

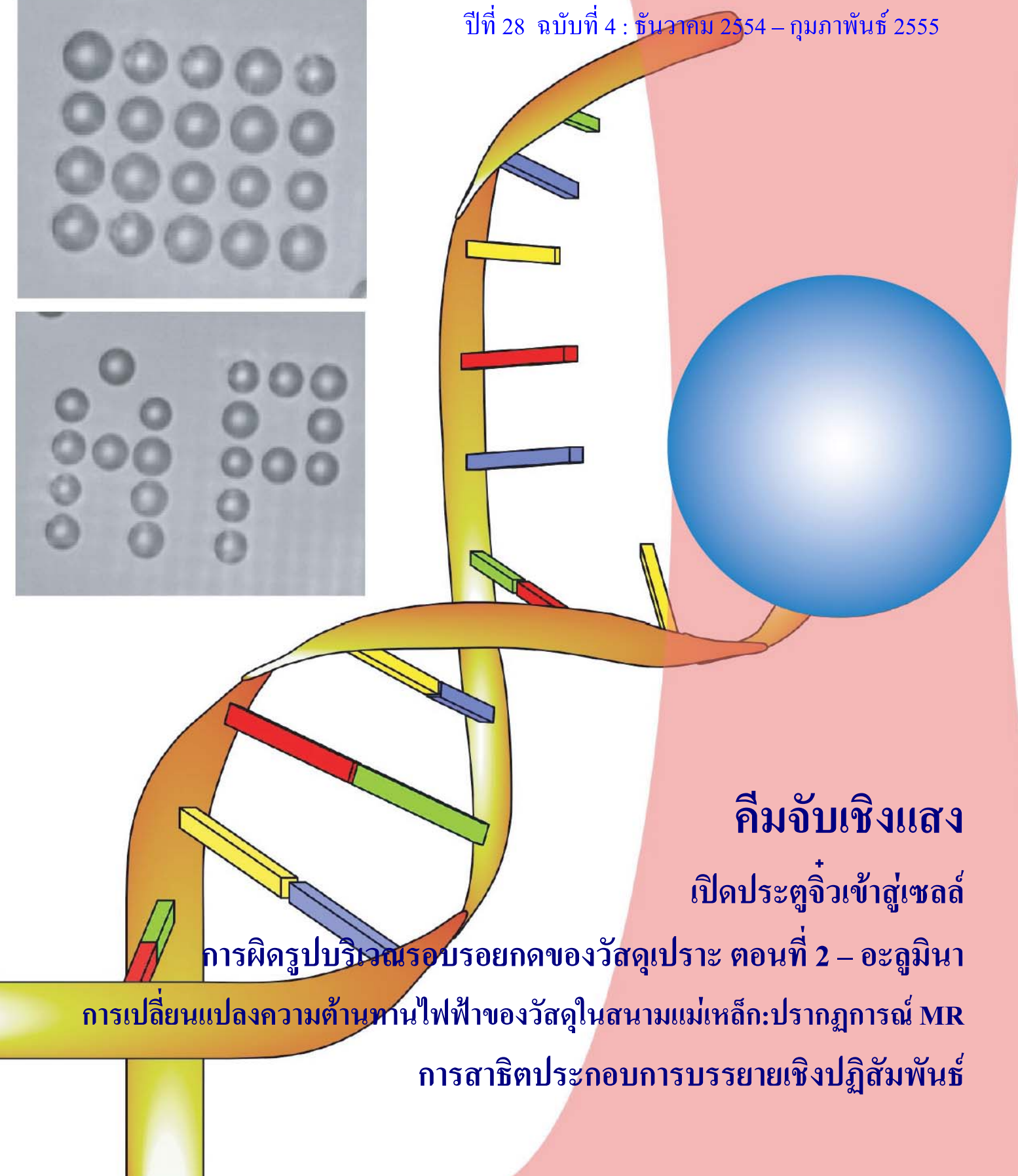
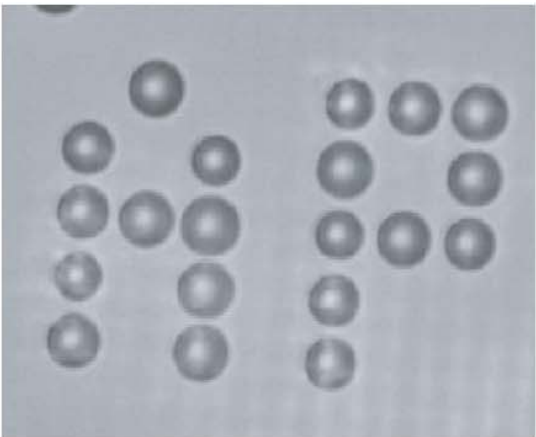
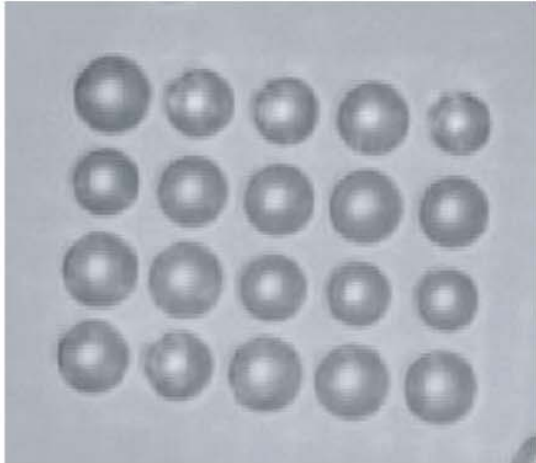
วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 : ธันวาคม 2554 – กุมภาพันธ์ 2555



กิมจับเชิงแสง

เปิดประตูสู่เซลล์

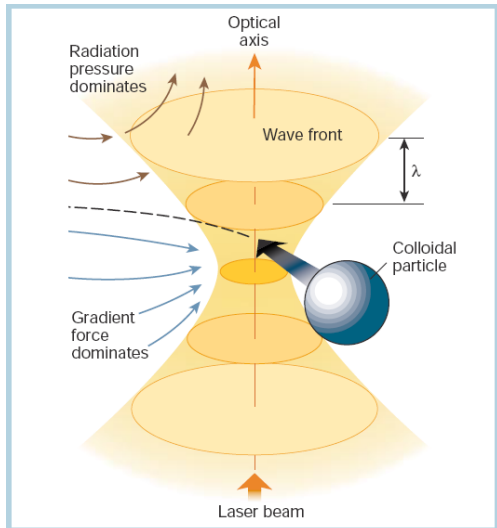
การศึกษารูปแบบการกระจายตัวของวัสดุประเภท ตอนที่ 2 – อะลูมินา

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR

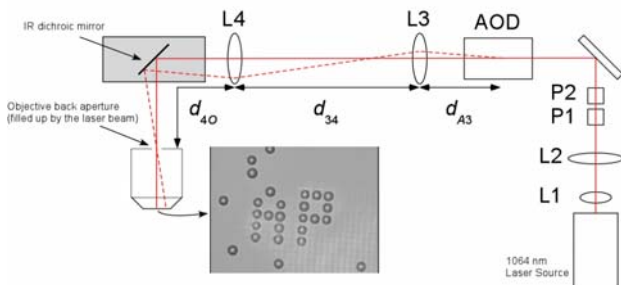
การสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิบัติการ

หมายเหตุ รูปจากปกเป็นการแสดงการเรียงเม็ดโพลิสไตรีน (Polystyrene) ขนาด 4 ไมโครเมตรโดยใช้คีมจับแสง (Optical tweezer) รูปภาพจาก ดร. อภิชาติ พัฒน โภครัตนา

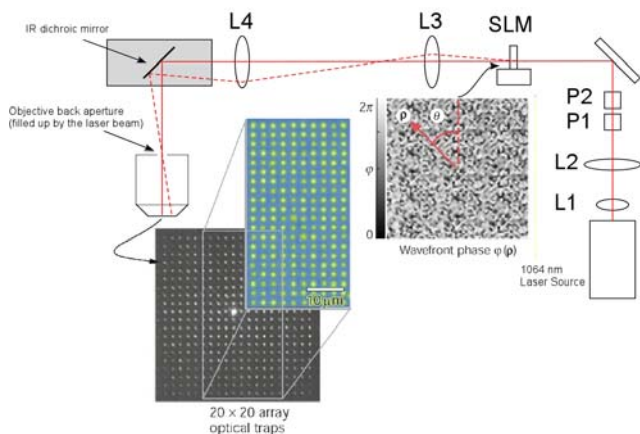
รูปประกอบจากบทความ “คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)” หน้า 4-10



รูปที่ 1

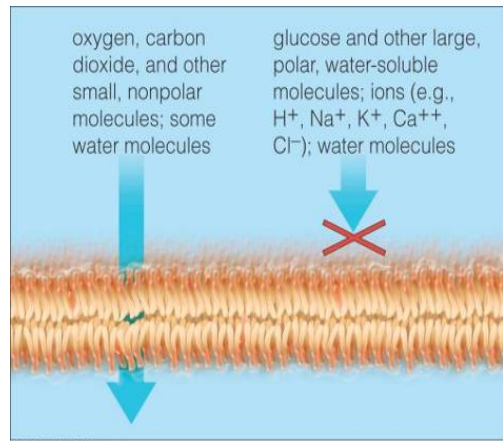


รูปที่ 4

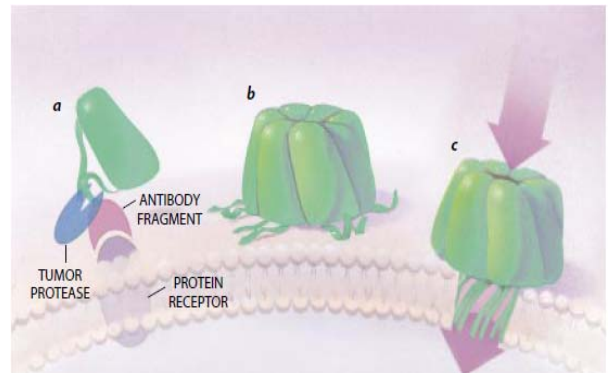


รูปที่ 5

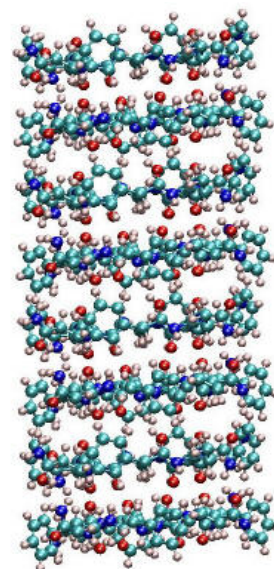
รูปประกอบจากบทความ “เปิดประตูสู่เซลล์” หน้า 11-17



รูปที่ 2



รูปที่ 7



รูปที่ 11

สารบัญ

สวัสดิ์	1
แนะนำกองบรรณาธิการ	2
คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)	4
อภิชาติ พัฒนา โภครัตนา	
เปิดประตูเข้าสู่เซลล์	11
จิรศักดิ์ วงศ์เอกบุตร	
การผิรุปรบริเวณรอบรอยคดของวัสดุเปราะ	18
ตอนที่ 2 – อะลูมินา	
อภิชาติ ลิ้มปิชัยพานิช	
การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุใน	22
สนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR	
วัชร รัตนสกุลทอง	
การสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์	29
พรรัตน์ วัฒนกุลวิวิช	



สวัสดิ์

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งกับวารสารฟิสิกส์ไทย หลังจากที่ได้มีการจัดตั้งกองบรรณาธิการเสร็จสิ้น ก็เหลือโอกาสแนะนำสมาชิกแต่ละท่านในหน้าที่ 2 โดยมีสมาชิกที่มาจากต่างสถาบันกันตั้งแต่เหนือสุดถึงใต้สุดของประเทศ ทั้งนี้ผู้ที่ประสงค์ส่งบทความเข้ามาตีพิมพ์สามารถดูรายละเอียดของสมาชิกของกองบรรณาธิการแต่ละท่านทั้งหัวข้อวิจัยหรือสถาบันที่ติดต่อได้ง่าย โดยสามารถส่งบทความให้สมาชิกแต่ละท่านได้โดยตรงตามความสะดวกครับ

สำหรับบทความฉบับนี้เริ่มต้นด้วยบทความเกี่ยวกับคีมจับเชิงแสง หรือ Optical tweezers ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้หลักการทางฟิสิกส์มาสร้างเครื่องมือค้ำจับอนุภาคเล็กๆ ซึ่งมีประโยชน์มากกับงานวิจัยทางด้านชีวฟิสิกส์ จากนั้นจะต่อยอดบทความด้านชีวฟิสิกส์ที่อธิบายเกี่ยวกับเซลล์และการใช้เทคนิคโมเลกุลาร์ไดนามิกส์มาศึกษาการส่งผ่านของโมเลกุลต่างๆ ในเซลล์ซึ่งเป็นหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับบทความในวารสาร Nature Nanotechnology ที่ผู้เขียนได้รับการตีพิมพ์เมื่อไม่นานนี้

อีก 3 บทความเกี่ยวกับ การอธิบายการผิรุปรของวัสดุอะลูมินา ซึ่งต่อยอดบทความ ตอนที่ 1 ในฉบับที่ 2 ปีที่ 27 ปรากฏการณ์ Magnetoresistance หรือ MR ในแบบต่างๆ และปิดท้ายด้วยบทความเกี่ยวกับฟิสิกส์ศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการบรรยายผ่านการสร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชาญกิจ กันถ่อง, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรรัตน์ วัฒนกุลวิวิช, ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล, สมศักดิ์ แดงดี, สตรีรัตน์ ไรต์, นววรรณ สงวนศักดิ์, เข้ม พุ่มสะอาด, ณัฐพร ฉัตรเกษม, อัสวิน สันทรัพย์, วรพงศ์ รักเรืองเดช, สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด, สุปรีย์ พินิจสุนทร, ชุตินทร พันธวงศ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ วรวัฒน์ มีวาสนา ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ ภาพและออกแบบปก วรวัฒน์ มีวาสนา เลขานุการกองบรรณาธิการ นารีรัตน์ ศรีบุรินทร์ จำนวนพิมพ์ 1,000 เล่ม

ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 อีเมลล์: worawat@g.sut.ac.th วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้ที่เกี่ยวข้องในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป Website: www.thps.org ผู้ดูแล: ณัฐวุฒิ สุรเดช

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2554 – 2556 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง อุปนายก รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ เลขาธิการ ผศ. ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง เหรียญฤกษ์ ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์ นายทะเบียน รศ. ดร. สันติ แม้นศิริ ปฏิคม ผศ. ดร. รัตติกร อัมมรินทร์ บรรณาธิการวารสารฟิสิกส์ไทย ดร. วรวัฒน์ มีวาสนา ประธานสัมพันธ์ ดร. อนันต์ เจริญกิติ รองเลขาธิการ ผศ. ดร. ทศวรรษ สีตะวัน กรรมการ รศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล, ดร. สาโรช รุจิวรรณ, ดร. ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ, ผศ. ดร. สุภกร รักใหม่, ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รังนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดาจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์, ดร. สิริพัฒน์ ประโตนเทพ, ดร. ณัฐพร ฉัตรเกษม

แนะนำกองบรรณาธิการ



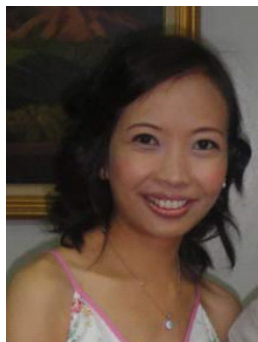
ดร. วรวัฒน์ มีวาสนา
อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของสารควบแน่น และ
การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน
อีเมลล์: worawat@g.sut.ac.th
(หัวหน้ากองบรรณาธิการ)



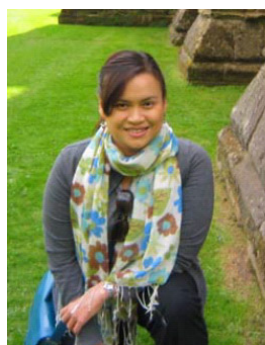
ดร. ประพงค์ คล้ายสุบรรณ (ขวา)
นักวิจัยประจำ
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค และ
การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน
อีเมลล์: pklysubun@slri.or.th
(ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ)



ผศ. ดร. สุรเชษฐ์ หลิมกำเนิด
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของสารควบแน่น (ทฤษฎี)
การจำลองการปลูกฟิล์มบาง และ
พลศาสตร์นอกสมดุล
อีเมลล์: surachate.l@chula.ac.th



ผศ. ดร. สตรีรัตน์ กำแพงแก้ว
โฮตค
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของสารควบแน่น การ
สังเคราะห์และการประยุกต์ใช้
ฟิล์มบาง และฟิสิกส์ศึกษา
อีเมลล์: jeauw3@yahoo.com



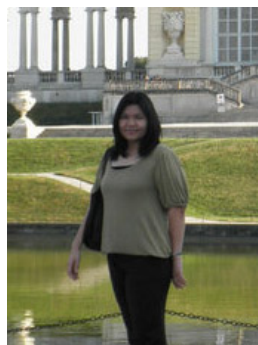
ดร. ณัฐพร ฉัตรแถม
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของผลึกเหลว ฟิสิกส์ทัศน-
ศาสตร์ของสารควบแน่นชนิด
อ่อน
อีเมลล์: nattaporn.c@ku.ac.th



ดร. สุปรีย์ พินิจสุนทร
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์
วัสดุแม่เหล็ก
อีเมลล์: psupree@kku.ac.th



อาจารย์ ชาญกิจ คันฉ่อง
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์และ
วัสดุศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์รากฐาน
(Foundation of physics)
อีเมลล์: chanon_physics@yahoo.com



ดร. พรรัตน์ วัฒนกสิวิชัย
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์และ
วัสดุศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ศึกษา
อีเมลล์: pwattanakasiwich@gmail.com



ดร. วรवरณ์ รักษ์เรืองเดช
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ทัศนศาสตร์ ฟิล์มบาง
และฟิสิกส์ศึกษา
อีเมลล์: worawarong.rak@kmutt.ac.th



ดร. นวลวรรณ สงวนศักดิ์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ดาราศาสตร์พลังงานสูง การ
ก่อตัวของกาแล็กซี โครงสร้าง
ขนาดใหญ่ กระบวนการแผ่รังสี
แบบ Non-thermal
อีเมลล์: nsangsci@gmail.com



รศ. ดร. พงรัตน์ ไพเราะ
อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของสารควบแน่น (ทฤษฎี)
อีเมลล์: pairor@g.sut.ac.th



ดร. สมศักดิ์ แดงดี
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยมหิดล
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
อันตรกิริยาของรังสีกับวัสดุ และ
การประยุกต์พลาสมาความดันสูง
ทางการเกษตร
อีเมลล์: somsak.dan@mahidol.ac.th,
kasmos47@yahoo.com



ดร. อัศวิน สิ้นทรัพย์
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยมหิดล
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์ของสารควบแน่น ฟิสิกส์
ของพื้นผิว สปินทรอนิกส์ วัสดุ
แม่เหล็ก วัสดุตัวนำและกึ่งตัวนำ
อินทรีย์ ฟิสิกส์ทัศนศาสตร์
อีเมลล์: asawin.sinsarp@gmail.com,
scasi@mahidol.ac.th



รศ. ดร. ชิตนรงค์ ชิวตติกุล
อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
วัสดุแม่เหล็ก
อีเมลล์: schitnar@wu.ac.th



ดร. เข้ม พุ่มสะอาด
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ฟิสิกส์อนุภาคมูลฐาน
อีเมลล์: kem@swu.ac.th



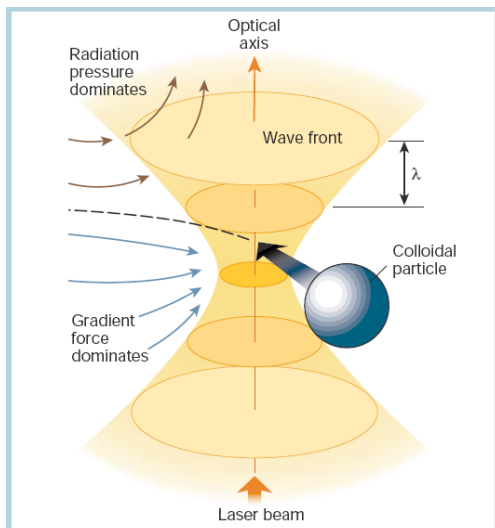
ดร. ชุตินทร พันธุ์วงศ์
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ความชำนาญ/งานวิจัยที่สนใจ:
ชีวฟิสิกส์เชิงทฤษฎีและคำนวณ
ชีวฟิสิกส์ระดับโมเลกุล และ
ชีววิทยาเชิงควอนตัม
อีเมลล์: chutinorn@gmail.com

กีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)

อภิชาติ พัฒนโกครัตนา¹

ลองนึกภาพการใช้ตะเกียบคีบเมล็ดงา คุณคิดว่าคุณสามารถทำได้ไหม? แต่ถ้าคุณต้องการคีบของที่เล็กกว่าเมล็ดงา ร้อยเท่า พันเท่า โดยมีเงื่อนไขว่าของชิ้นนั้นจะต้องไม่บอบช้ำ หรือถูกทำลาย คุณจะใช้วิธีใด?

