

Academic Article

ของไหลเชิงแสงกับการพัฒนาเทคโนโลยีแผ่นใหม่

Optofluidics and modern technology development

ณัฐพร สุวรรณพยัคฆ์^{1*}, ชาทิ ทีณะ² และ คทาวิธ กุลศิริรัตน์³

Nathaporn Suwanpayak^{1*}, Chat Teeka² and Kathawut Kulsirirat³

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

¹Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Pathiu, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต บางพลัด กรุงเทพมหานคร 10700

²Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University, Bangphlat, Bangkok 10700

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา 24110

³Department of General Science, Faculty of Education, Rajabhat Rajanagarindra University, Bangkhla, Chachoengsao 24110

*E-mail: ksnathap@gmail.com

Received: 14/09/2017; Accepted: 14/11/2017

บทคัดย่อ

ของไหลเชิงแสงเป็นศาสตร์ที่บูรณาการกันระหว่างของไหลและแสงบนหลักการของของไหลเชิงแสงในธรรมชาติ สามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาในเทคโนโลยีหลายด้าน ได้แก่ การนำคุณสมบัติของของไหลระดับจุลภาคและแสงมาทำงานร่วมกันเป็นห้องปฏิบัติการบนชิพ บทความนี้อธิบายถึงการนำของไหลเชิงแสงที่ประกอบด้วยของไหลและของแข็งมาสร้างนวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ ด้วยคุณสมบัติที่ต่างกันของไหลและของแข็งนี้จึงนำมาออกแบบอุปกรณ์ของไหลเชิงแสงได้ ของไหลเชิงแสงแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ ของไหลในของแข็ง ของไหลในของไหล และสารแขวนลอยที่อยู่ในของไหล ปัจจุบันเทคโนโลยีของไหลเชิงแสงมีการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ทางด้านการแพทย์ ด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ และ ด้านเซนเซอร์ เป็นต้น

คำสำคัญ: ของไหลเชิงแสง, ท่อนำคลื่น, ของไหล

Abstract

Optofluidics is an integration of microfluidics and optics based on the principles of natural fluid. It was applied and developed in various technologies, for instance, to combine the characteristics of microfluids and optics working together to be lab on a chip. This article explained the use of optofluidics which consisting of fluids and solids to develop the new innovation and modern technology. With the dissimilar properties of fluids and solids, optofluidics devices, thus, had been designed. Optofluidics was divided into three main groups: fluids in solids, fluids in fluids, and solids in fluids. Nowaday, optofluidics is applied in various ways, such as, medicine, biomedical engineering, biotechnology and sensors.

Keywords: optofluidics, waveguide, fluidics

บทนำ

ของไหลเชิงแสง (optofluidics) คือ ศาสตร์ผสมระหว่างของไหลระดับจุลภาค (microfluidics) กับพลังงานแสง (photonics) สำหรับสร้างห้องปฏิบัติการบนชิพ (lab on a chip) โดยอาศัยคุณสมบัติของของไหลและแสงที่ทำงานร่วมกัน Pang et al. (2012) ได้ศึกษาคุณลักษณะของของไหลระดับจุลภาคและทัศนศาสตร์เชิงลึกจากการเลียนแบบของไหลเชิงแสงในธรรมชาติได้อีกที่น่าสนใจ นั่นคือ การดูดน้ำของพืชด้วยพลังงานแสงเพื่อทำให้น้ำเคลื่อนที่ทวนแรงโน้มถ่วงของโลกพร้อมกับออสโมซิส (osmosis) การยึดติด (adhesion) และการคายน้ำ (transpiration) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ในขณะที่ Psaltis et al. (2016) ได้ศึกษาคุณลักษณะของแสงที่มีผลต่อการเบนเข้าหาแสงของใบไม้บางชนิดและการหุบของใบเมื่อไม่มีแสง เนื่องจากแสงมีผลต่อการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของสารในเซลล์ จึงทำให้ใบสามารถกางเมื่อได้รับแสงและหุบเมื่อไม่โดนแสง เช่นเดียวกับดอกทานตะวันที่เบนเข้าหาดวงอาทิตย์ ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เกี่ยวข้องกับโครงข่ายท่อลำเลียง (vascular network) เนื่องจากเป็นระบบลำเลียงอาหารหล่อเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของใบพืชด้วย และ Henrik et al. (2016) ได้ศึกษาโครงข่ายท่อลำเลียง แล้วพบว่า ในการขนส่งอาหารและน้ำไปยังเซลล์ต่าง ๆ ของพืชนั้น มีความซับซ้อนต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งทำให้มีการเจริญได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามแสงเป็นพลังงานหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมทั้งการนำส่งสัญญาณในระบบสื่อสารแบบต่าง ๆ ในปัจจุบันด้วย

เมื่อศึกษาย้อนกลับไปในปี ค.ศ. 1842 Daniel Colladon ได้ค้นพบว่าแสงสามารถโค้งไปตามทิศทางการไหลของน้ำที่ไหลออกจากขวดที่เจาะรูไว้ แสดงให้เห็นว่าน้ำมีคุณสมบัติเป็นท่อนำคลื่น (waveguide) จึงเกิดแนวความคิดเริ่มต้นในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างของน้ำและแสงเพื่อหาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกัน หลังจากนั้น

การค้นพบที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งคือการทำให้งแสงสามารถหนีบจับอนุภาคนขนาดเล็กได้เรียกว่า คีมหนีบเชิงแสง (optical tweezer) ด้วยแรงเกรเดียนต์ (gradient force) และแรงกระเจิง (scattering force) ในการทำให้อนุภาคหรือเซลล์เคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการได้โดยไม่เกิดความเสียหาย (Askhin, 1997) ต่อมา Flores-Flores et al. (2015) ได้ทำการทดลองเชิงคำนวณโดยการให้น้ำอยู่ในท่อแก้วขนาด $100\text{ }\mu\text{m}$ ที่ด้านหนึ่งของท่อแก้วเคลือบด้วยฟิล์มบางของซิลิคอน-อสัณฐาน (thin film of amorphous silicon: a-Si:H) สำหรับดูดซับความร้อนจากเลเซอร์ที่ใช้ในการหนีบอนุภาคระดับจุลภาค กำลังแสงน้อยกว่า 0.8 mW แต่เนื่องจากอนุภาคถูกหนีบในน้ำซึ่งเป็นของไหล จึงทำให้เกิดแรงลากสโตกส์และความร้อนจากแสง (stokes drag and thermo-phonophoretic forces) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลำแสงสามารถจับเคลื่อนอนุภาคได้ โดยไม่เกิดความเสียหายแก่อนุภาคหรือเซลล์และใช้ได้กับอนุภาคระดับไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตรได้

