

## หลักการและเทคนิคการสร้างภาพโดยระบบชลีเรน

อนัญญา เสน่หา, สรศักดิ์ ด้านวรพงศ์ และพรรณศิริ คำโอ

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการสร้างภาพถ่ายชลีเรน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบทั่วไป แบบสร้างภาพเงา และแบบแทรกสอด โดยแต่ละระบบมีความแตกต่างกันในแง่ของประเภท จำนวน และการจัดอุปกรณ์เชิงแสง การเกิดภาพชลีเรนสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแสงเชิงเรขาคณิตที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของรังสีของแสงในตัวกลางหรือวัตถุทดสอบที่ค่าความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหในแนวใด ๆ ภาพชลีเรนที่บันทึกได้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ในด้านการศึกษการเรียนรู้เกี่ยวกับการสร้างภาพชลีเรนทำให้ผู้เรียนเกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เชิงแสงมากขึ้น

**คำสำคัญ:** ชลีเรน (Schlieren), เทคนิคการถ่ายภาพพลวัต, เกรเดียนต์ของดัชนีหักเหของแสง

ระบบการถ่ายภาพชลีเรน (Schlieren) มีมาตั้งแต่ต้นคริสต์ศตวรรษที่ 18 ระบบชลีเรนนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพแบบพลวัต (dynamic) เพื่อแสดงภาพกระแสน้ำไหลของอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ภาพชลีเรนที่ได้สามารถนำมาแปลความหมายเชิงคุณภาพได้อย่างตรงไปตรงมาตามรูปที่ปรากฏ โดยไม่ถูกบิดเบือนไปจากลักษณะเดิมของวัตถุทดสอบ และหลังการถ่ายภาพวัตถุทดสอบนั้นจะยังอยู่ในสภาพเดิมไม่ถูกทำลาย วิธีการถ่ายภาพเช่นนี้มักใช้กับวัตถุทดสอบที่มีลักษณะโปร่งใส หรือเป็นตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านได้ มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากระบบชลีเรนมีคุณสมบัติที่สำคัญคือความไวต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะความหนาแน่นของตัวกลางและไม่รบกวนการไหลของของไหล จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของแสงภายในตัวกลางได้อีกด้วย ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ระบบการถ่ายภาพชลีเรน ได้แก่ การศึกษาการรบกวนของแก๊วหลังจากการขึ้นรูป (การเป่าแก้ว) การไหลเวียนอากาศขณะหายใจเข้าหรือออกของคนและสัตว์ คลื่นกระแทกที่เกิดจากเครื่องบินความเร็วเหนือเสียง และความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

## ความเป็นมาของระบบถ่ายภาพชลีเรน

คำว่า “Schlieren” อ่านว่าชลีเรน มาจากภาษาเยอรมันที่เขียนว่า “schliere” หรือ “striae” หมายถึงลักษณะที่ปรากฏเป็นเส้นคล้ายกับการไหลของของไหล ในยุคแรก ระบบชลีเรนถูกใช้ในการศึกษาส่วนประกอบทางแสงของกล้องโทรทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์ ต่อมาระบบนี้ได้รับการประยุกต์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือศึกษาพลศาสตร์ของไหล ถึงแม้ระบบชลีเรนจะถูกนำมาใช้และอ้างอิงถึงเป็นอย่างมาก ในศตวรรษที่ 19 แต่เมื่อสืบค้นจากหลักฐาน พบว่าระบบนี้ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรกตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 17 โดย Robert Hooke เขาค้นพบเทคนิคการถ่ายภาพชลีเรน และได้เผยแพร่ในหนังสือชื่อ “Micrographia” ต่อมา Christian Huygens ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพชลีเรน จนกระทั่งสามารถมองเห็นภาพของเส้นเลือดดำได้

ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 Leon Foucault ได้พัฒนาการทดสอบแบบขอบมีด (knife-edge test) สำหรับกระจกกล้องโทรทรรศน์ที่สามารถมองเห็นภาพการไหลของอากาศได้ โดยที่ลืออันไม่เคยทราบเลยว่า เทคนิคที่เขาพัฒนาขึ้นนั้น เป็นเรื่องแปลกใหม่และน่าตื่นตาตื่นใจสำหรับคนอื่น ๆ หลังจากนั้น August Toepler ได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพด้วยเทคนิคชลีเรน เขาได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบชลีเรนอย่างง่าย ทำให้ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าเป็นบุคคลแรกที่นำเสนอเทคนิคการถ่ายภาพแบบชลีเรน ถัดมาในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 Hubert Schardin ได้วิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการถ่ายภาพชลีเรนและพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ เพิ่มเติม

ในปัจจุบันพบว่า นักฟิสิกส์และวิศวกรด้านพลศาสตร์ของไหลได้นำเทคนิคที่ August Toepler และ Hubert Schardin พัฒนาขึ้นไปใช้ศึกษาลักษณะกระแทกที่เกิดจากเครื่องบิน การผสมกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ รวมทั้งยังได้นำฟิลเตอร์แบบสีมาช่วยในการถ่ายภาพชลีเรนอีกด้วย

## ทฤษฎีแสงและการมองเห็นที่ทำให้สามารถสร้างภาพชลีเรนได้

การเกิดภาพชลีเรนเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ที่กล่าวไว้ว่า แสงจะเคลื่อนที่ช้าลงเมื่อมีปฏิสัมพันธ์กับสสาร หากตัวกลางนั้นมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันอย่างเช่นสุญญากาศหรืออวกาศ แสงจะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอด้วยอัตราเร็วคงที่ แต่เมื่อเผชิญหน้ากับตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างเช่น แสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่เป็นของเหลวผ่านเข้าไปในอากาศ แสงจะหักเหไปจากเส้นทางเดิม ส่งผลให้เกิดภาพชลีเรนได้

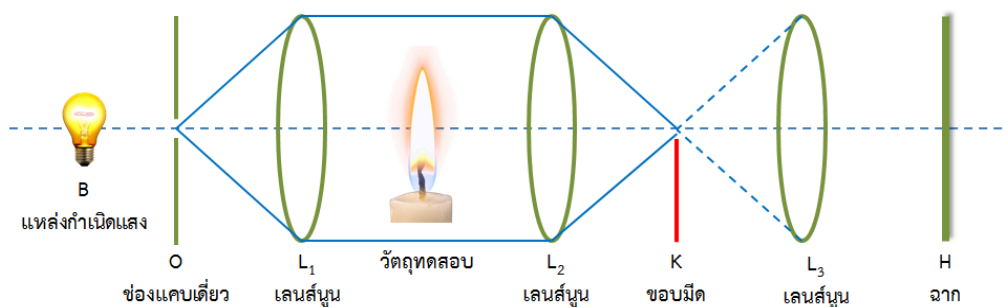
ในบทความนี้จะนำเสนอการจัดระบบเพื่อสร้างภาพชลีเรน 3 รูปแบบ ได้แก่

1) **แบบทั่วไป** เป็นการจัดระบบโดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ จำพวกเลนส์นูน ช่องแคบเดี่ยว ขอบมีด กระจกราบ กระจกโค้ง เป็นต้น โดยผู้ทดลองสามารถเลือกใช้และจัดอุปกรณ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น บางการทดลองใช้เพียงเลนส์นูนและกระจก แต่บางการทดลองอาจใช้เพียงแคเลนส์นูน ช่องแคบเดี่ยว และขอบมีด เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการศึกษา

2) **แบบสร้างภาพเงา** เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุด ระบบอาจมีเพียงแค่แหล่งกำเนิดแสง วัตถุทดสอบ และฉากรับภาพเท่านั้น

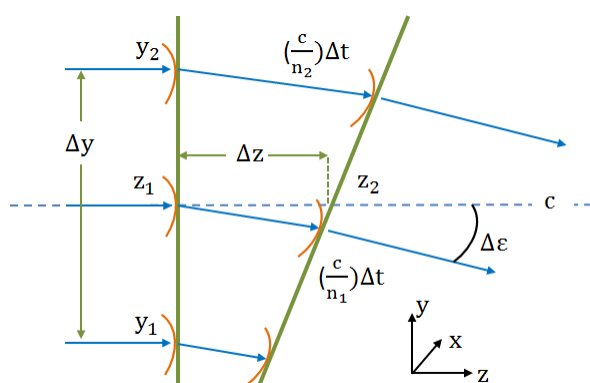
3) **แบบแทรกสอด** การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพรูปแบบนี้มีความคล้ายคลึงกับแบบทั่วไป แต่มีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากผู้ทดลองจะต้องแบ่งแสงเป็น 2 ขบวน และให้แต่ละขบวนเดินทางผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อมาแทรกสอดกัน ภาพที่ได้จากการจัดระบบแบบแทรกสอดเป็นภาพที่มีประสิทธิภาพสูงในแง่ของการให้ข้อมูลเชิงคุณภาพ

ในส่วนต่อไป เป็นตัวอย่างการจัดระบบการถ่ายภาพลิเรนทั้ง 3 รูปแบบ เริ่มจากการจัดระบบถ่ายภาพลิเรนแบบทั่วไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพลิเรนแบบทั่วไป

ระบบที่จัดขึ้นเพื่อการถ่ายภาพลิเรนในรูปที่ 1 เป็นการจัดวางเลนส์นูน 3 อัน ให้อยู่ในแนวเส้นตรง<sup>1</sup> เมื่อพิจารณาเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสง B แสงจะเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบเดี่ยว (single slit) O ซึ่งวางห่างออกไปเท่ากับระยะโฟกัสของเลนส์นูน  $L_1$  ส่งผลให้แสงเดินทางผ่านเลนส์ดังกล่าวเป็นแสงขนาน ซึ่งลำแสงขนานนี้จะเบนผ่านวัตถุที่ต้องการใช้ทดสอบ (เช่น ควันทันจากเปลวเทียน อากาศหรือแก๊สขณะมีคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน เป็นต้น) จากนั้นแสงจะผ่านเลนส์นูน  $L_2$  ไปตัดผ่านขอบมืด K ที่วางห่างจากเลนส์นูน  $L_2$  และ  $L_3$  เท่ากับระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง จะเกิดภาพลิเรนปรากฏบนฉาก H สำหรับการเบนของรังสีของแสงผ่านวัตถุทดสอบ สามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมแสดงการเบี่ยงเบนของรังสีของแสง เมื่อค่าเกรเดียนต์ (การเปลี่ยนแปลง) ของดัชนีหักเหแสงมีค่าเท่ากับ  $\frac{dn}{dy}$  โดยเลข 1 และ 2 ที่เป็นตัวห้อยแสดงดัชนีหักเหที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

<sup>1</sup> จำนวนเลนส์นูนที่ใช้ในการศึกษาอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของงาน

จากรูปที่ 2 สมมติให้เกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสงในแนวตั้งหรือแกน  $y$  มีค่าเป็นลบ  $\frac{\partial n}{\partial y} < 0$  ส่วนในแนวแกน  $x$  และแกน  $z$  นั้นค่าเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสงมีค่าเป็นศูนย์ หน้าคลื่นแสงในช่วงเริ่มต้นอยู่ในแนวตั้ง จากนั้นหน้าคลื่นจะเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่หลังจากเดินทางผ่านวัตถุทดสอบ ถ้าหากหน้าคลื่นของแสงเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ บนแกน  $y$  ในช่วงเวลาสั้น ๆ หน้าคลื่นมีความเร็ว  $\frac{\Delta z}{\Delta t}$  และ หักเหเป็นมุม  $\Delta \epsilon$  จากแนวเดิม โดยที่ดัชนีการหักเหของแสงมีค่าดังสมการที่ 1

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเห,  $c$  คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ และ  $v$  คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ

