DC_{8,9}PC ได้ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นฟอสโฟเนต ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนที่ตำแหน่ง C-O-P เป็น C-C-P (ดังภาพที่ 10)

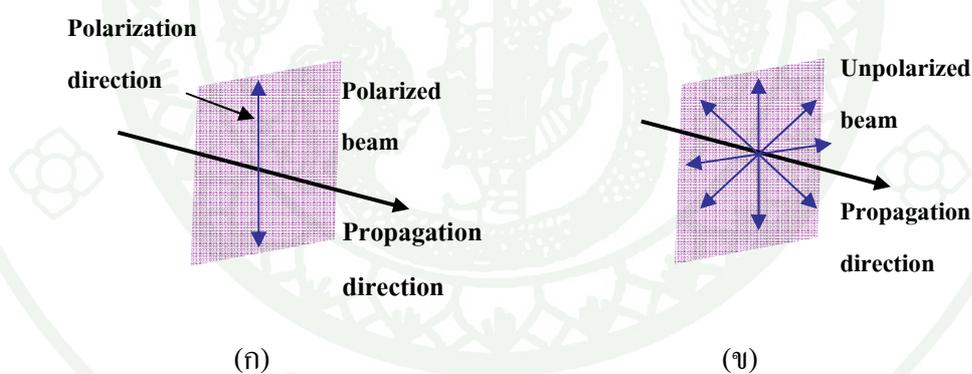


ภาพที่ 10 แสดงการเปลี่ยนธาตุในโครงสร้างฟอสโฟลิปิดจาก C-O-P เป็น C-C-P

ที่มา: Thomas *et al.* (1998)

3. โพลาริเซชัน (Polarization)

แสงโพลาไรซ์ (Polarized light) เป็นแสงที่ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้ามีทิศทางเดียว ส่วนแสงไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized light) เป็นแสงที่ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าอยู่ในทุกทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของแสง (ต้นกำเนิดแสงตามธรรมชาติ) ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 (ก) แสดงแสงโพลาไรซ์ (ข) แสงไม่โพลาไรซ์

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

จากสมการของคลื่นระนาบ

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (1)$$

พิจารณาทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางหนึ่ง คือ $\vec{k} = k\hat{e}_3$ และเนื่องจากเราทราบว่า คลื่นระนาบของ \vec{E} มีลักษณะเป็นคลื่นตามขวาง

ดังนั้น ทิศทางการแกว่งของ \vec{E} จะตั้งฉากกับทิศของเวกเตอร์ \vec{k} หรือเขียน \vec{E} ในลักษณะ

$$\vec{E}_0 = E_{01}\hat{e}_1 + E_{02}\hat{e}_2 \quad (2)$$

เมื่อ e_1, e_2 และ e_3 เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกนหลักที่ตั้งฉากกัน และแอมพลิจูด E_{01} และ E_{02} เป็นได้ทั้งจำนวนจริงและเชิงซ้อน จึงสามารถเขียนแอมพลิจูดในรูปเชิงซ้อน คือ

$$E_{01} = E_1 e^{i\alpha} \quad \text{และ} \quad E_{02} = E_2 e^{i\beta} \quad (3)$$

โดยที่ E_1, E_2, α, β เป็นจำนวนจริง ดังนั้นจะได้ว่า

$$\vec{E} = [\hat{e}_1 E_1 e^{i\alpha} + \hat{e}_2 E_2 e^{i\beta}] e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = E_1 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \alpha)} \hat{e}_1 + E_2 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \beta)} \hat{e}_2 \quad (4)$$

ลักษณะเช่นนี้ คือ สนามไฟฟ้า \vec{E} เสมือนเป็นการผสมของสนามไฟฟ้าย่อย ในทางกลับกัน ถ้าเกิดมีหลาย ๆ สนามคลื่นที่ไปในทิศทางเดียวกันจะเกิดการรวมคลื่นเป็นสนามรวม \vec{E} ซึ่งจะมีรูปร่างต่างๆ กันไปตามเวลา โดยจะขึ้นกับมุมเฟสเริ่มต้นของคลื่นไฟฟ้าย่อย

สามารถแยกพิจารณาตามกรณีได้ดังนี้

3.1 พิจารณากรณีที่ E_1 และ E_2 มีเฟสเดียวกัน หรือต่างกันเป็นจำนวนเต็มคูณกับ π

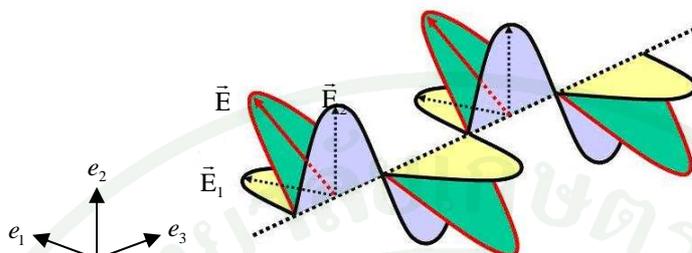
นั่นคือ $\beta = \alpha$ หรือ $\beta = \alpha \pm m\pi$ เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\vec{E} = (\hat{e}_1 E_1 \pm \hat{e}_2 E_2) e^{i(k \cdot r - \omega t + \alpha)} \quad (5)$$

นั่นคือ E_{01} และ E_{02} จะมีมุมเฟสเหมือนกันตลอดเวลา

ดังนั้น \vec{E} รวมจะชี้ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเสมอ คลื่นในลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า โพลาริเซชันเชิงเส้น (linear polarization) แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงโพลาริเซชันเชิงเส้น

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

3.2 พิจารณากรณีที่ E_1 และ E_2 มีขนาดเท่ากัน แต่มีเฟสต่างกัน $\pi/2$

นั่น คือ $E_1 = E_2 = E_0, \beta = \alpha \pm \pi/2$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\vec{E} = E_0 (\hat{e}_1 \pm i \hat{e}_2) e^{i(kz - \omega t + \alpha)} \quad (6)$$

โดยได้ใช้ $e^{\pm i\pi/2} = \cos \frac{\pi}{2} \pm i \sin \frac{\pi}{2} = \pm i$

จะเรียกคลื่นที่มีลักษณะเช่นนี้ว่ามีโพลาริเซชันเชิงวงกลม (circular polarization)

ถ้าสมมติให้ $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3 = \hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ จะได้ว่า

$$E_x = E_0 e^{i(kz - \omega t + \alpha)} \quad \text{และ} \quad E_y = \pm i E_0 e^{i(kz - \omega t + \alpha)} \quad (7)$$

ซึ่งจะมีส่วนจริง (real part) คือ

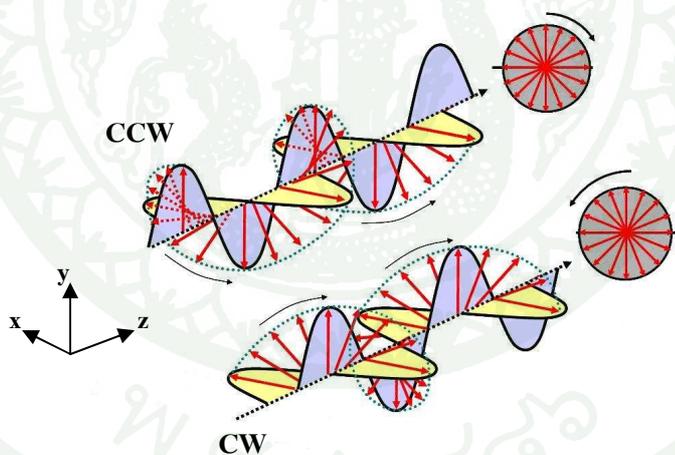
$$E_x = E_0 \cos(kz - \omega t + \alpha) \quad \text{และ} \quad E_y = E_0 \sin(kz - \omega t + \alpha) \quad (8)$$

ด้วยเหตุนี้ ณ ตำแหน่ง z ใดๆ ที่คงที่สมการ (8) จะเป็นฟังก์ชันของวงกลม กล่าวคือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า \vec{E} จะกวาดเป็นรูปวงกลมเป็นฟังก์ชันกับเวลา ทิศของการหมุนจะขึ้นกับเครื่องหมาย \pm ของ E_y ซึ่งก็คือระนาบของ E_y เมื่อเทียบกับ E_x โดยที่เฟส $\beta = \alpha + \pi/2$ หรือ $\beta = \alpha - \pi/2$ และแอมพลิจูดของสนาม คือ $\sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ ซึ่งขึ้นกับเวลา

หากพิจารณาเฟส β สามารถอธิบายได้ดังนี้

ถ้า $\beta = \alpha + \pi/2$ เวกเตอร์ \vec{E} จะกวาดวนเข็มนาฬิกา (counter clockwise or Left-handed) และเมื่อมองคลื่นที่วิ่งเข้าหาผู้สังเกตจะเห็นว่า \vec{E} หมุนแบบ positive helical เราเรียกคลื่นที่มีลักษณะนี้ว่าโพลาไรซ์วงกลมทางซ้าย (left-circular polarization) ดังภาพที่ 13

ถ้า $\beta = \alpha - \pi/2$ เวกเตอร์ \vec{E} จะกวาดตามเข็มนาฬิกา (clockwise or Right-handed) และเมื่อมองคลื่นที่วิ่งเข้าหาผู้สังเกตจะเห็นว่า \vec{E} หมุนแบบ negative helical เราเรียกคลื่นที่มีลักษณะนี้ว่าโพลาไรซ์วงกลมทางขวา (right-circular polarization) ดังภาพที่ 13



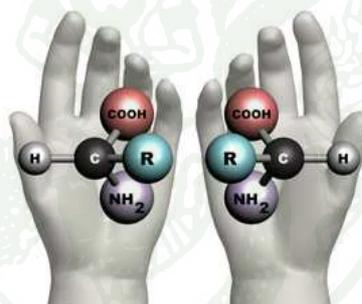
ภาพที่ 13 แสดงโพลาไรซ์แบบวงกลมแบบทางซ้ายและขวา

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

4. ไครอล (Chiral)

Louis Pasteur (1848) เป็นคนแรกที่ค้นพบไครอล โดยเขาพบว่าจากผลึกโซเดียมที่มีในธรรมชาตินั้น สามารถแยกได้เป็น 2 แบบ โดยที่มีทั้ง 2 แบบจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ แต่ไม่สามารถซ้อนทับกันได้

โมเลกุลไครอล (chiral molecules) คือโมเลกุลที่มีภาพสะท้อนในกระจก (mirror image) ที่ไม่สามารถซ้อนทับกับโมเลกุลที่เป็นต้นแบบได้สนิท สิ่งที่มีความเป็นไครอลนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นโมเลกุลเสมอไป วัตถุบางอย่างก็มีความเป็นไครอลได้ตัวอย่างเช่น มือของคนเรา โดยจะเห็นได้ว่ามือขวาและมือซ้ายนั้นดังภาพที่ 14 (โดยมือทั้งสองนั้นเหมือนกันไม่ผิเคี่ยน) เป็นภาพในกระจกซึ่งกันและกัน แต่จะเห็นได้ว่ามือทั้งสองไม่สามารถจะทับกันได้สนิท (นำหลังมือประกบกับหน้ามือ ถ้าเอาหน้ามือประกบหน้ามือไม่ใช้การทับกันของสิ่งของสองสิ่ง) ตัวอย่างโมเลกุลไครอล เช่น โมเลกุลของ DNA double helix กรดอะมิโน เป็นต้น

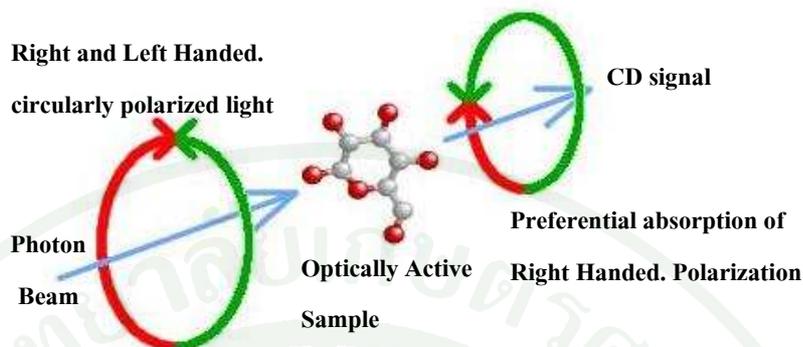


ภาพที่ 14 แสดงความเป็นไครอลของโมเลกุล ที่มีลักษณะเหมือนกัน แต่ไม่สามารถซ้อนทับกันได้ เช่นเดียวกับมือซ้ายและมือขวา

ที่มา: department of Chemistry and Biochemistry New Mexico State University (2006)

5. เซอร์คูลาร์ไดโครอิจซึม (Circular Dichroism)

เซอร์คูลาร์ไดโครอิจซึม (CD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดความแตกต่างการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายและทางขวาดังภาพที่ 15 โดยเมื่อให้แสงโพลาไรซ์วงกลม (circular polarized light) ผ่านตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเป็นไครอล จะทำให้ตัวอย่างดูดกลืนแสงทางซ้ายและขวา (left - right handed circular polarized light) ได้ไม่เท่ากัน



ภาพที่ 15 แสดงลักษณะการเกิด CD

ที่มา: department of Chemistry and Biochemistry New Mexico State University (2006)

การหาความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลม และ Molar ellipticity สามารถหาได้จาก

กำหนดให้ความเข้มของแสงโฟตอนที่ผ่านตัวอย่างเป็น I และความเข้มโฟตอนผ่านเซลล์ที่ไม่มีตัวอย่างเป็น I_0 การดูดกลืน A ของตัวอย่างสามารถหาได้จากสมการ

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

เนื่องจากการดูดกลืนมีทั้งแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้าย (left polarized light ;LCPL) และแสงโพลาไรซ์วงกลมทางขวา (right polarized light ;RCPL)

ดังนั้นความแตกต่างในการดูดกลืน ΔA สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta A = A_{LCPL} - A_{RCPL} \quad (2)$$

โดยถ้า ΔA มีค่ามาก แสดงว่ามีความแตกต่างในการดูดกลืนมาก

จากกฎของ Beer (Beer's law)

$$\Delta A = (\varepsilon_{LCPL} - \varepsilon_{RCPL})Cl \quad (3)$$

เมื่อ ε_{LCPL} และ ε_{RCPL} เป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้าย และทางขวา

C เป็นความเข้มข้นของตัวอย่าง (molar)

l เป็นความยาวของแสงก่อนที่จะผ่านตัวอย่าง (cm)

ดังนั้น

$$\Delta \varepsilon = (\varepsilon_{LCPL} - \varepsilon_{RCPL}) \quad (4)$$

เนื่องจาก Molar ellipticity $[\theta]$ คือค่าที่ใช้วัดความเป็นไครอลของโมเลกุล ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$[\theta] = 3298.2 \Delta \varepsilon \quad (5)$$

แทน (3) และ (4) ลงใน (5)

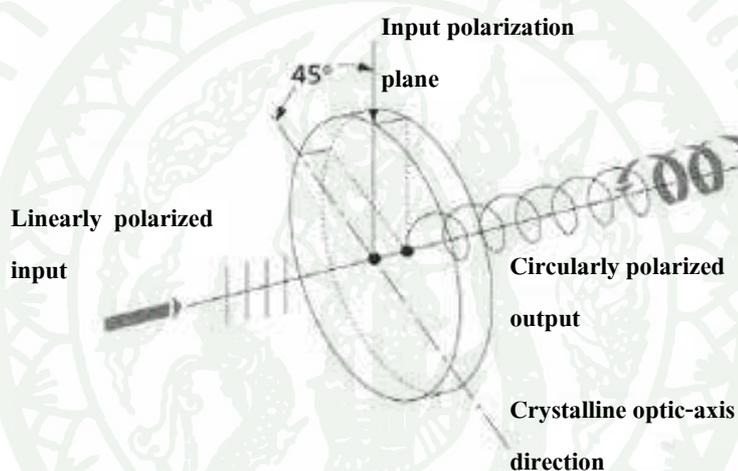
จะได้

$$[\theta] = 3298.2 \frac{\Delta A}{c \times l} \quad (6)$$

โดยถ้า ΔA มีค่ามาก เนื่องจากความแตกต่างในการดูดกลืนมาก จะทำให้ $[\theta]$ มีค่ามาก ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลจะมีความเป็นไครอลสูง