บทความนี้นำเสนอหลักการและการพัฒนางานวิจัยด้านของไหลเชิงแสง ซึ่งเป็นศาสตร์ผสมระหว่างแสงและของไหล โดยประยุกต์ใช้ในการสร้างนวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีขนาดเล็กลง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายแขนงด้วยกัน เช่น ด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ (biomedical engineering) (Zhu et al., 2011) ไบโอเซนเซอร์ (biosensor) (Liu et al., 2012) การทำเลนส์ในระดับไมโครและนาโนเมตร (micro-nano lens) (Kayani et al., 2012) ซึ่งเป็นนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการบูรณาการศาสตร์หลายด้านเข้าด้วยกันในอนาคต

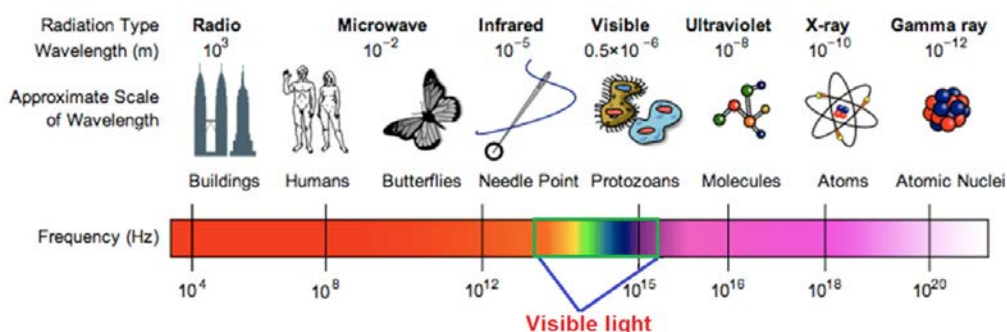
ธรรมชาติของแสง

แสงในธรรมชาติคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งในบรรดาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลากหลายชนิด เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรด และ รังสีเอกซ์ เป็นต้น ที่มีความยาวคลื่นต่างกัน และแสงที่ตามองเห็น (visible light) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น $400\text{--}700\text{ nm}$ ดังรูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับขนาดของโครงสร้างในแต่ละระดับ พืชสังเคราะห์แสงโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะบางความยาวคลื่นเท่านั้น อยู่ในช่วงของแสงที่ตามองเห็นซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณขนาดของโปรโตซัว แต่มีบางความคลื่นที่พืชไม่ได้ใช้ อย่างเช่น สีเขียว จึงสะท้อนเข้าสู่ตาเรา ทำให้มองเห็นใบไม้เป็นสีเขียว ทั้งนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีการนำไปใช้ประโยชน์และนำไปประยุกต์ใช้แตกต่างกันไปตามความเหมาะสม ทั้งในด้านการแพทย์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ อุตสาหกรรมการสื่อสาร และทางด้านนาโนเทคโนโลยี

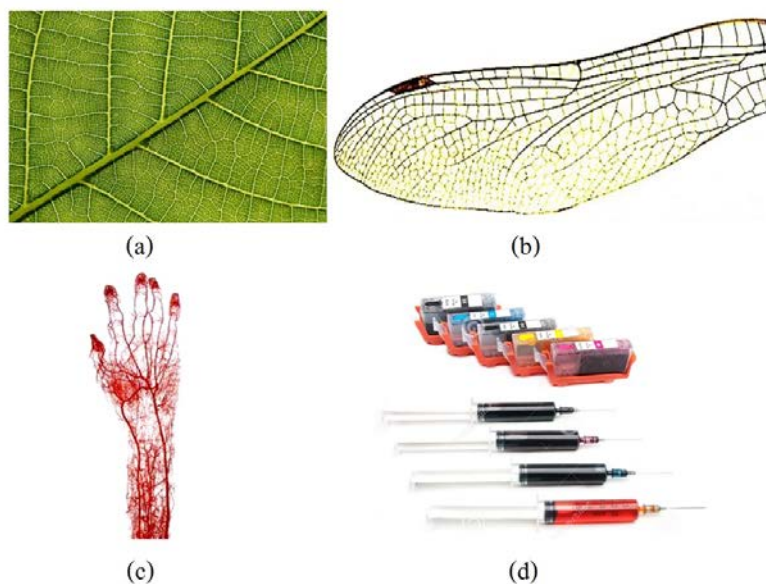
ของไหลในท่อระดับจุลภาคในธรรมชาติและชีวิตประจำวัน

เมื่อปี ค.ศ. 1950 เครื่องพิมพ์แบบหมึกพ่น (inkjet) ได้ถูกคิดค้นขึ้น เป็นนวัตกรรมที่อาศัยพื้นฐานของของไหลระดับจุลภาคของหลอดบรรจุสีซึ่งมีขนาดเล็กมากสำหรับใส่หมึกพิมพ์ (Hansell, 1950) ซึ่งใช้หลักการเดียวกับ

ของไหลระดับจุลภาคในธรรมชาติ รวมทั้งในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด เช่น มนุษย์ สัตว์ และพืช ดังรูปที่ 2 และเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์มาถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1. สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นแตกต่างกันเปรียบเทียบกับขนาดของโครงสร้าง (Ballachey, 2014)



รูปที่ 2. ตัวอย่างของไหลระดับจุลภาคที่อยู่ในชีวิตประจำวัน (a) โครงข่ายท่อลำเลียงในใบไม้ (Söderbergh, 2016); (b) หลอดเลือดในปีกแมลง (Katifori, 2017); (c) หลอดเลือดในระบบร่างกายมนุษย์ (Beane, 2014) และ (d) หมึกพิมพ์ (Horváth, 2017)

การบูรณาการระหว่างแสงและของไหล

แสงมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค คุณสมบัติที่แสดงว่าสิ่งนั้นเป็นคลื่นคือ การสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดได้ของแสง ส่วนความเป็นอนุภาคสามารถพิสูจน์ได้จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เกิดขึ้นได้เมื่อแสงตกกระทบผิวโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณผิวโลหะหลุดออกจากโลหะได้ และปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) เกิดขึ้นเมื่อแสงชนกับอะตอมหรืออิเล็กตรอนแล้วทำให้ความถี่ของแสงที่ชนมีค่าน้อยกว่าเดิมเนื่องจากการสูญเสียพลังงานระหว่างการชน (Attix, 1986)