จะได้ค่ามุม  $\Delta \epsilon$  ดังนี้

$$\Delta \epsilon = \frac{c/n_2 - c/n_1}{\Delta y} \Delta t \quad (2)$$

หากรวมสมการที่ (2) เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของเวลา  $\Delta t = \Delta z \frac{n}{c}$  สามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ตามสมการที่ (3)

$$\Delta \epsilon = \frac{n}{n_1 n_2} \frac{(n_1 - n_2)}{\Delta y} \Delta z \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาให้อนุพันธ์ของสมการที่ (3) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจัดรูป  $\frac{n}{n_1 n_2}$  เป็น  $\frac{1}{n}$  จะได้ว่า

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \quad (4)$$

หากใช้การประมาณค่ามุมเล็ก ๆ  $d\epsilon$  เท่ากับ  $\frac{dy}{dz}$  จะได้

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \quad (5)$$

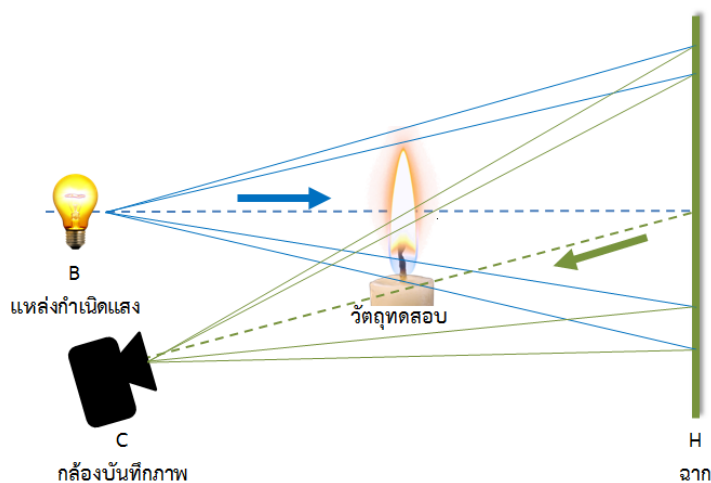
ความสัมพันธ์ในสมการที่ (5) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งของรังสีกับเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหของแสง ภาพคลื่นสามารถสร้างได้จากการรวมหน้าคลื่นที่เบนไปในตัวกลางเชิงแสงที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (optical inhomogeneities)

$$\epsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (6)$$

สมการที่ (5) และ (6) สามารถใช้หาค่าประกอบของเกรเดียนต์ใน 2 มิติ ในทิศทาง  $x$  ได้ด้วยการแทนที่  $y$  ด้วย  $x$  จะพบว่าการเบี่ยงเบนของรังสีไม่ได้เกิดจากดัชนีหักเห  $n$  ของวัตถุ แต่เกิดจากเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสง  $\frac{\partial n}{\partial y}$  นอกจากนี้ สมการดังกล่าว ยังสังเกตได้ว่าการหักเหแสงมีทิศเบนเข้าสู่บริเวณที่มีดัชนีหักเหของแสงสูง

นอกจากการจัดระบบอุปกรณ์ตามรูปที่ 1 จะทำให้ได้ภาพชลีเรนแล้ว การจัดระบบแบบอื่น ๆ ก็ยังทำให้ได้ภาพที่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากดัชนีหักเหแสงของตัวกลางโปร่งใส หรือการศึกษาการถ่ายเทความหนาแน่นของของไหล เช่นเดียวกับคุณสมบัติของภาพชลีเรนเช่นกัน วิธีการดังกล่าวได้แก่ วิธีสร้างภาพเงา (shadowgraphy) และวิธีการแทรกสอด (interferometry) โดยทั้งสองวิธีนี้ได้รับการพัฒนาในช่วงเวลาเดียวกัน

การจัดระบบถ่ายภาพชลีเรนแบบสร้างภาพเงา เป็นเทคนิคเชิงแสงที่ฉายภาพเงาของวัตถุบนระนาบ วิธีนี้ใช้หลักการเดียวกับการมองเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศด้วยตาเปล่าของมนุษย์ เช่น ไอร้อนบนผากระโปรงรถที่มีอุณหภูมิสูง แก๊สร้อนที่กำลังเคลื่อนขึ้นจากเตาข้างบาร์บีคิว เป็นต้น การจัดระบบในการสร้างภาพเงาของวัตถุทดสอบ ทำได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (B) และฉากรับภาพ (H) ทั้งนี้ผู้ทดลองสามารถย่อหรือขยายภาพ ด้วยการปรับเปลี่ยนระยะของฉาก หากต้องการบันทึกภาพ ผู้ทดลองสามารถจัดวางกล้อง (C) ไว้ที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3



(ก)

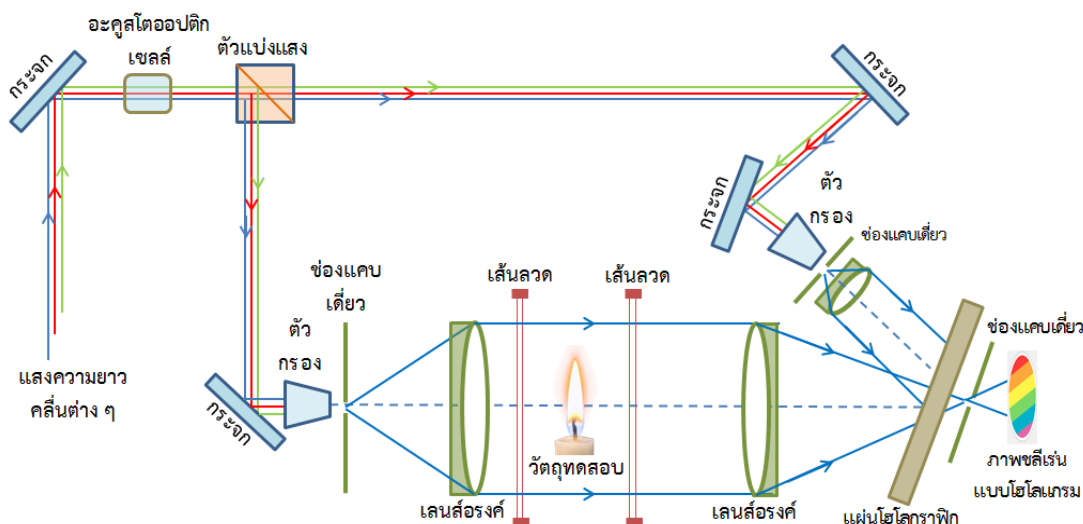


(ข)

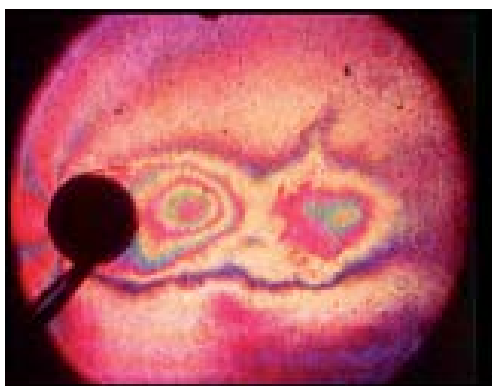
รูปที่ 3 แสดง (ก) ระบบพื้นฐานในการสร้างภาพเงา และ (ข) ภาพเงาที่เกิดจากการทดลอง [1]

การจัดระบบแบบสร้างภาพเงาเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดลองและการบันทึกภาพ ระบบนี้มีความยืดหยุ่นสูงในแง่ของการปรับขนาดภาพและความไวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุทดสอบ มักถูกนำไปใช้ในการสร้างภาพที่เกิดจากคลื่นกระแทก และภาพที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

การจัดระบบถ่ายภาพลิเอนแบบแทรกสอด เป็นเทคนิคการสร้างภาพแบบขลิเอนที่มีประสิทธิภาพในแง่ของการให้ข้อมูลที่ต้องการวัด ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นหรือการถ่ายเทความร้อนของวัตถุทดสอบ การจัดระบบเช่นนี้ทำได้โดยใช้เลนส์ 2 อัน คล้ายกับระบบขลิเอนแบบทั่วไป แต่เพิ่มปริซึมหรือลวดเส้นเล็ก ๆ ที่จะมาทำหน้าที่เป็นขอบมืด เพื่อให้แสงตัดผ่านแล้วเกิดการเลี้ยวเบนหรือแทรกสอด เกิดรูปเป็นภาพขลิเอนที่สามารถนำไปวิเคราะห์หสิ่งต้องการศึกษาได้



(ก)



(ข)

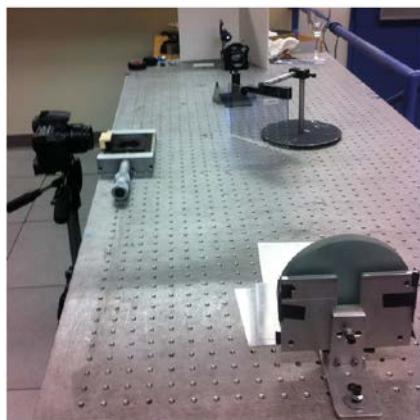
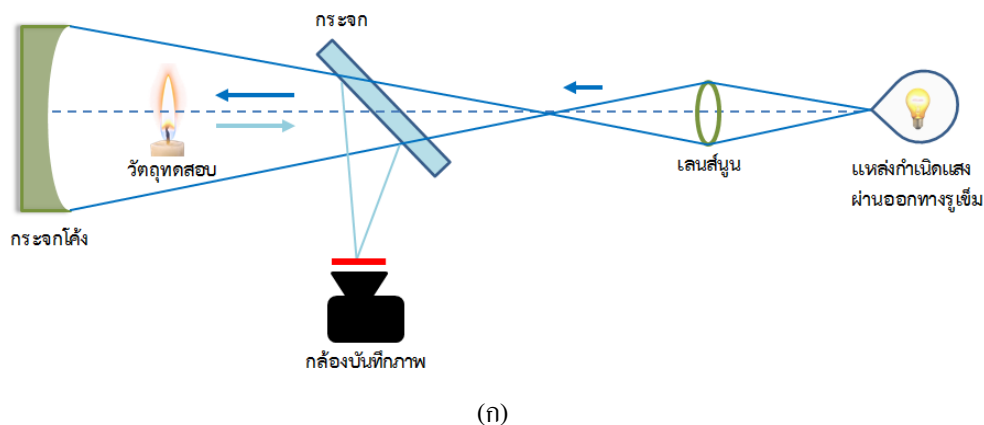
รูปที่ 4 ตัวอย่าง (ก) การจัดระบบการสร้างภาพขลิเอนแบบโฮโลแกรม (hologram) ด้วยการแทรกสอด และ (ข) ภาพที่ได้จากการแทรกสอด [2]

ระบบการสร้างภาพขลิเอนแบบโฮโลแกรมในรูปที่ 4 มีความซับซ้อนกว่าระบบอื่น ๆ เริ่มจากการใช้แสงจากแหล่งกำเนิด 3 แหล่งที่มีความยาวคลื่น (สี) ที่แตกต่างกัน ผ่านอะคูสโตออปติกเซลล์ (acousto optic cell) ซึ่งเป็นตัวควบคุมความถี่ของแสง ให้ผ่านตัวแบ่งแสง (beam splitter) ทำให้ลำแสงส่วนหนึ่งผ่านไปสะท้อนกระจกไปยังตัวกรองเชิงพื้นที่ (spatial filter) ที่ใช้หลักการแปลงแบบฟูริเยร์ (Fourier transform) มาช่วยในการปรับปรุงข้อมูลแสง (ภาพ) ให้มีความคมชัดมากขึ้น จากนั้นแสงดังกล่าวก็จะไปตกบนแผ่นโฮโลกราฟี (holographic plate) ลำแสงอีกส่วนก็ต้องผ่านตัวกรองเชิงพื้นที่อีกชุด แล้วผ่านไปยังวัตถุทดสอบ ที่อยู่ระหว่างชุดเลนส์ออร์ค (achromatic

lens) และเส้นลวด ก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปแทรกสอดกับลำแสงส่วนแรกบนแผ่นโฮโลกราฟิก แสงจากการแทรกสอดเบนผ่านช่องแคบเดี่ยว เกิดเป็นภาพขลิเร้นที่เป็นแบบโฮโลแกรม โดยภาพที่ได้ปรากฏเป็นสีส้มที่สวยงามกว่าภาพขลิเร้นที่สร้างจากระบบทั่วไปและระบบการสร้างภาพเงา