Optical tweezers เป็นเทคนิคที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวดักจับ (trap) อนุภาคนขนาดเล็ก ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และทีมงาน [1, 2] หัวใจสำคัญของ optical tweezers ก็คือการโฟกัสแสงเลเซอร์โดยเลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ (microscope objective) ลงมาที่อนุภาคนขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์ เงื่อนไขโดยทั่วไปของการดักจับอนุภาคด้วยเลเซอร์คืออนุภาคต้องโปร่งใสและมีดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆอนุภาค



รูปที่ 1: Optical tweezers ที่เกิดจากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็ก ซึ่งหัวใจสำคัญของการจับอนุภาคด้วยแสงก็คือการใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่า numerical aperture สูงเพื่อให้เกิดความแตกต่างของความเข้มแสงที่มาก ส่งผลให้แรง gradient force มากกว่าแรง scattering force จึงสามารถจับอนุภาคในสามมิติได้ ภาพอ้างอิงจาก [3]

1. หลักการทำงานของ optical tweezers

ทฤษฎีการทำงานของ optical tweezers สามารถแยกพิจารณาได้ สองกรณีคือ

1.1 กรณี ขนาดของอนุภาค d น้อยกว่าความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ λ มากๆ

ในกรณีนี้ สนามไฟฟ้า จากแสงเลเซอร์ ที่ผ่านอนุภาค ที่ขณะใดๆ จะถือว่าค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เพียงพอที่ ประจุในอนุภาคจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงได้ทัน และสามารถให้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำประจุ และพลังงานสะสมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในฉนวน (dielectrics) มาคำนวณหาแรงได้ กล่าวคือ เมื่ออนุภาค dielectric อยู่ในสนามไฟฟ้า E จะเกิดการเหนี่ยวนำไดโพลไฟฟ้าขึ้น มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_m ในทิศทาง สนามไฟฟ้าเดิม มีผลทำให้ขนาดสนามไฟฟ้าลัพธ์ $E_f = E - E_m$ มีค่าลดลง

ดังนั้นพลังงานสะสมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า $U \sim E^2$ ใน dielectric จึงมีค่าลดลง เทียบกับตอนไม่มี dielectric ทำให้อนุภาคมุ่งเข้าสู่จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์ เพราะเป็นจุดที่สนามไฟฟ้าจากแสงเลเซอร์ มีค่าสูง เพื่อที่ระบบจะได้มีพลังงานต่ำลงนั่นเอง

แรงในการดักจับอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$F = -\nabla U \quad (1)$$

ซึ่งเรียกแรงในลักษณะนี้ว่า gradient force เนื่องจากเกิดจากผลต่างของความเข้มของแสงเลเซอร์นั่นเอง ดังนั้น แรงในการจับอนุภาคจาก optical tweezers จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความสามารถในการควบคุมแสงให้โฟกัสลงมาเป็นจุดที่เล็กที่สุด เพื่อให้เกิดผลต่างของความเข้มแสงที่มากที่สุด

นอกจาก gradient force แล้ว ยังมีแรง scattering force ที่เกิดจากการดูดกลืนรังสี หรือ การสะท้อนที่ผิวของอนุภาค โดยแรงนี้จะดันให้อนุภาคเคลื่อนไปตาม ทิศทางเดินของแสงเลเซอร์ หรือ

¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

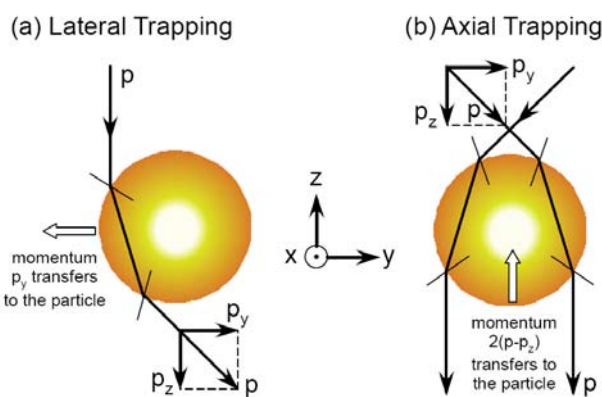
optical axis (รูปที่ 1) ถ้า gradient force ที่เกิดขึ้นมีขนาดน้อยกว่า แรง

scattering force ก็จะมีผลทำให้อนุภาคหลุดออกมาจาก จุดโฟกัสได้ ดังนั้นการจับอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์จึงต้องใช้เลนส์ วัตถุที่มีค่า numerical aperture (N.A.) สูง เช่นเลนส์วัตถุแบบ oil-immersion เป็นต้นเพื่อให้ได้ค่า gradient force ที่สูง สามารถ เอาชนะแรง scattering force ได้

รายละเอียดการคำนวณหา gradient force และ scattering force ด้วยทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า อาจศึกษาเพิ่มเติมได้จาก เอกสารอ้างอิง [4], [5]

1.2 กรณี ขนาดของอนุภาค d มากกว่าความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ λ มากๆ

ในกรณีนี้ สนามไฟฟ้า จากแสงเลเซอร์ ที่ผ่านอนุภาค ที่ ใดๆ จะไม่สม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ที่กล่าวมาข้างต้นในการ อธิบายแรง gradient force ได้ ดังนั้นจึงต้องมองแสงเป็นอนุภาค หรือโฟตอนที่มีการหักเหผ่านผิวอนุภาคตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) และมีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างแสง และอนุภาค ตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (รูปที่ 2) โดยขนาดของโมเมนตัมที่ เปลี่ยนไปต่อหน่วยเวลาของโฟตอนจะเท่ากับขนาดของแรง gradient force ที่อนุภาคได้รับ



รูปที่ 2: อธิบายต้นกำเนิดของแรง gradient force ในแนว (a) ตั้งฉากกับแนวเลเซอร์ และ (b) ขนานกับแนวเลเซอร์ โดยใช้ ray optics และการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างโฟตอนกับอนุภาคเมื่อ พิจารณาโมเมนตัมของแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนไปในรูปที่ 2 หลังจาก หักเหผ่านอนุภาคที่ต้องการดักจับ จะพบว่าอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์เสมอ ดังนั้น พิจารณาแนวแสง

เลเซอร์แนวหนึ่งซึ่งฉายผ่านอนุภาคทรงกลมแขวนลอยอยู่ในน้ำดัง รูปที่ 2(a) ถ้าอนุภาคนี้นี้มีดัชนีหักเหมากกว่าดัชนีหักเหของน้ำ มัน จะประพฤติตัวเป็นเลนส์นูนและหักเหแสงให้เบนไปในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางของอนุภาค ถ้าพิจารณาแสงเป็นอนุภาคโฟตอนซึ่ง แต่ละโฟตอนมีโมเมนตัม $p = h/\lambda$ จะพบว่าโฟตอนที่ผ่านอนุภาค ออกมามีทิศทางเปลี่ยนไป แต่มีขนาดของโมเมนตัมเป็น p เท่าเดิม เนื่องจากความยาวคลื่นเท่าเดิม แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะโมเมนตัมใน แนวแกน y พบว่าเปลี่ยนไปเท่ากับ p_y ซึ่งจะมีผลทำให้อนุภาค เคลื่อนที่ไปในทิศ $-y$ ด้วยโมเมนตัม $-p_y$ เพื่อที่จะอนุรักษ์ โมเมนตัมในแนวแกน y ของระบบ โดยที่อนุภาคจะหยุดเคลื่อนที่ ก็ต่อเมื่อมันอยู่ตรงกลางแนวเลเซอร์พอดี เนื่องจากเป็นจุดที่แสงไม่ มีการหักเห ในความเป็นจริงแสงเลเซอร์ที่พุ่งเข้าหาอนุภาคที่จุด โฟกัสของ microscope objective นั้นมีมากกว่าหนึ่งแนว จึงต้องมี การรวมผลจากโฟตอนในทุกแนวแสง ซึ่งผลที่ได้จะเหมือนเดิมคือ อนุภาคจะถูกแรงทางแสงกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวเลเซอร์ทำให้ เคลื่อนที่เข้าหาแนวศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ ในทำนองเดียวกัน จะมีแรงในทิศขนานกับแนวเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น/ลง เข้าหาจุดโฟกัสของเลเซอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 2(b) อนุภาคจึงถูกดัก จับในสามมิติ ส่วนโมเมนตัมที่เปลี่ยนไปของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน หรือสะท้อนที่ผิวของอนุภาค (ไม่ได้แสดงในรูปที่ 2) ก็เป็นสาเหตุ ให้เกิดแรง scattering force นั่นเอง

รายละเอียดการคำนวณหา gradient force และ scattering force โดยการถ่ายเทโมเมนตัมของโฟตอนจากการหักเหแสงผ่าน ผิวอนุภาค อาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [6], [7]

ในการทดลองจริง อนุภาคที่เหมาะสมในการดักจับควรมี ขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ คือประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ดังนั้นทฤษฎีทั้งสองข้อที่กล่าวมานั้นอาจจะใช้ได้ไม่ดีนัก แต่จากการทดลองพบว่าแรงในการจับอนุภาคที่วัดได้จริงจะอยู่ ในช่วงพิโคนิวตัน ซึ่งก็ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ข้างต้น

อนุภาคที่ถูกดักจับโดยแสงเลเซอร์ จะบอบช้ำน้อยมาก หรือไม่บอบช้ำเลย ถ้าเป็นตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น เซลล์เม็ดเลือด แดง เซลล์จุลินทรีย์ หรือตัวอสุจิ ก็จะถูกจับไว้เพื่อทำการทดลอง ต่างๆได้ในขณะที่มีชีวิต ทั้งนี้เนื่องจากแสงส่วนใหญ่จะส่งผ่าน ตัวอย่างชีวภาพเหล่านี้ไปเกือบทั้งหมด อีกทั้งการเลือกใช้แสงใน ย่านความยาวคลื่นที่เหมาะสม เช่นใช้แสง infrared ก็จะช่วยลด

ความร้อนที่เกิดจากการดูดกลืนแสง ของของเหลวในเซลล์ได้เช่นกัน

2. Optical tweezers สำหรับจับอนุภาคหลายตัว

การดักจับอนุภาคสองตัวพร้อมๆ กันอาจทำได้โดยใช้เลเซอร์สองตัว ฉายเข้าไปยังเลนส์วัตถุ หรืออาจจะใช้เลเซอร์ตัวเดียวกันแต่ใช้ beam splitter ในการแยกเลเซอร์ออกเป็นสองลำแสง แล้วจึงส่งผ่านเข้าไปยังเลนส์วัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 3

เลเซอร์แต่ละลำจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์วัตถุอันเดียวกัน ซึ่งจะทำหน้าที่โฟกัสแสงไปยังตำแหน่งของอนุภาคที่ต้องการ มุมที่เลเซอร์แต่ละลำทำกับ optic axis เมื่อผ่านช่องเปิดด้านหลัง (back aperture) ของเลนส์วัตถุ สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับเอียงกระจก GMM ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งโฟกัสทั้งสองของแสงเลเซอร์ได้อย่างอิสระ เพิ่มความสะดวกในการเลื่อนแสงเลเซอร์ไปยังอนุภาค และเคลื่อนย้ายอนุภาคไปที่ต่างๆ

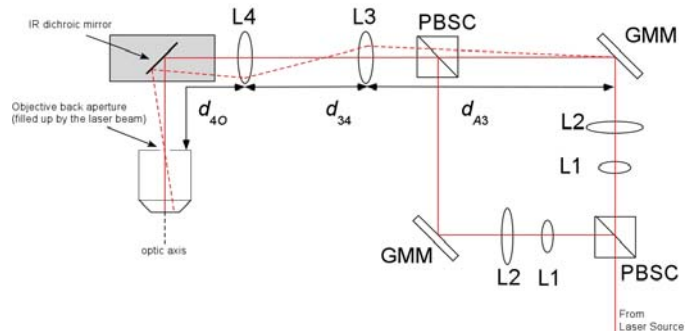
ในการปรับมุมการเข้าเลนส์วัตถุ ของเลเซอร์ด้วย GMM นั้น มีข้อควรระวังคือ เลเซอร์ต้องไม่มีการเลื่อนตำแหน่ง ที่ back aperture มิเช่นนั้นความเข้มแสงจะลดลง และทำให้แรงในการดักจับลดน้อยลงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีชุดเลนส์ L3 กับ L4 เพื่อฉายภาพเลเซอร์ที่ตำแหน่ง GMM ไปยัง back aperture ของเลนส์วัตถุ เพื่อให้แสงจากจุดที่ GMM เมื่อปรับเอียงให้ออกมาทำมุมใดใด จะไปตกกันที่จุดเดียวกัน ณ ตำแหน่ง back aperture ส่งผลให้แสงเลเซอร์ผ่านเข้ามาด้วยมุมที่ต่างกัน โดยไม่มีการเลื่อนตำแหน่ง ที่ back aperture ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสจึงคงที่ ในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายอนุภาค

เพื่อให้ได้ gradient force ที่มีค่ามากพอที่จะเอาชนะ scattering force ได้นั้น ขนาดจุดโฟกัสของเลเซอร์ที่จะใช้จับอนุภาค ควรมีขนาดเล็กมาก ซึ่งสามารถประมาณ ขนาดของลำแสงเลเซอร์ (beam waist) ที่ระยะนาบจุดโฟกัสของเลนส์วัตถุ w_f ได้จาก [8]

$$w_f \cong \frac{\lambda_0 f}{\pi w_i} \quad (2)$$

เมื่อ λ_0 คือความยาวคลื่นของเลเซอร์, f คือความยาวโฟกัสของเลนส์วัตถุ, และ w_i คือขนาดของลำแสงเลเซอร์ก่อนผ่านเข้ามายังเลนส์วัตถุ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าควรให้ w_i มีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ กล่าวคือให้ลำเลเซอร์มีขนาดใหญ่เต็มพื้นที่ของ back aperture

ซึ่งทำได้โดยการใช้ชุดเลนส์ L1 กับ L2 เพื่อขยายลำแสงให้มีขนาดตามต้องการ นอกจากนี้ยังควรเลือกใช้เลนส์ที่มีค่า N.A. ที่สูง เนื่องจาก w_f แปรผกผันกับค่า N.A. ($N.A. \sim w_i / f$)



รูปที่ 3: แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดตั้ง optical tweezers แบบ 2 จุด แสงเลเซอร์ถูกแยกเป็น 2 ลำแสงโดย polarizing beam splitter ชุดเลนส์ L1 กับ L2 มีไว้เพื่อขยายขนาดลำเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่เท่ากับช่องเปิดด้านหลัง (back aperture) ของเลนส์วัตถุ ตำแหน่งของเลเซอร์แต่ละลำ บนระนาบของวัตถุที่ต้องการจับ สามารถควบคุมโดยการปรับเอียงกระจก gimbal-mounted mirror (GMM) ที่สะท้อนเลเซอร์ในแต่ละเส้นทางแสง ชุดเลนส์ L3 กับ L4 มีไว้เพื่อฉายภาพเลเซอร์ที่ตำแหน่ง GMM ไปยัง back aperture ของเลนส์วัตถุ เพื่อให้แสงผ่านเข้าไปยังเลนส์วัตถุได้โดยไม่สูญเสียความเข้ม เมื่อมีการปรับเอียง GMM

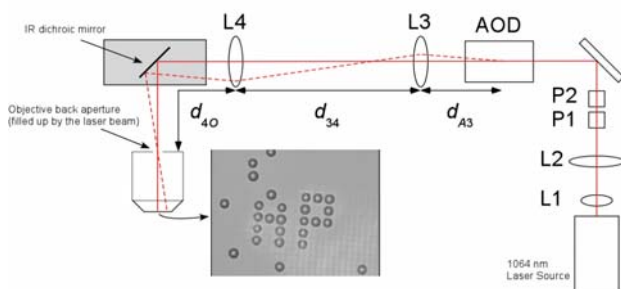
2.1 Time-sharing optical tweezers

เป็นการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers โดยใช้อุปกรณ์เบี่ยงเบนแสง ให้แยกเป็นมุมต่างๆ ได้หลายทิศทาง และเบนกลับมายังมุมเดิมได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถจับอนุภาคได้ที่หลายๆ ตัว ทั้งนี้ความเร็วในการเบนแสงต้องมากพอที่จะกลับมายังจุดเดิมได้ทันกับการที่อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่แบบ Brownian และหลุดออกไปจากจุดโฟกัสนั้น ความเข้มของแต่ละลำเลเซอร์จะลดลงไปตามจำนวนลำแสงที่เบนออกมาเป็นมุมต่างๆ เพราะต้องมีการปันเวลา กัน หรือที่เรียกว่า “time-shared” นั่นเอง

การจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers แบบ time-sharing นั้นสามารถทำได้ดังรูปที่ 4 แสงเลเซอร์ที่ใช้มักจะอยู่ในย่านคลื่น infrared เนื่องจากเป็นช่วงคลื่นที่เซลล์สิ่งมีชีวิตดูดกลืนพลังงานได้น้อย จึงไม่ทำให้เกิดความร้อนที่จะเป็นอันตรายแก่เซลล์ เลนส์ L1 และ L2 ทำหน้าที่ขยายขนาดของลำเลเซอร์ (beam expander) ส่วน

P1 และ P2 คือ Glan-Thomson prism polarizers ใช้ควบคุมความเข้มของแสงเลเซอร์ในกรณีที่ไม่สามารถปรับความเข้มได้ AOD ย่อมาจาก acousto-optic deflector เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถควบคุมตำแหน่งของลำเลเซอร์ (beam steering device) และยังสามารถแยกเลเซอร์ออกเป็นหลายลำโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของเลเซอร์อย่างรวดเร็ว เพื่อประโยชน์ในการดักจับอนุภาคพร้อมกันหลายๆตัว (multiple time-sharing traps) ส่วนเลนส์ L3 และ L4 ใช้ฉายภาพจาก AOD ให้มาตกที่ช่องเปิดด้านหลัง (back aperture) ของเลนส์วัตถุ เพื่อป้องกันการลดลงของความเข้มเลเซอร์ในขณะที่เปลี่ยนตำแหน่งโดย AOD ส่วนเลนส์ L1 และ L2 มีหน้าที่ขยายขนาดของลำเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่เท่ากับช่องเปิดด้านหลังของเลนส์วัตถุ

สำหรับหลักการทำงานของ AOD นั้นจะใช้การสั่นผลึก tellurium dioxide ด้วยความถี่ ultra sonic ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ที่ไปเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในผลึก เกิดเป็น grating ที่ใช้เลี้ยวเบนแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์ที่ได้จากลำดับการเลี้ยวเบนที่ 1 จะมีความเข้มมากที่สุดและถูกใช้ในการดักจับอนุภาค ทั้งนี้ใน AOD จะมีผลึก tellurium dioxide ทั้งสิ้น 2 ผลึกสำหรับการควบคุมทิศทางของแสงเลเซอร์ในแกน x และ y มุมการเบนของแสงสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของคลื่น ultra sonic ซึ่งสามารถสั่งการได้แบบ real time ด้วยคอมพิวเตอร์ ภาพแทรกในรูปที่ 4 เป็นตัวอย่างการใช้ AOD ในการจัดเรียงอนุภาคให้เป็นตัวอักษร “AP”



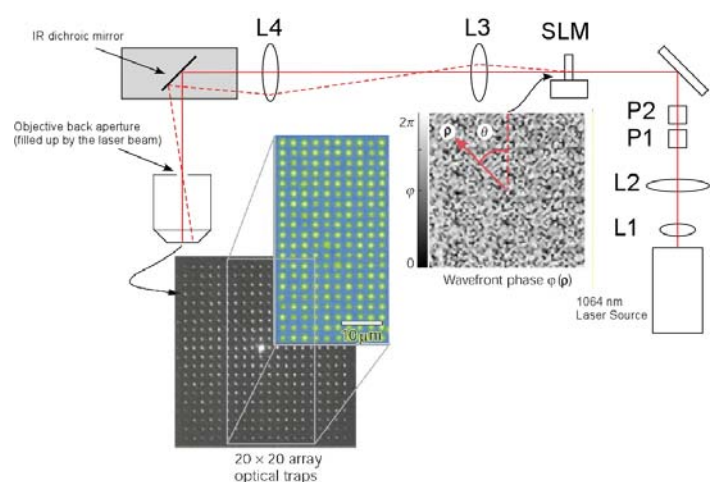
รูปที่ 4: แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดตั้ง time-sharing optical tweezers ภาพแทรกแสดงการดักจับ polystyrene spheres ขนาด 20 ไมโครเมตรในน้ำให้เรียงกันเป็นตัวอักษร “AP”

2.2 Holographic optical tweezers

เป็นการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers โดยใช้อุปกรณ์สร้างภาพ 3 มิติ เป็นตัวควบคุมแสงเลเซอร์ให้ไปเกิดเป็นภาพต่างๆ หลังจากผ่านเลนส์วัตถุ ดังแสดงโดยรูปที่ 5 ซึ่งการจัดตั้งนั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการจัดอุปกรณ์โดยใช้ AOD มาก เพียงแต่ใช้อุปกรณ์สร้างภาพ 3 มิติที่เรียกว่า spatial light modulator (SLM) ไปวางไว้แทนที่ตำแหน่งของ AOD

SLM ทำหน้าที่ควบคุมมุมเฟสของแสงเลเซอร์ที่ผ่านเข้ามาในแต่ละพิกเซล โดยใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมการเรียงตัวของโมเลกุลของผลึกเหลว (liquid crystal) ที่มีรูปร่างยาวคล้ายแท่งดินสอ และเนื่องจากคุณสมบัติการหักเหสองแนว (birefringence) ของผลึกเหลว ทำให้แสงรู้สึกถึงครีษณิกหักเหที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านผลึกเหลวที่มีการเรียงตัวทำมุมต่างกันเทียบกับแนวลำแสง แสงที่ออกมาในแต่ละพิกเซลจึงมีเฟสต่างกันไปตามการควบคุมความแรงของสนามไฟฟ้าในแต่ละพิกเซล

ภาพ 3 มิติ ที่ต้องการสร้างจะถูกคอมพิวเตอร์แปลงเป็นความต่างเฟสที่ระนาบของ SLM ซึ่งจะถูกส่งต่อไปตกที่ back aperture ด้วยชุดเลนส์ L3 กับ L4 และแปลงเป็นภาพ 3 มิติ ที่ต้องการหลังจากผ่านเลนส์วัตถุ ภาพแทรกในรูปที่ 5 เป็นตัวอย่างแผนภาพเฟสของแสงเลเซอร์ที่ SLM และภาพที่ระนาบโฟกัสของเลนส์วัตถุ ที่เกิดจากแผนภาพเฟสดังกล่าว การเปลี่ยนตำแหน่งของภาพนั้นจะทำเหมือนภาพเคลื่อนไหวจากการ์ตูน คือต้องค่อยๆ เปลี่ยนไปที่ละภาพ โดยใช้คอมพิวเตอร์คำนวณมุมเฟสของแต่ละภาพใหม่ทุกครั้ง



รูปที่ 5: การจัดตั้งอุปกรณ์ holographic optical tweezers โดยใช้ spatial light modulator (SLM) ภาพแทรกเป็นตัวอย่างแผนภาพ

เฟสของแสงเลเซอร์ที่ SLM และภาพที่ระนาบโฟกัสของเลนส์วัตถุ ที่เกิดจากแผนภาพเฟสดังกล่าว ภาพแทรกอ้างอิงจาก [3]

ข้อดีของ holographic optical tweezers ก็คือสามารถทำการดักจับอนุภาคใน 3 มิติได้ โดยอนุภาคที่จับนั้น ไม่จำเป็นต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน ส่วนข้อด้อยคือในการทดลองที่ต้องการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของอนุภาค อาจทำได้ช้า และในการวัดแรงน้อยๆระหว่างอนุภาค ที่ต้องการความละเอียดของพิกัดของจุดโฟกัสแสงสูง อาจทำได้ไม่ดีเท่ากับการใช้ AOD เนื่องจากข้อจำกัดด้านความละเอียดของพิกเซลของ SLM ที่อาจทำให้การแปลงมุมเฟสของหน้าคลื่นกลับมาเป็นภาพ คลาดเคลื่อนไปจากที่ต้องการ

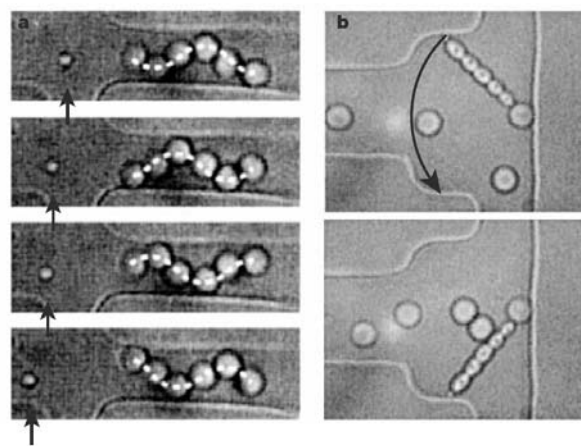
3. การนำ Optical tweezers ไปใช้ประโยชน์

Optical tweezers นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายทาง โดยเฉพาะในการวิจัยเกี่ยวกับ เซลล์และชีวโมเลกุล หลังจาก Ashkin และทีมงานได้ประดิษฐ์ optical tweezers ได้สำเร็จ เขาก็แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แสงในการบังคับการเคลื่อนที่ของไวรัส ยีสต์ แบคทีเรีย โปรโตซัว และออร์แกเนลล์ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายกับเซลล์ [9-11] ต่อมาในปี 1990 Ashkin ได้ใช้ optical tweezers ในการศึกษาแรงในการเคลื่อนย้ายออร์แกเนลล์ (organelle) เดียว ไปตามสาย microtubules ภายในตัวอมีบาอีคัย Reticulomyxa และสามารถประมาณขนาดของแรงได้ [12]