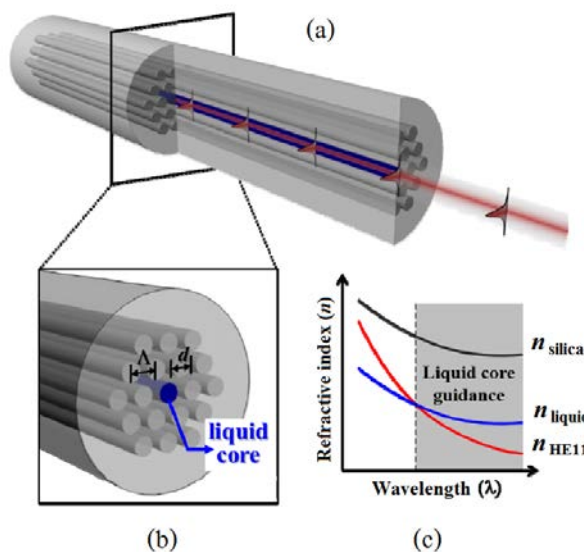
ในปัจจุบันใยแก้วนำแสง (fiber optic) มีความสำคัญต่อระบบการสื่อสารเป็นอย่างมาก ใยแก้วนำแสงประกอบไปด้วยแกนใยแก้ว (core) และวัสดุหุ้ม (cladding) โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดของคลื่นแสงป้องกันการสูญเสียสัญญาณและสัญญาณอื่นรบกวนได้ดี ทำให้ใยแก้วนำแสงกลายเป็นนวัตกรรมที่นิยมใช้ในด้าน การสื่อสารกันอย่างแพร่หลาย (Nouchi et al., 2012) แต่วิวัฒนาการการสื่อสารไม่ได้หยุดนิ่งเพียงแคใยแก้วนำแสง ปัจจุบันได้มีการใช้ของไหลเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการเป็นตัวนำสัญญาณและนำมาใช้ในการทำเลนส์ ด้วยคุณสมบัติของไหลที่แตกต่างกับคุณสมบัติของแข็ง จึงสามารถนำของไหลมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ในทางทัศนศาสตร์ และระบบสื่อสารสมัยใหม่ได้ โดยของไหลเชิงแสงสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ ของไหลในของแข็ง (fluids in solids) ของไหลในของไหล (fluids in fluids) และสารแขวนลอยที่อยู่ในของไหล (solids in fluids)

1. ของไหลในของแข็ง

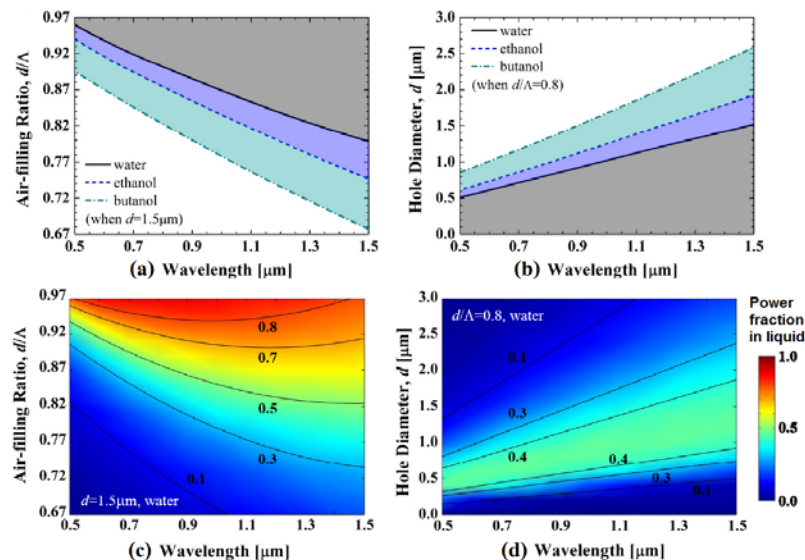
ความสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับของแข็งสามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ของไหลเชิงแสงได้ โดยออกแบบให้โครงสร้างของแข็งที่มีช่องว่างสำหรับบรรจุของไหลมีขนาดมากกว่าความยาวของคลื่นแสง ช่องว่างนี้อาจเป็นรูปทรงกระบอกกลางหรือทรงสี่เหลี่ยมก็ได้ เมื่อเติมของเหลว เช่น น้ำเข้าไปในช่องว่างของท่อนำคลื่นนี้ทำให้เกิดการสะท้อนและส่งสัญญาณแสงผ่านน้ำ ถ้าสมมติให้ขนาดของช่องว่างสำหรับของไหล ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง สัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนมากและทำให้เกิดปรากฏการณ์ blazed grating ในของเหลว ซึ่งเป็นรูปแบบการสะท้อนของแสงชนิดหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการสะท้อนแสงได้ดีเป็นผลให้แสงมีพลังงานมากขึ้น (Psaltis et al., 2006)

ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติของแสงแตกต่างกันนี้ เป็นผลดีต่อการทำให้แสงแพร่กระจาย (propagation) ในท่อนำคลื่น เช่น อากาศกับปริซึมแก้วสามารถแยกแสงที่ตามองเห็นออกเป็นสีต่าง ๆ ได้ เนื่องจากมุมตกกระทบต่างกัน นอกจากนี้ตัวอย่างสำคัญและสามารถพบได้ในท่อนำคลื่นใยแก้วนำแสง (fiber-optic waveguide) คือการสะท้อนกลับหมดของแสงระหว่างรอยต่อของวัสดุหุ้มกับแกน ซึ่งค่าดัชนีหักเหของแกนมากกว่าดัชนีหักเหของวัสดุหุ้ม (Psaltis et al., 2006) เมื่อไม่นานมานี้ Karasawa et al. (2012) ได้ออกแบบเส้นใยโฟโตนิกคริสตัล (photonic crystal fibers: PCF) โดยกำหนดเงื่อนไขที่โครงสร้างเฉพาะ $\Lambda = d + 0.1 \mu\text{m}$ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการแพร่กระจายของแสงโดยใช้วิธีสมาชิกจำกัด (finite element method: FEM) ในขณะที่ Park et al.

(2014) แสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของท่อนำคลื่นเส้นใยโฟโตนิกคริสตัลแบบแกนของไหล (liquid-core photonic crystal fibers: LCPCF) โดยการเติมของเหลวที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำลงในช่องว่างตรงกลางท่อนำคลื่น จากรูปที่ 3(a) และ (b) แสดงระยะที่เติมอากาศเข้าไป อัตราส่วน d/Λ ที่ $d = 1.5 \mu\text{m}$ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรู $d/\Lambda = 0.8$ ซึ่งเหมาะกับของเหลวในแกนของท่อนำคลื่น ในรูปที่ 4 (b) แกนของเหลวที่เหมาะสมกับความยาวคลื่น $0.5 \mu\text{m}$ เมื่อ $d < 0.856 \mu\text{m}$ สำหรับบิวทานอล $d < 0.612 \mu\text{m}$ สำหรับเอทานอล และ $d < 0.508 \mu\text{m}$ สำหรับน้ำ ผลปรากฏว่าดัชนีหักเหของของเหลวที่เหมาะสมสำหรับแสงซึ่งเข้าไปในแกนของเหลวที่ภาวะพื้นฐานอยู่ในช่วงดัชนีหักเห 1.30-1.44 และยังวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนของเหลวในแกนกลาง ได้แก่ น้ำ (H_2O) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และบิวทานอล ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$) เพื่อดูการแพร่กระจายของแสง โดยเฉพาะแกนที่เป็นน้ำของ LCPCF จากผลการทดลองในรูปที่ 4 เป็นการแพร่กระจายของแสงในตัวกลาง 3 ชนิด คือ น้ำ เอทานอล และบิวทานอล ที่อุณหภูมิห้อง ที่ความดันบรรยากาศ โดยน้ำมีค่าดัชนีหักเหต่ำที่สุด ในขณะที่บิวทานอลมีค่าดัชนีหักเหมากที่สุด