6. Quarter-wave plate

การทำงานของตัวหน่วงคลื่นแบบ quarter - wave plate เป็นดังนี้คือ ถ้าแสงที่ตกกระทบกับแกนทึบเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยที่มุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ตกกระทบและแกนทึบของตัวหน่วงคลื่นธรรมชาติทำมุม $+45$ องศา ถ้าแสงที่ออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมทางขวามือ แต่ถ้ามุมระหว่างเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ตกกระทบและแกนทึบของตัวหน่วงคลื่นธรรมชาติทำมุม -45 องศา ถ้าแสงที่ออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายมือ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แนวโพลาไรซ์ของลำแสงเมื่อผ่าน quarter-wave plate

ที่มา: department of Chemistry and Biochemistry New Mexico State University (2006)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนานอลิปิด

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมท่อนานอลิปิด เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดัง
ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมท่อนานอลิปิด

วัสดุ	สูตรทางเคมี
ฟอสโฟลิปิด (1,2-bis(10,12-Tricosadiynoyl- <i>sn</i> -Glycero-3-Phosphocholine ; DC _{8,9} PC))	C ₅₄ H ₉₂ NO ₈ P
เอทานอล	C ₂ H ₅ OH
น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Ultra-pure water)	D ₂ O
น้ำแข็งแห้ง (dry ice)	CO ₂

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนานอลิปิด

- 2.1 ขวด (vial) ขนาด 2 มิลลิลิตร สีชา
- 2.2 เทอร์โมมิเตอร์
- 2.3 เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
- 2.4 คอมพิวเตอร์
- 2.5 เครื่องชั่งอย่างละเอียด ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ที่ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 210 กรัม ความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม จอแสดงผลแบบ black graphic LCD ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

2.6 ไมโครปิเปต ที่มีความจุ 0.01- 1 มิลลิลิตร



ภาพที่ 18 ไมโครปิเปต

2.7 เครื่องฉายรังสี UV (Ultra-violet Radiation) มีความยาวคลื่น 2 ระดับ คือ 254 nm และ 365 nm 230V ~50/60 Hz



ภาพที่ 19 เครื่องฉายรังสี UV

3. อุปกรณ์ที่ให้ศึกษาโครงสร้างภายนอกของท่อนาโนลิปิด

3.1 กล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ ดังภาพที่ 20 (ก) มีเลนส์ใกล้วัตถุสูงสุด 50 x ที่สามารถบันทึกภาพท่อนาโนลิปิดได้ดังภาพที่ 20 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 (ก) กล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ

(ข) ภาพถ่ายของท่อนาโนลิปิดที่บันทึกได้จากกล้องจุลทรรศน์

3.2 กระจกสไลด์

3.3 หลอดหยด

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะทางการยภาพของท่อนาโนลิปิด

4.1 หลอดหยด

4.2 กระจกสไลด์

4.3 ปากกาตัดกระจก

4.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope หรือ AFM) รุ่น Dimension

3100 Digital



ภาพที่ 21 แสดงกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซลล์

- 5.1 กระจกปิดสไลด์ (cover slip)
- 5.2 กาวสองหน้า อย่างหนา
- 5.3 กาว (epoxy)
- 5.4 คัดเตอร์
- 5.5 ไม้บรรทัด

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไครอลของฟอโนลิปิด

6.1 เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 532 nm ผลิตโดย Laxor technology Corp. เป็น Laser Radiation มีพลังงานสูงสุดน้อยกว่า 5 mW มีความยาวคลื่น 532 nm เป็น Pulse duration $>3.8 \times 10^4$ และ เป็น Class III a Laser Product หลีกเลี่ยงการโดนตาโดยตรง

6.2 เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 632 nm เป็น Helium – Neon มีพลังงาน 0.95 mW มีความยาวคลื่น 632.8 nm และ เป็น Class II Laser Product

6.3 เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 810 nm ยี่ห้อ Sepia II เป็น Invisible Laser Radiation มีความต่างศักย์สูงสุด 30 mV มีความยาวคลื่น 700 – 1050 nm ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าในการใช้งาน และ เป็น Class III Laser Product หลีกเลี่ยงการโดนลำแสงเลเซอร์โดยตรง

- 6.4 โพลาริเซอร์แบบปริซึม
- 6.5 quarter wave plate
- 6.6 ตัวกรองความเข้มแสง (filter)

6.7 เครื่องตรวจจับโฟตอน (photon detector) ยี่ห้อ PicoQ เป็น MPD Micro Photon devices รุ่น DPM series ดังภาพที่ 22 โดยภาพ (ก) เป็นภาพเครื่องตรวจจับโฟตอนทางด้านข้าง ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพเครื่องตรวจจับโฟตอนด้านหน้า โดยบริเวณที่ถูกศรชี้ถึงบริเวณที่ตรวจจับโฟตอน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 แสดงภาพเครื่องตรวจจับโฟตอนที่ใช้ในการทดลอง

(ก) แสดงภาพเครื่องตรวจจับโฟตอนทางด้านข้าง

(ข) แสดงภาพเครื่องตรวจจับโฟตอนด้านหน้า

6.8 คอมพิวเตอร์

6.9 โปรแกรม Detector 2CH time 1.0 vi ซึ่งสามารถตรวจจับจำนวนโฟตอนได้ละเอียดในระดับ 0.1 วินาที

6.10 โต๊ะทัศนศาสตร์ (Optical table)

วิธีการวิเคราะห์

1. การสังเคราะห์ท่อนานาโนลิปิด

เตรียมลิปิด ($DC_{8,9}PC$) ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวใส่ขวด ขวดละ 50 มิลลิกรัม จำนวน 5 ขวด จากนั้นเติมตัวทำละลายที่ได้จากการผสมเอทานอลกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (D_2O) ในอัตราส่วน 75:25 (v:v) ประมาณ 0.5 มิลลิตร ลงในแต่ละขวด ซึ่งต้องเติมเอทานอล 0.375 มิลลิตรและน้ำกลั่น 0.125 มิลลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตที่มีความจุ 0.01- 1 มิลลิตร เขย่าให้เป็นเข้ากัน จากนั้นให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ นาน 15-20 นาที (หรือจนกว่าลิปิดจะละลายหมด) ซึ่งจะเป็นสารละลายที่ใส ไม่มีสี จากนั้นลดอุณหภูมิแบบควบคุมตามอัตราที่กำหนด 5 อัตรา ดังแสดงในตารางที่ 2 จากอุณหภูมิ $60^{\circ}C$ จนถึงอุณหภูมิห้อง ($27^{\circ}C$) โดยใช้โปรแกรม Wintemp ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ และต่อกับเตาอบที่สามารถควบคุมการลดอุณหภูมิในอัตราที่กำหนดได้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนการลดอุณหภูมิต่อเวลา

ลำดับ ที่	อัตราการลด อุณหภูมิต่อเวลา	รวมเวลาที่ใช้ในการ ลดอุณหภูมิ	ส่วนกลับของอัตรา การลดอุณหภูมิ
1	$10^{\circ}C/hr$	2 ชั่วโมง 18 นาที	$0.10 hr/^{\circ}C$
2	$4.8^{\circ}C/hr$	4 ชั่วโมง 47 นาที	$0.21 hr/^{\circ}C$
3	$1.8^{\circ}C/hr$	12 ชั่วโมง 47 นาที	$0.56 hr/^{\circ}C$
4	$1.2^{\circ}C/hr$	19 ชั่วโมง 10 นาที	$0.83 hr/^{\circ}C$
5	$0.6^{\circ}C/hr$	38 ชั่วโมง 20 นาที	$1.66 hr/^{\circ}C$

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการลดอุณหภูมิแบบควบคุมจะได้สารที่มีลักษณะเป็นเจล ที่มีสีขาวขุ่น จากนั้นเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 2 มิลลิตร แล้วเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารแขวนลอยที่มีสีขาวขุ่น ซึ่งเมื่อนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นท่อนานาโนลิปิดจำนวนมาก จากนั้นฉายรังสี UV ที่มีความยาวคลื่น 254 nm นาน 20 นาที เพื่อรักษาความเป็นท่อนานาโนลิปิดโดยในขณะฉายรังสี UV ต้องรักษาอุณหภูมิต่ำกว่า $4^{\circ}C$ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่น้ำแข็งแห้ง (dry-ice) เข้าไปในเครื่องฉายรังสี UV ด้วย จากนั้นนำท่อนานาโนลิปิดที่ได้ไปเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า $4^{\circ}C$ ซึ่งสามารถรักษาความเป็นท่อได้นานถึง 3 เดือน (การทดลองทั้งหมดทำในห้องมืด)



ภาพที่ 23 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมท่อนานโนลิปิด

2. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ

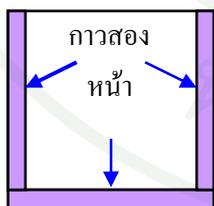
นำท่อนานโนลิปิดที่เก็บไว้ในตู้เย็นมาหยดบนกระจกสไลด์ 2 หยด วางทิ้งให้แห้งในอากาศ จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่มีท่อนานโนลิปิดอยู่มาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่เลนส์ใกล้วัตถุกำลังขยาย 50x จะเห็นท่อนานโนลิปิดที่มีลักษณะเป็นเส้นๆ สีดำซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก จากนั้นถ่ายภาพท่อนานโนลิปิดที่ได้จากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมในแต่ละอัตรา

3. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

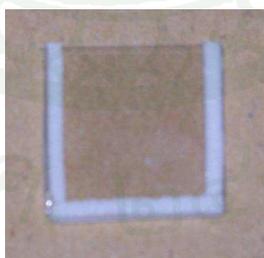
นำท่อนาโนลิปิดที่เก็บไว้ในตู้เย็นมาหยดบนกระจกสไลด์ 2 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ จากนั้นตัดกระจกสไลด์ในส่วนที่ไม่มีท่อลิปิดทิ้ง ด้วยปากกาตัดกระจก (ให้มีขนาดที่ใส่ในเครื่อง AFM ได้) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM จากนั้นนำภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ที่ได้มาหาค่ามุมเกลียวของท่อ โดยการลากเส้นให้ขนานกับแกนกลางของท่อนาโนลิปิด 1 เส้น จากนั้นลากเส้นตั้งฉากกับเส้นที่ลากขึ้น แล้วลากเส้นที่ทำมุมพร้อมวัดมุม โดยในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเลือกจุดที่วัด 30 จุด ซึ่งเป็นจุดที่ค่อนข้างชัดเจนที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละอัตรา

4. ขั้นตอนการเตรียมเซลล์

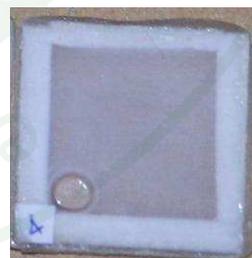
ตัดกาวสองหน้าที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตรให้เป็นเส้น โดยมีขนาดความกว้างเส้นละประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาติดบนกระจกปิดแผ่นสไลด์ 3 ด้าน ดังแสดงในภาพที่ 24 (ก) จากนั้นนำกระจกปิดแผ่นสไลด์อีกแผ่นมาปิดทับ ทากาว (epoxy) ปิดทับทั้ง 3 ด้าน (ทำให้ปิดสนิท) จะได้เซลล์ที่มีลักษณะดังภาพที่ 24 (ข) รองกาวแห้ง จากนั้นนำท่อนาโนลิปิดที่เก็บไว้ในตู้เย็น เจือจางความเข้มข้นลิปิดด้วยการเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ให้มีความเข้มข้นลิปิด 0.011 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แล้วนำท่อนาโนลิปิดที่เจือจางแล้วประมาณ 0.1 มิลลิลิตรใส่ในเซลล์ที่เตรียมไว้ จากนั้นปิดผนึกเซลล์ด้านที่เหลือ ซึ่งจะได้เซลล์ดังภาพที่ 24 (ค) ที่จะใช้ในการทดลอง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 24 แสดงการเตรียมเซลล์

(ก) ลักษณะการติดกาวสองหน้า

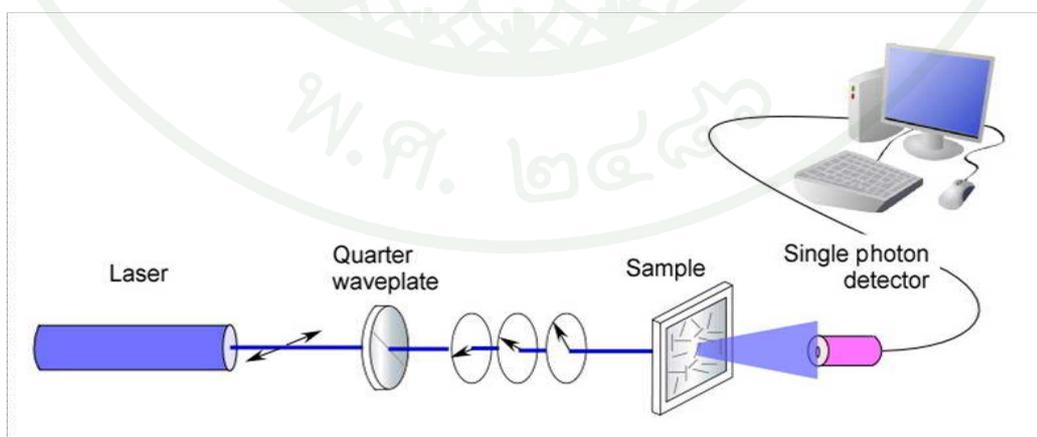
(ข) เซลล์ที่เตรียมได้

(ค) เซลล์ที่ใส่ท่อนาโนลิปิดและปิดผนึกเซลล์ทั้ง 4 ด้าน

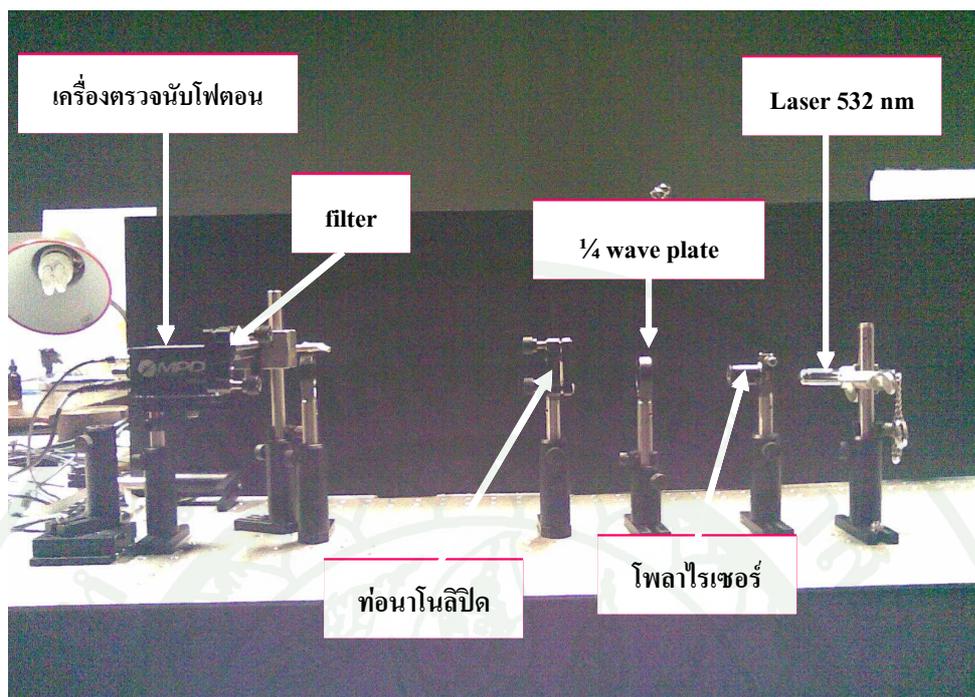
5. การวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเชอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม

การวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเชอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม มีขั้นตอนคร่าว ๆ ดังภาพที่ 25