ต่อมา Optical tweezers จึงถูกใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ และงานวิจัยทางชีวภาพ เช่น ใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการปฏิสนธิภายนอก (in vitro fertilization) [13] ใช้ศึกษาสมบัติหยุ่นหนืด (viscoelastic) ของโพลิเมอร์ชีวภาพ ต่างๆ [14-15] ใช้ในการวัดแรงในการศึกษาระบบอนุภาคแขวนลอย [16-19] และใช้ในการวัดขนาดของแรงจาก molecular motors ต่างๆ [20] เช่น ไมโอซิน (myosin), ไคเนซิน (kinesin), และ ไรโบโซม (ribosomes) ทำให้ทราบว่าเซลล์ใช้แรงกลในกระบวนการต่างๆมากมาย อาทิเช่น การเคลื่อนที่ของตัวสุจิในกระบวนการปฏิสนธิ กระบวนการหายใจในระดับเซลล์ ตลอดจนการถอดรหัสทางพันธุกรรม เป็นต้น หรืออาจใช้ในการวัดแรงที่ใช้ในการดึงสาย DNA ให้ยืดออก เพื่อศึกษาการควบแน่นของ DNA (DNA condensation) [21] optical tweezers สามารถใช้ร่วมกับ pulse laser กำลังสูง ทำให้สามารถจับเซลล์และผ่าตัดเซลล์ เพื่อเปลี่ยนแปลงโครโมโซมของเซลล์นั้นได้

[22] และยังสามารถใช้ร่วมกับ เทคนิคเชิงแสงอื่นๆเช่นเทคนิค Raman spectroscopy เพื่อใช้วิเคราะห์โหมดการสั่น (vibration modes) ของเซลล์มีชีวิต หรือของโพลิเมอร์ชีวภาพต่างๆ [23, 24]

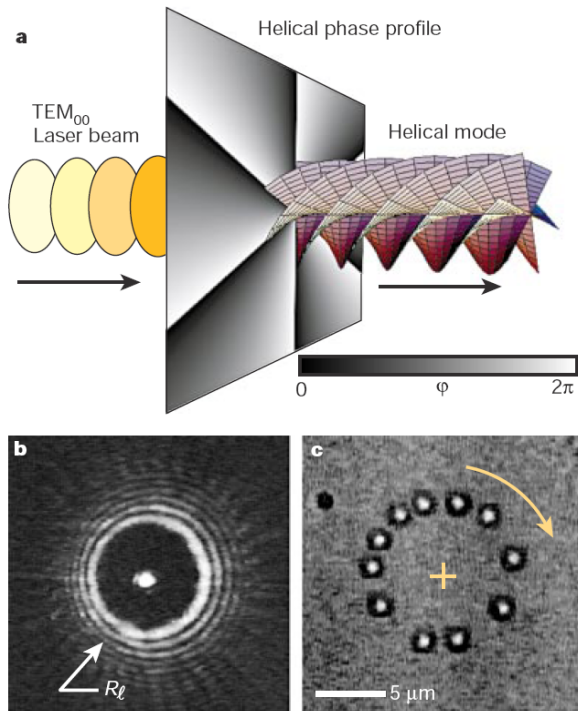
Optical tweezers เหมาะสำหรับการใช้จัดเรียง และเคลื่อนย้ายวัตถุขนาดเล็ก เช่น ใช้จัดเรียงสายไฟนาโน (nana wires) [25] เพื่อใช้สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโน หรือนำแสงเลเซอร์มาจับอนุภาคทรงกลมที่ใส่เข้าไปในท่อ microfluidic ให้เสียดกันเป็นสายยาว แล้วบังคับให้เคลื่อนที่ไปในลักษณะของคลื่น ทำเป็น ปี่มเชิงแสง ขับดันของเหลวในท่อให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 6(a) หรืออาจทำเป็น วาล์วเชิงแสง ดังรูปที่ 6(b) ที่ใช้เปิด ปิด ให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในช่องทางที่ต้องการ



รูปที่ 6: Optical tweezers กับการนำมาใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์ microfluidic (a) ปี่มเชิงแสง ที่เกิดจากการใช้แสงเลเซอร์บังคับเม็ดอนุภาคที่อยู่ในท่อ microfluidic ให้เรียงต่อกันเป็นสาย และเคลื่อนที่ในรูปแบบของคลื่น ทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ดังจะเห็นได้จากทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคอันเล็ก (ชี้บอกโดยลูกศร) (b) วาล์วเชิงแสง ที่ควบคุมโดยแสงเลเซอร์ ให้มีการเปิด ปิด เพื่อควบคุมให้อนุภาคไหลไปตามท่อด้านล่าง หรือด้านบน ตามต้องการ ภาพอ้างอิงจาก [3]

Optical tweezers มักจะใช้จับอนุภาคได้ดี เมื่ออนุภาคนั้นมีขนาดประมาณจุดโฟกัสของเลเซอร์ ซึ่งจุดโฟกัสจะมีขนาดเล็กได้มากที่สุดประมาณ 0.5 ไมโครเมตร หรือประมาณความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ทั้งนี้ขนาดจุดโฟกัสของแสงเลเซอร์ ไม่สามารถทำให้เล็กลงจนเป็นจุดได้ เพราะจะขัดกับหลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg คือความไม่แน่นอนในโมเมนตัมของโฟตอนเป็น

อนันต์ ณ ตำแหน่งจุดโฟกัสที่มีขนาดเป็นศูนย์ ซึ่งมักจะเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าเป็นข้อจำกัดการเลี้ยวเบน (diffraction limit) ของแสง ดังนั้นวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดจุดโฟกัสของเลเซอร์มากๆ เช่นวัตถุระดับนาโนเมตรโดยทั่วไปจึงไม่ค่อยรู้สึกถึง gradient force เท่าใดนักและอาจเคลื่อนที่แบบ Brownian หลุดออกไปจากจุดโฟกัสได้ง่าย ดังนั้นในการจับอนุภาคระดับนาโนอาจจะต้องใช้เลเซอร์กำลังสูงขึ้น หรือเลือกวัสดุนาโนที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าของตัวกลางที่วัตถุนั้นอาศัยอยู่มากๆ วัสดุนาโนที่เล็กที่สุดที่ผู้เขียนทราบว่าสามารถใช้ optical tweezers จับได้มีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร [26, 27] และทำจากโลหะ ทั้งนี้วัสดุโลหะระดับนาโนจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง และส่งผลให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสะสมในไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำลงได้มากเทียบกับตอนไม่มีไดอิเล็กตริก



รูปที่ 7: การใช้คลื่นรูปเกลียว (helical mode) ในการหมุนอนุภาคที่ถูกจับด้วย optical tweezers (a) แสดงการแปลงมุมเฟสของหน้าคลื่นระนาบจากเลเซอร์ ให้เป็นคลื่นรูปเกลียวด้วยอุปกรณ์ควบคุมเฟสเช่น SLM (b) ลักษณะของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสจะเป็นวงกลม (c) เมื่อทำการจับอนุภาคแขวนลอยให้มาอยู่ในวงกลมพบว่าอนุภาคจะหมุนเป็นวงกลม ดังมีทิศทางแสดงโดยลูกศร ภาพอ้างอิงจาก [3]

แสงเลเซอร์ที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม (circular polarization) เมื่อส่งผ่านวัสดุที่มีดัชนีหักเหสองแนว (birefringence) เช่นแผ่น calcite [28] จะมีการถ่ายเทโมเมนตัมเชิงมุม ให้กับวัตถุ และทำให้วัตถุนั้นหมุนได้ อาจนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนาโนมอเตอร์เชิงแสง สำหรับวัสดุทั่วไปที่ไม่ใช่วัสดุ birefringence ก็สามารถทำให้หมุนได้เช่นกัน โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีการเปลี่ยนมุมเฟส ϕ ในระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ดังสมการ

$$\phi(\rho) = \ell\theta \quad (3)$$

เมื่อ ℓ เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยในการเปลี่ยนมุมเฟสอาจทำได้โดยใช้ SLM ซึ่งแสงเลเซอร์เมื่อผ่าน SLM ที่มีมุมเฟสเปลี่ยนแปลงดังสมการ (3) ก็จะเปลี่ยนจากคลื่นระนาบเป็นคลื่นรูปเกลียว หรือ helical mode ดังแสดงในรูปที่ 7(a) และโฟตอนแต่ละตัวจากคลื่นรูปเกลียวดังกล่าวจะมีโมเมนตัมเชิงมุมเท่ากับ $\ell\hbar$ [3] ลักษณะของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสจะเป็นวงกลม ดังรูปที่ 7(b) และเมื่อทำการจับอนุภาคแขวนลอยให้มาอยู่ในวงกลม พบว่าอนุภาคจะหมุนเป็นวงกลมตามแนวเส้นรอบวงของเลเซอร์ ดังรูปที่ 7(c) การหมุนของอนุภาคเป็นวงกลมนี้อาจนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนาโนมอเตอร์เชิงแสงได้เช่นกัน ลองนึกภาพการนำอนุภาคที่หมุนเป็นวงกลมมาเรียงต่อกันเป็นแถว รวม 2 แถว โดยแถวทางซ้ายอนุภาคหมุนตามเข็มนาฬิกา แถวทางขวาอนุภาคนำหน้าจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ก็จะสามารรถทำเป็นปั๊มเชิงแสงขับเคลื่อนให้ของเหลวเคลื่อนที่ไปตามแนวระหว่างแถวทั้งสองได้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่า บทความเรื่องนี้จะทำให้ท่านผู้อ่านเห็นได้ว่า optical tweezers เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน อีกทั้งการจัดตั้งก็ไม่ยุ่งยากนัก สามารถทำได้ด้วยงบประมาณต่ำกว่าหนึ่งล้านบาท [29] และเหมาะสำหรับการวิจัยทางชีวภาพ หรือทางด้านวัสดุนาโนในประเทศไทย ที่งบประมาณในการทำวิจัยอาจมีจำกัด

เอกสารอ้างอิง

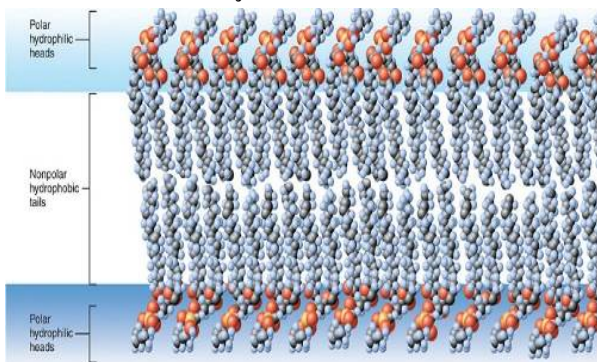
- [1] Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., and Chu, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt. Lett.* 11, 288–290 (1986).
- [2] Ashkin, A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elec.* 6, 841–856 (2000).

- [3] Grier, D. G. A revolution in optical manipulation. *Nature* 424, 810-816 (2003).
- [4] Kerker, M. *The Scattering of Light and other Electromagnetic Radiation* (Academic, New York, 1969).
- [5] Tlustý, T., Meller, A., and Bar-Ziv, R. Optical gradient forces of strongly localized fields. *Phys. Rev. Lett.* 81, 1738-1741 (1998).
- [6] Ashkin, A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime. *Biophys. J.* 61, 569-582 (1992).
- [7] Gauthier, R. C. Theoretical investigation of the optical trapping force and torque on cylindrical micro-objects. *J. Opt. Soc. Am. B* 14, 3323-3333 (1997).
- [8] Verdeyen, J. T. *Laser Electronics* (Prentice Hall, 3rd ed., 1995).
- [9] Ashkin, A., and Dziedzic, J. M. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. *Science* 235, 1517-1520 (1987).
- [10] Ashkin, A., Dziedzic, J. M., and Yamane, T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. *Nature* 330, 769-771 (1987).
- [11] Ashkin, A., and Dziedzic, J. M. Internal cell manipulation using infrared laser traps. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 86, 7914-7918 (1989).
- [12] Ashkin, A., Schutze, K. J., Dziedzic, J. M., Euteneuer, U., and Schliwa, M. Force generation of organelle transport measured *in vivo* by an infrared laser trap. *Nature* 348, 346-348 (1990).
- [13] Wright, G., Tucker, M. J., Morton, P. C., Sweitzer-Yoder, C. L., and Smith, S. E. Micromanipulation in assisted reproduction: A review of current technology. *Curr. Opin. Obstet. Gyn.* 10, 221-226 (1998).
- [14] Svoboda, K., Mitra, P. P., and Block, S. M. Fluctuation analysis of motor protein movement and single enzyme-kinetics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 91, 11782-11786 (1994).
- [15] Bustamante, C., Smith, S. B., Liphardt, J., and Smith, D. Single-molecule studies of DNA mechanics. *Curr. Opin. Struct. Biol.* 10, 279-285 (2000).
- [16] Crocker, J. C., and Grier, D. G. Microscopic measurement of the pair interaction potential of charged-stabilized colloid. *Phys. Rev. Lett.* 73, 352-355 (1994).
- [17] Crocker, J. C., and Grier, D. G. When like charges attract: The effects of geometrical confinement on long-range colloidal interactions. *Phys. Rev. Lett.* 77, 1897-1900 (1996).
- [18] Ohshima, Y. N. Direct measurement of infinitesimal depletion force in a colloid-polymer mixture by laser radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.* 78, 3963-3966 (1997).
- [19] Crocker, J. C., Matteo, J. A., Dinsmore, A. D., and Yodh, A. G. Entropic attraction and repulsion in binary colloids probed with a line optical tweezer. *Phys. Rev. Lett.* 82, 4352-4355 (1999).
- [20] Ashkin, A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elec.* 6, 841-856 (2000).
- [21] Zhuang, X. Unraveling DNA condensation with optical tweezers. *Science* 305, 188-190 (2004).
- [22] Berns, M. W., Tadir, Y., Liang, H., and Tromberg, B. Laser scissors and tweezers. *Methods Cell Biol.* 55, 71-98 (1998).
- [23] Creely, C. M., Volpe, G., Singh, G. P., Soler, M., and Petrov, D. V. Raman imaging of floating cells. *Opt. Express* 13 (16), 6105-6110 (2005).
- [24] Tang, H., Yao, H., Wang, G., Wang, Y., Li, Y.-q., and Feng, M. NIR Raman spectroscopic investigation of single mitochondria trapped by optical tweezers. *Opt. Express* 15 (20), 12708-12716 (2007).
- [25] Pauzauskis, P. J., Radenovic, A., Trepagnier, E., Shroff, H., Yang, P., and Liphardt, J. Optical trapping and integration of semiconductor nanowire assemblies in water. *Nature Mater.* 5, 97-101 (2006).
- [26] Svoboda, K., and Block, S. M. Optical trapping of metallic Rayleigh particles. *Opt. Lett.* 19, 930-932 (1994).
- [27] Ke, P. C., and Gu, M. Characterization of trapping force on metallic Mie particles. *Appl. Opt.* 38, 160-167 (1999).
- [28] Friese, M. E. J., Nieminen, T. A., Heckenberg, N. R., and Rubinsztein-Dunlop, H. Optical alignment and spinning of laser trapped microscopic particles. *Nature* 394, 348 (1998).
- [29] ประมาณค่าอุปกรณ์การจัดตั้ง optical tweezers เป็นดังต่อไปนี้ ค่า SLM ประมาณ 500,000 บาท ค่าเลนส์วัตถุ (oil-immersion objective) ประมาณ 90,000 บาท ค่าเลเซอร์ ประมาณ 120,000 บาท และค่าอุปกรณ์ optics (breadboard + lenses + mirrors + mounts) ประมาณ 200,000 บาท ทั้งนี้ไม่ได้รวมราคาล้องจุลทรรศน์ ซึ่งถือว่าในห้องปฏิบัติการทางชีวภาพส่วนใหญ่จะมีใช้กันอยู่แล้ว และถ้าต้องการวัดแรงระหว่างอนุภาคด้วย อาจต้องใช้อุปกรณ์เพิ่ม เช่น quadrant photo detector

เปิดประตูชีวเข้าสู่เซลล์⁺

จิรศักดิ์ วงศ์เอกบุตร¹

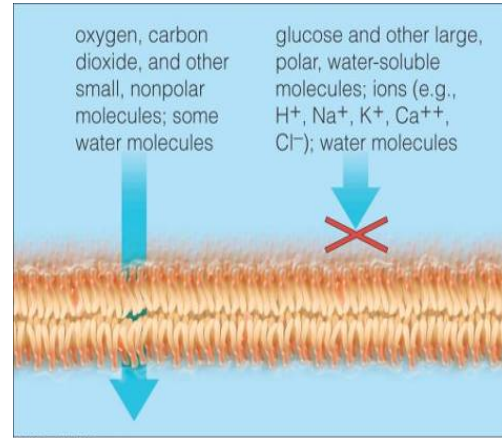
เซลล์และอวัยวะภายในของเซลล์ถูกแบ่งแยกออกจากสิ่งแวดล้อมภายนอกด้วยเยื่อหุ้มเซลล์(Cell membrane) โดยเยื่อหุ้มเซลล์นั้นประกอบด้วยชั้นไขมันซึ่งมีโครงสร้างหลัก คือฟอสโฟลิปิด(Phospholipid)เรียงตัวเป็น 2 ชั้น (lipid bilayer) โดยหันส่วนหัวที่มีขั้ว/ชอบน้ำ(Polar hydrophilic head)ออกด้านนอก และหันส่วนปลายที่ไม่มีขั้ว/ไม่ชอบน้ำ(Non-polar hydrophobic tail)เข้าด้านในของชั้นไขมัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลิพิดไบเลเยอร์ แสดงขอบเขตส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วของลิพิดไบเลเยอร์[1]

เยื่อหุ้มเซลล์มีสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membrane) ซึ่งยอมให้สารบางชนิด เช่น ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารไม่มีขั้วขนาดเล็ก แพร่ผ่านได้ และไม่ให้ผ่านให้น้ำตาลกลูโคส, ไอออน และสารที่มีขั้วขนาดใหญ่แพร่ผ่าน โดยตัวอย่างชนิดสารดังกล่าวได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2

แต่อย่างไรก็ตามการดำรงชีวิตของเซลล์นั้น จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนสารอาหารระหว่างตัวมันเองกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นธรรมชาติจึงได้สร้างช่องโปรตีนขนาดเล็กชื่อว่า โปรตีนทรานสเมมเบรน (transmembrane protein) จำนวนมากเพื่อเป็นกลไกพิเศษในการทำหน้าที่ยอมให้สารที่สำคัญ และจำเป็นต่อเซลล์ผ่านเข้าออกผนังเซลล์ได้[2] โดยกลไกการคัดกรองสารที่ธรรมชาติได้ออกแบบไว้นั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงมีความสนใจในการ



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงตัวอย่างการเลือกสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ [3]

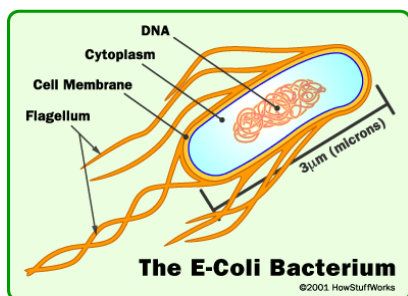
ศึกษาวิจัยสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของโปรตีนเหล่านี้ โดยใช้เทคนิคต่างๆทั้งด้านทฤษฎี และทางด้านการทดลอง เพื่อที่จะนำความรู้ที่ได้ มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับอนาคต เช่น เครื่องอ่านรหัสดีเอ็นเอ, เครื่องกรองน้ำบริสุทธิ์ประสิทธิภาพสูง, อุปกรณ์นำส่งยา เป็นต้น

ในบทความนี้ได้แนะนำตัวอย่างของท่อนาโนชนิดต่างๆ ที่คุณสมบัติน่าสนใจ ทั้งท่อนาโนที่มีอยู่ในธรรมชาติ และท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมา และอธิบายถึงคุณสมบัติของท่อนาโนเหล่านั้น ด้วยวิธีการศึกษาทางฟิสิกส์และเทคนิคแบบจำลองโมเลกุล (Molecular modeling) นอกจากนี้ยังมีการยกตัวอย่างแนวคิดการนำองค์ความรู้ที่ได้มีการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีทางด้านการรักษาโรคมะเร็ง เทคโนโลยีการกรองสาร และเทคโนโลยีทางด้านการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะเป็นประโยชน์และช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ให้ดีขึ้นต่อไป

สิ่งมีชีวิตตัวอย่างที่สำคัญซึ่งมักถูกเลือกใช้ในการศึกษา กลไกการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนสารระหว่างเซลล์กับสิ่งแวดล้อมคือ แบคทีเรียซึ่งมีชื่อว่า อี โคไล(E. coli) แสดงดังรูปที่ 3 ขนาดของแบคทีเรียชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1

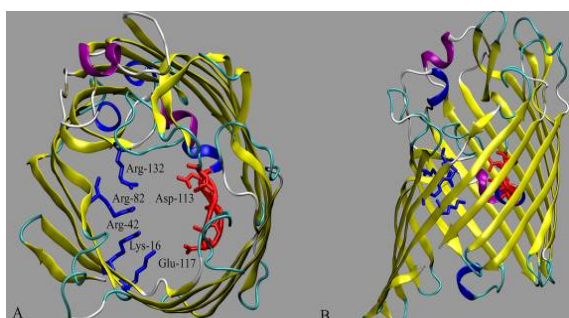
¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไมโครเมตรและมีความยาวประมาณ 3 ไมโครเมตร อี. โคไลเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ[4]ซึ่งมีผนังเซลล์ที่ค่อนข้างหนา ดังนั้นจึงมีโปรตีนทรานสเมมเบรน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า พอริน (porins) ทำหน้าที่ช่วยควบคุมการลำเลียงสารอาหารและสารพิษเข้าและออกจากเซลล์ผ่านผนังเซลล์[5].