รูปที่ 3. (a) แผนภาพแกนของเหลวของท่อนำคลื่นเส้นใยโฟโตนิกคริสตัลแบบแกนของไหล (LCPCF) (b) ภาพตัดขวางแกนของเหลว (c) แถบสเปกตรัมดัชนีหักเหของแกนและวัสดุหุ้มที่มีแกนเป็นของเหลว (Park et al., 2014)

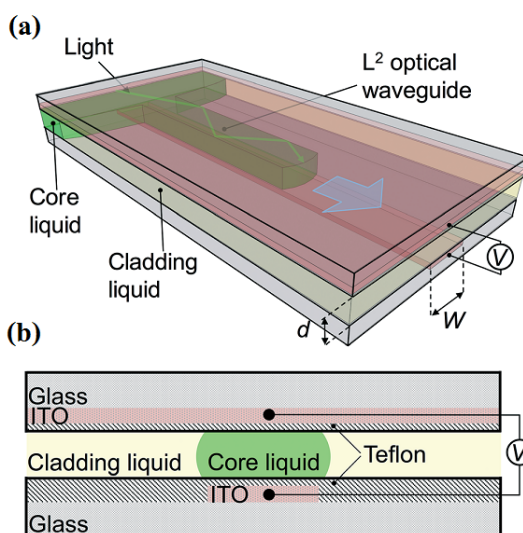


รูปที่ 4. ระยะที่สเปกตรัมแผ่เข้าไปใน LCPCF จากระยะ 0.5-1.5 μm สำหรับน้ำ เอทานอล และบิวทานอล (a) อากาศที่เติมเข้าในอัตราส่วน (d/Λ) ในช่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 1.5\mu\text{m}$ (b) ช่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับเติมอากาศที่อัตราส่วน $d/\Lambda = 0.8$ (c) กำลังในแกนที่เป็นน้ำโดยการเปลี่ยนค่าอัตราส่วน $d = 1.5\mu\text{m}$ และ (d) เปลี่ยนอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ $d/\Lambda = 0.8$ (Park et al., 2014)

2. ของไหลในของไหล

โดยทั่วไปของไหลกับของไหลหากมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันจะสามารถรวมตัวกันได้ แต่ถ้าความหนาแน่นของของไหลต่างกันจะรวมตัวกันไม่ได้ เช่น น้ำกับน้ำมัน นอกจากนี้ความหนาแน่นยังมีความสัมพันธ์กับความเร็วแสง ถ้าตัวกลางมีความหนาแน่นมาก แสงจะเดินทางได้ช้า ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นที่มีแกนของเหลวกับวัสดุหุ้มของเหลว (liquid core/liquid cladding) ของเหลวทำหน้าที่เสมือนวัสดุหุ้มที่เป็นของแข็งห่อหุ้ม (Fan et al., 2016; Wolfe et al., 2004) ในปี ค.ศ. 2004 Wolfe et al. ได้ศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นแบบสวิตช์เชิงแสง (optical switch) ในลักษณะการไหลแบบเป็นชั้น (laminar flow) โดยกำหนดให้วัสดุหุ้มเป็นน้ำที่มีดัชนีหักเห $n = 1.335$ และแกนของท่อนำคลื่นเป็นแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีดัชนีหักเห $n = 1.445$ ไหลอยู่ภายในท่อที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรทำจากพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxane: PDMS) มีค่าดัชนีหักเห $n = 1.40$ เนื่องจากน้ำเป็นของไหลมีการขยายตัวน้อย และไม่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของ PDMS จึงถูกเลือกใช้ในการศึกษา ทั้งนี้ CaCl_2 เป็นแกนของท่อนำคลื่นมีดัชนีหักเหมากกว่า PDMS การทดลองนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำคลื่นแบบภาวะเดี่ยว (single mode) และภาวะผสม (multimode)

อีกกรณีหนึ่งในการใช้แกนและวัสดุหุ้มเป็นของไหลโดยเลือกใช้แกมมาบิวทีโรแลคโตน (gamma-butyrolactone: GBL) ที่มีดัชนีหักเห $n=1.4341$ เป็นแกน และใช้น้ำมันซิลิโคน (silicone oil) มีดัชนีหักเห $n=1.401$ เป็นวัสดุหุ้มในกรณีการสร้างไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (dielectrophoresis) คือการให้แรงกระทำต่ออนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จนเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (polarization phenomenon) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (non-uniform electric field) หรือสนามไฟฟ้าที่ปรับค่าได้กระทำต่ออนุภาคก่อให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) เกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักให้อนุภาคเคลื่อนที่เรียกแรงที่กระทำต่ออนุภาคนี้นี้ว่าแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก (dielectrophoretic force) เพื่อศึกษาการแพร่กระจายและการสูญเสียของแสงอันเนื่องจากการใช้แกนและวัสดุหุ้มเป็นของเหลวทั้งสองชนิดนี้เป็นท่อนำคลื่น (Fan et al., 2016) ดังตัวอย่างในรูปที่ 5 โดยออกแบบให้มีแผ่นแก้วขนานทั้งสองด้านของท่อนำคลื่นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ หรือ ทางด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ (Demircan et al., 2013; Negr & Cavallini, 2017)

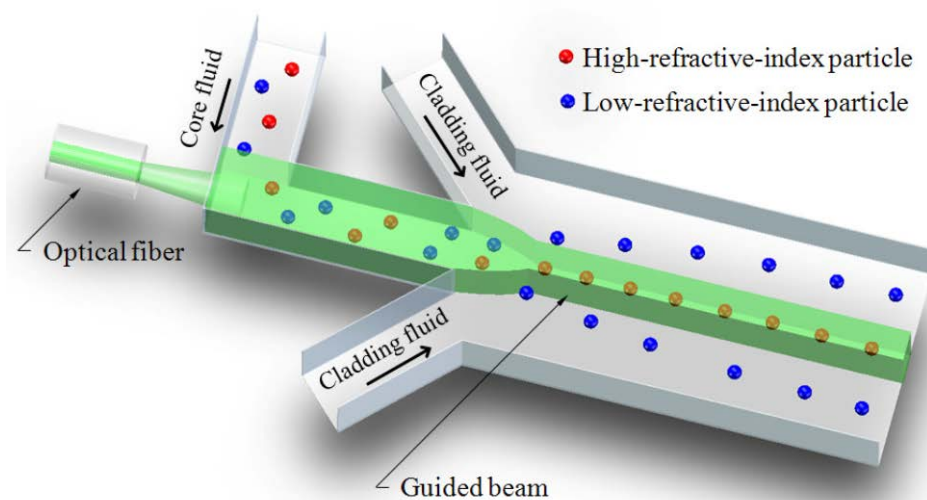


รูปที่ 5. แผนภาพของท่อนำคลื่นที่มีแกนและวัสดุหุ้มเป็นของไหล (a) แกน GBL มีดัชนีหักเห 1.4341 และวัสดุหุ้มที่ทำจากน้ำมันซิลิโคนมีดัชนีหักเห 1.401 (b) ภาพตัดขวางของไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Fan et al., 2016)