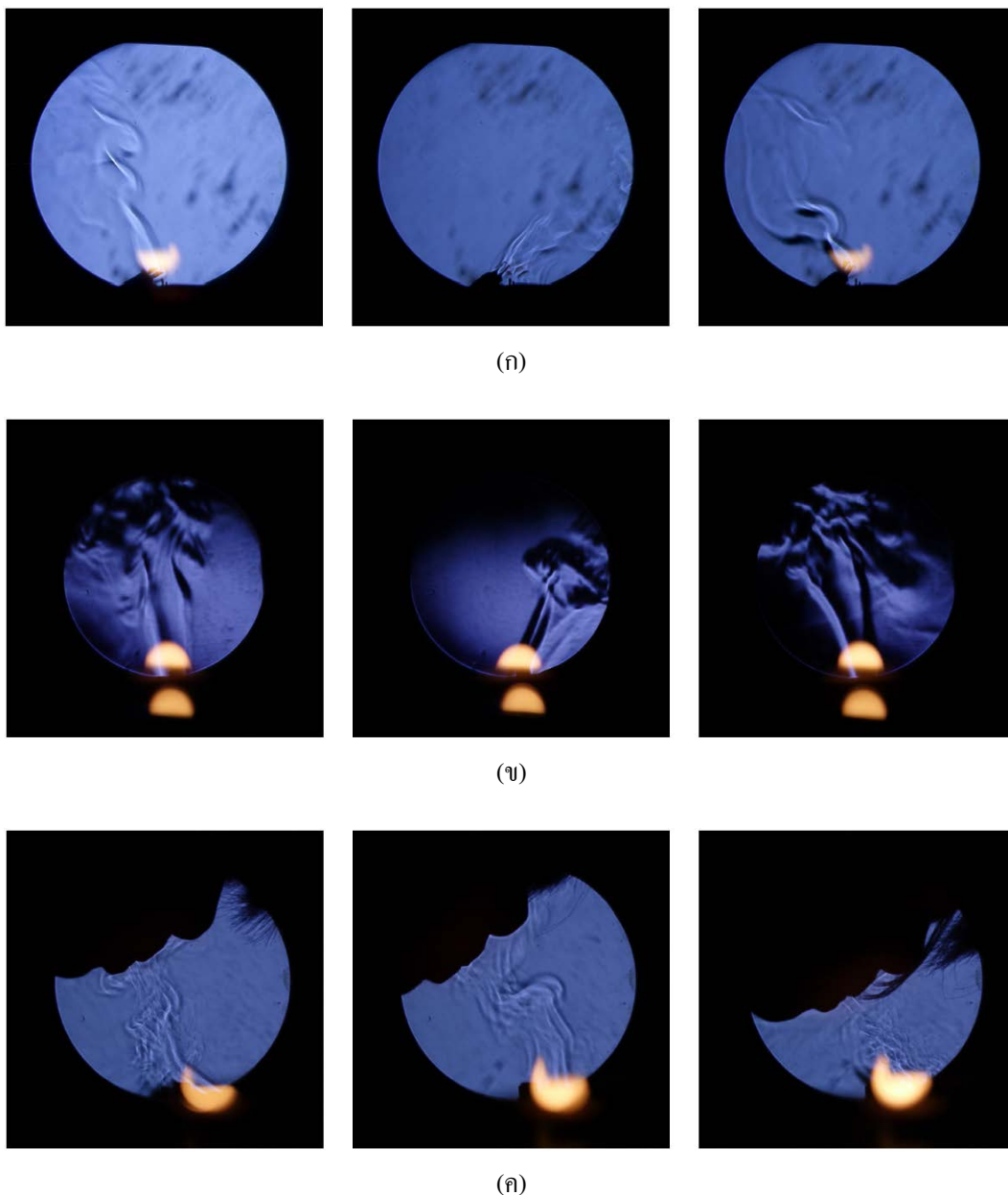
#### ตัวอย่างภาพขลิเร้นและข้อพิจารณาในการสร้างระบบขลิเร้น

บทความวิจัยของ Amrita Mazudar (2013) [1] ได้นำเสนอเทคนิคการสร้างภาพขลิเร้น ด้วยการประยุกต์ตามระบบการถ่ายภาพขลิเร้นแบบทั่วไป โดยใช้กระจกโค้ง กระจกราบ และเลนส์นูน ดังรูปที่ 5 ระบบนี้ประกอบแสงจากหลอดแอลอีดี (LED) ที่เดินทางลอดผ่านรูเข็ม ทำให้ได้แสงที่เป็นจุด จากนั้นแสงดังกล่าวจะหักเหผ่านเลนส์นูน เคลื่อนที่ผ่านกระจกที่เป็นตัวแบ่งแสง ทำให้แสงครึ่งหนึ่งผ่านไปสะท้อนบนกระจกเว้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้วและมีอัตราส่วนของความยาวโฟกัสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 (12 inch f/8 spherical mirror) และอีกครั้งหนึ่งของแสงตกบนกล้องถ่ายภาพ ถึงแม้ว่าแสงครึ่งหนึ่งจะสูญเสียไป แต่แสงที่เหลือก็ยังเพียงพอต่อการเกิดภาพซึ่งสามารถบันทึกได้ด้วยกล้องที่มีอัตราเร็วของชัตเตอร์ (shutter speed) 1/1000 โดยในการทดลองนี้ผู้ศึกษาใช้แผ่นโลหะและแท่งไม้เป็นขาตั้ง



รูปที่ 5 (ก) ไลอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อสร้างภาพขลิเร้น และ (ข) การจัดวางอุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ [1]

การจัดอุปกรณ์ในรูปที่ 5 ผู้ศึกษาจัดวางอุปกรณ์ทั้งหมดบนโต๊ะแสง การจัดวางจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้แสงเกิดการโฟกัสโดยปราศจากการแทรกสอดหรือการบิดเบี้ยว เมื่อจัดเตรียมอุปกรณ์เสร็จสิ้น ถัดไปจะเป็นขั้นตอนการนำวัตถุทดสอบเข้าสู่ระบบ และจัดวางกล้องบันทึกภาพให้มีระยะโฟกัสอยู่ที่วัตถุทดสอบพอดี หน้ากล้องบันทึกภาพตรงระยะโฟกัสของลำแสงหักเหได้ติดตั้งตัวกรองแสง (filter) ไว้เพื่อให้ได้ภาพที่มีพื้นหลังและการกระจายของแสงที่สม่ำเสมอ สำหรับวัตถุทดสอบในการทดลองนี้ ได้แก่ เปลวเทียน และลมหายใจเข้า-ออกของมนุษย์ ผู้ศึกษาได้บันทึกภาพไว้ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพชลีเร้นที่ถูกบันทึกไว้ด้วยกล้อง Canon 50 mm f/1.8 ด้วยความเร็วชัดเตอร์ 1/125 และ ISO 100 (ก) ภาพเปลวเทียนจากการจัดวางขอบมิดแบบปกติ (ข) ภาพเปลวเทียนที่เกิดจากการปรับขอบมิดให้ภาพมีความคมชัดขึ้น และ (ค) ภาพลมหายใจของมนุษย์และเปลวเทียนขณะวางคมมิดที่ปกติ [1]

ระบบการสร้างภาพชลีเร้นมีข้อจำกัดด้านขนาดและค่าใช้จ่าย เนื่องจากขนาดของระบบขึ้นอยู่กับระยะโฟกัสของเลนส์หรือกระจกที่เลือกใช้ นั่นคือหากใช้อุปกรณ์ที่มีความยาวโฟกัสน้อย จะทำให้ขนาดของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดมีความกะทัดรัดลง แต่ขนาดภาพที่ได้ก็จะมีขนาดเล็กลง อาจส่งผลให้ผู้ศึกษามองไม่เห็นรายละเอียดของภาพนั้น ๆ ได้อย่างชัดเจน ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้มีความยาวโฟกัสมาก ขนาดอุปกรณ์ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยข้อจำกัดนี้ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนย้าย ส่วนข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายนั้น ผู้ทดลองอาจต้องรับภาระค่าใช้จ่ายที่สูงอันเกิดจากการเลือกใช้กระจกและเลนส์แบบชัดเจนที่ดี เพื่อลดความผิดเพี้ยนและการบิดเบือนของภาพ

## สรุป

ระบบการสร้างภาพชลีเร้นช่วยให้มนุษย์สามารถมองเห็นภาพที่มองไม่เห็นหรือลักษณะภาพที่สังเกตได้ยาก ทำให้นักวิจัยเข้าใจปรากฏการณ์ในธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น เทคนิคการถ่ายภาพชลีเร้นมีอายุผ่านมามากหลายศตวรรษ ในบางยุคความนิยมอาจซบเซาลงไปบ้างอย่างในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 อันเนื่องมาจากความยากในการจัดวางระบบที่ต้องอาศัยความแม่นยำ ผ่นวกกับค่าใช้จ่ายสูง แต่ในปัจจุบันกลับพบว่าเทคนิคการถ่ายภาพชลีเร้นกลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้ง เพราะอุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ มีราคาถูกลงและถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ภาพถ่ายมีองค์ประกอบของข้อมูลเชิงคุณภาพมากขึ้น มีการนำระบบคอมพิวเตอร์และการสร้างกราฟิกที่ทันสมัยมาใช้ในการสร้างภาพและวิเคราะห์ผล ช่วยนักวิจัยที่สามารถตีความได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Mazumdar, "Principles and techniques of Schlieren imaging systems," Columbia University Computer Science Technical Report, (2013).
- [2] M. J. Hargather and G. S. Settles, "A comparison of three quantitative Schlieren techniques," Optics and Lasers in Engineering, 50(1), 8 (2012).
- [3] J. M. Dese, R. Deron, "Shadow, Schlieren and Color Interferometry," Journal Aerospace Lab, 1, 1 (2009).

# ไพธอน โครงสร้างโมเลกุล และกราฟที่เบียร์

ศุภกร รักใหม่

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

## บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงความสามารถของภาษาไพธอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานสำหรับการค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์ บทความยกตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้เครื่องมือคำนวณทางคณิตศาสตร์ของไพธอนในการวิเคราะห์ข้อมูล และสร้างแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุล และตัวอย่างการใช้เครื่องมือจัดการกราฟิกและอินเตอร์เฟซของไพธอนร่วมกับเครื่องมือสำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์สร้างโปรแกรมสำหรับการเรียนรู้ ออกแบบกราฟที่เบียร์ และจำลองการปฏิกิริยากราฟที่เบียร์

**คำสำคัญ:** ไพธอน, การกระเจิงรังสีเอกซ์, การจำลองโครงสร้างโมเลกุล, กราฟที่เบียร์

ปัจจุบันมีภาษาเขียนโปรแกรมจำนวนมากมาย ไพธอนเป็นหนึ่งในภาษาเขียนโปรแกรมที่ใช้กันมากที่สุดในโลก และอยู่ในอันดับที่หนึ่งของการจัดอันดับภาษาเขียนโปรแกรมของปี 2019 [1] อาจกล่าวได้ว่า ไพธอนเป็นภาษายอดนิยมของโลกยุคใหม่ ในความเป็นจริงแล้ว ไพธอนไม่ใช่ภาษาใหม่ ภาษาไพธอนนั้นถือกำเนิดขึ้นเมื่อเกือบสามสิบปีมาแล้ว แต่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ไพธอนมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดด พร้อมๆกับที่โลกเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วด้วยเทคโนโลยีป่วนโลกทั้งหลายที่กำเนิดขึ้น แต่การก้าวกระโดดของเทคโนโลยีไม่แข็งแรงอย่างที่ช่วยให้ไพธอนเติบโตอย่างรวดเร็ว แรงขับเคลื่อนที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงของแนวคิดองค์กรรวมของโลก เป็นการเปลี่ยนแปลงที่นำไปสู่ความรู้สึกโหยหาโลกแบบใหม่ โลกที่เห็นแก่ตัวน้อยลง โลกที่การลงแรงก็เพื่อมุ่งหวังโลกที่ดีขึ้น โลกที่ขับเคลื่อนด้วยสปิริตแห่งการแบ่งปัน