รูปที่ 3 แบคทีเรียอีโคไล [6]

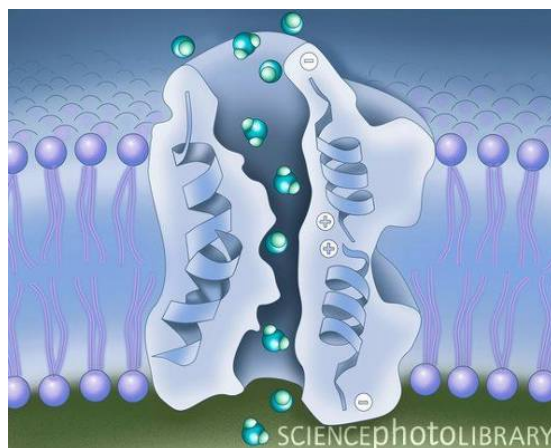
ตัวอย่างที่โดดเด่นของเมมเบรนโปรตีนสำหรับการแพร่แบบพาสซีฟ(passive diffusion) คือเอาเทอร์เมมเบรนโปรตีนเอฟ (Outer membrane protein F) หรือเรียกโดยย่อว่า โปรตีนโอเอ็มพีเอฟ (OmpF protein), รูปที่ 4, ซึ่งมีอยู่บนผนังเซลล์ประมาณ 100,000 ช่องกระจายบนผนังเซลล์[7]. โปรตีนโอเอ็มพีเอฟยอมให้สารที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า (Mass weight) 400 Da ผ่านได้ [8,9] ซึ่งธรรมชาติได้ใช้ช่องของโปรตีนชนิดนี้สำหรับนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ แต่อย่างไรก็ตามโมเลกุลอื่นที่โปรตีนนี้ไม่ได้ออกแบบไว้ก็สามารถใช้ช่องนี้ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้เช่นกัน[10] ดังนั้นเราจึงสามารถศึกษาเพื่อออกแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยา



รูปที่ 4 โครงสร้างสามมิติของเอาเทอร์เมมเบรนโปรตีนเอฟ (OmpF) โดยเน้นสีสำหรับกลุ่มประจุย่อย(charged residues)บริเวณส่วนที่แคบที่สุด(constriction region) (Arg-42-82-132, Lys-16 แสดงด้วยสีน้ำเงิน และ Glu-117, Asp-113 แสดงด้วยสีแดง) [12]

ปฏิชีวนะเพื่อให้สามารถแพร่เข้าสู่เซลล์โดยใช้โปรตีนโอเอ็มพีเอฟเป็นตัวกลางในการนำส่งยาเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียเชื้อโรคได้ [11]

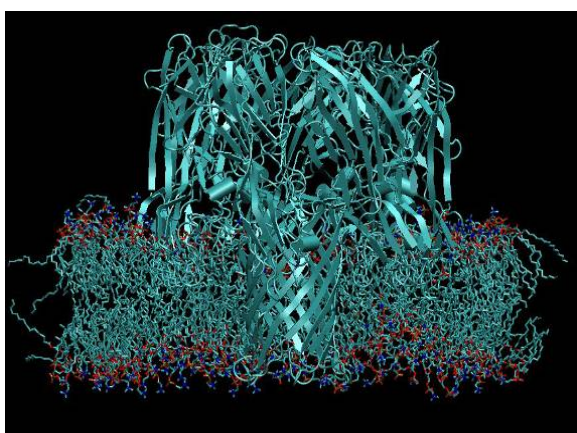
อีกตัวอย่างหนึ่งของระบบการแลกเปลี่ยนสารที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของเซลล์ คือระบบควบคุมการไหลเข้าออกของน้ำ ซึ่งระบบนี้โคควบคุมด้วยโปรตีนชนิดหนึ่งที่อยู่บนผนังเซลล์ที่ชื่อว่า โปรตีนอะควาพอริน (Aquaporin)[13] แสดงดังรูปที่ 5 โปรตีนชนิดนี้ทำหน้าที่ควบคุมการไหลเข้าออกของน้ำในขณะเดียวกันมันยังสามารถป้องกันการเข้าออกของไอออนบวกไม่ให้ผ่านตัวมันได้ด้วย[14,15] ดังนั้นโปรตีนอะควาพอรินจึงเป็นโปรตีนที่สำคัญในการควบคุมสมดุลของน้ำภายในและภายนอกเซลล์ โดยเปรียบเสมือนกับเป็นระบบประปาของเซลล์นั่นเอง



รูปที่ 5 โปรตีนอะควาพอริน (Aquaporin) [16]

ช่องเมมเบรนโปรตีนนั้นไม่ได้ถูกออกแบบมาเพียงแค่นำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ และป้องกันสารที่เซลล์ไม่ต้องการให้อยู่ด้านนอกเซลล์เท่านั้น แต่ช่องเมมเบรนโปรตีนยังสามารถนำมาใช้เป็นอาวุธป้องกันตัวและใช้ในการรุกรานศัตรูด้วยการทำลายสมดุลการเข้าออกของสารผ่านผนังเซลล์ของศัตรูได้อีกด้วย ตัวอย่างของโปรตีนประเภทนี้ได้แก่ โปรตีนอัลฟ่าฮีโมไลซิน (Alpha-hemolysin) ดังรูปที่ 6 โปรตีนชนิดนี้เป็นพิษที่ถูกสร้างมาจากแบคทีเรีย ชื่อว่าสแตฟีโลคอคคัส อลริอุส (Staphylococcus aureus) แบคทีเรียจะหลั่ง ฮีโมไลซิน โมโนเมอร์ (Hemolysin monomer) ซึ่งโมโนเมอร์จะรวมตัวกันเอง(Self assembly forming) จำนวน 7 โมเลกุล และกลายเป็นช่องบนผนังเซลล์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตร

โดยรูรั่วนี้มีสมบัติการไหลผ่านแบบไม่เจาะจง ซึ่งมีขนาดใหญ่พอสำหรับโมเลกุลที่มีขนาดเล็กให้ผ่านไปได้ ตัวอย่างโมเลกุลที่สามารถผ่านช่องโปรตีนอัลฟาฮีโมไลซิน ได้แก่ น้ำตาล, ไอออน, น้ำ หรือ อะดีโนซีน ไตรฟอสเฟส (Adenosine triphosphate, ATP) เป็นต้น และการไหลผ่านแบบไม่เจาะจงนี้จะมีผลให้เซลล์ไม่สามารถควบคุมปริมาณสารสำคัญภายในตัวมันเอง และเป็นเหตุอันตรายเป็นเซลล์ถึงขั้นตายได้ ด้วยสมบัติดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โปรตีนอัลฟาฮีโมไลซินได้รับความสนใจนำมาใช้รักษาโรคมะเร็ง[18] หรืออีกนัยหนึ่งเพื่อนำมาใช้ฆ่าเซลล์มะเร็งโดยมีนักวิจัยทางด้านวิศวกรรมชีวภาพ (Bioengineering) ได้

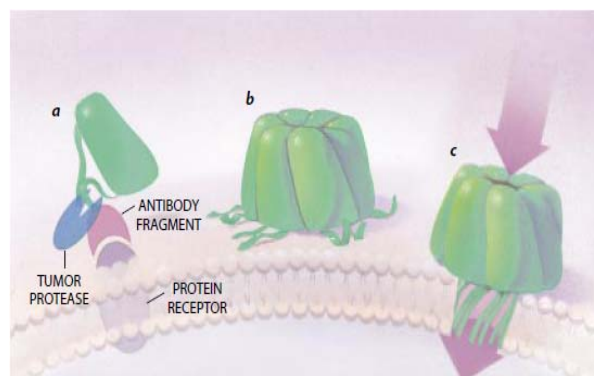


รูปที่ 6 โครงสร้างโปรตีนอัลฟาฮีโมไลซิน (Alpha-hemolysin) ที่ฝังตัวในลิพิดไบเลเยอร์ (lipid bilayer) [17]

พัฒนาดัดแปลงโปรตีนอัลฟาฮีโมไลซิน เพื่อให้สามารถจดจำผนังของเซลล์มะเร็ง ด้วยการติดแอนติบอดี (Antibody) เข้ากับส่วนปลายของอัลฟาฮีโมไลซิน โมโนเมอร์ (Alpha-hemolysin monomer) และเมื่อมันจับตัวกับผนังเซลล์ของเซลล์มะเร็งมันจะรวมตัวและเรียงตัวเป็นรูบนผนังเซลล์ (self assembly pore formation) ซึ่งรูเหล่านี้จะทำให้ผนังเซลล์มะเร็งรั่วจนไม่สามารถควบคุมการไหลของสารสำคัญโดยเฉพาะโมเลกุลน้ำ และรวมไปถึงยาที่ใช้ในการฆ่าเซลล์มะเร็งก็สามารถเข้าไปสู่ด้านในของเซลล์ได้ง่ายขึ้น กระบวนการรวมตัวของโปรตีนอัลฟาฮีโมไลซิน และการเกิดรูบนผนังเซลล์มะเร็งแสดงไว้ดังรูปที่ 7

ประโยชน์อีกด้านหนึ่งของโปรตีนชนิดนี้ คือนอกจากขนาดความกว้างของรูประมาณ 2 นาโนเมตร ทำให้โปรตีนอัลฟาฮีโมไลซิน เป็นทางเลือกที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์ประเภทนาโนเซนเซอร์ เช่น ในการอ่านรหัสของสายดีเอ็นเอ หรือวัดความ

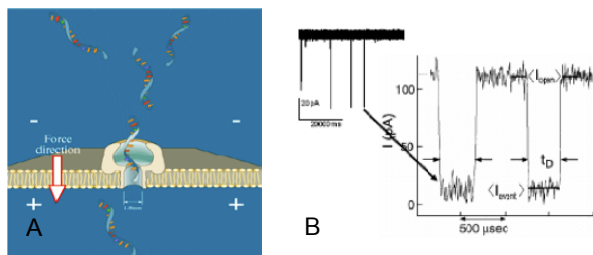
เข้มข้นของสารในสารละลายที่มีความละเอียดสูงได้[19] โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์ไฟฟ้าเบื้องต้น คือเราสามารถตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านช่องของอัลฟาฮีโมไลซิน และเนื่องจากโมเลกุลของดีเอ็นเอสายเดี่ยว (single strand DNA) มีค่าประจุเป็นลบ และมีขนาดเล็กกว่าช่องอัลฟาฮีโมไลซิน ดังนั้นมันจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องอัลฟาฮีโมไลซินไปได้ และในขณะที่โมเลกุลของดีเอ็นเออยู่ในช่องอัลฟาฮีโมไลซิน มันจะกีดขวางการไหลของไอออน และค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจากไอออนที่วัดได้จะมีค่าลดลง โดยความถี่ของการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้า ไอออนนั้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความหนาแน่นของสายดีเอ็นเอที่ละลายอยู่ในสารละลายทำให้เราสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของสายดีเอ็นเอที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายได้ นอกจากนี้



รูปที่ 7 แสดงขั้นตอนการเกิดรูบนเยื่อหุ้มเซลล์มะเร็ง [18] โดยโมเลกุลอัลฟาฮีโมไลซิน โมโนเมอร์ที่ถูกดัดแปลงเพื่อให้สามารถจดจำผนังเซลล์มะเร็งจะไปเกาะบนผิวของผนังเซลล์ (a) จากนั้นจะรวมตัวเป็นกลุ่ม (b) และเกิดเป็นรูเปิดบนผนังเซลล์ (c) เพื่อให้สารเคมีหรือยาผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ต่อไป

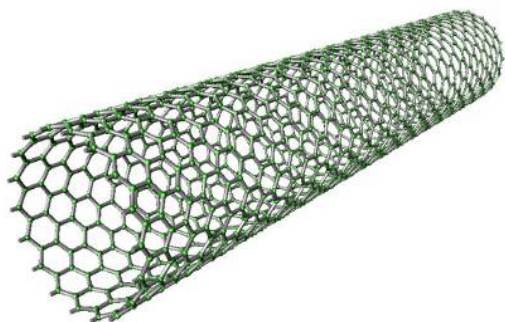
ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าลดลง และปริมาณของกระแสไฟฟ้า ไอออนขณะที่มีดีเอ็นเอแขวนอยู่ในช่องจะมีสัมพันธ์กับความจำเพาะของโมเลกุล ซึ่งจะทำให้สามารถระบุชนิดของเบสในสายดีเอ็นเอได้ ด้วยเทคนิคนี้จะทำให้เราถอดรหัสเบสบนสายดีเอ็นเอได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งหลักการเบื้องต้นของการวิเคราะห์รหัสเบสบนสายของดีเอ็นเอนั้นได้ถูกแสดงเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 8

จากประโยชน์ของช่องเมมเบรนโปรตีนที่ได้กล่าวไปข้างต้นทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจศึกษาวิจัยกลไกการไหลภายในช่องเมมเบรนโปรตีนเหล่านั้น เพื่อนำมาพัฒนานวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีสมัยใหม่สำหรับอนาคต เช่น ระบบการ-

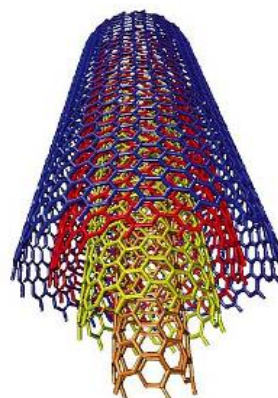


รูปที่ 8 แสดงหลักการอ่านรหัสสายดีเอ็นเอ [19] รูป A แสดงตัวอย่างแผนภาพการจำลองการทดลองโดยฝังโปรตีนอัลฟาไฮโมโกลบินไปบนชั้นของไขมันและใส่สนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไอออน และผลักดันดีเอ็นเอสายเดี่ยวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องของโปรตีน โดยผลการทดลองของกระแสไฟฟ้าได้ถูกแสดงไว้ดังรูป B

นำส่งยา, ระบบการกรองเกลือออกจากน้ำทะเลให้ได้น้ำจืดที่มีประสิทธิภาพ, และระบบตรวจวัดชนิดและปริมาณของสารตัวอย่าง [18, 20, 21, 22, 23] แต่อย่างไรก็ตามช่องเมมเบรนโปรตีนซึ่งเป็นช่องนาโนแบบชีวภาพ ยังมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ความเสถียร, ความแข็งแรงคงทน, และค่อนข้างยากในการผลิตระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงค่อนข้างมีอุปสรรค และยากลำบากที่จะนำช่องนาโนแบบชีวภาพไปพัฒนาใช้งานจริงในระดับมหภาค แต่เนื่องจากคุณสมบัติเด่นหลายด้าน นักวิจัยจึงได้มีการสนใจและพัฒนาช่องนาโนแบบสังเคราะห์เพื่อลอกเลียนแบบธรรมชาติ และเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรงทนทานขึ้นมา โดยตัวอย่างที่สำคัญคือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายไอโซโทป (isotope) ของกราฟไฟต์คาร์บอน (Graphitic carbon) โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนมีผนัง 1, 2, หรือหลายชั้นก็ได้แสดงดังรูปที่ 9 และ 10

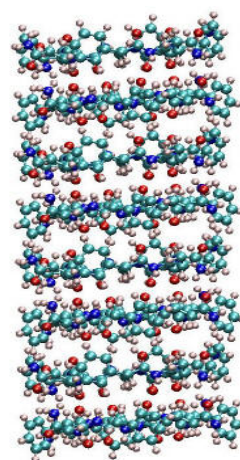


รูปที่ 9 ท่อนาโนคาร์บอนมีผนังชั้นเดียว [24]



รูปที่ 10 ท่อนาโนคาร์บอนมีผนังหลายชั้น [25]

คุณสมบัติที่โดดเด่นหลายอย่างของท่อนาโนคาร์บอนคือความแข็งแรง, ความยืดหยุ่น, การเป็นตัวนำไฟฟ้า และอื่นๆอีกมากมาย ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ท่อนาโนคาร์บอน จึงได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิจัยต่างๆ โดยมีผลงานวิจัยตีพิมพ์มากกว่าหลายร้อยฉบับต่อปี แต่อย่างไรก็ตาม ความรู้ความเข้าใจสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนยังคงมีน้อยซึ่งยังอุปสรรคสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานจริงในส่วนของอุตสาหกรรมเนื่องจากราคาที่ต้นทุนที่แพงมาจากการผลิตเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดี และที่สำคัญยังไม่ได้รับการรับรองด้านความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงมีความสนใจพัฒนาสังเคราะห์ท่อนาโนชนิดอื่นเพิ่มขึ้น นั่นคือการสังเคราะห์ท่อนาโนจากกรดอะมิโนโดยนำมาเรียงต่อกันเป็นท่อเรียกว่าท่อนาโนเปปไทด์ (peptide nanotube) [26, 27] ดังแสดงด้วยรูปที่ 11 ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในทางการแพทย์เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต (Bio-compatibility).



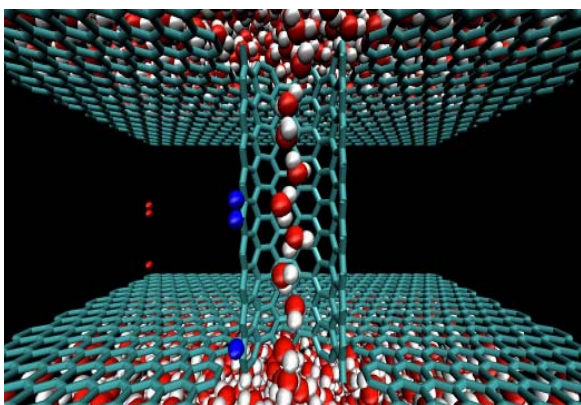
รูปที่ 11 ท่อนาโนเปปไทด์ [26, 27]

จากประโยชน์และความหลากหลายของช่องนาโนดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น ปัญหาการไหลของโมเลกุลขนาดเล็กผ่านช่องนาโนจึงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเพื่อการศึกษาวิจัยอย่างมากแต่เนื่องจากความรู้ที่มีอยู่เดิมนั้นไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการไหลในระดับนาโนเมตรได้ ด้วยเหตุมาจากขนาดที่เล็กมาก ทำให้ปรากฏการณ์ พฤติกรรม และสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากความรู้เดิมที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ ทำให้ความรู้ที่มีอยู่ในขณะนี้ยังไม่เพียงพอที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานได้ ประกอบกับข้อจำกัดทางอุปกรณ์ในการทดลองที่ใช้ในการศึกษาระบบในระดับนาโน ทำให้นักวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะนักฟิสิกส์ได้พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของโมเลกุลโดยคอมพิวเตอร์ หรือเรียกว่า “โมเลกูลาร์ไดนามิกส์ซิมูเลชัน” (Molecular dynamics simulation) [28, 29, 30] เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนามากกว่า 30 ปี โดยปัจจุบันนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาวิจัยอย่างมากมาย ตั้งแต่ระบบที่อยู่ในระดับนาโนเมตรจะกระทั่งถึงระดับไมโครเมตร ประกอบกับการพัฒนาประสิทธิภาพขั้นสูงทางด้านคอมพิวเตอร์ จึงทำให้ผลการคำนวณทางฟิสิกส์มีความรวดเร็ว, แม่นยำมากขึ้น และยังสามารถคาดการณ์การทดลองปริมาณทางฟิสิกส์บางอย่างได้ค่อนข้างดี

เทคนิคโมเลกูลาร์ไดนามิกส์ซิมูเลชันได้ถูกนำมาใช้ศึกษาการไหลของน้ำผ่านท่อนาโนคาร์บอนโดย สุมเมอร์และคณะ [31] ได้ตีพิมพ์ในวารสารเนเจอร์ ปี ค.ศ. 2001 โดยผลการทดลองจากแบบจำลองเป็นที่น่าสนใจและปลาดใจอย่างยิ่ง ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในท่อคาร์บอนซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และถ้าท่อคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากพอ (ประมาณ 0.8 nm) น้ำที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในท่อนั้นจะต่อเรียงตัวเป็นเส้นสายเดี่ยว 1 มิติต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วผ่านท่อโดยอัตราการไหลประมาณ 17 โมเลกุลต่อนาโนวินาที หรือ 99 cm s^{-1} โดยการทำแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ทำก่อนหน้านี้จะมีผลทดลองจริง ต่อมาได้มีการทดลองด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การเลี้ยวเบนนิวตรอน (neutron diffraction) [32], ทรานสมิซชันสเปกโตรสโคปี (transmission electron microscopy) [33], นิวเคลียร์แมกเนติกสเปกโตรสโคปี (nuclear magnetic resonance spectroscopy) [34], และ รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) [35] เพื่อยืนยันว่าโมเลกุลน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไป

อยู่ในท่อคาร์บอนได้จริงตามที่ได้นำมาโดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ได้มีการทดลองการไหลของแก๊สและน้ำผ่านท่อคาร์บอน [36] และผลการทดลองได้แสดงให้เห็นต่อไปอีกว่าการไหลของโมเลกุลของน้ำในท่อคาร์บอนนั้นมีความเร็วกว่าผลการคำนวณที่ได้จากการประมาณโดยวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม (Poiseuille permeation) กว่า 10,000-100,000 เท่า จากผลความสำเร็จของการใช้แบบจำลองโมเลกูลาร์ไดนามิกส์ซิมูเลชันเพื่อคาดการณ์ปริมาณ และสมบัติทางฟิสิกส์จากที่ได้กล่าวในตัวอย่างข้างต้น ประกอบกับประโยชน์ที่จะได้รับเมื่อนำท่อคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้มีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มได้ออกแบบท่อคาร์บอนชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์โดยใช้แบบจำลองโมเลกูลาร์ไดนามิกส์ซิมูเลชันกันมากขึ้น และหนึ่งในตัวอย่างที่น่าสนใจคือ การออกแบบท่อคาร์บอนโดยนำความรู้ทางฟิสิกส์มาประยุกต์เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำภายในท่อคาร์บอนได้ โดยใช้เทคนิคที่สำคัญ คือการใช้ความดัน [37], การใช้สนามไฟฟ้า [38], และการใช้ประจุซึ่งกระจายในรูปแบบต่างๆ บนท่อคาร์บอน [21, 39, 40] โดยรูปแบบการกระจายของประจุได้ลอกเลียนแบบมาจากโปรตีนอะควาพอรินแบบจำลองการไหลผ่านท่อคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 12 [21, 40] ซึ่งแบบจำลองนี้มีแนวความคิดที่ดีมากและผลจากการจำลองได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอย่างมากคือพบทิศทางการไหลของน้ำผ่านช่องนาโนซึ่งจะเป็นประโยชน์กับเทคโนโลยีการกรองอนุภาคขนาดเล็กและการตรวจวัดชนิดของโมเลกุลโดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้รับเผยแพร่ในวารสารชั้นนำได้แก่นเจอร์นาโนเทคโนโลยี (Nature Nanotechnology) ในปี ค.ศ. 2007

จากผลงานวิจัยข้างต้นนอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลองแล้ว ผลงานชิ้นนี้ยังเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์มาคำนวณเพื่อนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมและปรากฏการณ์ทางธรรมชาติในระดับนาโนเมตรได้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีระบบทางชีวภาพที่ความซับซ้อนอีกมากมายซึ่งเป็นปัญหาที่รื้อให้นักวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะนักฟิสิกส์ชีวภาพได้ค้นคว้าวิจัย แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรและเทคโนโลยีที่มีก่อนหน้านี้จึงทำให้ไม่สามารถศึกษาวิจัยได้ดีเท่าที่ควร ดังนั้นความรู้วิทยาศาสตร์พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการไหลของโมเลกุลผ่านท่อคาร์บอนจึงยังมีความต้องการ และมีความจำเป็น



รูปที่ 12 แบบจำลองการไหลผ่านท่อนาโนคาร์บอนโดยมีการกระจายประจุบนท่อคล้ายกับประจุที่มีอยู่ในโปรตีนอะควาพอริน ซึ่งประจุคู่สื่อน้ำเงินตรงบริเวณกลางท่อมักมีค่าเท่ากับ $+0.5e$ และประจุเดี่ยวสื่อน้ำเงินตรงบริเวณปลายท่อใกล้เคียงกับแผ่นกราฟีนมีค่าเท่ากับ $+1.0e$ [21, 40]

อีกมากมายเพื่อที่จะนำมาเป็นฐานความรู้ในการวิจัย, พัฒนา, และประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.yellowtang.org/images/lipid_bilayer_c_la_784.jpg
 [2] Tyree, M. T. (2003). "The ascent of water." *Nature* 423(6943): 923-923.
 [3] <http://www.yellowtang.org/images/0315.jpg>
 [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Gram-negative>
 [5] Schlaeppli, J. M., et al. (1985). "Accessibility of lysyl residues of Escherichia coli B/r porin (OmpF) to covalent labeling reagents of different sizes. An approach for a three-dimensional structure of a channel-forming protein." *J Biol Chem* 260(17): 9775-9783.
 [6] <http://theboldcorsicanflame.files.wordpress.com/2011/05/cell-ecoli.gif>
 [7] Rosenbusch, J. P. (1974). "Characterization of the major envelope protein from Escherichia coli. Regular arrangement on the peptidoglycan and unusual dodecyl sulfate binding." *J Biol Chem* 249(24): 8019-8029
 [8] Van Gelder, P., et al. (2000). "Understanding the function of bacterial outer membrane channels by reconstitution into black lipid membranes." *Biophys Chem* 85(2-3): 153-167.
 [9] Danelon, C., et al. (2003). "Molecular origin of the cation selectivity in OmpF porin: single channel conductances vs. free energy calculation." *Biophys Chem* 104(3): 591-603.