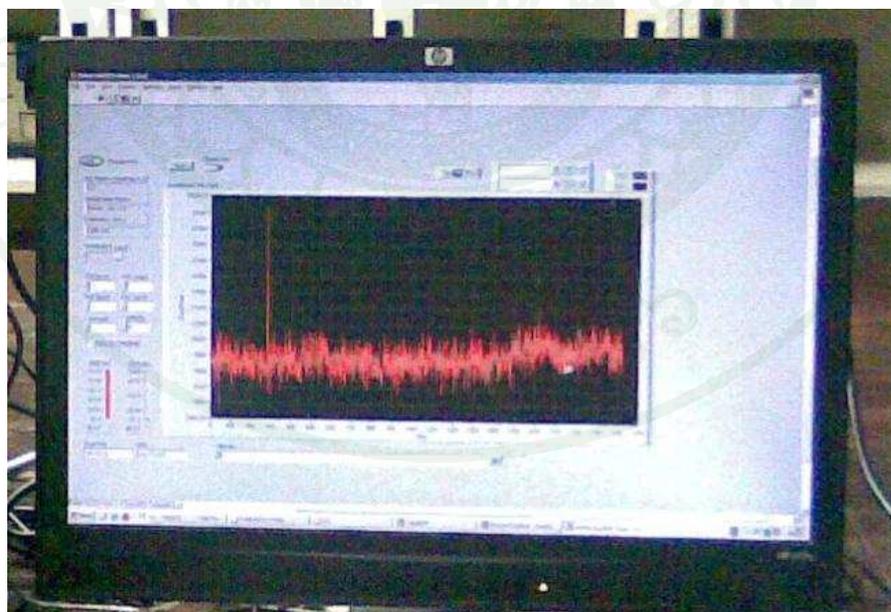
โดยเริ่มจากการเปิดเลเซอร์ทิ้งไว้อย่างน้อย 20 นาที จากนั้นนำโพลาริเซอร์ที่มีลักษณะเป็นปริซึม และเครื่องตรวจนับโฟตอน (photon detector) มาวางหน้าเลเซอร์ ตามลำดับ (ดังภาพที่ 26) โดยจัดให้อยู่ในแนวขนานกับลำแสงเลเซอร์และมีระยะห่างที่เหมาะสม จากนั้นจัดให้ลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านโพลาริเซอร์ออกมาตกกระทบบนหัวของเครื่องตรวจนับโฟตอนพอดี นำ ตัวกรองความเข้มแสงมาวางหน้าเครื่องตรวจนับโฟตอน (เพื่อให้เครื่องตรวจนับโฟตอนรับโฟตอนไม่เกิน 5 ล้านตัวต่อวินาที) จากนั้นนำ quarter wave plate มาวางระหว่างโพลาริเซอร์กับเครื่องตรวจนับโฟตอน จัดลำแสงตกกระทบบน และแสงกระเจิงให้ตรงกับเครื่องตรวจนับโฟตอน จากนั้นใช้โปรแกรม Detector 2CH time 1.0 vi ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์และต่อกับเครื่องตรวจนับโฟตอน ในการควบคุมเครื่องนี้ให้นับจำนวนโฟตอนในทุกๆ 0.1 วินาที โดยสังเกตจากกราฟที่เกิดขึ้น (ดังภาพที่ 27) โดยให้นับจำนวนโฟตอนได้ไม่เกิน 3 ล้านตัวต่อวินาที (ถ้าเกินให้ปรับตัวกรองความเข้มแสงใหม่) นำตัวอย่าง (เซลล์ที่มีท่อนาโนลิปิด) มาวางระหว่าง quarter wave plate กับเครื่องตรวจนับโฟตอน หมุน quarter wave plate ไปทางขวา 45° (เทียบกับแกนโพลาริซ์ของเลเซอร์) ทำการวัดโดยใช้เวลา 30 วินาที จากนั้นหมุน quarter wave plate ไปทางซ้าย 45° (เทียบกับแกนโพลาริซ์ของเลเซอร์) ทำการวัดแต่ละตัวอย่างซ้ำด้านละ 3 ครั้ง จนครบทุกตัวอย่าง



ภาพที่ 25 แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด คุณสมบัติเชอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม



ภาพที่ 26 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นโครอลของท่อนาโนลิปิด โดยเทคนิค เซอร์คิวลาร์ไดโครอิม



ภาพที่ 27 แสดงกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความเป็นโครอลของท่อนาโนลิปิด โดยแกนตั้งคือ จำนวนโฟตอน แกนนอนคือเวลา (0.1 วินาที)

6. สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

6.1 สถานที่ทำวิจัย

6.1.1 เตรียมท่อนาโนลิปิด ที่ห้องปฏิบัติการ Liquid Crystals ภาควิชาฟิสิกส์ และห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

6.1.2 ศึกษาการเป็นท่อนาโนลิปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่ห้องปฏิบัติการ Liquid Crystals ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

6.1.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ที่ห้องปฏิบัติการ BiOTEC ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

6.1.4 ศึกษาความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้เทคนิคเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม ที่ห้องปฏิบัติการ Optics ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตพญาไท

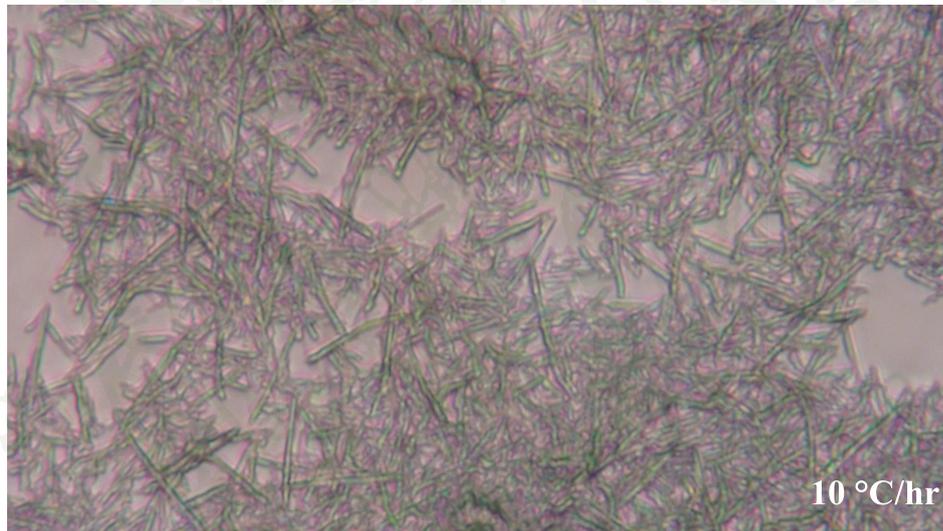
6.2 ระยะเวลาทำการวิจัย

ปีการศึกษา 2550 - ปีการศึกษา 2552

ผลการทดลองและวิจารณ์

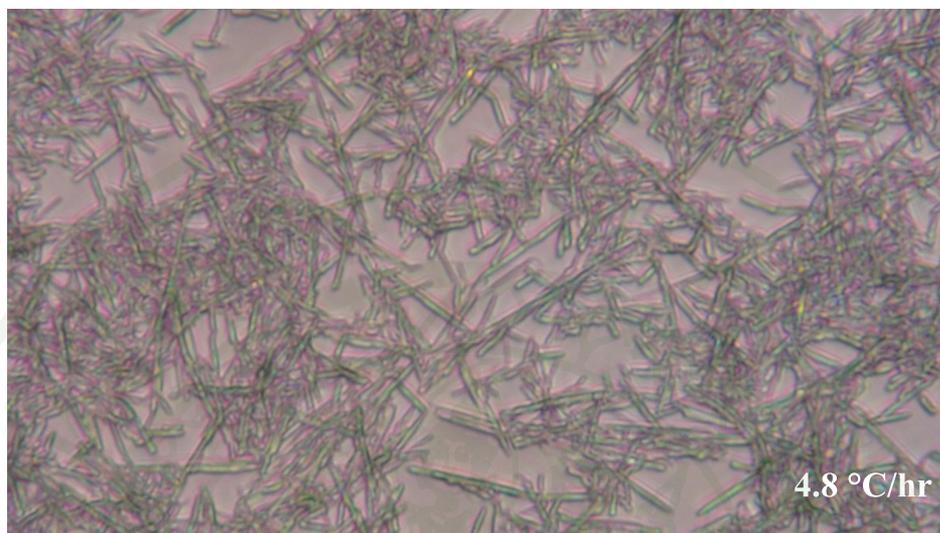
1. ผลการวิเคราะห์ที่อนุโนลิปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์

การวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการสังเคราะห์อนุโนลิปิดโดยการลดอุณหภูมิแบบควบคุม ที่มีความแตกต่างกัน 5 อัตราคือ 10 °C/hr, 4.8 °C/hr, 1.8 °C/hr, 1.2 °C/hr และ 0.6 °C/hr ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เลนส์ใกล้วัตถุ 50x แสดงดังภาพที่ 28, 29, 30, 31 และ 32 ตามลำดับ โดยภาพที่ 28 ที่อัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม 10 °C/hr จะเป็นอนุลิปิดที่มีลักษณะเป็นท่อสั้นๆ



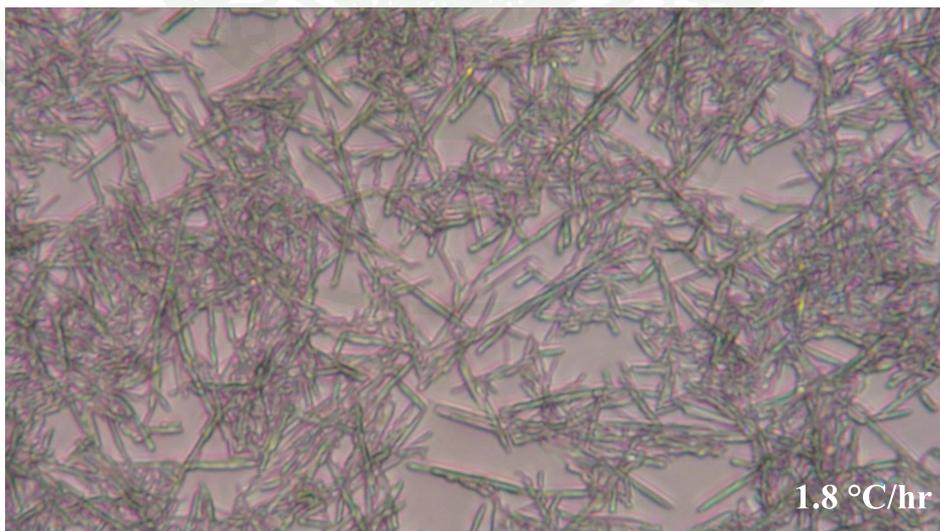
ภาพที่ 28 แสดงภาพอนุโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 10 °C/hr

ภาพที่ 29 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม 4.8 °C/hr จะเป็นท่อนาโนลิปิดที่มีลักษณะเป็นท่อนสั้นๆ เช่นเดียวกับที่อัตรา 10 °C/hr



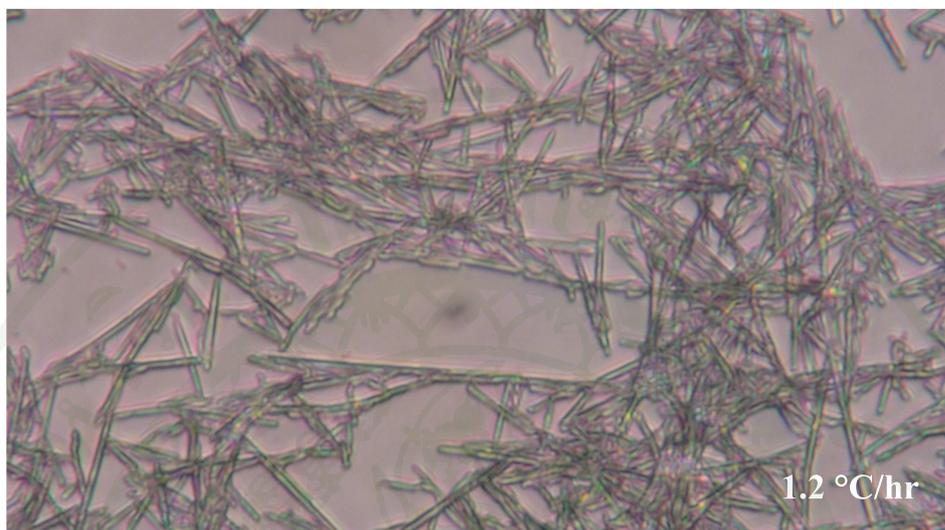
ภาพที่ 29 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 4.8 °C/hr

ภาพที่ 30 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม 1.8 °C/hr จะเป็นท่อนาโนลิปิดที่มีลักษณะเป็นท่อที่มีความยาวเพิ่มขึ้น



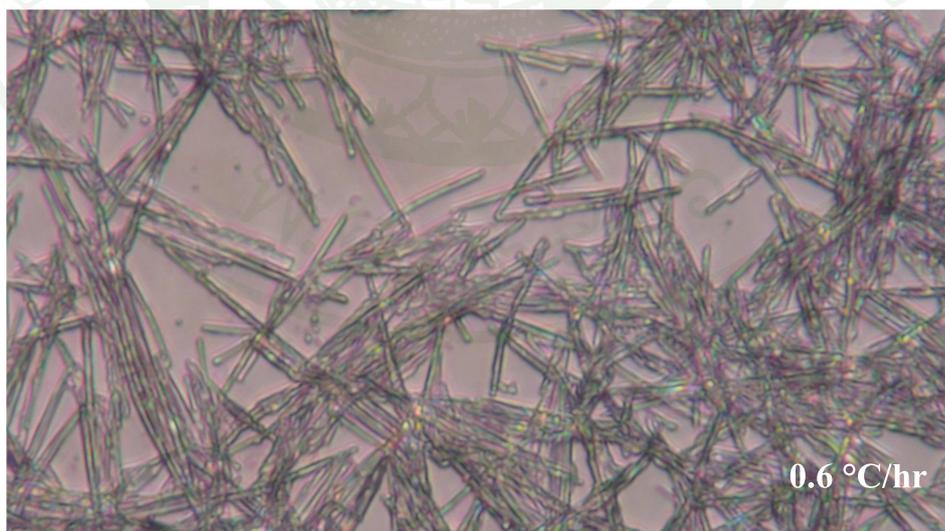
ภาพที่ 30 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.8 °C/hr

ภาพที่ 31 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม $1.2\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ จะเป็นทอлипิดที่มีลักษณะเป็น
ทอที่มีความยาวมาก



ภาพที่ 31 แสดงภาพทอานาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา $1.2\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$

ภาพที่ 32 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม $0.6\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ จะเป็นทอลิปิดที่มีลักษณะเป็น
ทอที่มีความยาวมาก

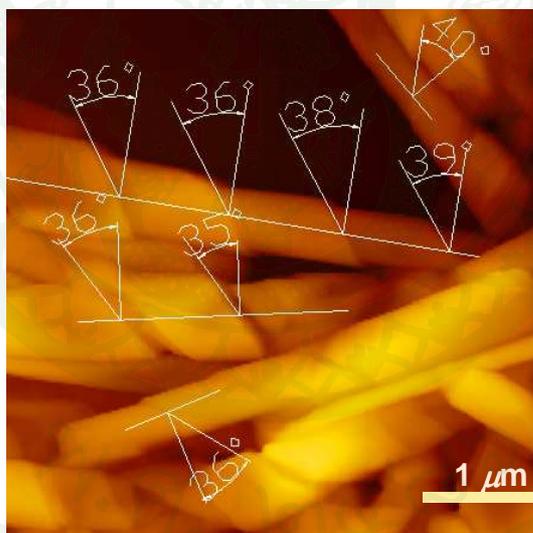


ภาพที่ 32 แสดงภาพทอานาโนลิปิดที่ได้จากลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา $0.6\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$

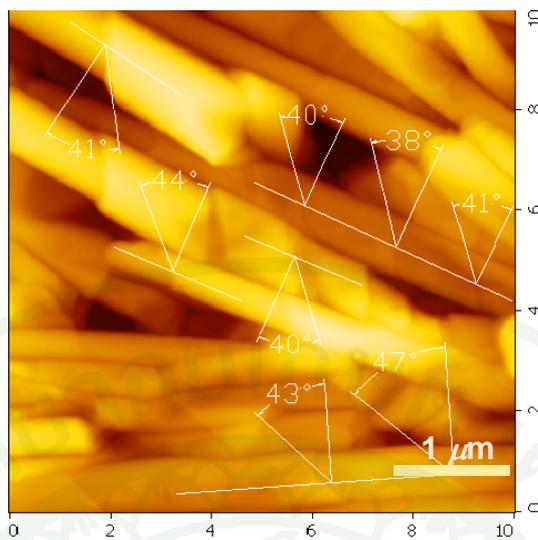
ผลจากการวิเคราะห์ท่อนาโนลิปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เมื่อส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิมีค่าน้อย (อัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลานานมาก) จะได้ท่อลิปิดที่มีลักษณะเป็นท่อสั้นๆ ในขณะที่ส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิมีค่ามาก (อัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาน้อย) จะได้ท่อลิปิดที่มีลักษณะเป็นท่อยาวมาก