## ทำไมต้องไพธอน

ไพธอน เป็นภาษาโปรแกรมระดับสูง ซึ่งหมายความว่า เป็นภาษาที่มีโครงสร้างที่เข้าใจง่าย การฝึกเขียนโปรแกรมด้วยไพธอนจึงทำได้ไม่ยาก และใช้เวลาไม่นาน นอกจากนั้น ไพธอนยังเป็นภาษาเชิงวัตถุ ซึ่งหมายความว่า สามารถจัดโปรแกรมเป็นส่วนๆ เหมือนสร้างกล่องเครื่องมือที่บรรจุเครื่องมือสำหรับงานแต่ละชนิดขึ้นมา แล้วเรียกใช้เครื่องมือต่างๆ จากแต่ละกล่อง ทำให้ตัวโปรแกรมหลักนั้นสั้น เป็นระเบียบ และมีประสิทธิภาพสูง

การเป็นภาษาเชิงวัตถุทำให้ผู้ใช้ไพธอนสามารถใช้เครื่องมือจากกล่องเครื่องมือต่างๆ ทั้งที่สร้างขึ้นเอง และที่ผู้อื่นสร้าง และนั่นเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้ไพธอนเติบโตอย่างรวดเร็ว กลายเป็นภาษาโปรแกรมอันดับหนึ่งของโลก และนั่นก็เนื่องมาจากกล่องเครื่องมือ

จำนวนมหาศาลที่ถูกสร้างขึ้นและแบ่งปันกันใช้โดยผู้ใช้ไพธอนทั่วโลกผ่านทาง ระบบ “ดัชนีบรรจุภัณฑ์ไพธอน” จึงอาจกล่าวได้ว่า ไพธอน เป็นภาษาที่กำเนิด ดำรงอยู่ และเติบโต บนสปิริตแห่งการแบ่งปัน

### ระบบ “ดัชนีบรรจุภัณฑ์ไพธอน” (Python Package Index หรือ PyPI)

บรรจุภัณฑ์ หรือ แพคเกจ (package) ของไพธอนนั้น เป็นโปรแกรมย่อย ที่เขียนขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับทำงานด้านต่างๆ เช่น แพคเกจชื่อ นัมไพ (numpy) เป็นแพคเกจที่บรรจุเครื่องมือจัดการตัวเลข หรือ แมทพลอตลิบ (matplotlib) เป็นแพคเกจบรรจุเครื่องมือเขียนกราฟแบบต่างๆ PyPI หรือ ไพพาย นี้ จึงเป็นเหมือน โกดังเก็บกล่องเครื่องมือ

ความพิเศษของโกดังไพพายนี้ คือ ใครๆ ก็ส่งกล่องเครื่องมือเข้าไปเก็บไว้ได้ และใครๆ ก็สามารถรับกล่องเครื่องมือออกมาใช้ได้ เช่น กลุ่มนักดาราศาสตร์ที่ใช้ไพธอนจนชำนาญ เขียนโปรแกรมคำนวณต่างๆ ว่างๆ จากการนั่งดูดาว ก็เปลี่ยนมานั่งจับเครื่องดัด รวบรวม เครื่องมือการคำนวณทางดาราศาสตร์ที่ตัวเองเขียนไว้ รวมเป็นแพคเกจชื่อ แอสโตรไพ (astropy) ส่งเข้าไปเก็บในโกดังไพพาย นักศึกษาที่กำลังทำวิทยานิพนธ์ทางดาราศาสตร์อยู่อีกมุมโลก ก็สามารถเข้าไปนำกล่องเครื่องมือแอสโตรไพ ออกมา และใช้เครื่องมือคำนวณต่างๆ เกี่ยวกับดวงดาวได้

ปัจจุบัน โกดังไพพาย มีกล่องเครื่องมือสำหรับใช้งานด้านต่างๆ เก็บอยู่ประมาณหนึ่งแสนสองหมื่นกล่อง เครื่องมือทั้งหมดนั้น เขียนขึ้นโดยผู้ใช้ไพธอนจากทุกซอกมุมของโลก และทั้งหมดนั้น ไม่ว่าใคร อยู่มุมไหนของโลก ในประเทศหนาวเย็น ประเทศเขตร้อน ประเทศร่ำรวย ประเทศยากจน หรือแม้แต่ประเทศกึ่งประชาธิปไตยแถวเอเชีย ก็นำออกมาใช้ได้ ...ฟรี ไพธอนจึงเป็นภาษาแห่งการแบ่งปัน เป็นสปิริตของโลกสมัยใหม่ หาก อับราฮัม ลินคอล์น ทราบเรื่องไพธอน ท่านก็อาจจะอุทานว่า

“นั่นแหละ สิ่งที่ข้าพเจ้าพูดถึง... That’s the language of the people... by the people... for the people”

### ไพธอนกับการคำนวณทางวิทยาศาสตร์

ไพธอนมีกล่องเครื่องมือ หรือแพคเกจที่ใช้ในงานทางวิทยาศาสตร์อยู่หลายแพคเกจ เช่น แพคเกจที่ใช้ในการจัดการกราฟ ชื่อแมทพลอตลิบ (matplotlib) แพคเกจสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติชื่อแพนดา (panda) แพคเกจสำหรับการสร้าง GUI (Graphical User Interface) ชื่อทีเคอินเตอร์ (tkinter) และแพคเกจสำคัญที่บรรจุเครื่องมือคำนวณทางคณิตศาสตร์ คือช่ายไพ (scipy)

scipy มีเครื่องมือคำนวณทางคณิตศาสตร์ต่างๆ มากมายที่มีประโยชน์กับงานทางฟิสิกส์ เช่น การอินทิเกรต หรือแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และที่สำคัญ scipy บรรจุเครื่องมือสำหรับการทำ optimization ที่ทรงประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล และทำแบบจำลองต่างๆ

### การจำลองโครงสร้างโมเลกุล จากข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์

การกระเจิงรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุลภายในสสาร เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบวัตถุ อันตรกิริยาระหว่างโฟตอนของรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอนในวัตถุทำให้อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาสู่หัววัดเกิดเป็นรูปแบบต่างๆ ที่เรียกว่าแผนผังการ

กระเจิงรังสีเอกซ์ (scattering pattern) ในทางคณิตศาสตร์นั้น แผนผังการกระเจิงรังสีเอกซ์เป็นการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ของลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนภายในวัตถุ หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า [2]

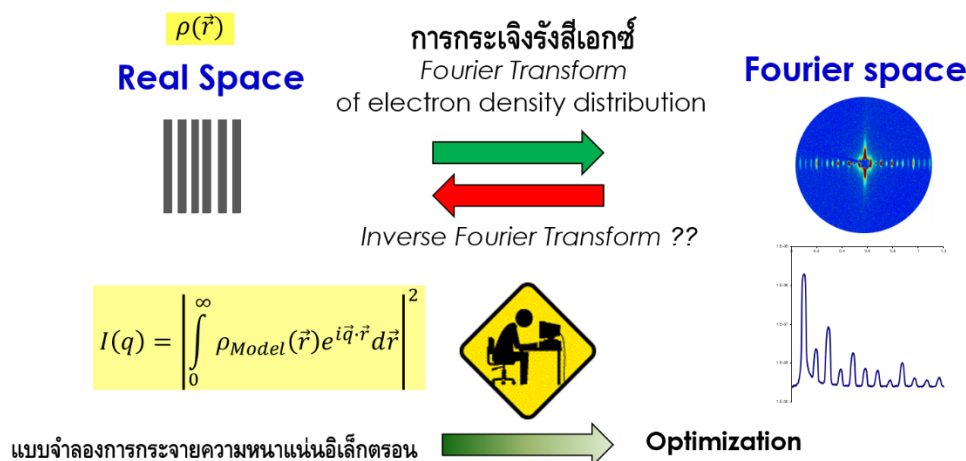
$$I(\vec{q}) = \left| \int_0^\infty \rho(\vec{r}) e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}} d\vec{r} \right|^2 \quad (1)$$

โดย  $I(\vec{q})$  เป็นแผนผังการกระเจิงรังสีเอกซ์ หรือคือความเข้มรังสีเอกซ์ที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดที่มุมต่างๆ  $\rho(\vec{r})$  เป็นลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนภายในวัตถุ  $\vec{q}$  เป็นเวกเตอร์การกระเจิง และ  $\vec{r}$  เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง

ลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็คือรูปร่างของโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบภายในวัตถุนั้นเอง ดังนั้นจึงสามารถหาโครงสร้างโมเลกุลของสารได้โดยการวิเคราะห์แผนผังการกระเจิงรังสีเอกซ์ เพื่อให้ได้ลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอน โดยจากสมการ จะเห็นว่าวิธีที่ตรงไปตรงมาที่สุดคือการทำการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (inversed Fourier transform) ของแผนผังการกระเจิงรังสีเอกซ์ แต่ในการทำเช่นนั้น จำเป็นต้องวัดการกระเจิงรังสีเอกซ์เป็นช่วงกว้างถึงอนันต์ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความจำกัดของขนาดหัววัด

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์ จึงต้องอาศัยการทำแบบจำลองของลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอน และทำ optimization ของแบบจำลองกับข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์ที่วัดได้

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลจึงประกอบด้วยการวัดการกระเจิงรังสีเอกซ์ การหารูปแบบทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง และการทำ optimization ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1



**รูปที่ 1** การวิเคราะห์ข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์เพื่อหาโครงสร้างโมเลกุลในสาร ลูกศรสีแดง และเครื่องหมายคำถามหลัง Inverse Fourier Transform แสดงถึงความยากหรือเป็นไปได้ในทางปฏิบัติในการหาโครงสร้างโมเลกุลโดยการแปลงฟูริเยร์ผกผันของแผนผังการกระเจิง

ในรูปที่ 2 เป็นหน้าต่างโปรแกรมชื่อแซกโซไฟ (SAXSoPy: SAXS on Python) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนด้วยไพธอน อินเตอร์เฟซของโปรแกรมถูกสร้างด้วยแพ็คเกจ tkinter ในรูปแบบของสมุดโน้ตสำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์เพื่อหาโครงสร้างโมเลกุล โดยโปรแกรมอ่านข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์ และให้ผู้ใช้เลือกลักษณะการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบบต่างๆ จากนั้นโปรแกรมใช้เครื่องมือ optimization จากแพ็คเกจ scipy ของไพธอนหาค่าพารามิเตอร์ของการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ให้ค่าต่ำสุดของผลต่างระหว่างการกระเจิงรังสีเอกซ์ที่วัดได้ และการกระเจิงรังสีเอกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง นั่นคือการทำ chi-squared minimization

$$\chi^2 = \sum \left( \frac{I_{data} - I_{model}}{\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

โดย  $I_{data}$  เป็นข้อมูลจากการวัดการกระเจิงรังสีเอกซ์  $I_{model}$  เป็นข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์จากแบบจำลอง และ  $\sigma$  เป็นความคลาดเคลื่อนของผลการวัด นอกจาก scipy และ tkinter แล้ว โปรแกรมแซกโซไฟ ใช้แพ็คเกจ matplotlib สำหรับการแสดงกราฟต่างๆ และใช้ numpy ในการจัดการตัวเลข



รูปที่ 2 หน้าปกโปรแกรมแซกโซไฟสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล