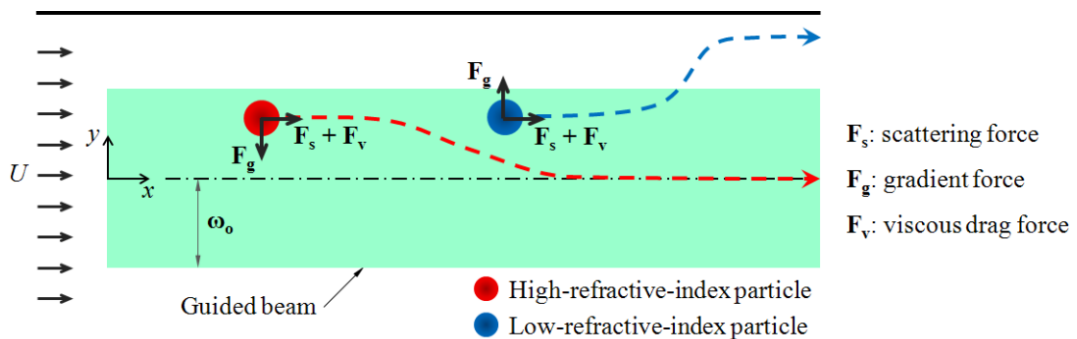
3. สารแขวนลอยในของไหล

สารแขวนลอยในของไหล คือ อนุภาคของแข็งขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ที่อยู่ในระบบของไหลเชิงแสงและมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงแสงบางอย่างของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงไป จากรูปที่ 6 ลักษณะ

ของท่อนำคลื่นแบบของไหลเป็นแกนและเป็นวัสดุหุ้ม (liquid core/ liquid cladding) โดยที่แกนมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าวัสดุหุ้ม ในระบบของไหลทั้งสองชนิดนี้ แสงทำหน้าที่ในการแยกอนุภาคที่ดัชนีหักเหมากกว่าเคลื่อนที่ไปบริเวณแกนของท่อนำคลื่น ในขณะที่อนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่าเคลื่อนที่แยกไปยังบริเวณวัสดุหุ้ม แรงที่กระทำต่ออนุภาคทั้งสองชนิดเป็นไปดังรูปที่ 7 และแสดงดังสมการที่ (1)



รูปที่ 6. แผนภาพแสดงแกนของไหลและวัสดุหุ้มของท่อนำคลื่นในการแยกอนุภาคออกจากกัน (Lee et al., 2012)



รูปที่ 7. แผนภาพของแรงกระทำต่ออนุภาคที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกันคือ อนุภาคสีน้ำเงิน (low refractive index particle) มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าอนุภาคสีแดง (high refractive index particle) (Lee et al., 2012)

$$\vec{F}_{net} = m_p \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{F}_{rad} + \vec{F}_v \quad (1)$$

m_p คือ มวลของอนุภาค และ $\vec{U}$ คือ เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค เมื่อ $\vec{F}_{net}$ $\vec{F}_{rad}$ และ $\vec{F}_v$ คือ แรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาค แรงในการแผ่รังสีและแรงดึงดูดเนื่องจากความหนืดของของไหลกระทำต่ออนุภาคตามลำดับ โดยที่

$$\vec{F}_v = 6\pi\mu r_p \vec{U} \quad (2)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดของของไหล และ r_p คือ รัศมีของอนุภาค พิจารณารูปที่ 7 โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน สามารถแยกสมการการเคลื่อนที่ที่เป็นแนวแกน x และแนวแกน y ดังนี้

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} = F_s - 6\pi\mu r_p \left(\frac{dx}{dt} - U \right) \quad (3)$$

$$m_p \frac{d^2y}{dt^2} = F_g - 6\pi\mu r_p \frac{dy}{dt} \quad (4)$$

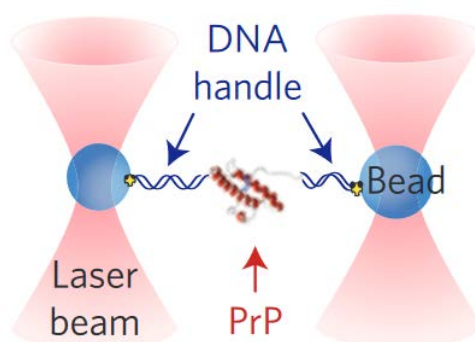
โดยที่ F_s และ F_g คือ แรงกระเจิงและแรงเกรเดียนต์ ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 7 พบว่าการที่อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวไปตามแกนหรือวัสดุหุ้มของท่อนำคลื่นนั้นขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเกรเดียนต์ Lee et al. (2012) ได้แสดงวิธีการคำนวณแรงกระทำและการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากแกนและวัสดุหุ้มเป็นของไหลที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกันทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างกันด้วย

การพัฒนาเทคโนโลยีของไหลเชิงแสง

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น สามารถผลิตอุปกรณ์และเครื่องมือขนาดเล็กที่เหมาะสมกับการใช้งานและสะดวกในการพกพา รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการทำงานได้อย่างแม่นยำสูง ทำให้ระบบปฏิบัติการที่เคยใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่ ถูกย่อส่วนให้สามารถใช้ในห้องปฏิบัติการขนาดเล็กได้ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้หลากหลายสาขาทั้งด้านการแพทย์ วิศวกรรม เทคโนโลยีชีวภาพ รวมถึงศาสตร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1. ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

ในการใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์จัดการกับสิ่งที่มีขนาดเล็ก การหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายแก่ชิ้นตัวอย่างหรือเซลล์เหล่านั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีและนวัตกรรมมีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงสามารถใช้แสงในการหนีบและดึงสาย DNA ให้คลายออกจากกันได้ โดยมีโปรตีนพรีออน (Prion protein: PrP) อยู่ตรงกลางของสาย DNA ดังรูปที่ 8 ในปี ค.ศ. 1997 Ashkin ได้นำเสนอเทคนิคการใช้แสงในการจับเคลื่อนอนุภาคเรียกว่าคีมหนีบเชิงแสง โดยการใช้แสงที่มีปลายลำแสงขนาดเล็กหนีบหรือดึงอนุภาคนขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรอย่างเช่น เซลล์เม็ดเลือดแดงให้เคลื่อนที่ไปตามที่ต้องการ (Miccio, 2015) เทคนิคนี้นิยมใช้กันมากในด้านโมเลกุล เนื่องจากการหนีบด้วยแสงไม่ทำให้เซลล์หรือโมเลกุลเกิดความเสียหาย อันเนื่องจากแรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของลำแสง แรงทั้งสองนี้มีผลทำให้เกิดการดูดกันหรือผลักให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแรงเกรเดียนต์หรือแรงกระเจิงที่มีค่ามากกว่ากัน ถ้าแรงเกรเดียนต์มากกว่าจะทำให้้อนุภาคนั้นถูกดูดเข้าหาลำแสง แต่ถ้าแรงกระเจิงมากกว่าส่งผลให้แสงเกิดการผลัก้อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ (Suwanpayak et al., 2011)