[10] Simonet, V., et al. (2000). "Substitutions in the eyelet region disrupt cefepime diffusion through the Escherichia coli OmpF channel." *Antimicrob Agents Chemother* 44(2): 311-315.
 [11] Danelon, C., et al. (2006). "Interaction of zwitterionic penicillins with the OmpF channel facilitates their translocation." *Biophys J* 90(5): 1617-1627.
 [12] <http://www.bioscience.org/2009/v14/af/3446/figures.htm>
 [13] Agre, P., et al. (1993). "Aquaporins: a family of water channel proteins." *Am J Physiol* 265(3 Pt 2): F461.
 [14] de Groot, B. L., et al. (2001). "A refined structure of human aquaporin-1." *FEBS Lett* 504(3): 206-211.
 [15] de Groot, B. L., et al. (2003). "The mechanism of proton exclusion in the aquaporin-1 water channel." *J Mol Biol* 333(2): 279-293.
 [16] <http://www.sciencephoto.com/media/95227>
 [17] <http://pirun.ku.ac.th/~fscijsw/research&products.htm>
 [18] Bayley, H. (1997). "Building doors into cells." *Scientific American* 277(3): 62-67.
 [19] Butler, T. Z., et al. (2007). "Ionic current blockades from DNA and RNA molecules in the alpha-hemolysin nanopore." *Biophysical Journal* 93(9): 3229-3240.
 [20] Bayley, H. (2009). "Membrane-protein structure: Piercing insights." *Nature* 459(7247): 651-652.
 [21] Gong, X. J., et al. (2007). "A charge-driven molecular water pump." *Nature Nanotechnology* 2(11): 709-712.
 [22] Bianco, A., et al. (2005). "Cationic carbon nanotubes bind to CpG oligodeoxynucleotides and enhance their immunostimulatory properties." *Journal of the American Chemical Society* 127(1): 58-59.
 [23] Service, R. F. (2003). "Molecular electronics - Nanodevices make fresh strides toward reality." *Science* 302(5649): 1310-1310.
 [24] <http://www.gaia3d.co.uk/3d-models/3d-chemistry/carbon-nanotube/>
 [25] http://www.graphistrength.fr/sites/group/en/products/detailed_sheets/multi_wall_carbon_nanotubes_graphistrength/general_characteristics.page
 [26] Ghadiri, M. R., et al. (1993). "Self-assembling organic nanotubes based on a cyclic peptide architecture." *Nature* 366(6453): 324-327
 [27] Ghadiri, M. R., J. R. Granja, et al. (1994). "Artificial transmembrane ion channels from self-assembling peptide nanotubes." *Nature* 369(6478): 301-304.
 [28] Limbach, H. J., et al. (2006). "ESPResso - an extensible simulation package for research on soft matter systems." *Computer Physics Communications* 174(9): 704-727.

- [29] Hess, B., et al. (2008). "GROMACS 4: Algorithms for highly efficient, load-balanced, and scalable molecular simulation." *Journal of Chemical Theory and Computation* 4(3): 435-447
- [30] Brooks, B. R., et al. (2009). "CHARMM: The Biomolecular Simulation Program." *Journal of Computational Chemistry* 30(10): 1545-1614.
- [31] Hummer, G., et al. (2001). "Water conduction through the hydrophobic channel of a carbon nanotube." *Nature* 414(6860): 188-190.
- [32] Kolesnikov, A. I., et al. (2004). "Anomalously soft dynamics of water in a nanotube: a revelation of nanoscale confinement." *Phys Rev Lett* 93(3): 035503.
- [33] Naguib N., et al. (2004). "Observation of Water Confined in Nanometer Channels of Closed Carbon Nanotubes." *Nano Letters* 4(11): 2237-2243.
- [34] Wang, H. J., et al. (2008). "Temperature-induced hydrophobic-hydrophilic transition observed by water adsorption." *Science* 322(5898): 80-83.
- [35] Cambre, S., and Wenseleers, W. (2011). "Separation and Diameter-Sorting of Empty (End-Capped) and Water-Filled (Open) Carbon Nanotubes by Density Gradient Ultracentrifugation." *Angewandte Chemie-International Edition* 50(12): 2764-2768.
- [36] Holt, J. K., et al. (2006). "Fast mass transport through sub-2-nanometer carbon nanotubes." *Science* 312(5776): 1034-1037.
- [37] Zhu, F. Q., et al. (2004). "Theory and simulation of water permeation in aquaporin-1." *Biophysical Journal* 86(1): 50-57.
- [38] Joseph, S. and Aluru, N. R. (2008). "Pumping of confined water in carbon nanotubes by rotation-translation coupling." *Physical Review Letters* 101(6): 064502.
- [39] Li, J. Y., et al. (2007). "Electrostatic gating of a nanometer water channel." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(10): 3687-3692.
- [40] Wong-Ekkabut, J., et al. (2010). "Static charges cannot drive a continuous flow of water molecules through a carbon nanotube." *Nature Nanotechnology* 5(8): 555-557.

การผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะ ตอนที่ 2 – อะลูมินา

Deformation around Indentation of Brittle Materials II—Alumina

อภิชาติ ลิ้มปัทมพานิช¹

จากบทความตอนที่แล้ว [1] ได้กล่าวถึง การผิดรูป (Deformation) ของวัสดุโดยการกด (Indentation) และการศึกษาการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดโดย การจัดเป็นชั้น (Sequential polishing) ซึ่งในบทความข้างต้นได้อธิบายถึงลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับการผิดรูปที่สังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เช่น รอยแตก รอยแตก หลุมซึ่งเกิดจากการหลุดของวัสดุบริเวณผิว และ วงแสงจาง (Halo) รอบรอยกด ซึ่งสามารถใช้จำแนก เขตพลาสติก (Plastic zone) หรือบริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบไม่ยืดหยุ่นได้ แต่ข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง คือ รูปภาพไม่สามารถบ่งบอก บริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic zone) หรือเกิดการผิดรูปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีลักษณะทางกายภาพไม่แตกต่างจากบริเวณที่ไม่เกิดการผิดรูป นอกจากนี้การจำแนกเขตพลาสติกอย่างชัดเจนทำได้ยาก เนื่องจากเขตพลาสติกบางพื้นที่ไม่เกิดรอยแตก [1] ดังนั้นการศึกษากการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของวัสดุเปราะจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นควบคู่ไปกับการจัดเป็นชั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึงเทคนิคจำเพาะที่ใช้ในการศึกษากการผิดรูปบริเวณรอบรอยกดของอะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (ซึ่งถือเป็นวัสดุเปราะชนิดหนึ่ง) เท่านั้น

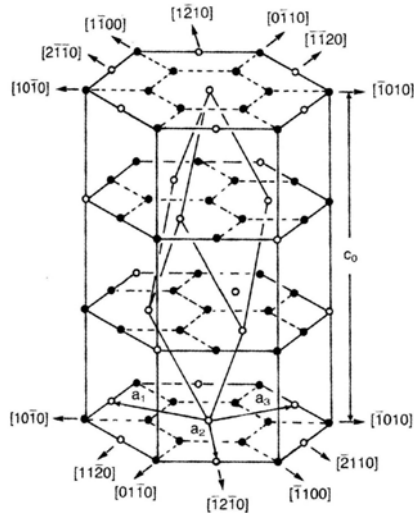
อะลูมินา (Alumina) จัดเป็นเซรามิกที่ได้รับความนิยมสูงชนิดหนึ่งเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีความแข็งแรงสูง (ประมาณ 20 GPa จากการทดสอบด้วยหัวกดวิกเกอร์ส [1]) มีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 2045°C) มีความต้านทานต่อการสึกหรอ การสึกกร่อน การกัดกร่อน รวมถึงสารเคมีทั้งกรดและด่าง โดยทั่วไปนิยมนำอะลูมินามาใช้เป็นวัสดุขัดถู (Abrasive), เซรามิกทนไฟ (Refractories), ฉนวนกันความร้อน (Insulator), วัสดุกันกระแทกในเชิงยุทธโธปกรณ์ (Ballistic) เป็นต้น ในเชิงฟิสิกวิทยาอะลูมินาประกอบด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมและออกซิเจนโดยผลึกจัดเรียงเป็นรูปหกเหลี่ยม (คล้ายแท่งดินสอ) หรือเรียกว่า เฮก

ซะโกนัล (Hexagonal Closed Pack—HCP) ซึ่งมีอะตอมของอะลูมิเนียมเติมเต็มเพียง 2/3 ของที่ว่างอะตอมทั้งหมดในตำแหน่ง A-site และอะตอมของออกซิเจนเติมเต็มที่ว่างอะตอมทั้งหมดในตำแหน่ง B-site อะลูมินาจึงมีสูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 ดังรูปที่ 1 ที่แสดงโครงสร้างผลึกอะลูมินา ในธรรมชาติอะลูมินามีสารเจือปนคือ โครเมียมหรือโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) โดยอะตอมของโครเมียมเข้าไปแทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมเป็นบางส่วน สารเจือปนดังกล่าวเป็นประโยชน์ในการศึกษาการผิดรูปรอบรอยกดของอะลูมินาซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

การตรวจวัด ความเค้นตกค้าง (Residual stress) เป็นวิธีตรวจสอบการผิดรูปของวัสดุวิธีหนึ่งเมื่อมีแรงอัดมากระทำ หลังจากที่ไม่มีความเค้นจากการกดมากระทำต่อวัตถุ (เช่น ในกรณีการทดสอบการกด ในตอนที่ผิวของวัตถุไม่ได้สัมผัสกับหัวกดแล้ว) วัตถุเกิดการผิดรูปได้เนื่องจากความเค้นตกค้างภายในวัตถุ โดยทั่วไปความเค้นตกค้างเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการผลิต เช่น การเย็นตัวของวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิดโดยที่แต่ละองค์ประกอบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกัน (Thermal expansion coefficient) นอกจากนั้นสามารถเกิดจากการขัดผิวชิ้นงานซึ่งทำให้เกิดการผิดรูปและความเค้นตกค้างแบบอัดบริเวณพื้นผิว เป็นต้น

เทคนิคที่เป็นที่ยอมรับในการใช้ตรวจสอบความเค้นตกค้างที่จะกล่าวถึงในบทความนี้คือ (1) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction), (2) การเลี้ยวเบนของนิวตรอน (Neutron diffraction), และ (3) จุลทรรศน์เรืองแสง (Fluorescence microscopy) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ในอดีตการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบความเค้นตกค้างโดยการวัดความเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอะตอมหรือแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter) แต่มีข้อเสีย

¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของอะลูมินา จุดทึบแสดงตำแหน่งของอะลูมิเนียมและจุดโปร่งแสดงตำแหน่งที่ว่าง [2]

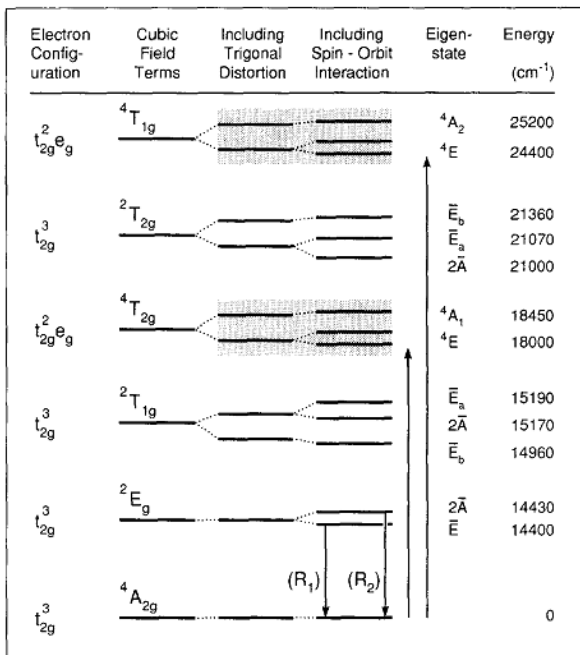
คือ รังสีเอกซ์ทะลุลงไปในตัวไม่มากและการใช้รังสีเอกซ์เป็นวิธีการทดสอบที่ทำลายชิ้นงาน (Destructive testing) การเลี้ยวเบนของนิวตรอนเป็นวิธีที่นำมาใช้ในเวลาต่อมาเนื่องจากนิวตรอนสามารถทะลุลงไปในตัวมากกว่าและการใช้นิวตรอนเป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำลายชิ้นงาน (Non-destructive testing) อย่างไรก็ตามข้อเสียคือ เครื่องมือมีราคาแพงและการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก ส่วนจุดทึบของรังสีเอกซ์เป็นวิธีล่าสุดที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความเค้นตกค้างซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าเทคนิคสองวิธีแรกคือ มีความละเอียด (Resolution) ที่สูงเนื่องจากปริมาตรของชิ้นงานที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างตรวจจับ (Interaction volume) น้อยกว่า ต้นทุนในการเตรียมชิ้นงานที่ต่ำและความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ข้อเสียของเทคนิคจุลทรรศน์เรืองแสงคือ ชิ้นงานจะต้องโปร่งใสหรือโปร่งแสง หากเป็นชิ้นงานทึบแสง สัญญาณแสงที่เกิดจากการเรืองแสงจะไม่สามารถตรวจจับได้เนื่องจากไม่เกิดการส่องผ่านออกมาจากชิ้นงาน สำหรับอะลูมินาที่มีความพรุนน้อยกว่าร้อยละ 1 ถือว่ามีความโปร่งใสมากสามารถใช้เทคนิคดังกล่าวในการตรวจจับความเค้นตกค้างเพื่อศึกษาการผิวดรูปรอบรอยกดของวัสดุประาได้

หลักการทำงานของจุลทรรศน์เรืองแสงคือการตรวจจับสัญญาณการเรืองแสงจาก อันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานและโฟตอนจากแหล่งกำเนิดแสง เมื่อโฟตอนกระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลในระดับชั้นพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น

หลังจากนั้นอิเล็กตรอนกลับสู่ระดับชั้นพลังงานเริ่มต้นและรวมกับโฮล ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานแบบแผ่รังสี (Radiative recombination) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการเรืองแสง (Luminescence)

ในกรณีของอะลูมินา การเรืองแสงเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโครเมียมซึ่งเจืออยู่ในอะลูมินาและโฟตอน จากความรู้ทางด้านโครงสร้างอะตอมและผลึกวิทยาเมื่อไอออนของโครเมียมเข้าไปแทนที่ไอออนของอะลูมิเนียมทำให้ผลึกเปลี่ยนสมมาตรกลายเป็นสมมาตรแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) โครเมียมเป็นธาตุแทรนซิชันที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ทำให้เกิดระดับชั้นพลังงาน คือ $4A_{2g}$ (สถานะพื้น) $2E_g$ $2T_{1g}$ $4T_{2g}$ $2T_{2g}$ และ $4T_{1g}$ (สถานะถูกกระตุ้น) ดังรูปที่ 2 และเมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างสปินและออร์บิต (Spin-orbit interaction) ของอิเล็กตรอนระดับพลังงานสามารถแบ่งแยกออกเป็นระดับพลังงานย่อยอีก สำหรับเทคนิคนี้จะสนใจศึกษาการปลดปล่อยพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น $2E_g$ ไปยังชั้น $4A_{2g}$ โดยที่ระดับพลังงานชั้น $2E_g$ สามารถแบ่งแยกเป็นระดับพลังงาน 2 ชั้นมีชื่อเฉพาะเรียกว่า Ruby line หรือ R-line (R_1 มีเลขคลื่นอยู่ที่ $14,400 \text{ cm}^{-1}$ และ R_2 มีเลขคลื่นอยู่ที่ $14,430 \text{ cm}^{-1}$) เมื่อมีการผิวดรูปในอะลูมินาที่เจือโครเมียม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกทำให้ตำแหน่งไอออนของโครเมียมเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ระดับพลังงานที่เกิดการปลดปล่อยเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ตำแหน่งความถี่ของสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไปด้วย (รูปที่ 3)

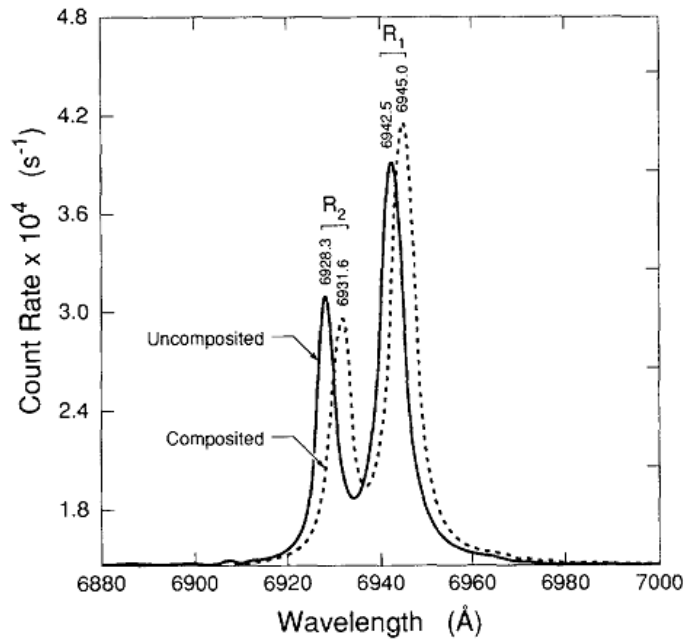
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือความถี่ของเส้นสเปกตรัมดังกล่าวเป็นไปตามความสัมพันธ์ $\Delta\nu = \pi_{ij}\sigma_{ij}$ เมื่อ $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ (Frequency shift) ของ R-line โดยที่ ν คือ ความถี่เมื่อมีความเค้นตกค้าง และ ν_0 คือ ความถี่เมื่อไม่มีความเค้นตกค้าง, ส่วน π_{ij} คือสัมประสิทธิ์เพียโซสเปกโตรสโกปี (Piezospectroscopic coefficient) หรือสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเปลี่ยนแปลงความถี่ และ σ_{ij} คือ เทนเซอร์ความเค้น ในกรณีที่ไอออนของโครเมียมเข้าไปแทนที่ไอออนอะลูมิเนียมในโครงสร้างอะลูมินาทำให้เกิดสมมาตรเตตระโกนัลซึ่งเป็นสมมาตรเชิงแกนเดี่ยว (Uniaxial) จะได้ว่า $\pi_{11} = \pi_{22} \neq \pi_{33}$ เมื่อให้ $\pi_a = \pi_{11} = \pi_{22}$ (สัมประสิทธิ์ในทิศทาง a หรือแกน x และแกน y ของผลึก) และให้ $\pi_c = \pi_{33}$ (สัมประสิทธิ์ในทิศทาง c หรือแกน z ของ



รูปที่ 2 ระดับชั้นพลังงานของอะลูมินาที่เจือโครเมียมในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ (visible light) [3]

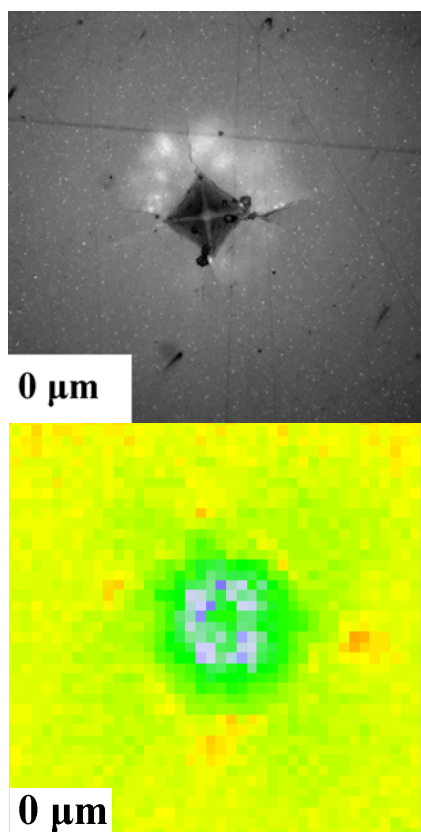
ผลึก) จะได้ว่า $\Delta v = (\sigma_{11} + \sigma_{22})\pi_a + \sigma_{33}\pi_c$ และถ้าสมมุติให้ ความเค้นมีค่าเท่ากันทุกแกน คือ $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_m$ (hydrostatic) จะได้ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความเค้นดกค้าง การเปลี่ยนตำแหน่งความถี่ และสัมประสิทธิ์เพียโซสเปกโตรสโกปี คือ [3-4] $\sigma_m = \Delta v / (2\pi_a + \pi_c)$

สำหรับอุปกรณ์การทดลองแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นแสงเลเซอร์ He-Ne ซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm และกล้องจุลทรรศน์แสงทำงานในระบบโฟกัสรวม (Confocal) กล่าวคือช่องเปิด (Aperture) มีขนาดเล็กทำให้แสงผ่านช่องเปิดและโฟกัสที่ผิวชิ้นงานเพื่อลดผลกระทบจากการดูดกลืนและการกระเจิงแสงที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการเรืองแสงสะท้อนออกมาจากชิ้นงานและผ่านช่องเปิดโดยโฟกัสไปที่ตัวรวบรวมสัญญาณ (Collector) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณและแปลงสัญญาณผ่าน CCD เป็นสเปกตรัมที่หน้าจอประมวลผลต่อไป การจัดตั้งอุปกรณ์มีความสำคัญมากเนื่องจากจะต้องควบคุมไม่ให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณจากปริมาตรในการเกิดอันตรกิริยา (Interaction volume) และเพื่อให้ได้สัญญาณจากบริเวณใต้ผิวของชิ้นงานเท่านั้น