โปรแกรมที่เขียนด้วยไพธอนยังสามารถถูกแปลงเป็น executable เพื่อให้สามารถใช้งานบนระบบปฏิบัติการต่างๆ ได้โดยไม่ต้องมีไพธอน ในกรณีของโปรแกรมแซกโซไฟ ได้ถูกแปลงเป็น executable สำหรับใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows (64bit) สำหรับแจกจ่ายให้ใช้ได้ฟรี (ผู้สนใจสามารถติดต่อผู้เขียนได้ทางอีเมล)

## ไพธอนกับการเรียนรู้ และออกแบบกราฟท์เบียร์

นอกจากการคำนวณแล้ว ไพธอนยังมีเครื่องมือสำหรับการจัดการกราฟฟิค และทำ simulation ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างโปรแกรมสำหรับการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์ ในที่นี้ จะยกตัวอย่างไพธอนสำหรับการเรียนรู้เรื่องกราฟท์เบียร์

เบียร์ เป็นเครื่องดื่มที่อยู่คู่กับมนุษยชาติมาเป็นเวลานาน มีการค้นพบหลักฐานการทำเบียร์อายุกว่า 9000 ปีในประเทศจีน [3] นอกจากนั้น มีการค้นพบแผ่นดินเหนียวจากกรีกอักษรคูนiform ในแถบเมโสโปเตเมียอายุราว 5000 ปี ซึ่งนับเป็น “สลิปเงินเดือน” ชิ้นแรกของโลก แสดงการจ่ายค่าแรงคนงานด้วยเบียร์ [4] เครื่องดื่มเก่าแก่นี้ ได้ถูกพัฒนามาเป็นลำดับ พร้อมๆ กับการเจริญของอารยธรรมโลก เบียร์ในโลกมีอยู่มากมายหลายประเภท ขึ้นกับวัตถุดิบ และเทคนิคที่ใช้ผลิต ปัจจุบันมีการบริโภคเบียร์ทั่วโลกกว่าปีละ 170,000 ล้านลิตร หรือเป็นมูลค่าการตลาดกว่า 10 ล้านล้านบาท [5] ในประเทศไทยเอง ถึงแม้เบียร์ที่มีจำหน่ายในตลาดจะขาดความหลากหลาย เนื่องจากกฎหมายไม่เอื้อให้ประชาชนหรือผู้ผลิตรายย่อยผลิตเบียร์ แต่มูลค่าการตลาดของเบียร์ในประเทศไทยก็ยังมีมูลค่ามหาศาลที่ 131,308 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2561 [6]

ทางเลือกของผู้ที่ต้องการดื่มเบียร์ที่มีความหลากหลาย คือ “กราฟท์เบียร์” หรือเบียร์ปรุงมือ ซึ่งหมายถึงการผลิตเบียร์ปริมาณน้อย และการผลิตที่ง่ายที่สุดคือการปรุงเบียร์ดื่มเองที่บ้าน หรือที่เรียกว่าโฮมบรูว์ ซึ่งตามกฎหมายควบคุมการผลิตสุรา (รวมถึงเบียร์) ฉบับใหม่ของประเทศไทย มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2560 ได้มีการเพิ่มข้อยกเว้น “การประดิษฐ์ค้นคว้าที่มิได้ทำขึ้นเพื่อขาย” ซึ่งหมายความว่าประชาชนสามารถทำเบียร์เพื่อการศึกษาวิจัย หรือเพื่อการบริโภคที่ไม่ใช่เพื่อจำหน่ายได้ [7]

การปรุงเบียร์ประกอบด้วยสามกระบวนการหลัก คือ การแมช (mashing) การต้ม (boiling) และการหมัก (fermenting) ทั้งสามกระบวนการต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์หลายแขนง ศาสตร์ของการปรุงเบียร์จึงเป็นส่วนสำคัญของหลักสูตร Fermentation Science และ Agricultural Science ในมหาวิทยาลัยใหญ่ๆ หลายแห่งของโลก เช่นที่มหาวิทยาลัยแห่งรัฐ โอเรกอน (Oregon State University) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดวิทยาการสำคัญเกี่ยวกับเบียร์ในหลายด้าน รวมถึงการคิดค้นสายพันธุ์ฮอปหลายสายพันธุ์ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุดิบสำคัญของกราฟท์เบียร์

วัตถุดิบหลักสำหรับปรุงเบียร์คือมอลต์ หรือคือข้าวเพาะงอกซึ่งส่วนใหญ่ใช้ข้าวบาร์เลย์ หรือข้าวสาลี เมื่อเพาะงอกแล้ว มอลต์จะถูกอบแห้งด้วยความร้อนระดับต่างๆ กัน การอบแห้งทำให้มอลต์เกิดสี ตั้งแต่เหลืองอ่อน น้ำตาล จนถึงดำ มอลต์ที่ใช้ทำเบียร์จึงจะมีค่าสีที่กำหนดโดยผู้ผลิต ซึ่งสีของเบียร์ที่จะได้ สัมพันธ์กับสีของมอลต์ที่ใช้ โดยในกลุ่มผู้ปรุงเบียร์นิยมประมาณสีเบียร์จากสมการของมอเรย์ (Morey's equation) [8]

$$Color = 1.4922 * MCU^{0.6859} \quad (3)$$

โดย MCU คือ malt color unit ซึ่งเป็นค่าสีรวมของมอลต์ที่ใช้ และค่าสีมีหน่วยเป็น Standard Reference Unit (SRM) ซึ่งนิยามจากการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร [9]

การเมชนั้นเป็นการสกัดน้ำตาลจากแป้งในมอลต์โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์หลักสองตัวซึ่งอยู่ในมอลต์ คือ อัลฟาอะไมเลส (ย่อยแป้งให้น้ำตาลโมเลกุลใหญ่) และเบตาอะไมเลส (ย่อยแป้งให้น้ำตาลมอลโตส) และสามารถกำหนดคุณลักษณะบางด้าน เช่น ความหนาบางของเบียร์ (ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัดส่วนน้ำตาลโมเลกุลใหญ่และน้ำตาลมอลโตสที่ถูกสกัดออกมา) ได้ด้วยการกำหนดอุณหภูมิของการเมชระหว่างอุณหภูมิ 60 – 72 เซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมของการทำงานของเบตาอะไมเลส และอัลฟาอะไมเลส ตามลำดับ นอกจากนี้ ในขั้นนี้ผู้ปรุงเบียร์ต้องคำนวณปริมาณน้ำตาลที่จะได้จากปริมาณแป้งของมอลต์ที่ใช้ ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ได้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณแอลกอฮอล์ในเบียร์

น้ำตาลที่สกัดได้จากมอลต์ เรียกว่าเวิร์ท (wort) หลังจากได้เวิร์ทแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการต้ม ซึ่งนอกจากเป็นการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแล้ว ในกระบวนการนี้ยังมีขั้นตอนสำคัญของกระบวนการปรุงเบียร์ คือการใส่ความขมให้กับเบียร์ ความขมของเบียร์นั้นเกิดจากการใส่ฮอป ซึ่งเป็นดอกของพืชไม้เลื้อยในตระกูลแคนาเบส ในดอกฮอปมีสารสวามไม่ละลายน้ำที่ชื่อฮูมูโลน ซึ่งเมื่อโดนความร้อนจากการต้มจะเกิดการเปลี่ยนรูปทางเคมีผ่านกระบวนการไอโซเมไรเซชัน (isomerization) กลายเป็นสารไอโซฮูมูโลนซึ่งละลายน้ำได้ดี และระดับความขมของเบียร์นั้นกำหนดโดยปริมาณส่วนในล้านส่วน (ppm) ของไอโซฮูมูโลนที่ละลายอยู่ในน้ำเบียร์ โดย 1 IBU (International Bitterness Unit) หมายถึงมีไอโซฮูมูโลน 1 ppm อยู่ในน้ำเบียร์

ระดับความขมของเบียร์คำนวณได้จาก

$$IBU = \frac{W \times A \times U \times 10}{V} \quad (4)$$

โดย W เป็นปริมาณฮอป (กรัม) A เป็นสัดส่วนฮูมูโลนในฮอป (%) V เป็นปริมาตรเบียร์ และ U เป็นอัตราการใช้ฮูมูโลน หรือเรียกว่า utilization ของฮอป

ตัวแปรสำคัญในการคำนวณความขมของเบียร์คือค่า utilization ซึ่งการคำนวณปริมาณดังกล่าวนี้ ยังไม่มีแบบจำลองที่สร้างจากปฏิกิริยาไอโซเมไรเซชันของฮูมูโลนโดยตรง แต่นิยมใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ โดยหนึ่งในแบบจำลองที่นิยมใช้คือ ค่า utilization ที่ขึ้นกับระยะเวลาการต้ม และค่าความถ่วงจำเพาะของเวิร์ท (ซึ่งคือความเข้มข้นน้ำตาล) โดย ค่า utilization ที่เวลาใดๆ ได้จาก [9]

$$U = BF \times BTF \quad (5)$$

โดย BF เรียกว่า Bigness Factor ซึ่งเป็นเทอมที่ขึ้นกับค่าความถ่วงจำเพาะ และ BTF เป็น Boil Time Factor ซึ่งเป็นเทอมที่ขึ้นกับเวลา โดยที่

$$BF = 1.65 * 0.000125^{(OG-1)}$$

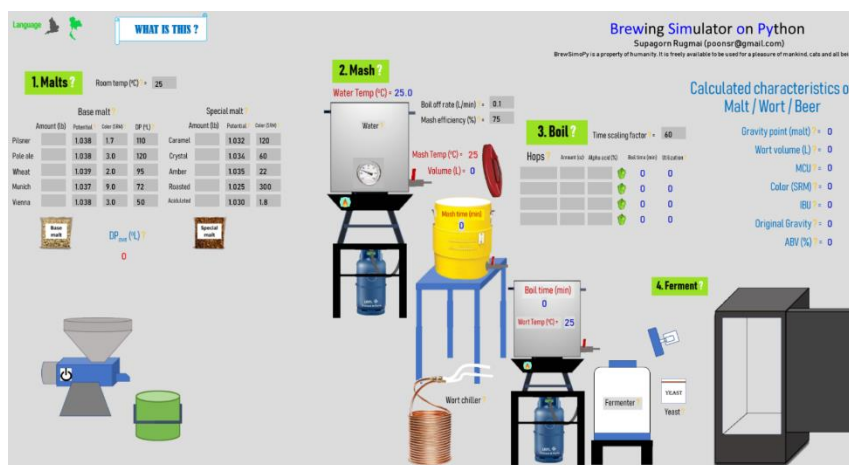
$$BTF = \frac{1 - e^{-0.04t}}{4.15}$$

โดย OG (Original Gravity) เป็นค่าความถ่วงจำเพาะของเวิร์ท และ t เป็นเวลา แต่เนื่องจาก OG ก็เป็นฟังก์ชันของเวลาเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ค่า utilization เฉลี่ยที่เวลาต้ม  $t_{boil}$  (นาที) เป็น

$$U_{ave}(t_{boil}) = \frac{\int_0^{t_{boil}} U(t, OG(t))}{t_{boil}} \quad (6)$$

ในการปรุงเบียร์ ผู้ปรุงต้องวางแผนเป้าหมายคุณลักษณะของเบียร์ที่ต้องการ จากนั้นจึงเลือกวัตถุดิบ และวางแผนขั้นตอนการปรุง ซึ่งการที่จะได้เบียร์ที่มีลักษณะตามที่ต้องการนั้น จำเป็นต้องคำนวณลักษณะต่างๆ ของเบียร์จากวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ ดังนั้นความสามารถในการจำลองการปรุงเบียร์บนคอมพิวเตอร์จึงอาจช่วยให้ได้เบียร์ที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด

ไพธอนมีแพ็คเกจชื่อ pygame ซึ่งบรรจุเครื่องมือสำหรับการจัดการกราฟิก และการอินเตอร์เฟสกับเมาส์ และแป้นพิมพ์ ถึงแม้แพ็คเกจ pygame จะถูกสร้างขึ้นเพื่อการเขียนเกมส์ แต่เครื่องมือภายในสามารถใช้ในการสร้างโปรแกรม เพื่อการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี และเมื่อรวมกับแพ็คเกจ scipy จึงสามารถสร้างโปรแกรมทำ calculation-simulation ที่รวมการเรียนรู้เข้ากับการคำนวณทางวิทยาศาสตร์



รูปที่ 3 ภาพหน้าต่างโปรแกรมบรูสิโมไพ (Brewing Simulator on Python) สำหรับการเรียนรู้และออกแบบกราฟที่เบียร์ โดยผู้ใช้งานสามารถเรียนรู้กระบวนการปรุงเบียร์ โดยมีคำอธิบายวัตถุดิบ และอุปกรณ์ต่างๆ พร้อมทั้งสามารถคำนวณคุณลักษณะเบียร์จากวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ได้

รูปที่ 3 แสดงภาพหน้าต่างโปรแกรมบรูสิโมไพ (Brewing Simulator on Python) ซึ่งเขียนขึ้นด้วยไพธอนโดยใช้ pygame และ scipy สำหรับการเรียนรู้การทำกราฟที่เบียร์แบบโฮมบรูว์ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้วัตถุดิบ และทำการปรุงเบียร์ได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ตามกระบวนการเหมือนจริง แต่ย่นระยะเวลาสั้นลง และบรรจุคำอธิบายของกระบวนการ วัตถุดิบ และอุปกรณ์ต่างๆ โดยสามารถเลือกเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ พร้อมกับคำนวณคุณลักษณะของเบียร์ เช่น สี และความขม ตามสมการที่ 3-6 แบบเรียลไทม์ด้วย โปรแกรมบรูสิโมไพ ยังถูกแปลงเป็น executable ที่สามารถใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows (64bit) ได้โดยไม่ต้องมีไพธอน ผู้สนใจสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมเพื่อนำไปใช้งาน เรียนรู้ หรือใช้สำหรับการเรียนการสอนได้ฟรีทาง [www.facebook.com/purbeer](http://www.facebook.com/purbeer)

## สรุป

ไพธอน เป็นภาษาเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุที่ใช้งานง่าย และมีประสิทธิภาพสูง ทั้งยังมีเครื่องมือที่เหมาะสมกับการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพ็คเกจ scipy ของไพธอนมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและทำแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ ยิ่งไปกว่านั้น ไพธอนยังมีแพ็คเกจ pygame ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเขียนเกมแต่เมื่อรวมกับแพ็คเกจ scipy สามารถใช้พัฒนาโปรแกรมแบบ calculation-simulation สำหรับการเรียนรู้และใช้งานทางวิทยาศาสตร์ได้เป็นอย่างดี ในบทความนี้ได้แสดงตัวอย่างโปรแกรมไพธอนชื่อ SAXSoPy สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการกระเจิงรังสีเอกซ์เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุล และโปรแกรม BrewSimoPy สำหรับการเรียนรู้และออกแบบกราฟที่เบียร์ เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของไพธอน โดยทั้งสองโปรแกรมนั้นแจกจ่ายให้ผู้สนใจได้ใช้ฟรี เพื่อรักษาสปิริตของการแบ่งปันของไพธอน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Spectrum, September 2019
- [2] A. Guinier and G. Fournet, Small-Angle Scattering of X-rays, John Wiley and Sons, 1955, New York.
- [3] P. E. McGovern, J. Zhang, J. Tang, Z. Zhang, G. R. Hall, R. A. Moreau, A. Nuñez, E. D. Butrym, M. P. Richards, C. S. Wang, G. Cheng, Z. Zhao and C. Wang, "Fermented beverages of pre- and proto-historic China", Proceedings of the National Academy of Sciences, 101(51), 17593 (2004).
- [4] A. George, "The world's oldest paycheck was cashed in beer", New Scientist, June 2016
- [5] Beer and Cider Global Industry Guide 2013-2022, Research and Market, March 2019
- [6] สถิติอุตสาหกรรม, สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- [7] พระราชบัญญัติภาษีสรรพสามิต พ.ศ. 2560
- [8] D. Morey, Brewingtechniques, <http://www.morebeer.com/brewingtechniques/beerslaw/morey.html>
- [9] I. Stone and M. C. Miller, "The standardization of methods for the determination of color in beer", American Society of Brewing Chemists Proceedings, 7, 140 (1949).
- [10] G. Tinseth, Hop utilization numbers, <https://realbeer.com/hops/research.html>

## รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ประจำปี พ.ศ. 2561 (ค.ศ. 2018)

## “For ground-breaking inventions in the field of laser physics”

ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ<sup>1</sup> และ สรศักดิ์ ดำนวนรพงศ์<sup>2</sup><sup>1</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี<sup>2</sup>สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

## บทคัดย่อ

ปี พ.ศ. 2561 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลด้านฟิสิกส์แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกมอบให้กับผู้ค้นพบแหนบคิปปิงแสง (optical tweezer) Arthur Ashkin และส่วนที่สองมอบให้กับผู้พัฒนาเทคนิคการเพิ่มกำลังให้กับพัลส์ของแสงเลเซอร์โดยใช้เทคนิค chirped pulse amplification คือ Gerald Mourou และ Donna Stricklands โดยแหนบคิปปิงแสง (optical tweezer) ใช้หลักการความดันรังสี (radiation pressure) ภายใต้กฎอนุรักษ์โมเมนตัม ทำให้เกิดแรงเกรเดียนท์ (gradient force) และแรงกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering force) แรงทั้งสองควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคโปร่งใสที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าสิ่งแวดล้อม ขณะที่เทคนิค chirped pulse amplification ใช้หลักการขยายช่วงเวลาของพัลส์เพื่อลดกำลังของแสง ก่อนที่แสงจะเข้าสู่วัสดุเพิ่มจำนวนโฟตอน กำลังที่ลดลงจะไม่ทำลายวัสดุทำให้สามารถเพิ่มจำนวนโฟตอนได้ตามต้องการ หลังจากแสงผ่านออกมา พัลส์แสงจะเข้าสู่ระบบบีบให้พัลส์มีช่วงเวลาสั้นลง ทำให้กำลังของพัลส์เพิ่มขึ้น ในปัจจุบันถึงระดับเพตะวัตต์ การค้นพบแหนบคิปปิงแสงทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถศึกษาวิจัยวัสดุถึงระดับอะตอม และวัสดุทางชีววิทยาเช่น แบคทีเรีย หรือ DNA โดยไม่ทำลาย การพัฒนาการเพิ่มกำลังพัลส์ของแสงเลเซอร์ทำให้การศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุมีความก้าวหน้า และกำลังที่เพิ่มขึ้นถูกนำมาใช้ในการแพทย์โดยเฉพาะการผ่าตัด การใช้งานอย่างหนึ่งที่รู้จักกันทั่วไป คือ การผ่าตัดปรับเปลี่ยนสายตา หรือ เลสิก เป็นที่ประจักษ์ว่าการค้นพบของ Ashkin, Mourou และ Stricklands มีประโยชน์ต่อนุชนชาติตามวัตถุประสงค์ของรางวัลโนเบล

**คำสำคัญ:** รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์, แหนบคิปปิงแสง, พัลส์เลเซอร์แบบชริป

รางวัลโนเบลทางฟิสิกส์ประจำปี พ.ศ. 2561 ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ผู้ได้รับรางวัลครั้งแรกคือ Arthur Ashkin (ปัจจุบันอายุ 96 ปี) รางวัลอีกครั้งมีผู้ได้รับรางวัลสองท่านคือ Donna Stricklands และ อาจารย์ที่ปรึกษา Gerard Mourou งานวิจัยของสามท่านเกี่ยวข้องกับการใช้งานเลเซอร์ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) โดยท่านแรกเป็นผู้คิดค้น optical tweezers หรือ แหนบคิปปิงแสง อีกสองท่านเป็นผู้ที่คิดค้นวิธีเพิ่มกำลังให้พัลส์ของเลเซอร์ให้เกินขีดจำกัดเดิมโดยไม่ทำลายตัวกลางที่ใช้สำหรับเพิ่มจำนวนโฟตอน

ศาสตราจารย์ Arthur Ashkin นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน จากห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratories) แห่งเมืองบรูคลิน รัฐนิวยอร์ก เป็นผู้ซึ่งได้รับยกย่องให้เป็นบิดาแห่งเลเซอร์ระดับโลก Ashkin เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2465 ปัจจุบันอายุ 97 ปี นับว่าเป็นหนึ่งในบุคคลที่อายุมากที่สุดสำหรับการได้รับรางวัลโนเบลในรอบ 115 ปีที่ผ่านมา Ashkin จบการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์จาก Columbia University ที่รัฐนิวยอร์กในปี พ.ศ. 2490 ศึกษาต่อปริญญาโทและปริญญาเอกด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ที่ Cornell University จบปี พ.ศ. 2495 เขาเข้าทำงานที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ ครั้งแรกที่เมืองมัวเลย์ฮิลล์ นิวเจอร์ซีย์ หลังจากนั้น ย้ายไปที่เมือง ฮอล์มเดล รัฐเดิวกัน โดยได้ทำงานที่นั่นจนเกษียณในปี พ.ศ. 2535 [1] นับตั้งแต่เลเซอร์ลำแรกปรากฏขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2503 เป็นสิ่งที่ดึงดูดให้ Ashkin เข้ามาศึกษาสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆ จนเข้าใจได้ลึกซึ้งว่าแสงที่ส่องไปบนวัตถุสามารถทำให้เกิดความดันได้ แม้จะเป็นความดันในปริมาณน้อยๆ แต่ก็ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กๆ ระดับไมโครเมตรเคลื่อนที่ได้ ในปี พ.ศ. 2513 Ashkin ก็ยังคงมุ่งทดลองด้านเลเซอร์ดังกล่าว จนสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนย้ายอนุภาคโปร่งใสขนาดตั้งแต่ 0.59 ถึง 2.68 ไมโครเมตร และพบว่าการใช้เลเซอร์ที่มีความเข้มแสงเท่ากันสองลำพุ่งเข้าหากัน สามารถดึงให้อนุภาคขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในน้ำเคลื่อนที่เข้าไปที่กึ่งกลางของลำแสงพร้อมกับเคลื่อนที่ไปตามแนวของลำแสง หลังจากนั้น Ashkin และเพื่อนร่วมงานคือ Steven Chu ที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ ได้นำผลการทดลองข้างต้นมาต่อยอดเพื่อใช้ดักจับอะตอมเดี่ยว ส่งผลให้ Steven Chu ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2540 และบิดาแห่งเลเซอร์อย่าง Ashkin ก็ยังคงเดินทางศึกษางานทางด้านเลเซอร์ดังกล่าวอย่างต่อเนื่องจนได้รับรางวัลโนเบลฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2561 เป็นการพลิกวงการเลเซอร์ของโลกที่สามารถเชื่อมโยงทฤษฎีทางฟิสิกส์กับการประยุกต์ทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 Arthur Ashkin, Gérard Mourou และ Donna Stricklands (เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา) [4]