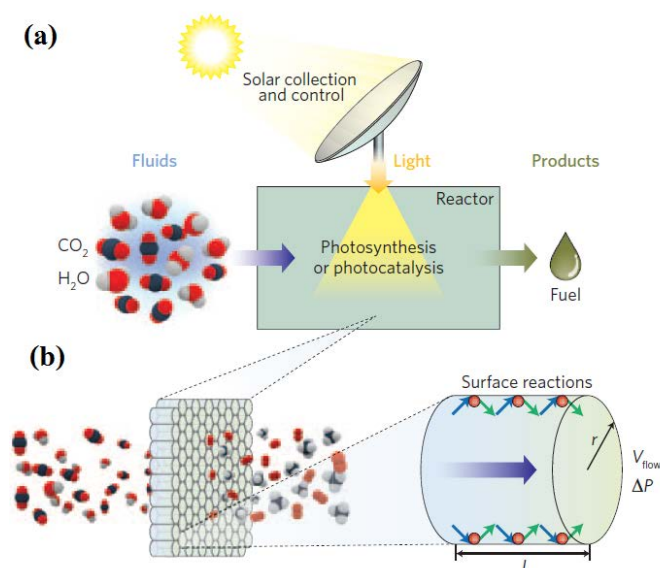


รูปที่ 8. ลักษณะของคีมหนีบเชิงแสงที่ใช้ในการคิบบโมเลกุล (Neupane et al., 2016)

2. ด้านพลังงาน

Erickson et al. (2011) ได้รวบรวมงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของไหลเชิงแสงในแง่การผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อแสดงศักยภาพของเครื่องมือขนาดเล็กของของไหลเชิงแสง รูปที่ 9 แสดงกระบวนการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์โดยเลียนแบบกระบวนการสังเคราะห์แสงหรือถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการทางชีวเคมี ถึงหมักชีวภาพเชิงแสง (photobioreactor: PBR) เป็นกระบวนการผลิตน้ำมันโดยการเลี้ยงสาหร่ายหรือจุลินทรีย์ในท่อหรือหลอดแก้วแบบเปิด จุลินทรีย์สามารถเคลื่อนที่และเจริญในท่อหรือหลอดแก้วโดยการรับแสงอาทิตย์ พร้อมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น และสารอาหารต่าง ๆ ที่จำเป็น จุลินทรีย์จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นเชื้อเพลิงเอทานอลหรือเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จากนั้นจุลินทรีย์จะจับน้ำมันและสามารถสกัดออกด้วยเทคโนโลยีการแยกสารทางชีวภาพ ซึ่งถ้ากระบวนการดังกล่าวเป็นไปตามที่นักวิจัยคาดหวังกันไว้ การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่สำหรับอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพ (Chen et al., 2011)



รูปที่ 9. (a) แผนภาพแสดงการผลิตเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย
(b) แสดงการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวท่อ (Erickson et al., 2011)

3. ด้านชีวการแพทย์

การใช้แสงในทางการแพทย์นั้นมีหลายเทคนิคด้วยกัน เช่น การเอกซเรย์ การใช้เลเซอร์ทำลายเนื้อเยื่อหรือเซลล์บางชนิด ปัจจุบันนักวิจัยจึงได้พยายามศึกษาค้นคว้าวิธีการส่งกระแสประสาทจากอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายไปยังสมอง จากความรู้เดิมคือระบบประสาทจะส่งผ่านการรับรู้ทางกระแสประสาทเหมือนการส่งกระแสไฟฟ้าโดยมีประจุบวกและประจุเคลื่อนที่ไปตามเส้นประสาทเพื่อส่งการรับรู้ไปยังสมอง การสื่อสารทางระบบประสาทในสิ่งมีชีวิต เป็นระบบสื่อสารที่มีความซับซ้อนและมีความรวดเร็วในการรับรู้ได้สูง Shin et al. (2016) ได้ศึกษาและใช้ใยแก้วนำแสงเหนี่ยวนำอุณหภูมิของแสงในสมองของหนู เพื่อออกแบบการทดลองส่งลำแสงไปยังเป้าหมายที่ลึกระดับเซลล์ลงไปด้วยความเข้มแสงที่เหมาะสม โดยสร้างแบบจำลองการคำนวณแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo: MC) สำหรับทำนายความร้อนที่เกิดขึ้นบนเนื้อเยื่อ ซึ่งวัดได้ 12.3 mV/ °C ในการศึกษาช่วยให้การออกแบบการทดลองเกี่ยวกับพันธุศาสตร์เชิงแสงบริเวณสมองเนื้อเทา (gray matter: GM) มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 1. คุณสมบัติเชิงแสงที่ใช้ในการคำนวณแบบมอนติคาร์โล

ความยาวคลื่น (nm)	μ_s (mm ⁻¹)	μ_a (mm ⁻¹)	g	บริเวณสมอง	ชนิดเซลล์รับแสง
473	11.5	0.50	0.89	GM	ChR2
532	10.5	0.25	0.89	GM	C1V1
593	9.6	0.14	0.89	GM	eNpHR3.0

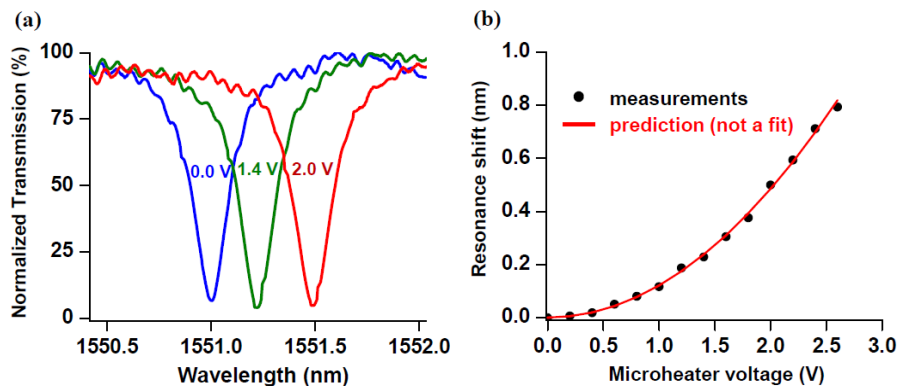
(Shin et al., 2016)

จากตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเชิงแสงในการใช้แบบจำลองการคำนวณแบบมอนติคาร์โลโดย μ_s คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของสารที่อยู่ในสมองเนื้อเทา (GM) ที่ความยาวคลื่น 473, 532 และ 593 nm และ μ_a คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารที่อยู่ในสมองที่ความยาวคลื่นเดียวกัน การใช้แบบจำลองในทดลองเพื่อหาผลกระทบของความร้อนที่เกิดจากแสง ช่วยให้การประเมินการทดลองจริงได้ง่ายและไม่มีผลต่อหนูทดลอง