2. ผลการวิเคราะห์ท่อนาโนลิปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

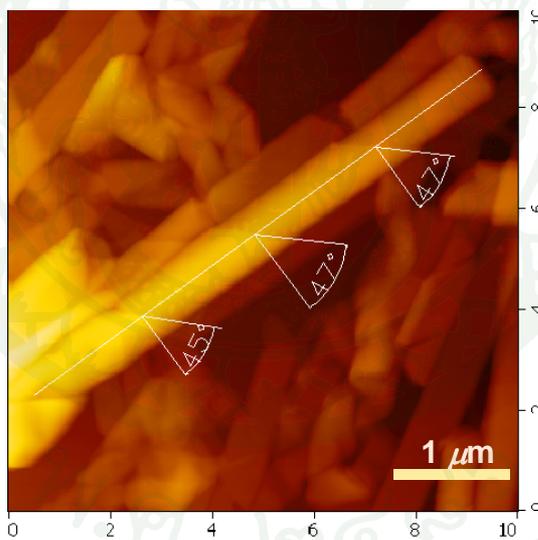
จากการทดลองนำท่อนาโนลิปิดที่ได้จากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมทั้ง 5 อัตรา มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และหาค่ามุมเกลียว (β) เฉลี่ยของท่อ แสดงดังภาพที่ 33, 34, 35, 36 และ 37 ตามลำดับ โดยค่ามุมเกลียวเฉลี่ยของท่อจากแต่ละอัตราแสดงดังตารางที่ 3 และนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเกลียวเฉลี่ยกับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 38



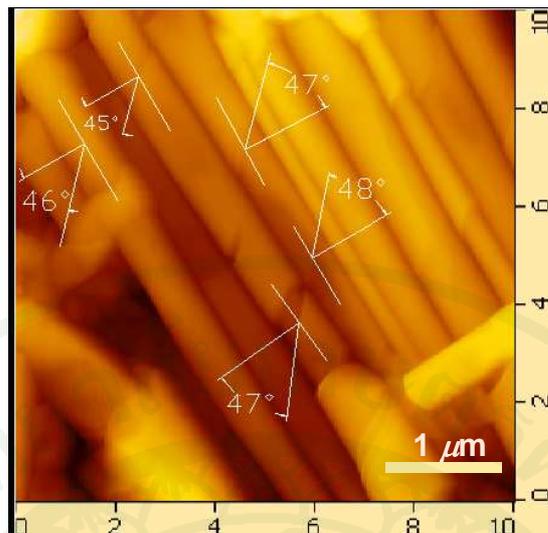
ภาพที่ 33 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



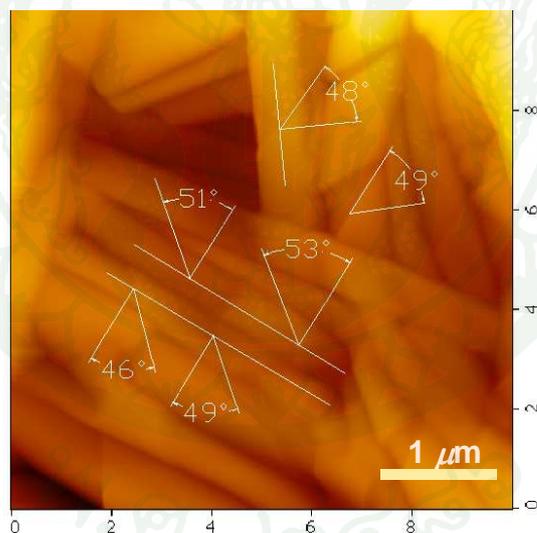
ภาพที่ 34 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 4.8°C/hr จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



ภาพที่ 35 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.8°C/hr จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



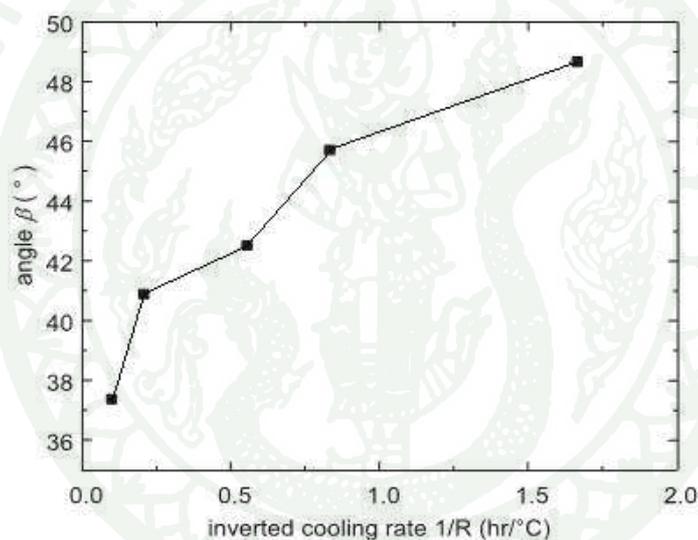
ภาพที่ 36 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 1.2°C/hr จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



ภาพที่ 37 แสดงภาพท่อนาโนลิปิดจากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตรา 0.6°C/hr ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ตารางที่ 3 แสดงค่ามุมเกลียวของท่อนาโนลิปิด ที่ได้จากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมที่อัตราต่างๆ

อัตราการลดอุณหภูมิ (°C/hr)	ส่วนกลับของอัตราการ ลดอุณหภูมิ (hr/°C)	มุมเกลียวเฉลี่ย (°C)
10	0.10	37
4.8	0.21	41
1.8	0.56	44
1.2	0.83	47
0.6	1.66	49



ภาพที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเกลียว (β) เฉลี่ยของท่อนาโนลิปิดกับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม

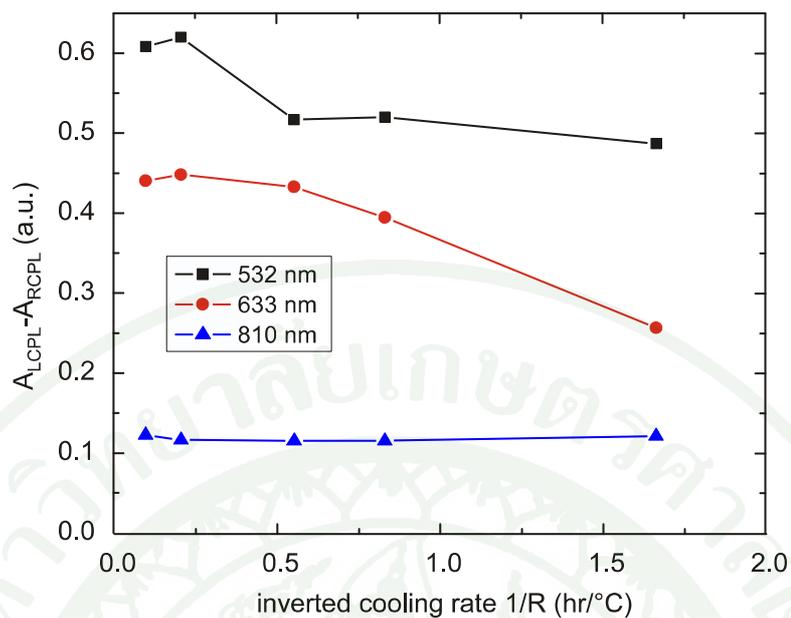
ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าท่อนาโนลิปิดเกิดจากการม้วนตัวของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้น และท่อเป็นทรงกระบอกกลวง เนื่องจากความเป็นไครอลของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิด และเมื่อวัดค่ามุมเกลียวเฉลี่ยของแต่ละอัตรา จะได้ค่ามุมเกลียวเฉลี่ยเป็น 37, 41, 44, 47 และ 49 ตามลำดับ เมื่อนำค่ามุมเกลียวเฉลี่ยและส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิมายืนยันกราฟ พบว่าเมื่อส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ามุมเกลียวจะเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ความยาวเกลียวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาลดลง

3. ผลการวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม

จากการทดลองนำท่อนาโนลิปิดที่ได้จากการลดอุณหภูมิแบบควบคุมทั้ง 5 อัตรา มาวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม จากเลเซอร์ 532 nm, 633 nm และ 810 nm พบว่าที่อัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุมเดียวกัน ท่อจะดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายได้มากกว่าแสงโพลาไรซ์ทางขวามือ (แสดงดัง ภาคผนวก ข) และเมื่อนำการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายและขวามาคำนวณหาค่าความแตกต่างการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมจากสมการ (2) จะได้ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์ดังแสดงในตารางที่ 4 และเมื่อนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมกับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิได้กราฟดังภาพที่ 39 และเมื่อนำค่าความแตกต่างการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์มาแทนค่าในสมการ (6) เพื่อหาค่า Molar ellipticity จะได้ค่า Molar ellipticity ในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5 และเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง molar ellipticity กับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิ ได้กราฟดังภาพที่ 40

ตารางที่ 4 ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์

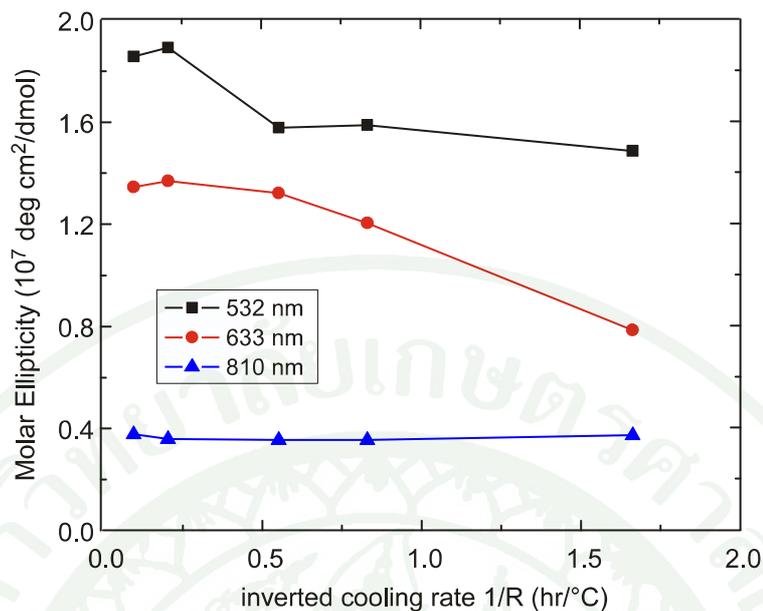
อัตราการลด อุณหภูมิ (°C/hr)	ส่วนกลับของ อัตราการลดอุณหภูมิ (hr/ °C)	ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์ วงกลม (a.u.)		
		532 nm	633 nm	810 nm
10	0.10	0.6084	0.4404	0.1226
4.8	0.21	0.6199	0.4481	0.1162
1.8	0.56	0.5168	0.4325	0.1151
1.2	0.83	0.5200	0.3942	0.1151
0.6	1.66	0.48702	0.2565	0.1212



ภาพที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมกับ ส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม

ตารางที่ 5 Molar ellipticity ในแต่ละอัตรา และแต่ละเลเซอร์

อัตราการลด อุณหภูมิ (°C/hr)	ส่วนกลับของ อัตราการลดอุณหภูมิ (hr/ °C)	Molar Ellipticity (10^7 deg cm ² /dmol)		
		532 nm	633 nm	810 nm
10	0.10	1.85	1.34	0.37
4.8	0.21	1.89	1.36	0.35
1.8	0.56	1.57	1.32	0.35
1.2	0.83	1.58	1.20	0.35
0.6	1.66	1.48	0.78	0.37



ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง molar ellipticity กับส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม

ผลจากการวิเคราะห์ความเป็นไครอลของท่อนาโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม ที่เลเซอร์ 532 nm และ 633 nm แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมและค่า molar ellipticity จะขึ้นอยู่กับอัตราการลดอุณหภูมิแบบควบคุม กล่าวคือ เมื่อส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิมีน้อย (อัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลามาก) ความแตกต่างในการดูดกลืน และค่า Molar ellipticity จะมาก ในขณะที่ส่วนกลับของอัตราการลดอุณหภูมิมีน้อยมาก ความแตกต่างในการดูดกลืน และค่า Molar ellipticity จะน้อย โดยที่เลเซอร์ 810 nm ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนานโนลิปิด โดยการลดอุณหภูมิแบบควบคุม สรุปได้ว่าเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลานานมาก จะได้ท่อนานโนลิปิดที่มีความยาวน้อย ในขณะที่เมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาน้อย จะได้ท่อนานโนลิปิดที่มีความยาวมาก

จากการศึกษาโครงสร้างภายนอก ลักษณะทางกายภาพ และหาค่ามุมเกลียวของท่อนานโนลิปิด สรุปได้ว่าท่อนานโนลิปิดเกิดจากการม้วนตัวของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้น และเป็นท่อทรงกระบอกกลวงเนื่องจากความเป็นไครอลของโมเลกุลชั้นคู่ลิปิด และค่ามุมเกลียวจะขึ้นอยู่กับอัตราการลดอุณหภูมิ คือเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลานานมาก มุมเกลียวจะมีค่าน้อย ในขณะที่อัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาต่ำน้อย มุมเกลียวจะมีค่ามาก

จากการศึกษาความเป็นไครอลของท่อนานโนลิปิดโดยคุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม สรุปได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบท่อนานโนลิปิดที่อัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลานาน พบว่าจะดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายได้มากกว่าแสงโพลาไรซ์วงกลมทางขวามือ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการลดอุณหภูมิต่อแต่ละอัตรา พบว่าความแตกต่างในการดูดกลืน และค่า Molar ellipticity จะขึ้นอัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลานานมาก ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมและค่า Molar ellipticity จะมีค่ามาก ซึ่งหมายความว่าท่อนานโนลิปิดมีความเป็นไครอลมาก เมื่ออัตราการลดอุณหภูมิต่อเวลาน้อย ความแตกต่างในการดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมและค่า Molar ellipticity จะมีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าท่อนานโนลิปิดมีความเป็นไครอลน้อย (เฉพาะที่เลเซอร์ 532 nm และ 633 nm)

ข้อเสนอแนะ

ผลจากการศึกษาความเป็นไครอลของท่อนานโนลิปิด โดยใช้คุณสมบัติเซอร์คูลาร์ไดโครอิสซึม พบว่าการศึกษาความเป็นไครอลของท่อนานโนลิปิด ควรใช้ความยาวคลื่นเลเซอร์ต่ำกว่า 810 nm