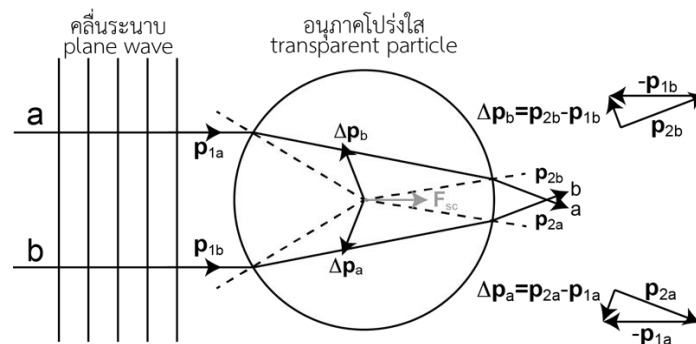
อีกส่วนของรางวัลโนเบลฟิสิกส์ในปีนี้เกิดจากความร่วมมือของ Professor Donna Strickland และอดีตอาจารย์ที่ปรึกษา Professor Gérard Albert Mourou ทั้งสองได้ร่วมมือกันเพื่อมุ่งสู่การทลายขีดจำกัดของการสร้างเลเซอร์ความเข้มสูง การประดิษฐ์เครื่องขยายสัญญาณพัลส์เลเซอร์แบบ chirped-pulse amplification (CPA) แสงพลังงานสูงในระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อใช้ในการผ่าตัด ศาสตราจารย์ Mourou เป็นชาวฝรั่งเศสอายุ 74 ปี เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2487 เมือง Albertville ได้รับปริญญาด้านฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัย Grenoble Alpes ในปี พ.ศ. 2510 หลังจากนั้นเขาได้เรียนต่อที่มหาวิทยาลัย Laval ในควิเบกซิตี และได้รับปริญญาเอกจาก Pierre and Marie Curie University (ปัจจุบันคือมหาวิทยาลัย Sorbonne) ในปารีสปี พ.ศ. 2516 เขาได้ทำวิจัยหลังปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยแห่งแคลิฟอร์เนียที่ซานดิเอโกและใช้เวลาสามปีที่ École Polytechnique ในปารีส จากนั้นเขาได้เป็นอาจารย์ที่ University of Rochester ในปี พ.ศ. 2520 โดยมุ่งงานวิจัยด้าน

เลเซอร์ความเร็วสูง ศาสตราจารย์ Mourou เป็นผู้ก่อตั้งศูนย์ Ultrafast Optical Science ที่ University of Michigan ในปี 2533 เป็นเวลากว่าสามสิบปีที่ Mourou เป็นผู้บุกเบิกด้านเลเซอร์ความเร็วสูงและนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และการแพทย์ เขายังเป็นผู้ริเริ่มโครงการ Extreme Light Infrastructure (ELI) ในยุโรป งานวิจัยของ Mourou ได้รับรางวัลต่างๆ มากมาย ในวงการวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวกับแสงเลเซอร์ [2]

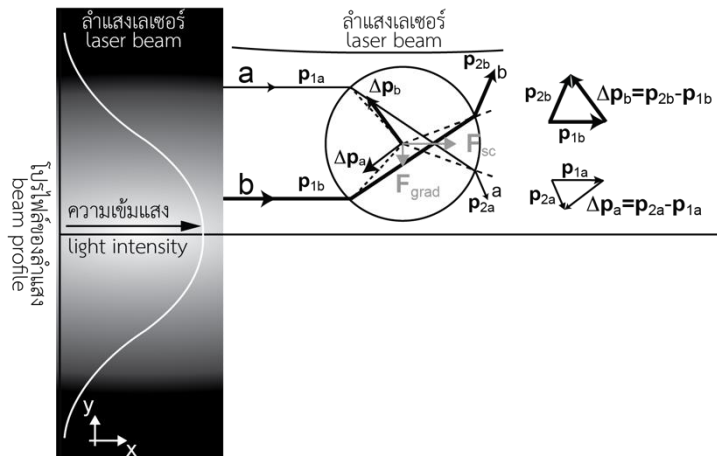
ศาสตราจารย์ Donna Stricklands แห่ง University of Waterloo เป็นนักวิทยาศาสตร์หญิงชาวแคนาดาคนแรกในรอบ 55 ปี ที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ และนับเป็นสตรีคนที่ 3 ในประวัติศาสตร์รอบ 115 ปี ที่ได้รับรางวัลอันทรงเกียรตินี้ ศาสตราจารย์ Stricklands เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2502 ที่เมืองกูเกิลฟ ออนแทรีโอ ประเทศแคนาดา เธอตัดสินใจเข้าเรียนที่ McMaster University เพราะมีหลักสูตรฟิสิกส์วิศวกรรมเลเซอร์ซึ่งเป็นสาขาที่เธอสนใจเป็นพิเศษ ที่ McMaster เธอเป็นหนึ่งในสามสตรีในชั้นเรียนยี่สิบห้าคน Stricklands สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ด้านวิศวกรรมฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2524 Stricklands เรียนจบจากปริญญาเอกจากสถาบันทัศนศาสตร์ University of Rochester ในปี พ.ศ. 2532 เธอทำการวิจัยระดับปริญญาเอกที่ห้องปฏิบัติการ Laser Energetics ภายใต้การดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ศาสตราจารย์ Mourou ในปี พ.ศ. 2531 ถึง พ.ศ. 2534 Stricklands เป็นสมาชิกสภานิติบัญญัติแห่งชาติของแคนาดา และทำงานในแผนกเลเซอร์ของ Lawrence Livermore National Laboratory หลังจากนั้นใน ปี พ.ศ. 2534 ถึง 2535 เธอได้เข้าร่วมกับเจ้าหน้าที่ด้านเทคนิคของศูนย์เทคโนโลยีขั้นสูงของ Photonics และ Opto-electronics ที่มหาวิทยาลัย Stanford และเธอได้เข้าไปทำงานที่ University of Waterloo ในปี พ.ศ. 2540 ในฐานะผู้ช่วยศาสตราจารย์ เธอกลายเป็นอาจารย์สตรีประจำสาขาฟิสิกส์คนแรกที่นี่ ปัจจุบัน Stricklands เป็นศาสตราจารย์ และเป็นผู้นำกลุ่มเลเซอร์ความเร็วสูงที่มุ่งพัฒนาระบบเลเซอร์ความเข้มสูงสำหรับการตรวจสอบเชิงแสงแบบไม่เชิงเส้น เธอให้สัมภาษณ์กับตัวเองว่า เธอคือ "เลเซอร์จ๊อค" (laser jock) [3-5] ศาสตราจารย์ Stricklands เป็นประธานของ The Optical Society และดำรงตำแหน่งประธานคณะกรรมการที่ปรึกษาประธานาธิบดี ในปี 2018 และได้รับการจัดอันดับให้เป็นหนึ่งใน 100 ผู้หญิงของปีบีบีซี

### แหนบคิปลิงแสง (optical tweezers)

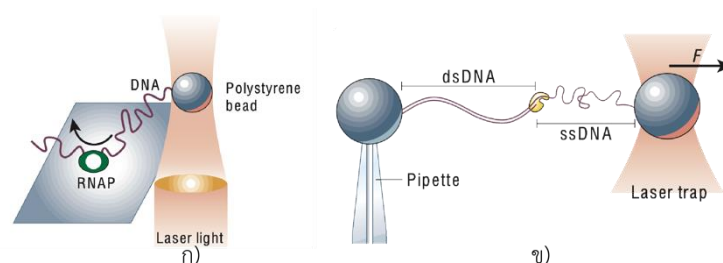
หนึ่งในสมบัติที่สำคัญของแสงคือ แสงมีโมเมนตัม สมบัตินี้จะถูกสังเกตพบครั้งแรกโดย Kepler จากการสังเกตหางของดาวหาง ที่เบนออกไปในทิศตรงข้ามกับดวงอาทิตย์ ทำให้ดูเหมือนว่าดาวหางกำลังพุ่งเข้าหาดวงอาทิตย์ หางของดาวหางนั้นได้รับความดันรังสี (radiation pressure) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ซึ่งแน่นอนทำให้เกิดแรงกระทำขึ้นในทิศตรงข้ามกับแสงที่มาตกกระทบบทำให้หางของดาวหางเบี่ยงไปในทิศตรงข้ามกับรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ แรงที่เกิดจากแสงถูกสาธิตให้เห็นด้วยการทดลอง โดย P.N. Lebedev ในปี พ.ศ. 2444 [5] แต่แรงดังกล่าวไม่มากพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ จนกระทั่งมีการสร้างเลเซอร์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2503 โดย T.H. Maiman [6] เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์สูง (highly coherent) และ เกือบเอกรงค์ (nearly monochromatic) แสงเลเซอร์เป็นลำขนานและควบคุมได้ด้วยทัศนอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาการอนุรักษ์โมเมนตัมของแหนบคิปลิงแสงที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นระนาบและมีความเข้มแสงคงที่ตลอดหน้าคลื่นดังรูปที่ 2 เส้นรังสีที่ตกกระทบบนอนุภาคโปร่งใส (ค่าดัชนีหักเหมากกว่าสิ่งแวดล้อม) มีโมเมนตัมตอนเริ่มต้นของเส้นรังสี a และ b คือ  $p_{1a}$  และ  $p_{1b}$  ตามลำดับ และอนุภาคอยู่นิ่ง ( $p_i=0$ ) โมเมนตัมรวมหลังการตกกระทบบคือ  $p_{2a}$  และ  $p_{2b}$  และโมเมนตัมของอนุภาค เมื่อพิจารณาผลต่างโมเมนตัมของเส้นรังสี  $\Delta p_a$  และ  $\Delta p_b$  จะพบว่าอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปในทิศตรงข้าม หรือเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ โดยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมนี้ เรียกว่า forward scattering force ( $F_{sc}$ )



รูปที่ 2 ลำแสงที่มีความเข้มคงที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบตกกระทบบนอนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าสิ่งแวดล้อม การตกกระทบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม การอนุรักษ์โมเมนตัมทำให้เกิด แรงกระเจิงไปข้างหน้า  $F_{sc}$  (forward scattering force)



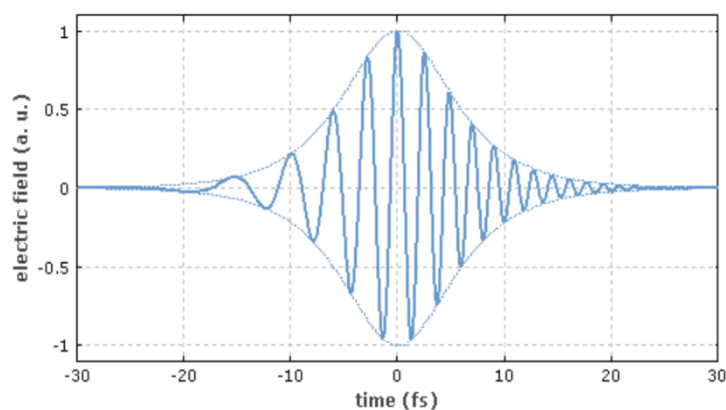
รูปที่ 3 ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแบบเกาส์ มีตกกระทบบนอนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าสิ่งแวดล้อม การตกกระทบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม การอนุรักษ์โมเมนตัมทำให้เกิด แรงกระเจิงไปข้างหน้า  $F_{sc}$  (forward scattering force) ไปในแนวแกน x และ แรงเกรเดียนต์ (gradient force) ไปในแนวแกน -y



รูปที่ 4 ตัวอย่างการใช้แหนบจับแสงทางด้านชีววิทยา ในรูปเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของ DNA และผลกระทบของแรงตึง (tension) ต่อ DNA ในด้านต่างๆ เช่น transcription packaging และ replication เป็นต้น [12-13]