4. ด้านเซนเซอร์

การนำของไหลเชิงแสงไปประยุกต์ด้านการทำเซนเซอร์ มีนักวิจัยจำนวนมาก (Song et al., 2014; Testaa et al., 2013; White et al., 2006; Lim et al., 2011; Liu et al., 2012) ได้นำไปใช้ในการตรวจจับสารชีวโมเลกุล โปรตีน หรือกรดนิวคลีอิก เนื่องจากของไหลเมื่อมีสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวปนเปื้อนอยู่จะทำให้ดัชนีหักเหหรือการส่งผ่านลำแสง มีการเปลี่ยนแปลงไป หลักการทำเซนเซอร์คือส่งผ่านมวลโมเลกุลไปยังบริเวณพื้นที่ตรวจจับ ของไหลเชิงแสงมีการนำไปใช้ทางด้านชีววิทยาและชีวเคมี เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่แสงมีปฏิริยากับตัวอย่างที่เป็นของไหลเหล่านี้ ไม่เฉพาะทางกายภาพเท่านั้นแต่ยังมีผลต่อจำนวนการเปลี่ยนแปลงของแสงในอุปกรณ์อีกด้วย ซึ่งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการทำเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะใช้วงแหวนสั่นพ้อง (ring resonator) ซึ่งเรียกว่าวงแหวนสั่นพ้องของไหลเชิงแสง เซนเซอร์ (optofluidics ring resonator sensor) ภายในวงแหวนสั่นพ้องจะเป็นแกนของไหล (liquid core ring resonator: LCORR) โดยใช้ท่อแก้วขนาดเล็กสำหรับของไหล จากนั้นส่งตัวอย่างผ่านท่อแก้วนี้และตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหที่ผิวด้านใน เซนเซอร์ชนิดนี้นำไปใช้เพื่อตรวจจับสารก่อมะเร็ง และค่าการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอื่น ๆ (Testaa et al., 2013; White et al., 2006; Lim et al., 2011)

ดังนั้นการใช้ของไหลเชิงแสงในการทำเซนเซอร์สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงได้หลากหลาย เช่น ดัชนีหักเห การส่งผ่านของแสง ความยาวคลื่น และความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบของไหลเชิงแสง ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ไม่สามารถสร้างแบบเชิงเดี่ยวได้จึงต้องอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางเคมี ทางแสง และของไหลร่วมกัน จึงจะทำให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10. ผลของการปรับเปลี่ยนทางไฟฟ้าของวงแหวนสั่นพ้องเชิงแสง (a) การปรับเปลี่ยนวงแหวนสั่นพ้องด้วยตัวทำความร้อนระดับไมโครเมตร โดยวัดค่าจากการส่งผ่านความต่างศักย์ของท่อนำคลื่นที่ประยุกต์ใช้ทำความร้อน โดยความยาวคลื่นที่ให้ไปอยู่ในช่วงมิลลิวัตต์ และ (b) ความยาวคลื่นสั่นพ้องที่อยู่กับค่าความต่างศักย์ของตัวทำความร้อนระดับไมโครเมตร โดยจุดและเส้นทึบเป็นการวัดค่าจากการทดลองและทางทฤษฎี ตามลำดับ (Soltani et al., 2012)

สรุปและข้อเสนอแนะ

ของไหลเชิงแสงคือศาสตร์ที่ผสมผสานระหว่างของไหลระดับจุลภาคกับแสง สำหรับสร้างห้องปฏิบัติการบนชิปโดยอาศัยคุณสมบัติของของไหลและแสงที่ทำงานร่วมกัน เพื่อศึกษาคุณลักษณะของของไหลระดับจุลภาค และทัศนศาสตร์เชิงลึก ของไหลเชิงแสงในระบบทัศนศาสตร์ถูกสังเคราะห์ด้วยของไหล ของไหลเป็นหน่วยหนึ่งที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกับของแข็ง และคุณสมบัติของไหลเชิงแสงนี้สามารถนำมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สมัยใหม่ ของไหลเชิงแสงสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ ของไหลในของแข็ง ของไหลในของไหลและสารแขวนลอยที่อยู่ในของไหล ปัจจุบันเทคโนโลยีของไหลเชิงแสงมีการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ด้านการแพทย์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีชีวภาพ และการประยุกต์เซนเซอร์ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเทคโนโลยีทางด้านแสงมาใช้งานหลายด้านเพื่อช่วยแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการเกษตร อุตสาหกรรม และการแพทย์ ดังนั้นความรู้ด้านเทคโนโลยีแสงทางชีวภาพ มีส่วนสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือและสร้างชุดตรวจวัดค่าต่าง ๆ และมีการประยุกต์ใช้งานในระบบของไหลจุลภาค (Sumriddetchkajorn et al., 2012; Chaitavon et al., 2013) แต่การใช้งานยังมีน้อยมากโดยเฉพาะการนำมาสร้างห้องปฏิบัติการบนชิป (lab-on chip) เนื่องจากต้นทุนในการศึกษาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังขาดนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญทางด้านนี้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Ashkin, A. (1997). Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94, 4853-4860.
- Attix, F. H. (1986). Gamma-and X-ray interactions in matter, *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry* (1st ed.) pp. 124-159. Weinheim: John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9783527617135.ch7
- Ballachey, G. (2014). *Sunlight Series: Part 3 – The Electromagnetic Spectrum*. Retrived October 10, 2017, from <http://sustainablebalance.ca/electromagnetic-spectrum/>
- Beane, S. (2014). *Body Worlds – The Art of Preservation*. Retrived October 20, 2017, from <https://newbiescience.wordpress.com/2014/09/26/body-worlds-the-art-of-preservation/>
- Chaitavon, K., Sumriddetchkajorn, S. & Nukeaw, J. (2013). Simple microfluidic chip structure for an alignment-free Young interferometry-based refractometer. *RSC Advances*, 3, 23470-23473. doi:10.1039/C3RA44009E
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J. & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71-81. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.159
- Colladon, D. (1842). On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream. *Comptes Rendus* 15, 800-802.
- Demircan, Y., Özgür, E. & Külah H. (2013). Dielectrophoresis: Applications and future outlook in point of care. *Electrophoresis*, 34(7), 1008-1027. doi: 10.1002/elps.201200446
- Erickson, D., Sinton, D. & Psaltis, D. (2011). Optofluidics for energy applications. *Nature Photonics*, 5, 583-590. doi:10.1038/nphoton.2011.209
- Fan, S. K., Lee, H. P., Chien, C. C., Lu, Y. W., Chiu, Y. & Lin, F. Y. (2016). Reconfigurable liquid-core/liquid-cladding optical waveguides with dielectrophoresis-driven virtual microchannels on an electromicrofluidic platform. *Lab on a Chip*, 16(5), 847-854. doi: 10.1039/c5lc01233c
- Flores-Flores, E., Torres-Hurtado, S. A., Páez, R., Ruiz, U., Beltrán-Pérez, G., Neale, S. L. et al. (2015). Trapping and manipulation of microparticles using laser-induced convection currents and photophoresis. *Biomedical Optics Express*, 6(10), 4079-4087. doi: 10.1364/BOE.6.004079
- Hansell, C. W. (1950). Jet sprayer actuated by supersonic waves. Patent US2512743. Retrived September 14, 2017, from <https://www.google.com/patents/US2512743>

- Horváth, T. (2017). *A set of ink for refilling inkjet printers*. Retrived October 20, 2017, from <https://www.dreamstime.com/stock-photos-set-ink-refilling-inkjet-printers-image26537493>
- Karasawa, N. (2012). Dispersion properties of liquid-core photonic crystal fibers. *Applied Optics*, 51(21), 5259-5265. <https://doi.org/10.1364/AO.51.005259>
- Katifori, E. (2017). *Architecture of vascular networks*. Retrived October 10, 2017, from <http://www.pbo.ds.mpg.de/Research.html>
- Kayani, A. A., Khoshmanesh, K., Ward, S. A., Mitchell, A. & Kalantar-zadeh, K. (2012). Optofluidics incorporating actively controlled micro and nano-particles. *Biomicrofluidics*, 6(3), 031501-1-031501-32. <https://doi.org/10.1063/1.4736796>
- Lee, K. S., Yoon, S. Y., Lee, K. H., Kim, S. B., Sung, H. J. & Kim, S. S. (2012). Optofluidic particle manipulation in a liquid-core/liquid-cladding waveguide. *Optics Express*, 20(16), 17348-17358. <https://doi.org/10.1364/OE.20.017348>
- Lim, J. M., Urbanski, J. P., Thorsen, T. & Yang, S.-M. (2011) Pneumatic control of a liquid-core/liquid-cladding waveguide as the basis for an optofluidic switch. *Applied Physics Letters*, 98, 044101-1-044101-3. <https://doi.org/10.1063/1.3535979>
- Liu, P., Huang, H., Cao, T., Tang, Z., Liu, X., Qi, Z., Ren, M. & Wu, H. (2012). An optofluidics biosensor consisted of high-finesse Fabry-Pérot resonator and micro-fluidic channel. *Applied Physics Letters*, 100, 233705-1-233705-4. <https://doi.org/10.1063/1.4726188>
- Miccio, L., Memmolo, P., Merola, F., Netti, P. A. & Ferraro, P. (2015). Red blood cell as an adaptive optofluidic microlens. *Nature Communications*, 6, Article ID 6502, 7 pp. doi: 10.1038/ncomms7502
- Negr, F. & Cavallini, A. (2017). Effect of dielectrophoretic forces on nanoparticles. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(3), 1708-1717. doi: 10.1109/TDEI.2017.006347
- Neupane, K., Manuel, A. P. & Woodside, M. T. (2016). Protein folding trajectories can be described quantitatively by one-dimensional diffusion over measured energy landscapes. *Nature Physics*, 12, 700-703. doi: 10.1038/nphys3677
- Nouchi, P., Sillard, P. & Molin, D. (2012). Optical fibres. In H. Venghaus & N. Grote (Eds.), *Fibre Optic Communication* (2nd ed.) pp. 55-97. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pang, L., Chen, H. M., Freeman, L. M. & Fainman, Y. (2012). Optofluidic devices and applications in photonics, sensing and imaging. *Lab on a Chip*, 12(19), 3543-3551. doi: 10.1039/c2lc40467b

- Park, J., Kang, D.-E., Paulson, B, Nazari, T. & Oh, K. (2014). Liquid core photonic crystal fiber with low-refractive-index liquids for optofluidic applications. *Optics Express*, 22(14), 17320-17330. <https://doi.org/10.1364/OE.22.017320>
- Psaltis, D., Andreas, E. V. & Jae, W. C. (2016). Optofluidics of plants. *APL Photonics* 1, 1(2), 020901-1-020901-11. <https://doi.org/10.1063/1.4947228>
- Psaltis, D., Quake, S. R & Yang, C. (2006). Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics. *Nature*, 442(7101), 381-386. doi: 10.1038/nature05060
- Ronellenfitch, H. & Katifori, E. (2016). Global optimization, local adaptation and the role of growth in distribution networks. *Physics Review Letters*, 117(13), 138301-1-138301-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.138301>
- Shin, Y., Yoo, M., Kim, H.-S., Nam, S.-K., Kim, H.-I., Lee, S.-K. et al. (2016). Characterization of fiber-optic light delivery and light-induced temperature changes in a rodent brain for precise optogenetic neuromodulation. *Biomedical Optics Express*, 7(11), 4450-4471. doi: 10.1364/boe.7.004450
- Söderbergh, I. (2016). Cells work tightly together to form the water-conducting vascular tissue of plants. Retrived October 10, 2017, from <https://phys.org/news/2016-02-cells-tightly-water-conducting-vascular-tissue.html>
- Soltani, M., Inman, J. T., Lipson, M. & Wang, M. D. (2012). Electro-optofluidics: achieving dynamic control on-chip. *Optics Express*, 20(20), 22314-22326. <https://doi.org/10.1364/OE.20.022314>
- Song, J., Lin, J., Tang, J., Liao, Y., Hea, F., Wang, Z., et al. (2014). Fabrication of an integrated high-quality-factor (high-Q) optofluidic sensor by femtosecond laser micromachining. *Optics Express*, 22(12), 14792-14802. doi: 10.1364/OE.22.014792
- Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K. & Nukeaw, J. (2012). A free-space interferometric refractometer structure with simple microfluidic chips. *IEEE Sensors Journal*, 12(2), 404-409. doi: 10.1109/JSEN.2011.2159969
- Suwanpayak, N., Jalil, M. A., Teeka, C., Ali, J. & Yupapin, P. P. (2011). Optical vortices generated by a PANDA ring resonator for drug trapping and delivery applications. *Biomedical Optics Express*, 2(1), 159-168. <https://doi.org/10.1364/BOE.2.000159>
- Testa, G., Persichetti, G., Zeni, L., Sarro, P. M. & Bernini, R. (2013). *Optofluidics: a new tool for sensing*. pp. 879402-1-879402-6. In The Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors (Proceedings of SPIE vol. 8794), 19-22 May 2013, Krakow, Poland. doi: 10.1117/12.2026027

- White, I. M., Oveys, H. & Fan, X. (2006). Liquid-core optical ring-resonator sensors. *Optics Letters*, 31(9), 1369-1371. <https://doi.org/10.1364/OL.31.001319>
- Wolfe, D. B., Conroy, R. S., Garstecki, P., Mayers, B. T., Fischbach, M. A., Paul, K. E. et al. (2004). Dynamic control of liquid-core/liquid-cladding optical waveguides. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(34), 12434-12438.
- Zhu, H., Mavandadi, S., Coskun, A. F., Yaglidere, O. & Ozcan, A. (2011). Optofluidic fluorescent imaging cytometry on a cell phone. *Analytical Chemistry*, 83(17), 6641-6647. doi: 10.1021/ac201587a