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

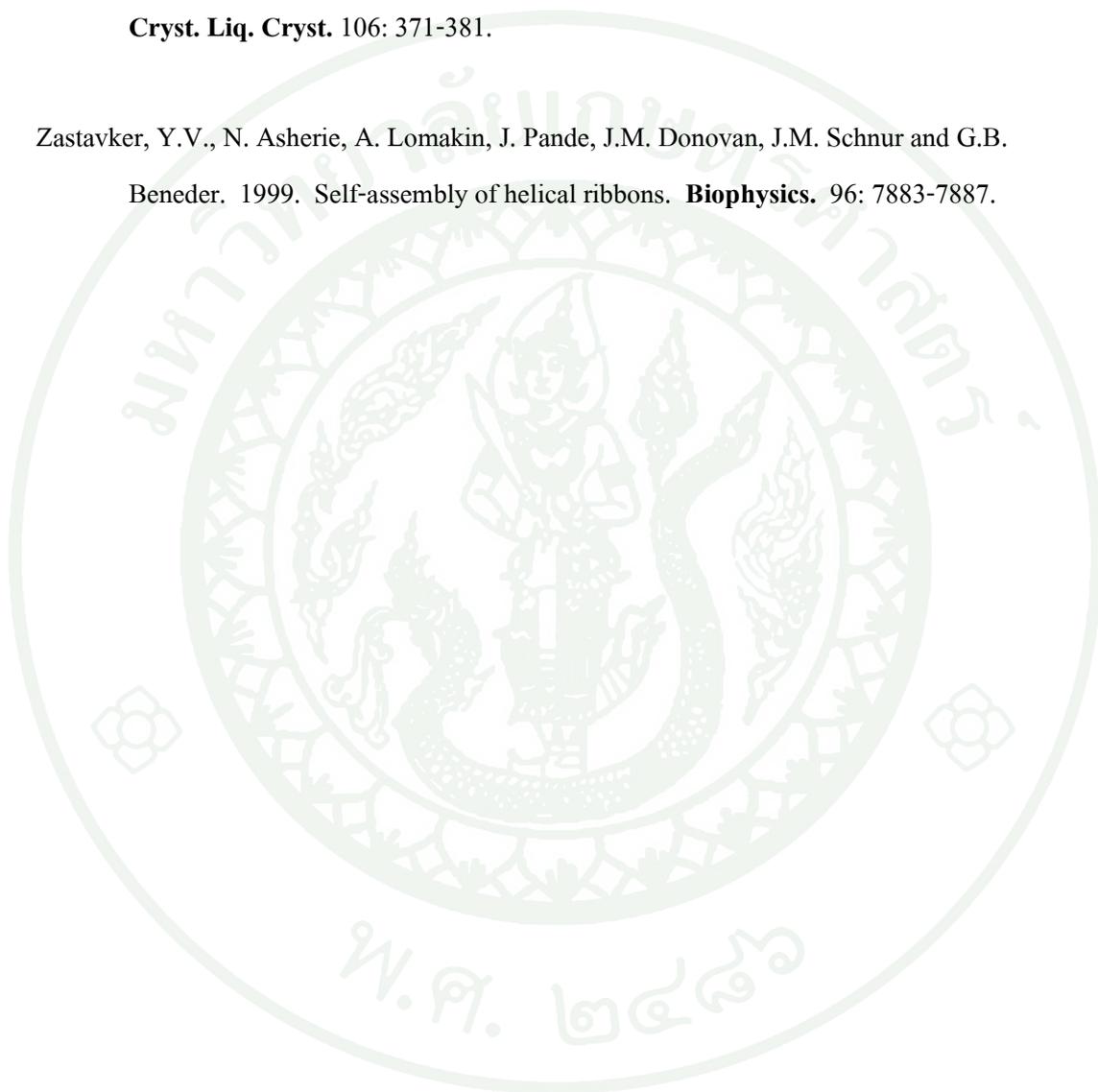
- Clark, N.A. and S.T. Langerwall. 1980. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals. **Appl. Phys. Lett** 36(11): 899-901.
- Georger, J.H., A. Singh, R.R. Price, J.M. Schnur, P. Yager, and P.E. Schoen. 1987. Helical and tubular microstructures formed by polymerizable phosphatidylcholines. **J. Am. Chem. Soc.** 109(20): 6169-6175.
- Hu, Z.N. and V.C. Lo. 2005. Chiral Lipid Bilayers with Cylindrical Symmetry. **World Scientific**. 19(18): 2999-3011.
- Nidhi, M., Y. Zhao, T. Du and J.Fang. 2006. Nanoscale Ripples in Self-Assembled Lipid Tubules. **Langmuir**. 22: 1973-1975.
- Pakhomov, S., R.P. Hammer, B.K. Mishra and B.N. Thomas. 2003. Chiral tubule self-assembly from an achiral diynoic lipid. **Pans**. 100(6): 3040-3042.
- Rodger, A. and B. Norden. 1997. **Circular Dichroism and Linear Dichroism**. Oxford University Press, England
- Schnur, J.M. 1993. Lipid Tubules: A Paradigm for Molecularly Engineered Structure. **Science**. 262: 1669-1676
- Selinger, J.V. and J.M. Schnur. 1993. Theory of Chiral Lipid Tubules. **Phys. Rev. Lett.** 71(24): 4092-4094
- Selinger, J.V., M.S. Spector and J.M. Schnur. 2001. Theory of Self-Assembled Tubules and Helical Ribbons. **J. Phys. Chem. B**. 105(30): 7157-7169.

- Singh, A., E.M. Wong, M.S. Spector and J.M. Schnur. 2002. Formation of Supramolecular Assemblies by Modulation Self-Assembling Properties of Diacetylenic Phosphocholines. **Mat. Res. Soc.** 711(HH3.36):1-6
- Singh, A., E.M. Wong and J.M. Schnur. 2003. Toward the Rational Control of Nanoscale Strucetylenic Phosphocholices. **Langmuri.** 19: 1888-1898.
- Spector, M.S., R.K. Easwaran, G.Jyothi, J.V. Selinger, A. Singh and J.M. Schnur. 1996. Chiral molecular self-assembly of phospholipids tubules:A circular dichroism study. **Biophysics.** 93: 12943-12946.
- Spectot, M.S., J.V. Selinger, A. Singh, J.M. Rodriguez, R.R. Price and J.M. Schnur. 1998. Controlling the Morphology of Chiral Lipid Tubules. **Langmuir.** 14: 3493-3500.
- Spector, M.S., R.R. Price and J.M. Schnur. 1999. Chiral Lipid Tubules. **Adv. Mater.** 11(4): 337-340.
- Spector, M.S., A. Sing, P.B. Messersmith and J.M. Schnur. 2001. Chiral Self-Assembly of Nanotubules and Ribbons from Phospholipid Mixtures. **Nano Lett.** 1(7): 375-378.
- Svenson, S. and P.B. Messersmith. 1999. Formation of Polymerizable Phospholipid Nanotubules and Their Transformation into a Network Gel. **Langmuir.** 15: 4464-4471.
- Thomas, B.N., C.R. Safinya, R.J. Plano and N.A. Clark. 1995. Lipid Tubule Self-Assembly: Length Dependence on Cooling Rate Through a First-Order Phase Transition. **Science.** 267: 1635-1638.
- Thomas, B.N., R.C. Corcoran, C.L. Cotant, C.M. Lindemann, J.E. Kirsch and P.J. Persichini. 1998. Phosphonate Lipid Tubule 1. **J. Am. Chem. Soc.** 120: 12178-12186.

Thomas, B.N., C.M. Lindemann and N.A. Clark. 1998. Left-and right – handed helical tubule intermediates from a pure chiral phospholipids. **Phy. Rev. E.** 59(3): 3040-3047

Yager, P. and P.E Schoen. 1984. Formation of tubules by a polymerizable surfactant. **Mol. Cryst. Liq. Cryst.** 106: 371-381.

Zastavker, Y.V., N. Asherie, A. Lomakin, J. Pande, J.M. Donovan, J.M. Schnur and G.B. Beneder. 1999. Self-assembly of helical ribbons. **Biophysics.** 96: 7883-7887.



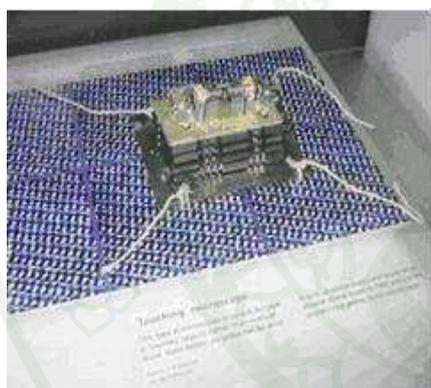


ภาคผนวก

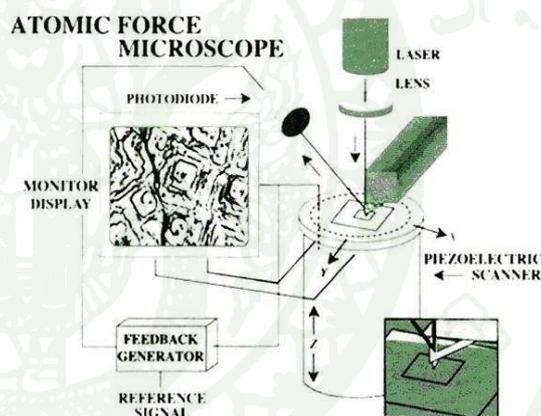


กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

Binnig, Quate และ Gerber (1986) ได้ร่วมกันประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์แบบใหม่ที่เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM) เครื่องแรกดังภาพผนวกที่ ก1 (ก) โดยเครื่อง AFM จะมีปลายเข็มติดอยู่กับปลายแขนเล็กซึ่งสามารถสแกนไปบนพื้นผิวคล้ายๆ กับเครื่อง STM ดังภาพผนวกที่ ก1 (ข) ขณะที่สแกนแรงอ่อนๆ เพียงนิดเดียวระหว่างปลายเข็มและผิวทำให้แขนนี้เกิดการโค้งงอ การวัดการงอของแขนทำให้สามารถสร้างภาพสามมิติของพื้นผิวได้จากความสำเร็จในการประดิษฐ์เครื่อง AFM ได้เปิดประตูสู่โลกของพื้นผิวในระดับนาโนเทคโนโลยี ทำให้สามารถศึกษาวัสดุต่างๆ ในระดับอะตอม ทราบโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอม เป็นต้น ซึ่งนำมาสู่องค์ความรู้ความเข้าใจที่มีประโยชน์อย่างมากในสาขาวิชาต่างๆ



(ก)



(ข)

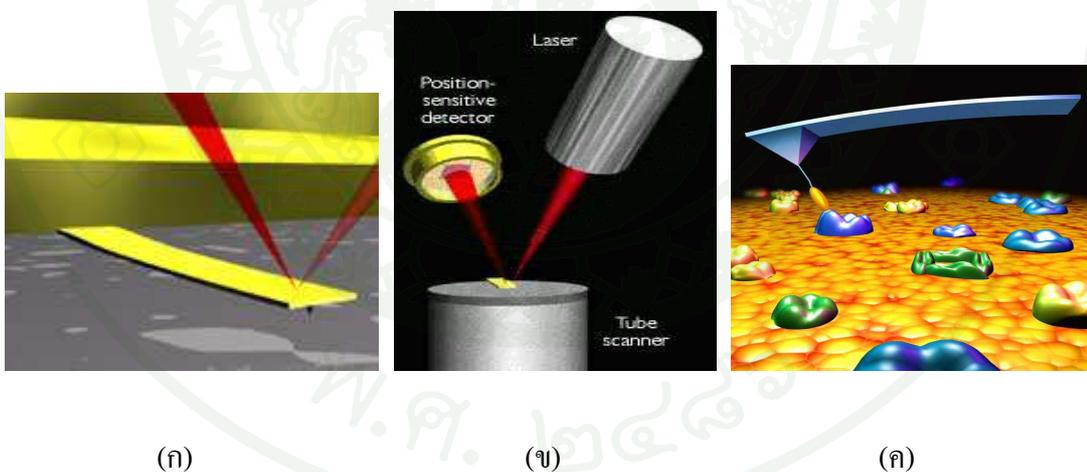
ภาพผนวกที่ ก1 (ก) เครื่อง AFM เครื่องแรกของโลก (ข) แสดงหลักการทำงานของเครื่อง AFM

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

1. หลักการทำงานของเครื่อง AFM

กล้องจุลทรรศน์แบบนี้ เป็นกล้องที่อาศัยเข็มขนาดเล็กกวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งสามารถวัดคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงานได้ ดังเช่น ความสูง การดुकกลืนแสง หรือสนามแม่เหล็ก เป็นต้น เนื่องจากปลายเข็มมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถตรวจสอบได้ในบริเวณที่เล็กมากๆ ถึงขนาดระดับอะตอม โดยเข็มจะกวาดไปบนพื้นผิว และแปรผลที่ได้ ออกเป็นภาพกราฟิกทางคอมพิวเตอร์

ภาพผนวกที่ ก2 (ก) คานกระเดื่องที่มีเข็มติดอยู่ด้านล่าง จะสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ภาพผนวกที่ ก2 (ข) แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง ใช้เครื่องตรวจจับโฟตอนความเร็วสูงรับ และแปรผลออกมาเป็นภาพ โดยมีหลอดสแกน (scanner tube) ด้านล่างทำหน้าที่ขยับชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อให้เข็มสามารถกวาดไปได้บนพื้นผิวของชิ้นงาน ภาพผนวกที่ ก2 (ค) ซึ่งหลอดสแกนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 mm ขณะที่คานกระเดื่องยาวเพียง 100 ไมโครเมตรหรือ 0.0001 เมตร



ภาพผนวกที่ ก2 (ก) แสดงคานกระเดื่องที่มีเข็มติดอยู่ด้านล่าง (ข) แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง (ค) เข็มที่กวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง

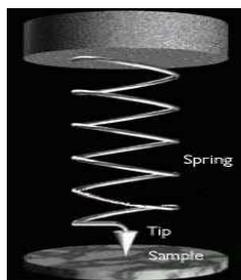
ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

หลักการพื้นฐานของ AFM คืออาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นจากหัวเข็มกับพื้นผิวของชิ้นงาน โดยเข็มที่ติดอยู่บนคานกระเดื่อง และเคลื่อนที่กวาดไปบนชิ้นงาน หรือ ให้เข็มอยู่กับที่และชิ้นงานเคลื่อนที่ก็ได้ ทำให้คานกระเดื่องบิดตัวขึ้นลงตามความสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง ก็จะเปลี่ยนทิศทางการสะท้อนตามการบิดตัวของคานกระเดื่อง นำข้อมูลของเลเซอร์ที่ได้ไปแปรผล ก็สามารถสร้างภาพพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้ โดย AFM ให้ภาพที่ความละเอียดสูงมาก ถึงระดับ 10 pm และยิ่งดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนเพราะสามารถนำชิ้นงานตัวอย่างไปวัดในอากาศหรือในของเหลวก็ได้

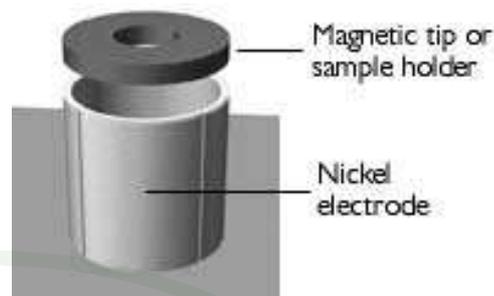
2. ส่วนประกอบของ AFM

- 2.1 แสงเลเซอร์
- 2.2 เครื่องตรวจจับโฟตอนความเร็วสูง
- 2.3 คานกระเดื่อง
- 2.4 หัวเข็ม
- 2.4 ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง
- 2.5 ระบบควบคุมแบบย้อนกลับ
- 2.6 หลอดสแกนภาพ

โดยแสงเลเซอร์จะส่องไปที่คานกระเดื่อง เพื่อตรวจวัดการบิดของคานกระเดื่อง การบิดตัวของคานกระเดื่องแม้เพียงเล็กน้อย จะทำให้การเบี่ยงเบนของมุมเลเซอร์เปลี่ยนไปเป็น 2 เท่า และระยะจากคานกระเดื่องถึงเครื่องตรวจจับโฟตอนมีความยาวมากกว่าตัวกระเดื่อง 1000 เท่า ดังนั้นเมื่อใช้แสงเลเซอร์ตรวจสอบจะสามารถขยายผลที่เกิดจากการบิดได้หลายพันเท่า ความละเอียดของเครื่องจึงสูงมาก โดยเข็มที่กดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานมีค่าน้อยมาก จึงทำให้พื้นผิวของชิ้นงานไม่บิด และเข็มก็ไม่หักด้วย โดยปกติเข็มของ AFM มีค่าคงที่ของสปริง 0.1 N/m (ภาพผนวกที่ ก3 ก) โดยชิ้นงานตัวอย่างวางไว้บนหลอดสแกนภาพ (ภาพผนวกที่ ก3 ข) ซึ่งทำจากเซรามิก มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก คือสามารถที่จะขยายหรือหดตัวได้ เมื่อใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป คุณสมบัตินี้จะทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่บนแกน x หรือ y ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ กล่าวคือ เมื่อต้องการให้เข็มสแกนไปบนแกน x ซึ่งจริงๆแล้วไม่ใช่เข็มเคลื่อนที่ไปบนแกน x แต่ว่าเป็นหลอดสแกนเคลื่อนที่ โดยควบคุมที่แรงดันไฟฟ้า ส่วนเข็มจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงเท่านั้น



(ก)

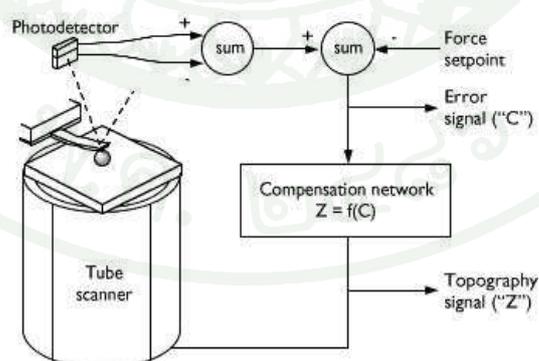


(ข)

ภาพผนวกที่ ก3 (ก) ภาพของเข็มที่ติดอยู่บนสปริง (ข) ภาพของหลอดสแกนภาพ ทำจากสารเพียโซเซรามิกซึ่งจะเปลี่ยนขนาดเมื่อใส่แรงดันไฟฟ้า