รูปที่ 3 การเปลี่ยนตำแหน่งความยาวคลื่นที่เทียบกันระหว่างชิ้นงานสารบริสุทธิ์อะลูมินา (เส้นทึบ) และคอมโพสิตระหว่างอะลูมินาและไทเทเนียม (เส้นประ) ในกรณีนี้มีความเค้นดกค้างแบบอัด ในชิ้นงานคอมโพสิตจะสังเกตเห็นสเปกตรัมเลื่อนไปทางขวา (หากในชิ้นงานมีความเค้นดกค้างแบบดึง สเปกตรัมจะเลื่อนไปทางซ้าย) [3]

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและภาพที่ได้จากเทคนิคจุลทรรศน์เรืองแสงจากสัญญาณเส้นสเปกตรัม R_1 โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของชิ้นงานบริเวณรอบรอยกด บริเวณที่มีสีเหลืองคือบริเวณที่ไม่มีมีความเค้นดกค้าง (มีค่าเลขคลื่น $14,402 \text{ cm}^{-1}$ ในการทดลองนี้) บริเวณที่มีสีเขียวและสีม่วงแสดงบริเวณที่มีความเค้นดกค้างแบบอัด (Compressive residual stress) ส่วนบริเวณที่มีสีส้มแสดงบริเวณที่มีความเค้นดกค้างแบบดึง (Tensile residual stress) สำหรับภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงให้เห็นถึงรอยกด รอยแตก และวงแสงจางรอบรอยกด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าบริเวณรอยกด เกิดการผิดรูปแบบไม่ยืดหยุ่นหรือเขตพลาสติก ในขณะที่บริเวณรอบรอยกดที่มีวงแสงจางแสดงขอบเขตรอยต่อระหว่างเขตที่มีการผิดรูปแบบยืดหยุ่นและเขตที่ไม่มีการผิดรูป เมื่อพิจารณาภาพที่ได้จากสัญญาณการเรืองแสงจะเห็นว่า บริเวณที่มีความเค้นแบบอัดสูง (มีค่าความถี่ต่ำ) หรือบริเวณสีม่วงและสีน้ำเงินคือบริเวณรอบรอยกด ส่วนบริเวณที่มีความเค้นแบบอัดค่อนข้างสูงหรือบริเวณสีเขียวเข้ม คือ บริเวณเขตที่มีการ



รูปที่ 4 (รูปสไลด์เว็บไซท์) ลักษณะของรอยแตกวิกเกอร์ส [1] บนพื้นผิวอะลูมินาเมื่อแรงกดเท่ากับ 9.8 N เทียบภาพถ่ายที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (บน) และภาพจากเทคนิคจุลทรรศน์เรืองแสง (ล่าง) ซึ่งมีความสามารถในการแยกแยะบริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก (สีม่วงและเขียวในบริเวณรอยแตก), บริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (สีเขียวรอบรอยแตก), และบริเวณที่เกิดความเค้นตกค้างแบบดึง (สีส้มบริเวณปลายรอยแตก) [5]

ผิดรูปแบบยืดหยุ่นซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่สามารถแยกแยะได้ในกรณีที่มีองไม่เห็นวงแสงจาง บริเวณปลายของรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกด (Radial cracks) ทั้งสี่ ที่ในกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมองไม่เห็นรายละเอียดใดๆ แต่ในสัญญาณการเรืองแสงสามารถมองเห็นบริเวณที่มีความเค้นตกค้างแบบดึงซึ่งเกิดจากการขยายตัวของรอยแตก (Crack propagation) สำหรับการเคลื่อนที่ของรอยแตกจำเป็นต้องอาศัยความเค้นแบบดึง ประเด็นที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งคือ ขอบเขตรอยแตกในแนวตั้งฉากกับรอยแตกบริเวณฐานของรอยแตก (Lateral cracks) ซึ่งคาดว่าจะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม (Hemisphere) [1] ตามทฤษฎี ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่สามารถบ่งบอกขอบเขตรอยแตกดังกล่าว

ได้เนื่องจากขอบเขตดังกล่าวเกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่น อย่างไรก็ตามภาพสัญญาณการเรืองแสงแสดงให้เห็นว่าความเค้นตกค้างในเขตที่มีการผิดรูปแบบยืดหยุ่นไม่ได้มีผิวหน้าตัดเป็นรูปวงกลมแต่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกไม้อีก 4 แฉกระหว่างรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแรงกด (บริเวณที่มีสีเขียวอ่อนแยกเป็นแฉกในรูปที่ 4 ล่าง)

เทคนิคจุลทรรศน์เรืองแสงเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาการผิดรูปรอบรอยแตกของอะลูมินาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถมองเห็นรายละเอียดได้มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง อีกทั้งยังมีความสะดวกและมีต้นทุนการวิเคราะห์ที่ไม่สูงนัก อย่างไรก็ตามการพัฒนาคุณภาพรายละเอียด (Resolution) ให้สูงขึ้นยังเป็นความท้าทายในการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวเพื่อศึกษาการผิดรูปรอบรอยแตกของอะลูมินา ซึ่งนักวิทยาศาสตร์จำเป็นต้องศึกษาและค้นคว้าวิจัยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ชาญกิจ คันถ่อง ผู้ให้คำแนะนำในการใช้ภาษาไทยและศัพท์บัญญัติแก่ผู้เขียนและช่วยปรับปรุงบทความจนกระทั่งมีความสมบูรณ์และความชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิชาติ ลิ้มปิยะพานิช, “การผิดรูปบริเวณรอบรอยแตกของวัสดุเปราะ”, วารสารฟิสิกส์ไทย, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, มิถุนายน-สิงหาคม 2553, หน้า 14-16
- [2] W E Lee and M Rainforth, *Ceramic Microstructures: Property Control by Processing*, Chapman and Hall, 1994.
- [3] H Hough, J Demas, T O Williams and H N JG Wadley, *Acta Metall Mater*, **43**(2), 821-835, 1995.
- [4] Q Ma and D R Clark, *Acta Mater*, **41**, 1817-23, 1993.
- [5] A Limpichaipanit, *Wear and Indentation of Alumina/Silicon Carbide Nanocomposites*, DPhil thesis, 2008.

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุใน สนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR

วัชร รัตนสกุลทอง¹

เป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนสามารถทำให้สมบัติทางกายภาพรวมทั้งความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้สนามแม่เหล็กก็สามารถทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เพิ่มขึ้น หรือ ลดลงได้ เช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุประเภทโลหะตัวนำในสนามแม่เหล็ก เป็นที่รู้จักกันมาเป็นเวลานานกว่า 150 ปี เมื่อมีการค้นพบปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสเทนซ์ (Magnetoresistance Effect) หรือเรียกว่าสั้น ๆ ว่าปรากฏการณ์ MR ซึ่งการพบครั้งแรกเป็นการเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าในโลหะตัวนำเมื่อวางในสนามแม่เหล็ก และต่อมาได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ MR ชนิดอื่น ๆ อีกหลายชนิด โดยทั่วไป ขนาดของปรากฏการณ์ MR คำนวณได้จากสมการ

$$\%MR = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \times 100$$

เมื่อ $R(0)$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือ สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ $R(H)$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุภายใต้สนามแม่เหล็ก

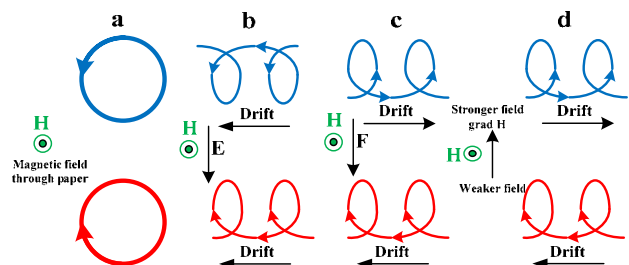
ชนิดของปรากฏการณ์ MR

ปรากฏการณ์ MR แต่ละชนิดพบในวัสดุที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงในสนามแม่เหล็ก ขึ้นอยู่กับชนิด และ/หรือโครงสร้างในวัสดุนั้น ๆ และกลไกการเกิดปรากฏการณ์ MR แต่ละชนิดก็แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งชนิดของปรากฏการณ์ MR ออกเป็น 5 ชนิด ตามกลไกการเกิดปรากฏการณ์ MR ได้ ดังต่อไปนี้

1. ปรากฏการณ์ OMR (Ordinary MR)

ปรากฏการณ์ OMR เกิดจากแรงลอเรนซ์ของสนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน ทำให้มีเส้นทางการเคลื่อนที่

เปลี่ยนไป การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 1 นั่นคือเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนจะมากมากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการชนในโครงผลึกมากขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานของวัสดุตัวนำเพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์ OMR จะเกิดขึ้นในวัสดุตัวนำ กึ่งตัวนำ และวัสดุที่มีสารตัวนำเป็นองค์ประกอบ เปอร์เซ็นต์การเกิด OMR มีค่าไม่มากนัก และมีขนาดเป็นสัดส่วนกำลังสองกับขนาดของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B^2) โดยล่าสุดในปี ค.ศ. 2005 ฮอนดะ (Honda) และคณะ [1] ได้พบปรากฏการณ์ OMR ในฟิล์ม Co/Si ประมาณ 3.5% ที่อุณหภูมิห้อง และประมาณ 10% ที่อุณหภูมิ 110 K ภายใต้สนามแม่เหล็ก 5 kOe



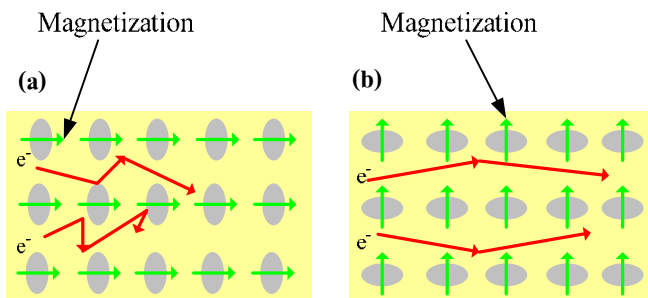
รูปที่ 1 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุ ภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [2]

2. ปรากฏการณ์ AMR (Anisotropic MR)

ในปี ค.ศ. 1857 ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ AMR ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรโดย วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) ขนาดของปรากฏการณ์ MR ชนิดนี้จะขึ้นกับมุมระหว่างกระแสไฟฟ้า และทิศการแมกนีไทเซชัน (Magnetization) ของวัสดุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสปินและออร์บิต

¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(spin-orbit interaction) ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ทำให้ อัตราการกระเจิงของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป กลไกการเกิดปรากฏการณ์ AMR สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 เมื่อทิศทางการแมกนีไทเซชันขนานกับทิศกระแสไฟฟ้า (ดังรูป 2(a)) จะเกิดการกระเจิงมากขึ้น ทำให้ความต้านทานของระบบมีค่ามากขึ้น และเมื่อทิศทางการแมกนีไทเซชันตั้งฉากกับทิศกระแสไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนน้อยลง (ดังรูป 2(b))



รูปที่ 2 แสดงการกระเจิงของอิเล็กตรอน ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ เมื่อ (a) แมกนีไทเซชันขนานกับทิศของกระแส และ (b) แมกนีไทเซชันตั้งฉากกับทิศของกระแส

โดยทั่วไปความต้านทานไฟฟ้าของปรากฏการณ์ AMR ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะเปลี่ยนแปลง เป็นฟังก์ชันกับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันและกระแส ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

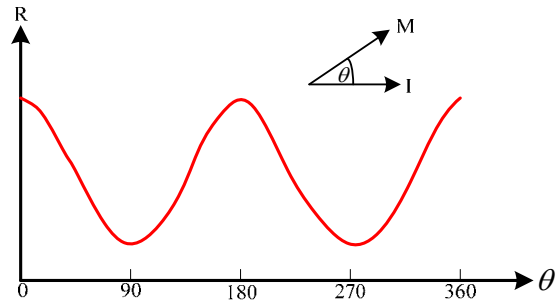
$$R_\theta = R_\perp + (R_\parallel - R_\perp) \cos^2 \theta$$

เมื่อ $R_\parallel$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อสนามแม่เหล็กขนานกับกระแส $R_\perp$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแส และ R_θ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เมื่อสนามแม่เหล็กทำมุม θ กับกระแส [3]

จากสมการแสดงให้เห็นความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะมีค่าสูงสุด เมื่อทิศของแมกนีไทเซชันขนานกับทิศกระแสไฟฟ้า และความต้านทานของวัสดุจะมีค่าต่ำสุด เมื่อทิศของแมกนีไทเซชันตั้งฉาก หรือทำมุม 90 องศา กับทิศกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามมุมระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และกระแส (I) ได้ดังรูปที่ 3

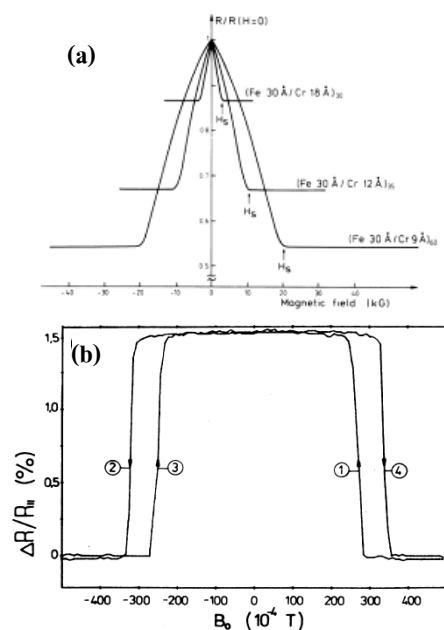
3. ปรากฏการณ์ GMR (Giant MR)

ในปี ค.ศ. 1988 กลุ่มวิจัยที่นำโดย อัลแบร์ แฟร์ (Albert Fert) ได้ตีพิมพ์ผลงานการค้นพบปรากฏการณ์ GMR ในฟิล์มบาง



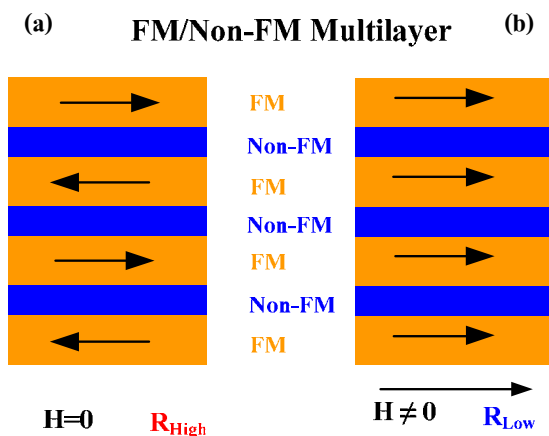
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า (R) ในวัสดุ AMR กับมุม (θ) ระหว่างทิศการแมกนีไทเซชัน (M) และทิศกระแสไฟฟ้า (I)

สลับชั้นของ Fe/Cr [4] ซึ่งเป็นช่วงเวลาใกล้เคียงกับที่ กลุ่มวิจัยของ ปีเตอร์ กรุนเบิร์ก (Peter Grunberg) รายงานการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสามชั้นของ Fe/Cr/Fe ภายใต้สนามแม่เหล็ก [5] จากการค้นพบ GMR ของทั้งสองกลุ่มวิจัยนี้ ทำให้แฟร์และกรุนเบิร์ก ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 2007 รูปที่ 4 แสดงกราฟ GMR ที่ค้นพบครั้งแรกในฟิล์มบางหลายชั้นของ Fe/Cr ที่มีจำนวนคู่ชั้น Fe/Cr 30, 35 และ 60 คู่ชั้น และในฟิล์มบางสามชั้น Fe/Cr/Fe



รูปที่ 4 แสดง GMR ที่ค้นพบครั้งแรก (a) ในฟิล์มบางหลายชั้น Fe/Cr ที่มีจำนวนคู่ชั้นต่าง ๆ [4] และ (b) ในฟิล์มบางสามชั้น Fe/Cr/Fe [5]

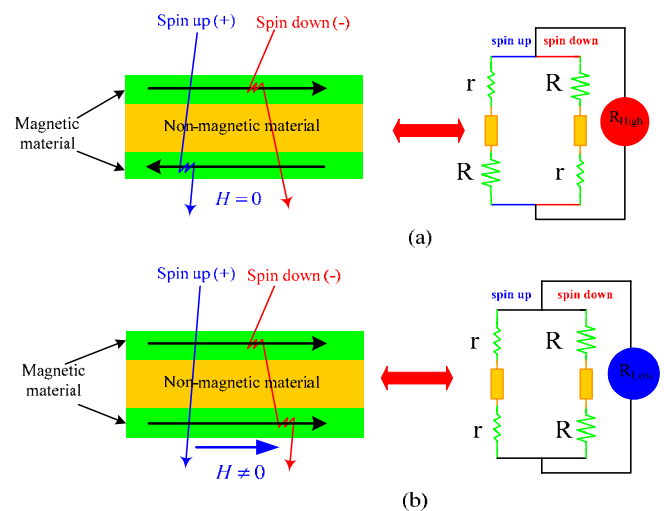
ในฟิล์มบางหลายชั้นที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (FM) ที่สลับด้วยชั้นฟิล์มโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Non-FM) ฟิล์มบางหลายชั้น เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ทิศการแมกนีไทเซชันของชั้น FM แต่ละชั้นจะมีทิศสวนทางกัน แสดงดังรูปที่ 5(a) และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับฟิล์มบางหลายชั้น ดังรูปที่ 5(b) ทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM จะจัดเรียงไปในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางหลายชั้นลดลง การลดลงของความต้านทานไฟฟ้าในปรากฏการณ์ GMR เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่แตกกันของสปินอัพ (Spin up) และสปินดาวน์ (Spin down) หรือ เรียกว่า การกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน (Spin dependent scattering) โดยความต้านทานไฟฟ้าที่ของวัสดุ GMR ลดลงได้มากถึง 80% ในสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5 แสดงทิศแมกนีไทเซชันของฟิล์มบางหลายชั้น เมื่อ (a) สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ และ (b) ในสนามแม่เหล็กมีค่าใด ๆ

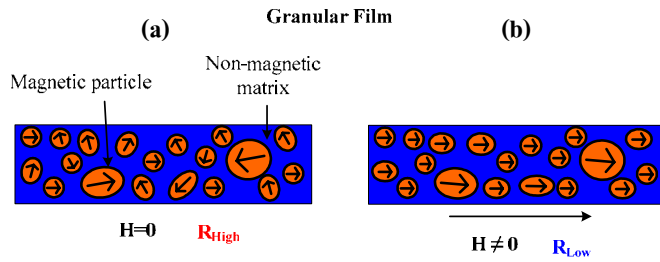
ปรากฏการณ์ GMR เกิดจากอัตรากระเจิงที่ขึ้นกับสปินของอิเล็กตรอน [4] การลดลงของความต้านทานสามารถอธิบายได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าแบบง่าย ๆ ดังรูปที่ 6 โดยการนำไฟฟ้าในฟิล์มแม่เหล็กหลายชั้นเกิดจากทั้งอิเล็กตรอนสปินอัพ และสปินดาวน์ ที่สามารถนำไฟฟ้าได้อย่างอิสระต่อกัน [6] เปรียบเทียบเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีตัวต้านทานไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนสปินอัพและสปินดาวน์ต่อขนานกันเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ รูปที่ 6(a) ทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM จะมีทิศสวนกัน ทำให้อิเล็กตรอนสปินอัพเกิดการกระเจิงมาก (R) ในชั้น FM แรก และอิเล็กตรอนสปินดาวน์เกิดการกระเจิงมาก (R) ในชั้นถัดไป นั่นคือ

ทั้งอิเล็กตรอนสปินอัพ และสปินดาวน์มีการกระเจิงมากเท่ากัน ทำให้ความต้านทานรวมของฟิล์มแม่เหล็กหลายชั้นมีค่ามาก เมื่อฟิล์มแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 6(b) ชั้น FM จะถูกเหนี่ยวนำ ทำให้ทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM วางตัวขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก และขนานกับทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM อื่น ๆ ทำให้อิเล็กตรอนสปินอัพสามารถผ่านชั้น FM ได้ง่ายทำให้เกิดการกระเจิงน้อย (r) ในขณะที่อิเล็กตรอนสปินดาวน์จะเกิดการกระเจิงมาก (R) เมื่อผ่านชั้น FM ทำให้ความต้านทานรวมของฟิล์มแม่เหล็กหลายชั้นมีค่าลดลง ต่อมาได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ GMR ในโครงสร้างแบบฟิล์มบางหลายชั้นของสาร Co/Cu [6-8] Co/Ag [8, 9] และ NiFe/Au [8-10] และอื่น ๆ

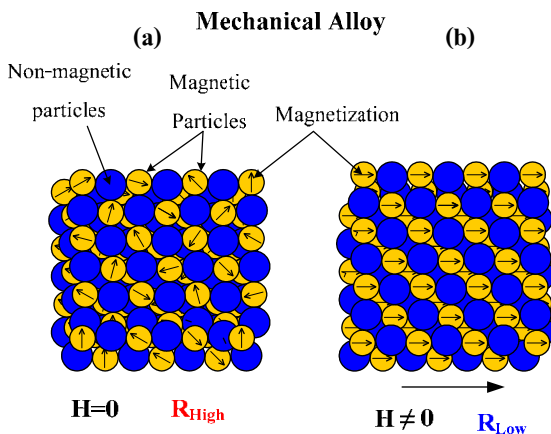


รูปที่ 6 โค้ดแกรมแสดงการกระเจิงที่ขึ้นกับสปินตรงรอยต่อระหว่างชั้น FM/non-FM ในฟิล์มแม่เหล็กแบบหลายชั้น เมื่อ (a) แมกนีไทเซชันสวนทิศกัน และ (b) แมกนีไทเซชันขนานกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก

ต่อมาได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ GMR ในฟิล์มบางแบบแกรนูลาร์ (Granular film) [11-14] ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีอนุภาคแม่เหล็กเฟอร์ไรต์กระจายอยู่ในเนื้อโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เช่นฟิล์ม Co-Cu โดยกลไกการเกิด GMR ในฟิล์มแบบแกรนูลาร์แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นผลจากการกระเจิงที่ขึ้นกับสปินของอิเล็กตรอนตัวนำภายในอนุภาคแม่เหล็ก และที่ผิวรอยต่อระหว่างสารแม่เหล็กกับสารโลหะที่ไม่ใช่แม่เหล็ก



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฟิล์มแบบแกรนูลาร์ เมื่อ (a) สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และ (b) ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก



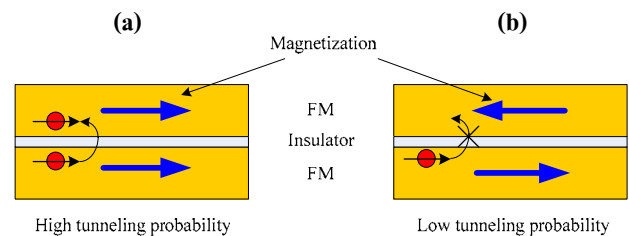
รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของผงอัดของอัลลอยด์โดยการบด เมื่อ (a) สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และ (b) ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก

นอกจากนี้ยังมีการพบปรากฏการณ์ GMR ในผงอัดของอัลลอยด์โดยการบด (Mechanical alloy) ที่เกิดจากการบดของผงสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์กับผงของโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เช่น Co-Ag [15- 16] Co- Cu [17-19] Fe-Ag [20] โครงสร้างของอัลลอยด์โดยการบดที่แสดงปรากฏการณ์ GMR แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งกลไกการเกิด GMR เกิดจากการกระเจิงที่ขึ้นกับสปินภายในอนุภาคแม่เหล็ก และ รอยต่อระหว่างอนุภาคแม่เหล็กและโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของอัลลอยด์จากการบดเหล่านี้ลดลง

4. ปรากฏการณ์ TMR (Tunneling MR)

ปรากฏการณ์ TMR ถูกค้นพบในวัสดุที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่เป็นฉนวน (Insulator) บาง ๆ ประมาณ 1 นาโนเมตรแทรกระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ การ

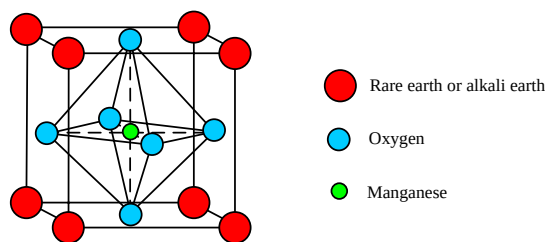
เปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าในปรากฏการณ์ TMR มีขนาดสูงถึง 100% การเปลี่ยนความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ TMR เกิดจากการทันเนลผ่านที่ขึ้นกับสปิน (Spin-dependent tunneling) ซึ่งมีความน่าจะเป็นในการทันเนลผ่านชั้นฉนวน ของอิเล็กตรอนสปินอัพและสปินดาวน์ ที่มีค่าแตกต่างกัน สามารถแสดงไดอะแกรมการเกิดปรากฏการณ์ TMR ได้ดังรูปที่ 9 โดยความน่าจะเป็นของการทันเนลผ่านชั้นฉนวนของอิเล็กตรอน จะขึ้นกับทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM นั่นคือ อิเล็กตรอนจะสามารถทันเนลผ่านจากชั้น FM หนึ่งไปยังชั้น FM อีกชั้นหนึ่งได้ง่าย เมื่อชั้น FM ที่อยู่ถัดไปมีทิศแมกนีไทเซชันเดียวกันกับชั้นแรกแสดงดัง รูปที่ 9(a) และอิเล็กตรอนจะไม่มี การทันเนลผ่านไปยังชั้น FM ถัดไป ถ้าชั้น FM ถัดไปมีทิศแมกนีไทเซชันที่สวนทิศกันดัง รูปที่ 9(b)



รูปที่ 9 ไดอะแกรมแสดงการทะลุผ่านที่ขึ้นกับสปินของอิเล็กตรอนเมื่อ (a) แมกนีไทเซชันชั้น FM ขนานกัน และ (b) แมกนีไทเซชันของชั้น FM สวนทิศกัน

5. ปรากฏการณ์ CMR (Colossal MR)

ปรากฏการณ์ CMR เพิ่งค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1993 ในวัสดุที่เป็นออกไซด์ของแมงกานีสที่เจือด้วยโครงสร้างแบบสารเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ CMR แสดงดัง รูปที่ 10 โดยวัสดุ CMR จะเป็นฉนวนที่อุณหภูมิสูง แต่จะเปลี่ยนมาเป็นโลหะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างโลหะ-ฉนวน (Metal-insulator transition temperature: T_p) ในเฟสโลหะและอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) วัสดุ CMR จะมีพฤติกรรมเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุ CMR ในสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าในวัสดุ GMR และ TMR แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ CMR มีข้อจำกัด คือ จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ปรากฏการณ์ CMR เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน-โฟนอน ทำให้เกิดการบิดรูปแบบจาห์น-เทลเลอร์



รูปที่ 10 แสดงออกไซด์ของแมงกานีสที่เจือด้วยโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

(Jahn-Teller distortion) ใกล้กับการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสแม่เหล็กเฟอร์โรไปเป็นเฟสแม่เหล็กพารา [21]

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า กลไกการเกิด และโครงสร้างวัสดุของปรากฏการณ์ MR ชนิดต่าง ๆ แสดงเชิงเปรียบเทียบในตารางที่ 1

ตาราง 1: แสดงการเกิดปรากฏการณ์ MR ชนิดต่าง ๆ

ปรากฏการณ์	ความต้านทาน	โครงสร้างวัสดุ	กลไกการเกิด
OMR	เพิ่มขึ้น	โลหะ และ สารกึ่งตัวนำ	แรงลอเรนซ์
AMR	เพิ่มขึ้น/ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก	การเข้าคู่ของการสปิน-ออร์บิต
GMR	ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก/โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก	การกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน
TMR	ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก/ฉนวน	การทะลุผ่านที่ขึ้นกับสปิน
CMR	ลดลง	แมงกานีสออกไซด์	การเปลี่ยนเฟสโลหะ-ฉนวน

การประยุกต์ปรากฏการณ์ MR ในเซนเซอร์

เซนเซอร์ MR มีจุดเด่นหลายอย่างทำให้เป็นที่สนใจของนักวิจัย ทำให้มีการวิจัยวัสดุ MR กันอย่างกว้างขวาง และต่อเนื่อง ข้อเด่นของ เซนเซอร์ MR โดยทั่วไป มีดังนี้ [22]

- **แม่นยำสูง** เนื่องจากเซนเซอร์ MR มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูง ทำให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เหมาะสำหรับการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง และให้สัญญาณที่มีคุณภาพดีกว่าเซนเซอร์แบบเก่า ไม่ว่าจะนำไปประยุกต์ใช้วัดมุม ความยาว หรือ วัดกระแสไฟฟ้า ก็ตาม

- **ความละเอียดสูง** เซนเซอร์ MR มีความละเอียดสูง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการควบคุมคุณภาพความละเอียดสูง เช่น เป็นตัวเข้ารหัสสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อน ประกอบกับเป็นเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณรบกวนต่ำ และให้สัญญาณขาออกที่สูง ทำให้ได้ค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise-ratio) ที่ดีเยี่ยม

- **ความแม่นยำของสัญญาณสูง และอายุการใช้งานยาวนาน** เซนเซอร์ MR เป็นเซนเซอร์ที่เชื่อถือได้ เนื่องจากเป็นเซนเซอร์แบบของแข็งที่สามารถรับสัญญาณได้โดยไม่ต้องสัมผัสที่ และการทดสอบเชิงคุณภาพในช่วงสัญญาณย่านต่าง ๆ ตามมาตรฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ จึงเป็นสิ่งยืนยันได้ถึงเสถียรภาพ และเชื่อถือได้ของสัญญาณจากเซนเซอร์ MR

- **ทนทานต่อความชื้น ฝุ่นละออง และน้ำมันสูง** เซนเซอร์ MR ทนทานต่อทั้งอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ รวมไปถึงน้ำมัน สิ่งสกปรก หรือ แรงสั่นสะเทือน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้กับสารกัมมันตรังสี หรือในสุญญากาศ เช่น ที่ระยะ 400 กิโลเมตรบนผิวดาวอังคารซึ่งมีอุณหภูมิ -120 องศาเซลเซียส และหรือ ที่ก้นบ่อน้ำมันที่ระยะ 10 กิโลเมตรใต้พื้นผิวโลกที่อุณหภูมิสูง 200 องศาเซลเซียส

- **ความไวสูง** เซนเซอร์ MR มีความไว และมีขนาดสัญญาณขาออกสูงกว่า เซนเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall-effect sensor) ทำให้เซนเซอร์ MR สามารถนำไปใช้วัดขนาดสนามแม่เหล็กโลกที่ประยุกต์ใช้เป็นเข็มทิศ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เนื่องจากสามารถตรวจรับสัญญาณโดยไม่ต้องสัมผัส

- **ประหยัดพลังงาน** เซนเซอร์ MR สามารถออกแบบให้มีความต้านทานภายในสูง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานใช้กับแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็ก และสามารถออกแบบให้ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย ๆ โดยใช้หลักการวัดแบบชดเชยทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อย และ ให้ประสิทธิภาพของพลังงานสูง

ในปัจจุบันนี้ เซนเซอร์ MR มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ หลายบริษัทด้วยกัน เช่น บริษัทเซนซิเทค (Sensitac) [22] บริษัทนิคโคชิ

(Nikkoshi) [23] และอื่น ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดปริมาณหลัก ๆ ได้ 4 ปริมาณด้วยกัน คือ

(1) เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic field measurement)

ซึ่งสามารถนำไปวัดสนามแม่เหล็กค่าน้อย ๆ ได้อย่างแม่นยำ ที่ประมาณ 50 A/m หรือ 62.5 ไมโครเทสลา เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ สวิตช์แบบไม่สัมผัส โดยส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ทางด้านธรณีวิทยา ใช้ในการสำรวจแก๊ส น้ำมัน และทรัพยากรธรรมชาติอื่น ๆ รวมไปถึงการเป็นเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กของเซ็นเซอร์ที่เป็นฟังก์ชันในนาฬิกาข้อมือ

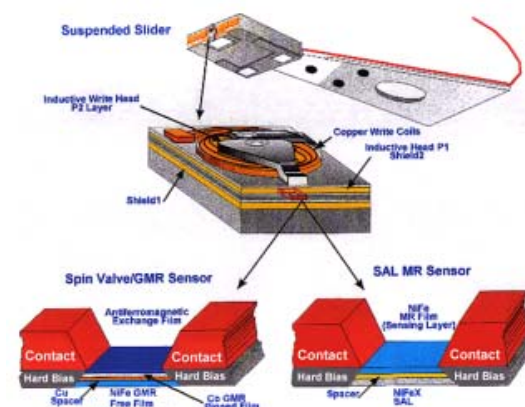
(2) เซนเซอร์วัดความยาวและตำแหน่ง (Displacement and position measurement) สามารถใช้วัดความยาว หรือการเปลี่ยนแปลงความยาว และตำแหน่งที่มีความแม่นยำในย่านไมโครเมตร เซนเซอร์ประเภทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกลุ่มต่างๆ ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ และทางด้านการศึกษา

(3) เซนเซอร์วัดกระแส (Current measurement) เป็นเซนเซอร์วัดกระแส โดยสามารถวัดกระแสสูงสุดได้ถึง 100 แอมแปร์ ส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

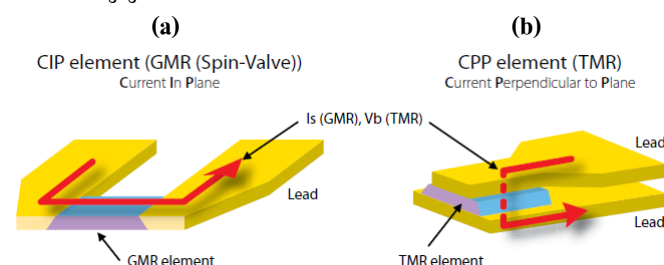
(4) เซนเซอร์วัดมุม (Angle measurement) สามารถนำไปวัดค่ามุมที่แน่นอน การเพิ่มขึ้นของมุม การเปลี่ยนแปลงมุม หรือความเร็วรอบ ความละเอียดในการวัดน้อยกว่า 0.5 องศา เซนเซอร์วัดมุมส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และอื่น ๆ

นอกจากนี้ ยังมีการนำเซนเซอร์ MR ไปใช้เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก จากแผ่นบันทึกข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเซนเซอร์ MR ได้ทำให้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ใด ๆ มีความก้าวหน้าที่สำคัญ และเพิ่มขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้มากขึ้น หัวอ่านในฮาร์ดดิสก์เริ่มต้นจากเซนเซอร์จากการเหนี่ยวนำ โดยเริ่มใช้หัวอ่านแบบ MR ในปี 1996 โดยหัวอ่าน MR แบบแรกจะเป็น แบบ AMR เนื่องจากสามารถอ่านค่าสัญญาณสนามแม่เหล็กปริมาณน้อย ๆ ได้ดีกว่าการเหนี่ยวนำ ดังนั้นทำให้มีการวิจัยและพัฒนาหัวอ่านแบบ MR อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งให้ความสนใจการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเซนเซอร์แบบ CMR และ GMR แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ CMR แม้จะให้สัญญาณที่สูง แต่มีข้อจำกัด คือ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่

อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน งานวิจัยจึงยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ และยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม หัวอ่านยุคต่อมาได้เปลี่ยนมาเป็นแบบ GMR ด้วยเหตุผลที่สำคัญ คือ หัวอ่าน GMR ให้สัญญาณขาออกและความไวมากกว่าหัวอ่าน AMR มาก และล่าสุดปัจจุบันเป็นหัวอ่านแบบ TMR ข้อได้เปรียบของหัวอ่าน TMR เทียบกับหัวอ่าน GMR คือให้สัญญาณที่ดีกว่า ความไวสูงกว่า และที่สำคัญมีขนาดเล็กกว่า ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของสื่อบันทึกข้อมูลเพิ่มสูงมากในปัจจุบัน รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างหลักของฮาร์ดดิสก์แสดงส่วนของหัวอ่าน และหัวเขียน ที่ใช้หัวอ่านแบบ GMR



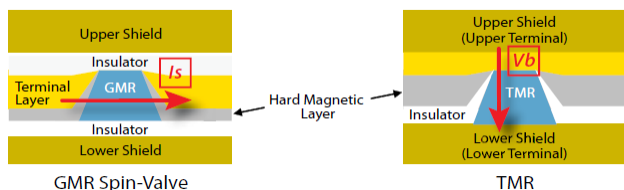
รูปที่ 11 แสดงส่วนของฮาร์ดดิสก์ใด ๆ ที่มีเซนเซอร์ GMR เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก [24]



รูปที่ 12 (a) หัวอ่าน GMR ที่มีกระแสในระนาบเดียวกับ GMR เซนเซอร์ และ (b) หัวอ่าน TMR ที่มีกระแสดังกล่าวจาก TMR เซนเซอร์ [26]

บริษัท IBM ได้นำหัวอ่านแบบ MR มาใช้เป็นครั้งแรก เนื่องจากความสามารถในการอ่านข้อมูลของเซนเซอร์ MR ทำให้มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ได้รับการพัฒนาจนเพิ่มขึ้นประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ต่อมาในปี 2000 ได้มีการพัฒนาหัวอ่านแบบ GMR มาแทนหัวอ่านแบบ MR จากงานวิจัยของบริษัทฮิตาชิ (Hitachi) พบว่าทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ

ฮาร์ดดิสก์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยฮาร์ดดิสก์ขนาดประมาณ 11 GB และในปี 2005 บริษัทซีเกท (Seagate) ได้เริ่มใช้หัวอ่านแบบ TMR กับฮาร์ดดิสก์ขนาด 400 GB [25] ทั้งนี้ในปี 2006 ทางบริษัทฟูจิซี (Fujitsu) [26] ได้เผยแพร่ผลงานเกี่ยวกับการออกแบบหัวอ่าน TMR ที่ออกแบบให้กระแสตั้งฉากกับระนาบ (CPP) ของฟิล์ม เซนเซอร์ เปรียบเทียบกับหัวอ่าน GMR ที่เป็นแบบกระแสในระนาบ (CIP) ของฟิล์มเซนเซอร์ **รูปที่ 12** แสดงลักษณะหัวอ่าน GMR แบบ CIP และ TMR แบบ CPP โครงสร้างส่วนประกอบของหัวอ่านทั้งสองแบบดัง**รูปที่ 13** ทางฟูจิซีได้ทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่าน TMR ที่ออกแบบ พบว่าหัวอ่าน TMR มีขนาดเล็กลง มีความไวสูงขึ้น มีความละเอียดสูง และลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้ดี อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในอนาคตอาจจะมีหัวอ่านแบบใหม่ที่มีความสามารถ และประสิทธิภาพดีกว่าหัวอ่านแบบเดิม หรือต่อไปอาจจะเป็นยุคของหัวอ่าน GMR แบบ CPP ก็อาจจะเป็นไปได้



รูปที่ 13 โครงสร้างของ (a) หัวอ่าน GMR ที่มีกระแสในระนาบ และ (b) หัวอ่าน TMR ที่มีกระแสตั้งฉากกับระนาบ [26]

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เป็นส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงหรือพัฒนาเทคโนโลยีที่นำความสะดวก ทันสมัย และความคุ้มค่าให้กับมวลมนุษยชาติ จึงไม่แปลกใจเลย ที่นักวิทยาศาสตร์พยายามทำวิจัยเพื่อการค้นพบสิ่งใหม่ๆ อันจะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Honda S., Ishikawa T., Takai K., Mitarai Y. and Harada H. (2005), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **290-291**, 1063-1066.
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Charged-particle-drifts.svg>
- [3] McGuire T.R. and Potter R.L. (1975), *IEEE Transactions on Magnetism*, **MAG-11** (4), 1018-1037.
- [4] Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Nguyen Van Dau F. and Petroff F. (1988), *Physical Review Letters*, **61** (21), 2472-2475.

- [5] Binasch G., Grunberg P., Saurenbach F. and Zinn W. (1989) *Physical review B*, **39** (14), 4828-4830.
- [6] Mott N.F. (1935), *Proceeding of the Physical Society*, **47**, 571-588.
- [7] Parkin S.S.P. (1993), *Physical Review B*, **47** (14), 9136-9139.
- [8] Gijs M.A.M., Lenczowski S.K.J., Vande Veerdonk R.J.M., Giesbers J.B., Johnson M.T. and aan de Stegge J.B.F. (1994), *Physical Review B*, **50** (22), 16733-16739.
- [9] Spizzo F., Angeli E., Bisero D., Vavassori P. and Ronconi F. (2002), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **242-245**, 473-475.
- [10] Angelakeris M., Papaioannou E. Th., Pouloupoulos P., Valassiadis O. and Flevaris N. K. (2003), *Sensors and Actuators A: Physical*, **106**, 91-95.
- [11] Du J.H., Liu W.J., Li Q., Sang H., Zhang S.Y., Du Y.W. and Feng D. (1999), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **191**, 17-24.
- [12] Rubin S., Holdenried M. and Micklitz H. (1999), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **203**, 97-99.
- [13] Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Carey M.J., Young A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F.T., Hutten A. and Thomas G. (1992), *Physical Review Letters*, **68**, 3745-3748.
- [14] Xiao J.Q., Jiang J. S. and Chien C.L. (1992), *Physical Review Letters*, **68**, 3749-3752.
- [15] Fagan A.J., Viret M. and Coey J.M.D. (1995), *Journal of Physics: Condensed Matter*, **7**, 8953-8966.
- [16] Coey J.M.D., Fagan A.J., Skomski R., Gregg J., Ounadjela K. and Thompson S.M. (1994) *IEEE Transaction on Magnetism*, **30**, 666-668.
- [17] Yoo Y.G., Yu S.C. and Kim W.T. (2001), *Materials Science and Engineering A*, **304-306**, 928-931.
- [18] Champion Y., Meyer H., Bonnetien J.L. and Chassaing E.J. (2002), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **241**, 357-363.
- [19] Aizawa T. and Zhou C. (2000), *Materials Science and Engineering A*, **285**, 1-7.
- [20] Gomez J.A., Xia S.K., Passamani E.C., Giordanengo B. and Baggio-Saitovitch E.M. (2001), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **223**, 112-118.
- [21] Souza J. A., Yu Y., Neumeier J. J., Terashita H. and Jardim R. F. (2005), *Physical Review Letters*, **94**, 2072091-2072094.
- [22] <http://www.sensitec.com/en/?s=2,1,0>
- [23] <http://www.nikkoshi.co.jp/english/>
- [24] <http://hgst.com/hdd/technolo/gmr/gmr.htm>
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head
- [26] http://www.fujitsu.com/downloads/COMP/fcpa/hdd/ccp-basedstorage_wp.pdf

การสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์

พรรัตน์ วัฒนกลวิษฐ์¹

เป็นเวลามากกว่า 30 ปี ที่นักฟิสิกส์เริ่มให้ความสนใจและหันมาทำการวิจัยทางด้านฟิสิกส์ศึกษาอย่างจริงจัง ทำให้เกิดแนวทางการเรียนการสอนฟิสิกส์แบบผู้เรียนมีส่วนร่วม หรือ การเรียนการสอนฟิสิกส์เชิงรุก (Active Learning in Physics) ซึ่งเน้นให้ผู้เรียนมีการเรียนรู้เชิงรุก ผ่านการสร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน และระหว่างผู้เรียนด้วยกันเอง กระบวนการสอนเน้นให้ผู้เรียนมีการคาดการณ์ผลเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ในรูปแบบของการสังเกต การทดลอง หรือการร่วมกันแก้โจทย์ปัญหาต่างๆ นอกจากนี้ยังสนับสนุนและกระตุ้นให้ผู้เรียนแสดงความคิดเห็นและอภิปราย เพื่อสร้างความเข้าใจฟิสิกส์ในขณะที่เรียน โดยการสอนเชิงรุกจะแตกต่างจากการสอนแบบดั้งเดิมหรือการบรรยายเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตาราง 1 ที่เปรียบเทียบลักษณะของการสอนแบบดั้งเดิมและการสอนเชิงรุก

การสอนเชิงรุกมีเป้าหมายหลัก คือ เพื่อให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้เป็นระบบ (Learning Cycle) แบบ PODS [การคาดเดา (Prediction), การสังเกต (Observation), การอภิปราย (Discussion) และ การสังเคราะห์ (Synthesis)] วิธีการสอนฟิสิกส์เชิงรุกนี้มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน บางรูปแบบอาจจะต้องมีการปรับเปลี่ยนลักษณะเชิงกายภาพของห้องเรียนและมีการใช้อุปกรณ์เสริมจำนวนมาก ดังนั้นการนำไปใช้จะต้องคำนึงถึงความพร้อมและความเหมาะสมด้วย ซึ่งสามารถสรุปจำแนกแนวทางการสอนฟิสิกส์เชิงรุกได้ออกเป็น 4 ประเภทดังนี้[1]

1) กลุ่มเรียนรู้จากชุดอุปกรณ์ (Studio Model)

ผู้เรียนถูกจัดเป็นกลุ่มย่อยเพื่อค้นคว้าหาหลักการทางฟิสิกส์จากชุดอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่มีการทำงานค่อนข้างง่าย มีการจัดการค้นคว้าเป็นแบบแผนและต่อเนื่อง โดยไม่มีการบรรยายจากผู้สอน แต่ผู้สอนมี

ตาราง 1 เปรียบเทียบลักษณะของของการสอนแบบดั้งเดิมและการสอนเชิงรุก[1]