## เลเซอร์ Ultrafast และความเข้มแสงสูง

เลเซอร์ ultrafast ให้แสงเลเซอร์แบบพัลส์ (pulse) ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้กำลังของเลเซอร์มีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าพัลส์ของเลเซอร์จะถูกทำให้ช่วงเวลาสั้นลงไปได้อย่างต่อเนื่องด้วยเทคนิคโหมดล็อก (mode-locking) แต่จำนวนโฟตอนต่อพัลส์ก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามเวลาที่สั้นลงจากเทคนิคโหมดล็อกได้ แสงระดับนาโนจูลสามารถขยายไปถึงระดับมิลลิจูลได้ แต่หากต้องการขยายพลังงานให้มากกว่านี้จะทำให้อุปกรณ์แสงที่เกี่ยวข้องและวัสดุสำหรับเพิ่มจำนวนโฟตอน (amplifying material) เสียหายได้ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ การเพิ่มพลังงานหรือจำนวนโฟตอนให้พัลส์ ดำเนินการโดยขยายขนาดของลำแสง เพื่อเพิ่มพื้นที่รับพลังงาน (ลดความเข้ม) ของอุปกรณ์หรือวัสดุเพิ่มจำนวนโฟตอน แต่กระบวนการนี้ต้องใช้งบประมาณจำนวนมากและห้องปฏิบัติการที่ใช้เทคนิคนี้ มีแต่ห้องปฏิบัติการระดับชาติเท่านั้น และที่สำคัญอัตราการเกิดซ้ำ (repetition rate) ของพัลส์อยู่ที่ระดับ ไม่กี่ครั้งต่อวัน เพื่อให้วัสดุที่ใช้เพิ่มจำนวนโฟตอนได้เย็นตัวลงก่อนที่จะถูกยิงซ้ำ [14]



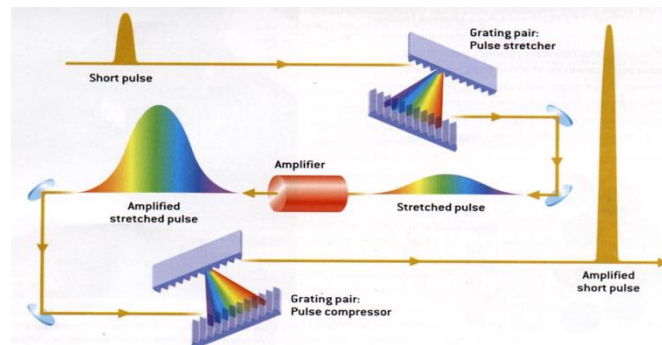
รูปที่ 5 ตัวอย่างของ chirped pulse ในกรณีนี้คือ up chirped ความถี่เพิ่มขึ้นตามเวลา กรณี down chirped ความถี่จะลดลงตามเวลา

(Reproduced from <http://rp-photonics.com/chirp.html>)

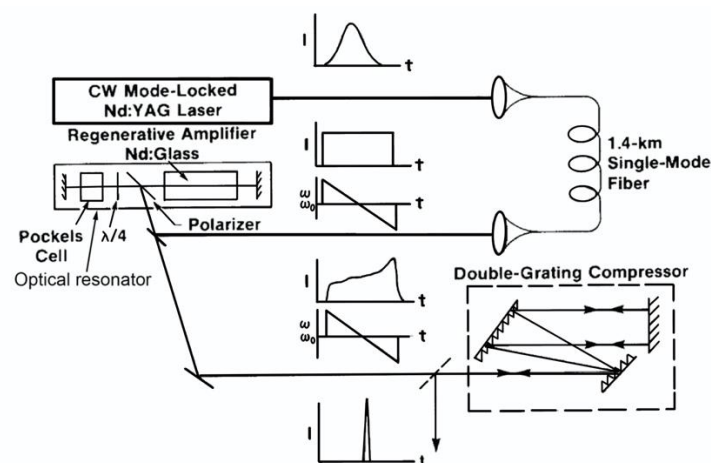
ในปี พ.ศ. 2528 Stricklands และ Mourou ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ chirped pulse amplification หรือ CPA สำหรับพัลส์ของแสง เทคนิคนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากเทคโนโลยีเรดาร์ [14] เทคนิค CPA สามารถสรุปย่อๆ ดังรูปที่ 6 ได้สามขั้นตอน [15-16]

- 1) พัลส์ของเลเซอร์ถูกยืดออกในมิติเวลาเป็นร้อยเท่า พันเท่าหรือมากกว่า เพื่อให้กำลังสูงสุดของแสงลดลง
- 2) พลังงานของพัลส์เลเซอร์ถูกเพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่ใช้เพิ่มจำนวนโฟตอนไม่ถูกทำลาย
- 3) พัลส์ของเลเซอร์ถูกบีบอัดกลับเข้าสู่ช่วงเวลาเดิมทำให้กำลังของแสงเพิ่มขึ้นมหาศาล

ในตอนแรกเริ่มการขยายพัลส์ในมิติของเวลา (temporal stretching) Stricklands และ Mourou ใช้ใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (single mode optical fiber) เพื่อนำแสง พัลส์ของแสงจะเคลื่อนที่ในใยแก้วจะยืดออก (broadening) เนื่องจากปรากฏการณ์ group velocity dispersion หรือ GVD และปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ของวัสดุทำใยแก้ว ทำให้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของแสงเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสง หรือเรียกว่า self-phase modulation ทำให้ส่วนหน้าของพัลส์มีความถี่ต่ำลง ในขณะที่ส่วนตาม หรือ ส่วนหลังของพัลส์มีความถี่สูงขึ้น เป็นไปตามปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ทั้งสองปรากฏการณ์ทำให้พัลส์ของแสงยืดออกในเทอมของ เวลาและเกิดการเลื่อนความถี่ขึ้น [17-18]



รูปที่ 6 กระบวนการ chirped pulse amplification อย่างง่าย (Reproduced from Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan in Ann Arbor)



รูปที่ 7 เส้นทางเดินแสงและทัศนอุปกรณ์ของ chirped pulse amplification จากงานพิมพ์ในวารสาร Optics Communications ของ Mourou และ Stricklands ในเดือนธันวาคมปี 2528 [16]

ในรูปที่ 7 พัลส์ของแสงจากเลเซอร์ Nd:YAG ถูกโฟกัสเข้าสู่ใยแก้วนำแสงที่ยาว 1.4 กิโลเมตร ทำให้เกิดการยืดออกของพัลส์ในเทอมของเวลา (จากปรากฏการณ์ GVD) ดังแสดงในกราฟความเข้ม ( $I$ ) และ เวลา ( $t$ ) และความถี่ที่แยกออกจากกัน (จากปรากฏการณ์เคอร์) ดังแสดงในกราฟระหว่างความถี่ ( $\omega$ ) และเวลา โดยในกราฟนี้ แกนเวลานั้นอยู่ที่ตำแหน่งความถี่ที่มีความเข้มสูงสุดของพัลส์ ( $\omega_0$ ) พัลส์ที่เปลี่ยนไปนี้ เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบเพิ่มจำนวนโฟตอนแบบ regenerative ที่ใช้ Nd:glass เป็นวัสดุเพิ่มจำนวนโฟตอน มี Pockels cell ที่ทำจากผลึก Potassium Dihydrogen Phosphate (KDP) ผลึกนี้มีบทบาทสำคัญในการสร้างพัลส์ของแสง เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ค่าดัชนีหักเหขึ้นกับ

สนามไฟฟ้า (electro-optic) ทำให้โพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านเข้าผลึกเปลี่ยนไป และส่งผ่านออกไปทาง  $\lambda/4$ -waveplate ในกรณีที่ควบคุมให้พัลส์ออกมาไม่ได้ จำนวนโฟตอนสะสมภายใน resonator เพิ่มขึ้น จาก population inversion ใน Nd:glass เมื่อต้องการปล่อยพัลส์ของแสง Pockels cell ก็จะถูกสวิตช์ เพื่อให้พัลส์ผ่าน  $\lambda/4$ -waveplate ออกมาเข้าสู่เกรตติงคู่ เพื่อบีบอัดพัลส์ให้สั้นลง พัลส์ที่ออกมาจะมีความกว้างพัลส์แคบขึ้นและจำนวนโฟตอนมากขึ้น

ในงานของ Mourou และ Stricklands ทั้งสองสามารถเพิ่มกำลังของเลเซอร์ จาก 2.3 วัตต์ เป็น 0.5 เมกกะวัตต์ ความสำเร็จของ Mourou และ Stricklands ทำให้กำลังของพัลส์ของเลเซอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับเพตะวัตต์ ( $10^{15}$  W) เทคนิค CPA ทำให้ระบบพัลส์เลเซอร์กำลังสูงมีขนาดเล็กลง ใช้งานได้ง่ายขึ้น เหมาะกับอุตสาหกรรม และการแพทย์ การใช้งานทางการแพทย์เรารู้จักกันมากที่สุดคงเป็น laser assisted in situ keratomileusis หรือ LASIK ในยุคแรก เลเซอร์ระดับเฟมโตวินาที (femtosecond laser) มาถูกนำมาใช้ผ่าตัดเนื้อเยื่อด้านบนของกระจกตา เพื่อให้ excimer laser (เลเซอร์นี้มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 350 นาโนเมตรในช่วงอัลตราไวโอเล็ต) สามารถเข้าถึงเนื้อกระจกตา และเปลี่ยนรูปกระจกตาได้ เพื่อรักษาอาการสายตาสั้น (myopia) และสายตาเอียง (astigmatism) ในปี พ.ศ.2544 ระบบเลเซอร์เฟมโตวินาที แบบ all-in-one ถูกนำมาใช้ในการทำเลสิก โดยไม่จำเป็นต้องผ่ากระจกตาออก เพียงแค่เปิดกระจกตาด้านน้อยกว่า 4 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงเข้าไปเปลี่ยนรูปกระจกตาให้มีความโค้งน้อยลง ทำให้แสงที่เข้าสู่ตาโฟกัสลงบนเรตินาพอดี [19] นอกจากนี้ด้านการแพทย์แล้ว CPA ยังถูกนำมาใช้ในการวิจัยพื้นฐานในการศึกษาฟิสิกส์ระดับอะตอมโดยใช้สนามความเข้มสูง (strong field) ซึ่งนอกจากจะสูงพอที่จะทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมแล้วยังถ่ายทอดพลังงานให้กับไอเล็กตรอน ทำให้ไอเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูง โดยกระบวนการนี้เรียกว่า above-threshold ionization (ATI) [20]

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.britannica.com/biography/Arthur-Ashkin>
- [2] <https://www.britannica.com/biography/Gerard-Mourou>
- [3] <https://www.britannica.com/biography/Donna-Strickland>
- [4] <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.1.20181002a/full/>
- [5] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/popular-information/>
- [6] P. N. Lebedev, "Experimental examination of light pressure", Annalen de Physik, 6, 433 (1901).
- [7] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby", Nature, 187, 493 (1960).
- [8] A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", Physical Review Letters, 24, 156 (1970).
- [9] A. Ashkin, "Atomic-beam deflection by resonance-radiation pressure", Physical Review Letters, 25, 1321 (1970).
- [10] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, "Optical levitation by radiation pressure", Applied Physics Letters, 19, 283 (1971).
- [11] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, "Stability of optical levitation by radiation pressure. Applied Physics Letters, 24, 586 (1974).
- [12] C. Bustamante, Z. Bryant, and S. B. Smith, "Ten years of tension: Single-molecule DNA mechanics", Nature, 421(6921), 423 (2003).

- [13] M. D. Wang, H. Yin, R. Landick, J. Gelles and S. M. Block, "Stretching DNA with optical tweezers", *Biophysical Journal*, 72(3), 1335 (1997).
- [14] C. H. Townes, *Quantum Electronics: A Symposium*, Columbia University Press, New York (1960).
- [15] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/advanced-information/>
- [16] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses", *Optics Communications*, 56(3), 219–221 (1985).
- [17] B. Nikolaus and D. Grischkowsky, "12× pulse compression using optical fibers", *Applied Physics Letters*, 42(1), 1–2 (1983).
- [18] W. J. Tomlinson, "Curious features of nonlinear pulse propagation in single-mode optical fibers", *Optics News*, 15(1), 7 (1989).
- [19] W. Sekundo, K. S. Kunert and M. Blum, "Small incision corneal refractive surgery using the small incision lenticule extraction (SMILE) procedure for the correction of myopia and myopic astigmatism: Results of a 6-month prospective study", *British Journal of Ophthalmology*, 95(3), 335 (2011).
- [20] K. J. Schafer, B. Yang, L. F. Dimauro and K. C. Kulander, "Above threshold ionization beyond the high harmonic cutoff", *Physical Review Letters*, 70, 1599 (1993).