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

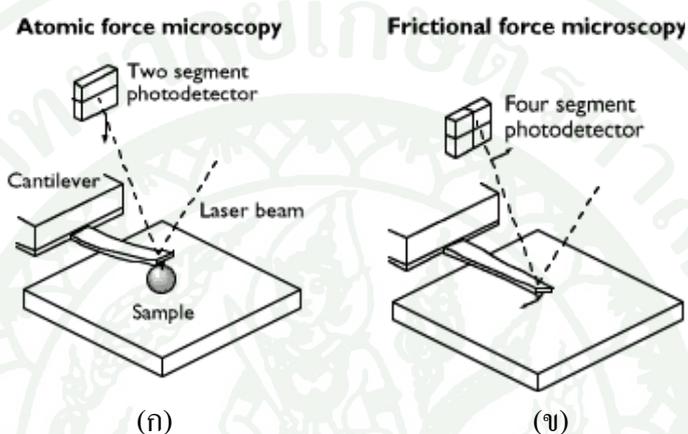
ระบบควบคุมแบบย้อนกลับภาพผนวกที่ ก5 เป็นระบบควบคุมที่ฉลาด คือสามารถที่จะปรับระดับความสูงของหัวเข็มกับผิวของชิ้นงานให้คงที่ตลอด จากการตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา เมื่อระยะเปลี่ยนไป ระบบควบคุมจะปรับแต่งหลอดสแกนภาพซึ่งเป็นที่ตั้งของชิ้นงานให้ขึ้นหรือลง ถ้าระยะห่างไป จะปรับขึ้น และถ้าสูงไปจะปรับลง ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้รวดเร็ว และใช้เวลาสั้นในระดับไมโครวินาที โดยข้อมูลที่ได้จากการขึ้นลงของหัวเข็มจะถูกแปรเป็นภาพกราฟิกทางคอมพิวเตอร์



ภาพผนวกที่ ก4 ระบบควบคุมของ AFM เป็นระบบแบบย้อนกลับ สามารถควบคุมให้ระยะของหัวเข็มของพื้นผิวของชิ้นงานคงที่ตลอดได้

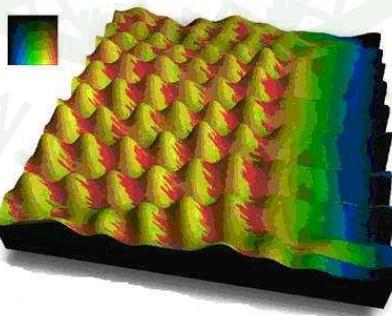
ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

โดยปกติเข็มจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงเท่านั้น ภาพผนวกที่ ก5 (ก) ส่วนหลอดสแกนจะช่วยให้เข็มสามารถกวาดไปบนแกน x และ y ได้ ดังนั้นเครื่องตรวจจับโฟตอนจึงวัดอยู่เพียง 2 แกนเท่านั้น ส่วนภาพผนวกที่ ก5 (ข) ทางขวา เป็น AFM แบบพิเศษ ที่สามารถวัดแรงเสียดทาน ระหว่างเข็มกับผิวชิ้นงานได้ ดังนั้นคันกระเดื่องจึงต้องบิดตัวในแนวระดับและแนวตั้งได้ เครื่องตรวจจับโฟตอนจะต้องวัดได้ถึง 3 แกนคือได้ทั้งด้าน x y และ z ดังภาพผนวกที่ ก7



ภาพผนวกที่ ก5 (ก) เข็มจะเคลื่อนที่ขึ้นและลง เครื่องตรวจจับโฟตอนจึงวัดอยู่เพียง 2 แกน (ข) เป็น AFM แบบพิเศษ เครื่องตรวจจับโฟตอนจะต้องวัดได้ถึง 3 แกนคือ x, y และ z

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)



ภาพผนวกที่ ก6 ภาพขนาด 2.5mm x 2.5 mm สร้างขึ้นจากคอมพิวเตอร์กราฟิก เป็นภาพของอะตอมกราฟต์ แสดงภาพสีแบบ 3 มิติ รอยเว้าในภาพแสดงรูปร่างของอะตอม

ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2548)

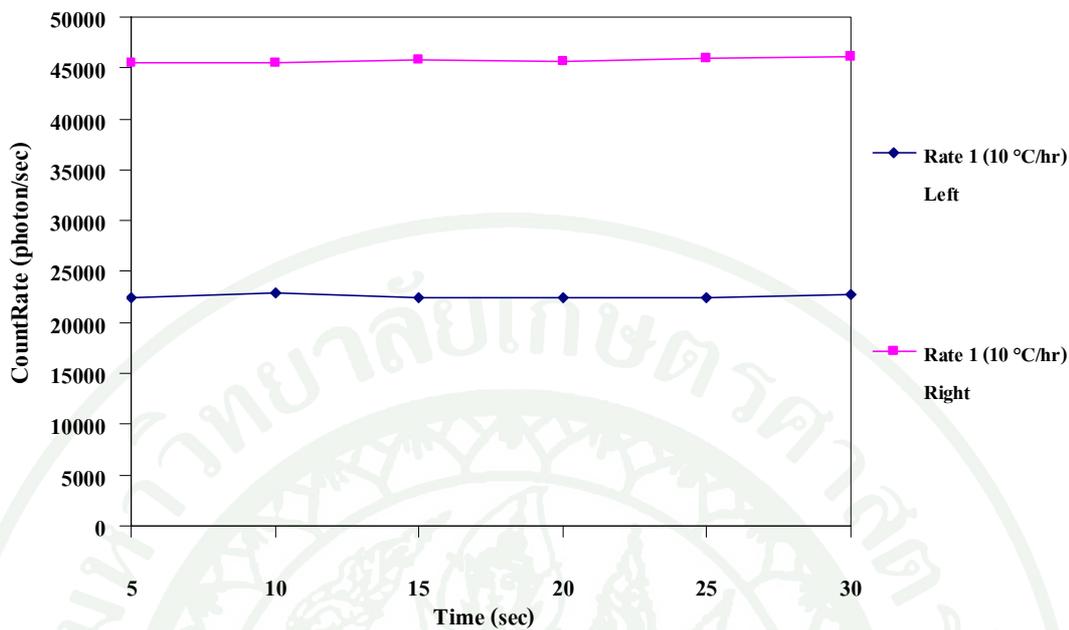


ภาคผนวก ข

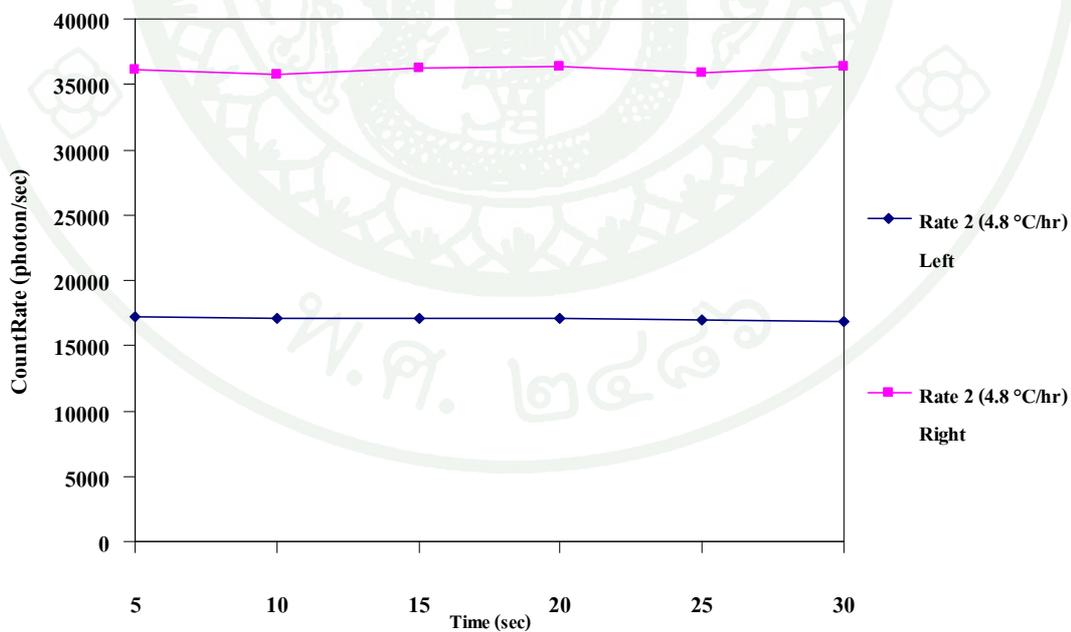
กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติเซอร์คูลาร์โคโคโรซิสซึม



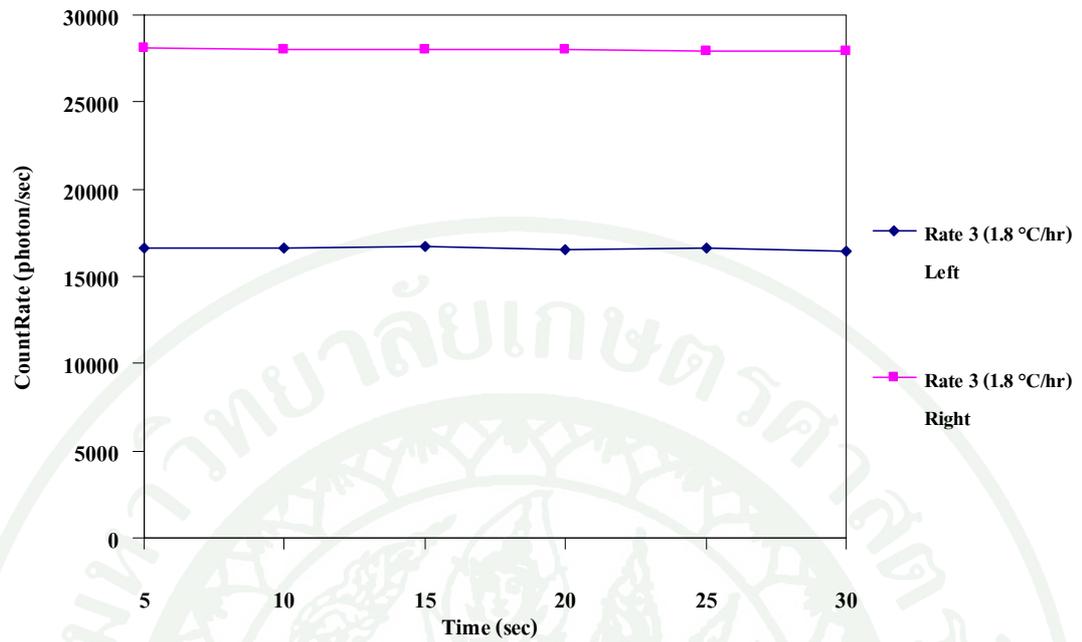
เลเซอร์ 532 nm



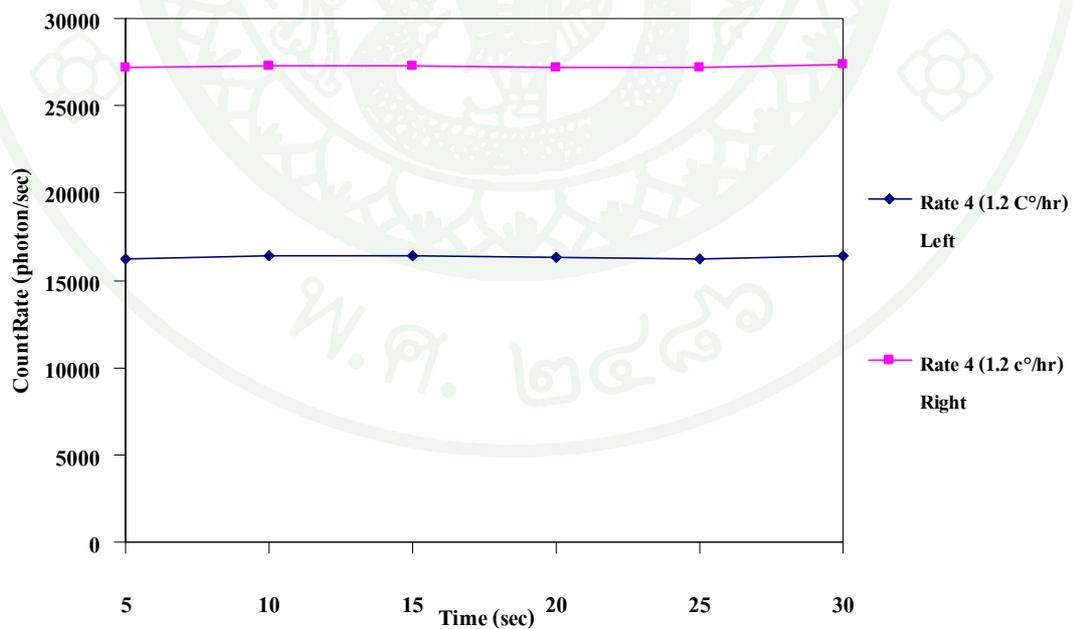
ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr



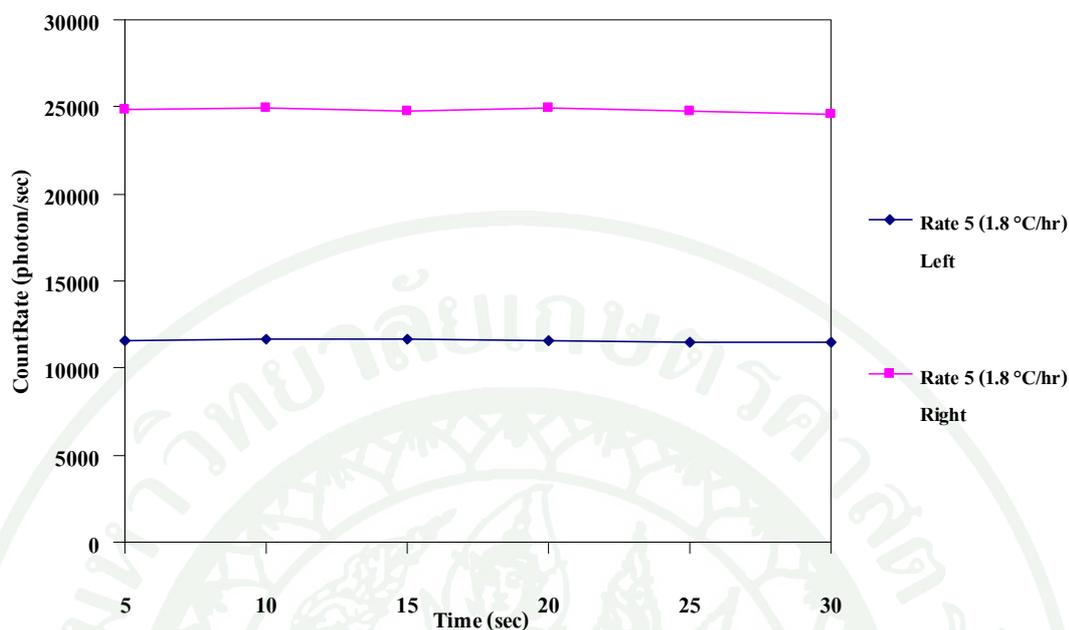
ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr



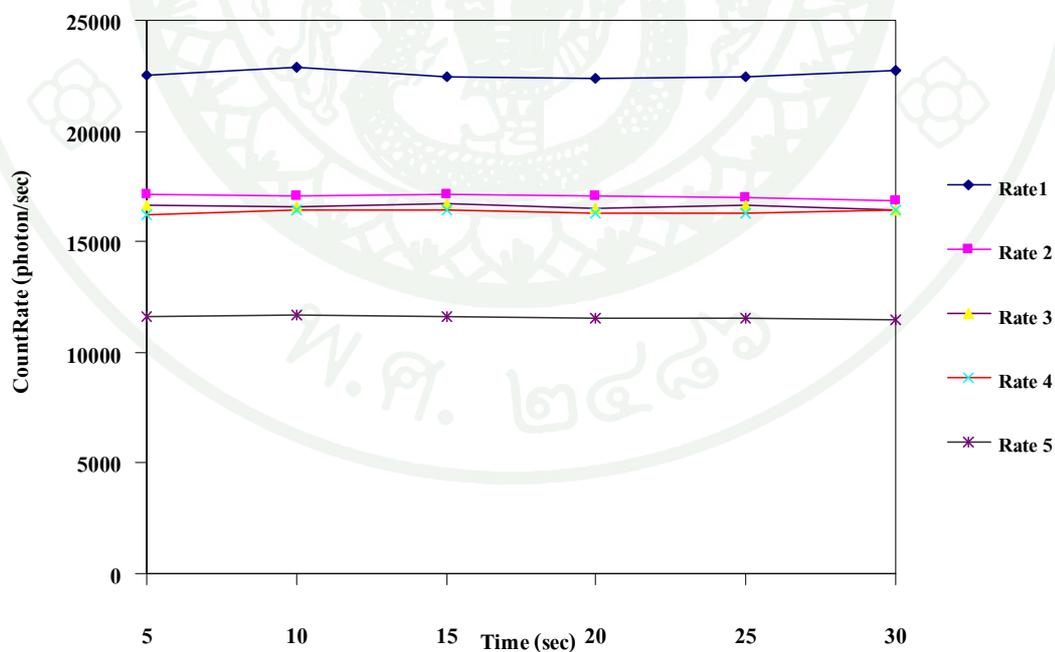
ภาพผนวกที่ ข3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr



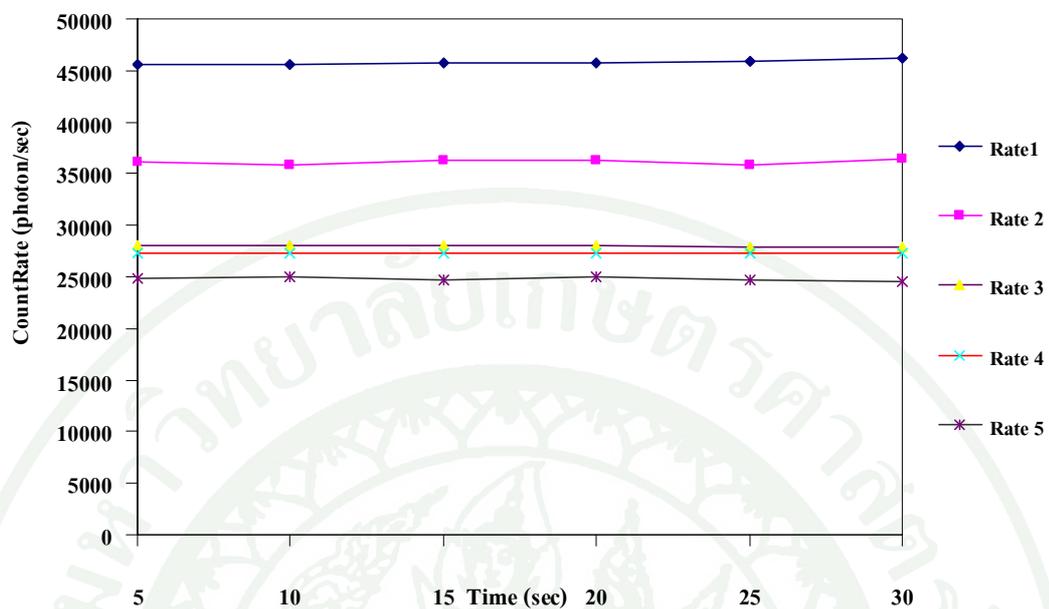
ภาพผนวกที่ ข4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr



ภาพผนวกที่ ข5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 0.6 °C/hr



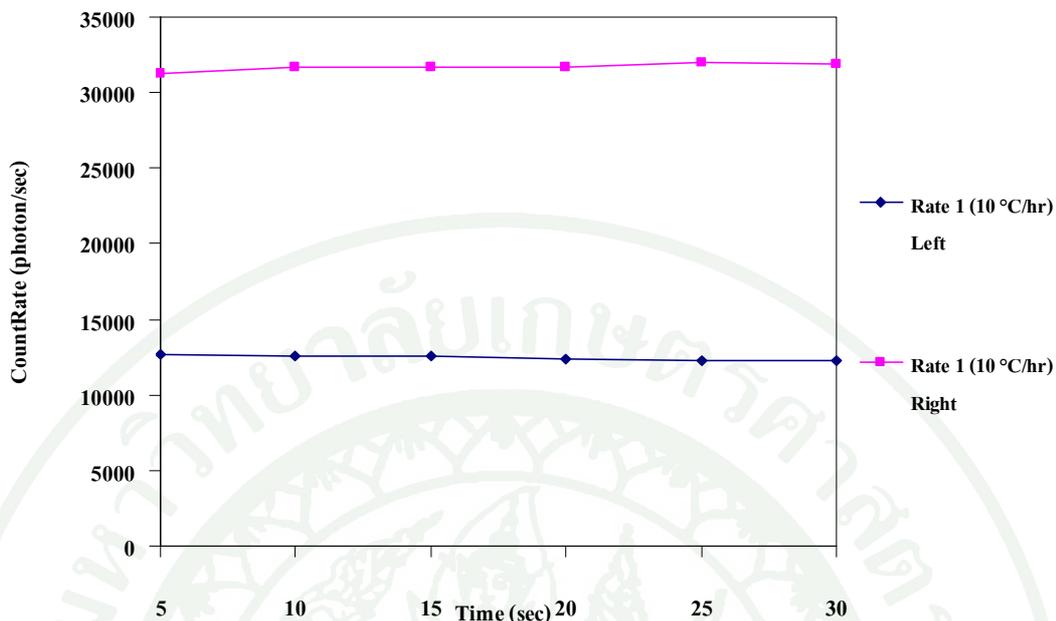
ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่ดูคลื่นแสงโพลาไรซ์วงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 532 nm



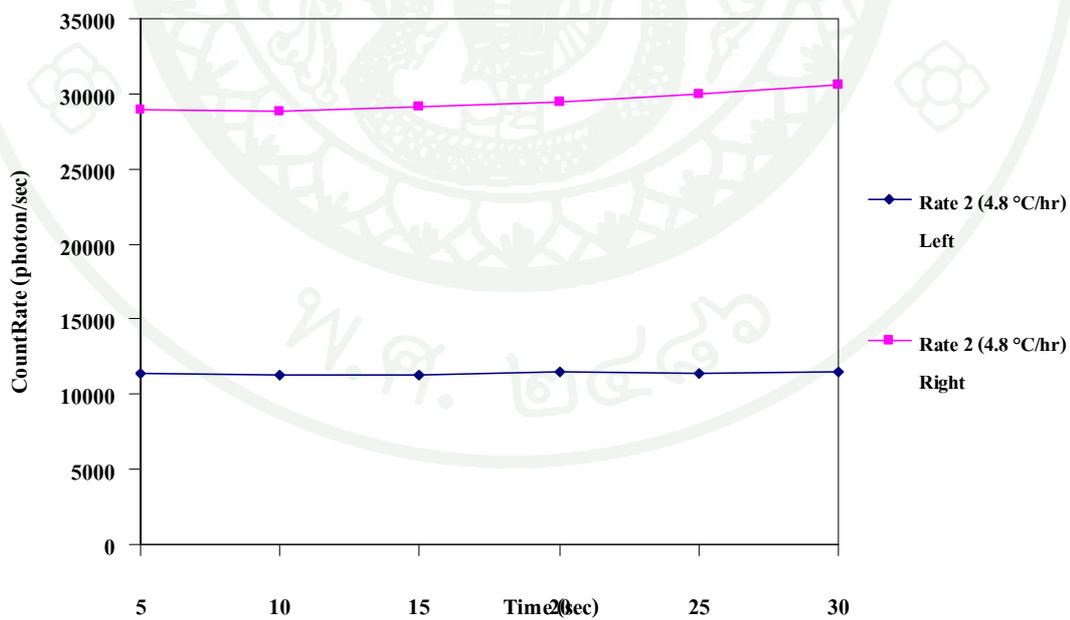
ภาพผนวกที่ ข7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่ดูดกลืนแสงโพลาไรซ์วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 532 nm



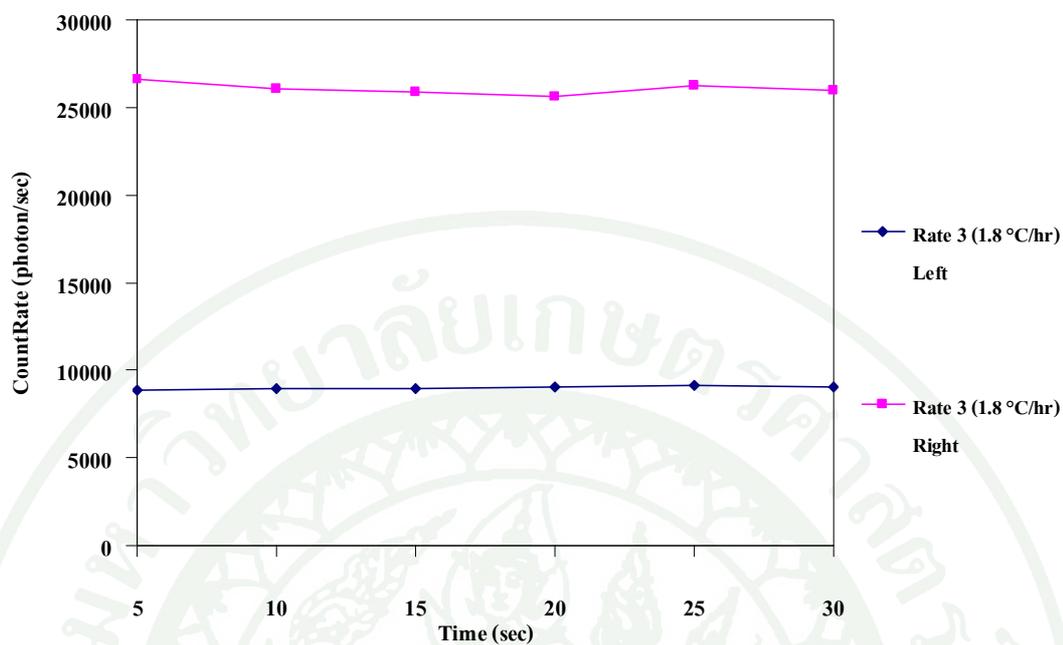
เลเซอร์ 633 nm



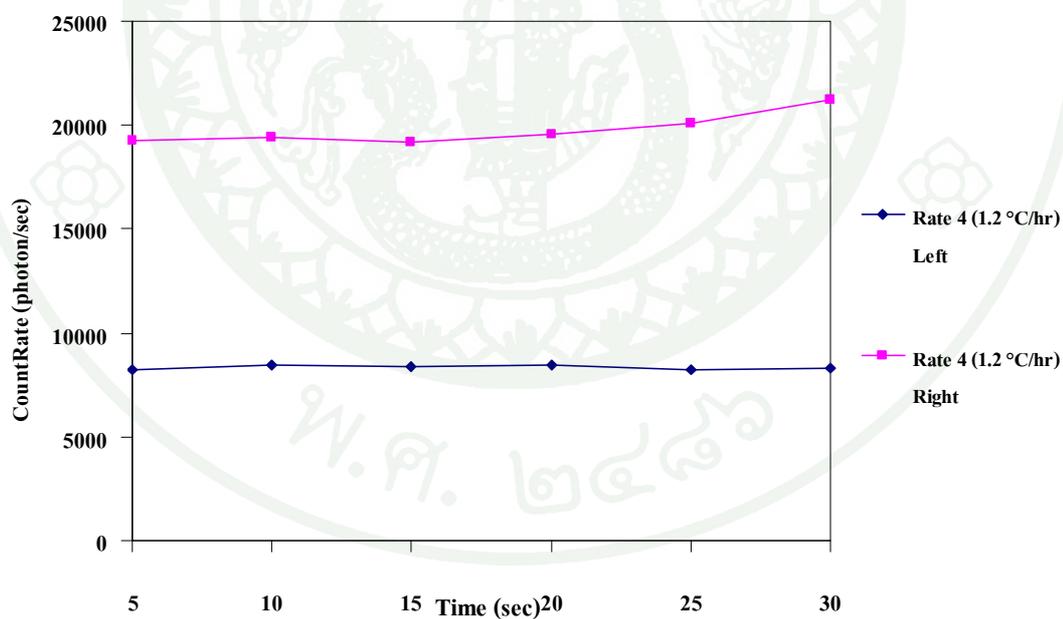
ภาพผนวกที่ ข8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr



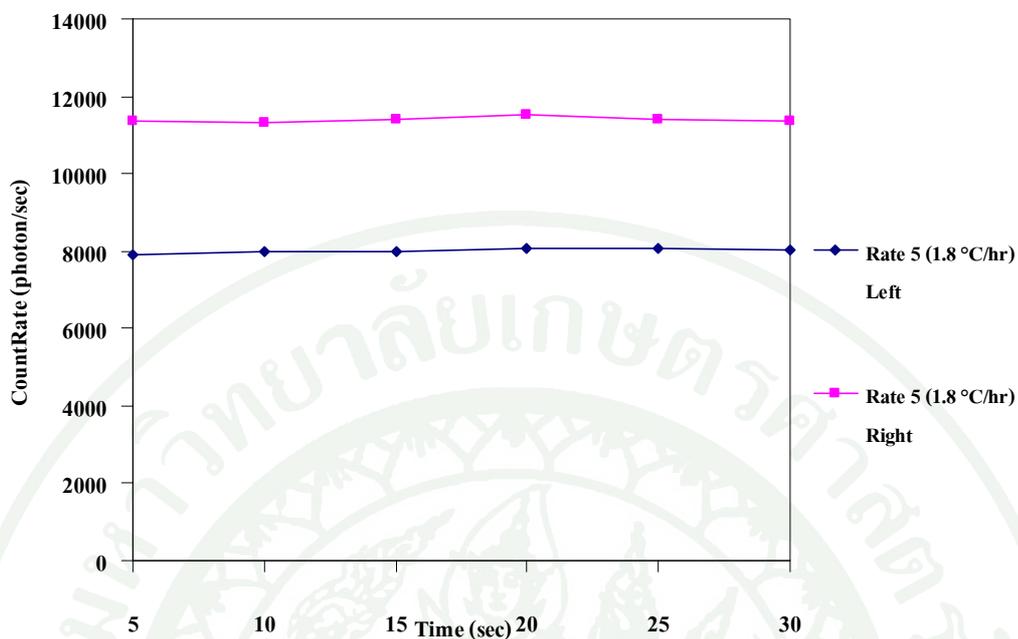
ภาพผนวกที่ ข9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr



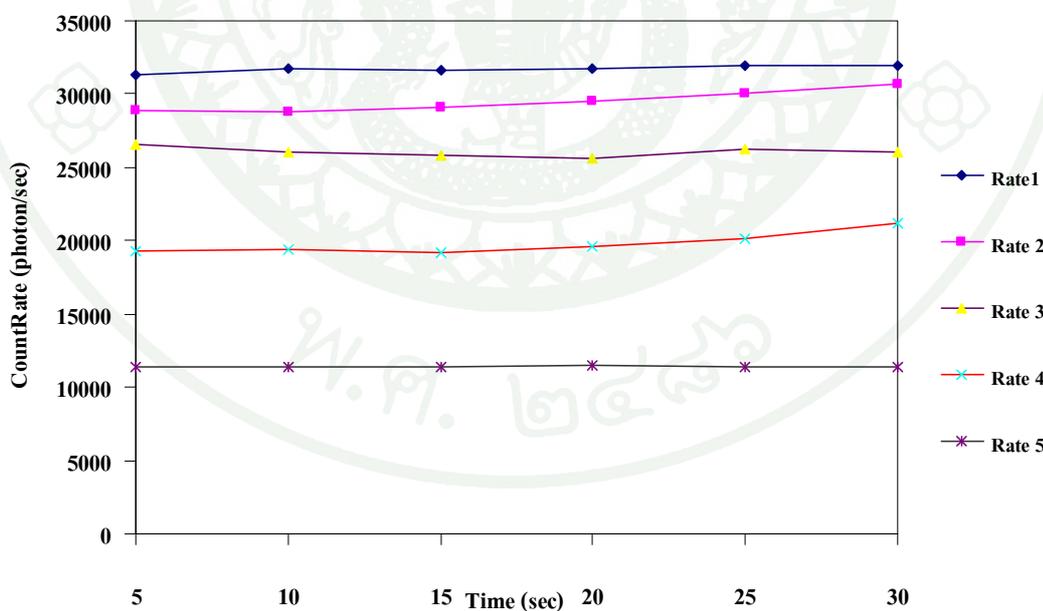
ภาพผนวกที่ ข10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr



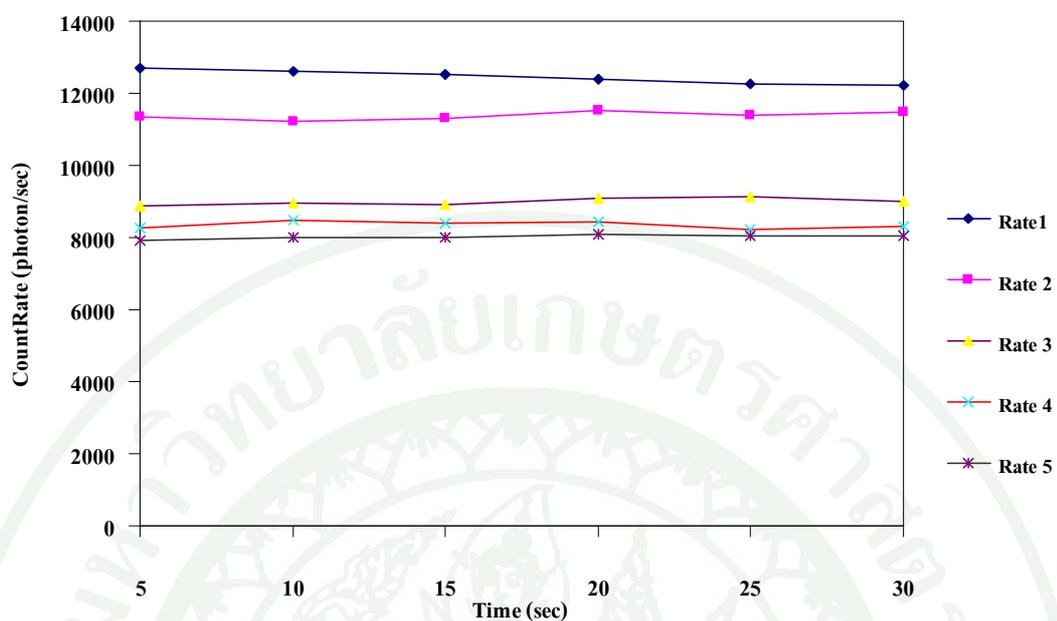
ภาพผนวกที่ ข11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr



ภาพผนวกที่ ข12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา $0.6\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$

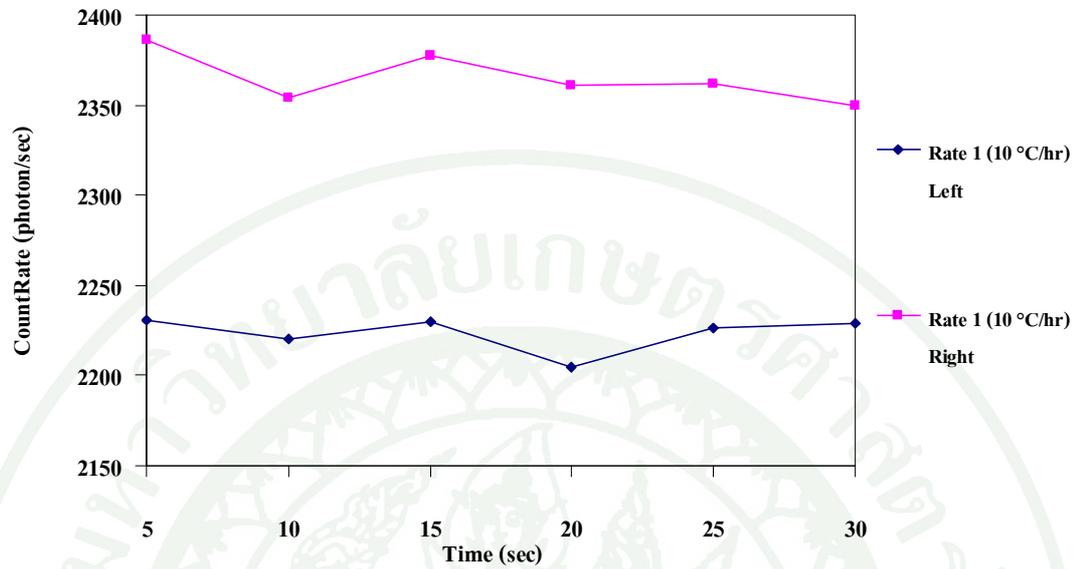


ภาพผนวกที่ ข13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่ดูคลื่นแสง
โพลาริซวงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm

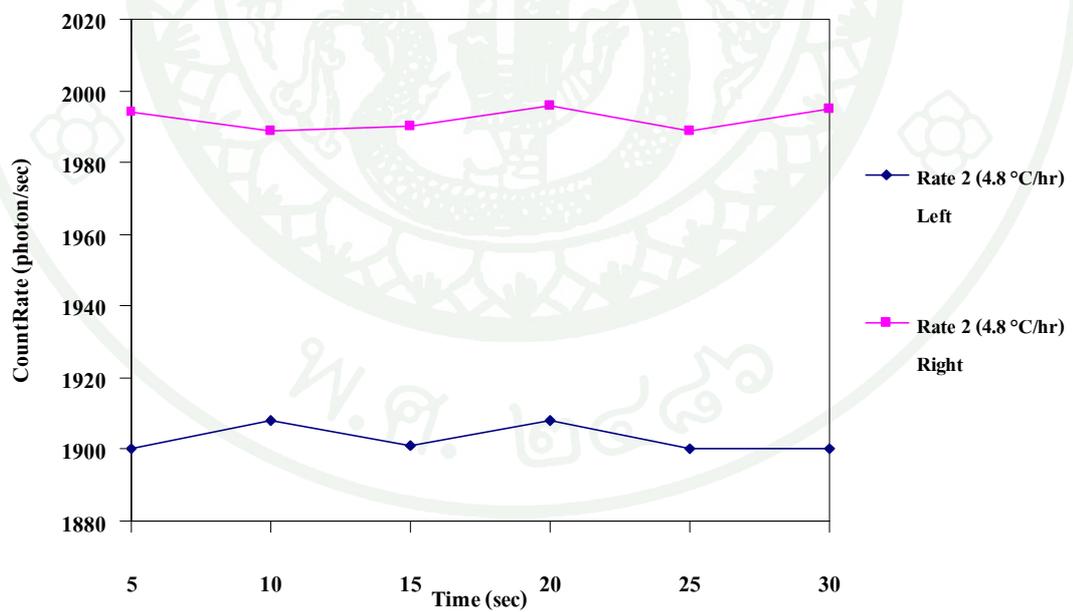


ภาพผนวกที่ ข14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่ดูคลื่นแสงโพลาไรซ์วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 633 nm

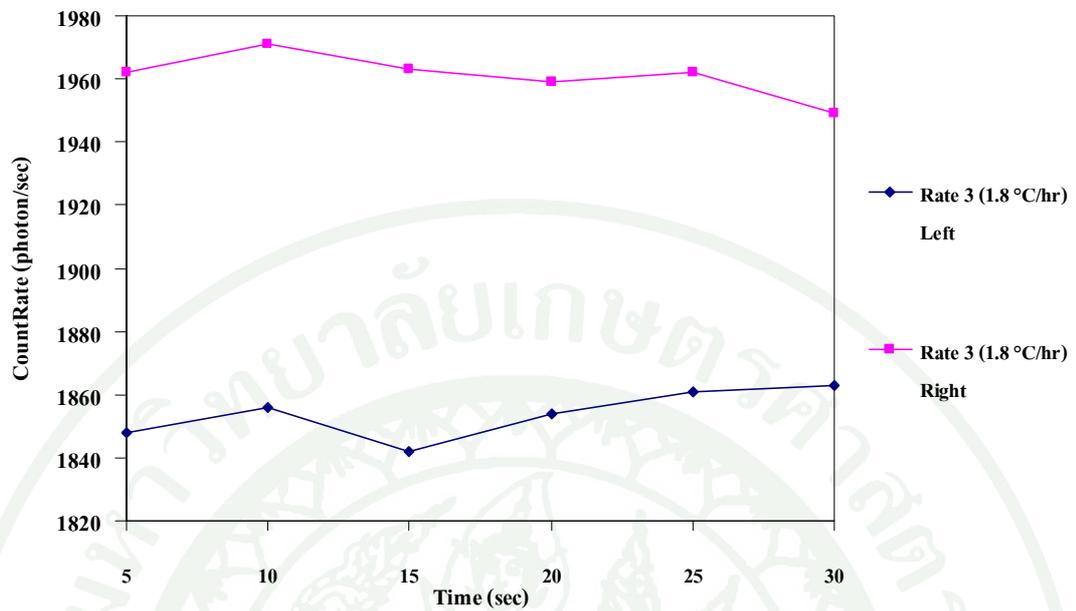




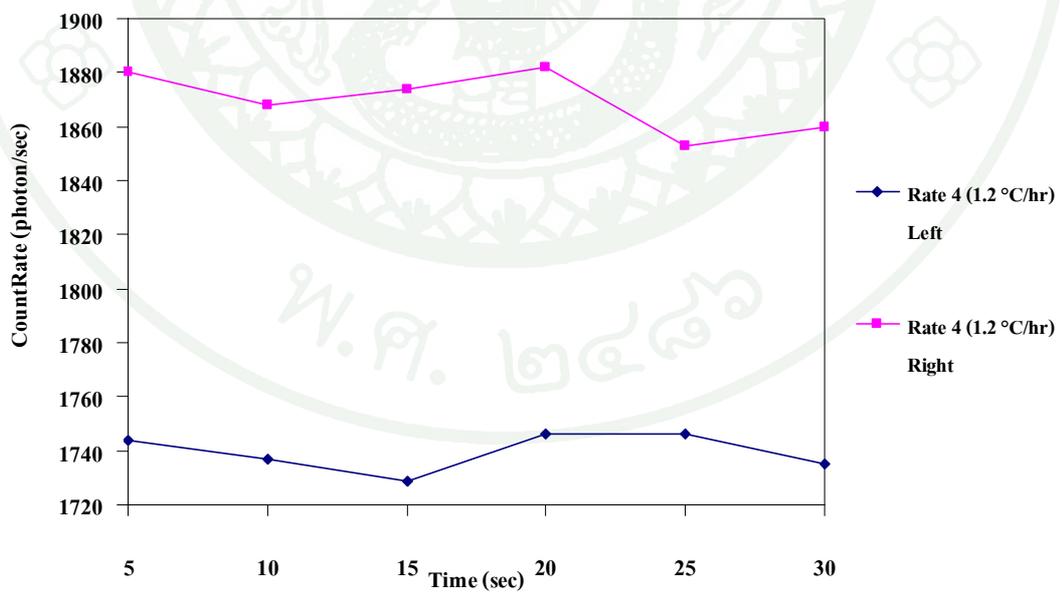
ภาพผนวกที่ ข15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 10 °C/hr



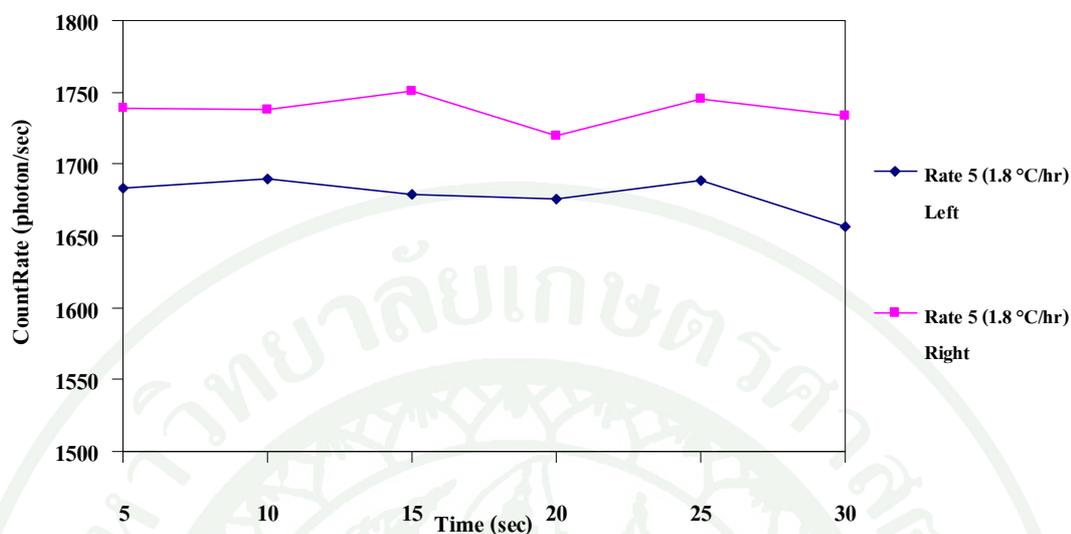
ภาพผนวกที่ ข16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 4.8 °C/hr



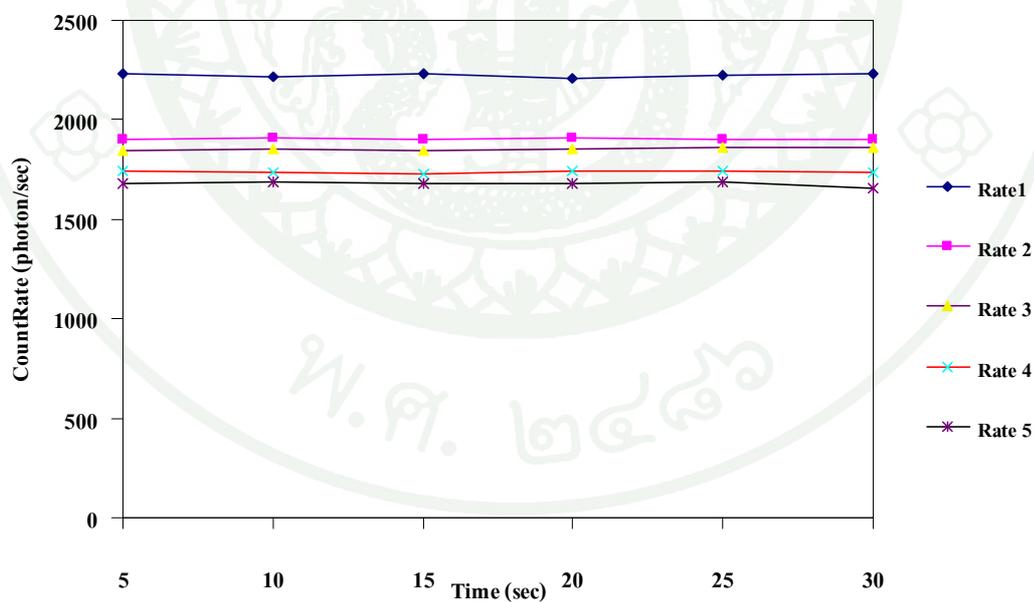
ภาพผนวกที่ ข17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.8 °C/hr



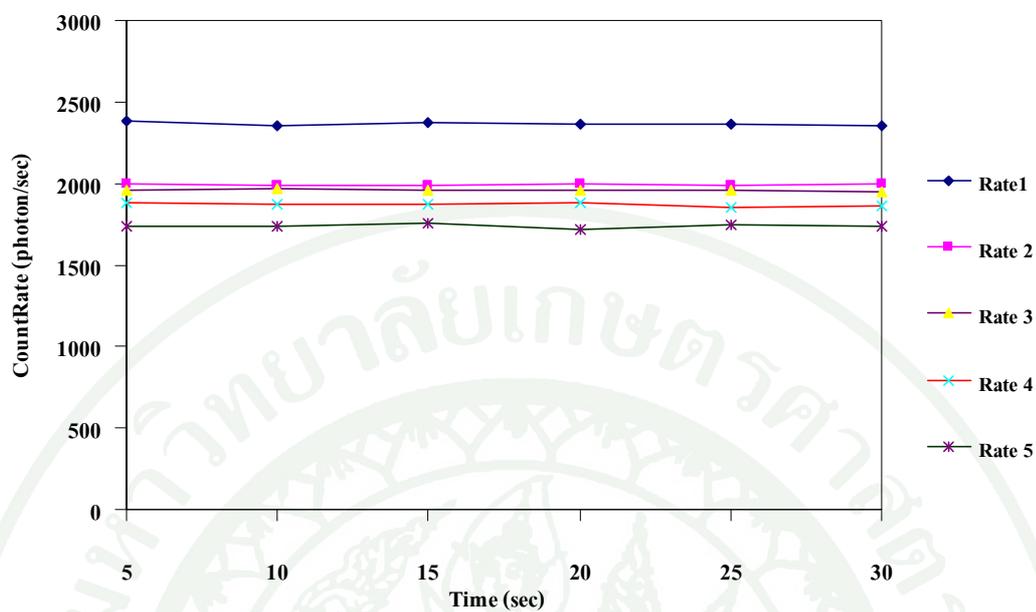
ภาพผนวกที่ ข18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 1.2 °C/hr



ภาพผนวกที่ ข19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่อัตรา 0.6 °C/hr



ภาพผนวกที่ ข20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลาที่ดูคลื่นแสง
โพลาริซวงกลมทางซ้ายของทุกอัตราที่เลเซอร์ 810 nm



ภาพผนวกที่ ข21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนต่อเวลา ที่จุดคลื่นแสงโพลาไรซ์ วงกลมทางขวาของทุกอัตราที่เลเซอร์ 810 nm

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวยูวธิดา จันทร์ทิพนา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	18 เดือน เมษายน พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	อำเภอชัยบุรี จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยทักษิณ (พ.ศ. 2548)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ครูอัตราจ้าง อบจ. นนทบุรี
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงเรียนไทรน้อย ต.ไทรน้อย อ. ไทรน้อย จ. นนทบุรี
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2550-2551)