การสอนแบบดั้งเดิม	การสอนเชิงรุก
ผู้สอนหรือหนังสือ เป็นแหล่งความรู้	ผู้เรียนสร้างองค์ความรู้จากการสังเกตและประสบการณ์ตรงที่มีต่อปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์
มีช่วงให้ผู้เรียนใช้ความคิดค่อนข้างน้อย	ผู้เรียนถูกท้าทายให้ใช้ความคิด และเปรียบเทียบการทำนายผลที่ได้จากการสังเกตปรากฏการณ์ต่างๆ กับผลตามความเชื่อของผู้เรียน
บทบาทของผู้สอนเป็นแบบผู้สั่งการ	บทบาทของผู้สอนเป็นแบบผู้ช่วยหรือผู้เสนอแนะแนวทาง
ไม่สนับสนุนการทำงานร่วมกันในหมู่ผู้เรียน	กระตุ้นให้มีการทำงานร่วมกันในหมู่ผู้เรียน
ผู้สอนบรรยายถึงผลจากการทดลอง หรือผลการวิเคราะห์ในรูปข้อมูล/เหตุการณ์	ผลจากการสังเกตหรือวิเคราะห์ จะนำมาอภิปรายเพื่อทำความเข้าใจระหว่างการทดลองจริงในชั้น
ปฏิบัติการ (หากมี) จะทำเพื่อยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีที่ผู้สอนบรรยายไว้ และมักจะเป็นปฏิบัติการที่บอกขั้นตอนทั้งหมดแบบสูตรสำเร็จ	ผู้เรียนทำปฏิบัติการเพื่อเรียนรู้ เพื่อแสวงหาองค์ความรู้หรือทฤษฎีด้วยตนเอง

หน้าที่ชี้แนะและอภิปรายกับผู้เรียนเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้อง เช่น Workshop Physics, Studio Physics เป็นต้น ลักษณะของห้องเรียนแบบกลุ่มเรียนรู้จากชุดอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 1 (ก)

2) ห้องปฏิบัติการแห่งการค้นพบ (Discovery Lab)

ผู้เรียนทำการทดลองเพื่อสร้างองค์ความรู้และข้อสรุปภายในห้องปฏิบัติการอย่างมีอิสระ ซึ่งคู่มือ คำแนะนำ

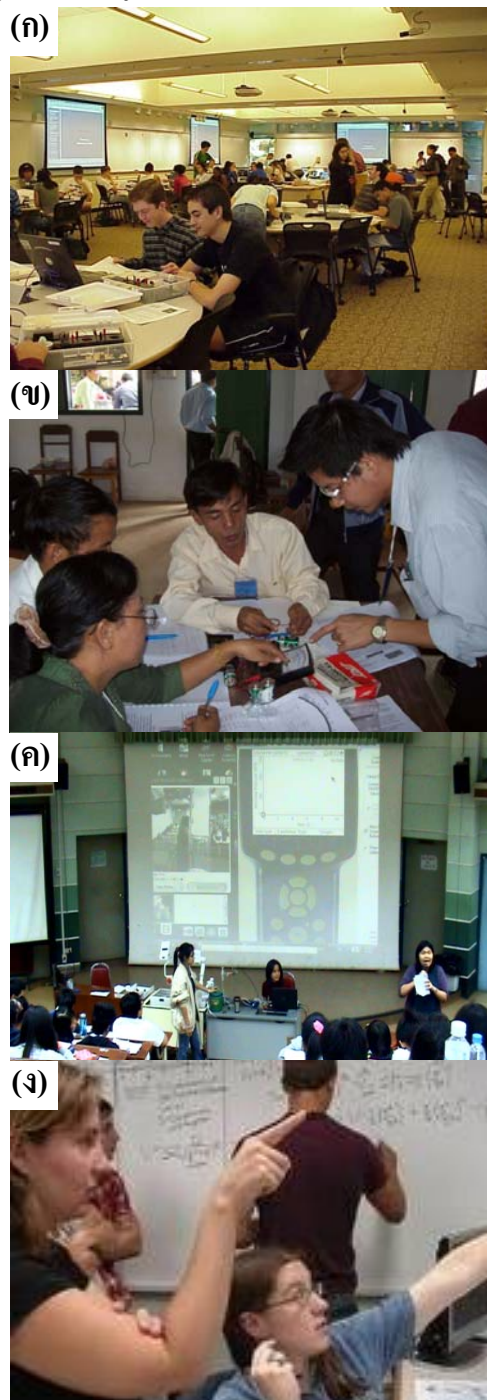
¹ อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขั้นตอน หรือสูตรทดลองจะถูกจัดเตรียมไว้อย่างคร่าวๆ และผู้สอนเป็นเสมือนผู้ร่วมทดลองที่คอยชักนำผู้เรียน อย่างระมัดระวัง เช่น Real Time Physics เป็นต้น ลักษณะของห้องปฏิบัติการแห่งการค้นพบแสดงในรูปที่ 1 (ข)

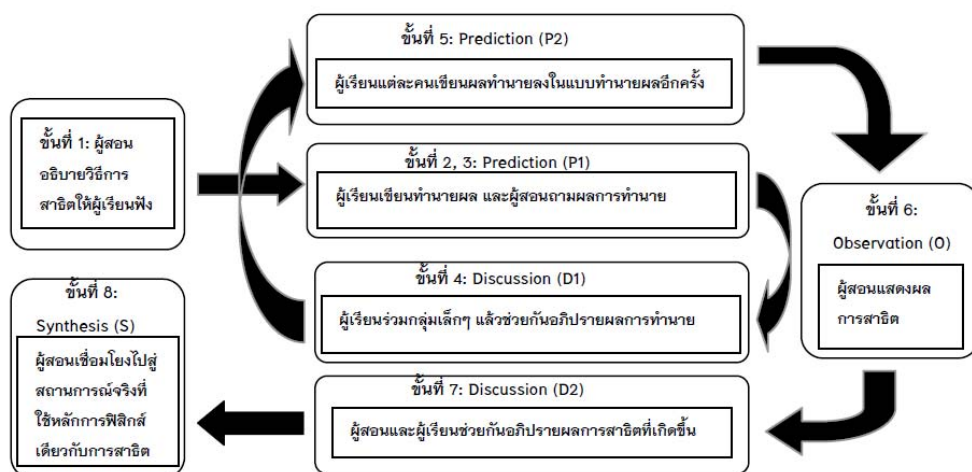
- 3) **ห้องบรรยายปฏิสัมพันธ์ (Lecture Based Model)**
การสอนหลักจะมาจากการบรรยายของผู้สอน แต่เพิ่ม และเน้นการถามตอบ และสร้างกิจกรรมกลุ่มในระหว่างการสอน กระตุ้นให้เกิดการอภิปรายและซักถามจากผู้เรียน เช่น Interactive Lecture Demonstration (ILD), Peer Instruction เป็นต้น ลักษณะของห้องบรรยายปฏิสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 1 (ค)
- 4) **ช่วงทบทวนปฏิสัมพันธ์ (Recitation Based Model)**
ใช้เวลาออกเหนือจากการบรรยายในกิจกรรมที่เน้นให้ผู้เรียนต้องคิดและสร้างความเข้าใจในหลักการฟิสิกส์ที่สอนในการบรรยาย โดยส่วนใหญ่ช่วงเวลาดังกล่าวใช้ในการสอนเสริม หรือทำโจทย์ที่ผู้สอนมอบหมาย โจทย์ที่ให้นักเรียนจะต้องอาศัยจินตนาการ หรือหาข้อมูลที่สำคัญบางอย่าง หรือยากเกินกว่าที่ผู้เรียนคนหนึ่งๆ จะหาคำตอบได้ด้วยตนเอง จึงต้องมีการทำงานกลุ่ม มีการอภิปราย และหาข้อมูลเพิ่มเติม เช่น Cooperative Problem Solving, Physics by Inquiry เป็นต้น ลักษณะของช่วงทบทวนปฏิสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 1 (ง)

ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์ หรือเรียกสั้นๆ ว่าการสอนแบบ ILD เป็นวิธีการสอนเชิงรุกที่เน้นให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในระหว่างการบรรยายในห้องเรียน ผู้ที่ริเริ่มพัฒนาวิธีการสอนแบบนี้ขึ้นมาเป็นครั้งแรก คือ David Sokoloff และ Ronald Thornton[2] ซึ่งเป็นการสอนบรรยายที่มีชุดสาธิตและแบบทำนายผลร่วมในการเรียนการสอน เพื่อให้ผู้เรียนทำการคาดการณ์และสังเกตผลจากชุดสาธิต แล้วให้ผู้เรียนเขียนทำนายลงในแบบทำนายผล ในระหว่างการเรียนการสอนนั้นก็จะให้มีการอภิปรายกันระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน และผู้เรียนด้วยกันเอง โดยอาจมีคอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงข้อมูลจากการสาธิต เพื่อสร้างบรรยากาศในการเรียนรู้ของผู้เรียน กระบวนการสอนแบบ ILD มีทั้งหมด 8 ขั้นตอน ซึ่งสามารถเขียน

เป็นวัฏจักรการเรียนรู้ (Learning Cycle) ในการจัดการเรียนการสอนในรูปแบบนี้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการสอนฟิสิกส์เชิงรุก (ก) Studio Model ที่ Massachusetts Institute of Technology, USA (ข) ปฏิบัติการแบบ Real Time ในการอบรมครูฟิสิกส์ แขวงไชยบุรี ประเทศลาว (ค) การสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ (ง) การสอนในช่วงทบทวนปฏิสัมพันธ์



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพวัฏจักรการเรียนรู้ (Learning Cycle) ของการสอนแบบ ILD[3]

งานวิจัยที่ได้นำรูปแบบการสอนแบบ ILD มาใช้ในการจัดการเรียนการสอน แล้วส่งผลให้ผู้เรียนเกิดความรู้ความเข้าใจมากขึ้นกว่าการเรียนการสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียวหรือการสอนแบบดั้งเดิม มีอยู่ด้วยกันหลายงานวิจัย เช่น ใน University of Sydney ประเทศออสเตรเลีย ได้นำ ILD มาใช้สอนฟิสิกส์ชั้นปีที่ 1 เป็นเวลานานถึง 10 ปี โดยในงานวิจัยนี้ Manjula Sharma และคณะ [4] ได้รายงานผลจากการใช้ ILD สอนหัวข้อกลศาสตร์พบว่า ในปี 1999-2001 นักศึกษาที่เรียนในห้องที่ใช้ ILD มีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 31%-50% ในขณะที่ห้องเรียนที่ใช้การสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียว นักศึกษามีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 13%-16% จากผลการวิจัยที่แสดงว่าการใช้ ILD ทำให้นักศึกษามีการเรียนรู้ที่ดีขึ้น ทำให้มีการปรับการเรียนการสอนเป็นแบบ ILD ในงานวิจัยมีการเก็บผลอีกครั้งในปี 2007-2009 แต่เนื่องจากทุกกระบวนการวิชาของฟิสิกส์ปี 1 ในหัวข้อกลศาสตร์ได้ปรับรูปแบบให้เหมือนกันหมด ผลการวิจัยจึงมีเฉพาะห้องเรียนที่ใช้การสอนแบบ ILD พบว่านักศึกษามีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 28%-42% การประเมินการเรียนรู้ใช้ Force and Motion Conceptual Evaluation (FMCE) ซึ่งเป็นข้อสอบแบบปรนัยจำนวน 47 ข้อ ที่นิยมใช้วัดความรู้ความเข้าใจของผู้เรียนในหัวข้อแรงและการเคลื่อนที่

ส่วนในประเทศไทย อ่ำพล ใจรักษ์ และ ขวัญ อารยะชนิตกุล [5] ได้ทำการสอนแบบ ILD ในหัวข้อแรงและการเคลื่อนที่กับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ณ โรงเรียนแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ โดยใช้ชุดการสาธิตที่พัฒนาขึ้น และนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการแสดงผลของการสาธิต จากนั้นมีการวัดความรู้ความเข้าใจของ

ผู้เรียนก่อนและหลังการสอนด้วยแบบทดสอบ FMCE ฉบับภาษาไทย แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์พบว่า ผู้เรียนที่ผ่านการเรียนโดยวิธีการสอนแบบ ILD มีการเรียนรู้เพิ่มขึ้น 26% และกลุ่มผู้เรียนที่ผ่านการสอนแบบดั้งเดิม (บรรยายเพียงอย่างเดียว) มีการเรียนรู้เพิ่มขึ้นเพียง 10% จากงานวิจัยทั้งสองสามารถสรุปได้ว่าการสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์สามารถช่วยให้ผู้เรียนมีความเข้าใจในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

นอกจากนี้ผู้เขียนและปรีดา ตะเหลบ (นักศึกษาระดับปริญญาโทการสอนฟิสิกส์) [6] ได้พัฒนาชุดสาธิตและแบบทำนายผลที่ใช้ในการสอนแบบ ILD สำหรับหัวข้อกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ จำนวน 5 ชุด ได้แก่ pee-pee boy, movable syringe, isothermal process, fog in a bottle และ simple heat engine แล้วนำไปใช้สอนฟิสิกส์ 1 ในหัวข้ออุณหพลศาสตร์กับกลุ่มผู้เรียนจำนวน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 สอนแบบบรรยาย จำนวน 229 คน และกลุ่มที่ 2 สอนแบบ ILD จำนวน 325 คน ซึ่งเป็นผู้เรียนที่ได้ลงทะเบียนในรายวิชาฟิสิกส์ 1 ต่างภาคการศึกษากัน จากนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบความเข้าใจในเนื้อหาอุณหพลศาสตร์ระหว่างสองกลุ่ม คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบทดสอบ Thermodynamic Conceptual Survey (TCS) ขึ้นมา ประกอบด้วยคำถามปรนัยเกี่ยวกับเนื้อหาอุณหพลศาสตร์พื้นฐาน จำนวน 35 ข้อ แบบทดสอบฉบับนี้ไปใช้ทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนของทั้งสองกลุ่ม พบว่ากลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 3% และ 26% ตามลำดับ แสดงว่ากลุ่มที่ได้รับการสอนแบบ ILD มีความเข้าใจในเนื้อหาอุณหพล

ศาสตร์พื้นฐานได้ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการสอนแบบบรรยายอย่างมีนัยสำคัญ

แต่กระบวนการสอนแบบ ILD ที่มีขั้นตอนถึง 8 ขั้นตอนอาจจะทำให้ใช้เวลาบรรยายในหัวข้อใดๆ นานเกินไป ทำให้นักวิจัยทางด้านฟิสิกส์ศึกษาอย่าง Timothy French และ Karen Cummings[7] ได้ศึกษาผลจากการสอนแบบ ILD ที่มีการลดขั้นตอนลง โดยกลุ่มตัวอย่างการวิจัยเป็นนักศึกษาที่เรียนฟิสิกส์ 1 แบบ Studio Physics จากสถาบัน Rennselaer Polytechnic Institute (RPI) ซึ่งนักศึกษาเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ทั้งสองกลุ่มได้รับการสอนแบบ ILD ในเรื่องกฎข้อสามของนิวตันเหมือนกัน แต่กลุ่มแรกจะใช้เพียงสามขั้นตอนเท่านั้น คือ ขั้นตอนที่ 1 ผู้สอนอธิบายวิธีการสาธิต ขั้นตอนที่ 2 ผู้เรียนทำการทำนายผล และขั้นตอนที่ 6 ผู้เรียนสังเกตผลการสาธิต ส่วนอีกจะใช้ทั้ง 8 ขั้นตอนของ ILD จากนั้นวัดความรู้ความเข้าใจในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ โดยใช้ FMCE พบว่า การสอนแบบ ILD ที่มีการลดขั้นตอน นักศึกษามีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 76% ในขณะที่การสอน ILD ที่มีครบทุกขั้นตอน มีค่า นักศึกษามีการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น 67%

จากงานของ Timothy French และ Karen Cummings แสดงให้เห็นว่าการสาธิตประกอบการบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์ที่มีการลดขั้นตอนยังคงช่วยให้นักศึกษาเกิดการเรียนรู้ได้ดี ข้อสรุปนี้คงจะทำให้ผู้อ่านบทความนี้เกิดแรงจูงใจ ที่จะนำเทคนิคการสอนเชิงรุกแบบ ILD ไปประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอนของท่าน หากมีข้อสงสัยหรือคำแนะนำประการใดกรุณาส่ง e-mail มาได้ที่ pwattanakasiwich@gmail.com

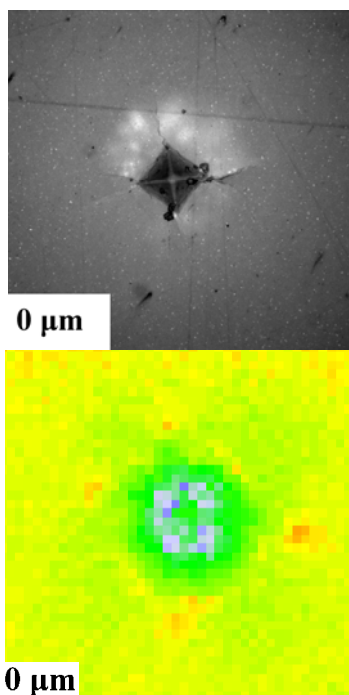
เอกสารอ้างอิง

- [1] Paosawatyanong, B. & Wattanakasiwich, P. (2010), "Implication of physics active-learning in Asia", *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 4 (3), 501-505.
- [2] Sokoloff, D. R., & Thornton, R. K. (1997), "Using Interactive Lecture Demonstrations to create an active learning environment", *Phys. Teach.*, 35, 340-347.
- [3] ปรีดา คะเหลน. การพัฒนาการสอนบรรยายแบบสาธิตเชิงปฏิสัมพันธ์ของกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การสอนฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2553
- [4] Sharma, M. D., et. al. (2010), "Use of interactive lecture demonstrations: A ten year study", *Phys. Rev. ST Physics Ed. Research*, 6, 020119-1-9.
- [5] อำพล ใจรักย์ และ ขวัญ อารยะชนิตกุล, "การสอนแบบบรรยายประกอบการสาธิตเชิงปฏิสัมพันธ์ในเรื่องแรงและการเคลื่อนที่สำหรับการ

สอนในระดับมัธยมศึกษา", *Paper presented at National Conference on Undergraduate Physic Education*, 8-9 ธันวาคม 2548, เชียงใหม่

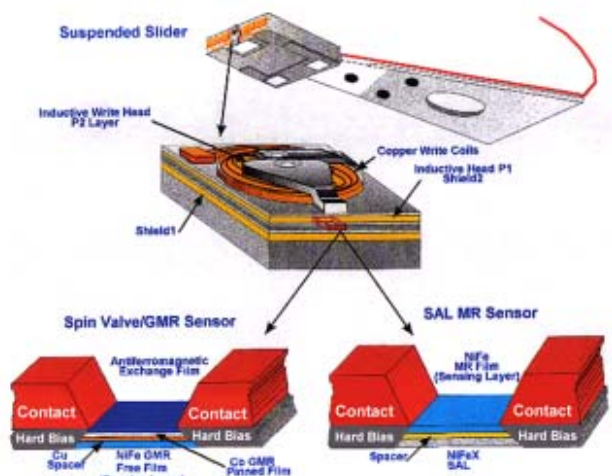
- [6] Taleab, P., & Wattanakasiwich, P. (2010), "Development of Thermodynamic Conceptual Evaluation", *Proc. of International Conference on Physics Education 2009* (pp.183-186).
- [7] French, T., & Cummings, K. (2002), "Effectiveness of Abridged Interactive Lecture Demonstrations", *Proc. 2002 Phys. Ed. Res. Conference* (pp. 201-203).

รูปประกอบจากบทความ “การผิดรูปบริเวณรอยกดของวัสดุ
เปราะ ตอนที่ 2 – อะลูมินา” หน้า 18 – 21

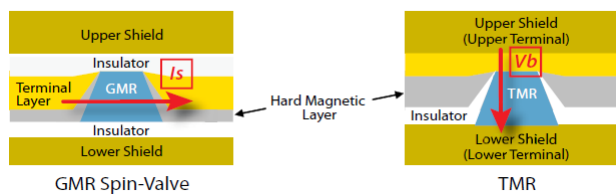


รูปที่ 4

รูปประกอบจากบทความ “การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า
ของวัสดุในสนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR ” หน้า 22 – 28



รูปที่ 11



รูปที่ 13

รูปประกอบจากบทความ “การสาธิตประกอบการบรรยายเชิง
ปฏิสัมพันธ์” หน้า 29 – 32



(ข)



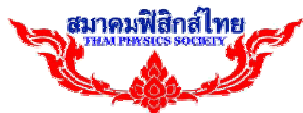
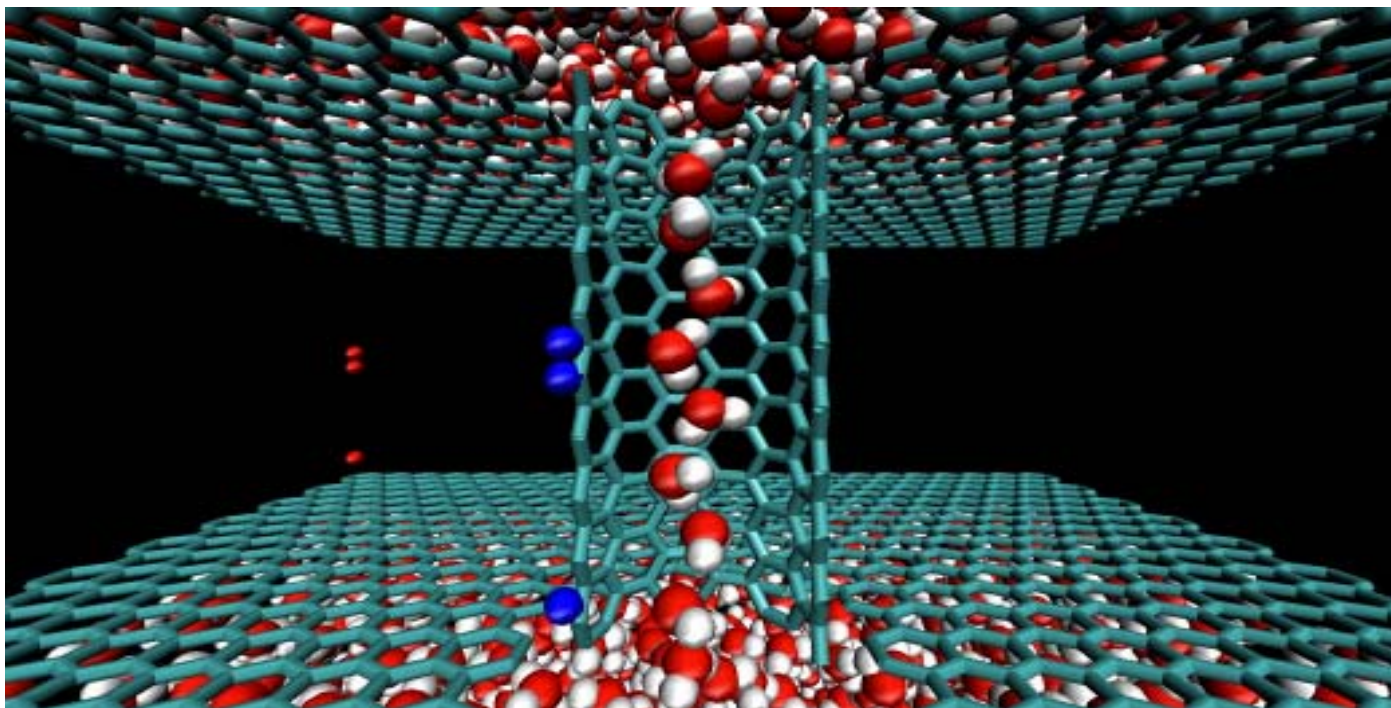
(ค)



(ง)

รูปที่ 1

เปิดประตูสู่เซลล์
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Surapat 3 Building, University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

P.O. Box 93 Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย